

Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2020

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe, Teil 1

Harald Horn, Thomas Kolb, Dimosthenis Trimis und Josef Klinger

Forschung und Lehre, Tätigkeitsbericht, Ausbildung, Weiterbildung

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

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

Zur Geschichte und zum Umfeld

Das Engler-Bunte-Institut am Karlsruher Institut für Technologie ist hervorgegangen aus der 1907 gegründeten „Lehr- und Versuchsgasanstalt“ und führt seit 1971 den Namen „Engler-Bunte-Institut“. Die enge Verbindung zu praxisrelevanten Fragestellungen des Gas- und Wasserfaches äußert sich darin, dass die jeweiligen Teilinstitutsleiter, gegenwärtig „Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie“, „Verbrennungstechnik“ und „Wasserchemie

und Wassertechnologie“, auch in Personalunion Leiter der entsprechenden Bereiche der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT sind.

Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist nach dem Zusammenschluss des Forschungszentrums Karlsruhe und der Universität Karlsruhe im Jahre 2009 inzwischen eine feste Größe in der internationalen Forschungslandschaft. Dies gelingt mit dem hohen Anspruch, sich selbst als die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Ge-

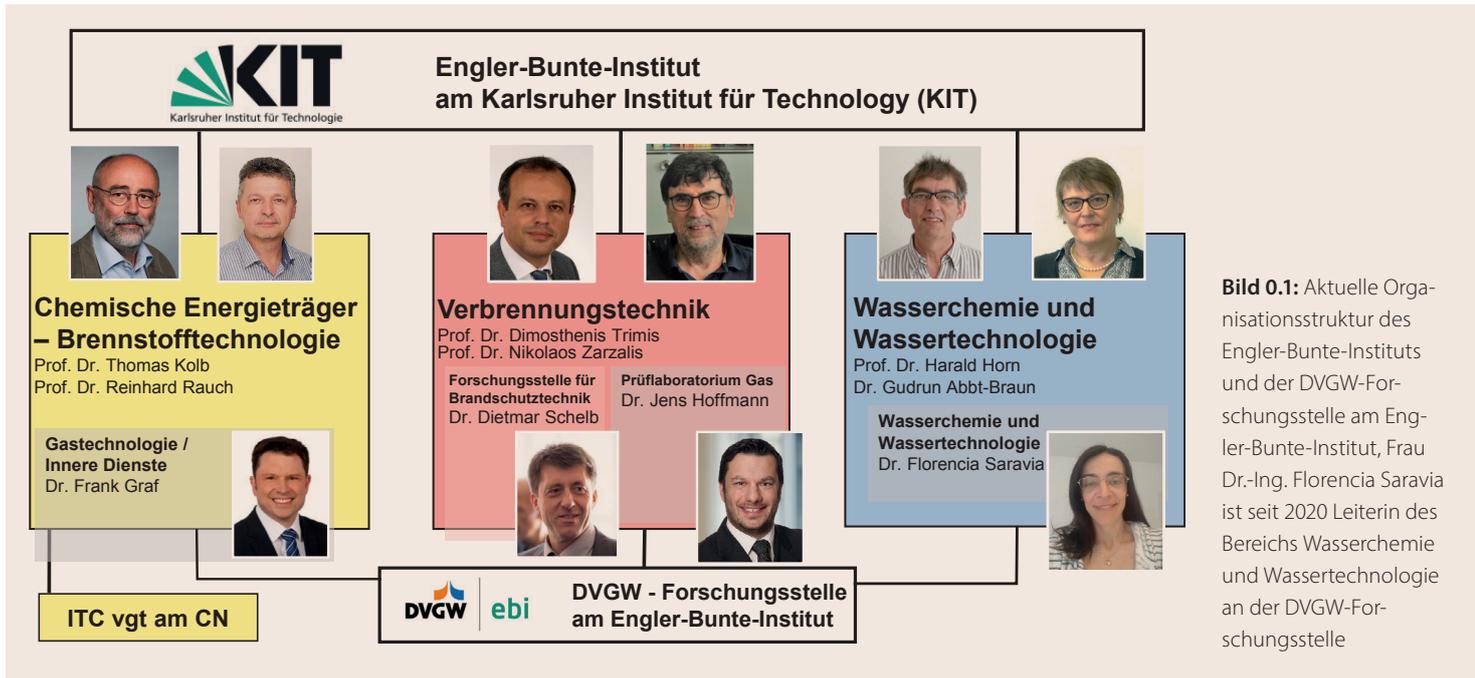


Bild 0.1: Aktuelle Organisationsstruktur des Engler-Bunte-Instituts und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Frau Dr.-Ing. Florencia Saravia ist seit 2020 Leiterin des Bereichs Wasserchemie und Wassertechnologie an der DVGW-Forschungsstelle

meinschaft zu definieren. Im KIT wird seit dem Jahre 2015 ein übergeordneter Strategieprozess (Dachstrategie KIT 2025) umgesetzt, der als Konsequenz des zuvor erarbeiteten Leitbilds des KIT angesehen werden kann. Das KIT hat sich 2015 zum Ziel gesetzt, maßgeblich Beiträge zu den Feldern Energie, Mobilität und Information zu leisten. 2019 konnte das KIT im Rahmen der Exzellenzstrategie von Bund und Ländern mit dem Leitmotiv „Living the Change“ in den Kreis der Exzellenzuniversitäten in Deutschland zurückkehren.

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

Das Engler-Bunte-Institut am KIT zusammen mit der angeschlossenen DVGW-Forschungsstelle trägt seit Jah-

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

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

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





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

zur *nanostrukturalen Analyse von Rußpartikeln*) von Prof. Henning Bockhorn betreut wurde.

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

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

Das Aufkommen von Forschungsprojekten aus dem Gas- und Verbrennungsfach sowie dem Wasserfach ist nach wie vor sehr hoch. Die Mittel kommen dabei vom Land BW (Ministerien, BW-Stiftung), dem Bund (DFG, BMBF, BMWi, DBU, HGF) und der Europäischen Union. Die einzelnen Forschungsprojekte werden in den Berichten der

Teilinstitute detaillierter dargestellt. Die aus der Praxis entstehenden Fragestellungen werden vor allem in der DVGW-Forschungsstelle, der Abteilung Gastechologie, dem Prüflaboratorium Gas und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bearbeitet.

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

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

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

Lehre und Ausbildung

Im Grunde genommen stand die Lehre am Engler-Bunte-Institut das ganze Jahr 2020 unter dem Eindruck der Corona-Pandemie. Während die Lehre des WS 19/20 noch bis Anfang März in Präsenz angeboten wurde, waren dann Vorlesungen und Seminare ab SS 2020 als online Veranstaltungen für die Studierenden verfügbar. Einschränkungen gab es bei den großen Praktika, bei denen die Studierenden die Versuche als Video angeboten bekommen haben und dann auf der Basis von „Versuchsergebnissen“ ihre Protokolle schreiben mussten. Nur ein Teil der Prakti-

ka konnte im Sommer 2020 in Präsenz durchgeführt werden. Erfreulich war, dass wir die Durchführung von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten nahezu uneingeschränkt realisieren konnten, da der Zugang zu den Laboratorien nicht eingeschränkt war, solange die Abstandsregeln und die weiteren Schutzmaßnahmen (wie das Tragen von Masken) eingehalten wurden.

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

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

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

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

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

Thomas Kolb, Reinhard Rauch, Siegfried Bajohr, Frank Graf

1.1 Lehre und Forschung

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

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

Die grundlagenorientierten F&E-Arbeiten von EBI ceb werden ergänzt durch die Arbeiten zur Flugstrom-Vergasung der Abteilung Vergasungstechnologie, ITC vgt, am Institut für Technische Chemie, Campus Nord. Durch die enge Verbindung zwischen EBI ceb und ITC vgt werden die anwendungsnahe Forschungseinrichtungen des Campus Nord auch für die Ausbildung der Studierenden verstärkt genutzt.

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

die Bearbeitung von Forschungsthemen von den Grundlagen bis zur technischen Anwendung.

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

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

Die Vorlesung „Organisch-chemische Prozesskunde“ im Bachelor-Studiengang sowie diverse Praktika und Exkursionen für die Studienrichtungen Verfahrenstechnik

und Chemieingenieurwesen ergänzen das Lehrangebot des EBI ceb. In Kooperation mit EBI vbt ist EBI ceb verantwortlich für die Vorlesung „Energieverfahrenstechnik“ und das Profilmfach „Energie- und Umwelttechnik“ für den Bachelor-Studiengang.

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

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

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

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

1.2 Große Projekte zur Energiewende

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

1. **BMWi-Leitprojekt „MethQuest“:** Im Sommer 2018 wurde das Leitprojekt gestartet. Dieses besteht aus sechs Verbundprojekten mit einem Gesamtbudget von 32 Mio. € und beschäftigt sich mit der Erzeugung von EE-Methan über PtG-Verfahren und mit der Nutzung in stationären und mobilen Anwendungen. 2020 wurden u.a. erfolgreich Versuche an der 3-Phasen-Methanisierungsanlage am Energy-Lab 2.0 durchgeführt.
2. **Horizon 2020 Projekt „STORE&GO“:** Nach Auswertung der Betriebsphasen der drei PtG-Demonstrationsanlagen an den Standorten Falkenhagen (D), Troia (I) und Solothurn (CH) und Finalisierung der begleitenden Forschungsaktivitäten wurde das Projekt 2020 erfolgreich abgeschlossen.
3. **ENSURE II (BMBF):** Das Kopernikus-Projekt „ENSURE“ zu neuen Netzstrukturen wird fortgeführt. DVGW gt ist für die Sektorenkopplung mit Gas zuständig.
4. **Roadmap Gas 2050 (DVGW):** Im Rahmen des Verbundprojektes werden die Rolle von Gas bei der Energiewende mit Hilfe von technologischen und systemischen Untersuchungen analysiert und Lösungswege aufgezeigt. 2020 wurde u.a. analysiert wie EE-Gase in der MENA-Region erzeugt und nach Deutschland transportiert werden können.
5. **reFuels – Kraftstoffe neu denken:** Im Demonstrationsprojekt „reFuels“ geht es um die Herstellung und Anwendung von regenerativen Kraftstoffen, wobei der Fokus auf Benzin aus Biomasse und Diesel aus CO₂ liegt.

1.3 Im Jahr 2020 abgeschlossene wissenschaftliche Arbeiten

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

Tabelle 1.1: Ereignisse 2020

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

- Daniel Böhm „Bestimmung der Vergasungskinetik biogener Festbrennstoffe mit H₂O im Einzelpartikelreaktor bei erhöhtem Druck“, Prof. Kolb
- Daniel Conrad „Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von biogenem Pyrolyseöl in inerte Atmosphäre“, Prof. Kolb
- Deborah Fröhlich „Einsatz einer optischen Nadelsonde zur räumlich aufgelösten Messung der lokalen Hydrodynamik in Blasensäulen“, Prof. Kolb
- Yannick Gahler „Experimente und Modellierung zur Kinetik der Dreiphasen-Methanolsynthese“, Prof. Kolb
- Kevin Loran „Untersuchungen zur ortsaufgelösten Messung der Brennstoffverteilung im Flugstromvergaser über Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)“, Prof. Kolb
- Moritz Poßmann „Untersuchungen zur Sekundärpyrolyse von biogenem Pyrolyseöl in einem Hochtemperatur-Fallreaktor“, Prof. Kolb
- Felix Rinkewitz „Räumlich aufgelöste Messung der Hydrodynamik in Blasensäulen mittels optischer Nadelsonde“, Prof. Kolb
- Igor Scherbej „Untersuchung des dynamischen Betriebsverhaltens eines katalytischen Reaktors zur Dreiphasen-Methanisierung“, Prof. Kolb
- Josua Bauer „Ausarbeitung und Validierung einer katalytischen Route für das Upgrading einer biogenen Schwerbenzinfraction“, Prof. Rauch
- Xhesika Korovesi „Integration of Refineries into the Energy Transformation Process: Production of Gasoline-Components from Synthesis Gas and its Integration in Existing Refinery-Processes on the Example of MiRO“, Prof. Rauch
- Marius Müller „Untersuchung zur Massenstromskalierung gasgestützter Düsen“, Prof. Kolb
- Wiebke Asbahr „Experimentelle Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Katalysatoren hinsichtlich Aktivität und Produkteigenschaften bei Hydroprocessing von Fischer-Tropsch-Wachsen“, Prof. Rauch
- Denis Wiegand „Wirtschaftlichkeitsanalyse einer Wirbelschichtvergasungsanlage betrieben mit Biomasse“, Prof. Rauch
- Henning Rädle „Methodische Untersuchung Petrochemisch relevanter Parameter von Bioliq® Kraftstoff mittels FT-IR-Spektroskopie“, Prof. Rauch

1.4 Laufende wissenschaftliche Arbeiten

1.4.1 Arbeitsgruppe „Thermo-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung“

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

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

Kinetik der Feststoffvergasung

Beim Flugstromvergasungsprozess mit einem Suspensionsbrennstoff als Einsatzstoff wird der Brennstoff zunächst zerstäubt und verdampft. Anschließend durchläuft der trockene Koks eine Sekundärpyrolyse unter hohen Temperaturen und Aufheizraten. Der vorliegende Sekundärkoks reagiert nun heterogen mit CO₂ und H₂O. Diese Reaktionen sind der geschwindigkeitsbestimmende Schritt des Vergasungsprozesses. Für die Ermittlung dieser Vergasungskinetik muss zunächst ein Pyrolysekoks unter prozessnahen Bedingungen, d. h. hohen Temperaturen und Aufheizraten, erzeugt werden. Die Herstellung dieses Modellbrennstoffes kann am EBI ceb in einem atmosphärischen Hochtemperatur-Fallrohrreaktor durchgeführt werden, der sowohl für die Erzeugung des Pyrolysekokes unter inerten Bedingungen, als auch für die Untersuchung der Koks kinetik bei sehr schnellen Aufheizraten (104 K/s) verwendet werden kann.

Zur Untersuchung des Einflusses der Pyrolysebedingungen auf die Sekundärkoks-Eigenschaften (Morpholo-

Die folgenden Studierenden haben am EBI ceb ihre Bachelorarbeit abgeschlossen:

- Marius Birg „Inbetriebnahme einer Laboranlage zur Untersuchung der Hydrodynamik in Packungskolonnen“, Prof. Kolb
- Max Christeinicke „Messung von Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten zur atmosphärischen Charakterisierung von Brennerdüsen für Flugstromvergaser“, Prof. Kolb
- Martin Daescu „Experimentelle Untersuchungen zur Hydrodynamik von viskosen Flüssigkeiten in Packungskolonnen“, Prof. Kolb
- Fabian Eckert „Auslegung und Aufbau einer Kolonne zur Vorsättigung von Gasströmen in Packungskolonnen“, Prof. Kolb
- Jannis Götz „Experimentelle Untersuchung einer 3-flutigen Zerstäuberdüse“, Prof. Kolb
- Tim Kurtz „Experimentelle Untersuchungen an einer Laboranlage zum Stofftransport von CO₂ in Wasser in Packungskolonnen“, Prof. Kolb

gie, Graphitisierung, Aschedispersion) wurden Pyrolyseexperimente in Fallrohrreaktor zwischen 1000 °C und 1600 °C bei einer konstanten Verweilzeit von 200 ms durchgeführt. Die anschließenden Brennstoffcharakterisierungen wurden im Rahmen der Masterarbeit von Frau Stella Walker in Kooperation mit der Technischen Universität Luleå (LTU, Schweden) durchgeführt. **Bild 1.1** zeigt die Entwicklung von CaO Dispersion D_{CaO} , Graphitisierung ($L_a/L_{a,0}$) und initialer Umsatzrate R_0 (Vergasung mit CO_2 bei 750 °C in TGA) als Funktion der Pyrolysetemperatur T_{Pyr} [1].

Zwischen 1000 °C und 1400 °C ist eine lineare Abnahme der initialen Umsatzrate zu beobachten. Gleichmaßen sinkt die Aschedispersion bis 1400 °C. Bei 1600 °C steigen sowohl Umsatzrate als auch Aschedispersion steil an. Die Graphitisierung steigt stetig bis zu einer Pyrolysetemperatur von 1600 °C. Die Ursache für den starken An-

stieg der Reaktivität bei 1600 °C konnte durch mikroskopische Aufnahmen der Koksoberfläche (REM/TEM) aufgeklärt werden. Die Aufnahmen weisen auf die Bildung eines CaO Films bei 1600 °C hin, der die Vergasungsreaktion mit CO_2 selektiv katalysiert und somit die Reaktivität des Sekundärkokes erhöht. Zudem konnte mittels Physisorption ein starker Abfall der Mikroporenoberfläche zwischen 1400 °C und 1600 °C beobachtet werden, der durch die Bildung des CaO Films und damit einer Blockierung der Poren einhergeht.

Um die Auswirkungen der Kokeigenschaften auf die Heterogenreaktionskinetik zu untersuchen, wurden die bei 1400 °C (P1400) und 1600 °C (P1600) hergestellten Koksfraktionen im Hochdruck-Einzelpartikelreaktor mit CO_2 , H_2O und in Mischungen aus CO_2/H_2O umgesetzt. Inbetriebnahme und Durchführung von Experimenten mit CO_2 wurden im Rahmen der Masterarbeit von Herrn

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

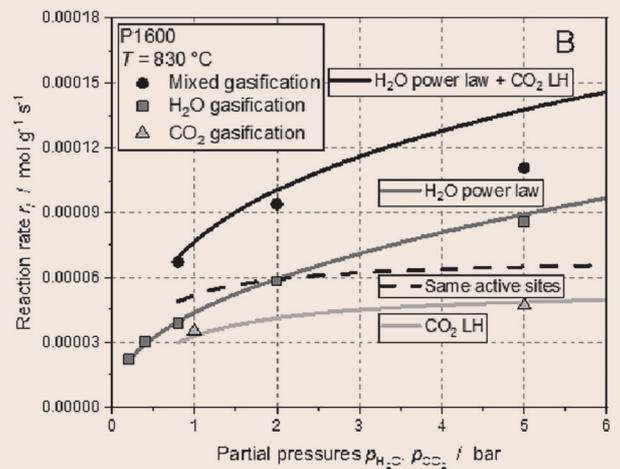
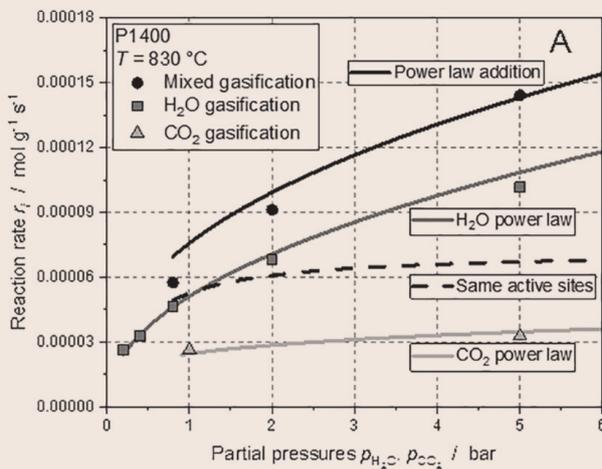
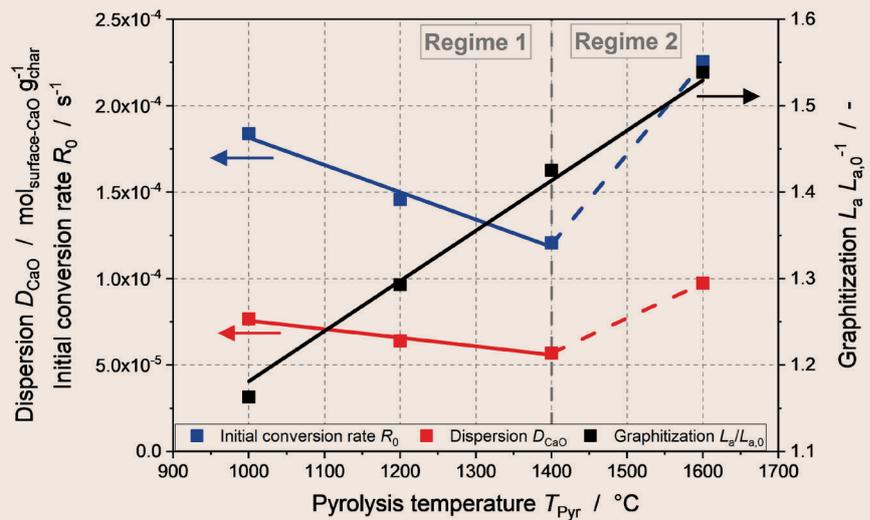


Bild 1.2 li,re: Modellierung der Vergasungskinetik zweier Biomassekoke (P1400 und P1600) mit CO_2 , H_2O und Mischungen aus CO_2/H_2O [2]

Michael Zeller im Jahr 2019 durchgeführt. Eine Fortführung der Arbeiten einschließlich der Experimente in H_2O und Mischungen aus CO_2/H_2O fand im Rahmen der Masterarbeit von Herrn Daniel Böhm im Jahr 2020 statt. **Bild 1.2** zeigt die Reaktionsgeschwindigkeiten beider Sekundärkokse P1400 und P1600 für die verschiedenen Gasatmosphären. Die aus den Experimenten gewonnenen Daten wurden über zwei verschiedene reaktionskinetische Ansätze (Potenzansatz und Langmuir-Hinshelwood-Ansatz) modelliert. Die Vergasungsexperimente in Mischungen aus CO_2/H_2O wurden mittels einer Addition der Kinetik für die Einzelatmosphären modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Messwerte der CO_2/H_2O Vergasung mit P1400 im gesamten Druckbereich mithilfe der Addition der Kinetik der Einzelatmosphären zufriedenstellend beschrieben werden können. Somit herrscht keine Konkurrenz zwischen CO_2 und H_2O um aktive Zentren auf der Koks Oberfläche. Für die Vergasung von P1600 liefert dieser Ansatz nur im niedrigen Druckbereich eine gute Abbildung der Messwerte. Für höhere Partialdrücke der Eduktgase ist eine Sättigung festzustellen, die auf die deutlich kleinere spezifische Oberfläche und der stärkeren Graphitisierung der Probe P1600 im Vergleich zu P1400 zurückzuführen ist. Die beiden Eduktgase konkurrieren somit um die vergleichsweise niedrigere Anzahl aktiver Zentren, wodurch ein inhibierender Effekt beobachtet werden kann.

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

Literatur

- [1] Schneider, C.; Walker, S.; Phounglamcheik, A.; Umeki, K.; Kolb, T. (2021): Effect of calcium dispersion and graphitization during high-temperature pyrolysis of beech wood char on the gasification rate with CO_2 . *Fuel* 283(3), 118826. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118826.

- [2] Schneider, C.; Zeller, M.; Böhm, D.; Kolb, T. (2021): Influence of pressure on the gasification kinetics of two high-temperature beech wood chars with CO_2 , H_2O and its mixture. accepted in *Fuel*. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120523.

Thermo-chemische Umsetzung von biogenem Pyrolyseöl

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

Um die Prozesse in der flüssigen Phase in einer modelltechnischen Beschreibung abbilden zu können, werden experimentelle Untersuchungen zum Umsatzverhalten von biogenem Pyrolyseöl in einem Hochtemperatur-Fallrohr unter inerter Atmosphäre durchgeführt. Der technische Brennstoff wird in einer monodispersen Tropfenkette zusammen mit dem Trägergasstrom aus Stickstoff in das Reaktionsrohr eingeleitet und bei einer Gas Temperatur von 1000 °C und einer Verweilzeit von 600 ms umgesetzt. Der nicht umgesetzte Brennstoff wird als fester Rückstand am Ende des Reaktionsrohrs aufgefangen. Dabei handelt es sich um feste, kugelförmige Hohlkörper, sogenannte Cenosphären. Diese entstehen, wenn schwersiedende Bestandteile des Pyrolyseöls bei höheren Temperaturen in der flüssigen Phase reagieren und langkettige Moleküle bilden. **Bild 1.3** zeigt REM-Aufnahmen dieser Cenosphären. Die Größe dieser Cenosphären liegt dabei bei einem Faktor 0,5 und 2 der ursprünglichen Tropfengröße.

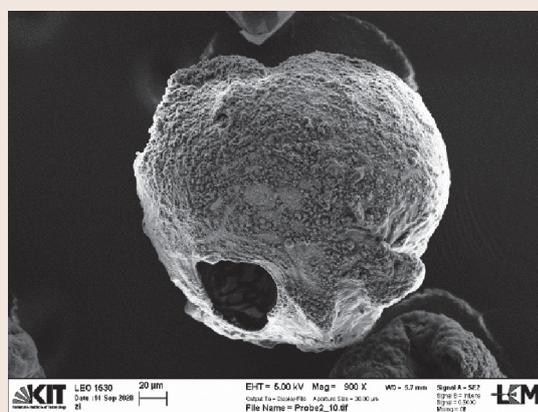
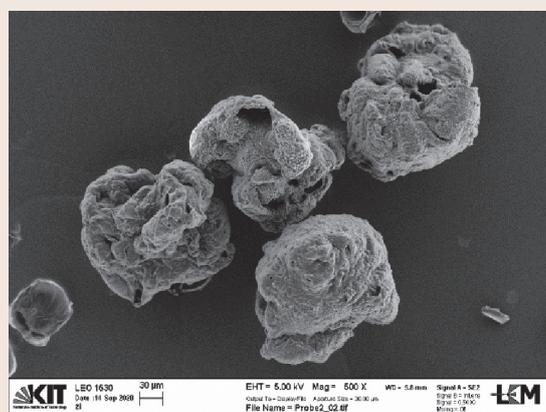


Bild 1.3 li, re: REM-Aufnahmen von Feststoffrückstand (Cenosphären) bei der Umsetzung von Pyrolyseöltropfen mit einem Durchmesser d_0 von $363\text{ }\mu\text{m}$ in inerter Stickstoffatmosphäre bei 1000 °C und 600 ms Verweilzeit

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

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

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

1.4.2 Arbeitsgruppe „Katalytisch-chemische Verfahren der Brennstoffwandlung“

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

Methanisierung im Dreiphasen-Reaktor

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

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

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

In einer der im Jahr 2020 durchgeführten Messkampagnen wurden für das vom BMWi geförderte Projekt „Zellenübergreifende Regionalisierung der Energieversorgung durch betriebsoptimierte Sektorenkopplung – RegEnZell“ experimentelle Daten zum stationären und dynamischen Betriebsverhalten des 3PM-Reaktors bestimmt. In Kooperation mit dem KIT Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH) wurde hierzu ein Lastprofil gewählt, welches typischen Tagesmustern im Stromnetz entspricht. **Bild 1.5** zeigt einen Ausschnitt der im Realbetrieb dosierten Wasserstoff- und Kohlenstoffdioxidströme, die Reaktortemperatur und die heizwertbezogene Methan-Produktionsleistung aus einer einwöchigen Versuchskampagne. Ziel der Messreihe war, die Lastprofile im Stromnetz maßstabsbezogen, direkt an die Synthese gekoppelt und ohne ansonsten nötige Zwischenspeicher in den speicherbaren chemischen Energieträger Methan umzuwandeln. In den Versuchen zeigte sich, dass selbst Lastsprünge von 100 % in weniger als einer Minute gefahrlos und mit einer maximalen Temperaturänderung im Reaktor von 10 K durchgeführt werden können.

Im Rahmen des BMWi-Projektes „MethQuest - Erzeugung und Einsatz von Methan aus erneuerbaren Quellen in mobilen und stationären Anwendungen“ konnte die 3PM-Anlage weiter ertüchtigt werden. Begleitende Laboruntersuchungen und Modellrechnungen am EBI ceb wurden durch insgesamt drei Wochen Versuchskampagne an der 3PM ergänzt. Da in diesem Projekt auch die Verschaltung mit einer überlastfähigen PEM-Elektrolyse untersucht werden sollte, wurde die für 100 kW Methan-



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

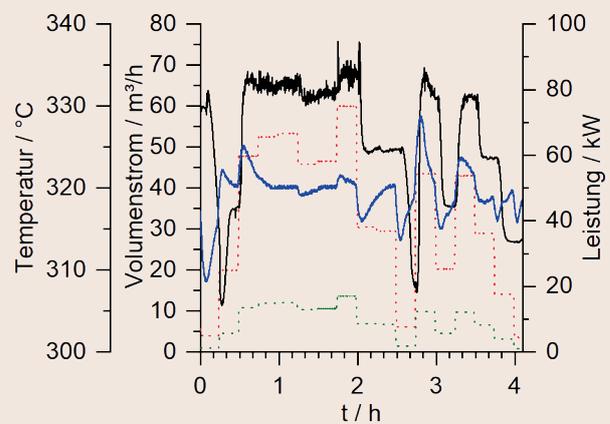


Bild 1.5: In blau: Reaktortemperatur, Edukt-Volumenströme gestrichelt in Grün: (H_2) und in Rot: (CO_2), in Schwarz: heizwertbezogene Methan-Produktionsleistung

leistung ausgelegte Anlage im Rahmen einer Versuchskampagne für mehrere Stunden mit 200 % Auslegungslast betrieben. Auch unter diesen extremen Bedingungen bewährte sich die Dreiphasen-Methanisierung und es kam lediglich zu geringen Einbußen an erzielbarer Gasqualität und Umsatz.

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

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

Methanolsynthese

Neben den zuvor vorgestellten Arbeiten zur Dreiphasen-Methanisierung wurde in 2020 auch die Methanolsynthese im Dreiphasenreaktor am EBI ceb weiter untersucht. Durch Verlagerung der Reaktion und der damit verbundenen Wärmefreisetzung in die flüssige Phase ist die Dreiphasen-Methanolsynthese bezüglich der Wärmeabfuhr

vom Katalysator und aus dem Reaktor sowie der Lastwechselfähigkeit gegenüber etablierten Festbettverfahren im Vorteil. Dies konnte bereits in dem im Jahr 2019 abgeschlossenen BMBF-Verbundprojekt „OptiMeOH“ nachgewiesen werden. Bei der Untersuchung der Reaktionskinetik der Dreiphasen-Methanolsynthese wurde jedoch festgestellt, dass eine starke Wechselwirkung zwischen Katalysatoraktivität, Produktzusammensetzung und der Menge an eingesetztem Wärmeträgerfluid, welche durch Verdunstung im Laufe der Versuche leicht abnimmt, den Verlauf der Reaktion beeinflusst. Vor allem bei längeren und daher großtechnisch relevanten Versuchszeiten von mehreren Wochen, sowie beim Einsatz von CO_2 als Kohlenstoffquelle im Eduktgas, tritt diese Wechselwirkung in Form einer starken Abnahme der Menge an gebildetem Methanol als Funktion der Versuchszeit auf. Die systematische Untersuchung und Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Katalysatoraktivität, Produktzusammensetzung, CO_2 -Anteil im Eduktgas, sowie der Menge an eingesetztem Wärmeträgerfluid wurden im Jahr 2020 weiter fortgesetzt. Erste Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Menge an eingesetztem Wärmeträgerfluid einen untergeordneten Einfluss auf das Reaktionsgeschehen ausübt, da die Ausbeute an produziertem Methanol während einer Versuchszeit von 312 h nahezu Null erreichte, in der gleichen Zeit jedoch weniger als 7 % Wärmeträgerfluid ausgetragen wurden. Der Fokus der Experimente liegt daher nun auf der Quantifizierung der chemischen Wechselwirkung sowohl zwischen Katalysator und Wärmeträgerfluid, als auch zwischen Katalysatoraktivität und CO_2 -Anteil im Eduktgas.

Neben den Forschungen zur Dreiphasen-Methanolsynthese am EBI besteht eine Kooperation mit dem

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg in Form einer gemeinsam betreuten Promotionsarbeit zur Verfahrensentwicklung einer dynamisch betriebbaren Methanolsynthese im Festbettreaktor. Anhand einer örtlich aufgelösten Temperaturmessung in einer Technikums-Methanolsynthese-Apparatur wurde auch hier eine Verringerung der örtlichen Katalysatoraktivität über längere Versuchszeiträume von einigen Wochen bei erhöhtem CO₂-Anteil im Eduktgas beobachtet, die als Folge das Temperaturprofil im Reaktor signifikant ändert.

Aufgrund der nachgewiesenen Wechselwirkungen zwischen CO₂-reichem Synthesegas und Katalysatoraktivität in der Zwei- sowie Dreiphasen-Methanolsynthese wird in 2021 am EBI ein Zweiphasen-Zapfstellenreaktor aufgebaut, der neben orts aufgelöster Temperaturmessung auch eine orts aufgelöste Konzentrationsmessung im Reaktor erlaubt. Durch Kombination von orts aufgelöster Temperaturmessung und bzw. Edukt- und Produktkonzentrationen können lokal ablaufende Reaktionen mit Temperaturspitzen und Ad- und Desorptionsvorgängen identifiziert werden, welche die Aktivitätsänderung des Katalysators begründen und durch konventionelle, integrale Messungen nicht nachgewiesen werden können.

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

1.4.3 Arbeitsgruppe „Physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung“

Frank Graf, Friedemann Mörs, Tobias Stegmaier

Brennstoffe müssen für die meisten technischen Anwendungen strenge Anforderungen bezüglich Reinheit und Zusammensetzung einhalten. Hierzu sind entsprechend energieeffiziente Prozessstufen nötig, die vor allem den Reinigungs- und Regenerationsaufwand minimieren. Teilweise kann die Brennstoffaufbereitung auch in den eigentlichen Erzeugungs- oder Umwandlungsprozess integriert werden und so eine vorteilhafte Kombination aus Erzeugung/Umwandlung und Aufbereitung ermöglichen. Derzeit werden in der Arbeitsgruppe insbesondere neuartige Konzepte zur Bereitstellung von gasförmigen Brennstoffen aus erneuerbaren Quellen wie Biomethan erforscht und auf ihre Eignung zur Prozessoptimierung etablierter Verfahren oder zur Entwicklung neuer Verfahren hin bewertet. Einen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten stellt die Bereitstellung von CO₂ aus unterschiedlichen Quellen für PtX-Prozesse dar. Außerdem werden grundlegende Untersuchungen zu Hydrodynamik und Stoffübergang in Dreiphasen-Systemen wie Füllkörperkolonnen oder Blasensäulenreaktoren durchgeführt.

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

In der thermischen Verfahrenstechnik sind Packungskolonnen gängige Apparate zur Intensivierung des Stofftransports in Gas/Flüssigkeits-Systemen, z. B. bei der Absorption. Dabei wird die Packungskolonne in der Regel im Gegenstrom betrieben, wobei das Feedgas im Sumpf der Kolonne eingeführt wird, während die Absorptionsflüssigkeit am Kolonnenkopf über die Packung verteilt wird. Die Flüssigkeit fließt anschließend in Form von Rieselströmen oder in Gestalt von Tropfen gravitationsbedingt durch die Packung herab. Dabei wird sie mit dem aufsteigenden Gasstrom in Kontakt gebracht, wodurch eine Komponente des Feedgases, wie beispielsweise CO₂, selektiv in die Waschflüssigkeit absorbiert. Die Packung sorgt hierbei für eine gleichmäßige Verteilung der Flüssigphase und eine größere effektive Stoffaustauschfläche zwischen Gas und Flüssigkeit, wodurch der Stofftransport bei minimalem Druckverlust verbessert werden kann.

Am Engler-Bunte-Institut wird seit mehreren Jahren ein neuartiges Absorptionsverfahren zur Abtrennung von CO₂ aus unterschiedlichen Gasgemischen entwickelt, welches den Einsatz von chemisch-funktionalisierten ionischen Waschflüssigkeiten (IL) in einem innovativen Aufbereitungskonzept vorsieht. Aufgrund des vernachlässigbaren Dampfdrucks der IL ermöglicht dieses Verfahren gegenüber herkömmlichen Gaswäschen signifikante Energieeinsparungen. Die im Vergleich zu Wasser hohe Viskosität und niedrige Oberflächenspannung von ILs führen jedoch zu Stofftransportlimitierungen bei der Absorption von CO₂. Der Stofftransport zwischen Gas und Flüssigkeit innerhalb der Kolonne ist hierbei hauptsächlich von den vorliegenden Phasenanteilen der Flüssigphase (Film, Rinnsale, Tropfen) und der sich ausbildenden Phasengrenzfläche abhängig. In der Literatur finden sich jedoch hauptsächlich Korrelationen, die Wasser als Modellmedium verwenden (z. B. Billet & Schultes¹ oder Mackowiak²). Diese sind somit aufgrund der sich stark unterscheidenden Stoffeigenschaften nicht für ILs zulässig. Um die Hydrodynamik und den Stofftransport mit IL bei der Absorption von CO₂ in ausreichender Güte modellieren zu können, sind somit weitere experimentelle Untersuchungen mit höherviskosen Modellmedien notwendig.

Hierfür werden am EBI ceb im Rahmen des 2018 gestarteten BMWi-Leitprojektes „MethQuest“ an einer Versuchsapparatur im Technikumsmaßstab (siehe **Bild 1.6 links**) experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um den Stofftransport bei der Absorption von CO₂ mit IL in

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

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

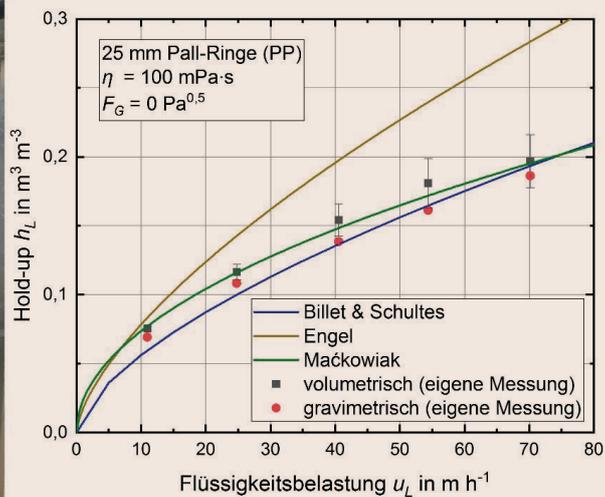


Bild 1.6 li: Die DN250 Absorptionskolonne zur Bestimmung der Hydrodynamik und des Stoffübergangs in Packungs- und Füllkörperkolonnen im Testbetrieb mit Wasser

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

ausreichender Güte modellieren zu können. Dadurch soll ein allgemein gültiges Stofftransportmodell für viskose Flüssigkeiten in Packungskolonnen erstellt und validiert werden, um eine optimale Auslegung bei der Gasaufbereitung mit IL zu ermöglichen. Die Anlage wurde gemäß den Vorgaben VDI-Richtlinie 2761 „Thermische Trennverfahren in der Verfahrenstechnik; Messung und Auswertung von Fluidodynamik und Stofftransport in gepackten Kolonnen“ ausgelegt. An der Anlage kann der Flüssigkeitsinhalt der Packung (engl. Hold-Up) in Abhängigkeit von den eintretenden Masseströmen sowohl gravimetrisch als auch volumetrisch gemessen werden. Außerdem kann über eine Messung der Gaszusammensetzung am Ein- und Auslass der Kolonne der volumetrische Stoffübergangskoeffizient $k_{La,eff}$ bestimmt werden.

Zur Validierung der Anlage wurden Stofftransportmessungen mit dem Stoffsystem $\text{CO}_2/\text{Luft-Wasser}$ durchgeführt. Die Untersuchung über den Einfluss der Flüssigkeitsbelastung ergab, dass der flüssigseitige volumetrische Stoffübergangskoeffizient $k_{La,eff}$ mit zunehmender Flüssigkeitsbelastung von $0,007 \text{ s}^{-1}$ bei $u_L = 25 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ auf $0,027 \text{ s}^{-1}$ bei $u_L = 97 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ zunehmen. Dieser Trend deckt sich mit der Korrelation von Billet und Schultes.

Zur Untersuchung des Einflusses der Packungshöhe auf den flüssigseitigen volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten wurde die Packungshöhe zwischen 1,00 m und 0,45 m variiert. Die Untersuchung zeigte, dass $k_{La,eff}$ mit abnehmender Packungshöhe zunimmt. Mit abnehmender Packungshöhe wurde ein annähernd linear zunehmender flüssigseitiger volumetrischer Stoffübergangskoeffizient festgestellt. Damit wurde gezeigt, dass die Überschätzung des Stoffübergangskoeffizienten mit abnehmender Packungshöhe zunimmt. Die Überschätz-

zung ist auf den Einfluss von externen Endeffekten zurückzuführen. Externe Endeffekte beschreiben den Stoffübergang ober- und unterhalb der Packung im Inneren der Kolonne. Um dies quantifizieren zu können, werden Probeentnahmestellen innerhalb der Packung installiert, so dass die Gaszusammensetzung in verschiedenen Höhen der Packung gemessen werden kann.

Des Weiteren wurde der Einfluss der Viskosität auf den Hold-Up in Packungskolonnen untersucht. Die untersuchten Viskositäten der Flüssigkeiten befanden sich im Bereich von $25 \text{ mPa}\cdot\text{s} < \eta < 100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Die experimentellen Untersuchungen des Hold-Ups wurden für eine Schüttung aus 25 mm Pall-Ringen (PP) und einer strukturierten Packung Mellapak 250 Y durchgeführt. Zusammenfassend konnte die Aussage getroffen werden, dass auch für höher viskose Flüssigkeiten das Modell nach Billet & Schultes¹ den Hold-Up gut beschreibt (vergleiche **Bild 1.6 rechts**). Die großen Abweichungen bei Stoffübergangskorrelationen für viskose Flüssigkeiten können somit nur zu geringem Teil auf eine falsche Abschätzung des Hold-Up zurückgeführt werden. Es lässt sich eher vermuten, dass die lokale Flüssigkeitsverteilung und die entsprechend entstehende lokale effektive Oberfläche unzureichend beschrieben werden. Dies kann nur durch lokale Stoffübergangsmessungen in den Packungen oder optischen Messmethoden genauer untersucht werden.

Hydrodynamik und Stofftransport in Blasensäulenreaktoren

In (Suspensions-)Blasensäulenreaktoren wird das gasförmige Edukt in eine Flüssigkeit bzw. Suspension dispergiert. In Form von Blasen steigt die Gasphase durch die

Flüssigkeit/Suspension auf. Die zunächst in Ruhe befindliche Suspension/Flüssigphase wird durch die aufsteigende Blasenströmung beschleunigt. Dies führt zu einer Zirkulation und Durchmischung der Flüssigphase. Diese Zirkulation beeinflusst wiederum die Blasenbewegung und somit die Verweilzeit der Gasphase im Reaktor. Durch den hohen Anteil an Flüssigkeit im Reaktor zeichnet sich der Blasensäulenreaktor durch seine sehr guten Wärmetransporteigenschaften aus. Zum einen besteht ein effektiver Wärmetransport zwischen den im Blasensäulenreaktor vorliegenden Phasen (Gasphase, Flüssigkeit und Katalysatorpartikel), was lokale Hotspots bei stark exothermen Reaktionen verhindert. Zum anderen kann freigesetzte Reaktionswärme sehr gut über die Reaktorwände bzw. Kühlrohre abgeführt werden. Dadurch ist auch bei einer lastflexiblen Fahrweise mit schnellen Lastwechselraten ein nahezu isothermer Betrieb des Reaktors gewährleistet. Hierdurch werden eine hohe Katalysatorausnutzung und eine gleichbleibend hohe Produktselektivität erzielt.

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

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

- Blasengröße d_B
- Blaugeschwindigkeit u_B
- Relativer Gasgehalt ϵ_G

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

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

Da die optische Zugänglichkeit der Blasenströmung bei hoher Blasendichte (relativer Gasgehalt $\epsilon_G > 5 - 10\%$) und bei Einsatz von Suspensionen stark eingeschränkt ist, wird für lokale Messungen in Blasenströmungen eine optische Nadelsonde eingesetzt (**Bild 1.8**). Die Spitze der Nadelsonde besteht aus Glas mit einer konischen Spitze ($d_{\text{Glas}} = 125 \mu\text{m}$). Über einen Lichtleiter wird Laserlicht in die Glasspitze eingekoppelt, welches teilweise an der



Bild 1.7: Hydrodynamik in Blasensäulen im homogenen Strömungsregime: $d_R = 100 \text{ mm}$, Wasser/Luft

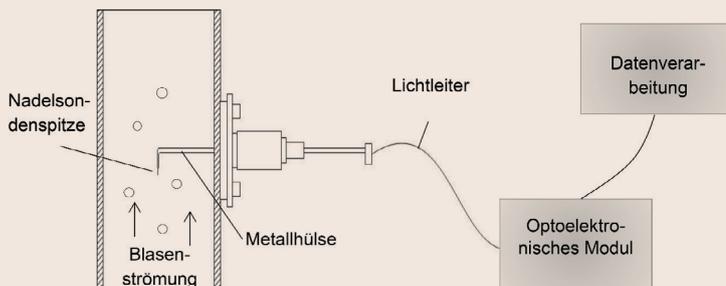


Bild 1.8: Messaufbau zur Messung der hydrodynamischen Größen mit der optischen Nadelsonde

Spitze reflektiert wird. Dabei hängt die Intensität der Reflexion vom Brechungsindex des an der Spitze umgebenden Fluides ab. Über die Messung der Reflexion kann auf Grund von unterschiedlichen Brechungsindizes zwischen Gas- und Flüssigphase unterschieden werden. Die Nadelsonde ist dabei senkrecht nach unten ausgerichtet, wodurch die aufsteigenden Blasen von oben nach unten durchstochen werden. Aus dem zeitlichen Signalverlauf beim Durchstechen einer Blase kann die Blasengeschwindigkeit und durchstochene Sehnenlänge l_b ermittelt werden. Weiterhin lässt sich der relative Gasgehalt aus der Zeit bestimmen, in welcher die Nadelsonde von der Gasphase umgeben wird.

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

Literatur

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

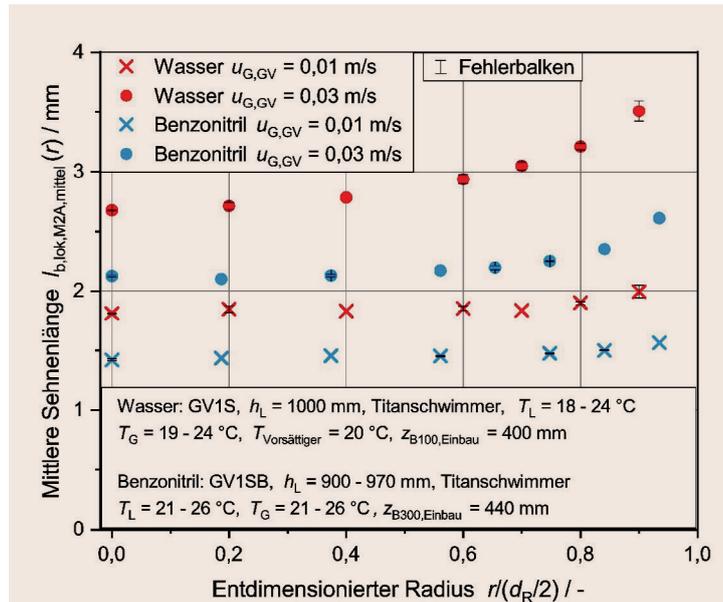


Bild 1.9: Einfluss der Oberflächenspannung auf die gemessene Sehnenlänge durch Vergleich der Stoffsystem Wasser/Luft ($\sigma = 72 \text{ mN/m}^2$) und Benzonitril/Luft ($\sigma = 39 \text{ mN/m}^2$) bei gleicher Flüssigkeitsviskosität und -dichte

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

Der Verkehrssektor hat von allen Sektoren noch immer den geringsten Anteil von erneuerbaren Energieträgern. Es ist deshalb von hoher Priorität, die Energieträger Benzin, Diesel und Kerosin aus erneuerbaren Quellen zu erzeugen. Basierend auf erneuerbaren Rohstoffen bieten sich vor allem das *Fischer-Tropsch*- und das *Methanol-to-Gasoline*-Verfahren (MtG) an, diese Kraftstoffe zu synthetisieren und in bestehende Raffinerien zu integrieren. Beide Technologien werden am KIT erfolgreich demonstriert, wie etwa mit dem *bioliq*®-Prozess zur Erzeugung von Benzin aus Stroh. Beide katalytischen Routen bringen auch Herausforderungen mit sich. Die Fischer-Tropsch-Synthese erzeugt durch einen auf Wachstumswahrscheinlichkeit von Kohlenwasserstoffketten beruhenden Mechanismus als Hauptprodukt Diesel. Als Nebenprodukte fallen zu einem nicht vernachlässigbaren Teil auch langkettige Wachse an. Das beim MtG-Verfahren erzeugte synthetische Benzin bietet aufgrund des hohen Aromatengehaltes viele Vorteile. Gleichzeitig bringen hochmolekulare Aromaten wie etwa Durol (1,2,4,5-Tetramethylbenzol, $\text{C}_{10}\text{H}_{14}$) Probleme bei der motorischen Verbrennung mit sich. Für beide Verfahren ist es deshalb essentiell, die anfallenden Nebenprodukte energetisch oder stofflich zu verwerten. Dabei bietet sich das *Hydro*-

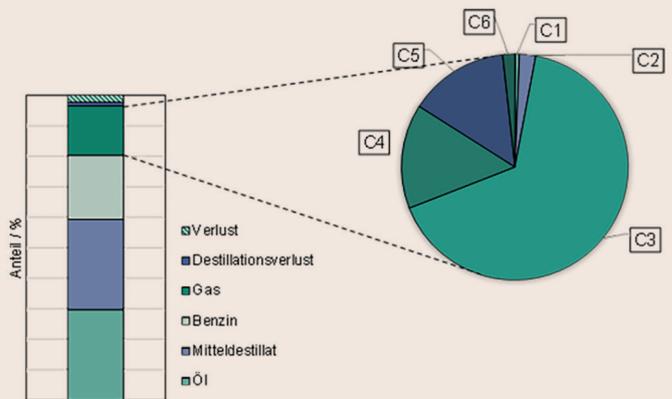
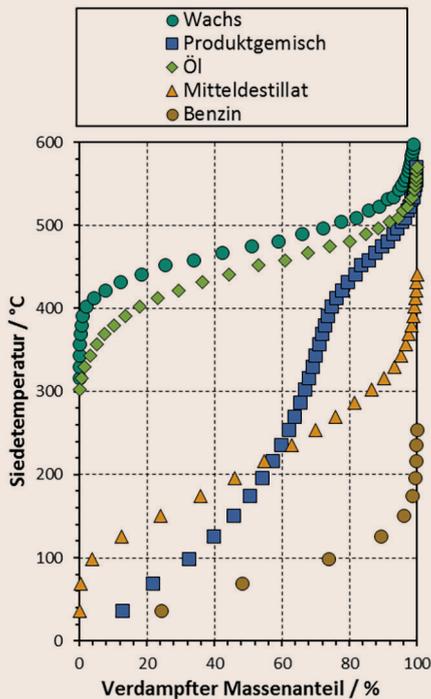


Bild 1.10: Siedebereiche der erzeugten Fraktionen, mittels Gaschromatographie bestimmt

Bild 1.11: Ausbeuten der unterschiedlichen Fraktionen nach der Destillation

processing aufgrund der hohen Prozessvariabilität besonders an.

Hydroprocessing von Fischer-Tropsch-Wachsen

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

Zunächst mussten die signifikanten Unterschiede zwischen Wachs und Öl definiert werden. In beiden Fällen wird erwartet, dass sich die Produkte beim Erhitzen nicht verflüchtigen, allerdings ist Öl im Allgemeinen bei Raumtemperatur flüssig, wohingegen klassisches Wachs fest

ist. Das bedeutet, dass bei der Umwandlung von Wachs zu Öl ein hoher Siedebereich bei gleichzeitig absinkendem Schmelzpunkt angestrebt wird. Dies schließt ein Cracken der Kohlenwasserstoffe aus, da das zu einem sehr starken Absinken der Siedetemperatur führen würde. Es muss also möglichst selektiv isomerisiert werden. Hierzu wurde ein engporiger, schwach saurer Katalysator mit AEL Struktur gewählt. Dieser war in der Lage die langkettigen Kohlenwasserstoffe zu isomerisieren und Öle mit einer Viskosität im Bereich 30 - 40 mPa. s zu erzeugen. Exemplarische Ausbeuten und die Siedebereiche sind in **Bild 1.10** und **1.11** dargestellt.

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

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

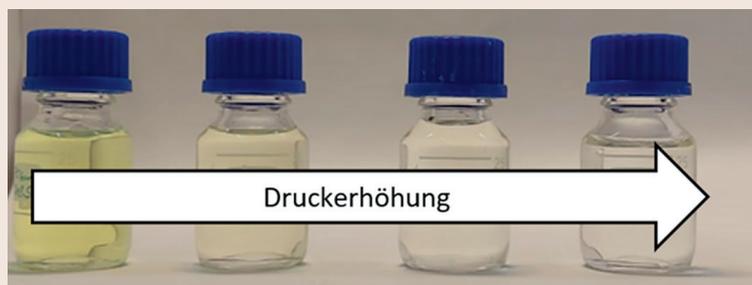


Bild 1.12: Farbänderung der produzierten Öle bei steigendem Druck

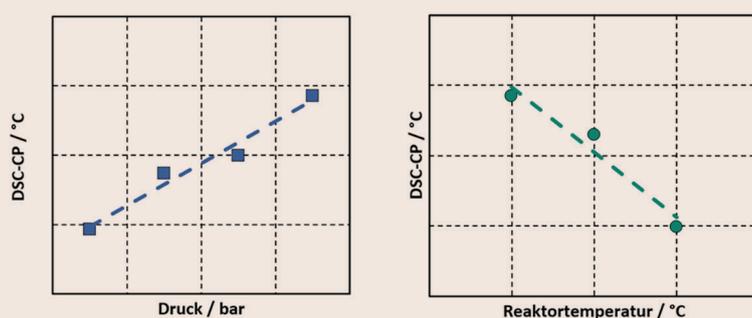


Bild 1.13: Abhängigkeiten des Cloud-Points der Ölfraction von Druck und Reaktions-temperatur

Die wichtigste Frage bei der Produktion von Weißölen ist allerdings die nach den Kaltfließigenschaften. Diese können anhand unterschiedlicher Parameter beurteilt werden. Bei Diesel wäre es beispielsweise der Cold Filter Plugging Point (CFPP), also der Punkt, an dem der Treibstoff nicht mehr durch einen standardisierten Filter fließen kann. Bei Ölen gibt es den sogenannten Tropfpunkt, dieser ist ein Maß für die Fließfähigkeit des Öls bei definierten Temperaturen. Bei beiden Stoffklassen gibt es zudem den Cloud-Point (CP) als Referenz. Dieser ist die Temperatur, bei der die ersten Paraffinkristalle gebildet werden. Die Flüssigkeit behält allerdings ihre Fließfähigkeit, was bedeutet, dass die anderen genannten Eigenschaften unterhalb des CPs liegen müssen. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Cloud-Point mittels dynamischer Differenzkalorimetrie bestimmt werden kann. Das ist eine Messung, die geringen Zeitaufwand und Probenmenge (ca. 10 mg pro Messung) benötigt. Hierdurch war es möglich das Kälteverhalten der Öle in Abhängigkeit von Reaktionsdruck und -temperatur zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in **Bild 1.13** dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass der CP mit steigendem Reaktionsdruck zunimmt. Dies ist auf die katalytische Inhibierung durch den Wasserstoff bei der Carbeniumionenbildung zurückzuführen. Gleichzeitig konnte dem durch erhöhte Temperatur entgegengewirkt werden. Hier gilt es ebenfalls noch ein wirtschaftliches Optimum, bzw. einen Kompromiss aus Ölausbeute, CP und Energieaufwand bei der Prozessführung zu bestimmen.

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

Aufbereitung einer biostämmigen Schwerbenzinfraction

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

Zunächst erfolgt die Synthese eines biostämmigen Kraftstoffes basierend auf Stroh mit der auf dem Campus Nord des KIT betriebenen bioliq®-Anlage (siehe auch **Bild 1.14**). Das Benzin wird im nachfolgenden Prozessschritt über eine Destillation in eine Leicht- und Schwerbenzinfraction getrennt. Das Leichtbenzin ($\leq C_9$) steht im Anschluss für Flottentests bei Industriepartnern zur Verfügung. Die Schwerbenzinfraction ($C_9 - C_{12}$), die prozessbedingt reich an dem schweren Aromaten Durol (C_{10}) ist,

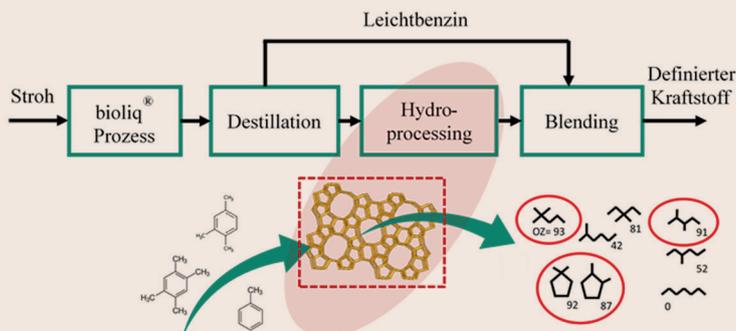


Bild 1.14: Prozessschema der Kraftstoffsynthese und des Schwerbenzin-Upgradings

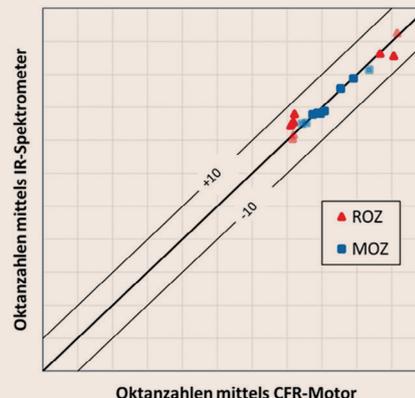


Bild 1.15: Paritätsplot zu den Oktanzahlen (ROZ/MOZ), aufgetragen sind die mittels IR-Spektrometers bestimmten über denen im CFR-Motor gemessenen Oktanzahlen

führt unter anderem bei der motorischen Verbrennung zu Problemen. Aufgrund der hohen Schmelztemperatur besteht die Gefahr von Verblockungen im Motor, außerdem sind die Verbrennungseigenschaften nicht optimal, wodurch es zu starken Partikelemissionen kommt. Aus diesem Grund wird die Fraktion einem *Upgrading* unterzogen, welches am EBI ceb näher untersucht wird. Die Zielsetzung des *Upgradings* besteht in der Herstellung einer hochwertigen Blending-Komponente, welche später der Leichtbenzinfraction beigemischt wird.

Für das *Upgrading* wird als erster Prozessschritt das Hydrieren der schweren Aromaten hin zu Naphthenen untersucht. Das Ziel dieser Maßnahme besteht darin, die C₉ - C₁₂-Aromaten in Naphthene umzuwandeln, welche weniger Emissionen bei der motorischen Verbrennung erzeugen. Besonderes Augenmerk liegt bei Otto-Kraftstoffen jedoch auf der Oktanzahl, welche nach der DIN EN 228 einen Mindestwert von 95 für die ROZ und 85 für die MOZ aufweisen muss. Im etablierten Raffineriebetrieb wird dies durch ein Beimischen von Aromaten erreicht. In den benzintypischen Siedeschnitten sind dies Toluol- und Xylole-Isomere, welche das Klopfverhalten einstellen. Das Ziel der vorliegenden Aufgabenstellung ist, eine möglichst hohe Klopfestigkeit unter Abwesenheit von Aromaten bei der hydrierten Fraktion einzustellen, da andernfalls die Gefahr bestünde, dass nach dem *Blending* die durch die Norm vorgegebene Oktanzahl nicht erreicht wird. Die Hydrierung der aromatenreichen Fraktion führt immer zu einer Abnahme der Oktanzahl, zudem sinkt sie mit zunehmender Molekülgröße tendenziell noch weiter. Um dem entgegenzuwirken, wird als zweiter Reaktionsschritt ein *Hydroprocessing* durchgeführt, welches einen etablierten Prozess darstellt, um die Klopfestigkeit von Molekülen durch strukturelle Umlagerungen (Isomerisierung) zu er-

höhen. Bei Naphthenen kommt es neben der Umlagerung von Alkylgruppen auch zu einer Ringschrumpfung. Diese führt zu einer Verkleinerung der C₆- hin zu einer C₅-Ringstruktur. Besonders die geschrumpften Ringe versprechen eine Erhöhung der Oktanzahl, wohingegen sich lange Alkylketten analog zu linearen Paraffinen negativ auswirken. Des Weiteren entsteht beim *Hydroprocessing* durch das Aufbrechen von Ringstrukturen in Abhängigkeit des eingesetzten Katalysators eine signifikante Menge an Paraffinen. In Vorversuchen (März bis November 2019) wurden zunächst potentielle Katalysatoren auf ihre Eignung für den Prozess untersucht. Als besonders vielversprechend erwiesen sich bifunktionelle Edelmetall-Zeolith-Katalysatoren, die sowohl an der Edelmetallkomponente die Hydrierung katalysieren als auch Isomerisierungs- und Cracking-Reaktionen an den sauren Zentren des Zeolithen. Basierend auf den Vorversuchen war es möglich, Rückschlüsse auf die Aktivität und Selektivität der ablaufenden Reaktionen zu ziehen.

Die Selektivität drückt sich maßgeblich in der Oktanzahl aus. Diese zu bestimmen gestaltete sich allerdings als Herausforderung, da für die Messung in einem sogenannten CFR-Motor ein Probenvolumen von mindestens 2 L erforderlich war. Im labortechnischen Maßstab wurde dies durch mehrwöchige Dauerversuche umgesetzt, war allerdings für viele Proben wegen des hohen Zeitaufwandes wenig praktikabel. Aus diesem Grund wurde Anfang 2020 eine Methode entwickelt, um die jeweiligen Oktanzahlen anhand einer infrarotspektroskopischen Messung zu ermitteln. Die multivariate Datenanalyse bietet zusätzlich eine Analyseverfahren, die in einem breiten spektroskopischen Bereich mehrere Wellenlängen gleichzeitig einer Regression unterziehen kann. Dies war erforderlich, da komplexe Molekülstrukturen ein dementsprechend

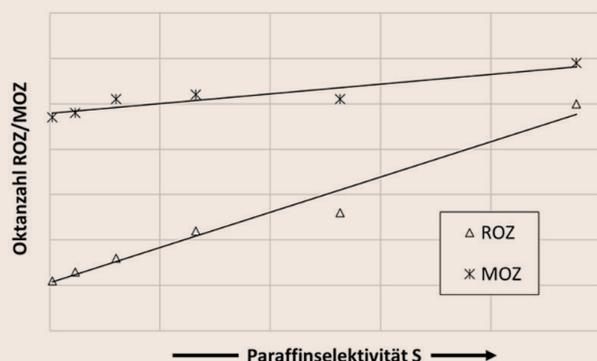


Bild 1.16: Abhängigkeit der Oktanzahlen (ROZ/MOZ) von der Paraffinselektivität

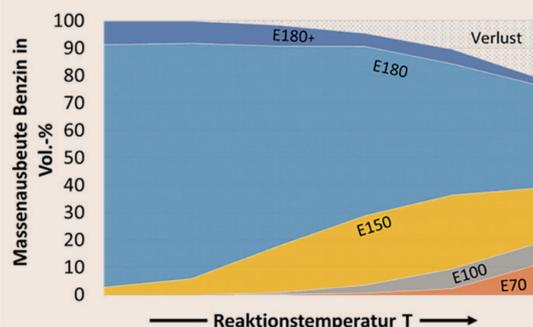


Bild 1.17: Benzinausbeute, dargestellt anhand der E-Werte in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur

vielseitiges IR-Absorptionsspektrum aufweisen und die Konzentration wegen Überlagerungen mit den Schwingungen anderer Moleküle nicht an einer Wellenlänge festgemacht werden konnte. **Bild 1.15** zeigt eine hervorragende Übereinstimmung der normgerecht mit einem CFR-Motor gemessenen Oktanzahlen mit den spektroskopisch gemessenen.

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

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

Mit dieser spektroskopischen Methode wurde untersucht, wie sich die Qualitäten der Kraftstoffe bei einer Vielzahl von Parametern verändern. Neben der Oktanzahl wurde der Leichtsiederanteil als kritische Größe identifiziert. Die DIN EN 228 schreibt hier mit den sogenannten E-Werten Mindestanteile vor, so muss etwa beim E100 (Verdampfter Anteil bei 100 °C) mindestens 46 Vol.-% des Ottokraftstoffes verdampft sein. MtG-Kraftstoffe sind meist reich an vergleichsweise schweren Aromaten und

liegen für den beispielhaft erwähnten E100 nicht selten unter 10 Vol.-%. Es liegt daher nahe, die Schwerbenzinfraction so aufzubereiten, dass sie möglichst viele Leichtsieder aufweist. Im nachfolgenden **Bild 1.17** ist zu sehen, wie sich die einzelnen E-Werte über die Prozesstemperatur entwickeln.

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

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

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

LNG-Bezugskosten der betrachteten Versorgungspfade
in €ct/kWh

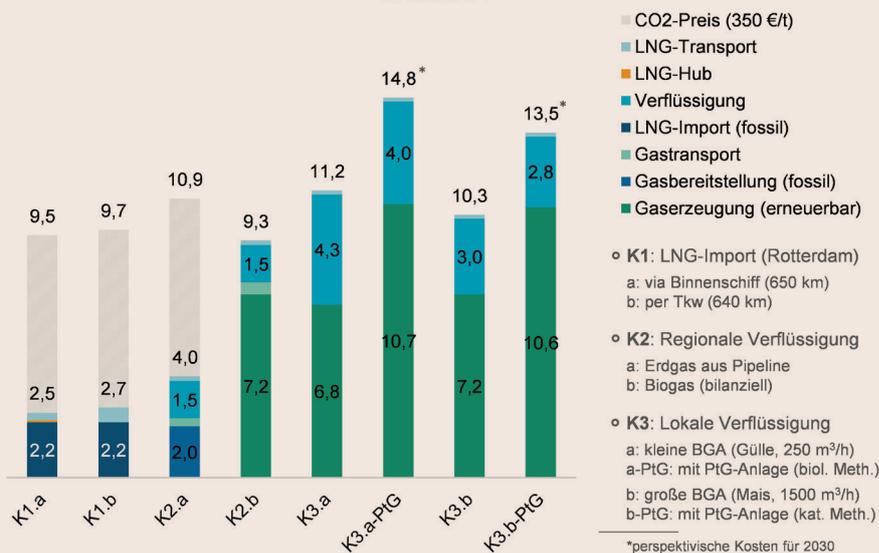


Bild 1.18: Vergleich von fossiler mit regenerativer LNG-Bezugskosten

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

1.5.1 Arbeitsgruppe „Systeme und Netze“

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

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

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

Das heutige LNG-Nutzungspotential in Baden-Württemberg beträgt etwa 18,2 TWh. Dieses Potenzial ergibt

sich im Wesentlichen aus dem Kraftstoffwechsel im Schwerlastverkehr von Diesel zu LNG mit ca. 8,3 TWh [4] und durch die Erschließung von Wärmekunden in Gebieten, die bisher nicht an das Gasnetz angeschlossen sind, mit ca. 9 TWh [5]. Schienenverkehr und Binnenschifffahrt weisen zusammen ein weiteres Potenzial von ca. 0,9 TWh aus.

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

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

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

In der Diskussion wird die LNG-Nutzung im Schwerlastverkehr als zielführend und schnell umsetzbar angesehen, so dass sie in diesem Projekt als Anwendungsbeispiel aufgegriffen wurde. Diese Einschätzung spiegelt sich am Ende des Projekts in der Realität wider. Wie aus aktuellen Zahlen der LNG-Taskforce hervorgeht, wurden

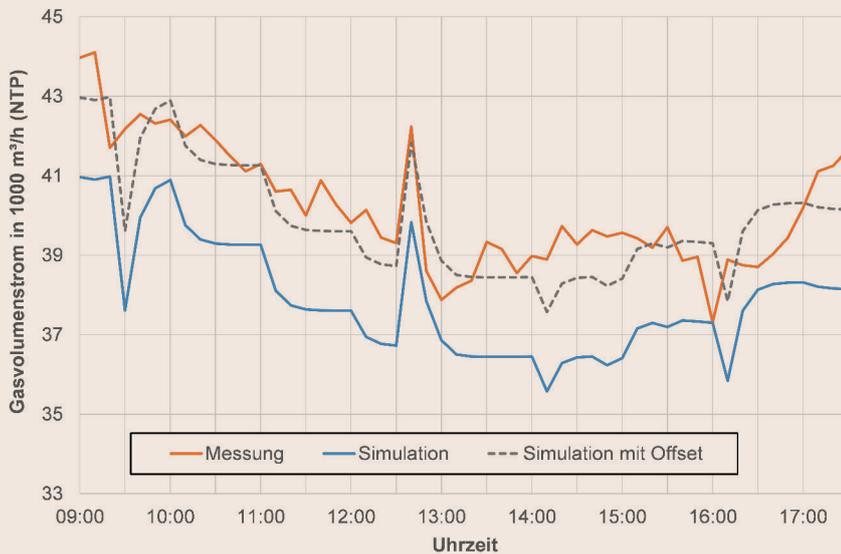


Bild 1.19: Summe der Gasflüsse an den Übernahmestationen; Mess- und Simulationswerte

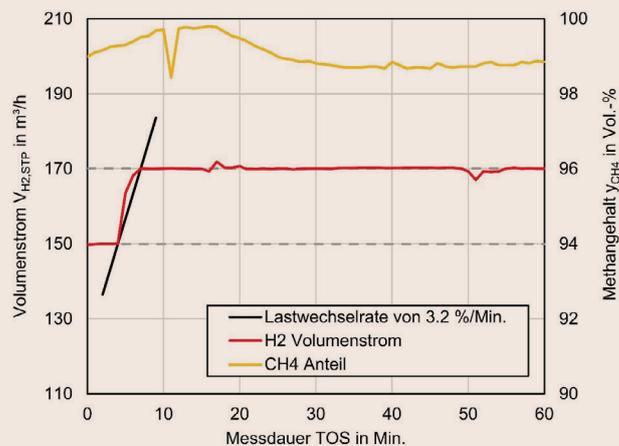
seit Inkrafttreten des BMVI-Förderprogramms am 22. Mai 2018 insgesamt 3.996 Förderanträge für LNG-Nutzfahrzeuge gestellt (Stand: Dezember 2020, [7]). Auch die Zahl der LNG-Tankstellen ist stark gewachsen. Demnach hat sich allein im Jahr 2020 die Zahl der öffentlich zugänglichen LNG-Tankstellen von 11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

In diesem Projekt wurden die verfügbaren Kraftstoffe für das Beispiel Sattelzugmaschine fossiles LNG, Biogas aus Mais und Biogas aus Gülle mit Diesel verglichen. Die THG-Emission von fossilem LNG liegt zwischen 9 und 12 % geringer als die von Diesel, das ca. 970 g CO₂-eq/km verursacht. Biogas aus Mais vermeidet ca. 48 % gegenüber Diesel und weist somit schon eine deutlich bessere THG-Emissionsbilanz auf. Bei der Nutzung von Methan aus Gülle als Kraftstoff wird eine negative THG-Emission

(THG-Senke) von 600 - 930 g CO₂-eq/km erreicht. Dies ist auf die Vergleichsanwendung zurückzuführen. Gülle wird üblicherweise als Wirtschaftsdünger auf die Felder ausgebracht. Durch natürliche Abbauprozesse entstehen dann auf dem Feld klimawirksame Gase wie Lachgas und Methan, die bei einer Weiterbehandlung in einer Biogasanlage nicht entstehen bzw. gezielt aufgefangen und genutzt werden. Somit kann mit Biogas und insbesondere mit Biogas aus Gülle eine schnelle und nachhaltige THG-Emissions-Minderung erzielt werden.

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

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



Laufzeit von 20 Jahren wurde für die Konstellation Gesteinskosten von 4,6 €/kg ermittelt.

Zum anderen sollte die schwankende Eispeisung von Wasserstoff in ein bestehendes Gasnetz mit der Fragestellung der Voraussage der Ausbreitung im Gasnetz anhand einer Fallstudie untersucht werden. Hierfür wurde das Gasnetz hydraulisch mit der kommerziellen Software STANET® simuliert. Zur Validierung der berechneten zeitlichen und örtlichen Wasserstoff-Gehalte wurde die H₂-Einspeisung mit einer Stoßodorierung simuliert. Hierbei wird am Einspeisepunkt die Odoriermittelkonzentration deutlich erhöht und stromabwärts wird die Änderung der Odoriermittel messtechnisch erfasst. Da solch ein Test vor Ort in Whylen nicht möglich war, wurde dieser mit den Stadtwerken Karlsruhe Netzservice GmbH unter dem Dach der Forschungspartnerschaft Energie Karlsruhe durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Simulation die Realität in ausreichender Genauigkeit abbildet. Lediglich eine Anpassung (Offset) war nötig, um die realen Verbräuche an die auf Basis von Standardlastprofilen simulierten Werte anzupassen (Bild 1.19). Mit diesem Test konnte daher festgestellt werden, dass die Methodik für die Erfassung von Netzzuständen verwendbar ist und auch für die Betriebsführung prädiktiv eingesetzt werden kann. Zudem zeigte der Test, dass Eingriffe in die Netzbetriebsführung wie z. B. eine flexible Wasserstoffeinspeisung ohne eine Simulation einen hohen Messaufwand im Netz und somit zu erhöhten Kosten führen würde.

Literatur

- [4] Stand heute; zukünftig ist entsprechend dem steigenden Schwerlastverkehr mit einem leicht steigenden Potential zu rechnen
- [5] Stand heute; zukünftig ist u.a. aufgrund von Gebäudesanierungen von sinkenden Verbräuchen in der Wärmeversorgung auszugehen

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

1.5.2 Arbeitsgruppe „DVGW Verfahrenstechnik“

Frank Graf, Katharina Bär, Johanna Gegenheimer, Peter Kussin, Janina Leiblein, Friedemann Mörs, Christian Müller, Ruth Schlautmann

Die Arbeitsgruppe Verfahrenstechnik (AG-VT) beschäftigt sich mit der Erzeugung, Aufbereitung und Umwandlung von Gasen aus erneuerbaren Quellen. Die Arbeiten umfassen experimentelle und theoretische Untersuchungen zu den Themengebieten biologische bzw. thermochemische Gaserzeugung, Gasreinigung, CO₂-Abscheidung sowie biologische bzw. katalytische Methanisierung.

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

- Katalytische Wabenmethanisierung
- Biologische Methanisierung in gerührter Blasensäule
- Katalytischer mikrostrukturierter Reaktor

Zur Analyse wurden Versuchsergebnisse der Anlagen hinsichtlich Energieverbrauch, Gasqualität, dynamische Betriebsweise etc. ausgewertet und in einem zweiten Schritt optimiert. In den Versuchen konnte gezeigt wer-

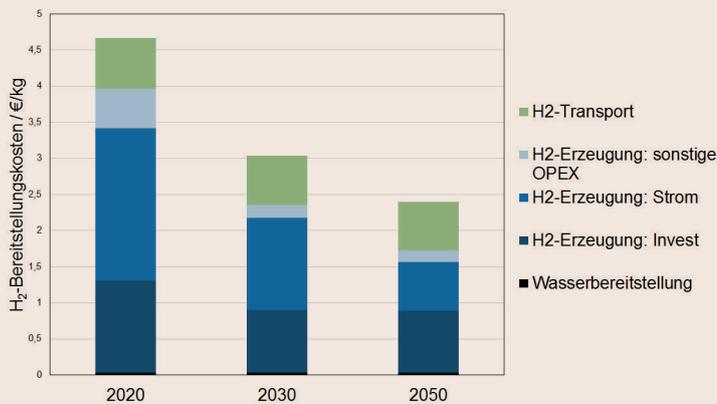


Bild 1.21: Bereitstellungskosten von Wasserstoff aus der MENA-Region für heute, 2030 und 2050

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

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

Wasserstoff-Herstellungsverfahren in Form von Steckbriefen vorgestellt. Die Steckbriefe enthalten die wichtigsten Parameter jedes Verfahrens wie z. B. Reaktionsbedingungen, Reaktortechnik, Reinheitsgrad der Gase sowie Angaben zum Technologiereifegrad. Aufgrund des sehr hohen Technologiereifegrads wurden die Wasserelektrolyse sowie die Dampfreformierung mit CCS im Rahmen des Projekts im Detail betrachtet. Zusätzlich wurde die Methanpyrolyse technoökonomisch bewertet. Schwerpunkt der Arbeiten war die detaillierte Analyse der Wasserstoffherstellung in MENA per Elektrolyse und der Pipeline-Transport nach Deutschland. Bestandteile der gesamten Prozesskette sind die Photovoltaikanlagen zur Strombereitstellung, eine Meerwasserentsalzung, eine Elektrolyse und der Transport des Wasserstoffs nach Deutschland. Die erfolgte technische Auslegung aller Komponenten liefert die Grundlage für die Kostenabschätzung. Die Ergebnisse der Kostenabschätzung sind in Form von H_2 -Bereitstellungskosten in Deutschland in **Bild 1.21** zu sehen. Durch das Kostensenkungspotenzial der Investitionen für Elektrolyseure und der Strombereitstellung können die heutigen Kosten von 4,7 €/kg um ca. die Hälfte auf 2,4 €/kg im Jahr 2050 gesenkt werden.

1.5.3 Arbeitsgruppe „Physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung“

Die Gasaufbereitung mit ionischen Flüssigkeiten (IL) zur Abtrennung von CO_2 aus Gasströmen wurde in 2020 weiter beforscht und für verschiedene Anwendungsbereiche adaptiert. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist in Kapitel 1.4.3 (Arbeitsgruppe „Physikalisch-chemische Verfahren der Brennstoffaufbereitung“) zu finden. Die CO_2 -Abtrennung mit ionischen Flüssigkeiten, das ursprünglich für die absorptive CO_2 -Entfernung aus Biogas entwickelt wurde, wird im EU-Projekt „ReCO2De“ (<https://>

www.recodeh2020.eu) für die CO₂-Abtrennung aus industriellen Abgasströmen genutzt. Hierzu wurden vom Projektpartner IoLiTec eine umfangreiche Auswahl an potenziellen IL synthetisiert und am EBI im Labormaßstab charakterisiert und bewertet. Aussichtsreiche Flüssigkeiten wurden daraufhin in einer Technikumsanlage auf die Eignung für den Prozess untersucht und die Betriebsführung optimiert. Es wurde eine geeignete Flüssigkeit gefunden, welche sowohl eine hohe CO₂-Kapazität als auch eine hohe Stabilität gegenüber Sauerstoff aus dem Rauchgas aufweist. Auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse erfolgte ein Upscaling des Prozesses. In dem mit 8 Mio.€ geförderten Demonstrationsvorhaben wird die Pilotanlage an einem Zementwerk in Griechenland für die Aufbereitung von 50 m³/h Abgas betrieben und das abgetrennte CO₂ für die Synthese verschiedener Zement-Additive genutzt. In 2020 startete die Fertigung der TRL 6-Demonstrationsanlage beim italienischen Projektpartner Hysytech (Anlagenbauer).

In dem vom BMWi geförderten Leitprojekt „MethQuest“ (www.methquest.de.) wird die Eignung des Verfahrens zur CO₂-Abtrennung mit ionischen Flüssigkeiten für die CO₂-Bereitstellung aus Umgebungsluft (engl.: Direct Air Capture, DAC) untersucht. Dabei liegt die Herausforderung der Trennaufgabe in dem geringen CO₂-Anteil in der Luft von ca. 400 ppmv. Für die experimentellen Arbeiten wurde die bestehende Technikumsanlage für einen Luftdurchsatz von 20 m³/h erweitert. In ersten Versuchen konnte die Machbarkeit nachgewiesen und konzentriertes CO₂-Desorptionsgas mit 70 - 90 % CO₂ gewonnen werden. Neben CO₂ wird auch Wasser aus der Luft im ionischen Fluid (Waschflüssigkeit) akkumuliert und während der Desorption wieder freigesetzt. Für eine optimale Nutzung der Ressourcen bei der Erzeugung erneuerbaren Methans ist es nicht ausreichend, die einzelnen PtG-Technologien (CO₂-Bereitstellung, Methanisierung und Elektrolyse) separat zu betrachten. Erst die Bewertung einer gesamten PtG-Prozesskette berücksichtigt Wechselwirkungen wie Wärmeintegration zwischen den einzelnen Technologien. Deshalb sind die Arbeiten zur technischen und ökonomischen Bewertung verschiedener PtG-Prozessketten im Projekt „MethQuest“ essenziell.

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt „ProBioLNG“ (www.probiolng.de) arbeiten seit September 2019 fünf Partner aus Wissenschaft und Industrie an der Demonstration einer neuartigen Prozesskette zur Bereitstellung von LNG aus erneuerbaren Quellen. Die DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut und die Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim haben gemeinsam ein Verfahren entwickelt, um Biogas mit einem Methananteil von mehr als 75 Vol.-% zu produzieren. Dies gelingt, indem die eingesetzte Biomasse zu-

nächst bei Umgebungsdruck in einem kontinuierlich betriebenen Hydrolysereaktor (HR) in gelöste organische Verbindungen überführt wird. Diese werden im zweiten Schritt, dem so genannten Druckmethanreaktor (MR), zu Methan umgewandelt. Um das erzeugte Methan in einem Sterling-Verflüssiger zu verflüssigen, wird zunächst mit Hilfe von ionischen Flüssigkeiten CO₂ aus dem MR-Gas entfernt und in Adsorbentien entschwefelt und getrocknet. In aktuellen Arbeiten der DVGW-Forschungsstellen wurde die Detailplanung der Gasaufbereitung und der Verschaltung der Gesamtprozesskette aus Biogasproduktion, Gasaufbereitung und Verflüssigung durchgeführt.

1.5.4 Arbeitsgruppe „Materialprüfung“

Andreas Strauß, Jörg Riedl

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

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

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

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

- **DIN 30654** „Dichtungsprofile aus expandiertem PTFE für Flanschverbindungen der Gasversorgung“, Überführung aus DVGW VP 403 - neue Norm veröffentlicht 2020-01



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

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

1.5.5 Arbeitsgruppe „Brennstofflabor“

Jochen Schütz, Kerstin Kröger

Wegen Einschränkungen durch die Covid-19-Pandemie wurden in der ersten Hälfte des Jahres 2020 hauptsächlich bestehende Messmethoden überarbeitet, optimiert bzw. neu entwickelt. Nachdem wieder die Möglichkeit zur Probenahme und für Außendiensttätigkeiten bestand, wurden zuvor vertagte Messtätigkeiten und Prüfaufträge unter Berücksichtigung geltender Verordnungen wieder aufgenommen und systematisch abgearbeitet. Hierzu zählten u.a. umfangreiche Beprobungen diverser Biogasanlagen, wobei der Fokus auf der Biogaserzeugung, Gasaufbereitung und Kontrolle der Einspeisefähigkeit des bereitgestellten Biomethans lag. Zusätzlich zur routinemäßigen Auftragsanalytik beschäftigte sich die Arbeitsgruppe mit einer Vielzahl an analysetechnischen Fragestellungen im Zuge der laufenden Forschungsprojekte. Hierbei wurden z. B. Substanzen zur CO₂-Abtrennung für die Projekte „Recode“, „Pro-

BioLNG“ und „MethQuest“ untersucht. Für das Projekt „reFuels“ wurden verschiedene Edukte und Produkte für die Erzeugung regenerativer Kraftstoffe analysiert.

Das durch Politik, Forschung und Wirtschaft bekundete, stetig steigende Interesse an Wasserstoff als Energieträger und dessen zukünftige Anwendungsmöglichkeiten hielt auch in der Arbeitsgruppe Brennstofflabor Einzug. Hierzu wurden bestehende Messmethoden auf die Anwendbarkeit zur Wasserstoffcharakterisierung überprüft, erste Anpassungen vorgenommen bzw. damit begonnen, neue Methoden zu entwickeln. Ebenso bearbeitet die Arbeitsgruppe das laufende DVGW-Forschungsprojekt „H₂-Qual – Voruntersuchungen zu Gasbeschaffenheitsaspekten bei Transport und Verteilung von Wasserstoff mit Hilfe der bestehenden Erdgasinfrastruktur“ und hat dessen Projektleitung inne. **Bild 1.22** zeigt einen Blick in einen Teil der Laborräumlichkeiten mit der darin aufgebauten Analytik und Infrastruktur.

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

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

1.6 Veröffentlichungen

Zeitschriftenaufsatz

- Bär, K.; Graf, F. (2020): Techno-ökonomische Bewertung der Kopplung von Biogasanlagen mit biologischer Methanisierung. *gwf Gas + Energie* (9), S. 48–57.
- Benedetti, V.; Ail, S. S.; Patuzzi, F.; Cristofori, D.; Rauch, R.; Baratieri, M. (2020): Investigating the feasibility of valorizing residual char from biomass gasification as catalyst support in Fischer-Tropsch synthesis. *Renewable Energy* 147, S. 884–894. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.050.
- Chaussonnet, G.; Joshi, S.; Wachter, S. Koch, R.; Jakobs, T.; Kolb, T.; Bauer, H.-J. (2020): Air-assisted atomization at constant mass and momentum flow rate. Investigation into the ambient pressure influence with the smoothed particle hydrodynamics method. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 142 (3), S. 176. DOI: 10.1115/1.4044968.
- Eberhard, M.; Santo, U.; Michelfelder, B.; Günther, A.; Weigand, P.; Matthes, J. et al. (2020): The bioliq® entrained-flow gasifier – A model for the German Energiewende. *ChemBioEng Reviews* 60 (5), S. 56. DOI: 10.1002/cben.202000006.
- Graf, F. (2020): Klimaneutrale Gase sind der Schlüssel zur Energiewende mit Gas! Editorial. *energie | wasser-praxis* (6/7), S. 3.
- Graf, F.; Köppel, W.; Bär, K.; Hüttenrauch, J.; Burmeister, F.; Schwarz, S.; Rommelfanger, J. (2020): Die Rolle von Gas bei der Energiewende – Vorstellung des DVGW-Leitprojekts „Roadmap Gas 2050“. *energie | wasser-praxis* (11), S. 38–43.
- Graf, F.; Sauerschell, S.; Prabhakaran, P.; Bajohr, S.; Slama, J.; Stapf, D.; Kolb, T. (2020): Sektorenkopplung mit Gas im Rahmen des BMBF-Vorhabens SEKO – Teil 2: Gasfachliche Untersuchungen. *energie | wasser-praxis* (10), S. 43–49.
- Gruber, H.; Lindner, L.; Arlt, S.; Reichhold, A.; Rauch, R.; Weber, G.; Trimbach, J.; Hofbauer, H. (2020): A novel production route and process optimization of biomass-derived paraffin wax for pharmaceutical application. *Journal of Cleaner Production* 275, S. 124135. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124135.
- Held, M.; Schollenberger, D.; Sauerschell, S.; Bajohr, S.; Kolb, T. (2020): Power-to-Gas: CO₂ Methanation concepts for SNG production at the Engler-Bunte-Institut. *Chemie Ingenieur Technik* 92 (5), S. 595–602. DOI: 10.1002/cite.201900181.
- Heneka, M.; Köppel, W.; Graf, F. (2020): Vergleichende Bewertung von Power-to-X-Prozessen zur Bereitstellung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen. *energie | wasser-praxis* (3), S. 40.
- Hongrapipat, J.; Siritwongrunson, V.; Messner, M.; Henrich, C.; Gunnarsen, S.; Koch, M. et al. (2020): Co-gasification of cassava rhizome and woody biomass in the 1 MW el prototype dual fluidised bed gasifier by gussing renewable energy. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 495, S. 12019. DOI: 10.1088/1755-1315/495/1/012019.
- Horn, H.; Kolb, T.; Trimis, D.; Klinger, J. (2020): Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Jahr 2019. DVGW-Forschungsstelle am EBI, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Teil 1. *gwf Gas + Energie* (6).
- Loipersböck, J.; Weber, G.; Rauch, R.; Hofbauer, H. (2020): Developing an adsorption-based gas cleaning system for a dual fluidized bed gasification process. *Biomass Conv. Bioref.* 13, S. 594. DOI: 10.1007/s13399-020-00999-1.
- Lubenu, U.; Kussin, P. (2020): Abtrennung von Wasserstoff aus Wasserstoff-Erdgas-Gemischen. *energie | wasser-praxis* (1), S. 60–66.
- Mielke, K.; Kolb, T.; Müller, M. (2020): Chemical fractionation of inorganic constituents in entrained flow gasification of slurry from straw pyrolysis. *Biomass and Bioenergy* 141, S. 105732. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105732.
- Nestler, F.; Schütze, A. R.; Ouda, M.; Hadrich, M. J.; Schaadt, A.; Bajohr, S.; Kolb, T. (2020): Kinetic modelling of methanol synthesis over commercial catalysts: A critical assessment. *Chemical Engineering Journal*. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124881.
- Rincón Prat, S.; Schneider, C.; Kolb, T. (2020): Determination of active sites during gasification of biomass char with CO₂ using temperature-programmed desorption. Part 2. Influence of ash components. *Fuel* (267), S. 117179. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117179.
- Ruf, J.; Köppel, W.; Graf, F. (2020): Die Power-to-Gas-Technologie in der deutschen Energiewende. Aktueller Stand und Ausblick auf die nächste Dekade. *gwf - Gas+Energie* (9), S. 42–47.
- Russner, N.; Dierickx, S.; Weber, A.; Reimert, R.; Ivers-Tiffée, E. (2020): Multi-physical modelling of planar solid oxide fuel cell stack layers. *Journal of Power Sources*, S. 227552. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227552.
- Sauerschell, S.; Prabhakaran, P.; Graf, F.; Bajohr, S.; Slama, J.; Stapf, D.; Kolb, T. (2020): Sektorenkopplung mit Gas im Rahmen des BMBF-Vorhabens SEKO - Teil 1: Forschungsinfrastruktur EnergyLab 2.0. *energie | wasser-praxis* (9), S. 26–29.
- Schneider, S.; Bajohr, S.; Graf, F.; Kolb, T. (2020): State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas. *ChemBioEng Reviews* 2 (1), S. 11. DOI: 10.1002/cben.202000014.
- Schneider, C.; Walker, S.; Aekjuthon, P.; Kentaro, U.; Kolb, T. (2021): Effect of Calcium dispersion and graphitization during high-temperature pyrolysis of beech wood char on the gasification rate with CO₂. *Fuel* (283). DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118826.
- Schneider, S.; Bajohr, S.; Graf, F.; Kolb, T. (2020): Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse. *Chemie Ingenieur Technik* 92 (8), S. 1023–1032. DOI: 10.1002/cite.202000021.
- Schulz, H. (2020): Confinements on growth sites of Fischer-Tropsch synthesis, manifesting in hydrocarbon-chain branching – Nature of growth site and growth-reaction. *Applied Catalysis A: General* 602, S. 117695. DOI: 10.1016/j.apcata.2020.117695.
- Schwarz, S.; Bartsch, V.; Gerstein, D.; Gröschl, F.; Wetzel, U.; Graf, F.; Albus, R.; Burmeister, F.; Lucke, N.; Leicher, J.; Krause, H.; Kukuk, J.S. (2020): Gas. *BWK Band 72* (8-9), S. 94–115.
- Siritwongrunson, V.; Hongrapipat, J.; Kuba, M.; Rauch, R.; Pang, S.; Thaveesri, J. et al. (2020): Influence of bed materials on the performance of the Nong Bua dual fluidized bed gasification power plant in Thailand. *Biomass Conv. Bioref.* 30 (2018), S. 565. DOI: 10.1007/s13399-020-00908-6.
- Verleger, S.; Graf, F.; Gerstein, D. (2020): EU-Leuchtturmprojekt STORE&GO erfolgreich abgeschlossen. *energie | wasser-praxis* (6/7), S. 50–58.
- Wachter, S.; Jakobs, T.; Kolb, T. (2020): Experimental investigation on the influence of system pressure on resulting spray quality and jet breakup applying pressure adapted twin-fluid nozzles. *Inter-*

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

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

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

Vortrag

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

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

Schneider, C.; Rincon, S.; Kolb, T. (2020): Biogenic Solid Fuel Conversion under Entrained-Flow Gasification Conditions. POSTER. 3rd In-

ternational Workshop on Oxy-Fuel Combustion. Collaborative Research Center Oxyflame. Montabaur, 04.03.2020.

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

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

Hochschulschrift

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

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

Teil 2 des Tätigkeitsberichts **Aktivitäten des Teilinstituts Verbrennungstechnik, der DVGW-Forschungsstelle, Prüflaboratorium Gas, und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik** folgt in Ausgabe 7-8/2021

Autoren



Prof. Dr. rer. nat. **Harald Horn**
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) |
Karlsruhe |
Tel.: +49 721 608 42580 |
harald.horn@kit.edu



Prof. Dr.-Ing. **Thomas Kolb**
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) |
Karlsruhe |
Tel.: +49 721 608 42561 |
thomas.kolb@kit.edu



Prof. Dr.-Ing. **Dimosthenis Trimis**
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) |
Karlsruhe |
Tel.: +49 721 608 42570 |
dimosthenis.trimis@kit.edu



Dr. rer. nat. **Josef Klinger**
Technologiezentrum Wasser |
Karlsruhe |
Tel.: +49 721 9678 110 |
josef.klinger@tzw.de