

Synthetische Kraftstoffe – Technologien, Prozessketten, Kohlenstoffquellen und Produkte

Einleitung

Der Begriff „synthetische Kraftstoffe“ bezeichnet flüssige oder gasförmige Kraftstoffe, aber auch Kraftstoff-Komponenten, die aus einem „Aufbauprozess“ aus chemischen Bausteinen erzeugt werden.

Kraftstoffe werden in großen Mengen verbraucht. Daher müssen Technologien für ihre Herstellung „skalierbar“, das heißt auf sehr große Produktionskapazitäten übertragbar sein.

Die Technologien schließen sowohl chemische, elektro- und photochemische wie auch biochemische Stoffumwandlungen ein. Darüber hinaus umfassen diese physikalisch-chemische Trennprozesse mit der Aufgabe, unerwünschte Nebenbestandteile abzutrennen und die Kraftstoff-Eigenschaften auf die geforderten Anwendungen anzupassen.

Synthetische Kraftstoffe können aus Wasserstoff und CO₂, aber auch aus Biomasse oder Abfallstoffen gewonnen werden.

Im Rahmen des reFuels-Projekts im Land Baden-Württemberg wurden folgende Kraftstoffe unter dem Begriff „reFuels“ zusammengefasst [1]:

- fortschrittliche Biokraftstoffe
- Kraftstoffe, die aus organischen oder anderen Abfällen oder industriellen Reststoffen hergestellt werden
- e-Fuels, hergestellt aus regenerativ erzeugtem Wasserstoff und CO₂, das entweder durch Abtrennung aus der Atmosphäre (direct air capture = DAC) oder aus CO₂-Quellen biogenem Ursprungs oder aus langfristig nicht vermeidbaren CO₂-Quellen gewonnen wird.

Zu den synthetischen Kraftstoffen können sowohl Komponenten hinzugerechnet werden, die vollständig kompatibel sind zu den bestehenden Anwendungs- und Logistikkonzepten bestehender Kraftstoffe, wie auch neue Komponenten, die verbesserte Eigenschaften im Vergleich zu bestehenden Kraftstoffen aufweisen.

Es wird erwartet, dass die synthetischen Kraftstoffe neben der Elektromobilität und dem Wasserstoff als Energieträger einen Baustein der zukünftigen Mobilität darstellen werden – mit dem Fokus auf Anwendungen, in denen hohe Energiedichten gefordert sind.

Anwendung der Kraftstoffe

Bei der Entwicklung und der Bewertung von synthetischen Kraftstoffen ist eine Betrachtung der gesamten Wirkungskette notwendig: von den Rohstoffen über die Technologien zur Bereitstellung von Rohstoffen und zur Herstellung der Kraftstoffe bis hin zur Verbrennung in Turbinen oder Kolbenmaschinen, der Abgasbehandlung, der Bewertung von Luftschadstoffen und der Bewertung der Auswirkung auf den Menschen und die Natur.

Durch die Verwendung neuer, maßgeschneiderter synthetischer Kraft- oder Treibstoffkomponenten ergibt sich ein Verbesserungspotenzial für die Anwendungseigenschaften sowie für die aus der Kraftstoffverbrennung resultierende Schadstoffbelastung des Abgases.

Der Zusammenhang zwischen Kraft- und Treibstoffeigenschaften und der Qualität des Abgases ist bei Flugzeugtreibstoffen besonders ausgeprägt, da hier keine Abgasreinigung nach dem Verbrennungsprozess eingesetzt werden kann. Bei der ECLIF Messkampagne [2,3] vergleicht das DLR synthetische und andere alternative Treibstoffe mit konventionellen Referenzkerosinen in Bezug auf schädliche Emissionen. ► **Abbildung 1a** zeigt, dass sich die Partikelbildung im Abgas einer Flugzeug-Turbine mit steigendem Wasserstoffgehalt des Treibstoffs verringert und der Wasserstoffgehalt des Treibstoffs einen geeigneten Maßstab für die Rußbildung darstellt. Dabei ist eine deutliche Streuung und damit eine Abweichung vom linearen Zusammenhang zu erkennen. Die Auftragung des Wasserstoff-Gehalts in Abhängigkeit des Aromatengehalts in ► **Abbildung 1b** zeigt auch einen direkten Zusammenhang, wenn auch keine direkte lineare Beziehung. Dies ist dadurch



KIT

Prof. Dr. Jörg Sauer
j.sauer@kit.edu

Prof. Dr. Thomas Kolb
thomas.kolb@kit.edu

Prof. Dr. Peter Pfeifer
peter.pfeifer@kit.edu

DBFZ

Dr. Franziska Müller-Langer
franziska.mueller-langer@dbfz.de

Dr. Marco Klemm
marco.klemm@dbfz.de

DLR

Dr. Sophie Jürgens
sophie.juergens@dlr.de

FZ Jülich

Prof. Dr. Ralf Peters
ra.peters@fz-juelich.de

Fraunhofer ISE

Max Julius Hadrich
max.julius.hadrich@ise.fraunhofer.de

Dr. Achim Schaadt
achim.schaadt@ise.fraunhofer.de

UFZ

Prof. Dr. Falk Harnisch
falk.harnisch@ufz.de

ZSW

Dr. Ulrich Zuberbühler
ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de

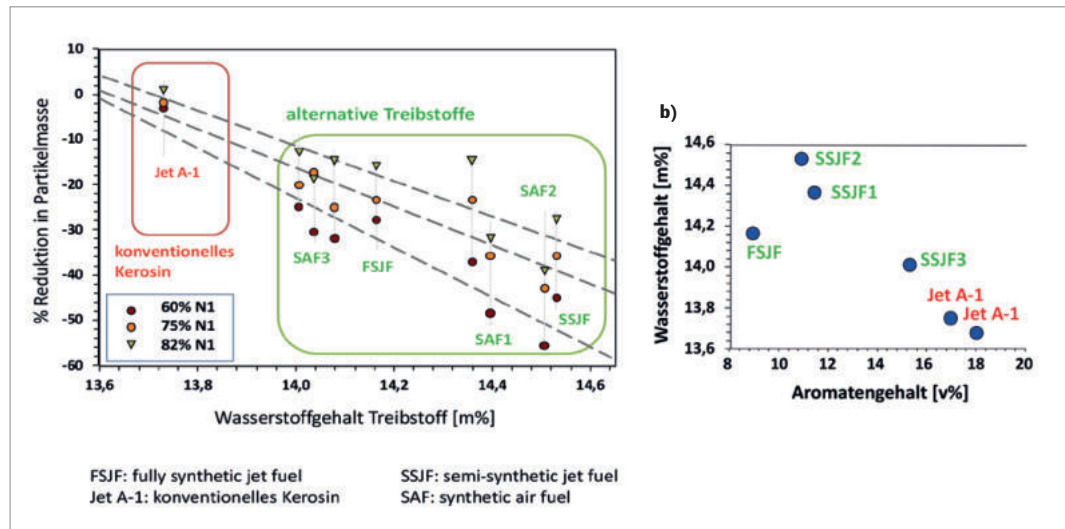
Abbildung 1

**Flugzeugtreibstoffe:
Vergleichsmessungen für
synthetische und kon-
ventionelle Kraftstoffe**

a) Verbesserte Reduktion der Abgaspartikel (relativ zum konventionellen Jetfuel) in Abhängigkeit vom steigenden Wasserstoff-Gehalt der alternativen Flugzeugkraftstoffe

b) Zusammenhang zwischen Aromatengehalt und Wasserstoff-Gehalt verschiedener Kraftstoff-Komponenten

(Quelle: DLR, ECLIF Messkampagne)



bedingt, dass Kraftstoffe verschiedene Gehalte an Aromaten enthalten können, deren Struktur und Zusammensetzung sich wiederum voneinander unterscheiden und so zu unterschiedlichen Mengen an Ruß im Abgas führen können.

Somit sind aromatenfreie synthetische Kraftstoffe nicht nur CO₂-neutral sondern auch aus Sicht reduzierter Partikelbildung unter Flugbedingungen positiv klimawirksam.

Neben den Umweltauswirkungen der Kraftstoffe sind deren Kosten wichtige Kriterien für ihren zukünftigen Einsatz. Langfristig ist eine Bewertung der Gesamtkosten des Anwenders notwendig. Dies muss entlang der gesamten Kette der Herstellung und Anwendung geschehen, unter Berücksichtigung der Herstellungskosten der Kraftstoffe aber auch der Anschaffungskosten der Fahrzeuge.

Derzeit ist die Angabe von Bereitstellungskosten der Kraftstoffe auf Basis von Referenzszenarien mit bekannten Herstelltechnologien möglich. Am Forschungszentrum Jülich wurde dazu eine vergleichende Bewertung verschiedener Kraftstoff-Konzepte durchgeführt [4]. Bei vorgegebenen Referenzkosten für Wasserstoff und CO₂ steigen die auf Dieselkraftstoff normierten Kosten der Kraftstoffe mit zunehmender Komplexität ihrer chemischen Struktur und damit zusammenhängend mit der Komplexität der Herstellverfahren (► *Abbildung 2*). Neben der direkten Anwendung von Wasserstoff sind von den betrachteten Kraftstoffen die mit bestehenden Technologien hergestellten Komponenten Methanol, Dimethylether und durch das Methanol-to-Gasoline-Verfahren hergestelltes Benzin vergleichsweise am günstigsten. Oxymethylenether sind auf Grund der noch nicht ausgereiften Herstelltechnologie am teuersten. Methan als CRG (compressed renewable gas) aus erneuerbaren Quellen zeigt im Vergleich zu den flüs-

sigen Kraftstoffen eine höhere Energieeffizienz (Lit KIT/DVGW). Allen Kraftstoffen ist gemeinsam, dass die Herstellkosten des Wasserstoffs den größten Einfluss auf die Kosten haben. Die Kraftstoffsynthese steht am Ende der gesamten Herstellkette, weshalb die Effizienz ihrer Herstellung ebenfalls einen hohen Einfluss auf die Effizienz der gesamten Herstellkette hat. Der Abstand zu fossilem Kraftstoff ist dabei mit >1 Euro/l bis >3,5 Euro/l Dieseläquivalent noch sehr groß.

**Wertschöpfungsketten und
Forschungsinfrastrukturen**

Da die Herstellkosten der synthetischen Kraftstoffe noch erheblich höher sind, als die fossilen Komponenten, ist sowohl die Weiterentwicklung von einzelnen Herstelltechnologien notwendig, wie auch die Optimierung des Zusammenspiels der Einzeltechnologien in einem Gesamtverbund von Prozessketten und Verbundstrukturen.

Am KIT wird im Energy Lab 2.0 [6] in Zusammenarbeit mit dem DLR und dem FZ Jülich das Zusammenspiel von Energiebereitstellung, Wandlung und Speicherung in elektrochemischen, chemischen und thermischen Speichern und der Einspeisung von Gas und Strom in das lokale KIT-Netz untersucht. Diese Komponenten sind darüber hinaus mit der Anwendung in Musterhäusern gekoppelt (► *Abbildung 3*). Die Steuerung des Zusammenspiels der Komponenten im Gesamtverbund ist eines der wichtigsten Forschungsthemen des Energy Labs 2.0.

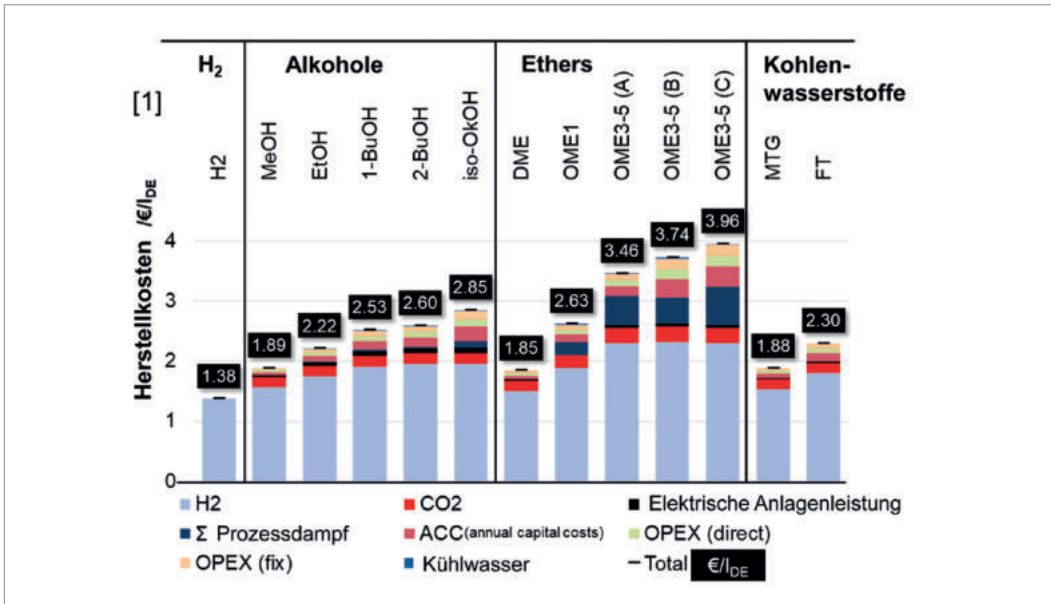


Abbildung 2

Vergleich der Herstellkosten bei der Synthese eines Liter Dieselequivalent verschiedener Elektrokraftstoffe und Aufschlüsselung der Kostenbeiträge

Zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe sind im Energy Lab 2.0 folgende Anlagen/Teilkomponenten realisiert:

- SNG (synthetic natural gas) aus der Methanisierung von CO₂:
 - Einsatz wabenförmiger Katalysatoren
 - Dreiphasen-Methanisierung, hier ist der Katalysator in einem nichtreaktiven, flüssigen Wärmeträgermedium dispergiert
 - mikrostrukturiertes Methanisierungsmodul
- mikrostrukturiertes Fischer-Tropsch-Verfahren zur Herstellung von Diesel und Kerosin in modularisierter Bauweise

Das Energy Lab 2.0 ist mit der bioliq-Anlage und ihren Teilanlagen Pyrolyse, Vergasung, Gasreinigung, Benzinsynthese verknüpft, dadurch kann sowohl der Energie- wie auch der Kohlenstoff-Gehalt der Biomasse zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe genutzt werden.

Neben den Prozessketten unter Nutzung von elektro-/thermochemischen Prozessstufen ist auch die Nutzung biochemischer Verfahren zur Stoffumwandlung möglich. Das DBFZ forscht im Rahmen von SynBioPTx-Ansätzen an der Synthese gasförmiger Energieträger auf der Basis von Biogas, Gas aus der thermochemischen Vergasung von Biomasse, sowie Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse

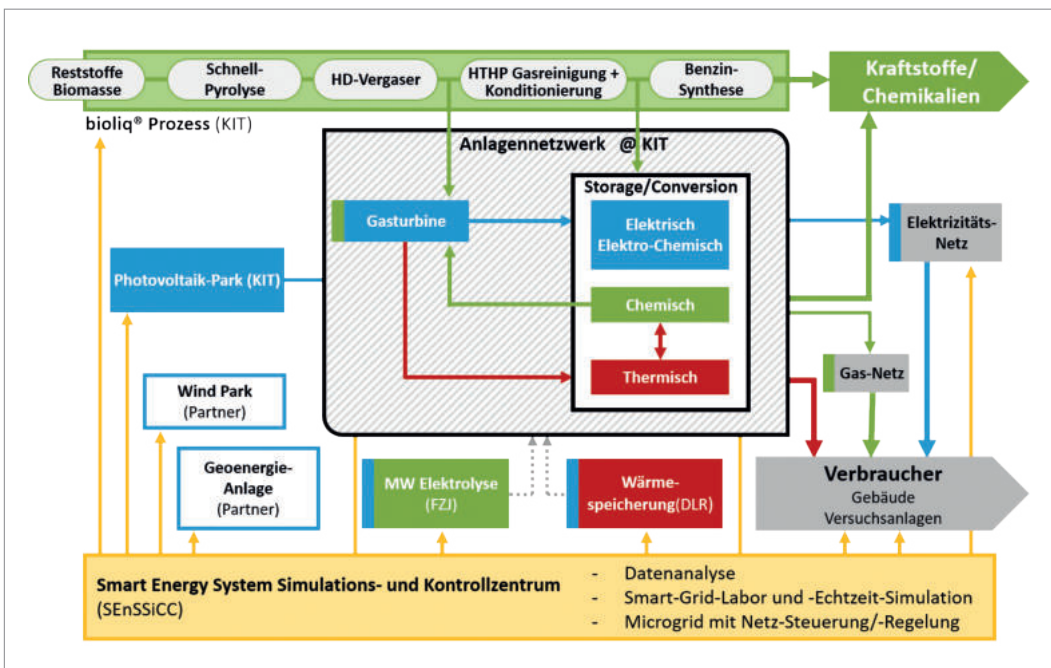


Abbildung 3

Optimierung des Zusammenspiels von Einzelkomponenten und Prozessketten bei der Herstellung synthetischer Kraftstoffe:

Energy Lab 2.0 der Helmholtz Gemeinschaft und bioliq-Anlage am KIT in Zusammenarbeit mit Partnern

[Quelle: KIT]

Durch Methanisierung des bei Biomassevergasung entstehenden CO und CO₂ und bei der Biogas-Herstellung entstehenden CO₂ kann der Aufwand für die Aufreinigung der Prozessströme reduziert und der Nutzungsgrad des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs maximiert werden [7,8,9]. Die anaerobe Umwandlung von Biomassekomponenten kann dann durch eine gezielte Reaktionsführung und einer Kopplung mit elektrochemischen Reaktionen so gesteuert werden, dass Kraftstoff-Komponenten erzeugt werden.

Am UFZ [10] wird die Kombination der Bereitstellung von organischen Säuren bei der anaeroben Vergärung von Biomasse am Beispiel von Maisbier oder im VIP+Projekt MolkeKraft [11] bei Molkereiabwässern mit deren elektrochemischer Umwandlung zu Kohlenwasserstoffen mittels Kolbe-Reaktion untersucht und skaliert. Erste techno-ökonomische Untersuchungen ergeben Kosten für die Herstellung der Kraftstoff-Komponenten von 1,37 \$/l [12].

Entwicklung von Technologien und neuen Kraftstoff-Konzepten

Die Schließung des anthropogenen Kohlenstoff-Kreislaufs kann durch Verwendung von Biomasse als Kohlenstoff-Quelle wie auch durch die direkte Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre (CO₂ Direct Air Capture = DAC) gewährleistet werden. Eine DAC-Komponente wurde beispielsweise im Projekt PowerFuel bereits ins Energy Lab 2.0 am KIT integriert und in Betrieb genommen.

Die Effizienz der Bereitstellung der Kohlenstoff-Quelle hat neben Wasserstofferzeugung und Kraftstoffsynthese sowohl Auswirkung auf die Kosten des synthetischen Kraftstoffs, wie auch auf die Gesamteffizienz der Herstellkette, da bei der DAC-Abscheidung Energie zur Gewinnung von reinem CO₂ aufgewandt werden muss. Am ZSW wurde eine DAC-Technologie entwickelt, die eine kontinuierliche Bereitstellung von CO₂ ermöglicht und bei der eine polymere Komponente als „Waschmittel“ für die Abscheidung des CO₂ aus der Atmosphäre zum Einsatz kommt, wodurch Verluste des „Waschmittels“ sicher vermieden werden können. Der Prozess kann mit Abwärmeströmen aus nachgelagerten Prozessstufen verschaltet und so effizienter gestaltet werden, was wiederum hilft, die Gesamteffizienz zu optimieren [13].

Zur Optimierung der Herstellung von Methanol als Komponente oder Zwischenprodukt bei der Herstellung synthetischer Kraftstoffe wurden beim Fraunhofer ISE kontinuierlich betriebene Versuchs-

anlagen zur Prozessoptimierung, sogenannte Miniplants, errichtet. Im Rahmen des durch das BMBF finanzierten Carbon2Chem-Projektes dienen Hüttengase aus der Stahlerzeugung als Kohlenstoff-Quelle für die Herstellung von Methanol.

Am Forschungszentrum Jülich werden kurzkettinge Alkohole wie Methanol oder Ethanol durch die sogenannte Guerbet-Reaktion zu höheren Alkoholen wie Isobutanol oder Isooktoanol umgesetzt. Isobutanol kann als Blendkomponente zu Benzin und Isooktoanol zur Emissionsminderung in Verbrennungskraftmotoren zu Dieselmotoren zugegeben werden [14].

Oxymethylenether (OME) stellen eine weitere Klasse synthetischer Kraftstoffe für die Anwendung in Dieselmotoren dar. Sie zeichnen sich durch Kohlenstoff-Sauerstoff-Ketten aus, in denen der Kohlenstoff im Molekül durch Sauerstoff getrennt vorliegt. OME führen in der dieselmotorischen Verbrennung zu einer weitgehenden Vermeidung der Rußbildung. Die Rußbildung kann auch beim Ottomotor nahezu vollständig unterdrückt werden. Dies ist durch die Nutzung von Mischungen von Dimethylcarbonat/Methylformiat als Reinstoff oder in Blends mit Benzin als Basiskraftstoff möglich.

Die Anwendung beider Familien von Oxygenat-Kraftstoffen in Otto- bzw. Dieselmotoren wird im Projekt NAMOSYN [13] untersucht, das vom BMBF gefördert wird. Für OME ist im NAMOSYN-Projekt die Wertschöpfungskette von der Entwicklung von Herstellungskonzepten durch die chemische Industrie über den Anlagenbau bis hin zur Anwendungsentwicklung durch die Mineralölindustrie abgebildet. Auf der Anwendungsseite kooperieren Technologieentwickler, Automobilzulieferer, Motorenhersteller und Automobilhersteller mit akademischen Gruppen.

Zusammenfassung

Nachhaltige erneuerbare synthetische Kraftstoffe werden im zukünftigen Energie- und Mobilitätssystem insbesondere für Anwendungen benötigt, bei denen hohe Energiedichten gefragt sind. Zur Erreichung energieeffizienter Lösungen muss F&E die gesamte Kette von der Bereitstellung der Kohlenstoff-Quelle wie auch des Wasserstoffs, über die Syntheseverfahren und Produktionskonzepte bis hin zu Anwendungskonzepten abdecken. Dabei muss sichergestellt werden, dass Lösungen bevorzugt werden, bei denen der Kohlenstoff-Kreislauf so weit wie möglich geschlossen bleibt. Aufgabe der Politik bleibt es, durch geeignete Hebel die auf Dauer verbleibende und nicht schließbare Kostenlücke zwischen Erzeugung synthetischer Kraftstoffe und fossilen Kraftstoffen nachhaltig zu schließen.

Literatur

- [1] <https://www.refuels.de>, entnommen am 15.11.2020
- [2] Schripp T., Anderson B., Crosbie E.C., Moore R.H., Herrmann F., Osswald P., et al. Impact of Alternative Jet Fuels on Engine Exhaust Composition During the 2015 ECLIF Ground-Based Measurements Campaign. *Environmental Science & Technology* 2018; 52(8): 4969–78, <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06244>.
- [3] Kleine J., Voigt C., Sauer D., Schlager H., Scheibe M., Jurkat-Witschas T., et al. In Situ Observations of Ice Particle Losses in a Young Persistent Contrail. *Geophys Res Lett* 2018; 45(24):13553–61, <https://doi.org/10.1029/2018gl079390>.
- [4] Schemme, S., et al., H₂-based synthetic fuels: A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production, *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) 5395-5414, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.028>.
- [5] Köppel, W.; Bajohr, S.; Sauer, J.: Vergleichende Bewertung von PtX-Prozessen zur Bereitstellung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen“, Abschlussbericht DVGW-Forschungsvorhaben G 201603 (2018).
- [6] <https://www.elab2.kit.edu/index.php>, entnommen am 15.11.2020.
- [7] Witte, Julia; Kunz, Andreas; Biollaz, Serge M.A.; Schildhauer, Tilman J. (2018): Direct catalytic methanation of biogas – Part II. Techno-economic process assessment and feasibility reflections. In: *Energy Conversion and Management* 178, S.26–43. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.079>.
- [8] Dannesboe, Christian; Hansen, John Bøgild; Johannsen, Ib (2020): Catalytic methanation of CO₂ in biogas. Experimental results from a reactor at full scale. In: *React. Chem. Eng.* 5 (1), S. 183–189. <https://doi.org/10.1039/C9RE00351G>.
- [9] <https://www.dbfz.de/projektseiten/pilot-sbg/>, entnommen am 19.11.2020.
- [10] Urban, C., Xu, J., Sträuber, H., dos Santos Dantas, T.R., Mühlenberg, J., Härtig, C., Angenent, L.T., Harnisch, F. (2017) Production of drop-in fuels from biomass at high selectivity by combined microbial and electro-chemical conversion, *Energy Environ. Sci.* 10 (10), 2231–2244, <https://doi.org/10.1039/C7EE01303E>.
- [11] <https://www.ufz.de/index.php?en=46376>, entnommen am 20.11.2020.
- [12] Harnisch, F., Urban, C. (2018): Electrobio-refineries: Unlocking the synergy of electro-chemical and microbial conversions, *Angew. Chem.-Int. Edit.* 57 (32), 10016–10023, <https://doi.org/10.1002/anie.201711727>.
- [13] https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/REG_Projekte/CORAL_Abschluss-ergebnisse.pdf, entnommen am 18.11.2020.
- [14] Pasel, J., Häusler, J., Schmitt, D., Valencia, H., Meledina, M., Mayer, J., Peters, R. (2020), Ethanol Dehydrogenation: A Reaction Path Study by Means of Temporal Analysis of ProductsCatalysts 2020, 10, 1151, <https://doi.org/10.3390/catal10101151>
- [15] <http://namosyn.de>, entnommen am 16.11.2020.