

CO₂-neutrale Kraftstoffe aus dezentralen Syntheseanlagen – Ansatz, Status Quo und der Blick nach vorne

Michael Klumpp, Tim Böltken, Alexander Gräfenhahn, Michael Riedinger, Peter Pfeifer, Roland Dittmeyer*
siehe Autorenangaben

Abstract

Dieser Beitrag analysiert den Status erneuerbarer Energieträger im Mobilitätssektor und zeigt die Relevanz CO₂-neutraler flüssiger Kraftstoffe zur Erreichung der Klimaschutzziele auf. Verschiedene Optionen des unter dem Begriff „Power-to-X“ bekannten Konzeptes zur Sektorenkopplung werden beleuchtet. Die Synthese von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen aus CO₂ und erneuerbarem Strom in modularen Anlagen wird beschrieben und deren technische Realisierbarkeit anhand konkreter Beispiele, unter anderem aus dem Kopernikus-Projekt „P2X“, belegt.

Schlagwörter/Keywords:

Power-to-Fuel, e-Fuels, CO₂-neutraler Kraftstoff, Fischer-Tropsch-Synthese, Power-to-X

1. Einleitung

In Politik, Gesellschaft und Industrie herrscht mittlerweile weitgehend Einigkeit darüber, dass die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen (THG) – allen voran von Kohlendioxid (CO₂) – zur Erwärmung des Erdklimas führen. Die Auswirkungen sind bereits jetzt zu beobachten: 2018 lag die globale Durchschnittstemperatur 0,8 °C über dem Referenzzeitraum 1951-1980 und 18 der 19 heißesten Jahre traten seit 2001 auf (NASA, 2019). Auch der deutsche Sommer 2019 war laut dem Deutschen Wetterdienst (Deutscher Wetterdienst, 2019) nach 2003 und 2018 der drittwärmste seit Beginn der regelmäßigen Messungen im Jahr 1881. Der Klimawandel hat durch die steigende Anzahl an extremen Wetterereignissen, wie anhaltenden Dürreperioden, Überschwemmungen, Stürmen und steigender Meeresspiegel, das Potenzial, die Lebensgrundlage der Menschen weltweit zu gefährden. Die Folgen für Wirtschaft und Gesellschaft sind immens und machen an keiner Landesgrenze halt. Noch besteht aber Handlungsspielraum: Gemäß dem Sonderbericht der IPCC vom Oktober 2018 (IPCC, 2018) ließe sich die globale Erderwärmung auf 1,5 °C begrenzen, wenn bis spätestens 2050 global „Netto-Null“ der Treibhausgasemissionen erreicht würde, also nicht mehr THG emittiert werden als durch biologische (Stichwort Aufforstung) oder technische Systeme (Stichwort Direct Air Capture) der Atmosphäre entzogen werden.

Folglich steht die Weltgemeinschaft vor der Herausforderung, ihre Energiegewinnung und -nutzung einem Paradigmenwechsel zu unterziehen: Die primäre Energiequelle darf nicht länger fossiler Natur sein. Vielmehr gilt es, die natürlichen Energiequellen zu nutzen und die gesamten energetischen und stofflichen Wertschöpfungsketten auf den erneuerbaren Strom auszurichten.

Neben der damit verbundenen Notwendigkeit eines beschleunigten Zubaus an Erzeugungskapazität ist dabei die fluktuierende Natur der erneuerbaren Energiequellen (EE) zu berücksichtigen und das Energiesystem mit all seinen Facetten darauf entsprechend anzupassen. Denn zu bestimmten Zeiten und an gewissen Orten besteht eine Diskrepanz zwischen zur Verfügung stehender erneuerbarer Energie (Sonneneinstrahlung, Wind) und dem Bedarf an erneuerbarem Strom. So zeigt Abbildung 1(a) für den Fall Deutschland den zeitlichen Verlauf des im Januar und August 2019 erzeugten erneuerbaren Stroms mit einerseits den tageszeitabhängigen Fluktuationen und andererseits den saisonalen Unterschieden (Wind – Sonne). Hinzu kommen geographische und geopolitische Gegebenheiten (windreicher Norden, sonnenreicher Süden, wirtschaftliche Ballungsräume im Westen), die auch eine örtliche Diskrepanz zwischen Erzeugung des erneuerbaren Stroms und dessen Gebrauch verursachen (Abb. 1(b)). Diese Betrachtung lässt sich naturgemäß auch für andere Regionen der Erde mit den dort gegebenen Rahmenbedingungen anstellen.

* Korrespondierender Autor.

E-Mail: roland.dittmeyer@kit.edu (R. Dittmeyer)

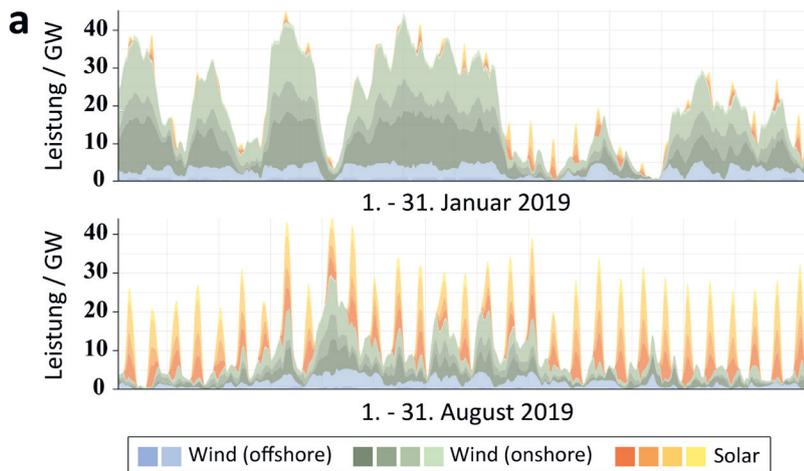
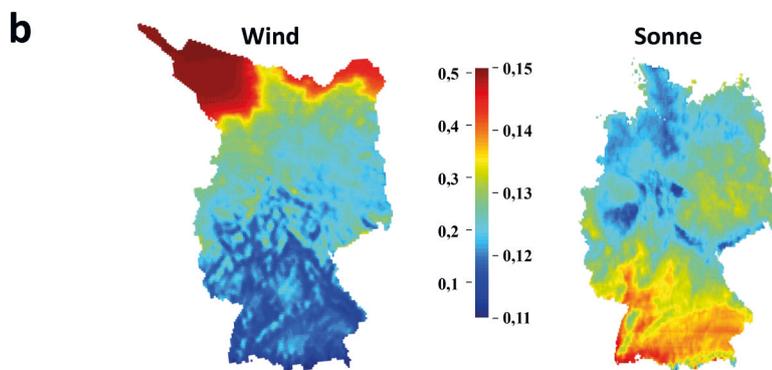


Abbildung 1: Erzeugung elektrischen Stroms aus erneuerbaren Quellen in Abhängigkeit der Zeit und des Ortes.

(a) Zeitliche Fluktuationen in der Leistung aus Wind- und Solarenergie im Januar und August 2019 (Deutschland, Graphik angepasst nach: (Fraunhofer ISE, 2019)) und

(b) mittlere Kapazitätsfaktoren von Sonnen- und Windenergie (Mittelwert 1995 – 2015, Graphik angepasst aus: (Deutscher Wetterdienst, 2018)).



Sektorkopplung – zentraler Bestandteil des zukünftigen Energiesystems

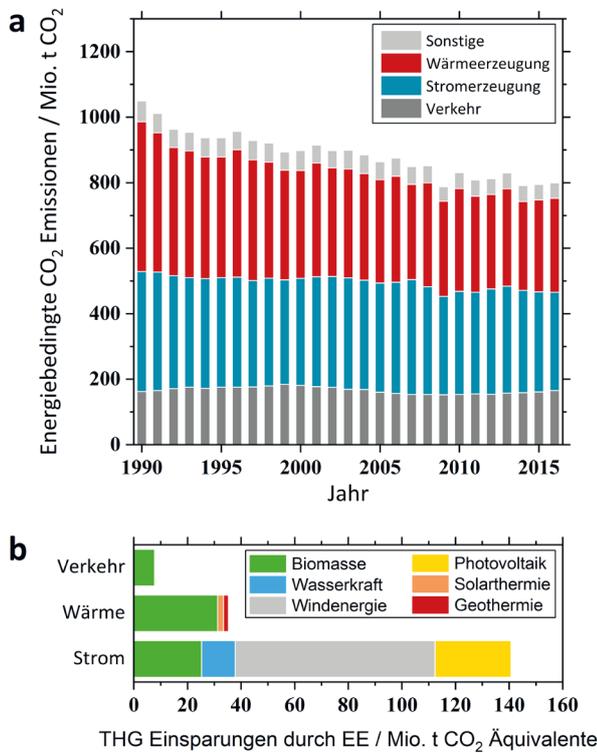
Die Abkehr von THG-verbundener Energieerzeugung betrifft sämtliche Sektoren der Industriegesellschaften. Wie in Abbildung 2(a) dargestellt, sind dies in Deutschland neben dem Stromsektor insbesondere die Sektoren der Wärme- und Kälteerzeugung und des Transports. Neben der Effizienzsteigerung (Reduktion des Energieverbrauchs, bspw. durch energetische Gebäudesanierung und intensivierete Industrieprozesse) werden aber auch CO₂-neutrale, alternative und neuartige Strategien für Energiespeicherung und -transport benötigt. Hier stellen die sogenannten Power-to-X-Technologien einen vielversprechenden Ansatz dar: ausgehend von CO₂-neutraler elektrischer Energie („Power“) wird über technische Lösungen („to“) die elektrische Energie in andere Energieformen und -träger („X“) umgewandelt. Diese kann einerseits im Bereich des Wärmesektors z.B. Hochtemperatur-Wärme sein („Power-to-Heat“), die entsprechend dem Stromangebot erzeugt, gespeichert und bedarfsgerecht genutzt werden kann oder im Bereich der chemischen Energiespeicherung über elektrochemische und katalysierte chemische Reaktionen in Form von chemischen Bindungen. Letztere Ansätze werden dann, abhängig vom Zielprodukt, als Power-to-Fuel, Power-to-Gas, Power-to-Chemicals bezeichnet. Die Power-to-X-Technologien sind damit prädes-

gniert für die Kopplung unterschiedlicher Energiesektoren, was aufgrund der oben dargelegten Charakteristika der erneuerbaren Energiequellen eine zentrale Anforderung an ein stabiles zukünftiges Energiesystem ist.

Für die Defossilisierung (Abkehr von fossilen Rohstoffquellen, insbes. Erdöl und -gas) der Energie-, Rohstoff- und Kraftstoffversorgung werden seit Jahren auch biomassebasierte Lösungen propagiert, demonstriert und angewendet. Diese reichen von der Nutzung biogener Brennstoffe über die fermentative Erzeugung von Biogas und Bioalkoholen bis hin zur synthetischen Erzeugung von Biokraftstoffen und chemischen Grundstoffen. Im bunten Puzzle der zukünftigen CO₂-freien Energie- und Rohstoffbereitstellung werden diese Ansätze eine wichtige Stellung einnehmen, jedoch – wie alle anderen diskutierten Ansätze – nicht alleinig zur Versorgung der Gesellschaft ausreichen, erfordern sie doch (sieht man von der Biomassereststoffnutzung ab) auch zusätzlich Anbaufläche.

Während in Deutschland der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in den letzten Jahren stetig zunahm (wenngleich Zubau derzeit abflachend), so sind insbesondere in den Sektoren Wärme/Kälte und Transport noch wenig Erfolge bei der Integration CO₂-freier Energien zu verzeichnen: So zeigt Abbildung 2(b) die Menge an vermiedenen THG-Emissionen in Deutschland durch Nutzung alternativer Energie- und Rohstoffquellen im Jahre 2018. Es ist deutlich

Abbildung 2: Energiebedingte CO₂-Emissionen und Einsparungen.
 (a) Emissionen nach Sektoren 1990 – 2016 (Datenquellen: (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018)),
 (b) Einsparung durch erneuerbare Energien und Rohstoffquellen im Jahr 2018 nach Sektoren und EE-Quellen (Datenquellen: (Umweltbundesamt, 2019))



erkennbar, dass im Stromsektor bereits eine Vielzahl an unterschiedlichen Technologien zu einer signifikanten Emissionsreduktion beiträgt, während insbesondere im Transportsektor derzeit lediglich die biomassebasierten Treibstoffe implementiert sind.

Im Folgenden soll zunächst ein Überblick über die derzeitige Situation im Bereich des Transportsektors gegeben werden, bevor in Abschnitt 2 Kraftstoffe erzeugt nach dem Power-to-X-Konzept vorgestellt und diskutiert werden und in Abschnitt 3 auf die flüssigen, CO₂-neutralen Fischer-Tropsch-Kraftstoffe im Detail eingegangen wird.

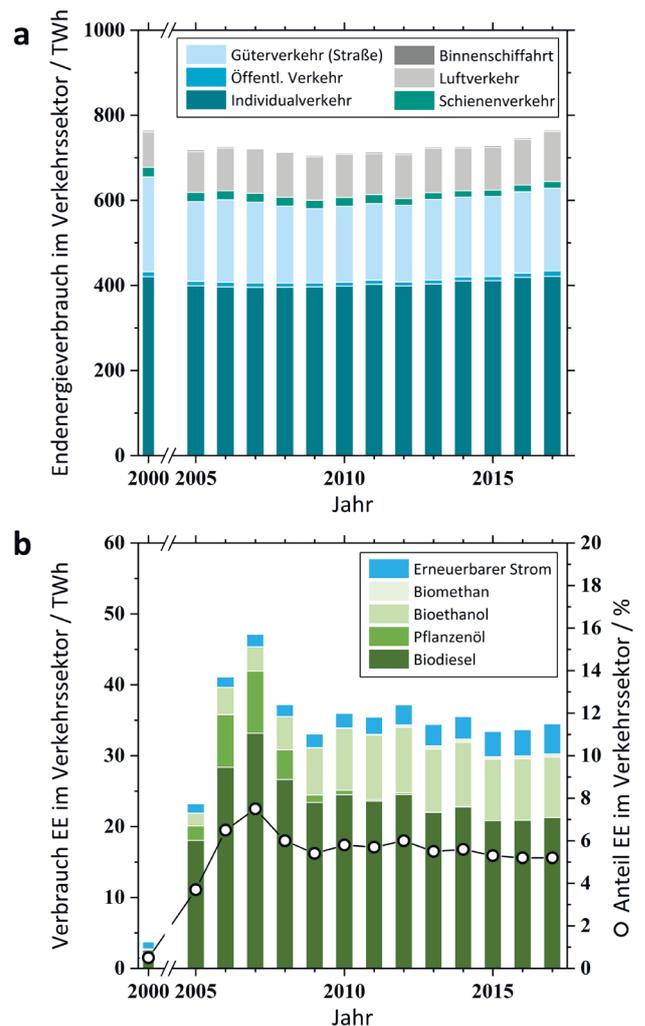
Verkehrswende – wo stehen wir heute?

Wie oben bereits erwähnt, lassen sich gut 20 % der deutschen energiebedingten CO₂-Emissionen dem Transportsektor zuschreiben. Diese wiederum stammen wie in Abbildung 3(a) dargestellt in Deutschland zum überwiegenden Teil aus dem Straßenverkehr, gefolgt vom Flugverkehr. Wenngleich über politisch gesetzte Richtlinien (E5 bzw. E10) in Deutschland bereits ein gewisser Anteil an erneuerbaren Kraftstoffen im Markt Einzug gehalten hat, so sind diese wie in Abbildung 3(b) gezeigt nahezu ausschließlich biogener Natur und deren Anteil zudem seit Jahren stagnierend. Die Elektromobilität als eine Möglichkeit, den Transportsektor über erneuerbaren Strom direkt CO₂-neutral zu gestalten, trägt in Deutsch-

land bei weitem noch nicht zu einem signifikanten Anteil der CO₂-Einsparung bei. Der Anteil von 12 % des erneuerbaren Stroms an den erneuerbaren Energien im Verkehrssektor bzw. von weniger als 1 % am gesamten Energieverbrauch im Transportsektor ist hauptsächlich dem Schienenverkehr zuzuschreiben, wird die absolute Zahl zugelassener voll-elektrischer oder Hybrid-Fahrzeuge in Deutschland betrachtet (Marktanteil elektrische Fahrzeuge lag 2017 bei 1,56 % (0,71 % vollelektrischer Antrieb, 0,85 % Plug-in-Hybrid (European Alternative Fuels Observatory, 2019). Neuzulassungen rein batterieelektrischer Fahrzeuge in 2018: ca. 36.000 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2019)).

Während im Bereich des Individualverkehrs – insbesondere im städtischen Raum – die Elektromobilität und neue Mobilitätskonzepte inkl. neuer Ansätze und Anreize im ÖPNV (siehe auch (DVWG, 2019)) zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes führen können und werden, so sind diese Ansätze nur

Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf des Energieverbrauchs im deutschen Verkehrssektor.
 (a) Endenergieverbrauch nach Transportmittel (Datenquellen: (Kraftfahrt-Bundesamt, 2018)),
 (b) Verbrauch erneuerbarer Elektrizität sowie erneuerbarer Kraftstoffe im Verkehrssektor (Datenquelle: (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018)).



bedingt für den ländlichen Raum und auf andere Transportsektoren übertragbar. Besonders der Schwerlast-, Schiffs- und Flugverkehr ist mit den derzeitigen Antriebskonzepten klar auf die hohe Speicherdichte der flüssigen Kraftstoffe angewiesen. Im zukünftigen CO₂-neutralen Energiesystem werden solche regenerativ erzeugten Kohlenwasserstoffe als Brenn- oder Kraftstoffe in großem Umfang benötigt (Umweltbundesamt, 2014). Eine CO₂-neutrale Alternative zu den fossilen Kraftstoffen über die Power-to-X-Konzepte bereitzustellen, hat hier mehrere positive Aspekte: Kurz- und mittelfristig kann so unter Nutzung gegebener Infrastruktur sowie vorhandener Fahr- bzw. Flugzeuge die CO₂-Bilanz verbessert werden. Zudem verspricht dieser Ansatz mittel- bis langfristig einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit und Stabilisierung des Stromnetzes mit überwiegend erneuerbarem Strom zu liefern. Aufgrund der Tatsache, dass sich diese Technologien einfach skalieren und unabhängig von den örtlichen Rahmenbedingungen anwenden lassen (siehe dazu auch Abschnitt 3), bieten sie darüber hinaus die Möglichkeit des Exportes und über die Multiplikationseffekte die Chance, einen signifikanten Anteil zur Reduktion der CO₂-Emissionen beizutragen.

2. Vom erneuerbaren Strom zum Kraftstoff für nachhaltige Mobilität

Für die Herstellung CO₂-neutraler Kraftstoffe und Energieträger werden derzeit in Wissenschaft und Forschung unterschiedlichste Konzepte erforscht, erprobt und demonstriert. Auch wenn die Auflistung der möglichen Konzepte hier nur unvollständig sein kann, fasst Abbildung 4 die meistdiskutierten Pfade zusammen. Allen gemein ist die Tatsache, dass erneuerbarer Strom über ein Elektrolyseverfahren Eingang in

die chemische Prozesskette findet. Aus Elektrolyse gewonnener Wasserstoff stellt somit den einfachsten chemischen Power-to-X-Energieträger dar. Dieser kann dabei in Form von verflüssigtem bzw. komprimiertem Wasserstoff direkt für z.B. Brennstoffzellenanwendungen genutzt werden oder über neuartige Konzepte mit höherer volumetrischer Energiedichte und einfacherer Handhabung gespeichert werden. An dieser Stelle sei das Konzept der „Liquid Organic Hydrogen Carrier“ (LOHC) genannt. Weitere Informationen hierzu können z.B. dem Übersichtsartikel von Preuster und Kollegen (Preuster, Papp, & Wasserscheid, 2017) entnommen werden.

Aus dem durch Elektrolyse gewonnenen Wasserstoff kann auch mit CO₂ (zu dessen Gewinnung siehe unten) das sogenannte Synthesegas (Mischung aus Kohlenmonoxid (CO) und H₂) erhalten werden, welches in verschiedensten Prozessen in Kraftstoffe und andere chemische Wertprodukte umgesetzt werden kann. Dabei stehen Verfahren zur Verfügung, die gasförmige Kohlenwasserstoffe (Methan, erneuerbares Flüssiggas), flüssige Energieträger (Kohlenwasserstoffketten unterschiedlicher Kettenlänge) oder auch sauerstoffhaltige Moleküle wie Methanol (Alkohol), Dimethylether oder Oxymethylenether erzeugen. Durch chemische Verfahren können die Syntheseprodukte weiter aufbereitet und für die finale Anwendung optimiert werden.

Damit diese Technologien und die damit erzeugten „e-Fuels“ im Kontext des Klimawandels zu einer CO₂-Reduktion durch Schließen des CO₂-Kreislaufes beitragen können, müssen folgende Gegebenheiten erfüllt sein:

- Der elektrische Strom, der durch die Power-to-X-Technologien in chemischen Energieträgern (Kraftstoffe) gespeichert wird, muss aus erneuerbaren (CO₂-freien) Quellen stammen.
- Das CO₂, welches über die chemischen Prozesse zusammen mit Wasserstoff in die chemischen Energieträger um-

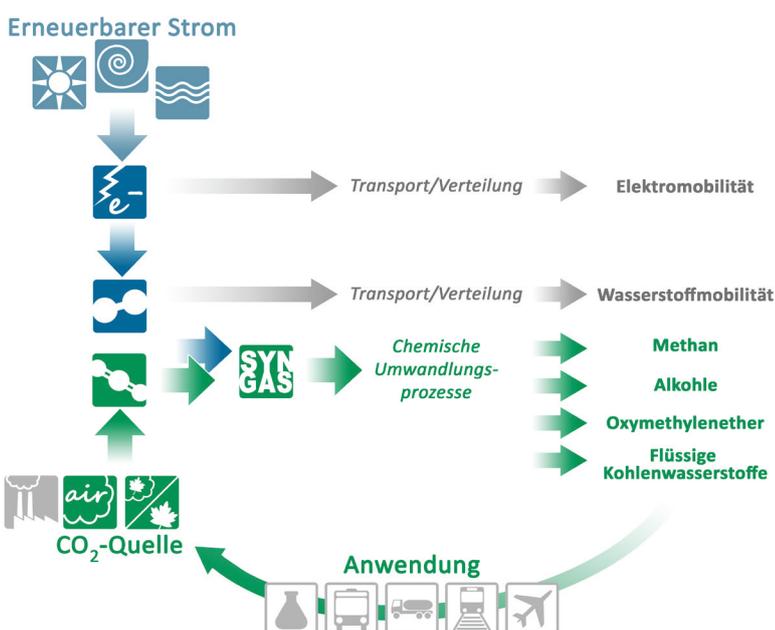


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Power-to-X-Konzepte. Grün hervorgehoben ist der CO₂-Kreislauf bei der Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom und CO₂ aus der Luft oder biogenen Ursprungs. Mit Industrieanlagen als CO₂-Punktquelle führt der P2X-Ansatz hier nicht zu einem CO₂-Kreislauf, jedoch zu einer Netto-Reduktion der CO₂-Emissionen (Quelle: KIT IMVT)

gewandelt wird, muss aus „erneuerbaren“ Quellen stammen. Kurz- bis mittelfristig wird man eventuell auf Industrieprozesse zurückgreifen, deren CO₂-Emissionen (noch) nicht reduziert werden können. Mittel- bis langfristig muss das CO₂ aus der Atmosphäre gewonnen werden, da nur so ein echter CO₂-Kreislauf und damit „Netto-Null“-Emissionen erreicht werden kann.

Sicherlich wird dies nicht sofort und nicht gleichzeitig gegeben sein können – insbesondere bei den ersten industriellen Implementierungen werden hier Kompromisse zu schließen sein, um einen zügigen Markthochlauf zu befördern. Langfristiges Ziel soll und muss jedoch die CO₂-Neutralität sein.

Die Herstellung CO₂-neutraler Kraftstoffe als Ersatz für das fossile Pendant im heutigen Transportsystem wird im Folgenden am Beispiel der sogenannten Fischer-Tropsch (FT)-Kraftstoffe aus dem CO₂ der Luft und erneuerbarem elektrischen Strom dargestellt.

3. Synthese flüssiger Fischer-Tropsch-Kraftstoffe aus Luft und erneuerbarem Strom

3.1 Von Luft und Strom zum FT-Kraftstoff in vier Prozessschritten

Wie erwähnt, stellt die Kopplung der Sektoren „elektrischer Strom“ und „chemische Energieträger“ in den Power-to-X-Konzepten die Basis für die Herstellung von CO₂-neutralen Kraftstoffen dar. Dies lässt sich wie bereits in Abschnitt 2 diskutiert durch unterschiedliche Verfahren realisieren. Die sogenannten Fischer-Tropsch-Kraftstoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie chemisch und physikalisch den heute genutzten fossilen Kraftstoffen sehr ähnlich sind, in einigen Parametern sogar überlegen (z.B. weniger NO_x, Ruß bei Verbrennung). Deshalb können synthetische Fischer-Tropsch-Kraftstoffe sowohl in der vorhandenen Infrastruktur, als auch in den gängigen Antriebskonzepten (Verbrennungsmotor, Turbine) im Wesentlichen direkt eingesetzt werden und so auch deren unschlagbar hohe Energiespeicherdichte genutzt werden.

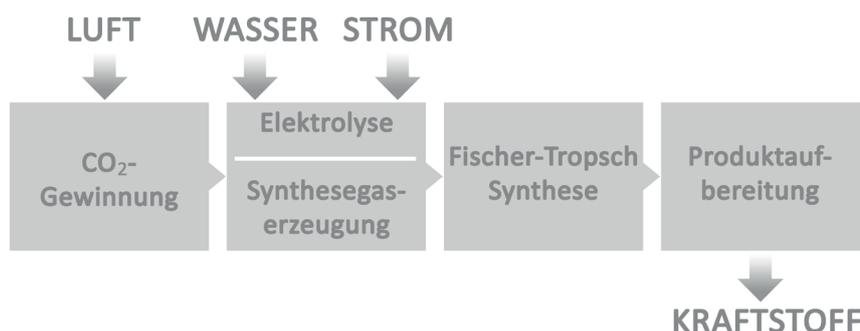
Die Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) ist bereits seit Jahrzehnten bekannt und wird ebenso lang großindustriell umgesetzt. Jedoch basieren die heute realisierten, technischen Syntheseanlagen (bspw. 34.000 Barrel/Tag (Kelly, 2018)) auf der Umsetzung von Synthesegas aus fossilen Quellen: Das H₂/CO-Gasgemisch wird also aus Kohle oder Erdgas gewonnen, weshalb der so hergestellte Kraftstoff alles andere als CO₂-neutral ist. Für die Herstellung von CO₂-neutralen Fischer-Tropsch-Kraftstoffen muss das CO₂ aus nicht fossilen bzw. aus nicht vermeidbaren fossilen Quellen stammen und auch der Wasserstoff oder das Synthesegas auf Basis erneuerbarer Energien gewonnen werden bzw. aus erneuerbaren Quellen stammen. Dies ist an den individuellen Orten nicht in den Mengen möglich, die eine Umsetzung durch Großanlagen ermöglichen würde. Zudem legen die volatilen erneuerbaren Energiequellen und der Aspekt der Stabilisierung des Stromnetzes einen dynamischen Betrieb der Syntheseanlagen nahe, der mit den konventionellen kommerziellen Anlagen nicht erreicht werden kann. Entsprechend ist daher ein komplettes Neudenken der technischen Umsetzung nötig.

Im Folgenden werden die in Abbildung 5 skizzierten vier Prozessschritte, die für die Herstellung von strombasierten CO₂-neutralen Fischer-Tropsch-Kraftstoffen nötig sind, vor diesem Hintergrund kurz erläutert, bevor deren technische Implementierung in den Abschnitten 3.2 und 3.3 dargestellt wird.

Schritt 1: CO₂-Gewinnung

Selbstverständlich emittieren auch synthetische Kohlenwasserstoffe bei ihrer Nutzung als Kraftstoff CO₂. Für die Erreichung der CO₂-Neutralität ist es daher erforderlich, den „Kohlenstoffanteil“ in den Kohlenwasserstoffen aus einer CO₂-neutralen Quelle zu gewinnen. Dies ist letztendlich nur über die Abtrennung des CO₂ aus der Luft möglich. Dafür können neben den natürlichen biologischen Systemen (Biomassennutzung) auch technische Ansätze genutzt werden. Mit dem Begriff „Direct Air Capture“ (DAC) werden technische Lösungen bezeichnet, die das CO₂ direkt aus der Umgebungsluft abtrennen. Hierbei wird die selektive Adsorption von Kohlendioxid an speziell dafür angepassten Filtermate-

Abbildung 5: Die vier Prozessschritte ausgehend von Luft, Wasser und erneuerbarem Strom zum Fischer-Tropsch-Kraftstoff. (Quelle: KIT-IMVT)



rialien genutzt. Die Climeworks AG entwickelt nach diesem Prinzip arbeitende DAC-Anlagen und errichtete 2017 die weltweit erste kommerziell betriebene DAC-Anlage, welche in Hinwil (Schweiz) bis zu 900 Tonnen CO₂ pro Jahr aus der Luft filtert (Climeworks AG, 2017).

Schritt 2: Generierung des Synthesegases

Die Kohlenwasserstoffsynthese gemäß der Fischer-Tropsch-Reaktion erfolgt ausgehend von Synthesegas. Die Erzeugung dieses Gasgemisches kann nach verschiedenen Varianten erfolgen, wobei stets ein Elektrolyseschritt involviert ist. Zwei dieser Varianten sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

a) Wasserelektrolyse und rückwärtige Wassergaskonvertierung
Wasserstoff lässt sich effizient mittels Wasserelektrolyse herstellen. Hier findet die Umwandlung von elektrischer Energie in chemische Energie statt. Zusammen mit dem z.B. in Schritt 1 gewonnenen CO₂ lässt sich in einem chemischen Verfahren, der sogenannten rückwärtigen Wassergaskonvertierung (RWGS), das Synthesegas erzeugen. Dabei wird ein Teil des Wasserstoffs verbraucht und in Wasser zurückverwandelt. Die Reaktion ist endotherm, weshalb sie zur Erreichung hoher Umsatzgrade bei hohen Temperaturen und unter Zufuhr von Wärmeenergie durchgeführt werden muss.

b) Hochtemperatur-Co-Elektrolyse von CO₂ und Wasserdampf
Alternativ zur Wasserelektrolyse lässt sich das Synthesegas auch direkt in einem Schritt, der sogenannten Hochtemperatur-Co-Elektrolyse, auf elektrolytischem Weg aus Wasserdampf und CO₂ gewinnen. Hier entfällt also der o.g. RWGS-Schritt. Diese vergleichsweise neue Elektrolysetechnologie wurde von der Firma Sunfire GmbH Anfang 2019 erstmals im Rahmen eines Testbetriebs von > 500 h auf Systemebene demonstriert (Sunfire GmbH, 2019).

Schritt 3: Fischer-Tropsch-Synthese

Bei der Fischer-Tropsch-Synthese bilden sich unter starker Wärmefreisetzung aus dem Synthesegas Kohlenwasserstoffketten unterschiedlicher Kettenlänge. Das Produktspektrum reicht von kurzen Ketten, die dementsprechend gasförmig vorliegen (C₁-C₄), über flüssige Produkte (Zielfraktion für Kraftstoffe: C₅-C₂₀) bis hin zu Wachsen (C₂₀₊), die unter Umgebungsbedingungen fest sind. Die hohe Exothermie der Reaktion erfordert eine chemische Reaktortechnologie, die diese Wärme effektiv aus dem Reaktionsraum abführen kann, um so die Reaktionstemperatur im optimalen Bereich zu halten. In den o.g. großtechnischen Anlagen wird dies z.B. dadurch bewerkstelligt, dass die Reaktion in einem sogenannten Rohrbündelreaktor durchgeführt wird, in denen die Reaktionswärme durch siedendes Wasser, das die mit Katalysator gefüllten Rohre umspült, entzogen wird. Alternativ wird der

Katalysator in einem sogenannten Blasensäulenreaktor im flüssigen Produkt fein verteilt eingesetzt, in dem die gasförmigen Edukte als Gasblasen aufsteigen und die Reaktionswärme von der flüssigen Phase aufgenommen und über Wärmetauscher, die nach einem ähnlichen Prinzip arbeiten, abgetrennt wird. Die Reaktionsbedingungen werden in der Regel so gewählt, dass nur ein begrenzter Umsatz erreicht wird (Reduktion der Wärmefreisetzung auf Kosten der sogenannten Raum-Zeit-Ausbeute). Die großtechnischen Ansätze sind nur bedingt zu kleineren Kapazitäten hin skalierbar und so für die Umsetzung des Verfahrens im beschriebenen Kontext nicht zielführend. Alternativ wurden ultrakompakte, hocheffiziente chemische Reaktoren vorgeschlagen, durch deren spezielles Reaktordesign sich die Möglichkeit eröffnet, auch kleinere Mengen an Synthesegas hocheffizient umzusetzen, die Reaktion dynamisch zu betreiben und die Reaktionswärme in Form von Dampf aus dem System auszukoppeln und in der Prozesskette zu nutzen (siehe z.B. (Loewert, et al., 2019)). Intensivierte chemische Reaktortechnologien auf Basis der Mikroverfahrenstechnik bietet z.B. die Firma Ineratec GmbH in modularen chemischen Anlagen für unterschiedliche Syntheserouten an.

Schritt 4: Produktaufbereitung durch hydrierende Spaltung und Isomerisierung

Das Produktspektrum der Fischer-Tropsch-Synthese ist wie erwähnt durch die Charakteristik der chemischen Reaktion vorgegeben und nur in Grenzen beeinflussbar. Um die Ausbeute an flüssigen Produkten (C₅-C₂₀) zu erhöhen, lässt sich die Länge der Kohlenwasserstoffketten der Wachphase durch das sogenannte hydrierende Spalten an einem Katalysatormaterial reduzieren und so die Menge an flüssigem Produkt erhöhen. Die flüssigen Produkte aus der Fischer-Tropsch-Synthese bzw. der hydrierenden Spaltung stellen noch keinen normgerechten Kraftstoff dar. Hierfür sind noch finale Aufbereitungsschritte notwendig: Bei der sogenannten Isomerisierung werden in die linearen Kohlenwasserstoffketten Verzweigungen eingebracht, was u.a. die Klopffestigkeit der Kraftstoffe erhöht (Erhöhung der Oktanzahl). Da beide Aufbereitungsschritte auch bei der Herstellung von konventionellen Kraftstoffen aus Rohöl erfolgen, lassen sich diese auch in den etablierten Raffinerien durchführen.

3.2 Umsetzung in modularen, dezentralen Anlagen

Studien sagen voraus, dass der Anteil erneuerbarer Energie in der Stromproduktion in Deutschland von 178 TWh in 2015 auf mindestens 475 TWh in 2050 zunehmen wird (Prognos/DBFZ/UMSICHT, 2018). Diese Änderungen im Energiesystem hin zu mehr Nachhaltigkeit beinhalten einen dramatischen Wechsel weg von der Stromproduktion in zentralisierten, fossil-betriebenen Kraftwerken hin zu dezentra-

len Anlagen zur Gewinnung von erneuerbarem Strom überwiegend aus Windenergie und Solarstrahlung, wie schon in Abschnitt 1 erläutert. Konsequenterweise wird dadurch auch ein dezentraler Ansatz für die Nutzung und Speicherung der erneuerbaren elektrischen Energie benötigt, der auch mit der natürlichen Fluktuation bei der Stromproduktion aus diesen erneuerbaren Quellen umgehen kann. Gleiches gilt für erneuerbare elektrische Energie, die infolge mangelnder Transportkapazität im Stromnetz oder aufgrund mangelnder Nachfrage nicht immer in dem Umfang genutzt werden kann, in dem sie zur Verfügung steht. Das führt dazu, dass Stromerzeugungsanlagen abgeschaltet werden, da entsprechende Speicher fehlen. Insbesondere der Einfluss der jahreszeitlichen Schwankungen wird zukünftig eine Speicherung der erneuerbaren Energie über Wochen bis Monate notwendig machen (siehe auch Abbildung 1). Durch den überwiegend dezentralen Charakter von Biogasanlagen, Windturbinen, Photovoltaik- und Wasserkraftanlagen können dezentrale, modulare Power-to-Fuel-Anlagen einen dringend benötigten Lösungsweg zur Speicherung großer Mengen erneuerbarer Energie darstellen.

Neben dem erneuerbaren Strom fallen auch Treibhausgase im großen Umfang dezentral an, u.a. als Abfallprodukte von Industrieprozessen. Statt diese Gase „ungenutzt“ in die Atmosphäre zu entlassen, könnten sie zukünftig als Rohstoff genutzt und vor Ort in speicherbare chemische Energieträger umgewandelt werden.

Ein wichtiger Schritt bei der dezentralen Umwandlung ist die Standardisierung der Module der verschiedenen in Abschnitt 3.1 beschriebenen Einzeltechnologien sowie die Anpassung und der Abgleich der Schnittstellen zwischen den Verfahrensschritten von der CO₂-Gewinnung über die Synthesegaserzeugung bis zur chemischen Synthese. Nur dadurch können Synergien wie die Verwertung der anfallenden Prozesswärme aus der Fischer-Tropsch-Synthese oder der Synthesegaserzeugung innerhalb der Prozesskette gewinnbringend umgesetzt und Energieeffizienzpotentiale realisiert werden. Das Ergebnis ist eine integrierte Power-to-Fuel-Anlage, die mehrere Module intelligent verknüpft. Die Modularisierung ermöglicht auch eine stärkere Flexibilisierung gegenüber Einstrang-Großanlagen, z.B. bezüglich Durchsatzvariationen, schnellen An- und Abfahrprozessen und Notabschaltungen. Sie lassen sich auch vergleichsweise einfach rekonfigurieren, z.B. durch „Updaten“ eines Moduls, und so stets dem neuesten technischen Fortschritt, z.B. durch effizientere Materialien und Komponenten, anpassen.

Solche Module können dann gemeinsam von standardisierten Produktionsprozessen profitieren, wodurch Kostenreduktionspotentiale bei der Fertigung gehoben werden können. Dadurch lassen sich perspektivisch kostengünstige Anlagen auch für kleinere CO₂-Quellen darstellen. In diesem Zusammenhang sei auch auf den vor kurzem zur Diskussion gestellten visionären Ansatz der CO₂-Gewinnung in Lüftungs- und Klimaanlage von Gebäuden mit vor-Ort-Umwandlung des abgetrennten CO₂ in flüssige Kraftstoffe hingewiesen,

der weitere Synergien mit sich bringen könnte (Dittmeyer, Klumpp, Kant, & Ozin, 2019).

Die Serienfertigung der Module für solche Anlagen in großen Stückzahlen würde Finanzierungs- und Investitionshürden reduzieren und die Markteinführung dieser disruptiven Technologie beschleunigen.

3.3 Erfolgreiche Schritte im Versuchsfeld

Wie eine energieeffiziente Kopplung einzelner Verfahrensschritte bewerkstelligt werden kann, wurde erfolgreich im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF geförderten Kopernikus-Projektes „Power-to-X“ demonstriert. Die notwendigen chemischen Prozessschritte haben die Partner Climeworks AG, Sunfire GmbH, Ineratec GmbH und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in einer vollintegrierten Versuchsanlage zusammengeschlossen (siehe Abb. 6). Der gekoppelte Dauerbetrieb wurde im August 2019 erreicht und somit das Funktionsprinzip validiert. Die Technologiekombination zeigt eine optimale und nahezu vollständige Ausnutzung des eingesetzten Kohlendioxids sowie den größtmöglichen energetischen Wirkungsgrad auf, da die Stoff- und Energieströme intern recycelt werden. Die Versuchsanlage kann rund 10 Liter Kraftstoff am Tag produzieren. Die Technologie wird in der im September 2019 beginnenden zweiten Phase des Kopernikus-Projektes auf eine Produktionskapazität von 200 Litern pro Tag hochskaliert, was einer Elektrolyseleistung von etwa 150 kW entspricht, bevor der Schritt in den Megawattbereich gegangen wird. Mit dem dargelegten Prinzip wird ein Wirkungsgrad der gesamten Prozesskette von etwa 60 % erreicht, also 60 % der eingesetzten erneuerbaren elektrischen Energie sind als chemische Energie im flüssigen Kraftstoff gespeichert.

Die oben genannte nächstgrößere Ausbaustufe der chemischen Reaktortechnologie von Ineratec GmbH wurde im Rahmen des sogenannten „Energy Lab 2.0“ der Helm-

Abbildung 6: Weltweit erste integrierte Power-to-Liquid (PtL) Versuchsanlage zur Synthese von Kraftstoffen aus dem Kohlendioxid der Luft. (Quelle: Projektteam: Climeworks AG, Sunfire GmbH, Ineratec GmbH, Karlsruher Institut für Technologie. Patrick Langer, KIT)



holtz-Gemeinschaft bereits realisiert. Am Campus Nord des KIT wurde in diesem Jahr ein containerbasierter Anlagenverbund zur Synthese von 200 bis 300 Liter Fischer-Tropsch-Produkt pro Tag aus erneuerbarer elektrischer Energie und CO₂ aufgebaut und wird derzeit in Betrieb genommen. Der Wasserstoff wird hier durch einen PEM-Elektrolyseur der Firma Siemens erzeugt, das CO₂ wird gegenwärtig in einem Speichertank flüssig vorgelegt. Erneuerbarer Wasserstoff und CO₂ werden in den Synthesecontainer (Abbildung 7) geleitet, wo im ersten Reaktionsschritt (siehe auch Abschnitt 3.1) daraus an einem industriellen Katalysator reaktionsfähiges Synthesegas erzeugt wird. Im zweiten Reaktionsschritt wird dieses Synthesegas über die Fischer-Tropsch-Synthese in den Kraftstoff umgewandelt. In der Anlage ist erstmalig eine Standard-Reaktoreinheit von Ineratec integriert, die bei einer äußerst kompakten Größe von gerade einmal 50 cm x 60 cm x 80 cm die genannte Produktionsleistung von 200 bis 300 Litern Kraftstoff pro Tag besitzt.

Aufgrund der intensivierten chemischen Reaktortechnologie auf Basis der Mikroverfahrenstechnik können Anlagenkapazitäten mit einer Produktionsleistung von bis zu 350 Tonnen Kraftstoffe pro Jahr – dies entspricht einer Elektrolyseleistung von ungefähr 1 MW – immer noch im Containermaßstab realisiert werden. Durch die Standardisierung bestehender Module können insbesondere im kleineren bis

Abbildung 7: Containerbasierte Anlage zur Synthese von 200 bis 300 Liter Fischer-Tropsch-Produkt pro Tag aus CO₂ und Wasserstoff im Energy Lab 2.0 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). (Quelle: Ineratec GmbH)



mittleren Maßstab schnell und kostengünstig Anlagen aufgebaut werden. Die Ineratec GmbH verfolgt dabei den Ansatz, schlüsselfertige Kompaktanlagen in Containergröße zu realisieren, die Anlagen im Ganzen zu transportieren und dann weltweit dezentral einzusetzen – dort, wo erneuerbarer Strom oder Treibhausgase vorhanden sind. Durch die erfolgreiche Skalierung in den Megawattmaßstab sind die Kompaktanlagen bei einer industrierelevanten Kapazität angekommen. Höhere Kapazitäten sind aufgrund der Modularität ebenfalls darstellbar, unter Beibehaltung der benötigten technischen Schnittstelle zur jeweils verwendeten Elektrolyseeinheit. Die Skalierung der Anlagen, und somit der Produktionsmenge, erfolgt dabei über eine Vervielfältigung (sog. Numbering-Up) und nicht über eine klassische Skalierung der Größe (sog. Scale-Up). Ein nicht zu vernachlässigender Vorteil ist, dass die Anlagenmodule platzsparend in bereits vorhandene und zukünftig zu realisierende Erneuerbare-Energie-Parks integriert werden können. Es hat sich bereits mehrfach gezeigt, dass dadurch Genehmigungsprozesse deutlich schneller und kostengünstiger durchgeführt werden können. Dies ist insbesondere wichtig für den momentan stattfindenden Markthochlauf der erneuerbaren synthetischen Kraftstoffe.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Für eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes des Verkehrssektors bis hin zur Erreichung von „Netto-Null“ werden signifikante Mengen CO₂-neutraler synthetischer Kraftstoffe benötigt. Gekoppelt mit der Synthesegaserzeugung aus CO₂ und erneuerbarem Wasserstoff bietet die Fischer-Tropsch-Synthese einen Weg, um solche Kraftstoffe herzustellen. Durch den Einsatz modularer und dadurch einfach skalierbarer Prozesstechnologien, sowie durch intelligente Verschaltung der Einzelstufen zu stoff- und wärmeintegrierten Prozessketten lassen sich, wie am Beispiel der im Rahmen des Kopernikus-Projekts „Power-to-X“ entwickelten Technikumsanlage gezeigt, CO₂-neutrale Fischer-Tropsch-Kraftstoffe effizient herstellen. Die technische Realisierbarkeit ist heute schon belegt – Demonstrationsanlagen werden in den nächsten Jahren auch die Skalierung in den industriell relevanten Größenbereich zeigen. Die Modularität der eingesetzten Technologien ermöglicht eine gute Skalierbarkeit der gesamten Prozesskette und begünstigt dadurch einen schnellen Markthochlauf. Die Technologie ist exportfähig, die Anlagen können nicht nur in Deutschland, sondern auch an anderen Standorten, insbesondere an solchen mit höherem Potenzial für erneuerbare Energien, in Europa und weltweit zum Einsatz kommen. Wie schnell CO₂-neutrale Kraftstoffe vom Markt angenommen werden, wird aber sicherlich auch davon abhängen, welche ordnungspolitischen Maßnahmen ergriffen werden und wie die synthetischen, CO₂-neutralen Kraftstoffe im resultierenden Rahmen betrachtet werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die zur Verfügung gestellten Fördermittel innerhalb des Projekts Kopernikus, P2X: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen – Erforschung, Validierung und Implementierung von ‘Power-to-X’ Konzepten’ sowie den Projektpartnern Climeworks AG und Sunfire GmbH für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2018). Erneuerbare Energien – Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2018). Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende, Berichtsjahr 2016.
- Climeworks AG. (2017). Climeworks – News. Abgerufen am 03. September 2019 von <https://www.climeworks.com/news/>
- Deutscher Wetterdienst. (2018). Pressekonferenz vom 6. März 2018. Abgerufen am 03. September 2019 von www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2018/PK_06_03_2018/pressekonferenz.html
- Deutscher Wetterdienst. (2019). Pressemitteilung „Deutschlandwetter im Sommer 2019“ vom 30.08.2019. Abgerufen am 03. September 2019 von https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2019/20190830_deutschlandwetter_sommer2019_news.html
- Dittmeyer, R., Klumpp, M., Kant, P., & Ozin, G. (2019). Crowd Oil Not Crude Oil. *Nature Communications*, 10:1818. doi:10.1038/s41467-019-09685-x
- DVWG. (2019). *Journal für Mobilität und Verkehr*, Ausgabe 2 „Neue Formen der Mobilität“.
- European Alternative Fuels Observatory. (2019). Marktanteil von Elektrofahrzeugen in Deutschland im Zeitraum der Jahre 2011 bis 2017. Statista. Abgerufen am 06. September 2019 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/784986/umfrage/marktanteil-von-elektrofahrzeugen-in-deutschland/>
- Fraunhofer ISE. (2019). Fraunhofer ISE – Energy Charts. Abgerufen am 03. September 2019 von https://www.energy-charts.de/power_de.htm
- IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. Genf, Schweiz: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.).
- Kelly, G. J. (2018). Fischer-Tropsch Synthesis – Carbon monoxide hydrogenation. In S. D. (Ed.), *Hydrogenation: Catalysts and Processes*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2018). *Verkehr in Zahlen 2018/2019*, 47. Jahrgang (ISBN 978-3-00-061294-7).
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2019). Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland von 2003 bis 2019*. Statista. Abgerufen am 06. September 2019 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/244000/umfrage/neuzulassungen-von-elektroautos-in-deutschland/>
- Loewert, M., Hoffmann, J., Piermartini, P., Selinsek, M., Dittmeyer, R., & Pfeifer, P. (2019). Microstructured Fischer-Tropsch Reactor Scale-up and Opportunities for Decentralized Application. *Chemical Engineering and Technology*. doi:10.1002/ceat.201900136
- NASA. (2019). NASA Global Climate Change. Abgerufen am 03. September 2019 von <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>
- Preuster, P., Papp, C., & Wasserscheid, P. (2017). Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC): Toward a Hydrogen-free Hydrogen Economy. *Accounts of Chemical Research*, 50(1), S. 75-85.
- Prognos/DBFZ/UMSICHT. (2018). Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende.
- Sunfire GmbH. (2019). Pressemitteilung vom 15.01.2019. Abgerufen am 03. September 2019 von <https://www.sunfire.de/de/unternehmen/news/detail/durchbruch-fuer-power-to-x-sunfire-nimmt-erste-co-elektrolyse-in-betrieb-und-startet-die-skalierung>
- Umweltbundesamt. (2014). Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Von <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050> abgerufen
- Umweltbundesamt. (2019). Erneuerbare Energien in Deutschland 2018 – Daten zur Entwicklung im Jahr 2018 (ISSN 2363-829X).

Autorenangaben

Dr.-Ing. Michael Klumpp

Institut für Mikroverfahrenstechnik und Institut für Katalyseforschung und -technologie am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
michael.klumpp@kit.edu

Dr.-Ing. Tim Böltken

INERATEC GmbH
Siemensallee 84
76187 Karlsruhe
tim.boeltken@ineratec.de

Dipl.-Ing. Alexander Gräfenhahn

Institut für Mikroverfahrenstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
alexander.graefenhahn@kit.edu

Michael Riedinger M. Sc.

Institut für Mikroverfahrenstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
michael.riedinger@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Peter Pfeifer

Institut für Mikroverfahrenstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
peter.pfeifer@kit.edu

und
INERATEC GmbH
Siemensallee 84
76187 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Roland Dittmeyer

Institut für Mikroverfahrenstechnik und Institut für Katalyseforschung und -technologie am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
roland.dittmeyer@kit.edu