

# Innovative Synthesegas-Gewinnung zur Herstellung CO<sub>2</sub>-neutraler Flugtreibstoffe

Tabea J. Stadler und Peter Pfeifer

Um das im UN-Klimaabkommen vereinbarte Ziel zur Begrenzung der globalen Erderwärmung zu erreichen, setzt die EU im Verkehrssektor auf eine kohlenstoffneutrale Kreislaufwirtschaft. Insbesondere im Bereich des Lufttransports sind flüssige Kraftstoffe langfristig nicht ersetzbar. Eine CO<sub>2</sub>-neutrale Alternative zu fossilen Treibstoffen bieten hier synthetische Kraftstoffe. Diese chemischen Energieträger können durch Power-to-Liquid-Verfahren aus CO<sub>2</sub>, Wasser und Strom aus regenerativen Quellen erzeugt werden. Bei der Verbrennung führen sie aufgrund des geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislaufs nicht zu einem weiteren Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration.

## CO<sub>2</sub>-neutrale flüssige Treibstoffe im Transportsektor

Die Menschheit braucht Energie in vielen Formen. Gestern, heute und morgen. Eine zentrale Frage dabei lautet: Ist unser heutiger Umgang mit den vorhandenen Energieressourcen auch morgen noch vertretbar, obwohl wir die Konsequenzen unseres gestrigen Handelns kennen?

Diese Frage ist insbesondere im Zusammenhang mit dem Klimawandel von Bedeutung. Die zunehmende Nutzung fossiler Brennstoffe als Energieträger hat im vergangenen Jahrhundert zu einer merklichen Zunahme der atmosphärischen Konzentration des Treibhausgases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) geführt. Der hierdurch bedingte Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur hat teilweise drastische Klimaveränderungen und die Zunahme extremer Wetterereignisse zur Folge. Um die vom Menschen verursachten Auswirkungen in der Zukunft abzumildern, muss die oben genannte Frage mit innovativen Lösungsansätzen beantwortet werden.

Es gilt einerseits zu klären, für welchen Zweck die vorhandenen Energieressourcen eingesetzt werden und andererseits, auf welche Art und Weise wir sie nutzen. Diese gesellschaftlichen und technischen Herausforderungen des heutigen Energieverbrauchs sind stark mit politischen Entscheidungen und Maßnahmen verknüpft. Ein wegweisender Meilenstein ist das vor rund fünf Jahren von fast 200 Ländern beschlossene UN-Klimaabkommen von Paris [1]. Die unterzeichnenden Parteien verpflichten sich, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu

halten und: enorme weitere Bemühungen anzustellen, um das als realistisch betrachtete 1,5 °C-Ziel zu erreichen. Berechnungen des Weltklimarates zufolge kann dieses Ziel nur dann noch erreicht werden, wenn die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2050 zurückgehen und schließlich einen netto-Wert von 0 erreichen [2].

Hierfür müssen in allen Energiesektoren drastische Veränderungen vollzogen werden. Dies betrifft insbesondere den Transportsektor, welcher für etwa ein Viertel der europäischen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich ist [3]. Denn während die energiebedingten Emissionen in Deutschland in den vergangenen 30 Jahren insgesamt um ca. 30 % gesunken sind, konnte bei den darin enthaltenen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr lediglich ein Rückgang von weniger als 1 % verzeichnet werden [4]. In dem 2016 veröffentlichten Mobilitätsstrategie-Papier hat

die EU daher beschlossen, die Mobilitätsbedürfnisse von Menschen und Gütern zukünftig durch eine möglichst kohlenstoffneutrale Kreislaufwirtschaft sicherzustellen [3]. Diese Strategie umfasst auch die Erforschung synthetischer Kraftstoffe aus CO<sub>2</sub>, um Energie für die Bereiche bereitzustellen, die von flüssigen Kraftstoffen abhängig bleiben. Hierzu zählt auch der Luftfahrtsektor, der aufgrund der volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte von Batterien nicht elektrifizierbar ist. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der Horizon 2020-Initiative der EU das Projekt „Kerogreen“ gestartet.

## Das „Kerogreen“-Projekt

Im Projekt „Kerogreen“ entwickeln sechs Partner aus Industrie und Forschung eine innovative Prozessroute zur Gewinnung von CO<sub>2</sub>-neutralem Flugkraftstoff [5]. Ziel des

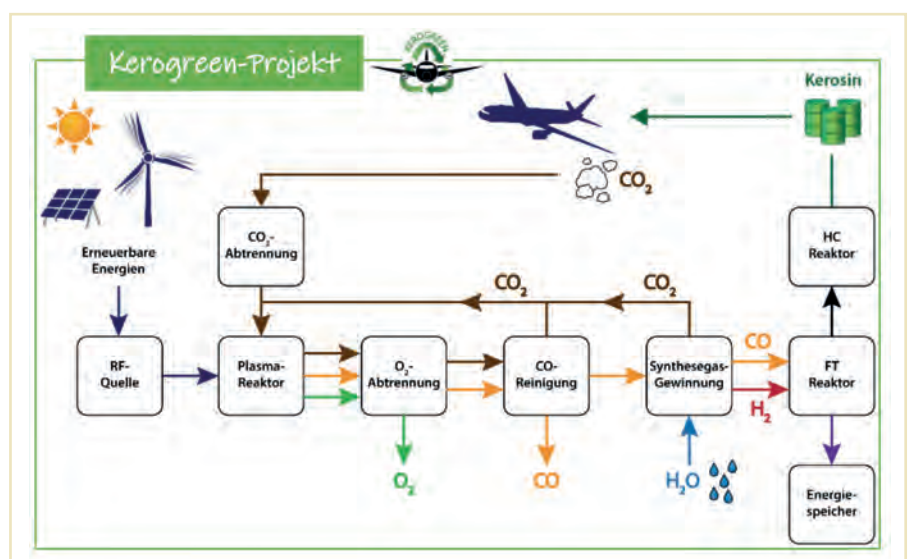


Abb. 1 „Kerogreen“-Prozessschema

Quelle: DIFFER 2020

Projekts ist der Betrieb einer Demonstrationsanlage zur Produktion von 100 g/h Kerosin. Die containerbasierte Anlage wird derzeit am Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) aufgebaut.

Die „Kerogreen“-Prozessroute basiert auf einem sog. Power-to-Liquid (PtL)-Konzept. Das synthetische Kerosin wird ausgehend von Wasser, CO<sub>2</sub> aus der Luft und Strom aus erneuerbaren Energiequellen produziert. Das bei der Verbrennung des Treibstoffs emittierte CO<sub>2</sub> entspricht bilanziell der zu dessen Produktion eingesetzten CO<sub>2</sub>-Menge. Daher entsteht ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf, welcher nicht zu einem Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration führt. Im Gegensatz zu Kerosin fossilen Ursprungs enthält der synthetisierte Kraftstoff keinen Schwefel und keine Aromaten – so entsteht im Flugbetrieb weniger Ruß und NO<sub>x</sub>. Die existierende Infrastruktur für Lagerung, Transport, Betankung der Flugzeuge und auch die Triebwerkstechnik kann unverändert genutzt werden. Die „Kerogreen“-Technologie ist modular, skalierbar und lastflexibel. So eignet sie sich für dezentrale Produktionsanlagen. Diese können in abgelegenen Gebieten, z.B. in der Nähe von Offshore-Windkraftanlagen oder Solarparks, errichtet werden.

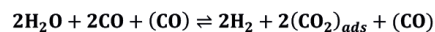
In Abb. 1 ist der „Kerogreen“-Prozess schematisch dargestellt. Die CO<sub>2</sub>-Gewinnung soll vorrangig über „CO<sub>2</sub> Direct Air Capture“ (DAC) – also direkt aus der Luft – erfolgen. Im Gegensatz zu konventionellen PtL-Ansätzen beginnt der Prozess nicht mit der Wasserspaltung durch Elektrolyse: Hier wird zuerst CO<sub>2</sub> im Plasma zu Kohlenmonoxid (CO) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) gespalten. O<sub>2</sub> wird mittels einer Elektrolytzelle und nicht umgesetztes CO<sub>2</sub> durch Druckwechseladsorption (CO-Reinigung) abgetrennt. Das gereinigte CO wird dann mit Wasserdampf zur Herstellung von Synthesegas genutzt; dabei fällt nochmals etwas Kohlendioxid an, welches wieder in den Plasmareaktor rückgeführt wird. Das Synthesegas, ein Gemisch bestehend aus CO und H<sub>2</sub>, dient schließlich als Ausgangsstoff für die Fischer-Tropsch-Synthese (FTS). Im FTS-Reaktor werden Kohlenwasserstoffe mit unterschiedlicher Kettenlängenverteilung erzeugt. Da nur Kohlenwasserstoffe mit ca. 10 bis 14 C-Atomen im Kerosin genutzt werden, können längere Kohlenwasserstoffe

im Hydrocracking-Reaktor (HC) katalytisch gespalten werden. Hierdurch wird der Kerosinanteil stark erhöht.

### Teilaspekt: kontinuierliche Synthesegasherstellung

Am IMVT wird der Prozessschritt der Synthesegas-Gewinnung mit besonderem Augenmerk erforscht: Soll dieser Teilaspekt und damit auch der Gesamtprozess optimiert werden, bietet sich die Integration von Reaktion und CO<sub>2</sub>-Abtrennung in einem Schritt an. Damit kann einerseits CO<sub>2</sub> zurück ins Plasma geführt und andererseits das Synthesegas möglichst in Reinform für die FTS-Stufe bereitgestellt werden. Ermöglicht wird dies in einem sorptionsverbesserten Wassergas-Konvertierungsreaktor („sorption enhanced watergas shift“, kurz SEWGS).

Die Umsetzung von CO mit Wasserdampf zu Synthesegas, einer Mischung aus H<sub>2</sub> und CO, findet dabei an einem Kupfer-Katalysator bei 250 °C und 8 bar nach der Brutto-Reaktionsgleichung



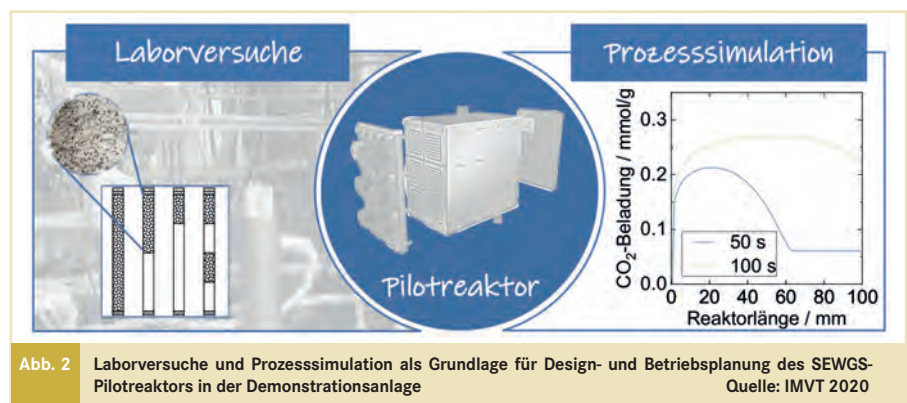
statt. Das aus CO gebildete CO<sub>2</sub> wird insitu, also im Reaktionsraum, durch Adsorption an einem hochselektiven, temperaturbeständigen und stabilen Sorbens abgetrennt. Dazu werden Katalysator- und Sorbenspartikel gleicher Größe in der Reaktionskammer eines Festbettreaktors gemischt. Durch die Entfernung von CO<sub>2</sub> wird das Reaktionsgleichgewicht zur Produktseite hin verschoben. Das gewünschte H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis wird mittels CO-Überschuss eingestellt. Da das Sorbens nach einer gewissen Zeit gesättigt ist und kein CO<sub>2</sub> mehr aufnehmen kann, muss es regeneriert

werden. Dies geschieht mit Wasserdampf, der das CO<sub>2</sub> vom Sorbens entfernt, damit es zum Plasmareaktor zurückgeführt werden kann.

Um kontinuierlich Synthesegas zu erzeugen, ist ein Prozess mit mehreren Reaktionskanälen notwendig, denn die Regeneration dauert länger als die Beladung. Das Besondere an dem IMVT-Konzept ist, dass parallele mikrostrukturierte Reaktionskanäle genutzt werden. In diesen Kanälen kann die Verweilzeit der Reaktionsprodukte definiert gesteuert und die Energie für die Desorption durch die Energie aus der Reaktion von benachbarten Reaktionskanälen bereitgestellt werden. Für das Design und den Betrieb einer solchen mikrostrukturierten SEWGS-Reaktoreinheit in der „Kerogreen“-Demonstrationsanlage wurden sowohl Versuche im Labor als auch eine Prozesssimulation durchgeführt (Abb. 2).

In den Laborversuchen wurden geeignete Prozessparameter ermittelt. Es wurde gezeigt, dass die Zeit bis zum CO<sub>2</sub>-Durchbruch, also dem Messen einer CO<sub>2</sub>-Konzentration im Produktgas, durch Unterteilung des Reaktionskanals in unterschiedlich befüllte Zonen verlängert werden kann. Anstelle einer homogenen Mischung von Sorbens- und Katalysatorpartikeln hat sich eine Katalysatoranreicherung in der Einlasszone des Kanals als vorteilhaft erwiesen. So kann die Produktionsdauer eines CO<sub>2</sub>-freien Stroms aus einem Kanal verlängert werden.

Für die Prozesssimulation wurde ein dynamisches Modell in der Software Matlab® entwickelt. Das Modell liefert Informationen über den räumlich und zeitlich abhängigen Prozess im Inneren des Reaktors. Reaktion und Adsorption beziehungsweise Desorption werden in einem isothermen 1D-Pfropfstrom-



reaktor durch ein System aus partiellen Differentialgleichungen beschrieben. Mit Hilfe des Modells kann berechnet werden, wie die CO<sub>2</sub>-Front mit zunehmender Betriebszeit im Reaktionskanal voranschreitet. Das Modell soll es ermöglichen, den Betriebsablauf im SEWGS-Reaktor zu optimieren und Aufschluss über die erforderliche zyklische Verschaltung der parallelen Reaktionskanäle zu geben.

## Ausblick

Bereits im April 2021 soll die „Kerogreen“-Demonstrationsanlage fertig aufgebaut sein und mit der Inbetriebnahme begonnen werden. Dann wird sich zeigen, wie gut die Labor-

ergebnisse und die damit erzeugten Vorhersagen zum SEWGS-Reaktor sind. Insgesamt wird die Anlage die weltweit erste ihrer Art sein, die synthetisches Kerosin aus einem Spaltprozess von Kohlendioxid erzeugt.

## Quellen

- [1] United Nations: Paris Agreement (2015).
- [2] IPCC: 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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (2018).
- [3] European Commission: A European Strategy for Low-Emission Mobility, SWD(2016) 244.

[4] Umweltbundesamt: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2018 (2020).

[5] [www.kerogreen.eu](http://www.kerogreen.eu)

*T. J. Stadler, Prof. Dr.-Ing. P. Pfeifer, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT), Eggenstein-Leopoldshafen  
 tabea.stadler@kit.edu  
 peter.pfeifer@kit.edu*

## Acknowledgement

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme under GA-Nr. 763909

**VDE**  
VERLAG

Technik. Wissen. Weiterwissen.

**NEU**

Jürgen Klöpper  
**Ladeinfrastruktur**  
 für Elektromobilität im privaten  
 und halböffentlichen Bereich  
 2., überarbeitete und erweiterte Auflage

**Mit Technikwissen Energie sicher nutzen:  
 Ladeinfrastruktur für Elektromobilität im privaten  
 und halböffentlichen Bereich**

- Das Buch gibt Unterstützung bei Beratung und Auswahl des richtigen Ladepunkts bzw. der Ladestation
- Neu: Informationen zu eichrechtkonformen Ladesäulen
- Einarbeitung aller neuen Regelungen und Vorschriften
- Vorstellung der Komponenten einer Ladestation mit Hinweisen zur fachgerechten Installation

2., überarb. und erw. Auflage 2021  
 erscheint im Februar 2021  
 ca. 175 Seiten  
 ca. 34,- € (Buch/E-Book)  
 ca. 47,60 € (Kombi)

Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten. Sowohl das E-Book als auch das Kombiangebot (Buch + E-Book) sind ausschließlich auf [www.vde-verlag.de](http://www.vde-verlag.de) erhältlich. Dieses Buch können Sie auch in Ihrem Onlineportal für DIN-VDE-Normen, der Normenbibliothek, erwerben.

Bestellen Sie jetzt: (030) 34 80 01-222 oder [www.vde-verlag.de](http://www.vde-verlag.de)

Werb.-Nr. 201254