

Kosten und Nutzen strombasierter Kraftstoffe für einen nachhaltigen Luftverkehr

Engl.: Benefits and challenges of Electro-Fuels for future sustainable aviation

Vortragender: Dr.-Ing. Ralph-Uwe Dietrich

Koautoren: Sandra Adelung, Friedemann Georg Albrecht, Stefan Estelmann, Felix Habermeyer, Simon Maier

Einleitung

In der Diskussion um die Reduzierung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors gelangt neben der angestrebten Elektromobilität (auf Basis erneuerbar erzeugten Stroms aus Photovoltaik oder Windstrom) die Bereitstellung alternativer Kraftstoffe aus Biomasse und/oder ebenfalls erneuerbar erzeugtem Strom eine zunehmende Bedeutung. Die Luftfahrt nimmt in dieser Diskussion eine Sonderrolle ein, weil zum einen eine weitgehende Elektrifizierung derzeit nicht möglich scheint und zum anderen die begrenzte Anzahl an Akteuren (Luftfahrtgesellschaften, Flughäfen, Flugzeughersteller) einen überschaubaren, stark reglementierten Transportmarkt darstellt, der als Vorreiter für den Durchbruch alternativer Kraftstoffe dienen könnte.

Im Durchschnitt ist der weltweite Flugverkehr in den letzten Jahrzehnten jährlich um fünf Prozent gewachsen. Die Luftfahrtforschung rechnet auch in Zukunft mit ähnlichen Wachstumsraten. Dieser erhöhte Luftverkehr bringt vor allem wachsende Treibhausgas(THG)-Emissionen mit sich [1].

Die International Air Transportation Association (IATA) will den Luftverkehr von 2020 an ohne eine weitere Zunahme der Treibhausgasemissionen gewährleisten und die Emissionen bis 2050 um 50 Prozent gegenüber dem Jahr 2005 senken [1]. Die Begrenzung der Emissionen ist dringlich, da aus dem Luftverkehrswachstum trotz der erwarteten jährlichen Verbesserung der Brennstoffeffizienz durch umweltfreundlichere Flugzeugkonzepte ein steigender Kerosinverbrauch und damit zunehmende THG-Emissionen resultieren: In den Jahren 2020, 2021, 2022 müssten etwa sechs, zwölf, 18 Millionen Tonnen Kerosin zusätzlich eingespart oder durch einen CO₂-neutralen Treibstoff ersetzt werden, um die angestrebten Ziele zu erreichen [1].

Laut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) und IATA kann dieser Bedarf grundsätzlich mit Biokraftstoffen gedeckt werden. Doch die wesentlichen Fragen zu den Kosten und zum tatsächlich nutzbaren Biomassepotenzial unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien und Nutzungskonkurrenzen bleiben unbeantwortet [2]. Wissenschaftler am Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.) arbeiten an einem transparenten Vergleich der verschiedenen Optionen für synthetisches Kerosin aus Biomasse bzw. aus Ökostrom. Aufgabe der Fachgruppe Alternative Brennstoffe (ABS) ist die standardisierte und vergleichbare techno-ökonomisch-ökologische Bewertung der unterschiedlichen Kraftstoffprozesse. Im folgenden Beitrag soll gezeigt werden, wie diese Bewertungsmethodik bei der Bearbeitung ausgewählter Projekte eingesetzt wird.

Techno-ökonomische Bewertung

Die Herstellung alternativer Kraftstoffe über den Fischer-Tropsch-Pfad ist mit erheblichen Kosten verbunden. Es werden dabei u.a. neue Technologien verwendet, die aufgrund ihrer geringen Technologiereife einen hohen Entwicklungs- und Kapitalaufwand erfordern. Basierend auf den Ergebnissen der ökonomischen Bewertung können Entwicklungspfade priorisiert und der mögliche Nutzen vorgeschlagener Verfahrensverbesserungen quantifiziert werden. Die Berechnung der ökonomischen Kennwerte basiert auf einer standardisierten, jahresspezifischen und transparenten Methodik, die im Software-Tool TEPET implementiert wurde. Zusätzlich schafft eine ökologische Analyse der Kraftstoffherstellungsprozesse eine Vergleichbarkeit im Hinblick auf die Vermeidung der Umweltfolgen und die spezifischen Kosten der THG-Minderung. Besonders der herstellungsbasierte CO₂-Fußabdruck von regenerativ erzeugtem Kerosin steht hier im Fokus der Betrachtungen. Andere ökologische Kategorien wie z.B. die Grundwasserbelastung werden ebenfalls erfasst.

TEPET basiert auf der Investitionskostenschätzung nach Peters et al. [3]. Ausgehend von den Ergebnissen der stationären Prozesssimulation des Herstellungsverfahrens, welche z.B. in der kommerziellen Software ASPEN PLUS erstellt werden kann, wird zunächst die Apparategröße für alle Prozessschritte bestimmt. Die Investitionskosten für diese Apparate können dann im Bezug auf Anlagenkapazität und Investitionskosten eines Referenzapparats bestimmt werden. Skaleneffekte werden mit einem Degressionsfaktor abgebildet. Diese Berechnungsmethodik

entspricht der Klasse III bis IV der AACE International (Association for the Advancement of Cost Engineering), die dieser Klasse eine Prognosegenauigkeit von $\pm 30\%$ zugesteht. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Methodik ist [3], [4], [5] und [6] zu entnehmen.

Vereinfachte ökologische Bewertung

Ein Einsatz von alternativen Kraftstoffen im Verkehrssektor ist nur sinnvoll, wenn die Treibhausgasemissionen in der gesamten Lebenszykluskette von der Gewinnung bis zur Endnutzung deutlich unter den anfallenden Emissionen bei der Nutzung fossiler Kraftstoffe liegen. Derzeit werden die meisten Reduktionsziele für den Verkehrssektor über THG-Minderungsquoten für den eingesetzten Kraftstoff definiert. Ein Beispiel dafür ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz, in dem eine Reduzierung von 4 bzw. 6 % ggü. dem THG-Basiswert $83,8 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{äq}}\text{GJ}^{-1}$ für die Jahre 2017 und 2020 festgeschrieben ist [7]. Auf europäischer Ebene werden Biokraftstoffe auf Basis des EU-Nachhaltigkeitskonzepts bewertet [8]. Zum Erreichen der nationalen Reduktionsziele für den Verkehrssektor können nur Biokraftstoffe angerechnet werden, deren THG-Fußabdruck mindestens 60 % geringer als der o.g. Basiswert ist, was einem Wert von $33,5 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{äq}}\text{GJ}^{-1}$ entspricht [9]. Alternative Kraftstoffe mit einem größeren THG-Fußabdruck sind nicht anrechenbar. Durch die Kombination der ökonomischen und ökologischen Bewertung lassen sich THG-Vermeidungskosten berechnen und mit anderen Technologien zur CO_2 -Vermeidung, z. B. Gebäudesanierung und Aufforstung, vergleichen. Aus volkswirtschaftlicher Sicht können damit die Kosten für das Erreichen bestimmter THG-Minderungsziele berechnet werden.

Eine vereinfachte ökologische Analyse ermittelt die produktionsbedingten THG-Emissionen erneuerbarer Kraftstoffe. Für die verwendeten Rohstoffe und Energiequellen können Referenzgrößen aus der ProBas-Datenbank des Umweltbundesamtes [10] verwendet werden.

Beschreibung der untersuchten Prozessrouten

CO_2 -neutrales Flugbenzin lässt sich in den langfristig geforderten Mengen auf zwei Arten herstellen – entweder auf der Basis von Biomasse oder auf der Basis von CO_2 -neutralem Strom. Als geeignete Kraftstoffsynthese wurde der Fischer-Tropsch-Prozess ausgewählt, da Fischer-Tropsch-Kraftstoffe bereits für den Einsatz in der Luftfahrt als Beimischung zertifiziert sind [11]. Die wichtigsten Prozessschritte sind in Abbildung 1 für jeweils ein BtL-, PBtL- und PtL-

Verfahren dargestellt. Eine genauere Übersicht über die gewählten Prozessverschaltungen und möglichen Alternativen ist in [4] verfügbar. Zur Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen mittels Fischer-Tropsch-Synthese wird ein Synthesegas bestehend aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid, nachfolgend Syngas genannt, benötigt. Die Erzeugung des Syngases hängt von der jeweiligen Wasserstoff- und Kohlenstoffquelle ab.

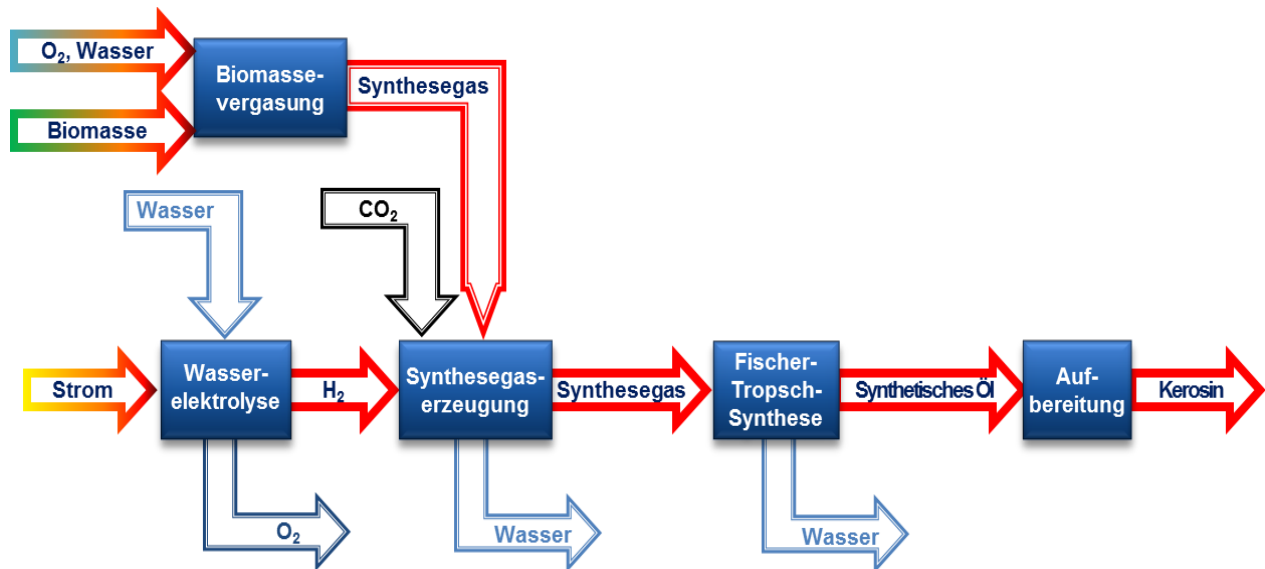


Abbildung 1 Übersicht der untersuchten Fischer-Tropsch Routen

Im BtL-Verfahren wird Biomasse mittels Vergasung sowohl für die Bereitstellung von Wasserstoff als auch von Kohlenstoff verwendet. Bei der Vergasung von Biomasse kann zwischen drei übergeordneten Vergaserkonzepten unterschieden werden: Festbettvergasung (Gleichstrom, Gegenstrom), Wirbelschichtvergasung (stationär, zirkulierend) und Flugstromvergasung. Für einige Vergaserkonzepte, z. B. für die Flugstromvergasung, ist die Aufbereitung der Biomasse durch bspw. Pyrolyse oder Torrefizierung erforderlich. Aufgrund der großen Anzahl von Studien zu diesem Thema wird hier auf eine detaillierte Einführung in die Vergasertechnologie verzichtet und auf verfügbare Literatur verwiesen [12], [13], [14], [15].

Der Syngasstrom wird in der nachfolgenden Wassergas-Shift (WGS)-Reaktion aufbereitet, um den Wasserstoffmangel ($H_2/CO < 1,2$) des Rohgases vor der FT-Synthese ($H_2/CO \approx 2$ erforderlich) auszugleichen. Ein Nachteil der WGS-Reaktion ist, dass ein Teil des aktiven Kohlenstoffes (CO) in CO_2 überführt und ausgeschleust wird, was die Ausnutzung des in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffes verringert.

Beim PtL-Verfahren bilden Wasserstoff und CO₂ die Edukte der Kraftstoffsynthese. Wasserstoff ist durch Wasserelektrolyse in großen Mengen bereitzustellen. Die bedeutendsten Elektrolyseverfahren sind die alkalische Elektrolyse, die Protonenaustauschmembran (*proton exchange membrane*, PEM)-Elektrolyse und die Hochtemperatur-Elektrolyse (*solid oxide electrolyzer cell*, SOEC), wobei der Entwicklungsstand dieser Technologien in der aufgeführten Reihenfolge abnimmt [16]. CO₂ muss zunächst aus der Luft oder aus industriellen Abgasströmen kosten- und energieintensiv abgetrennt werden, wobei die Nutzung von Industrieabgasen wegen höherer CO₂-Konzentrationen Vorteile besitzt. Zur Aktivierung des CO₂ wird die Eduktmischung in der reversen Wassergas-Shift (rWGS)-Reaktion bei hoher Temperatur (>700 °C) in Wasser und Kohlenmonoxid umgewandelt. Ein Vorteil dieses Hochtemperaturreaktors ist, dass zugleich Nebenprodukte der Fischer-Tropsch-Reaktion wie leichte Kohlenwasserstoffe (Methan bis Butan) reformiert werden können, was zu einer Erhöhung der Kraftstoffausbeute führt.

Das PbtL-Verfahren stellt eine Kombination aus dem PtL- und dem BtL-Prozess dar. Durch die Zugabe von Wasserstoff zum Rohgas aus der Vergasung wird der Wasserstoffmangel kompensiert. Das mit Wasserstoff angereicherte Rohgas wird zusammen mit den Nebenprodukten der Fischer-Tropsch-Reaktion aufbereitet.

Die Kraftstoffsynthese basiert auf dem Fischer-Tropsch-Prozess und ist identisch bei allen drei untersuchten Konzepten. Die Hauptreaktionsgleichung der FTS ist in Gl. (1) dargestellt [17].



Großtechnisch werden derzeit drei Reaktortypen eingesetzt: Festbett-, Slurry- und Wirbelschichtreaktoren [18]. Weiterhin wird zwischen Hochtemperatur- und Niedertemperatur-FT-Synthesen unterschieden, wobei die Niedertemperatur-FTS mit Kobaltkatalysator die Ausbeute an Mitteldestillaten erhöht. Alternative Kraftstoffsynthesen sind z. B. das Methanol-to-Gasoline-Verfahren oder die Mixed-Alkohol-Synthese. Allerdings sind diese Verfahren aufgrund der Produktzusammensetzung nicht für die Produktion von Kerosin aus Syngas geeignet und nicht für die Luftfahrt zertifiziert [11].

Die flüssigen Produkte der Fischer-Tropsch-Synthese werden im nachfolgenden Separationsprozess aus der Gasphase abgetrennt, die Wachsfraktion mit hohem Schmelzpunkt wird in einem Hydrocrackerprozess in kurzkettigere Produkte aufgespalten. Nicht umgesetzte

Edukte werden zur FTS zurückgeführt. Andere Restgase können in einem Oxyfuel-Brenner mit dem Sauerstoff aus der Elektrolyse verbrannt werden, um Energie für die endotherme rWGS-Reaktion bereitzustellen und dabei einen CO₂-reichen Abgasstrom zu erhalten, der in das Verfahren zurückgespeist werden kann.

Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

Die ökonomische Bewertung der unterschiedlichen Prozesse ist stark abhängig von den ökonomischen Randbedingungen und Annahmen, die für die Modellierung getroffen wurden. Auf diese soll hier nicht im Einzelnen eingegangen werden. Stattdessen sollen die ökonomischen Ergebnisse anhand einer Sensitivitätsanalyse für die zwei wichtigsten Prozessparameter, Anlagengröße und Strompreis, verglichen werden. In Abbildung 2 sind die Produktionskosten pro Liter FT-Kraftstoff (NPC – net production costs) über dem Strompreisintervall von 20 bis 110 €/MWh und der Anlagengröße im Bereich 25 bis 250 kt/a aufgetragen. In jedem der drei Bereiche ist nur das Verfahren mit den geringsten Herstellungskosten gezeigt.

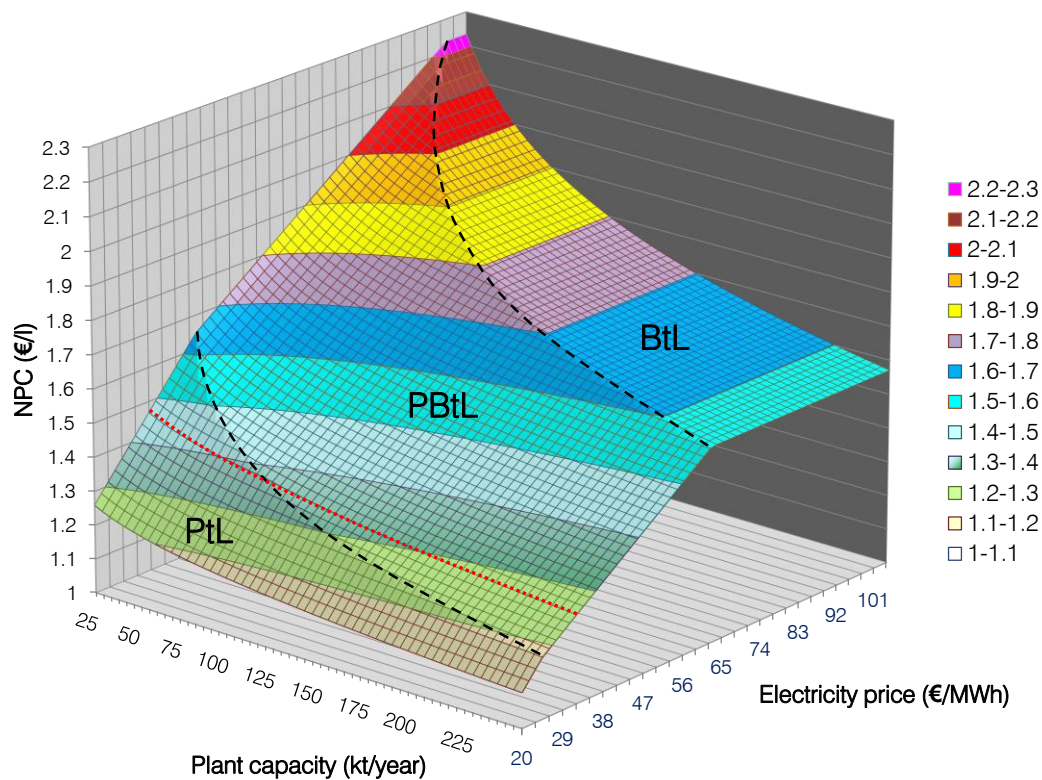


Abbildung 2 Sensitivitätsanalyse der Produktionskosten für PtL, PBtL & BtL über Strompreis und Anlagengröße

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (Abbildung 2) zeigen, dass die Randbedingungen der techno-ökonomischen Bewertung das ökonomisch optimale Verfahren definieren. BtL-Anlagen weisen die geringsten Kraftstoffkosten bei großen Anlagen und hohem Strompreis auf. Bei niedrigem Strompreis können synthetische Kraftstoffe in Kleinanlagen am kosteneffizientesten mit dem PtL-Verfahren produziert werden, wogegen die Reduktion der Investitionskosten durch den Skaleneffekt beim PBtL-Verfahren ein hohes Kostensenkungspotenzial für Großanlagen verspricht.

Ergebnisse der ökologischen Bewertung

Auch bei der ökologischen Betrachtung spielen die simulierten Randbedingungen eine dominierende Rolle. Diese sind im Detail aus [19] zu entnehmen. Hier werden für die verwendeten Rohstoffe, Biomasse und Strom, unterschiedliche Szenarien mit hohem, durchschnittlichem und niedrigem THG-Fußabdruck verglichen. Abbildung 3 zeigt den THG-Fußabdruck der Prozesse PtL BtL und PBtL für diese Szenarien. Zum Vergleich ist der Referenzwert für fossile Kraftstoffe von $83,8 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{äq.}}/\text{MJ}^{-1}$ [7] dargestellt.

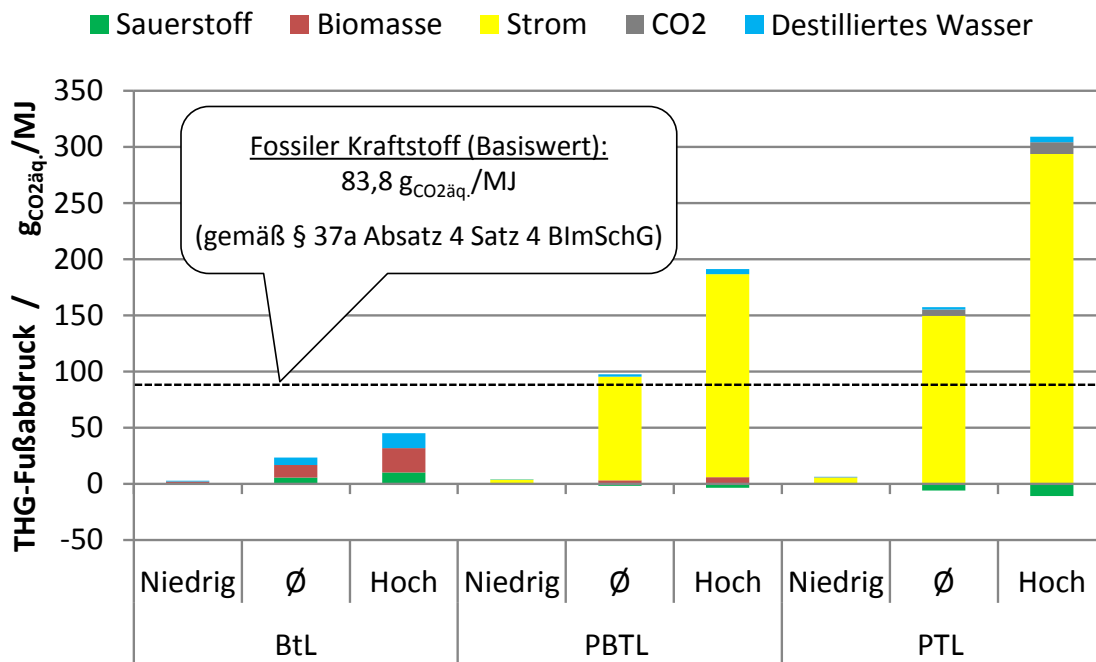


Abbildung 3 THG-Fußabdruck für die drei betrachteten Prozesse bei unterschiedlichen Annahmen für Strommix und Biomasseinzugsradius [19]

Der THG-Fußabdruck der BtL-Verfahren liegt deutlich unter dem Referenzwert für fossile Kraftstoffe. Große Anlagen sind zwar aus kostentechnischer Sicht zu bevorzugen, durch den größeren Biomassebedarf steigen allerdings auch die Transportentfernungen, was sich in höheren THG-Emissionen äußert. Für die strombasierten Kraftstoffe ist die Herkunft des eingesetzten Stroms von großer Bedeutung. Mit reinem Windstrom können Kraftstoffe mit einem sehr geringen THG-Fußabdruck hergestellt werden. Die THG-Bilanz verschlechtert sich deutlich, je mehr fossile Energieträger zur Stromproduktion eingesetzt werden. Mit dem derzeitigen deutschen Strommix (Fall: Hoch) haben die produzierten PBtL- und PtL-Kraftstoffe sogar einen doppelt bzw. dreifach so hohen THG-Fußabdruck im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen. Die Herstellung strombasierter Kraftstoffe erscheint aus ökologischer Sicht daher nur sinnvoll, wenn erneuerbarer Strom genutzt werden kann.

Technologische Weiterentwicklung der Kraftstofferzeugung

Mit den Ergebnissen der techno-ökonomischen sowie ökologischen Bewertung lassen sich die Anforderungen an die zu ändernden Rahmenbedingungen für die Einführung alternativer Kraftstoffe im Flugverkehr abschätzen. Darüber hinaus besteht noch enormer technologischer Entwicklungsbedarf, um die Marktreife der zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren zu erhöhen. Die nachfolgenden Beispiele geben einen Einblick in die Herausforderungen und mögliche Lösungswege.

EU-Projekt COMSYN

Im Rahmen des EU-Projekts COMSYN (www.comsynproject.eu) entwickeln die Projektpartner VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. (Koordinator), IneraTec, GKN, UniCRE/Unipetrol, Amec Foster Wheeler Italiana, ÅF-CONSULT Ltd. und DLR e.V. ein neues BtL-Verfahren, welches die Herstellungskosten von Biokraftstoffe gegenüber alternativen Routen senken soll. Ziel sind Produktionskosten für Biodiesel von unter 0,80 €/l.

Das Herstellungs-konzept umfasst kleine bis mittelgroße, dezentrale Anlagen in welchen die Biomasse vergast und das erhaltene Synthesegas in nachfolgenden Fischer-Tropsch Mikroreaktoren zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt wird. Zusätzlich zu den neuartigen Konzepten der Vergasung und der FT-Synthese sollen nach der Vergasung durch den Einsatz eines Hochtemperaturfilters Wärmeverluste minimiert werden. Durch den Betrieb des Vergasers

bei atmosphärischem Druck und der Nutzung von Dampf als Sauerstoffquelle für die partielle Oxidation wird der Einsatz einer Luftzerlegungsanlage vermieden. Lokal verteilte Produktionsorte ermöglichen sehr kurze Biomassetransportwege. Durch die Nutzung der Prozessabwärme zur Stromerzeugung und Einspeisung in lokale Fernwärmenetze sollen energetische Wirkungsgrade von bis zu 80 % erreicht werden. Dezentral erzeugte Fischer-Tropsch-Produkte sollen in Raffinerien zentral aufbereitet und zu Kraftstoffsubstituten bzw. –beimischungen veredelt werden.

Im Rahmen des Projekts soll die Machbarkeit des gesamten Prozesses in einer Testanlage bei den Projektpartnern in Finnland gezeigt werden. Besondere Herausforderungen stellen dabei der Hochtemperaturfilter, die Gasreformierung und die Gasreinigung dar, denn die FT-Synthese toleriert nur sehr geringe Mengen an Verunreinigungen im Synthesegas. Die vereinfachte Vergasung, sowie der Einsatz der hocheffizienten und kompakten Mikroreaktoren zur FT-Synthese sollen die Investitionskosten für eine Anlage mit 10 - 50 kt_{Produkt}/a wettbewerbsfähig machen. Der Entwurf für ein industrielles Demonstrationsprojekt ist bereits formuliert und wird je nach Erfolg des Projekts anschließend umgesetzt.

EU-Projekt FLEXCHX

Im EU Projekt „FLEXCHX – flexible combined of power, heat and transport fuels from renewable energy sources“ untersuchen zehn Partner aus Industrie und Wissenschaft (DLR e.V., HELEN, INERATEC, Kauno Energija AB, Lithuanian Energy Institute, Neste Jacobs Oy, Johnson Matthey plc., Brynolf Grönmark AB, UAB Enerstena, Projektleitung: VTT) die Integration eines Fischer-Tropsch Syntheseprozesses in der bestehenden Energieinfrastruktur von nord- und mitteleuropäischen Ländern (www.flexchx.eu). Dafür sollen die im Prozess anfallende Abwärme und das FT-Gas in bestehenden Wärmekraftwerken für die Herstellung von Elektrizität und Fernwärme verwendet werden. Zusätzlich soll zwischen zwei Betriebsmodi umgeschaltet werden können: Im Fall von hohem Wärmebedarf soll der erwähnte BtL-Prozess betrieben werden. Sinkt aber der Bedarf nach Fernwärme im Markt und ist gleichzeitig viel Solarstrom verfügbar, soll dem Prozess ein Elektrolyseur zugeschaltet werden können. Der dadurch erzeugte Wasserstoff kann den Umsatz des Fischer-Tropsch Reaktors so verändern, dass mehr FT-Wax erzeugt wird und dementsprechend weniger Fernwärme.

In beiden Betriebsmodi, die nach dem Wärmebedarf Winter- und Sommermodus genannt werden, wird Biomasse benötigt. Diese wird den dezentralen Anlagen aus Holzabfällen aus der näheren Umgebung zugeführt. Das FT-Wax wird folglich dezentral produziert und anschließend in das bestehende Raffinerienetz eingespeist. Mit dem so erzeugten FT-Treibstoff versucht man einerseits die Defossilisierung des Verkehrssektors voranzutreiben und andererseits ein wirtschaftlich sinnvollen alternativen Kraftstoff zu erzeugen (Zielproduktionskosten 0,80 – 1 €/l). Dabei kommt es vor allem auf eine intelligente Eingliederung in den bestehenden Energiemarkt sowie eine flexible Prozessführung an. Dazu muss für alle Komponenten der kleinskaligen Anlage (30 MW Input) im flexiblen Betrieb experimentell untersucht werden, um so das Konzept zu validieren. Mit den so gewonnen experimentellen Daten muss anschließend simulativ gezeigt werden, dass der FLEXCHX Prozess wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll ist.

Förderinitiative des BMWi: Energiewende im Verkehr - Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe

Im Jahr 2017 hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) einen Förderaufruf gestartet für die gezielte Verknüpfung innovativer Energie- und Verkehrsthemen gestartet und fördert strombasierte Kraftstoffe und Energiesystemanalysen sowie innovative Antriebstechnologien für mobile Anwendungen. Mehrere Forschungscluster verfolgen unterschiedliche Verfahrensansätze und Zielprodukte für alternative Kraftstoffe. Das DLR hat die Begleitforschung übernommen, in der die Vergleichbarkeit und Konformität sowie die Vernetzung der Forschungsarbeiten im Rahmen der Förderinitiative sichergestellt werden sollen.

Cluster	Besonderheiten
FlexDME	Spezieller Ansatz der Verwendung von Biogas, Trockenreformierung
E2-Fuels	OME als vielversprechender Kandidat für Dieseladditiv.
PlasmaFuel	Spezieller Ansatz der Verwendung eines Lichtbogens zur Reduktion von CO ₂ zu CO
KeroSyN100	Alternativer Herstellungsprozess von Kerosin. MtG Verfahren statt FT-Synthese
SynLink	Synthesegas über Co-Elektrolyse
C3-Mobilty	Aldolkondensation als sehr speziellen Synthesepfad .
MethQuest	Methan als potentieller Energieträger für Schwerlastverkehr (Schiff, LKW)

Abbildung 4 Ausgewählte Forschungscluster der Förderinitiative des BMWi: Energiewende im Verkehr - Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe

Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde u.a. gezeigt, in welcher Detailtiefe das DLR das zukunftsweisende Thema der alternativen Kraftstoffe für Luftfahrt bearbeitet. Die Fachgruppe für alternative Brennstoffe verfolgt einen transparenten Ansatz für vielfältige Kraftstoff- und Herstellungsvarianten. Mit dem in der Fachgruppe entwickelten Software-Tool TEPET ist eine effiziente und transparente Bewertung unterschiedlicher Herstellungsprozesse in Bezug auf deren technische, ökonomische und ökologische Eigenschaften möglich. Der Vergleich der Prozessrouten BtL, PtL und PbtL zeigt den Einfluss der Prozessparameter auf die Wirtschaftlichkeit [19], ebenso den Einfluss der verwendeten Rohstoffe auf den ökologischen Fußabdruck. In der Fachgruppe ABS kann mit der Variation zentraler Modellannahmen wie dem Strompreis eine transparente und ergebnisoffene Technologiebewertung erstellt werden. Vorteilhaft ist das Software-Tool TEPET für Sensitivitätsanalysen auf Basis komplexer Prozessverschaltungen.

Mit dem Ziel, das Spektrum an unterschiedlichen Prozessrouten für alternative Bio-Kraftstoffe zu erweitern, engagiert sich die Fachgruppe ABS in mehreren Projekten auf nationaler und europäischer Ebene. Weitere Optionen für die Erzeugung alternativer Kraftstoffe sind zu suchen, zu optimieren und baldmöglichst in den Markt einzuführen.

Literaturverzeichnis

- [1] International Air Transport Association, “IATA TECHNOLOGY ROADMAP 2013, <https://www.iata.org/publications/pages/technology-roadmap.aspx>,” 2013.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change, Chapter 5. Transport and its infrastructure, https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch5.html,” 2007.
- [3] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West, K. Timmerhaus, and R. West, *Plant design and economics for chemical engineers*, vol. 4. McGraw-Hill New York, 1968.
- [4] F. G. Albrecht, D. H. König, N. Baucks, and R.-U. Dietrich, “A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels—a case study,” *Fuel*, vol. 194, pp. 511–526, 2017.
- [5] D. H. König, M. Freiberg, R.-U. Dietrich, and A. Wörner, “Techno-economic study of the storage of fluctuating renewable energy in liquid hydrocarbons,” *Fuel*, vol. 159, pp. 289–297, 2015.
- [6] R. Smith, *Chemical process: design and integration*. John Wiley & Sons, 2005.
- [7] “Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG).” Bundesanzeiger Verlag, 2017. Köln.
- [8] “Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG,” *Amtsblatt EU*, 2009. L140, 16.
- [9] “Mitteilung der Kommission zur praktischen Umsetzung des EU-Nachhaltigkeitskonzepts für Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe sowie zu den Berechnungsregeln für Biokraftstoffe,” *Amtsblatt EU*, 2010. C160, 8.
- [10] “www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php (Zugriff am 26. Juni 2017),” 2017.
- [11] “ASTM D7566-14c: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons,” *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2015.

- [12] A. Molino, S. Chianese, and D. Musmarra, “Biomass gasification technology: The state of the art overview,” *Journal of Energy Chemistry*, vol. 25, no. 1, pp. 10–25, 2016.
- [13] S. Heidenreich and P. U. Foscolo, “New concepts in biomass gasification,” *Progress in energy and combustion science*, vol. 46, pp. 72–95, 2015.
- [14] E. G. Pereira, J. N. da Silva, J. L. de Oliveira, and C. S. Machado, “Sustainable energy: a review of gasification technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 4753–4762, 2012.
- [15] M. Patel, X. Zhang, and A. Kumar, “Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 1486–1499, 2016.
- [16] T. Smolinka, M. Günther, and J. Garcke, “Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien,” *Kurzfassung des Abschlussberichtes NOW-Studie, Freiburg im Breisgau*, 2011.
- [17] A. De Klerk, *Fischer-Tropsch Refining*. John Wiley & Sons, 2012.
- [18] S. Sie and R. Krishna, “Fundamentals and selection of advanced Fischer–Tropsch reactors,” *Applied Catalysis A: General*, vol. 186, no. 1-2, pp. 55–70, 1999.
- [19] R.-U. Dietrich, F. Albrecht, and T. Pregger, “Erzeugung alternativer flüssiger Kraftstoffe im zukünftigen Energiesystem,”
- [20] “<http://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spotmarket/european-emission-allowances#!/2017/06/29> (Zugriff am 29.Juni 2017),” June 2017.
- [21] P. Capros, A. De Vita, N. Tasios, P. Siskos, M. Kannavou, A. Petropoulos, S. Evangelopoulou, M. Zampara, D. Papadopoulos, C. Nakos, *et al.*, “EU Reference Scenario 2016-Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050.,” 2016.