

Technologieplattform Power-to-Liquid-Kraftstoffe Roadmap des TPP-Forschungsnetzwerkes

24. Juli 2026



GESAMTKONZEPT
**ERNEUERBARE
KRAFTSTOFFE**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projektträger:



Inhaltsverzeichnis

1. Das Forschungsnetzwerk der Technologieplattform Power-to-Liquid-Kraftstoffe _	5
1.1. Motivation	5
1.2. Arbeitsgruppen	5
2. AG 1 – Methanol-to-Jet – Herstellung, Aufbereitung, Prozesssystemanalyse ____	7
2.1. Motivation und Hintergrund	7
2.2. Forschungsbedarf	7
2.2.1. Aufbau und Betrieb einer offenen, modularen Forschungsplattform für MtJ	7
2.2.2. Unterstützung und Bündelung der Grundlagenforschung aufbauend auf den Arbeiten zur Forschungsplattform in den Bereichen Katalysatorforschung, experimentelle Prozessentwicklung, Prozessmodellierung und modellbasierte Prozessoptimierung	8
2.2.3. Anwendungsbewertung und Anwendungsentwicklung der erzeugten Kraftstoffqualitäten für SAF, Schiffs-kraftstoffe, Kraftstoffe für Resilienz-anwendungen	8
2.2.4. Systemanalyse (Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Systemintegration) von MtJ als Kraftstoffverfahren für Methanol als „grünes Schlüsselmolekül“ für Energieträgerlogistik	8
2.3. Übergreifende Forschungsthemen (Synergien mit anderen AGs)	9
2.4. Key Results/Ideen	9
2.5. Zu priorisierende Forschungsthemen	9
3. AG 2 – Fischer-Tropsch-Synthese & RWGS – Herstellung, Aufbereitung, Prozesssystemanalyse _____	11
3.1. Motivation und Hintergrund	11
3.2. Forschungsbedarf	11
3.2.1. Lastflexibler Betrieb	11
3.2.2. Prozessintegration	12
3.2.3. Upgrading der Produkte	13
3.2.4. Wasser-Management	13
3.3. Übergreifende Forschungsthemen (Synergien mit anderen AGs)	13
3.4. Key Results/Ideen	14
3.5. Zu priorisierende Forschungsthemen	14

4. AG 3 – CO ₂ und Wasserstoff – Supply Chains, Regulatorik und Nachhaltigkeit _	15
4.1. Motivation und Hintergrund	15
4.2. Forschungsbedarf	15
4.2.1. CO ₂ - und H ₂ -Reinheit	15
4.2.2. CO ₂ -Quellen	16
4.2.3. Regulatorik – vom Verhinderer zum Enabler	16
4.3. Übergreifende Forschungsthemen (Synergien mit anderen AGs)	16
4.4. Key Results/Ideen	17
4.5. Zu priorisierende Forschungsthemen	17
5. AG 4 – Innovative Prozesse – Plasma-Verfahren, Co-Elektrolyse, DAC _____	18
5.1. Motivation and Hintergrund	18
5.2. Forschungsbedarf (Forschungsthemen)	18
5.2.1. Direct Air Capture (DAC)	18
5.2.2. Co-Electrolyse	18
5.2.3. Plasma-Verfahren	19
5.2.4. Systemintegration und vergleichende Bewertung	19
5.3. Übergreifende Forschungsthemen (zusammen mit anderen AGs)	19
5.4. Zentrale Ergebnisse und Ideen	20
5.5. Zu priorisierende Forschungsthemen	20
6. AG 5 – Anwendungen Schifffahrt und Verkehr – Fuel Design, Logistik & Klimawirkung _____	21
6.1. Motivation und Hintergrund	21
6.2. Forschungsbedarf	21
6.2.1. Schifffahrt	21
6.2.2. Schwerlast / Nutzfahrzeuge	22
6.2.3. Stationäre Energie und Notstromversorgung	22
6.2.4. Anwendung von Naphtha	22
6.2.5. Allgemein	22
6.3. Übergreifende Forschungsthemen (zusammen mit anderen AGs)	23
6.4. Key Results/Ideen	23
6.5. Zu priorisierende Forschungsthemen	23

7. AG 6 – Anwendung Luftfahrt (SAF) – Fuel Design, Logistik & Klimawirkung	25
7.1. Motivation und Hintergrund	25
7.2. Forschungsbedarf	25
7.2.1. Sichere Nutzung von SAF	25
7.2.2. Entwicklung von Standards für 100 % SAF	26
7.2.3. Leistung	26
7.2.4. Emissionsminderungen	26
7.2.5. Betrieb	26
7.2.6. Wartung	26
7.2.7. Aufbau der Lieferkette (Schwerpunkt auf TPP PtL-SAF)	26
7.2.8. Übergang von der Verwendung synthetischer Beimischungskomponenten (SBC) in Mischungen von maximal 50% auf 100% SAF	27
7.2.9. Intelligente Nutzung von SAF	27
7.2.10. Fuel Design	28
7.3. Übergreifende Forschungsthemen (Synergien mit anderen AGs)	28
7.4. Key Results/Ideen	28
8. Zusammenfassung und Ausblick	30

1. Das Forschungsnetzwerk der Technologieplattform Power-to-Liquid-Kraftstoffe

Mit der Technologieplattform Power-to-Liquid-Kraftstoffe (TPP) in Leuna wird das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) erstmalig die gesamte Prozesskette der Herstellung von strombasierten Kraftstoffen in einer Forschungsanlage im semi-industriellen Maßstab demonstrieren – vom Rohstoff bis zum einsatzfähigen Kraftstoff. Begleitet wird der Bau und Betrieb der Anlage durch das TPP-Forschungsnetzwerk, welches allen Interessierten offensteht und an die Ergebnisse vieler bisheriger Forschungsanstrengungen im Bereich Power-to-Liquid (PtL) in Deutschland, wie etwa im Kopernikus-Projekt Power-to-X, den Wasserstoff-Leitprojekten oder dem Projekt Care-O-Sene, anknüpft.

1.1. Motivation

Power-to-Liquid (PtL)-Kraftstoffe werden für eine klimaneutrale Mobilität, vor allem in der Luftfahrt, dringend benötigt. Auch weitere, schwer elektrifizierbare Bereiche, wie z.B. die Schifffahrt oder bestimmte Bereiche des bodengebundenen Verkehrs, werden auch in Zukunft auf flüssige Energieträger angewiesen sein. Strombasierte Kraftstoffe können hier nicht nur einen erheblichen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz leisten, sondern auch die Resilienz des Energiesystems als speicherbarer Energieträger unterstützen und somit zur Versorgungssicherheit der kritischen Infrastruktur, wie beispielsweise der Feuerwehr, THW oder Bundeswehr beitragen. Damit hat die Erzeugung strombasierter Kraftstoffe das Potenzial, strategische Abhängigkeiten zu verringern und die Handlungsfähigkeit in Krisen- und Konfliktsituationen sicherzustellen. Die Entwicklung entsprechender Technologien für ihre Produktion kann vor dem Hintergrund geopolitischer Unsicherheiten, fragiler Lieferketten und zunehmender Rohstoffabhängigkeiten in steigendem Maße gesellschaftliche und strategische Relevanz gewinnen. Aktuell sind PtL-Kraftstoffe jedoch noch nicht in größerem Umfang am Markt verfügbar, und die Integration aller benötigten Prozessschritte zu einer Gesamtanlage wurde bislang nicht demonstriert.

Die Errichtung und der Betrieb der TPP soll den Markthochlauf strombasierter Kraftstoffe beschleunigen und Technologien und Verfahren für deren Produktion weiterentwickeln. Auch die Kraftstoff-Zusammensetzung, die zum Beispiel über die sogenannten nicht-CO₂-Effekte einen erheblichen Einfluss auf die Klimawirkung der Luftfahrt hat, soll optimiert werden. Um größere Mengen von Treibstoffmustern effektiv herstellen zu können, wird zum ersten Mal die Gesamtintegration einer PtL-Anlage dieser Größenordnung erprobt.

Die Infrastruktur der vom Bundesministerium für Verkehr (BMV) geförderten Anlage steht nicht nur Forschenden aus dem DLR zur Verfügung. Sie kann von allen interessierten Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen aus ganz Europa für eigene Forschungszwecke genutzt werden. Das Leitbild für die Zusammenarbeit ist ein diskriminierungsfreier Zugang zur TPP. Alle interessierten Stakeholder aus Forschung, Industrie und Anwendung sind eingeladen, die TPP und ihre Produkte für Forschungs- und Entwicklungszwecke zu nutzen.

1.2. Arbeitsgruppen

Durch die Aktivitäten des TPP-Forschungsnetzwerkes wird die Forschungsagenda der TPP in themenspezifischen Arbeitsgruppen weiterentwickelt.

Die Zielsetzungen der Arbeitsgruppen des TPP-Forschungsnetzwerkes umfassen

- die Weiterentwicklung des Forschungsfeldes der PtL-Kraftstoffe (mit Fokus auf die TPP)
- die Zusammenarbeit zwischen Industrie, Universitäten und Forschungseinrichtungen
- den fachlichen Austausch zur Identifikation von Forschungsthemen auf der TPP
- sowie die Initiierung von Forschungsprojekten und Bildung von Projektkonsortien

Den Auftakt der Aktivitäten bildete eine erste Präsenzveranstaltung im Mai 2025 in Leuna, im Rahmen derer die Forschungsleitfragen der TPP mithilfe eines World Café-Formates diskutiert wurden. Dabei ergaben sich folgende Themenschwerpunkte und Forschungsfelder, welche die Grundlage für die Einrichtung der Arbeitsgruppen bildeten:

- AG 1 – Methanol-to-Jet – Herstellung, Aufbereitung, Prozesssystemanalyse
- AG 2 – Fischer-Tropsch-Synthese & RWGS – Herstellung, Aufbereitung, Prozesssystemanalyse
- AG 3 – CO₂ und Wasserstoff – Supply Chains, Regulatorik und Nachhaltigkeit
- AG 4 – Innovative Prozesse – Plasma-Verfahren, Co-Elektrolyse, DAC
- AG 5 – Anwendung Luftfahrt (SAF) – Fuel Design, Logistik & Klimawirkung
- AG 6 – Anwendungen Schifffahrt und Verkehr – Fuel Design, Logistik & Klimawirkung

Eine Teilnahme an den Arbeitsgruppen ist für alle Fachkundigen rund um die benannten Forschungsthemen offen. Beim zweiten TPP-Netzwerktreffen im Mai 2026 wurden durch die Leitungen der jeweiligen Arbeitsgruppen Workshops durchgeführt, deren Ergebnisse in der vorliegenden Roadmap konsolidiert wurden und einen entsprechenden Forschungsbedarf auf den jeweiligen Themengebieten aufzeigen.

2. AG 1 – Methanol-to-Jet – Herstellung, Aufbereitung, Prozesssystemanalyse

2.1. Motivation und Hintergrund

Die Methanol-to-Jet-Route (MtJ) ist ein vielversprechender Ansatz für die wirtschaftliche Herstellung von Sustainable Aviation Fuels (SAF) und weiteren langfristig notwendigen flüssigen Energieträgern. Methanol, der Einsatzstoff dieser Route, kann sowohl aus CO₂ und Wasserstoff, als auch aus nachhaltig verfügbaren Biomasse-Reststoffen gewonnen werden. Die Herstellung von Methanol aus CO₂ ist dabei ohne den Umweg über die RWGS möglich. Methanol kann als „grünes Schlüsselmolekül“ für die Herstellung von SAF, wie auch weiteren Kraftstoffqualitäten und Chemieprodukten dienen. Die MtJ-Route ermöglicht die Herstellung von SAF nach ASTM 7566 (Qualifizierung weit fortgeschritten) mit sehr hoher Ausbeute. Alternativ können aber auch weitere Kraftstoffqualitäten, wie bspw. Benzin und Diesel aus der MtJ-Herstellung ausgekoppelt und für weitere Fahrzeugklassen, wie Nutzfahrzeuge und in der Schifffahrt verwendet werden. Methanol kann heute schon Kraftstoffen beigemischt oder es können Kraftstoffkomponenten aus Methanol gewonnen werden. Methanol hat großes Potenzial, zukünftig als Plattform für die Speicherung und den Transport von Energie, Wasserstoff und erneuerbarem Kohlenstoff genutzt zu werden, um diese drei Schlüsselkomponenten aus Regionen mit hohem Erzeugungspotenzial nach Europa oder innerhalb Europas zu transportieren. Gleichzeitig kann die Methanolsynthese in der Zukunft netzdienlich als regionaler Energiespeicher im europäischen Netz dienen und so Übertragungs- und Verteilnetze entlasten. Die Herstellung von Methanol aus CO₂/H₂ und aus Biomasse-Reststoffen wurde bereits im industriellen Maßstab demonstriert. MtJ-Verfahren wurden in Laboranlagen demonstriert, eine Demonstration in größerem Maßstab steht jedoch noch aus. Zudem zeigen neueste Forschungsergebnisse ein deutliches Optimierungspotenzial der einzelnen Prozessstufen hinsichtlich der Kapital-, Rohstoff- und Energieeffizienz zur erheblichen Steigerung der SAF-Ausbeute der MtJ-Route.

2.2. Forschungsbedarf

2.2.1. Aufbau und Betrieb einer offenen, modularen Forschungsplattform für MtJ

Die Forschungsplattform soll mit einer Kapazität von 100–250 t/a SAF realisiert werden. Sie dient der Demonstration innovativer MtJ-Prozessketten unter Integration von Energie- und Stoffströmen zwischen den einzelnen Prozessstufen. Durch die kontinuierliche Herstellung von SAF aus Methanol in einer integrierten und verschalteten Anlage hebt sich die Forschungsplattform deutlich von bisherigen Anlagen ab. Die Forschungsplattform ist ein entscheidender Schritt auf dem Weg zur Industrialisierung deutscher und europäischer MtJ-Technologien. Das Konzept der Forschungsplattform sieht die Einbindung unterschiedlicher Prozessschritte vor, die möglichst flexibel an die Bedarfe der Technologieentwickler angepasst werden können, zur Demonstration und Optimierung individueller MtJ-Prozesskonzepte. Darüber hinaus soll sie die Einkopplung anderer nachhaltig verfügbarer Rohstoffe (z.B. Ethanol, Butanol, andere grüne Olefine) ermöglichen. Neben der Demonstration der Technologieentwicklungen wird die Forschungsplattform auch zur Bereitstellung von Produktmustern der Kraftstoff-Schnitte im Maßstab von bis zu 50 t für die Anwendungsentwicklung und Zertifizierungen genutzt werden.

2.2.2. Unterstützung und Bündelung der Grundlagenforschung aufbauend auf den Arbeiten zur Forschungsplattform in den Bereichen Katalysatorforschung, experimentelle Prozessentwicklung, Prozessmodellierung und modellbasierte Prozessoptimierung

Bei der MtJ-Route besteht hinsichtlich der Reduzierung der Investitionskosten, der Rohstoffintensität und der Energieintensität noch ein enormes Entwicklungspotenzial. Um dieses auszuschöpfen, sind sowohl Grundlagenforschung für die Katalysator- und Verfahrensentwicklung als auch ein grundlegendes Verständnis der Reaktionsmechanismen und der Katalysatordeaktivierung notwendig. Aufbauend auf diesem Verständnis werden unter Berücksichtigung der Reaktionskinetiken in den komplexen Reaktionsmechanismen die Reaktoren und die optimierten Betriebsbedingungen entwickelt. Die MtJ-Route kann darüber hinaus als Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer Prozesse zur Herstellung von Kraftstoffkomponenten wie Aromaten dienen. Durch die effiziente Herstellung von Aromaten aus Methanol, wird die Produktion von vollsynthetischem, aromatenhaltigem Kerosin, gemäß der in Arbeit befindlichen Erweiterung von ASTM D7566 hinsichtlich perspektivischem Einsatz von 100% drop-in SAF, ermöglicht. Aufbauend auf den Grundlagenuntersuchungen erfolgt eine erste Skalierung von Katalysatoren und Prozessstufen in den Laboren der Partner im TPP-Netzwerk auf der anschließend eine gezielte Maßstabsübertragung auf die Skala der Forschungsplattform möglich wird, zur Demonstration und Bereitstellung von Produktmustern.

2.2.3. Anwendungsbewertung und Anwendungsentwicklung der erzeugten Kraftstoffqualitäten für SAF, Schiffskraftstoffe, Kraftstoffe für Resilienzanwendungen

Die Bereitstellung von Produktmustern bis zu einem Maßstab von 50 t auf der MtJ-Forschungsplattform ermöglicht die Anwendungsentwicklung für SAF sowie für weitere mittel- bis langfristig notwendige Kraftstoffanwendungen. Dazu zählen neben SAF die Anwendung als Schiffskraftstoff für die Binnenschifffahrt, maritime Anwendungen sowie Anwendungen im Bereich von Dieselmotoren, bspw. für Sonder- und Nutzfahrzeuge. Durch die gezielte Anpassung von Katalysatoren und Prozessbedingungen in MtJ-Verfahren können die Kraftstoffeigenschaften präzise auf die Anforderungen innovativer Brennverfahren abgestimmt werden.

2.2.4. Systemanalyse (Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Systemintegration) von MtJ als Kraftstoffverfahren für Methanol als „grünes Schlüsselmolekül“ für Energieträgerlogistik

Die Begleitung der Entwicklungsarbeiten an Katalysatoren, Verfahren sowie Prozess- und Wertschöpfungsketten und deren Skalierung mittels Systemanalyse bildet die Grundlage für eine gezielte Steuerung der Entwicklung hin zu nachhaltigen Geschäftsmodellen. Die Systemanalyse umfasst sowohl die Modellierung der Stoffflüsse im nachhaltigen anthropogenen Kohlenstoffkreislauf als auch die Energiesystemmodellierung für die lokale Bereitstellung elektrischer Energie. Dabei werden auch standortbezogene Synergieeffekte berücksichtigt, wie beispielsweise Nutzung von Nebenprodukten und Integration von Energieströmen. GIS (Geographic Information System)- Analysen sind Teil der notwendigen detaillierten Standortanalyse.

2.3. Übergreifende Forschungsthemen (Synergien mit anderen AGs)

Die AG 1 MtJ hat wichtige Schnittstellen zu anderen Arbeitsgruppen des Forschungsnetzwerks, insbesondere zur Bereitstellung von CO₂, H₂ wie auch elektrischer Energie. Darüber hinaus ist die Zusammenarbeit zur Nachhaltigkeitsbewertung und bei regulatorischen Fragen notwendig. Der Beitrag der AG 1 liegt in der technischen Bewertung der MtJ-Prozessschritte und ihrer Integration in MtJ-Prozessketten hin zu SAF und anderen Kraftstoffen und Kraftstoffkomponenten.

Ein zentrales Querschnittsthema ist die Definition von Qualitätsfenstern für Edukte, Zwischenprodukte und Produktströme. Das betrifft CO₂ aus unterschiedlichen Quellen, Synthesegas aus Co-Elektrolyse oder Plasma-Verfahren sowie H₂- und CO-haltige Zwischenprodukte und das daraus gewonnene Methanol. Relevant sind Hauptkomponenten, Spurenstoffe und dynamische Schwankungen der Zusammensetzung.

Weitere Themen sind Feedstock-Speicherung, dezentrale Wärmenutzung, lokale Kohlenstoffquellen sowie Schnittstellen- und Datenstandards. Ziel ist es, Technologien vergleichbar zu machen und ihre Integration in PtL-Prozessketten zu erleichtern.

Eine Schnittstelle zu AG 2, 3 und 4 ist die Entwicklung und Demonstration von Herstellkonzepten für Vorprodukte von SAF (z. B. Wasserstoff, CO₂, Methanol, Fischer-Tropsch-Wachs) in modularen, seriengefertigten und lastflexibel betriebenen Produktionsanlagen. Dadurch können Energie- und Rohstoffquellen effizient genutzt werden und lagerfähige chemische Energie- und Wasserstoffträger aus lokalen Quellen im Falle von Krisensituation bereitgestellt werden.

2.4. Key Results/Ideen

Methanol soll zukünftig als „grünes Schlüsselmolekül“ für die Herstellung von SAF, weiteren Kraftstoffqualitäten, Chemieprodukten und für die Speicherung und den Transport von Energie und Wasserstoff dienen. Methanol kann sowohl global in Regionen mit großem Potenzial an erneuerbaren Energien produziert werden, als auch lokal als Schritt zur chemischen Speicherung von erneuerbaren Energien genutzt werden. Methanol eignet sich als Baustein für die Herstellung verschiedener Kraftstoff-Typen, wie auch neuer Komponenten, wie beispielsweise Aromaten sowohl für die chemische Industrie wie auch für die Herstellung von vollsynthetischem Kerosin für 100% SAF-Anwendungen. Der wichtigste nächste Schritt der Entwicklungsarbeiten ist die Übertragung von MtJ-Technologien in den größeren Maßstab durch die geplante MtJ-Forschungsplattform. Ausgehend davon können weitere F&E-Arbeiten initiiert werden mit dem Ziel, die Technologieführerschaft deutscher und europäischer Unternehmen in dem Bereich MtJ zu erreichen.

2.5. Zu priorisierende Forschungsthemen

- Aufbau und Betrieb der offenen, modularen Forschungsplattform für MtJ im 100 - 250 t/a-Maßstab in enger Abstimmung im Forschungsnetzwerk
- Grundlagenforschung und angewandte Forschung im iterativen Austausch mit der Forschungsplattform (Katalysatorforschung, experimentelle Prozessentwicklung, Prozessmodellierung, modellbasierte Prozessoptimierung, Prozessintensivierung, Wärmeintegration, Wassermanagement)
- Systemintegration in den Raffinerieverbund sowie Kombination mit anderen SAF-Herstellverfahren

- Anwendungsbewertung und Anwendungsentwicklung der erzeugten Kraftstoffqualitäten für SAF, Schiffskraftstoffe und Kraftstoffe für zivile und militärische kritische Services, die besondere Kraftstoff-Anforderungen (z.B. Lagerfähigkeit) haben, Variation des Produktspektrums
- Systemanalyse (Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Systemintegration) von MtJ als Kraftstoffverfahren mit Methanol als „grünes Schlüsselmolekül“ für Energieträgerlogistik
- Unterstützung der Entwicklung einer modularen, seriengefertigten, lastflexiblen, robusten und musterzertifizierten Methanolherstellung mit Methanolqualitäten, die eine hohe Effizienz der Methanol-Logistikketten inkl. der Integration in die MtJ-Route ermöglichen.

3. AG 2 – Fischer-Tropsch-Synthese & RWGS – Herstellung, Aufbereitung, Prozesssystemanalyse

3.1. Motivation und Hintergrund

Die Arbeitsgruppe adressiert die technologisch am weitesten entwickelte Prozesskette zur Herstellung nachhaltiger Power-to-Liquid-(PtL)-Kraftstoffe. Diese besteht aus 3 Prozessstufen: 1. thermokatalytische Synthesegaserzeugung aus CO_2 und H_2 über die rückwärtige Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS), 2. Fischer-Tropsch(FT)-Synthese mit Fokus auf langkettigen Kohlenwasserstoffen, 3. hydrierende Aufarbeitung der mittel-/langkettigen Kohlenwasserstoffe zu SAF und weiteren spezifikationsgerechten Produktfraktionen. Es werden Fragestellungen betrachtet wie beispielsweise die Integrationsmöglichkeiten der beiden Prozessschritte, die Optimierung der Kerosinproduktion hinsichtlich Quantität und Fuel Design, die Ermittlung von realen Herstellungskosten und deren Reduktionspotenziale sowie Möglichkeiten für eine spätere Hochskalierung auf einen industriellen Maßstab in Zusammenarbeit mit Industrie und Wissenschaft. Ziel ist es, Forschungsbedarfe zu identifizieren und Forschungs- und Demonstrationsprojekte zu initiieren, die geeignet sind, die technologischen und wirtschaftlichen Risiken der erforderlichen Skalierung zu reduzieren.

Es bestehen technologische Bezüge zu anderen AGs, z.B. betreffend die Co-Elektrolyse als besonders energieeffizientes, alternatives Verfahren zur Synthesegaserzeugung (AG 4) und die Wärmeintegration zwischen der exothermen FT-Synthese und vor- oder nachgelagerten Prozessschritten mit hohem Wärmebedarf, etwa zur Gewinnung von CO_2 aus der Umgebungsluft (AG 3,4) und zur Bereitstellung von H_2 oder Synthesegas durch Hochtemperatur-Elektrolyse oder -Co-Elektrolyse (AG 3,4).

3.2. Forschungsbedarf

3.2.1. Lastflexibler Betrieb

Je lastflexibler die PtL-Prozesskette betrieben werden kann, desto geringer sind die Kosten für die benötigte vorgelagerte Infrastruktur bei einer Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien (ggf. Netzausbau, elektrische und chemische Zwischenspeicher). Allerdings erfordert die Herstellung von Lastflexibilität technischen Aufwand, der sich in Investitionen niederschlägt, und ein lastflexibler Betrieb führt zu einer geringeren Kosteneffizienz und möglicherweise auch Energieeffizienz der PtL-Anlage verglichen mit Volllast. Eine quantitative Kenntnis dieser Zusammenhänge ist somit wichtig für die Bewertung des technologischen Potenzials und der Wirtschaftlichkeit der PtL-Technologie. Die erreichbare Lastflexibilität ist unter anderem von den eingesetzten Reaktor- und Prozesstechnologien abhängig, aber auch von der konkreten Implementierung dieser Technologien in einer konkreten PtL-Anlage (z.B. Apparatedesign, Wärmeintegration, stoffliche Rückführungen). Zur Untersuchung der Lastflexibilität von PtL-Prozessketten auf Basis RWGS und FT-Synthese wird eine kombinierte Strategie basierend auf detaillierten dynamischen Prozesssimulationen und experimenteller Validierung mit Anlagendaten verfolgt.

Für die Modellierung bietet sich ein modularer Ansatz an, der zu einem digitalen Zwilling der TPP führen soll. Unter anderem im Verbundprojekt PtX-Wind des Wasserstoff-Leitprojekts H2Mare wurden bereits dynamische Simulationen zu PtX-Prozessketten durchgeführt, an die in einem größeren Projekt angeknüpft werden kann.

Experimentelle Daten zum lastflexiblen Betrieb von PtL-Anlagen jenseits des Labormaßstabs sind in der Literatur wenig bis gar nicht verfügbar. Im Projekt RePoSe wurde ein lastflexibler Betrieb untersucht und erste Ergebnisse auf der Abschlusskonferenz im Mai 2026 vorgestellt. Aufgrund der spezifischen technologischen Auslegung dieser Anlage sind die gewonnenen Daten jedoch nur bedingt auf andere Reaktor- und

Prozesskonzepte übertragbar, weshalb für die Validierung allgemeingültiger dynamischer Prozessmodelle weiterhin ein erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Das KIT besitzt mit der transportablen PtL-Containeranlage „e-XPlore“ und der „Jet Fuel Syntheseanlage“ im Energy Lab zwei Systeme, die in experimentelle Untersuchungen zum lastflexiblen Betrieb von PtL-Prozessketten einbezogen werden können, um Simulationsmodelle zu validieren. Beide sind mit einem elektrisch beheizten RWGS-Reaktor, verdampfungsgekühlter FT-Synthese auf Basis Mikroreaktortechnologie sowie FT-Syncrude Upgrading ausgestattet, wobei die e-XPlore-Anlage nominell etwa 30 Liter eFuel pro Tag (ca. 8 t/a) und die Jet Fuel Syntheseanlage etwa 300 Liter pro Tag (80 t/a) produzieren kann.

Dynamische Prozessmodelle können damit an der TPP, sowie an weiteren Syntheseanlagen validiert werden, um so generische Prozessmodelle zu entwickeln, die eine Übertragbarkeit auch auf weitere Syntheseanlagen und deren Implementation in einem Energiesystem ermöglicht.

3.2.2. Prozessintegration

Die FT-Synthese wird nicht mit Vollumsatz betrieben und es entstehen dabei in gewissem Umfang auch kurzkettinge, bei Umgebungsbedingungen gasförmige Kohlenwasserstoffe. Darüber hinaus befindet sich im Synthesegas aus dem RWGS-Reaktor ein thermodynamisch bedingter Restanteil an CO_2 , der sich in der Kobalt-basierten FT-Synthese im Wesentlichen inert verhält. Um eine hohe Nutzung des in Form von CO_2 eingesetzten Kohlenstoffs zu erreichen, werden die gasförmigen Anteile nach dem FT-Reaktor in den RWGS-Reaktor zurückgeführt. Welche Auswirkungen diese Kopplung bei verschiedenen Betriebspunkten auf den Betrieb beider Reaktorstufen und somit auf den Gesamtprozess hat, gilt es zu untersuchen. Neben dem Einfluss der in die RWGS-Stufe zurückgeführten Gase muss hierbei auch der Einfluss möglicher Verunreinigungen in den Ausgangsstoffen CO_2 und H_2 betrachtet werden. Die für die Synthesegaserzeugung im RWGS-Reaktor benötigte Temperatur ist mit ca. 800-900°C sehr viel höher als die benötigte Temperatur von etwa 200 °C für die FT-Synthese. Für die FT-Synthese werden Drücke um 20-30 bar benötigt, damit eine ausreichend hohe Belegung der Katalysatoroberfläche mit CO erreicht wird, während ein erhöhter Druck in der RWGS-Stufe die unerwünschte Methanbildung thermodynamisch begünstigt. Weiterhin muss das bei der RWGS-Reaktion gebildete Produktwasser durch Kondensation weitgehend abgetrennt und das RWGS-Produkt hierfür abgekühlt werden, um den FT-Katalysator zu schonen. Je nach Prozessbedingungen in beiden Reaktorstufen, einschließlich Katalysator, ergibt sich eine optimale Temperatur für die Kondensation. Die FT-Synthese ist stark exotherm und erzeugt pro Mol CO etwa 158 kJ Wärme, während die RWGS-Reaktion pro Mol umgesetztem CO_2 etwa 41 kJ Wärme benötigt. Die möglichst weitgehende Nutzung der Abwärme der FT-Synthese im Prozess und die Optimierung der Wärmeintegration zwischen RWGS-Stufe und FT-Synthese sowie darüber hinaus in der gesamten PtL-Prozesskette (Elektrolyse, CO_2 -Gewinnung, Synthesegaserzeugung, FT-Synthese, FT-Syncrude-Upgrading inkl. Destillation) haben einen großen Einfluss auf die Gesamtenergieeffizienz des PtL-Verfahrens und müssen daher umfassend untersucht werden.

Im Hinblick auf die Reinheitsanforderungen an die Edukte CO_2 und H_2 bietet sich eine Zusammenarbeit mit der AG 3 an. Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Verunreinigungen im CO_2 und H_2 werden vorzugsweise an kleineren Anlagen, wie etwa den bereits unter 3.2.1 erwähnten PtL-Anlagen des KIT durchgeführt, um das Risiko hinsichtlich eines ggf. erforderlichen Katalysatorwechsels zu begrenzen.

Zur Frage der Prozessintegration zwischen Synthesegaserzeugung und FT-Synthese wäre in Zusammenarbeit mit der AG 4 auch ein Vergleich zwischen PtL-Prozessketten mit RWGS- und Co-SOEC-basierter Synthesegaserzeugung von hohem Interesse. Experimentell ist dies sowohl mit der unter 3.2.1 erwähnten Jet Fuel Syntheseanlage mit Co-SOEC im Energy Lab am KIT und mit der e-XPlore-PtL-Containeranlage des KIT in Verbindung mit einer dazu passenden Co-SOEC-Containeranlage des DLR-TT möglich.

3.2.3. Upgrading der Produkte

Die FT-Synthese liefert mechanistisch bedingt ein breites Produktspektrum. Zur Herstellung von SAF erzeugt man in der FT-Synthese an Kobalt-Katalysatoren unter Prozessbedingungen, die das Kettenwachstum begünstigen, ein Syncrude mit möglichst wenig kurzkettigen Kohlenwasserstoffen. Kohlenwasserstoffe mit Kettenlängen im Kerosinbereich (FT-Ölfraction) werden isomerisiert, längerkettige Kohlenwasserstoffe (FT-Wachsfraction) werden gecrackt und isomerisiert. In beiden Fällen wird Wasserstoff zugegeben, um das Cracking und die Isomerisierung zu begünstigen und ebenfalls im Produktspektrum enthaltene Olefine und sauerstoffhaltige Verbindungen vollständig zu hydrieren. Auf diese Art und Weise gelingt es synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK) als Hauptprodukt und Naphtha als Nebenprodukt zu erhalten.

Zu den Forschungsfragen im Bereich Upgrading gehört mit welchen Prozessbedingungen für das Cracking und die Isomerisierung der Wachsfraction und die Isomerisierung der Ölfraction die Ausbeute an FT-SPK gemäß ASTM D7566 maximiert werden kann. Weiterhin sollen verschiedene Möglichkeiten für die Nutzung des Nebenprodukts Naphtha untersucht werden. Dieses kann ebenso wie die kurzkettigen gasförmigen Bestandteile in die Synthesegaserzeugung zurückgeführt werden. In diesem Fall würde im PtL-Prozess nur SAF als Produkt erzeugt werden. Zu untersuchende Varianten sind die Aufarbeitung des Naphthas zu Benzin oder zu Aromaten. Darüber hinaus soll betrachtet werden, ob aus dem FT-Syncrude neben SAF weitere wichtige Produkte hergestellt werden können, beispielsweise Schmierstoffe, und wie die hierfür geltenden Spezifikationen erfüllt werden können. Weitere Forschungsfragen betreffen den Einfluss der Produktspezifikationen, z.B. für SAF, auf den PtL-Prozess und dessen kommerzielle Flexibilität. Zu dieser Frage bietet sich eine Zusammenarbeit mit der AG 5 an.

3.2.4. Wasser-Management

Mengenmäßiges Hauptprodukt des PtL-Prozesses ist Wasser, da pro Mol CO_2 zwei Mol H_2O entstehen, und zwar 1 Mol pro Mol umgesetztes CO_2 in der RWGS-Stufe und 1 Mol pro Mol umgesetztes CO in der FT-Synthese. In der FT-Synthese entstehen neben den Kohlenwasserstoffen in gewissem Umfang auch sauerstoffhaltige Nebenprodukte (z.B. Alkohole, Carbonsäuren), die sich je nach Prozessführung im Produktwasser anreichern und zu einem hohen Aufwand für die Abwasserbehandlung führen. Im Gegensatz dazu enthält das Produktwasser der RWGS-Stufe wenig Verunreinigungen. Für die Herstellung des für den PtL-Prozess benötigten grünen Wasserstoffs wird hochreines entionisiertes Wasser benötigt. Vor allem für Standorte mit geringer Verfügbarkeit von Süßwasser und geringer Infrastruktur für die Abwasserbehandlung wäre es daher wünschenswert das Produktwasser der RWGS-Stufe so aufzubereiten, dass es für die Wasserstoffherstellung durch Elektrolyse oder für die Dampferzeugung im Prozess wiederverwendet werden kann. Wie dies mit möglichst geringem Aufwand zuverlässig durchgeführt werden kann, gilt es zu untersuchen.

3.3. Übergreifende Forschungsthemen (Synergien mit anderen AGs)

Der Einfluss von Verunreinigungen in den Edukten CO_2 und H_2 auf den integrierten RWGS/FT-Prozess (Punkt 3.2.2 oben) soll idealerweise zusammen mit der AG 3 untersucht werden. Ebenfalls unter dem Blickwinkel der Prozessintegration wäre ein Prozesskettenvergleich Wasserelektrolyse/RWGS/FT-Synthese und Co-SOEC/FT-Synthese von hohem Interesse, der zusammen mit der AG 4 durchgeführt werden kann. Der Einfluss der Produktspezifikationen für SAF auf den integrierten RWGS/FTS/Upgrading-Prozess und dessen kommerzielle Flexibilität soll gemeinsam mit der AG 5 und für weitere Produkte (z.B. FT-Diesel) mit AG 6 untersucht werden.

3.4. Key Results/Ideen

Kernthemen für die AG 2 sind die dynamische Modellierung der PtL-Prozesskette mit Blick auf einem lastflexiblen Betrieb, die Prozessintegration von RWGS-Stufe und FT-Synthese unter dem Blickwinkel Robustheit und Energieeffizienz und die möglichst umfassende und effiziente Verwertung des gesamten Produktspektrums der PtL-Prozesskette.

3.5. Zu priorisierende Forschungsthemen

- Dynamische Modellierung der PtL-Prozesskette. Es soll ein Treffen der AG 2 organisiert werden, bei dem interessierte Mitglieder mögliche Beiträge vorstellen. Erfasst werden soll dabei auch, welche Möglichkeiten für experimentelle Untersuchungen bestehen.
- Prozessintegration von RWGS und FT-Synthese. Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Kopplung von RWGS und FT-Synthese mit Rückführung der gasförmigen Bestandteile des FT-Produkts (z.B. Einfluss durch Verunreinigung im Feedstock).
- Prozesskettenvergleich Wasserelektrolyse/RWGS/FT-Synthese und Co-SOEC/FT-Synthese.
- Flexibilität FT-basierter PtL-Anlagen bzgl. der Herstellung verschiedener Produkte neben SAF

4. AG 3 – CO₂ und Wasserstoff – Supply Chains, Regulatorik und Nachhaltigkeit

4.1. Motivation und Hintergrund

Die Arbeitsgruppe „CO₂ und Wasserstoff -Supply Chains, Regulatorik und Nachhaltigkeit“ adressiert insbesondere Forschungsfragen, die mit der nachhaltigen Bereitstellung von Wasserstoff und CO₂ für die Produktion von Power-to-Liquid Produkten verbunden sind. Dabei steht die Arbeitsgruppe in direkter Wechselwirkung mit dem TPP-Projekt, wobei Fragestellungen aus der TPP in die Arbeitsgruppe getragen und Praxiserfahrungen bei der Beantwortung von Fragestellungen aus dem Forschungsnetzwerk genutzt werden können. Diesbezüglich steht die Identifikation unterschiedlicher Rohstoffquellen, ihrer spezifischen Charakteristika und ihres Einflusses auf die Betriebsstabilität und Produktqualität im Vordergrund. Ganz explizit betrifft dies die Reinheitsanforderungen an CO₂ und Wasserstoff, die seitens der Syntheseprozesse gestellt werden, die Frage nach der sich daraus ableitenden Eignung unterschiedlicher Quellen bzw. des ggf. entstehenden Reinigungsaufwands.

Neben technologischen und wirtschaftlichen Fragestellungen steht in dieser Arbeitsgruppe vor allem die Regulatorik im Vordergrund, die bisher nur sehr eingeschränkt in der Praxis angewendet wurde und viele Herausforderungen und Optimierungspotenziale in sich birgt. Auch aus dieser Perspektive stehen die Zulässigkeit unterschiedlicher Wasserstoff- und CO₂-Quellen und ihre Nutzbarkeit für die Synthese im Fokus, nicht zuletzt unter Berücksichtigung der jeweiligen Phase des Markthochlaufs und den Anforderungen an eine langfristig nachhaltige, treibhausgasneutrale Produktion. Über den Wissenstransfer und die Vernetzung hinaus, möchte die Arbeitsgruppe gezielt Beiträge zur Gestaltung der Regulatorik leisten und Forschungsprojekte zur Optimierung der Supply Chain initiieren

Es ergeben sich einige inhaltliche Berührungspunkte mit AG 1, AG 2 und AG 4 bezüglich der Frage nach der CO₂-Reinheit und der notwendigen Anpassung der Regulatorik, die im Sinne der Synergienutzung aktiv adressiert werden.

4.2. Forschungsbedarf

4.2.1. CO₂- und H₂-Reinheit

Damit die Supply Chain dauerhaft funktioniert – auch mit unterschiedlichen CO₂ und Wasserstoff-Quellen – bedarf es neuer Standards, die die Anforderungen der Syntheseprozesse, und hier insbesondere der eingesetzten Katalysatoren, abbilden. Um hier schnell voranzukommen sind im ersten Schritt bestehende Standards zu identifizieren und mit Blick auf die Tauglichkeit für die Syntheseprozesse zu klassifizieren. Gleichzeitig sind laufende Forschungsprojekte und Standardisierungsansätze zu eruieren. Im zweiten Schritt soll dann im Rahmen von Stakeholder-Dialogen mittels Fachvorträgen der aktuelle Wissensstand vermittelt und weitergehende Fragestellungen formuliert werden. Auf dieser Basis sollen dann Standardisierungsansätze entwickelt und falls erforderlich in einem Forschungsprojekt finalisiert und in der Anwendung erprobt werden. Eine ganzheitliche Beantwortung der Fragestellung bedarf dabei insbesondere das Mitwirken von Akteuren seitens der Wasserstoff- und CO₂-Quellen, Infrastrukturbetreibern, (PtL-) Anlagenbetreibern und Technologiegebern.

4.2.2. CO₂-Quellen

In der Diskussion ergaben sich eine Reihe von Hinweisen, dass vor allem im Bereich CO₂ aber auch im Bereich H₂ zahlreiche Quellen bislang regulatorisch nicht erfasst sind und daher nicht zur Produktion von RFNBO genutzt werden können. Um hier eine möglichst vollständige Abbildung aller verfügbaren nachhaltig nutzbaren (d. h. im Einklang mit der angestrebten THG-Neutralität) Quellen zu erreichen, sollen zunächst über eine Abfrage der betroffenen Akteure im Netzwerk sämtliche Quellen und die fehlenden regulatorischen Elemente identifiziert werden. Dies schließt neben DAC und biogenen Quellen auch unvermeidbare CO₂-Quellen ein, sofern für diese – beispielsweise über einen bilanziellen Ausgleich – sichergestellt werden kann, dass über die Gesamtkette Treibhausgasneutralität erreicht wird. Im Rahmen von gemeinsamen Workshops sollen dann die aufgeworfenen Fragestellungen wie die „ex-use“ Anrechenbarkeit für nicht triviale CO₂ Quellen nach EU 2023/1185 Anhang 1 Punkt 10 geklärt, bislang nicht berücksichtigte „nachhaltige“ CO₂ Quellen identifiziert und Möglichkeiten der Ermöglichung von deren „ex-use“ Anrechenbarkeit nach EU 2023/1185 Anhang 1 Punkt 10 diskutiert werden. Ein ähnliches Vorgehen wird für Wasserstoff gewählt, um auch hier Wasserstoff, der beispielsweise aus nachhaltigen Quellen als Koppelprodukt entsteht, nutzbar zu machen.

4.2.3. Regulatorik – vom Verhinderer zum Enabler

Regulatorik ist ein sehr weites Feld und in der Diskussion zeigte sich, dass es in der Regel Details in Einzelregelungen sind, die die Realisierung von PtL-Projekten verhindern und somit im gewissen Maße auch den Markthochlauf erschweren können. Um die wichtigsten Probleme auch mit Blick auf den Erfolg der TPP möglichst zeitnah anzugehen, erscheint ein Workshop-Format zielführend, in dem zunächst die drängendsten Probleme benannt, Lösungsansätze diskutiert und formuliert werden, die dann in Richtung Bundesgesetzgebung und EU adressiert werden können. Ergänzt wird dies durch eine Befragung oder Interviewreihe mit PtL-Projektentwicklern, deren Projekte bisher noch nicht „Fahrt“ aufgenommen haben oder gescheitert sind, um auch deren wertvolle Erfahrungen für die zukünftige Gestaltung der Regulatorik nutzbar zu machen. Im Mittelpunkt stehen pragmatische Lösungsansätze, die ganzheitlich gedacht auch die Konsequenzen und Wechselwirkungen mit anderen Regelungen abbilden. So können ggf. Synergien und akzeptierbare Trade-Offs identifiziert werden, die auch auf EU-Ebene angenommen werden können. Um den Überblick über die ständigen Änderungen auf EU-Ebene behalten zu können, kann ggf. ein KI-gestütztes Tool mit Benachrichtigungsfunktion bei Änderungen zum Einsatz kommen.

4.3. Übergreifende Forschungsthemen (Synergien mit anderen AGs)

Die AG 3 hat klare Schnittstellen zu anderen Arbeitsgruppen, insbesondere zu Fischer-Tropsch- und Methanol-to-Jet-Prozessketten und zu den Innovativen Prozessen. Der Beitrag der AG 3 liegt dabei aufbauend auf der technischen Bewertung aus den anderen AGs darin, unter Einbeziehung von breitem Praxiswissen eine Rahmensetzung vorzubereiten, die eine schnelle Umsetzung für die TPP ermöglicht, beispielsweise mit Blick auf die CO₂ und H₂-Reinheit. Darüber hinaus kann die AG die technisch orientierten Bewertungen aus den anderen AGs um weitere Aspekte wie Nachhaltigkeit, Bedeutung für die Treibhausgasneutralität, Skalierbarkeit, Realisierungsgeschwindigkeit ergänzen und dies insbesondere in Anforderungen an die Regulatorik übersetzen.

4.4. Key Results/Ideen

Die AG 3 identifiziert für das Jahr 2026 ganz konkret drei Themenfelder, in denen die AG aktiv werden möchte. Dies ist einerseits das Thema Regulatorik generell, verbunden mit der Frage, wie die wichtigsten Probleme am schnellsten gelöst werden können. Hier soll die Vernetzung der Akteure und der Wissenstransfer über eine Workshopreihe vorangetrieben werden und die jeweiligen Ergebnisse auch in Konsultationsverfahren auf EU-Ebene eingebracht werden. Das zweite Themenfeld betrifft mögliche CO₂- und Wasserstoff-Quellen, verbunden mit der Frage, welche „nachhaltigen“ CO₂- und Wasserstoff-Quellen regulatorisch noch nicht berücksichtigt sind und wie diese nutzbar gemacht werden können. Für dieses Jahr sind hier ein oder mehrere Workshops möglich um gemeinsam mit Zertifizierern und betroffenen Anlagenbetreibern die regulatorische „Realität“ zu erläutern und Wege zu identifizieren, über die weitere CO₂- und Wasserstoff-Quellen regulatorisch abgebildet werden können, ggf. auch im Austausch mit den zuständigen Stellen im Bund und der EU. Klares Ziel ist die Anpassung oder Erweiterung der Regulatorik sofern nötig oder aber die Entwicklung und Dokumentation von konkreten Zertifizierungsoptionen. Das dritte Themenfeld ist CO₂ und H₂ Reinheit, konkret verbunden mit der Fragestellung, welche Reinheitsanforderungen notwendig sind und wie diese definiert werden sollten. Hierzu sollen im ersten Schritt Stakeholder-Dialoge und Fachvorträge aus laufenden Projekten zu dieser Thematik organisiert werden, um dann ggf. im zweiten Schritt ein konkretes Projekt zur Entwicklung von Standards aufzusetzen. In diesem Kontext wird auch das Thema Transportinfrastrukturen punktuell adressiert, da ohne diese die jeweiligen Quellen nicht erschließbar sein werden.

4.5. Zu priorisierende Forschungsthemen

- Regulatorik zu Ende Denken – Welche Regelungen beeinflussen und blockieren sich gegenseitig? Wie können diese beeinflusst werden?
- CO₂- und H₂-Quellen nutzbar machen – Welchen Änderungsbedarf gibt es in der Regulatorik und wie kann dieser adressiert werden?
- Qualitätsfenster für H₂ definieren. Wo liegt der beste Kompromiss zwischen Herstellung, Transport und Syntheseanforderungen?
- CO₂-Qualitätsfenster für DAC und weitere CO₂-Quellen definieren. Wo liegt der beste Kompromiss zwischen Abscheidung, Transport und Syntheseanforderungen?

5. AG 4 – Innovative Prozesse – Plasma-Verfahren, Co-Elektrolyse, DAC

5.1. Motivation and Hintergrund

Die Arbeitsgruppe „Innovative Prozesse“ adressiert neue Prozessbausteine für nachhaltige Power-to-Liquid-Kraftstoffe. Ziel ist es, konkrete Forschungsbedarfe zu identifizieren und daraus Konsortien für Forschungs- und Demonstrationsprojekte abzuleiten.

Im Mittelpunkt stehen drei Technologiefelder: Direct Air Capture (DAC) als langfristig skalierbare nachhaltige CO₂-Quelle, Co-Elektrolyse zur direkten Bereitstellung von Synthesegas für Fischer-Tropsch-Prozesse oder Methanol-Synthese sowie Plasma-Verfahren als flexible Umwandlungstechnologien für erneuerbare Stromspitzen und alternative Kohlenstoffquellen. Die AG ist technologieoffen angelegt, setzt aber diese drei Felder als zentrale Ausgangspunkte.

Die Abgrenzung zu den anderen Arbeitsgruppen liegt im Innovations- und Integrationscharakter. Während AG 1 und AG 2 etablierte PtL-Routen wie Methanol-to-Jet, Fischer-Tropsch-Synthese und RWGS behandeln und AG 3 CO₂- und H₂-Supply-Chains, Regulatorik und Nachhaltigkeit adressiert, fokussiert AG 4 auf neue Technologien, deren technische Anschlussfähigkeit und ihre Bewertung innerhalb zukünftiger PtL-Prozessketten.

5.2. Forschungsbedarf (Forschungsthemen)

5.2.1. Direct Air Capture (DAC)

Direct Air Capture gewinnt CO₂ direkt aus der Umgebungsluft. Aufgrund der niedrigen CO₂-Konzentration ist der Prozess energieintensiv, insbesondere bei der Regeneration von Lösungsmitteln oder Sorbentien. Gleichzeitig ist DAC langfristig eine zentrale nachhaltige CO₂-Quelle für PtL-Prozesse, da es unabhängig von punktuellen fossilen oder biogenen Quellen skalierbar ist.

Zentrale Forschungsbedarfe sind effizientere Sorbentien und Lösungsmittel, angepasste Regenerationskonzepte für unterschiedliche Temperaturniveaus sowie flexible Betriebsstrategien. Besonders relevant ist die Frage, wie DAC mit verfügbarer Prozesswärme, Abwärme oder erneuerbaren Energieüberschüssen gekoppelt werden kann. Ein mögliches Betriebsmodell ist die kontinuierliche Absorption bei flexibler, zeitlich verschiebbarer Desorption.

Für die Integration in PtL-Ketten müssen außerdem CO₂-Qualitätsfenster definiert werden. Dabei sind neben der CO₂-Reinheit auch Feuchte, Sauerstoff, Stickstoff, Lösungsmittelreste und weitere Spurenstoffe zu berücksichtigen. Diese Anforderungen müssen an den Toleranzen nachgelagerter Prozesse wie RWGS, Co-Elektrolyse und Fischer-Tropsch-Synthese ausgerichtet werden.

5.2.2. Co-Elektrolyse

Die Co-Elektrolyse von CO₂ und H₂O ermöglicht die direkte Herstellung von Synthesegas. Für Fischer-Tropsch-Prozesse ist insbesondere ein geeignetes und stabiles H₂/CO-Verhältnis entscheidend. Damit kann die Co-Elektrolyse eine alternative Route zur Synthesegaserstellung gegenüber separater Wasserstoffelektrolyse mit nachgeschalteter RWGS darstellen.

Forschungsbedarf besteht vor allem bei Synthesegasqualität, Lastflexibilität und Degradation. Zu untersuchen ist, wie stark Co-Elektrolyseure dynamisch betrieben werden können, ohne Effizienzverluste, Materialschäden oder unzulässige Schwankungen der Produktgasqualität zu verursachen. Dies ist wesentlich für Anlagenkonzepte mit hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Energie.

Weiterhin müssen Anforderungen an CO₂- und Wasserdampfqualität sowie die Toleranz gegenüber Verunreinigungen untersucht werden. Daraus ergeben sich Schnittstellen zur Gasaufbereitung und zu CO₂-Quellen, wobei der Fokus der AG 4 auf der technologischen Leistungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit der Co-Elektrolyse liegt.

5.2.3. Plasma-Verfahren

Plasma-Verfahren können chemisch stabile Moleküle aktivieren und damit alternative Routen zur Bereitstellung von H₂, CO oder Synthesegas eröffnen. Im Fokus stehen die Reformierung kohlenstoffhaltiger Stoffströme, die Nutzung erneuerbarer Stromspitzen und die Einbindung alternativer Kohlenstoffquellen wie Biomethan oder biogene Reststoffströme.

Der zentrale Forschungsbedarf liegt in Effizienz, Selektivität, Produktgasqualität, Reaktorstabilität und Skalierbarkeit. Plasma-Prozesse müssen zeigen, ob sie als flexible Ergänzung zu thermokatalytischen oder elektrochemischen Verfahren eingesetzt werden können. Besonders relevant ist der Betrieb bei dynamischer Stromverfügbarkeit.

Für eine belastbare Einordnung sind techno-ökonomische Analysen und Lebenszyklusbewertungen erforderlich. Plasma-Verfahren sollten systematisch mit RWGS und Co-Elektrolyse verglichen werden, insbesondere hinsichtlich Effizienz, Flexibilität, Integrationsaufwand, Produktgasqualität und Nachhaltigkeit.

5.2.4. Systemintegration und vergleichende Bewertung

Innovative Prozesse müssen im Kontext vollständiger PtL-Ketten bewertet werden. Dafür sind Schnittstellen zu CO₂-Quellen, Wasserstoffbereitstellung, Synthesegaserzeugung, Fischer-Tropsch-Synthese, Methanol-to-Jet-Routen, Aufbereitung und Speicherung zu definieren.

Ein zentrales Forschungsthema ist der Vergleich von RWGS, Co-Elektrolyse, Plasma-Verfahren und thermochemischen Prozessen zur Wasserstoff- oder Synthesegaserzeugung. Bewertet werden sollten Energieeffizienz, Kohlenstoffausbeute, Dynamikfähigkeit, Wärmeintegration, Kosten, Skalierbarkeit, Degradation und Produktgasqualität.

Darüber hinaus sind hybride Prozesskonzepte relevant. Dazu zählen insbesondere solarthermochemische Verfahren mit direkter solarer Einkopplung sowie deren Elektrifizierung oder Hybridisierung. Die TPP kann dabei als Plattform zur Erprobung und Integration solcher Konzepte dienen. Weitere Ansätze umfassen die Kopplung mit Wärmeträgerfluiden, thermischen Speichern oder lokalen Kohlenstoffquellen. Dazu zählen neben CO₂ auch Biogas, landwirtschaftliche Reststoffe, Abwasserströme, Lignin oder Schwarzlauge. Die Bewertung sollte technologieoffen erfolgen und sich an Nachhaltigkeit, Effizienz, Klimawirkung und technischer Umsetzbarkeit orientieren.

5.3. Übergreifende Forschungsthemen (zusammen mit anderen AGs)

Die AG 4 hat klare Schnittstellen zu anderen Arbeitsgruppen, insbesondere zu CO₂- und H₂-Bereitstellung, Fischer-Tropsch- und Methanol-to-Jet-Prozessketten, Nachhaltigkeitsbewertung und regulatorischen Fragen. Der Beitrag der AG 4 liegt in der technischen Bewertung innovativer Prozessmodule und ihrer Anschlussfähigkeit an PtL-Ketten.

Ein zentrales Querschnittsthema ist die Definition von Qualitätsfenstern für Edukte, Zwischenprodukte und Produktströme. Das betrifft CO₂ aus unterschiedlichen Quellen, Synthesegas aus Co-Elektrolyse oder Plasma-Verfahren sowie H₂- und CO-haltige Zwischenprodukte. Relevant sind Hauptkomponenten, Spurenstoffe und dynamische Schwankungen der Zusammensetzung.

Weitere Themen sind Feedstock-Speicherung, dezentrale Wärmenutzung, lokale Kohlenstoffquellen sowie Schnittstellen- und Datenstandards. Ziel ist es, innovative Technologien vergleichbar zu machen und ihre Integration in PtL-Prozessketten zu erleichtern.

5.4. Zentrale Ergebnisse und Ideen

Die AG 4 identifiziert DAC, Co-Elektrolyse und Plasma-Verfahren als zentrale Innovationsfelder für zukünftige PtL-Prozessketten. DAC adressiert die nachhaltige CO₂-Bereitstellung, Co-Elektrolyse die direkte Synthesegaserzeugung für Fischer-Tropsch-Prozesse und Plasma-Verfahren die flexible Nutzung erneuerbarer Stromspitzen sowie alternativer Kohlenstoffquellen.

Der gemeinsame Forschungsbedarf liegt in der Absicherung von Schnittstellen. Dafür müssen Stoffstromqualitäten, Betriebsfenster, Aufbereitungsbedarfe und dynamische Wechselwirkungen mit nachgeschalteten Prozessen bekannt sein. Besonders wichtig sind Benchmarking-Kampagnen, vergleichende Prozessbewertungen und standardisierte Anforderungen an Edukte und Zwischenprodukte.

5.5. Zu priorisierende Forschungsthemen

- CO₂-Qualitätsfenster für DAC und weitere CO₂-Quellen definieren.
- DAC-Konzepte für unterschiedliche Temperaturniveaus und flexible Betriebsstrategien bewerten.
- Co-Elektrolyse für Fischer-Tropsch-taugliches Synthesegas untersuchen.
- Lastflexibilität und Degradation von Co-Elektrolyseuren bewerten.
- Plasma-Verfahren hinsichtlich Effizienz, Flexibilität, Produktgasqualität und Skalierbarkeit analysieren.
- Alternative Kohlenstoffquellen und Anforderungen an Vorbehandlung, Speicherung und Weiterverarbeitung untersuchen.
- Regulatorische Rahmenbedingungen technologieoffen bewerten.

6. AG 5 – Anwendungen Schifffahrt und Verkehr – Fuel Design, Logistik & Klimawirkung

6.1. Motivation und Hintergrund

Die AG Anwendungen Schifffahrt und Verkehr betrachtet grundlegend verschiedenen Anwendungsgebiete für die Nutzung von PtL-Kraftstoffen. Dies beinhaltet zum einem die Anwendung von PtL-Diesel in der Schifffahrt, dem Schienenverkehr sowie ausgewählten Einsatzgebieten (z.B. Katastrophenschutz) von Nutzfahrzeugen und Großmotoren im Allgemeinen. Für die Nutzung von PtL-Kraftstoffen im bodengebundenen Verkehr werden neben Dieselanwendungen auch die Möglichkeiten des Einsatzes von PtL-Naphtha betrachtet. Darüber hinaus sind auch Anwendungsfelder außerhalb des Verkehrssektors (z.B. chemische Industrie, Notstromerzeugung) relevante Forschungsthemen.

Im Fokus stehen Fragen zur Einsatzfähigkeit und Einsetzbarkeit, der Logistik von Kraftstoffen, die Emissionen von nachhaltigen Kraftstoffen sowie Fragestellungen zu technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten. Damit eng verbunden sind die regulatorischen Rahmenbedingungen, die für eine nachhaltige und skalierbare Transformation der Energiewirtschaft notwendig sind. Die AG befasst sich dabei sowohl mit technischen, ökonomischen als auch regulatorischen Themenfeldern bzw. Fragestellungen.

6.2. Forschungsbedarf

Aufgrund der Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten wurden bereits zahlreiche Forschungsfragen, die als Grundlage für die weitere Forschung dienen können, erarbeitet. Diese sind nachfolgend aufgeführt wobei zwischen den verschiedenen Anwendungsfeldern unterschieden wird. Diese Auflistung ist allerdings als nicht abschließend zu betrachten, da sich jederzeit neue Forschungsthemen ergeben können.

6.2.1. Schifffahrt

- Ist eine Umrüstung von Schiffen zur Erhöhung der Kraftstoffflexibilität sinnvoll bzw. notwendig?
 - Dies würde die Kompatibilität mit unterschiedlichen Kraftstoffen sicherstellen und damit die Kraftstoffflexibilität erhöhen.
 - Dabei ist allerdings nicht ausreichend nur den Motor und das Kraftstoffsystem zu betrachten, sondern das gesamte kraftstoffführende System des Schiffes selbst
 - Welche bestehenden Schiffsmotoren können bereits ohne größere Anpassungen mit PtL-Diesel betrieben werden?
 - Welche technischen Anpassungen sind insbesondere bei einem Wechsel von Schweröl auf PtL-Diesel erforderlich?
- Wie könnten Schiffe mit möglichst wenig Aufwand angepasst werden?
- Ist eine Diversifizierung der Kraftstoffe abhängig vom Schiffstyp?
 - Für welche Schiffstypen und Einsatzprofile ist der Einsatz von PtL-Diesel besonders geeignet?
 - Können z.B. Fähren, Hafenschiffe oder Sportboote als frühe Demonstrationsanwendungen dienen?
- Ist ein gezielter Einsatz von PtL-Diesel in Häfen, Küstenregionen und Emissionskontrollgebieten technisch und ökologisch sinnvoll?
- Kann mit Blick auf die Logistik eine globale Verfügbarkeit gewährleistet werden?
 - Können bestehende Lager-, Tank- und Bunkerinfrastrukturen für PtL-Diesel genutzt werden?

6.2.2. Schwerlast / Nutzfahrzeuge

- Wie hoch ist das Nachfragepotenzial im Nutzfahrzeugbereich?
 - Welche Rolle spielen Verbrennungsmotoren im Vergleich zu batterieelektrischen und brennstoffzellenbasierten Antrieben?
 - Welche Nachfrage nach PtL-Kraftstoffen ist zu erwarten?
 - Sind PtL-Kraftstoffe ggf. nur für Sonderfahrzeuge relevant bzw. in welchen Einsatzgebieten werden PtL-Kraftstoffe auch zukünftig nachgefragt werden?
- V.a. mit Blick auf langfristig nicht elektrifizierbare Bereiche und Bestandsflotten: Lässt sich ein prioritärer Einsatz von PtL-Kraftstoffen identifizieren?

6.2.3. Stationäre Energie und Notstromversorgung

- Was gehört zur kritischen Infrastruktur und wer benötigt eine resiliente Notstromversorgung?
 - Bislang bekannte Bereiche sind Datenzentren und Krankenhäuser. Aber auch für Unternehmen würden die Vorhaltung von PtL-Diesel als Reserve die Scope-1-Emissionen reduzieren.
 - Wie lässt sich der Gesamtbedarf in diesem Bereich ermitteln?
- Lässt sich mit der Bevorratung von PtL-Kraftstoffen die Lagerstabilität erhöhen?
 - Da der Kraftstoff zunächst nur als Reserve für den Notfall gelagert wird und im Anwendungsfall zuverlässig funktionieren muss, muss der Kraftstoff nach einer bestimmten Zeit ausgetauscht werden.
 - Ein synthetischer Kraftstoff sollte mindestens genauso lange lagerfähig sein. Idealerweise wird der Syntheseprozess genutzt um die Lagerstabilität sogar noch zu erhöhen.
- Aufgrund des Aufwandes bei der Herstellung eines PtL-Kraftstoffes schließt sich die Folgefrage an, wie der Kraftstoff nach Ablauf des Lagerendes noch genutzt werden kann?

6.2.4. Anwendung von Naphtha

- Die oben genannten Anwendungsfelder fokussieren sich auf die Nutzung von PtL-Diesel. Im FT-Prozess entsteht allerdings immer auch Naphtha. – Wo bietet dieses eine sinnvolle Anwendungsmöglichkeit?
- Wie sollte die Kraftstoffzusammensetzung für ottomotorische Anwendungen aussehen?

6.2.5. Allgemein

Die hier aufgeführten Forschungsfragen sind für mehrere Anwendungsfelder zutreffend. Ihre Beantwortung kann je nach Anwendungsfall jedoch unterschiedlich ausfallen. Die Fragestellungen lassen sich dabei unterteilen in technische, ökonomische und regulatorische Themenfelder.

Technisch

- Wie verhält es sich mit den Produkteigenschaften, der Kompatibilität sowie der Mischfähigkeit des PtL-Kraftstoffes?
- Welche (ggf. neuen) Additive sind für den Einsatz notwendig?

- Wie verteilen sich die Emissionen hinsichtlich des Betrachtungsrahmens von Well-to-Gate, Well-to-Tank, Tank-to-Wake und Well-to-Wake?
- Wie hoch sind die realen Emissionseinsparungen bei der Verwendung von PtL-Kraftstoffen?
- Wie verhalten sich Zahlungsbereitschaft der verschiedenen Anwender und Kosten der Herstellung zueinander?
- Welche Rolle spielt die Kraftstofflogistik bei der Einführung eines synthetischen Kraftstoffes?

Ökonomisch

- Sind Biokraftstoffe ein Wettbewerber für PtL-Kraftstoffe mit Blick auf die Ressourcenverfügbarkeit vs. den Kosten?
- Inwieweit bietet die Anwendung von Mischkraftstoffen einen ökonomischen Vorteil?
- Wo liegt das technoökonomische Optimum bei der Betrachtung von Herstellung und ggf. notwendiger Umrüstung im Vergleich zur Anwendung des Kraftstoffes?

Regulatorisch

- Müssen Normen für die Anwendung von PtL-Kraftstoffen ggf. angepasst werden? Bspw. sind die Fahrzeuge der Bundeswehr nicht für die Nutzung von paraffinischem Dieselmotorkraftstoff nach EN 15940 zugelassen.
- Welchen Einfluss hat der regulatorischen Rahmen wie Quoten oder Vorgaben zur Inverkehrbringung?

6.3. Übergreifende Forschungsthemen (zusammen mit anderen AGs)

Mit Blick auf die Single-Fuel-Policy der NATO (Einsatz von Kerosin in Dieselmotoren) und der Frage der Nutzung von Kerosin bzw. SAF in Fahrzeugen wurde bereits eine Schnittstelle zur AG Anwendung Luftfahrt (SAF) identifiziert. Darüber hinaus ergibt sich mit der Betrachtung der Kraftstoffeigenschaften und -zusammensetzungen wie auch von ökonomischen Fragestellungen eine Schnittmenge zu den AGs Fischer-Tropsch-Synthese & RWGS sowie Methanol-to-Jet.

6.4. Key Results/Ideen

Die Diskussion mit Experten zeigt, dass immer neue Anwendungsbereiche auftauchen. Daher wäre ein erstes Ziel eine Übersicht zu den verschiedenen Kraftstoffoptionen und Anwendungsbereichen zu erarbeiten und dabei darzustellen in welchem Bereich welcher Kraftstoff benötigt wird.

6.5. Zu priorisierende Forschungsthemen

Die Demonstration des Kraftstoffes der TPP in realen Anwendungsuntersuchungen wird als prioritäres Thema gesehen. Dabei können mehrere Aspekte der oben genannten Forschungsfragen abgedeckt werden:

- Der Nachweis der technischen Zuverlässigkeit und Kompatibilität im Dauerversuch und unter realen Anwendungsbedingungen.
- Die Untersuchung der Möglichkeiten vorhandene Logistikketten zu nutzen bzw. der Aufwand, wenn neue Infrastrukturen geschaffen werden müssen.
- Die Begleitung der Anwendung mit Emissionsmessungen

7. AG 6 – Anwendung Luftfahrt (SAF) – Fuel Design, Logistik & Klimawirkung

7.1. Motivation und Hintergrund

Die Arbeitsgruppe „Anwendung Luftfahrt (SAF): Fuel Design, Logistik & Klimawirkung“ hat sich zum Ziel gesetzt, Forschungsprojekte zu initiieren und zu unterstützen, bei denen alle Arten von nachhaltigen Flugkraftstoffen (SAF), einschließlich des TPP-PtL-SAFs, an zivile, geschäftliche oder militärische Flugzeuge geliefert und dort eingesetzt werden, um die zusätzlichen Vorteile von SAF, über die CO₂-Emissionsminderungen hinaus, weiter aufzuzeigen und zu quantifizieren. Die vorgesehenen speziellen Methoden und Werkzeuge reichen von Experimenten im Labormaßstab über Prüfstandtests und Modellierungen mit Schwerpunkt auf physikalischen und chemischen Teilprozessen, bis hin zu speziellen Kurz- und Langstreckenflügen einschließlich Bodentestkampagnen. Im Einklang mit den übergeordneten Themen des Gesamtprojekts – dem Markteintritt und der Förderung von PtL-Kraftstoffen – wird auch die Lieferkette in der Arbeitsgruppe behandelt und bildet einen eigenen Forschungs- und Entwicklungsbereich. Ein derart breites Spektrum an notwendigen Forschungsaktivitäten erfordert eine Vielfalt an Akteuren, die an dieser Arbeitsgruppe teilnehmen: Universitäten und Forschungseinrichtungen, Luftfahrt-OEMs, Fluggesellschaften, Flughäfen, traditionelle Kraftstofflieferanten sowie Anbieter von Bordbetankungslösungen.

7.2. Forschungsbedarf

Die Nutzung von TPP-PtL-SAF muss auf die Produktion abgestimmt werden, insbesondere in den frühen Phasen, in denen ein Hochlauf sowie geplante Produktionskampagnen das wahrscheinlichste Betriebsszenario darstellen. Es ist geplant, die PtL-SAF-Produktion im Jahr 2028 hochzufahren und im Jahr 2029 eine kontinuierliche Produktion von synthetischen Beimischkomponenten (SBC) zu erreichen. Aus Sicht der Leistung der TPP-Demonstrationsanlage und der Kraftstoffnutzung, bildet der Zeitraum 2028–2029 die Basislinie und wird künftig als Vergleichsreferenz dienen. Über die SBC hinaus, können anschließend mehrere andere SAF-Typen hergestellt und in Großprojekten eingesetzt werden. Hier die Liste aller geplanten SAFs:

1. SBC (Synthetic Blending Component),
2. 100 % FT-SPK (Nicht-Drop-in-SAF), Jet „X“
3. SAK (Synthesized Aromatic Kerosene),
4. 100 % Drop-in-SAF.

7.2.1. Sichere Nutzung von SAF

Zur Sicherstellung der Sicherheit und Qualität von künftigen Kraftstoffen wird an der Weiterentwicklung der Normen ASTM D4054 und ASTM D7566 mitgewirkt. Der Fokus liegt dabei auf einer zukunftsweisenden Auslegung und Anpassung bestehender Annexe (FT-SPK) sowie der Einführung neuer Entwicklungen, wie z. B. für 100 % vollsynthetische Turbinenkraftstoffe. Forschungsbedarf besteht in der Auswahl geeigneter und idealerweise leicht messbarer Eigenschaften. Es besteht Forschungsbedarf bei der Definition von Grenzwerten, die gegebenenfalls gelockert werden könnten, um die Produktionskosten zu senken.

7.2.2. Entwicklung von Standards für 100 % SAF

Für die Standardisierungs- und Zertifizierungsprozesse werden neue Kraftstoffe in ausreichend großen Mengen benötigt. Mitwirkung an der Festlegung der neuen Spezifikation für 100 % nicht-drop-in-fähige SAF: Jet „X“. Angebot an das ASTM/IAEG-Gremium, ausreichende Menge von synthetischen Kraftstoffen mit verschiedenen Eigenschaften für weiterführende Messungen und Untersuchungen bereitzustellen. Die TPP unterstützt sowohl nationale als auch internationale Gremien bei der Qualifizierung von Luftfahrtkraftstoffen und technischen Vorhaben, indem sie Kraftstoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaften bereitstellt. Darüber hinaus sollen Flugzeug- und Triebwerkshersteller gezielt PtL-Kraftstoffe für Zertifizierungsverfahren erhalten. Damit leistet die TPP einen wesentlichen Beitrag zur beschleunigten Standardisierung von 100 % aromatenfreiem, nachhaltig produziertem Kerosin, was einer Grundvoraussetzung für die Ertüchtigung und Zertifizierung entsprechender Luftfahrzeuge ist.

7.2.3. Leistung

Untersuchung, Quantifizierung und Bewertung der Verbesserungen der Kraftstoffeigenschaften und der damit verbundenen Leistung von Strahltriebwerken.

7.2.4. Emissionsminderungen

Untersuchung und Quantifizierung des Emissionsminderungspotenzials, das direkt mit der Zusammensetzung des Kraftstoffes zusammenhängt: schwefelhaltige, flüchtige, organische Verbindungen (VOC) und flüchtige Partikel (vPM) sowie Ruß (d. h. nvPM). Bewertung der Vorteile hinsichtlich des Klimawirkungspotenzials und der lokalen Luftqualität.

7.2.5. Betrieb

Untersuchung von Leistungsverbesserungen und Emissionsminderungen im Flugbetrieb.

7.2.6. Wartung

Überwachung von Kraftstoff- und Verbrennungssystem während mehrerer Wartungszyklen und Vergleich der Ergebnisse mit ähnlichen Flugzeugbetrieben, die mit herkömmlichem Jet A-1 betrieben werden.

7.2.7. Aufbau der Lieferkette (Schwerpunkt auf TPP PtL-SAF)

- Technische Zertifizierung gemäß ASTM D7566 Annex 1 für jede Charge von PtL-SPK, die aus der Produktion der TPP-Demonstrationsanlage stammt. Anschließend gilt diese als synthetische Beimischungskomponente (SBC)

- Nachhaltigkeitszertifizierung: Auswahl eines Prüfunternehmens zur Bewertung der TPP-SAF-Kraftstoffproduktion gemäß den ISCC-Kriterien und zur Ausstellung der Zertifikate für alle im Projekt verwendeten Kraftstoffchargen
- Auswahl eines geeigneten konventionellen Jet A-1 für die Beimischung. Anschließend Beschaffung, Beimischung und gegebenenfalls Lagerung an einer Zwischenstation
- Zertifizierung der finalen Kraftstoffmischung gemäß ASTM D7566 Table 1; diese gilt anschließend als Jet A-1 (ASTM D1655)
- Logistik zum Flughafen
- Lagerung am Flughafen: separate Lagertanks für eine getrennte Nutzung im Gegensatz zur Einlagerung in die normalen Lagertanks
- Zusammenarbeit mit Betankungsdienstleistern
- Qualitätssicherung entlang der Lieferkette

7.2.8. Übergang von der Verwendung synthetischer Beimischungskomponenten (SBC) in Mischungen von maximal 50% auf 100% SAF

- 500 t bis 1.000 t SBC während der Basisproduktionsphase 2028–2029. Folglich sollten die Einsatzprojekte zahlreich sein und relativ kleine Mengen umfassen: jeweils 10 t bis 300 t. Vorgesehen sind Labor- und Teststandversuche, Triebwerksprüfstandtests sowie der Einsatz in Forschungsflugzeugen oder bei Unternehmen der Business Aviation. Letztere sollten einen Forschungsaspekt beinhalten.
- Ab Mitte 2029 sind größere Verwertungsprojekte mit 1.000 t pro Projekt vorstellbar. Vorrang sollten Projekte erhalten, die den Fokus auf eine Pilotstrecke für den langfristigen betrieblichen Einsatz sowie auf höhere SAF-Beimischungsquoten legen.
- Abhängig davon, ob sich synthetisches aromatisches Kerosin (SAK) direkt im Prozess der TPP-Produktaufbereitung (PWU) herstellen oder als Blendstock extern zukaufen lässt, ist bis 2030 der Einsatz von vollständig formulierten 100 % Drop-in-SAFs denkbar.
- Starke Unterstützung für Nischenflugroutenstrecken, auf denen ein Einsatz von 100 % SPK (Non-Drop-in-SAF) vorgesehen ist.

7.2.9. Intelligente Nutzung von SAF

Mischungen mit hohen Anteilen an PtL-SPK oder sogar 100 % PtL-SAF können als Kerosinvarianten betrachtet werden, die zu geringer Kondensstreifen-Bildung und verbesserter lokaler Luftqualität führen. Da solche Kraftstoffe auf dem Markt bis jetzt noch äußerst selten sind, wäre ihr Einsatz für den kleinen Anteil (<10 %) aller Flüge, der weltweit für den Großteil (> 80 %) der durch Kondensstreifen verursachten

Klimawirkung verantwortlich ist, von Vorteil. Ebenso wäre an Tagen mit Smogwarnung oder erhöhter Feinstaubbelastung der Einsatz eines solchen Kerosins, das die Konzentration von Rußpartikeln rund um den Flughafen erheblich reduziert, von großem Nutzen. Die Einrichtung der erforderlichen getrennten Kraftstofflagerung und Logistik am Flughafen sowie der Flugbetrieb im Rahmen dieses Konzepts der intelligenten Nutzung von SAF müssen zunächst entwickelt und im Vergleich zum „Business as usual“ bewertet werden.

7.2.10. Fuel Design

Fuel Design bezeichnet die maßgeschneiderte Entwicklung von Treibstoffen, um spezifische Ziele (z.B. Klimavorteile, höhere Ausbeuten) zu erreichen oder bestimmte Einsatzzwecke zu erfüllen. Im Kontext der TPP liegt ein Fokus auf der iterativen Abstimmung zwischen der FT-Syncrude-Raffination (oder PWU) und der PtL-SAF-Nutzung sowie deren Bewertung, um zu einer optimalen PtL-SAF-Zusammensetzung zu gelangen. Während dieses Konzept zunächst im Labor- und Pilotmaßstab ansetzt, wird es schließlich im Demonstrationsmaßstab angewendet. Die TPP wird dabei sowohl für die Produktionsseite (Raffination) als auch für Verwertungsprojekte genutzt, um die Vorteile der optimierten Zusammensetzung im Vergleich zum Basisszenario aufzuzeigen. Hier ist die enge Zusammenarbeit mit OEMs sowie Klima- und Umweltwissenschaftlern von großer Bedeutung, um die Ziele der Kraftstoffoptimierung zu definieren. Parallel dazu sollte die Zusammenarbeit und technische Abstimmung mit den Gremien für Standardisierung (ASTM) und OEM-Koordinierung (IAEG) erfolgen, damit das Potenzial bei der Herstellung und den entsprechenden Eigenschaften verstanden und umgesetzt werden kann. Ein Ziel vom Fuel Design besteht darin, ein günstiges, aber sicheres Kerosin zu entwickeln, das den Anforderungen der OEMs entspricht.

7.3. Übergreifende Forschungsthemen (Synergien mit anderen AGs)

Derzeit werden Überschneidungen und potenzielle Synergien sowohl mit der Arbeitsgruppe „Anwendung Schifffahrt und Verkehr – Fuel Design, Logistik & Klimawirkung“ (Arbeitsgruppe 5) als auch mit der Arbeitsgruppe „Methanol-to-Jet“ ermittelt. Der Methanol-to-Jet-Prozess kann dabei eine Quelle für SBC sein, sowohl in aromatenfreier als auch aromatenhaltiger Form. Zudem haben einige der bisher zur Gestaltung von TPP-SAF-Nutzungsprojekten kontaktierten Fluggesellschaften Interesse an DAC bekundet. Diese Technologie dient diesen Airlines derzeit als CO₂-Kompensationsmaßnahme. Der Aufbau von Kommunikationskanälen und der Austausch zwischen der Arbeitsgruppe 4 „Innovative Prozesse“ und der Arbeitsgruppe 5 könnte daher von Vorteil sein. Als ein gemeinsames Forschungsthema wäre hier beispielsweise die vergleichende Analyse alternativer Antriebskonzepte (LH₂, Brennstoffzelle, Hybrid-, Vollelektrisch) hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit, Nachhaltigkeitsbilanz, Lebenszyklusanalyse sowie des Gesamtwirkungsgrads über die gesamte Kette von der Quelle bis zur Endnutzung, in Betracht zu ziehen.

7.4. Key Results/Ideen

Die meisten der oben genannten Forschungsbedarfe lassen sich in eine zweidimensionale Matrix einordnen: Eine Dimension bilden dabei die verschiedenen PtL-SAF-Typen (SBC, 100 % SPK, SAK und 100 % Drop-in-SAF), die andere Dimension die jeweiligen Einsatzbereiche und Nutzungssektoren wie Zivilluftfahrt, Business Aviation sowie Notdienste (z.B. Rettungshubschrauber) und militärischer Einsatz. Somit kann für jedes der

zehn genannten Forschungsgebiete eine spezifische Kombination aus „Kraftstoff x Sektor“ abgeleitet werden.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Strombasierte Kraftstoffe können nicht nur einen erheblichen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz leisten, sondern auch die Resilienz des Energiesystems als speicherbarer Energieträger unterstützen. Aktuell sind sie jedoch noch nicht in größerem Umfang am Markt verfügbar. Um den Markthochlauf zu fördern wird mit der vom Bundesministerium für Verkehr (BMV) geförderten Technologieplattform Power-to-Liquid-Kraftstoffe (TPP) in Leuna die erste Forschungsanlage ihrer Art errichtet, welche die gesamte Prozesskette der PtL-Herstellung im semi-industriellen Maßstab demonstriert.

Der Betrieb der TPP soll nicht nur Technologien und Verfahren für die Produktion strombasierter Kraftstoffe weiterentwickeln, sondern auch die Kraftstoff-Zusammensetzung optimieren, die zum Beispiel über die sogenannten nicht-CO₂-Effekte einen erheblichen Einfluss auf die Klimawirkung der Luftfahrt hat. Begleitet wird der Bau und Betrieb der Anlage durch das TPP-Forschungsnetzwerk. Es steht allen interessierten Stakeholdern aus Forschung, Industrie und Anwendung offen und knüpft mit seinen Themen an die Ergebnisse vieler bisheriger Forschungsanstrengungen im PtL-Bereich in Deutschland an. Mit dem Start des Netzwerkes haben sich sechs themenspezifische Arbeitsgruppen herausgebildet.

Zwei Arbeitsgruppen fokussieren sich direkt auf die Produktionspfade. Die Arbeitsgruppe „Fischer-Tropsch-Synthese und RWGS“ adressiert die technologisch am weitesten entwickelte Prozesskette zur Herstellung von PtL-Kraftstoffen. Kernthemen sind dabei die dynamische Modellierung der PtL-Prozesskette mit Blick auf einen lastflexiblen Betrieb, die Prozessintegration von RWGS-Stufe und Fischer-Tropsch-Synthese unter dem Blickwinkel der Robustheit und Energieeffizienz und die möglichst umfassende und effiziente Verwertung des gesamten Produktspektrums. Auf eine weitere Produktionsroute fokussiert sich die Arbeitsgruppe „Methanol-to-Jet“ (MtJ) als einen vielversprechenden Ansatz für die wirtschaftliche Herstellung von Sustainable Aviation Fuels (SAF) und weiteren flüssigen Energieträgern. Die Herstellung von Methanol aus CO₂/H₂ und aus Biomasse-Reststoffen wurde bereits im industriellen Maßstab demonstriert. Bei MtJ-Verfahren steht eine Demonstration in größerem Maßstab noch aus, weshalb dies der wichtigste nächste Schritt in der Entwicklung ist.

Forschungsfragen, die mit der nachhaltigen Bereitstellung von Wasserstoff und CO₂ für die Produktion von Power-to-Liquid-Produkten verbunden sind, werden durch die Arbeitsgruppe „CO₂ und Wasserstoff -Supply Chains, Regulatorik und Nachhaltigkeit“ adressiert. Im Vordergrund stehen die Identifikation unterschiedlicher Rohstoffquellen, ihrer spezifischen Charakteristika und ihres Einflusses auf die Betriebsstabilität und Produktqualität.

Die Arbeitsgruppe „Innovative Prozesse“ legt den Schwerpunkt auf neue Prozessbausteine im Herstellungsprozess nachhaltiger Power-to-Liquid-Kraftstoffe. Sie ist technologieoffenen angelegt und grenzt sich durch ihren Innovations- und Integrationscharakter von den anderen Arbeitsgruppen ab. Zum Start ihrer Tätigkeiten stehen drei Technologiefelder im Fokus: Direct Air Capture (DAC) als CO₂-Quelle, Co-Elektrolyse zur Bereitstellung von Synthesegas sowie Plasma-Verfahren als flexible Umwandlungstechnologien für erneuerbare Stromspitzen und alternative Kohlenstoffquellen.

Zwei weitere Arbeitsgruppen beschäftigen sich mit den Anwendungsbereichen von PtL-Kraftstoffen. Die Demonstration von PtL-Kraftstoffen in realen Anwendungsuntersuchungen wird als prioritäres Thema gesehen. Dabei stehen Fragen zur Einsatzfähigkeit und Einsetzbarkeit, der Logistik von Kraftstoffen, den Emissionen von nachhaltigen Kraftstoffen sowie Fragestellungen zu technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten im Fokus.

Die Arbeitsgruppe „Anwendung Schifffahrt und Verkehr“ betrachtet verschiedene Anwendungsgebiete: PtL-Diesel in der Schifffahrt, dem Schienenverkehr sowie ausgewählten Einsatzgebieten (z.B. Katastrophenschutz) von Nutzfahrzeugen und Großmotoren im Allgemeinen. Für die Nutzung von PtL-Kraftstoffen im bodengebundenen Verkehr werden neben Dieselanwendungen auch die Möglichkeiten des Einsatzes von PtL-Naphtha betrachtet. Darüber hinaus sind auch Anwendungsfelder außerhalb des Verkehrssektors (z.B. chemische Industrie, Notstromerzeugung) relevante Forschungsthemen. Im Bereich der Arbeitsgruppe „Anwendung Luftfahrt (SAF)“ sollen Forschungsprojekte initiiert und unterstützt werden, bei denen alle Arten von nachhaltigen Flugkraftstoffen (SAF) an zivile, geschäftliche oder militärische Flugzeuge geliefert und dort eingesetzt werden, um die Vorteile von SAF aufzuzeigen und zu quantifizieren.

Mit den Themen aus den Arbeitsgruppen zeigt die Roadmap des TPP-Forschungsnetzwerkes einen umfassenden Forschungsbedarf entlang des gesamten Herstellungs- und Anwendungsprozesses von PtL-Kraftstoffen auf. Dies umfasst auch die Identifikation von arbeitsgruppenübergreifende Forschungsthemen. Damit wurde im Rahmen des Forschungsnetzwerkes ein aktiver Prozess des Wissensaustauschs initiiert, an dem bereits über 150 Fachexperten bundesweit aus vielen namhaften Forschungsinstitutionen und Unternehmen beteiligt sind. Durch den barrierefreien Zugang zum Forschungsnetzwerk wird die wichtige Vernetzung im PtL-Bereich gefördert. Die weitere Bearbeitung und Vertiefung der hier genannten Themen soll den Markthochlauf von PtL-Kraftstoffen vorantreiben und den Bau und Betrieb der Technologieplattform aktiv unterstützen.

Förderhinweis

Aufbau und Forschungsbetrieb der „Technologieplattform Power-to-Liquid-Kraftstoffe (TPP)“ werden im Rahmen des Gesamtkonzepts Erneuerbare Kraftstoffe mit insgesamt knapp 290 Millionen Euro durch das Bundesministerium für Verkehr gefördert. Der wettbewerbliche Förderaufruf „Errichtung und Betrieb einer Entwicklungsplattform für Power-to-Liquid-Kraftstoffe“ wird von der NOW GmbH koordiniert und durch den Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH umgesetzt.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projektträger:

