

Forschungs- und Demonstrationsvorhaben
zum Einsatz von erneuerbarem Kerosin am
Flughafen Leipzig/Halle (DEMO-SPK)

DEMO-SPK wird finanziert durch



www.mks-dialog.de



Einsatz von Multiblend-JET-A-1 in der Praxis

Zusammenfassung der Ergebnisse
aus dem Modellvorhaben der
Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

Autoren

Nils Bullerdiel (TUHH), Joachim Buse (AGM), Niels Dögnitz (DBFZ), Andreas Feige (MCS),
Ann-Marlen Halling (MCS), Stephanie Hauschild (DBFZ), Peter Hawighorst (MCS), Martin Kaltschmitt (TUHH),
Thomas Kuchling (TUBAF), Sven Kureti (TUBAF), Stefan Majer (DBFZ), Christian Marquardt (WIWeB),
Franziska Müller-Langer (DBFZ), Ulf Neuling (TUHH), Katja Oehmichen (DBFZ), Jan Pechstein (TUHH),
Dietmar Posselt (aireg), Sebastian Scheuermann (WIWeB), Tobias Schripp (DLR), Hendrik Stein (ASG),
Alexander Zschocke



Projektpartner und Kontaktmöglichkeiten

**Adeptus Green
Management GmbH**
Planning. Projects. Procurement.

Adeptus Green Management GmbH
Lerchennest 24
21244 Buchholz in der Nordheide

Dr. Joachim Buse
+49 41 81 39 231
josuko@t-online.de



aireg – Aviation Initiative for Renewable
Energy in Germany e. V.
Haus der Luftfahrt
Friedrichstraße 79
10117 Berlin

Melanie Form
+49 30 700-11 85 15
melanie.form@aireg.de



BP Europa SE
Überseeallee 1
20457 Hamburg

Thomas Parsons
+44 20 34 01 83 01
thomas.parsons@uk.bp.com

Sven Rieve
+49 172 67 21 879
sven.riev@de.bp.com



DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer
+49 341 24 34-423
franziska.mueller-langer@dbfz.de



European Air Transport Leipzig GmbH
August-Euler-Straße 1
04435 Leipzig

+49 341 44 99-10 30
eatlej.communications@dhl.com



Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt (DLR)
Pfaffenwaldring 38–40
70569 Stuttgart

Dr. Tobias Schripp
+49 711 68 62-373
tobias.schripp@dlr.de



IFOK GmbH
Reinhardtstraße 58
10117 Berlin

Catharina Wolf
+49 30 53 60 77-67
catharina.wolf@ifok.de



Meo Carbon Solutions GmbH
Hohenzollernring 72
50672 Köln

Andreas Feige
+49 221 50 80 20-20
feige@meo-carbon.com



Neste Corporation
Finland

Henrik Erämetsä
+358 50 45 84 482
henrik.erametsa@neste.com



Sunfire GmbH
Gasanstaltstraße 2
01237 Dresden

Karl Hauptmeier
+49 351 89 67 97-973
karl.hauptmeier@sunfire.de



Technische Universität Hamburg
Institut für Umwelttechnik und
Energiewirtschaft
Eißendorfer Straße 40 (N)
21073 Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt
+49 40 42 878-3008
kaltschmitt@tuhh.de



Wehrwissenschaftliches Institut für Werk-
und Betriebsstoffe (WIWeB)
Institutsweg 1
85435 Erding

Dr. Christian Marquardt
+49 81 22 95 90-34 53
christian2marquardt@bundeswehr.org

Auftraggeber

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Zitation (Autoren in alphabetischer Reihenfolge)

Bullerdiek, N.; Buse, J.; Dögnitz, N.; Feige, A.; Halling, A.-M.; Hauschild, S.; Hawighorst, P.; Kaltschmitt, M.; Kuchling, T.; Kureti, S.; Majer, S.; Marquardt, C.; Müller-Langer, F.; Neuling, U.; Oehmichen, K.; Pechstein, J.; Posselt, D.; Scheuermann, S.; Schripp, T.; Stein, H.; Zschocke, A. (2019): *Einsatz von Multiblend-JET-A-1 in der Praxis*. Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Modellvorhaben der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig.

Stand: 09/2019

Danksagung

Ein Forschungs- und Demonstrationsvorhaben dieses Umfangs zu realisieren, war nur durch das große Interesse und das besondere Engagement der in DEMO-SPK involvierten internationalen Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft möglich. Daher sei an dieser Stelle nicht nur dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) als Auftraggeber des MKS-Modellvorhabens gedankt, sondern auch aireg e. V. als Initiator der Projektidee und allen Partnern im Kernteam von DEMO-SPK: Adeptus Green Management, aireg, DLR, ifok, MCS, TUHH und WIWeB unter Koordination vom DBFZ.

Ganz besonderer Dank gilt den Praxispartnern, die teils weit über die monetär zu bewertenden Aufgaben hinaus das Vorhaben mit ihrer Expertise und vor allem ihrem Interesse am Thema sehr wohlwollend und konstruktiv unterstützt haben und somit insbesondere den Part der Demonstration der Gesamtkette bis zur Betankung im Flugzeug und den Emissionsmessungen am Flughafen erst möglich gemacht haben.

Ohne die frühzeitige Unterstützung von DHL/EAT (European Air Transport Leipzig GmbH) am Flughafen Leipzig/Halle hätten weite Teile des Vorhabens nicht realisiert werden können. An DHL/EAT-LEJ geht daher ein ganz besonders großer Dank für die hervorragende Zusammenarbeit, deren konstruktive und lösungsorientierte Unterstützung im Kontext der besonderen Anforderungen an die Demonstration: u. a. Bereitstellung und Reservierung von zuvor restentleerten Hochtanks für Einlagerung von JET A-1 aus Lingen und Multiblend JET A-1, Reservierung eigener vorher entsprechend gespülter Tankwagen (FTKW) für JET A-1 aus Lingen und Multiblend JET A-1 sowie Bereitstellung eines Luftfahrzeugs und Triebwerksprobelaufstand (inkl. Techniker vor Ort, Security usw.) für die Emissionsmessungen durch DLR.

Der hervorragenden Unterstützung durch die TanQuid GmbH & Co. KG gebührt ebenso ganz besonderer Dank: Nur so konnte es gelingen, den Multiblend JET A-1 überhaupt herzustellen. TanQuid hat nicht nur die Bereitstellung eines geeigneten Tanks sowie Konstruktion und Montage von Mischvorrichtungen ermöglicht, sondern auch die Einlagerung von erneuerbarem Kerosin aus ISO-Containern (nicht üblich bei Massengütern wie Kerosin) und die Auslagerung des Multiblends über bestehende Infrastruktur (Filterwasserabscheidung, Hinzufügung von Leitfähigkeitsadditiv, Kesselwagenverladung) bei gleichzeitiger Trennung von normaler Kerosinauslagerung organisiert. Dies alles wurde geleistet, während das Tanklager aufgrund äußerer Umstände (extrem niedriger Rheinwasserständen mit entsprechender Beeinträchtigung der Schifffahrt und Komplettausfall der Raffinerie Vohburg infolge einer Explosion) intensiv beansprucht war. Gleichzeitig funktionierte die Analytik der Kerosine durch die PetroLab GmbH sehr gut; auch hierfür vielen Dank.

BP Europa SE gilt besonderer Dank für die Bereitstellung von JET A-1 aus der Raffinerie Lingen (schwefelarm) in unterschiedlichen Mengen für die Voruntersuchungen bei WIWeB, für die Herstellung des Multiblend JET A-1 und Lieferung des gleichen JET A-1 nach LEJ sowie die beratende Unterstützung der damit verbundenen logistischen Herausforderungen.

VTG AG und Dettmer Rail GmbH sei für die ebenso sehr gute und lösungsorientierte Zusammenarbeit gedankt. Beispielhaft seien hier die Reservierung des beschichteten Ganzzuges, die HEFA-Beschaffung aus den USA direkt vom Hersteller und die Herausforderungen rund um die Zwischenlagerung und Verbringung zum Tanklager in Speyer. Der Knoell Germany GmbH danken wir für den Support bei allen Fragen rund um REACH und PPORD für HEFA-SPK und ATJ-SPK.

WorldEnergy und GEVO Inc. aus den USA sei für die unkomplizierte Zusammenarbeit während der Beschaffung des HEFA-SPK und ATJ-SPK für die Voruntersuchungen und die Demonstration sowie den Lebenszyklusanalysen und Nachhaltigkeitsaspekten gedankt. AMYRIS, Inc. – respektive TOTAL – gebührt großer Dank für die Unterstützung bei der Beschaffung von SIP.

Besonderer Dank geht auch an NESTE für die Bereitstellung von HFP-HEFA und für die Unterstützung bei der REACH-Zertifizierung für HEFA.

Dank der sehr guten Zusammenarbeit mit der TU Bergakademie Freiberg, der ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH und der Sunfire GmbH ist es außerdem gelungen, international erstmalig PTL/FT-SPK herzustellen und nachzuweisen, dass die ASTM-Spezifikationen eingehalten werden können.

Abschließend gilt der Dank selbstverständlich allen weiteren Unterstützern, die im Kleinen und Großen zum Erfolg des Vorhabens beigetragen haben: Unter anderem Panalpina Welttransport (Deutschland) GmbH, GERLACH Zolldienste GmbH, VARO Energy, FAUDI Aviation GmbH, verschiedene Zollämter, Kurierdienste und externe Referenten und Teilnehmer der im Vorhaben durchgeführten Workshops (u. a. Europäische Kommission, Transport & Environment CAAFI, Universität Hasselt, Umweltbundesamt, Arthur Pelchen als EU-ETS-Sachverständiger, Skybits GmbH, FuelPlus Software GmbH, AFS Aviation Fuel Services GmbH, Hauptzollamt Hamburg).



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Executive summary | 1 |
| 2 | Kurzzusammenfassung | 5 |
| 3 | Hintergrund, Ziel und Struktur des Vorhabens | 9 |
| 4 | Untersuchte erneuerbare Kerosine | 13 |
| 4.1 | HEFA-SPK | 13 |
| 4.2 | HFP-HEFA | 14 |
| 4.3 | ATJ-SPK | 14 |
| 4.4 | SIP | 14 |
| 4.5 | FT-SPK via PTL | 15 |
| 5 | Voruntersuchungen zu Eigenschaften von erneuerbarem Kerosin und Multiblend-JET-A-1 | 17 |
| 5.1 | Kerosinblending und Lagerverhalten | 17 |
| 5.2 | Klimakammeruntersuchungen | 26 |
| 5.3 | Fazit | 28 |
| 6 | Demonstration der Produktion, Bereitstellung und Nutzung von Multiblend-JET-A-1 an einem Flughafen | 29 |
| 6.1 | Bereitstellung der Komponenten und Herstellung vom Multiblend-JET-A-1 | 29 |
| 6.1.1 | Kraftstoffproduktion | 30 |
| 6.1.2 | Containerlogistik | 30 |
| 6.1.3 | Mischstandort | 30 |
| 6.1.4 | Ablauf der Mischung | 31 |
| 6.1.5 | Schienenlogistik | 32 |
| 6.2 | Logistik zur Verwendung des Multiblend-JET-A-1 am Flughafen LEJ | 32 |
| 6.2.1 | Örtliche Gegebenheiten | 32 |
| 6.2.2 | Vorgehensweise | 33 |
| 6.2.3 | Emissionsmessungen | 33 |
| 6.3 | Behördliche Genehmigungen und transportrechtliche Dokumente | 35 |
| 6.3.1 | REACH-Registrierung bzw. PPORD | 35 |
| 6.3.2 | Erstellung der Sicherheitsdatenblätter | 35 |
| 6.3.3 | Meldung von gefährlichen Gemischen | 36 |
| 6.3.4 | Zollrechtliche Erfassung | 36 |
| 6.3.5 | Begleichung der EBV-Beiträge | 37 |
| 6.4 | Fazit | 38 |
| 7 | Lokale Emissionen beim Einsatz von Multiblend-JET-A-1 im Flugzeug | 39 |
| 7.1 | Emissionsmessung Triebwerke | 39 |
| 7.2 | Reaktionschemie und Rußbildungspotenzial | 44 |
| 7.3 | Reaktionschemie und Emissionsmessungen im Technikum | 49 |
| 7.4 | Fazit | 56 |
| 8 | Lebenszyklusanalysen für Multiblend-JET-A-1 | 57 |
| 8.1 | Bereitstellungsketten | 57 |
| 8.1.1 | Fall A Demonstrierte Bereitstellungskette in DEMO-SPK | 57 |
| 8.1.2 | Fall B Geplante Bereitstellungskette in DEMO-SPK | 58 |
| 8.1.3 | Fall C Beispielhafte ganzjährige Versorgung des Flughafens LEJ | 58 |

| | | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.2 | Ökobilanz | 59 |
| 8.2.1 | Ökobilanzierung der erneuerbaren Kerosine gemäß DIN ISO 14040/14044 | 60 |
| 8.2.2 | Ökobilanzierung von Multiblend-JET-A-1 gemäß DIN ISO 14040/14044 | 64 |
| 8.2.3 | THG-Minderung der erneuerbaren Kerosine nach EU RED 2009/28/EC | 65 |
| 8.3 | Kostenbetrachtung | 66 |
| 8.3.1 | Gestehungskosten der erneuerbaren Kerosine | 67 |
| 8.3.2 | Bereitstellungskosten für Multiblend-JET-A-1 | 68 |
| 8.3.3 | Lebenszykluskosten Multiblend JET A-1 | 69 |
| 8.3.4 | Sensitivitätsanalyse | 70 |
| 8.4 | Fazit | 71 |
| 9 | Nachhaltigkeitsdokumentation und -zertifizierung | 73 |
| 9.1 | Anforderungen | 73 |
| 9.1.1 | Rahmenbedingungen einer Nachhaltigkeitsdokumentation für erneuerbares Kerosin | 73 |
| 9.1.2 | Anforderungen an eine Nachhaltigkeitsdokumentation für definierte Wertschöpfungsketten (ATJ-SPK, HEFA-SPK, FT-SPK via PTL) | 73 |
| 9.1.3 | Zwischenfazit | 76 |
| 9.2 | Dokumentation | 76 |
| 9.2.1 | Regulative Rahmenbedingungen der Nachweisführung auf EU-Ebene | 76 |
| 9.2.2 | Optionen der Nachweisführung | 77 |
| 9.2.3 | Regulative Rahmenbedingungen der Nachweisführung auf internationaler Ebene | 82 |
| 9.2.4 | Vorhandene Zertifizierungsstandards und weitere Nachhaltigkeitsanforderungen | 83 |
| 9.3 | Fazit | 84 |
| 10 | Konzeptionierung einer Anrechnungsmethodik für den Emissionshandel | 85 |
| 10.1 | Status bestehender Anrechnungssysteme im EU ETS | 85 |
| 10.2 | Konzeptionierung möglicher Anrechnungsverfahren | 87 |
| 10.2.1 | Track & Trace | 87 |
| 10.2.2 | Book & Claim | 90 |
| 10.3 | Fazit | 96 |
| 11 | Exkurs FT-SPK via PTL | 99 |
| 11.1 | Herstellung und Produktanalyse | 99 |
| 11.2 | Lebenszyklusanalysen | 104 |
| 12 | Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen | 107 |
| 13 | Referenzverzeichnis | 111 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1 | Struktur des Forschungs- und Demonstrationsvorhabens DEMO-SPK | 10 |
| Abb. 2 | Übersicht der an DEMO-SPK beteiligten internationalen Partner | 11 |
| Abb. 3 | Gefrierpunkte, Dichten und Viskositäten binärer HFP-HEFA / JET A-1-Mischungen | 26 |
| Abb. 4 | Vereinfachte schematische Darstellung der durchgeführten Bereitstellungskette für die Bereitstellung des Multiblend-JET-A-1 an den Flughafen LEJ | 29 |
| Abb. 5 | Der A300-600 für die Bodenmessung im Triebwerksprobelaufstand | 39 |
| Abb. 6 | Probenahmesonde in Position am Triebwerksprobelaufstand | 40 |
| Abb. 7 | Entwicklung der nicht volatilen Partikelanzahlmission in Abhängigkeit des Kerosinverbrauchs | 41 |
| Abb. 8 | Partikelanzahlverteilungen für die verschiedenen Betriebspunkte bei Verwendung des Referenzkerosins (oben) und des Multiblends (unten) | 42 |
| Abb. 9 | Emittierte Partikelanzahl (links) und Partikelmasse (rechts) in Abhängigkeit des Kerosinverbrauchs | 43 |
| Abb. 10 | Molenbruchprofile der Hauptspezies als Funktion der Ofentemperatur | 46 |
| Abb. 11 | Ausgewählte typische kleine Verbrennungsintermediate der brennstoffreichen Serie ($\Phi = 1.2$) | 47 |
| Abb. 12 | Ausgewählte C_{12} -Spezies als Beispiel für Alkane ($C_{12}H_{26}$), Naphthene bzw. Cycloalkane ($C_{12}H_{22}$) | 48 |
| Abb. 13 | Typische Rußvorläuferspezies: Benzol (C_6H_6), Styrol (C_8H_8), Indene (C_9H_8), Naphthalin ($C_{10}H_8$), Acenaphthylen ($C_{12}H_8$) und Antracen ($C_{14}H_{10}$) bzw. entsprechende Isomere Strukturen | 49 |
| Abb. 14 | Exemplarischer Vergleich der planaren OH*-Chemilumineszenzverteilung der untersuchten Kerosine bei 6 bar Brennkammerdruck und stöchiometrischem Treibstoff-Luft-Verhältnis | 50 |
| Abb. 15 | Gemessene totale Rußlumineszenz der Kerosine als Funktion des Äquivalenzverhältnisses bei einem Brennkammerdruck von 5 bar (links) und 6 bar (rechts) | 51 |
| Abb. 16 | Gemessene Abgasemissionen CO, CO ₂ , CO _x sowie NO _x der Kerosine als Funktion des Äquivalenzverhältnisses bei einem Brennkammerdruck von 5 bar (linke Spalte) und 6 bar (rechte Spalte) | 53 |
| Abb. 17 | Schematische Darstellung der Bereitstellungskette für Fall C | 59 |
| Abb. 18 | LCA der betrachteten erneuerbaren Kerosine | 62 |
| Abb. 19 | Spezifische THG-Emissionen der betrachteten erneuerbaren Kerosine | 63 |
| Abb. 20 | Sensitivitätsbetrachtung der THG-Bilanzierung am Beispiel von ATJ-SPK | 64 |
| Abb. 21 | Spezifische Gesamt-THG-Emissionen und THG-Minderungspotenzial der betrachteten Multiblends-JET-A-1 gegenüber konventionellem JET A-1 | 65 |
| Abb. 22 | Spezifische Gesamt-THG-Emissionen und THG-Minderungspotenzial der betrachteten erneuerbaren Kerosine gegenüber der fossilen Referenz gemäß EU RED | 66 |
| Abb. 23 | Gestehungskosten erneuerbarer Kerosine | 67 |
| Abb. 24 | Bereitstellungskosten Fall A, Fall B, Fall C | 69 |
| Abb. 25 | Lebenszykluskosten Multiblend-JET-A-1 im Fall C in Gegenüberstellung zur fossilen Referenz JET A-1 | 70 |
| Abb. 26 | Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskosten Fall C | 71 |
| Abb. 27 | Anforderungen an die Nachhaltigkeitsdokumentation einer Wertschöpfungskette für ATJ-SPK am Beispiel Gevo | 74 |

| | | |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abb. 28 | Anforderungen an die Nachhaltigkeitsdokumentation einer Wertschöpfungskette für HEFA-SPK aus Abfall- und Reststoffen _____ | 75 |
| Abb. 29 | Anforderungen an die Nachhaltigkeitsdokumentation einer Wertschöpfungskette für FT-SPK via Power-to-Liquid (PTL) _____ | 75 |
| Abb. 30 | Option 1: Eine EU-RED-Zertifizierung der gesamten Lieferkette bis eine Lieferstufe vor dem Flughafentanklager _____ | 78 |
| Abb. 31 | Option 2: Blending EU _____ | 79 |
| Abb. 32 | Option 2: Blending non EU _____ | 80 |
| Abb. 33 | Option 3: Massenbilanzierung unter Track & Trace _____ | 81 |
| Abb. 34 | Kernelemente und Funktionsweise des Book & Claim Ansatzes _____ | 92 |
| Abb. 35 | Vereinfachtes Aufbereitungs- und Analyseschema für PTL-SPK _____ | 100 |
| Abb. 36 | Siedeverhalten nach Hydroisomerisierung (Gesamtprodukt) _____ | 101 |
| Abb. 37 | Siedeverläufe für Einzelfractionen nach Hydrocracken der Schwersieder _____ | 101 |
| Abb. 38 | Mengenbilanz ausgehend vom FT-Zwischenprodukt zum PTL-SPK _____ | 102 |
| Abb. 39 | Spezifische THG-Emissionen und THG-Minderungspotenzial der betrachteten FT-SPK-Konzepte gegenüber der fossilen Referenz der EU RED _____ | 104 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 1 | Chemisch-physikalische Eigenschaften der reinen Kraftstoffe | 18 |
| Tab. 2 | Eigenschaften der binären Mischungen (BM) | 19 |
| Tab. 3 | Mischungsverhältnisse/Anteile der Kraftstoffe in den Multiblends | 20 |
| Tab. 4 | Absolute Mengen und Anteile der Einzelkomponenten in den Multiblends im Technikumsmaßstab | 21 |
| Tab. 5 | Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 1 | 22 |
| Tab. 6 | Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 2 | 23 |
| Tab. 7: | Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 3 | 24 |
| Tab. 8: | Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 4 | 25 |
| Tab. 9 | Dichten von Proben der Multiblends Nr. 1–4 (in kg/m ³) | 25 |
| Tab. 10 | Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 1 und einer 20%v/v HFP-HEFA-Mischung vor und nach den Klimakammerversuchen | 27 |
| Tab. 11 | Eigenschaften Multiblend-JET-A-1 und Referenzkerosin JET A-1 aus Lingen | 34 |
| Tab. 12 | Übersicht der verwendeten Messgeräte für die Emissionsmessungen im Bodenlauf | 40 |
| Tab. 13 | Abschätzung der Emissionen von Partikelanzahl (PN) und Partikelmasse (PM) für den LTO-Zyklus mit Referenzkerosin und Multiblend | 43 |
| Tab. 14 | Reaktorbedingungen für die untersuchten Verbrennungsbedingungen | 45 |
| Tab. 15 | Flussraten in mg/min für die untersuchten Verbrennungsbedingungen der Treibstoffmessreihen bei konstantem Argonfluss (17,64 g/min) | 45 |
| Tab. 16 | Chemische Kerosinkenngößen | 54 |
| Tab. 17 | Ausgewählte physikalische Kerosineigenschaften | 54 |
| Tab. 18 | Betriebsparameter und physikalische Kerosineigenschaften sowie berechneter Sauterdurchmesser des Treibstoffsprays bei $\varphi = 1$, $p = 6$ bar | 55 |
| Tab. 19 | Betriebsparameter und physikalische Kerosineigenschaften sowie berechneter Sauterdurchmesser des Treibstoffsprays bei $\varphi = 1$, $p = 5$ bar | 55 |
| Tab. 20 | Betrachtete Wirkkategorien | 61 |
| Tab. 21 | Vorgaben zur Ermittlung des THG-Minderungspotenzials nach EU RED | 66 |
| Tab. 22 | Vergleich der Kerosineigenschaften mit den Anforderungen gemäß ASTM D7566-13 für FT-SPK | 103 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ALOP <i>Agricultural land occupation potential</i> | ISCC <i>international Sustainability and Carbon Certification</i> |
| ASTM <i>American Society for Testing and Materials</i> | KN <i>Siehe Kombiniertes Nomenklatur</i> |
| ATJ <i>Alcohol-to-JET</i> | LCA <i>Life Cycle Assessment</i> |
| BfR <i>Bundesinstitut für Risikobewertung</i> | LCC <i>Life Cycle Costing</i> |
| BHKW <i>Blockheizkraftwerk</i> | LCFS <i>Low Carbon Fuel Standard</i> |
| BKET <i>Brennkammereintrittstemperatur</i> | LDAS <i>Laserdioden-Absorptionsspektroskopie</i> |
| BMVI <i>Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur</i> | LEJ <i>IATA-Code Flughafen Leipzig/Halle</i> |
| BTL <i>Biomass-to-Liquid</i> | LTO-Zyklus <i>Landing and Take Off Cycle</i> |
| CFD <i>Computational Fluid Dynamics</i> | MBMS <i>Molecular Beam Mass Spectrometry</i> |
| ChemG <i>Chemikaliengesetz</i> | MCT <i>Maximum continuous thrust</i> |
| CLP <i>Classification, Labelling and Packaging</i> | MET <i>Marine ecotoxicity potential</i> |
| CoA <i>Certificate of Analysis</i> | MKS <i>Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie</i> |
| CoO <i>Certificate of Origin</i> | MVO <i>Monitoring-Verordnung</i> |
| CORSIA <i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i> | NDIR <i>Non-Dispersive Infrared Absorption</i> |
| DBFZ <i>DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH</i> | OTC <i>Over-the-Counter</i> |
| DIN <i>Deutsches Institut für Normung e. V.</i> | PMFp <i>Particulate matter formation potential</i> |
| DLR <i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.</i> | PoS <i>Proof of Sustainability</i> |
| DSHC <i>Direct Sugar to Hydrocarbons</i> | PPORD <i>Produkt- und Verfahrenorientierte Forschung und Entwicklung</i> |
| DStan <i>UK Defence Standardization</i> | PTG <i>Power-to-Gas</i> |
| EBV <i>Erdölbevorratungsverband</i> | PTL <i>Power-to-Liquid</i> |
| EE <i>erneuerbare Energie(n)</i> | PV <i>Photovoltaik</i> |
| EMCS <i>Excise Movement and Control System</i> | RCQ <i>Refinery Certificate of Quality</i> |
| EnergieStG <i>Energiesteuergesetz</i> | REACH <i>Regulation Concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i> |
| EPA <i>Environmental Protection Agency</i> | RED <i>Renewable Energy Directive</i> |
| ErdölBevG <i>Erdölbevorrattungsgesetz</i> | RFS2 <i>Renewable Fuel Standard 2</i> |
| ETS <i>Emissions Trading System</i> | RSB <i>Renewable Sustainable Biomaterials</i> |
| EWR <i>Europäischer Wirtschaftsraum</i> | RSPO <i>Roundtable on Sustainable Palm Oil</i> |
| FAME <i>Fatty Acid Methyl Ester</i> | RT <i>Recertification Test Certificate</i> |
| FDP <i>Fossil depletion potential</i> | RTRS <i>Roundtable on Responsible Soy</i> |
| FEP <i>Freshwater eutrophication</i> | SAF <i>Sustainable Aviation Fuels, Sustainable Aviation Fuels</i> |
| FIFO <i>First-In/First-Out</i> | SIP <i>synthetisiertes Kerosin aus hydroprozessierten fermentierten Zuckern</i> |
| FT <i>Fischer-Tropsch-Verfahren</i> | SMD <i>Spraytröpfchengrößenverteilung</i> |
| FTIR <i>Fourier-Transform-Infrarotspektrometer</i> | SPK <i>synthetisierte paraffinische Kerosine</i> |
| FTJ <i>Fermentation-to-JET</i> | TAP <i>Terrestrial acidification</i> |
| FTKW <i>Feldtankkraftwagen</i> | THG <i>Treibhausgas</i> |
| GoO <i>Guarantee of Origin</i> | TKW <i>Tankkraftwagen</i> |
| GWP <i>Global warming potential</i> | TUBAF <i>TU Bergakademie Freiberg</i> |
| HEFA <i>hydroprocessed esters and fatty acids</i> | VDI <i>Verein Deutscher Ingenieure</i> |
| HFP <i>High-Freeze-Point</i> | WDP <i>Water depletion potential</i> |
| HiPOT <i>Hochdruck-Verbrennungsprüfstand</i> | WIWeB <i>Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe</i> |
| HTPinf <i>Human toxicity</i> | |
| ICAO <i>International Civil Aviation Organization</i> | |
| IPCC <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> | |

1 Executive summary

DEMO-SPK is a research and demonstration project that investigated the use of renewable jet fuel at Leipzig/Halle airport. As a model project of the Mobility and Fuels Strategy (MFS), it was financed by the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI). The following summary of the DEMO-SPK project is geared towards answering public-sector questions and thus presents the project's basic components, results and recommendations in a simple and straightforward way.

What was the motivation behind the DEMO-SPK model project?

The necessity to reduce and prevent emissions in the German aviation industry has been addressed in the Mobility and Fuels Strategy of the German Government. In addition to technical and operational measures to reduce emissions, it focuses on substituting conventional fossil-based jet fuel with sustainable aviation fuels (SAF). For this purpose, new manufacturing processes, as specified in an international ASTM standard, are used instead of conventional oil refining processes. As the synthetic paraffinic kerosene (SPK) composition may differ from that of conventional fossil kerosene depending on the process used, market introduction is subject to certain restrictions. For example, synthetic kerosenes may not yet be placed on the market in their pure form. Instead, they have to be mixed ("blended") with fossil-based JET A-1.

Today, various SPK manufacturing processes have already been approved in accordance with the ASTM standard (e.g. HEFA-SPK, ATJ-SPK, FT-SPK, SIP). Other processes (e.g. HFP-HEFA) are currently in the process of standardization. In the medium term, airports in Germany are expected to be supplied with jet fuel containing varying proportions of different types of SPK. Since individual batches of jet fuel from different sources are usually transported and stored together within an airport's supply infrastructure, there is no physical separation of the delivered batches. This inevitably results in intermingling and mixing. As only specification-compliant JET A-1 may be used, this is formally permissible. However, the mixing behavior and compatibility of JET A-1 blends containing varying proportions of different types of SPK ("multiblending") had yet to be studied in Germany and internationally.

What were the objectives of the DEMO-SPK project?

The primary objective was to investigate and verify the behavior of mixtures of several renewable jet fuels under realistic conditions within the supply infrastructure of a major airport. The aim was to successfully demonstrate the deployment of the multiblend JET A-1 in the general fuel supply infrastructure, from procurement to aircraft refueling. In addition to analyzing the properties of the jet fuel, the project measured emissions, conducted life cycle analyses, analyzed the sustainability documentation and studied verification and credit allowances for the renewable fuels as part of European emissions trading. Furthermore, legal questions were clarified and organizational framework conditions were created.

What are the specific highlights of DEMO-SPK?

Thanks to the participation of more than 20 international partners from industry and academia, the MFS model project has been the first of its kind to succeed in:

- ▶ supplying nearly 600 tons of multiblend JET A-1 and utilizing this in flight operations at the Leipzig/Halle airport
- ▶ reducing (i) particle emissions in ground runs by approx. 30 to 60 % and (ii) CO₂ equivalent emissions by approx. 35 % through the use of multiblend JET A-1 in aircraft instead of pure fossil-based JET A-1 fuel

- ▶ preparing SPK using PTL (power-to-liquid) so that key requirements of the ASTM specifications can be met.

What is multiblend JET A-1 and how is it produced?

Multiblend JET A-1 is a blend of conventional fossil JET A-1 that is ASTM D1655 compliant, and at least two other (“multi”) renewable jet fuels that are in line with ASTM D7566.

Two important criteria were taken into account in the DEMO-SPK project when selecting the renewable jet fuels and their suppliers: (i) the current version of the ASTM approval process and (ii) their availability on the international market at the time of the preliminary investigations and the scheduled demonstration at Leipzig/Halle airport. The renewable jet fuels HEFA-SPK and ATJ-SPK, which were only available in the US, were used in the demonstration. The fossil-based JET A-1 was purchased from a refinery in Lingen. These components were used to produce approximately 600 tons of multiblend JET A-1 for DEMO SPK.

Current specifications do not explicitly cover multiblending, however successive mixing is implicitly permitted. In order to comply fully with the applicable regulations, the renewable jet fuels were added successively to the fossil-based JET A-1 to produce the multiblend JET A-1, and a fuel sample was taken after each mixing process. It was accepted that there would be additional work involved, as compliance with the ASTM specification had to be formally ensured in every case. The multiblend JET A-1 used at Leipzig/Halle airport was produced at a tank farm in Speyer. As jet fuel tanks normally do not have a mixing device, the tank farm’s infrastructure was adapted to the mixing task through the installation of a mixing device in a spherical tank that had previously been flushed several times.

How was the use of multiblend JET A-1 in the infrastructure of a major airport verified?

In preparation for demonstrating the provision and use of multiblend JET A-1, preliminary investigations were carried out on various multiblend formulations. It was shown that multiblends can be produced in line with specifications and that the chemical and physical variables can be precisely calculated as long as the pure fuels are known. No separation occurred, nor did the properties change when stored for a period of six months. Likewise, there was no decline in the quality of the fuel. Results obtained for lab-scale mixtures can be transferred.

Based on these findings, production began in Speyer on the multiblend JET A-1. The renewable jet fuels and the JET A-1 were supplied through combined logistics. The multiblend JET A-1 was delivered by railroad tank wagons in accordance with the specific requirements and conditions at the Leipzig/Halle airport. The fuel was stored there in an above-ground tank. In order to demonstrate the compatibility of a multiblend JET A-1 with the actual supply infrastructure of an airport, it was subsequently handled in the same manner as fossil-based JET A-1 for the purpose of aircraft refueling. This was the first time it could be verified anywhere in the world that multiblend JET A-1 can be used operationally in the same way as fossil-based JET A-1 without restrictions.

DEMO-SPK also planned to conduct comparative emission measurements on an aircraft turbine in a ground run. The quantities of multiblend JET A-1 and JET A-1 required to do this were transferred to field tank trucks, which are regularly used in aircraft refueling.

Does the use of multiblend JET A-1 contribute to a reduction in emissions and pollutants?

The DEMO-SPK project was able to demonstrate a reduction in emissions and pollutants in two ways. Both ways show which notable reduction potentials are possible in the short to medium term.

Measuring pollutant emissions. Comparative emission measurements were carried out on an aircraft turbine in an engine testing facility at Leipzig / Halle airport. Two ground runs were conducted based on a fixed measurement protocol that included a fossil JET A-1 reference measurement and a measurement with the multiblend JET A-1. The use of the multiblend JET A-1 reduced soot in relation to particulate mass by approx. 30 to 60% for different operating points. The soot reduction was not associated with a “trade-off” in any other emission parameter. This was verified by comparative investigations in the technical laboratory.

Life cycle analyses for the renewable jet fuels and the multiblend JET A-1. In accordance with the methodology guidelines of the Renewable Energy Directive (RED), the specific greenhouse gas reduction emissions (as CO₂ equivalents) of the renewable jet fuels were balanced and their reduction was determined in the multiblend JET A-1. The findings showed that the use of multiblend JET A-1 on its own can reduce greenhouse gas emissions by 35% compared to fossil JET A-1.

How were sustainability aspects taken into account by DEMO-SPK?

There is a consensus that only sustainable renewable jet fuels will be used in aviation. In the European Union, the sustainability criteria that have to be respected in practice are firmly anchored in the Renewable Energy Directive (RED). It specifies which raw materials can be used and stipulates the methods and minimum requirements of greenhouse gas reduction potentials over the fossil reference. Based on these standards, so-called life cycle analyses were also conducted for the renewable jet fuels used in DEMO-SPK. Their specific greenhouse gas reductions ranged from 57 to 96%. The multiblend JET A-1, which contained fossil jet fuel, still achieved reductions of 35%.

Furthermore, it was determined that the sustainability documentation criteria required by the certification process, which already apply to biofuels used in road traffic, can be transferred to the use of renewable jet fuel in multiblend JET A-1. DEMO-SPK also found that sustainability requirements and standards differ significantly from one another around the world. In a growing global market for renewable jet fuels, this can lead to additional administrative requirements for market participants. A solution to this problem lies in the mutual acknowledgment of existing systems and the development of so-called meta standards.

In addition, life cycle analyses of various sample supply chains were conducted with respect to cost sustainability. It was found that renewable jet fuels are likely to be much more costly than fossil jet fuels in the foreseeable future and will therefore not be competitive without specific incentives. An optimized logistics supply chain demonstrates a possible reduction in logistics costs of 85% over the supply chain demonstrated in DEMO-SPK. However, a cost ratio of 1.3 was determined in the case of multiblend JET A-1 to fossil jet fuels, assuming the year-round supply and using Leipzig / Halle airport as an example. This would favor an industrial-scale introduction in the future. However, as long as there are cost reservations with respect to renewable jet fuels, further measures are needed to introduce the use of multiblend JET A-1 on a larger scale due to the fierce international competition in air transport.

How can the aviation industry offset its obligations in emissions trading?

Another important aspect for the market implementation of sustainable aviation fuels (SAF) is the intersection between the mass balance system for sustainability certification and documentation, on the one hand, and the inclusion of renewable jet fuels in the European Emissions Trading Scheme, on the other. Certification and credits based on the current legal approach are associated with high administrative and operational costs, which leads to limited use of credit allowances for renewable jet fuels and thus further reduces incentives for the use of SAF. Against this backdrop, DEMO-SPK has therefore developed various approaches for improving credit allowances in European emissions trading (so-called “track and trace” or mass balancing, and “book

and claim” or the certificate solution) and has confirmed their basic functionality. In a further step, the developed procedures and approaches will be verified in practice beyond the experience gained in DEMO-SPK, thus identifying further measures for their future operationalization.

What other recommendations for action have emerged from DEMO-SPK?

The pilot project has identified not only numerous suggestions for operational project management, but also the concrete need for clarification, which is important for a successful implementation on the broader market. These include (i) the expansion of ASTM D7566 to include simultaneous production of multiblend JET A-1, (ii) a simplified REACH registration for renewable jet fuels and (iii) the amendment of the Energy Tax Act using the so-called similarity principle as per Article 2 (4) of the Energy Tax Act.

In addition, specific recommendations were derived for the international institutions (ASTM, JIG, ETS etc.) and addressed to them for consideration when further developing the respective specifications and guidelines. DEMO-SPK thus goes beyond the actual project and makes recommendations to internationally facilitate the operational coverage of renewable jets fuels as part of multiblend jet fuel and thus to enable market implementation.

Notwithstanding the successful investigations conducted as part of the DEMO-SPK MFS model project, the fact remains that, in addition to the above-mentioned recommendations for broad market implementation of renewable jet fuels, a massive expansion of production capacities and infrastructures (e.g. for the production of multiblend JET A-1) are required. Only then will it be possible to achieve the positive effects identified and verified by DEMO-SPK in relation to reducing potential pollutant emissions and greenhouse gases.

2 Kurzzusammenfassung

Das Forschungs- und Demonstrationsvorhaben zum Einsatz von erneuerbarem Kerosin am Flughafen Leipzig/Halle (kurz DEMO-SPK) wurde als Modellvorhaben der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) initiiert und durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) finanziert. Die nachstehende Kurzzusammenfassung zum DEMO-SPK-Vorhaben ist an öffentlichkeitsnahen Fragestellungen angelehnt und ermöglicht so eine einfach gehaltene und verständliche Darstellung der wesentlichen Inhalte, Ergebnisse und Empfehlungen.

Was war die Motivation für das Modellvorhaben DEMO-SPK?

In der MKS ist für die deutsche Luftfahrt die Notwendigkeit der Emissionsminderung und -vermeidung festgeschrieben. Neben technisch-operativen Maßnahmen zur Emissionsminderung liegt ein Fokus auf der Substitution des konventionellen fossilen Flugkraftstoffs durch erneuerbare Flugkraftstoffe (sog. synthetisches Kerosin, SPK). Hierfür kommen anstelle der herkömmlichen Erdölaufbereitung und -verarbeitung neuartige Herstellungsverfahren zur Anwendung, die in einer internationalen ASTM-Norm spezifiziert sind. Da sich abhängig vom Verfahren die SPK-Zusammensetzung von der konventionellen fossilen Kerosins unterscheiden kann, erfolgt das Inverkehrbringen unter Auflagen. So dürfen SPKs beispielsweise bisher nicht in Reinform in den Verkehr gebracht werden, sondern müssen zuvor jeweils mit erdölbasiertem Kerosin JET A-1 gemischt werden (sog. „Blending“).

Heute sind bereits unterschiedliche SPK-Herstellungsverfahren gemäß ASTM zugelassen (z. B. HEFA-SPK, ATJ-SPK, FT-SPK, SIP); weitere (z. B. HFP-HEFA) befinden sich im Zulassungsprozess. Mittelfristig ist zu erwarten, dass Flughäfen in Deutschland mit Kerosin beliefert werden, das auch SPK unterschiedlicher Art in variablen Anteilen enthält. Da innerhalb der Versorgungsinfrastruktur eines Flughafens einzelne Kerosinchargen unterschiedlicher Herkunft üblicherweise gemeinschaftlich transportiert und gelagert werden, erfolgt keine physische Trennung der eingelieferten Chargen, wodurch es zwangsläufig zur Vermischung kommt. Da nur spezifikationskonformes JET A-1 eingesetzt werden darf, ist dies formal zulässig. Allerdings wurde das Mischungsverhalten und die Verträglichkeit von JET-A-1-Blends, die verschiedenartige SPK in variablen Anteilen enthalten („Multiblending“), bislang weder in Deutschland noch international untersucht.

Welche Ziele wurden in DEMO-SPK verfolgt?

Vorrangiges Ziel war es, das Verhalten von Gemischen aus mehreren erneuerbaren Kerosinen unter realistischen Bedingungen in der Versorgungsinfrastruktur eines Großflughafens zu untersuchen und zu verifizieren. Hierzu galt es, bislang international erstmals den Einsatz von Multiblend-JET-A-1 in der allgemeinen Kraftstoffversorgungsinfrastruktur von der Beschaffung bis zur Betankung im Flugzeug erfolgreich zu demonstrieren. Neben Analysen zu den Kerosineigenschaften erfolgten zudem Emissionsmessungen, Lebenszyklusanalysen, praktikable Nachhaltigkeitsdokumentationen sowie Untersuchungen zur Nachweisführung und Anrechnung der erneuerbaren Kraftstoffe im Europäischen Emissionshandel. Weiterhin galt es, rechtliche Fragestellungen zu klären und organisatorische Rahmenbedingungen zu schaffen.

Welche besonderen Highlights stehen für DEMO-SPK?

Im MKS-Modellvorhaben ist es dank des Engagements von mehr als 20 internationalen Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft weltweit erstmalig gelungen:

- ▶ knapp 600 Tonnen Multiblend-JET-A-1 bereitzustellen und am Flughafen Leipzig/Halle im Flugbetrieb zu nutzen;
- ▶ durch den Einsatz von Multiblend-JET-A-1 im Flugzeug gegenüber reinem fossilen JET A-1 (i) Partikelemissionen im Bodenlauf um ca. 30 bis 60 % zu reduzieren und (ii) CO₂-Äquivalentemissionen um ca. 35 % zu reduzieren;
- ▶ synthetisches Kerosin aus PTL (Power-to-Liquid) aufzubereiten, so dass Schlüsselanforderungen der ASTM-Spezifikationen eingehalten werden können.

Was ist Multiblend-JET-A-1 und wie erfolgte dessen Herstellung?

Unter einem Multiblend-JET-A-1 ist eine Mischung („Blend“) von konventionellem fossilem JET A-1 gemäß ASTM D1655 und mindestens zwei weiteren („multi“) erneuerbaren Kerosinen gemäß ASTM D7566 zu verstehen.

Im DEMO-SPK-Vorhaben wurden für die Wahl der erneuerbaren Kerosine und deren Lieferanten zwei wesentliche Kriterien berücksichtigt: (i) die aktuell gültige Fassung der ASTM-Zulassung sowie (ii) Verfügbarkeit auf dem internationalen Markt zum Zeitpunkt der Voruntersuchungen und der geplanten Demonstration am Flughafen Leipzig/Halle. Für die Demonstration konnten schließlich als erneuerbare Kerosine HEFA-SPK und ATJ-SPK verwendet werden, die jeweils nur in den USA verfügbar waren. Das fossile JET A-1 wurde aus der Raffinerie in Lingen bezogen. Aus diesen Komponenten wurden schließlich etwa 600 Tonnen Multiblend-JET-A-1 im Rahmen von DEMO-SPK hergestellt.

Derzeit geltende Spezifikationen zielen nicht explizit auf Multiblending ab, implizit ist eine sukzessive Mischung zulässig. Um sich definitiv im Rahmen der geltenden Vorschriften zu bewegen, wurden bei der Herstellung des Multiblend-JET-A-1 die erneuerbaren Kerosine nacheinander dem fossilen JET A-1 beigemischt, und nach jedem Mischvorgang eine Kraftstoffprobe genommen. Der hiermit verbundene Mehraufwand wurde in Kauf genommen, da eine Einhaltung der ASTM-Spezifikation in jedem Fall auch formal sicherzustellen war. Hergestellt wurde das am Flughafen Leipzig/Halle eingesetzte Multiblend-JET-A-1 im Tanklager in Speyer. Da es regulär keine Kerosintanks mit Mischvorrichtung gibt, wurde hierfür die Infrastruktur des Tanklagers der Mischaufgabe angepasst und eine Mischvorrichtung in einem zuvor mehrfach gespülten Kugeltank installiert.

Wie erfolgte die Verifizierung des Einsatzes von Multiblend-JET-A-1 in der Infrastruktur des Großflughafens Leipzig/Halle?

In Vorbereitung auf die Demonstration der Bereitstellung und Nutzung von Multiblend-JET-A-1 wurden zunächst Voruntersuchungen zu verschiedenen Multiblendzusammensetzungen durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich spezifikationsgerechte Multiblends herstellen und die chemisch-physikalischen Kennwerte dieser mit guter Präzision berechnen lassen, wenn die reinen Kraftstoffe bekannt sind. Über eine Lagerperiode von sechs Monaten findet keine Entmischung oder Veränderung der Eigenschaften statt; die Kraftstoffqualität wurde nicht gemindert. Ergebnisse, die für Mischungen im Labormaßstab ermittelt werden, können übertragen werden.

Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgte die Herstellung des Multiblend-JET-A-1 in Speyer. Die dafür vorgesehenen erneuerbaren Kerosine und das JET A-1 wurden jeweils über kombinierte Logistik bereitgestellt. Die

Lieferung des Multiblend-JET-A-1 erfolgte gemäß den spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten am Flughafenstandort in Leipzig/Halle mittels Eisenbahnkesselwagen. Dort erfolgte die Einlagerung in einen Hochtank. Zur Demonstration der Kompatibilität eines Multiblend-JET-A-1 mit der realen Versorgungsinfrastruktur eines Flughafens geschah das weitere Handling in Bezug auf Betankung in Flugzeuge analog fossilem JET A-1. Damit war international erstmals der Nachweis erbracht, dass der Einsatz von Multiblend-JET-A-1 analog zu fossilem JET A-1 operativ ohne Einschränkungen möglich ist.

Die für die ebenso in DEMO-SPK vorgesehene Durchführung vergleichender Emissionsmessungen an einer Flugzeugturbine im Bodenlauf notwendigen Mengen an Multiblend-JET-A-1 und JET A-1 wurden in Feldtankkraftwagen (FTKW) überführt, die regulär auch der Betankung der Flugzeuge dienen.

Trägt der Einsatz von Multiblend-JET-A-1 zur Minderung von Emissionen und Schadstoffen bei?

Die Minderung von Emissionen und Schadstoffen konnte in DEMO-SPK über zwei Wege nachgewiesen werden. Beide Wege zeigen auf, welche nennenswerten Minderungspotenziale sich bereits kurz- bis mittelfristig erschließen ließen.

Schadstoffemissionsmessungen. Durchgeführt wurden vergleichende Emissionsmessungen an einer Flugzeugturbine in einem Triebwerksprobelaufstand am Flughafen Leipzig/Halle. Dies erfolgte durch zwei Bodenläufe anhand eines festgelegten Messprotokolls für eine Referenzmessung mit fossilem JET A-1 und anschließend eine Messung mit dem Multiblend-JET-A-1. Nachgewiesen werden konnte durch den Einsatz des Multiblend-JET-A-1 die erwartete Rußminderung bezogen auf die Partikelmasse bei ca. 30 bis 60 % für unterschiedliche Betriebspunkte. Die Rußminderung ist nicht mit der Verschlechterung („trade-off“) anderer Emissionsparameter verbunden. Dies wurde durch vergleichende Untersuchungen im Technikum verifiziert.

Lebenszyklusanalysen für die erneuerbaren Kerosine und das Multiblend-JET-A-1. Gemäß geltenden methodischen Vorgaben der Erneuerbaren-Energien-Direktive (RED) wurden u. a. die spezifischen Treibhausgasminderungsemissionen (als CO₂-Äquivalente) der eingesetzten erneuerbaren Kerosine bilanziert und deren Minderung im Multiblend-JET-A-1 ermittelt. Im Ergebnis lassen sich durch den Einsatz von Multiblend-JET-A-1 allein 35 % der Treibhausgasemissionen gegenüber fossilem JET A-1 ersparen.

Wie wurde in DEMO-SPK Nachhaltigkeitsaspekten Rechnung getragen?

Es ist Konsens, dass auch für die Luftfahrt nur nachhaltige erneuerbare Kerosine zum Einsatz kommen. In der Praxis einzuhaltende und entsprechend per Zertifikat nachzuweisende Nachhaltigkeitskriterien sind in der Europäischen Union fest in der Erneuerbaren-Energien-Direktive (RED) verankert. Neben Vorgaben zum einzusetzenden Rohstoff sind auch Methoden und Mindestanforderungen in Bezug auf das Treibhausgasminderungspotenzial gegenüber der fossilen Referenz festgelegt. Nach diesen Standards wurden ebenso für die in DEMO-SPK eingesetzten erneuerbaren Kerosine sog. Lebenszyklusanalysen durchgeführt. Ihre jeweils spezifische Treibhausgasminderung lag in Größenordnungen von 57 bis 96 %, im Multiblend-JET-A-1 mit fossilem Kerosin immerhin noch bei 35 %.

Weiterhin wurde nachgewiesen, dass für den Einsatz von erneuerbaren Kerosinen in Multiblend-JET-A-1, die bereits in der Praxis derzeit insbesondere für Biokraftstoffe für den Straßenverkehr angewendeten Kriterien einer Nachhaltigkeitsdokumentation im Zertifizierungssystem übertragbar sind. Die Arbeiten in DEMO-SPK zeigen auch, dass sich die Nachhaltigkeitsanforderungen und -standards global teilweise deutlich unterscheiden. Dies kann bei einem wachsenden globalen Markt für erneuerbare Kerosine zu zusätzlichen administrativen Anforderungen für die Marktbeteiligten führen. Ein Lösungsansatz, dem zu begegnen, liegt in der gegenseitigen Anerkennung bestehender Systeme und in der Entwicklung so genannter Metastandards.

Ergänzend dazu erfolgten ebenso Lebenszyklusanalysen für unterschiedliche beispielhafte Bereitstellungs-ketten in Bezug auf die kostenseitige Nachhaltigkeit. Bestätigt wurde, dass erneuerbare Kerosine auch absehbar deutlich kostenintensiver gegenüber fossilem Kerosin zu bewerten sind und damit ohne zielgerichtete Fördermaßnahmen nicht wettbewerbsfähig sind. Eine Optimierung der logistischen Bereitstellungskette gegenüber der in DEMO-SPK demonstrierten Kette zeigt eine mögliche Reduktion der Logistikkosten von 85 %. Bei Unterstellung der ganzjährigen Versorgung am Beispiel des Flughafens Leipzig/Halle konnte jedoch ein Kostenverhältnis des Multiblend-JET-A-1 zum fossilen Kerosin von 1,3 ermittelt werden. Dies würde zukünftig eine großtechnische Einführung begünstigen. Solange jedoch – mit Verweis auf den harten internationalen Wettbewerb im Luftverkehr – der Kostenvorbehalt bezüglich erneuerbarer Kerosine besteht, bedarf es weiterer Maßnahmen, den Einsatz von Multiblend-JET-A-1 in der Praxis im größeren Umfang einzuführen.

Wie kann die Luftfahrt ihre Verpflichtungen im Emissionshandel anrechnen lassen?

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Marktimplementierung von erneuerbaren Kerosinen stellt die Schnittstelle zwischen der Nachhaltigkeitszertifizierung und -dokumentation mit ihrem Massenbilanzsystem einerseits und der Anrechnung erneuerbarer Kerosine im Europäischen Emissionshandelssystem andererseits dar. Eine Nachweisführung und Anrechnung auf Basis des derzeit rechtlich geltenden Ansatzes ist mit hohen administrativen und operativen Aufwänden verbunden, was zu einer eingeschränkten Anrechenbarkeit erneuerbarer Flugkraftstoffe führt und damit Anreize zum Einsatz von erneuerbarem Kerosin weiter verringert. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen von DEMO-SPK daher verschiedene Ansätze zur verbesserten Anrechnung im Europäischen Emissionshandel konzeptioniert (sog. „Track and Trace“ bzw. Massenbilanzierung und „Book and Claim“ bzw. Zertifikatlösung) und ihre grundsätzliche Funktionalität bestätigt. Die entwickelten Verfahren und Ansätze gilt es in einem weiteren Schritt über die Erfahrungen in DEMO-SPK hinaus praktisch zu validieren und somit weitere Maßnahmen für ihre zukünftige Operationalisierung zu identifizieren.

Welche weiteren Handlungsempfehlungen gehen aus DEMO-SPK hervor?

Aus den Erfahrungen des Modellvorhabens lassen sich nicht nur zahlreiche Hinweise für das operative Projektmanagement ableiten, sondern auch konkreter Klarstellungsbedarf, welcher für eine erfolgreiche breitere Marktimplementierung wichtig ist. Dazu zählen u. a. (i) die Erweiterung der ASTM D7566 um die Option der simultanen, also zeitgleichen Herstellung von Multiblend-JET-A-1, (ii) die vereinfachte REACH-Registrierung für erneuerbare Kerosine und (iii) die Ergänzung im Energiesteuergesetz über das sog. Ähnlichkeitsprinzip nach § 2, Abs. 4 EnergieStG.

Darüber hinaus wurden gezielt Empfehlungen für die internationalen Institutionen (ASTM, JIG, ETS usw.) abgeleitet und an diese zur Berücksichtigung bei der Weiterentwicklung der jeweiligen Spezifikationen und Leitlinien übermittelt. Damit wirkt DEMO-SPK über das eigentliche Vorhaben hinaus und gibt Empfehlungen, international den operativen Umfang mit erneuerbaren Kerosinen als Teil von Multiblendkerosin zu erleichtern und damit die Marktimplementierung zu ermöglichen.

Ungeachtet der erfolgreichen Untersuchungen im MKS-Modellvorhaben DEMO-SPK bleibt die Tatsache, dass es neben den o. g. Empfehlungen für eine breite Marktimplementierung von erneuerbaren Kerosinen des massiven Ausbaus an Produktionskapazitäten sowie der Erweiterung von infrastrukturellen Gegebenheiten (z. B. zur Herstellung von Multiblend-JET-A-1) bedarf. Nur dann wird es möglich sein, die identifizierten und am Beispiel DEMO-SPK verifizierten positiven Effekte in Bezug auf Minderungspotenziale von Schadstoffemissionen und Treibhausgasen zu ermöglichen.

3 Hintergrund, Ziel und Struktur des Vorhabens

In der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) [MKS13] ist für die deutsche Luftfahrt die Notwendigkeit der Emissionsminderung und Emissionsvermeidung festgeschrieben. Neben technisch-operativen Maßnahmen zur Emissionsminderung liegt ein Fokus auf der Substitution des konventionellen Flugkraftstoffs durch erneuerbare Kerosine bzw. erneuerbare Flugkraftstoffe (engl.: Sustainable Aviation Fuels, SAF).

Zur Produktion von alternativen Flugkraftstoffen (sog. synthetischem Kerosin, SPK) kommen, anstelle der herkömmlichen Erdöldestillation, neuartige Herstellungsverfahren zur Anwendung die in der internationalen Norm ASTM D7566 spezifiziert sind. Je nach Verfahren kann sich die Zusammensetzung der SPK von der des konventionellen Erdölproduktes unterscheiden. Deshalb erfolgt das Inverkehrbringen unter Auflagen; beispielsweise dürfen sie dem erdölbasierten Kerosin bislang lediglich beigemischt werden („Blending“). Anschließend kann der Blend nach ASTM D7566 [AST19d] freigegeben werden und gilt dann als JET A-1 gemäß ASTM D1655 [AST19e], welcher nicht weiter zu deklarieren ist.

Heute sind bereits verschiedene unterschiedliche SPK-Herstellungsverfahren zugelassen (z. B. HEFA-SPK, ATJ, FT-SPK/BTL, FT-SPK/PTL, SIP); weitere (z. B. HEFA-Diesel) befinden sich im Zulassungsprozess. Mittelfristig ist zu erwarten, dass Flughäfen in Deutschland mit JET A-1 beliefert werden, das auch SPK unterschiedlicher Art in variablen Anteilen enthält.

Innerhalb der Versorgungsinfrastruktur eines Flughafens werden die einzelnen Kraftstoffchargen unterschiedlicher Herkunft üblicherweise gemeinschaftlich transportiert und gelagert. Es erfolgt keine physische Trennung der eingelieferten Chargen, wodurch es zwangsläufig zur Vermischung kommt. Da nur spezifikationskonformes JET A-1 eingesetzt werden darf, ist dies formal zulässig. Allerdings wurde das Mischungsverhalten und die Verträglichkeit von unterschiedlichen JET-A-1-Blends, die verschiedenartige SPK in variablen Anteilen enthalten („Multiblending“) bislang nicht untersucht. Auch internationale Vorhaben sind hierzu nicht bekannt.

Mit dem vorrangigen Ziel, das Verhalten von Multiblendkerosin unter realistischen Bedingungen in der Kraftstoffversorgungsinfrastruktur eines Großflughafens zu untersuchen und zu verifizieren, hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen der MKS ein umfassendes international bislang einmaliges Forschungs- und Demonstrationsvorhaben zum Einsatz von erneuerbarem Kerosin am Flughafen Leipzig/Halle (DEMO-SPK) beauftragt.

Eine Übersicht der mit DEMO-SPK verbundenen Einzelaufgaben zeigt die nachstehende Projektstruktur (Abb. 1).

Den Schwerpunkt bildet die Untersuchung des Mischungsverhaltens von konventionellem JET A-1 mit mehreren erneuerbaren Kerosinen. Dies umfasst Analysen der Kraftstoffeigenschaften, des Lagerungsverhaltens im Tank, des Mischungsverhaltens unter realen Bedingungen, der Kompatibilität mit der Kraftstoffversorgungsinfrastruktur sowie für den Multiblend-JET-A-1 auch den Einsatz im Flugzeug. Gleiches gilt für die Untersuchung lokaler Emissionen am Flughafen. Eine reine Laboranalyse reicht nicht aus, um die Fragestellung umfassend zu klären, da unter den realen Bedingungen im Tanklager und in der Versorgungsinfrastruktur Effekte und Wechselwirkungen auftreten können, die im Labor möglicherweise nicht reproduzierbar sind.

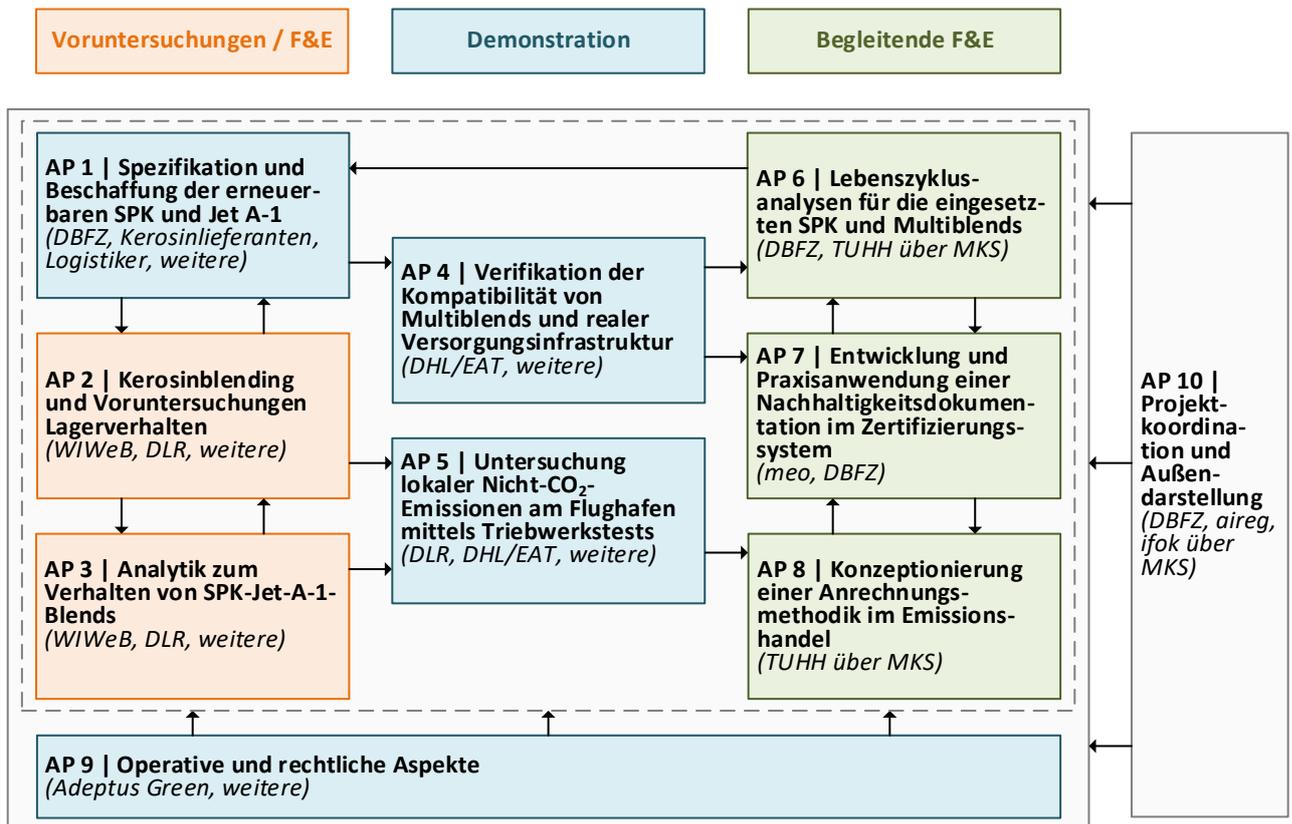


Abb. 1 Struktur des Forschungs- und Demonstrationsvorhabens DEMO-SPK

Zeitgleich bietet dieses Projekt die Möglichkeit, weitere offene Fragen zu adressieren, die in direktem Zusammenhang mit der flächendeckenden Einführung alternativer Flugkraftstoffe bisher unbeantwortet sind. Dies betrifft u. a. die Entwicklung einer praktikablen Nachhaltigkeitsdokumentation sowie die Frage nach einem standardisierten Anrechnungsverfahren im Emissionshandel. In diesem Kontext werden auch die tatsächlichen Lebenszyklusemissionen der eingesetzten erneuerbaren Kerosine und JET A-1 gegenübergestellt werden.

Weiterhin sind im Zuge des Vorhabens rechtliche Fragestellungen zu klären und organisatorische Rahmenbedingungen zu schaffen, die als Leitfaden für zukünftige Einsätze von erneuerbarem Kerosin in Deutschland dienen sollen.

Die erfolgreiche Umsetzung eines solchen international einmaligen Vorhabens als entscheidenden Beitrag auf dem Weg zu einem nachhaltigeren und klimafreundlicheren Luftverkehr gelang nur Dank einer Vielzahl engagierter internationaler Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft (Abb. 2).

Nachfolgend werden die Ergebnisse und Fazits aus den einzelnen Aufgaben dargestellt, mit dem Ziel, eine zusammenfassende Übersicht über das Vorhaben zu geben. Zudem findet sich in Kapitel 11 ein Exkurs zu erneuerbarem Kerosin aus der PTL-Route. Abschließend werden Schlussfolgerungen abgeleitet und Handlungsempfehlungen formuliert.



Abb. 2 Übersicht der an DEMO-SPK beteiligten internationalen Partner (weitere u. a. Amyris, Gerlach, Panalpina)



Bio-Jet A-1



4 Untersuchte erneuerbare Kerosine

Um im Luftverkehr als Treibstoffe eingesetzt zu werden, benötigen fossile wie erneuerbare Kerosine eine entsprechende technische Zulassung. Eine international tätige Instanz hierfür stellt die ASTM International (vormals American Society for Testing of Materials, kurz ASTM) mit Sitz in Pennsylvania/USA dar. In ihrer Funktion entspricht sie beispielsweise dem Deutschen Institut für Normung e. V. (DIN): Sie entwickelt technische Standards für den Gebrauch von Gegenständen oder Produkten, für spezifische Verfahrensweisen und Leistungen sowie für Prüf- und Analyseverfahren [AST19f]. Die Einhaltung und Nutzung dieser Standards ist (fast) immer freiwilliger Natur. Zumeist verpflichten sich jedoch bestimmte Industriezweige, Berufsgruppen oder Unternehmen selbst zur Einhaltung relevanter Standards, um sich auf dem Markt über gemeinsame Werte und Qualitäten zu verständigen.

Ein in Europa gängiger Standard zur Qualitätssicherung von Flugtreibstoffen wurde durch eine Organisation des britischen Verteidigungsministeriums entwickelt (UK Defence Standardization, DStan™). Gemäß den Absprachen zwischen der ASTM und der DStan wird der Bereich der „synthetischen Kerosine“ durch die ASTM bearbeitet, deren Entscheidungen dann die DStan übernimmt und in die für Europa maßgeblichen Vorschriften überträgt.

Erdölbasiertes Kerosin ist beispielsweise über die Standards ASTM D1655 oder DEF STAN 91-091 genormt, erneuerbare Kerosine müssen im Rahmen der ASTM D7566 zugelassen werden. Hier werden sie hinsichtlich ihrer Kraftstoff- und Blendeigenschaften geprüft sowie daraus resultierend hinsichtlich ihrer Beimischungsgrenze limitiert. Zu Beginn des Projekts war die Fassung D7566–16b gültig, die im Verlauf des Projekts mehrere Male durch aktuellere Fassungen ergänzt wurde. Die gegenwärtig gültige Fassung ist ASTM D7566–19.

ASTM D7566 lässt insgesamt vier unterschiedliche Arten von erneuerbaren Kerosinen zu: FT-SPK (Fischer-Tropsch hydroprozessiertes synthetisiertes paraffinisches Kerosin), HEFA-SPK (synthetisiertes paraffinisches Kerosin aus hydroprozessierten Estern und Fettsäuren), SIP (synthetisierte Iso-Paraffine aus hydroprozessierten fermentierten Zuckern) und ATJ-SPK (Alcohol-to-JET synthetisches paraffinisches Kerosin). Ein fünftes, in der ASTM D7566 aufgeführtes, Kerosin SPK/A (synthetisiertes Kerosin mit Aromaten aus der Alkylierung leichter Aromaten von nicht-erdölbasierten Rohstoffen) wird aus Kohle gewonnen und blieb daher in DEMO-SPK gänzlich unberücksichtigt.

Für die Wahl der erneuerbaren Kerosine und Lieferanten wurden zwei wesentliche Kriterien berücksichtigt:

- a. ASTM-Zulassung bezugnehmend auf die aktuell gültige Fassung (ASTM D7566) sowie
- b. Verfügbarkeit auf dem internationalen Markt zum Zeitpunkt der Voruntersuchungen und der geplanten Demonstration am Flughafen LEJ.

Nachfolgend werden die in DEMO-SPK eingesetzten Kerosinoptionen kurz charakterisiert. Umfassende technische Steckbriefe zu den einzelnen Optionen wurden beispielsweise im Rahmen des MKS-Vorhabens „Bio-kerosin und EE-Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft – von der Theorie zu Pilotvorhaben“ erstellt [Zec16].

4.1 HEFA-SPK

HEFA-SPK ist gegenwärtig das mengenmäßig wichtigste der ASTM-zugelassenen erneuerbaren Kerosine auf dem internationalen Markt. Synthetisierte, paraffinische Kerosine aus hydroprozessierten Estern und Fettsäuren (HEFA-SPK) können über die Umwandlung von pflanzlichen bzw. tierischen Ölen oder Fetten unter Einsatz von Wasserstoff (Hydrotreatment) hergestellt werden. Das weithin auf die Dieselproduktion ausgelegte Verfahren kann durch Anpassung der Betriebsbedingungen hin zur Kerosinfraktion optimiert werden.

Im Rahmen dieses katalytischen Verfahrens werden in einem ersten Schritt die Doppelbindungen gesättigt und Heteroatome entfernt. Zur Adaption der Produkteigenschaften werden im folgenden Prozessschritt eine Isomerisierung und ein mildes Cracken durchgeführt. Umfangreiche Untersuchungen erfolgten u. a. im Rahmen des MKS-Vorhabens „Machbarkeitsanalyse für eine PTG-HEFA-Hybridraffinerie in Deutschland“ [Die17].

Neben der Marktverfügbarkeit der HEFA-Kerosinfraktion, sollte mit Rücksicht auf die Nachhaltigkeitsstrategie von DHL ausschließlich erneuerbares Kerosin eingelagert und genutzt werden, das nachweislich nicht aus Palmöl oder Palmölderivaten hergestellt wurde. Relevante Produktionskapazitäten befanden sich zu diesem Zeitpunkt im Besitz des Unternehmens World Energy Paramount (ehemals AltAir Paramounts LLC, Kalifornien/USA). Den Rohstoff bildete ausschließlich Rindertalg und für den Kraftstoff liegt eine Nachhaltigkeitszertifizierung des Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) vor. Dieser Organisation wurde durch die Europäische Kommission am 9. August 2016 erneut für 5 Jahre die Einhaltung der Nachhaltigkeitskriterien nach 98/70/EC und 2009/28/EC bestätigt.

4.2 HFP-HEFA

HFP-HEFA (high-freeze-point HEFA) wird mit dem Ziel der Vereinfachung des Prozesses der HEFA-Herstellung entwickelt. Da die Isomerisierung der aufwendigste Prozessschritt für die Gewinnung von HEFA-SPK ist, wird dieser so einfach und kurz wie möglich gehalten. Dies ist nur auf Kosten einer verschobenen Zusammensetzung des HFP-HEFA möglich, welche wiederum einen erhöhten Gefrierpunkt zur Folge hat. Daraus resultiert eine deutlich geringere Blendrate im Vergleich zum HEFA-SPK. Dieser Prozess ist noch nicht zugelassen und konnte daher in die eigentlichen Multiblend-Untersuchungen nicht einbezogen werden [Sta16]. Im Zusammenhang mit der Zulassung stellten sich jedoch einige Fragen, die unter Sicherheitsaspekten von Interesse sind, aber bisher nicht untersucht worden waren. Die im Rahmen von DEMO-SPK stattfindenden Klimakammerversuche wurden daher um die Betrachtung von HFP-HEFA erweitert. Das hierfür eingesetzte HFP-HEFA wurde von der Firma Neste aus Finnland zur Verfügung gestellt.

4.3 ATJ-SPK

Synthetisierte, paraffinische Kerosine aus dem Alcohol-to-Jet-Verfahren (ATJ-SPK, engl.: Alcohol-to-Jet synthetic paraffinic kerosene) werden aus zuckerhaltigen oder verzuckerbaren Rohstoffen über die primäre Herstellung eines Alkohols (Ethanol oder Butanol) und die sekundäre Kettenverlängerung mithilfe von Dehydrierung und Oligomerisation produziert. Eine anschließende Fraktionierung wird zur Produktgewinnung nachgeschaltet. ATJ-SPK war bis Anfang 2018 ausschließlich als ATJ-SPK aus iso-Butanol zugelassen. Einziger Anbieter hierfür war die Firma Gevo, Inc., die ATJ-SPK in einer kleinen Raffinerie in Texas herstellt. Die Expansionspläne gehen von einer größeren Anlage am Standort Luverne in Minnesota aus. Mit ASTM D7566–18 wurde während der Projektlaufzeit von DEMO-SPK auch ATJ aus Ethanol zugelassen. Mit Verweis auf die für das Vorhaben zu späte Zulassung und unklarer Marktlage bezüglich der Verfügbarkeit wurde diese Option nicht berücksichtigt.

4.4 SIP

Die Herstellung von SIP (synthetisierte iso-Paraffine) führt über einen Prozess, der FTJ (engl.: Fermentation to Jet) oder DSHC (engl.: Direct Sugar to Hydrocarbons) genannt wird. Dabei werden genetisch veränderte Hefen eingesetzt, die in der Lage sind, aus Zucker langkettige Kohlenwasserstoffe zu erzeugen. Diese werden abgetrennt und mit Hilfe von Wasserstoff hydriert (Absättigen von Doppelbindungen) zu sog. Farnesan, bevor sie konventionellem Kerosin beigemischt werden können. Für den Bezug von SIP stand nur eine einzige Quelle

zur Verfügung: Dies ist die Firma Amyris, Inc., die sich zu diesem Zeitpunkt mehrheitlich im Besitz der Total S.A. befand.

SIP wurde aus Gründen der Verfügbarkeit ausschließlich für die Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab bezogen. Eine Inkludierung in den am Flughafen bereitgestellten Multiblend-JET-A-1 konnte nicht stattfinden, da die dafür erforderlichen Mengen anders als erwartet nicht mehr verfügbar waren. Die Firma Amyris konzentriert sich nunmehr weniger auf SIP als Kraftstoff als vielmehr auf hochpreisige biobasierte Produkte [Leu18], so dass fraglich ist, inwieweit SIP als erneuerbare Blendkomponente für Kerosin perspektivisch relevant sein wird.

4.5 FT-SPK via PTL

Die Zulassung des Fischer-Tropsch (FT)-Prozesses zur Erzeugung von synthetischem Kerosin durch ASTM erfolgte 2009. Die ASTM-Zulassung des FT-Prozesses bezieht sich aber auf den zweiten Schritt und enthält keine Vorgaben für die Erzeugung des Synthesegases, welches dann im FT-Prozess in Kohlenwasserstoffe (z. B. Kerosin) umgewandelt wird. Die bestehende Zulassung gilt mithin auch für FT-Kerosin, das auf anderem Wege als aus Erdgas oder Kohle gewonnen wird. Das Verfahren selbst wurde bereits vor der Zulassung durch ASTM auf der Basis einer firmenspezifischen Zulassung von der südafrikanischen Firma Sasol für die Erzeugung von Kerosin aus Kohle verwendet und wird mittlerweile in großem Maßstab in Qatar zur Erzeugung von Kerosin aus Erdgas eingesetzt. [Zsc17]

In Bezug auf den Einsatz erneuerbarer Rohstoffe für FT-SPK existieren gegenwärtig mehrere Projekte, auf Basis verbesserter Technologie FT-Kohlenwasserstoffe aus Biomasse oder Haushaltsabfällen zu gewinnen. Keines dieser Projekte hat aber einen Status erreicht, dass bereits eine Lieferung von FT-Biokerosin in für die Zwecke von DEMO-SPK relevanten Mengen möglich gewesen wäre; nicht einmal für die Voruntersuchungen.

Die Einbeziehung des FT-Prozesses in DEMO-SPK erfolgte stattdessen durch eine separate Untersuchung einer kleineren Menge eines FT-Zwischenprodukts, das von der Firma Sunfire GmbH als Power-to-Liquid (PTL)-Produkt gewonnen worden war. Das Besondere am PTL-Prozess ist, dass das Synthesegas aus Kohlendioxid und Wasserstoff gewonnen wird, wobei der Wasserstoff elektrolytisch unter Verwendung von erneuerbarem Strom (engl.: Power) aufgespalten wird. Für die anschließende Weiterverarbeitung des Synthesegases zu Kerosin existieren mehrere Verfahren (z. B. Methanolsynthese), von denen aber nur der FT-Prozess bereits zugelassen ist. Sunfire setzt daher den FT-Prozess als nachgelagerte Stufe ein, gewann aber daraus zunächst nur ein Zwischenprodukt. Die Bedingungen für die Aufarbeitung dieses Zwischenproduktes zu Kerosin wurden im Rahmen von DEMO-SPK näher untersucht.



5 Voruntersuchungen zu Eigenschaften von erneuerbarem Kerosin und Multiblend-JET-A-1

Hierzu wurden die chemisch-physikalischen Parameter der reinen Mischungskomponenten bestimmt, die Mischungsverhältnisse für spezifikationsgerechte binäre Mischungen mit maximalen synthetischen Anteilen berechnet und diese hergestellt. Auf Basis der binären Mischungen erfolgte die Konzipierung der Multikomponentenmischungen (nachfolgend Multiblend genannt). Nach Herstellung der Multiblends im Labormaßstab und Überprüfung auf Spezifikationskonformität wurden diese im Technikumsmaßstab hergestellt und ausgelagert. Zu Beginn und Ende der sechsmonatigen Auslagerungsperiode wurden die chemisch-physikalischen Parameter der Kraftstoffe bestimmt, um Aussagen über eventuelle Veränderungen der Kraftstoffqualität zu treffen. Um das unplausible Auftreten einer Entmischung auszuschließen, wurden periodisch entnommene Proben aus unterschiedlichen Füllhöhen der Kraftstoffmischungen untersucht. Darüber hinaus überprüfte man die Genauigkeit der Berechenbarkeit chemisch-physikalischer Eigenschaften von Multiblends indem die experimentell erhaltenen Messwerte mit den berechneten verglichen wurden.

Das Ziel der Voruntersuchungen bestand in der Erbringung des Nachweises, dass spezifikationsgerechte teilsynthetische Kraftstoffmischungen auch aus mehreren synthetischen Kraftstoffen hergestellt und ohne Minderung der Kraftstoffqualität gelagert werden können.

Hierzu wurden die chemisch-physikalischen Parameter der reinen Mischungskomponenten bestimmt, die Mischungsverhältnisse für spezifikationsgerechte binäre Mischungen mit maximalen synthetischen Anteilen berechnet und diese hergestellt. Auf Basis der binären Mischungen erfolgte die Konzipierung der Multikomponentenmischungen (nachfolgend Multiblend genannt). Nach Herstellung der Multiblends im Labormaßstab und Überprüfung auf Spezifikationskonformität wurden diese im Technikumsmaßstab hergestellt und ausgelagert. Zu Beginn und Ende der sechsmonatigen Auslagerungsperiode wurden die chemisch-physikalischen Parameter der Kraftstoffe bestimmt, um Aussagen über eventuelle Veränderungen der Kraftstoffqualität zu treffen. Um das unplausible Auftreten einer Entmischung auszuschließen, wurden periodisch entnommene Proben aus unterschiedlichen Füllhöhen der Kraftstoffmischungen untersucht. Darüber hinaus überprüfte man die Genauigkeit der Berechenbarkeit chemisch-physikalischer Eigenschaften von Multiblends indem die experimentell erhaltenen Messwerte mit den berechneten verglichen wurden.

Zusätzlich wurden ein Multiblend und ein binärer Blend mit Anteilen an HFP-HEFA und JET A-1 in einer Klimakammer zyklisch ändernden Temperaturen ausgesetzt, um den Einfluss wechselnder klimatischer Bedingungen zu untersuchen.

5.1 Kerosinblending und Lagerverhalten

Fossile Flugturbinenkraftstoffe müssen die Anforderungen der Spezifikation ASTM D1655 erfüllen, synthetische Kraftstoffe und deren Mischungen die der ASTM D7566. Letztere basiert auf der ASTM D1655 und stellt für teilsynthetische Kraftstoffmischungen zusätzliche Forderungen nach einem Mindestgehalt an Aromaten, an die Tieftemperatureigenschaften und den Gradienten der Siedekurve. Reine synthetische Kraftstoffe müssen zusätzlich höhere Anforderungen an die thermische Stabilität erfüllen. Gemäß ASTM D7566 müssen folgende 16 chemisch-physikalischen Kennwerte eingehalten werden, deren Bestimmung am WIWeB gemäß den entsprechenden Normen durchgeführt wurde: Säurezahl (ASTM D3242 [AST17a]), Aromatengehalt (ASTM D1319 [AST18d]), Siedeverlauf (ASTM D86 [AST18b])¹, Flammpunkt (IP 170 [IP 13]), Dichte

¹ Der Siedeverlauf für reines SIP wurde gemäß ASTM D7345 bestimmt.

(ASTM D4052 [AST18a]), Gefrierpunkt (ASTM D7153 [AST15]), Schmierfähigkeit (ASTM D5001 [AST14a]), Viskosität bei -20°C bzw. -40°C (ASTM D445 [AST19c]), Abdampfdruckstand (ASTM D381 [AST17b]), Heizwert (ASTM D3338 [AST14b]), thermische Stabilität (ASTM D3241 [AST19a]), Rußpunkt (ASTM D1322 [AST18c]), Kupferkorrosion (ASTM D130 [AST19b]), Schwefelgehalt (DIN EN ISO 14596 [DIN07]) und Naphthalinengehalt (ASTM D1840 [AST17c]).

In DEMO-SPK standen als konventioneller, fossiler Flugturbinenkraftstoff JET A-1, produziert in der Raffinerie Lingen (Fa. BP), und als synthetische Kerosine HEFA (Fa. World Energy), ATJ (Fa. Gevo) und SIP (Fa. Amyris) zur Verfügung. Entsprechend der ASTM D7566 dürfen diese synthetischen Kraftstoffe konventionellem Kerosin zugemischt werden, solange die binäre Mischung die Anforderungen dieser Spezifikation erfüllen. Zur Konzipierung der binären Mischungen wurden zunächst die chemisch-physikalischen Eigenschaften der einzelnen reinen Kraftstoffe bestimmt (Tab. 1).

Tab. 1 Chemisch-physikalische Eigenschaften der reinen Kraftstoffe

| Eigenschaft | fossiles JET A-1 | HEFA | ATJ | SIP | Forderung an Mischungen gem. ASTM D1655 bzw. D7566 | |
|------------------------------------------------------|------------------|---------|----------|----------|----------------------------------------------------|--------------------------|
| | Wert | Wert | Wert | Wert | Wert | Einheit |
| Säurezahl | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 0,005 | max. 0,10 | mg KOH/g |
| Aromatengehalt | 16,0 | 0 | 0 | 0 | 8–25 | %v/v |
| Siedeverlauf | | | | | | |
| Siedebeginn | 160,9 | 149,3 | 171,6 | 239,8 | angeben | $^{\circ}\text{C}$ |
| 10%v/v | 179,7 | 164,8 | 179,7 | 243,8 | max. 205 | $^{\circ}\text{C}$ |
| 50%v/v | 200,5 | 199,5 | 184,8 | 244,1 | angeben | $^{\circ}\text{C}$ |
| T50–T10 | 20,8 | 34,7 | 5,1 | 0,3 | min. 15 | $^{\circ}\text{C}$ |
| 90%v/v | 225,7 | 242,8 | 205,5 | 244,3 | angeben | $^{\circ}\text{C}$ |
| T90–T10 | 46,0 | 78,0 | 25,8 | 0,5 | min. 40 | $^{\circ}\text{C}$ |
| Siedeendpunkt | 250,4 | 251,3 | 257,9 | 245,6 | max. 300 | $^{\circ}\text{C}$ |
| Rückstand | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | max. 1,5 | %v/v |
| Verlust | 0,9 | 1,0 | 0,6 | 0,3 | max. 1,5 | %v/v |
| Flammpunkt | 48,0 | 42,5 | 47,5 | 107,5 | min. 38 | $^{\circ}\text{C}$ |
| Dichte bei 15°C | 811,7 | 751,5 | 758,0 | 772,0 | 775–840 | kg/m^3 |
| Gefrierpunkt | $-81,9$ | $-42,0$ | < -100 | < -100 | max. -47 | $^{\circ}\text{C}$ |
| Schmierfähigkeit (WSD) | 0,629 | 0,709 | 0,827 | 0,523 | max. 0,85 | mm |
| Viskosität [-20°C] | 4,250 | 3,891 | 4,779 | 13,64 | max. 8 | mm^2/s |
| Viskosität [-40°C] | 8,497 | 7,697 | 9,037 | 42,41 | max. 12 | mm^2/s |
| Abdampfdruckstand | < 1 | 2,9 | 2,2 | < 1 | max. 7 | $\text{mg}/100\text{ml}$ |
| therm. Stabilität | | | | | | |
| Farbe, Ablagerung | < 1 | < 1 | < 1 | 1 | < 3 | Note |
| Druckabfall | 0 | 0 | 0 | 0 | max. 25 | mm Hg |
| Heizwert | 43,172 | 44,174 | 44,039 | 44,061 | min. 42,8 | MJ/kg |
| Kupferkorrosion | 1b | 1a | 1b | 1b | max. 1 | Note |
| Rußpunkt | 22,9 | > 43 | 34,5 | — | min. 25,0 ^a | mm |
| Naphthalinengehalt | 0,243 | 0 | 0 | 0 | max. 3,0 | %v/v |
| Gesamtschwefel | 0,0023 | 0,0006 | 0 | 0 | max. 0,30 | %m/m |

^a Mindestens 25 mm oder min. 18 mm bei Naphthalinengehalt $< 3\%$ v/v. Der Rußpunkt konnte für SIP wegen seiner hohen Viskosität nicht bestimmt werden.

Im Rahmen der HBBA-Studie² wurden eine Vielzahl binärer Mischungen fossiler und synthetischer Kraftstoffe untersucht. Basierend auf hierbei gewonnenen Erkenntnissen lassen sich die chemisch-physikalischen Kennwerte Dichte, Aromatengehalt, Säurezahl, Heizwert, Naphthalingehalt, Gesamtschwefel, Abdampfdruckstand und Viskosität³ für binäre Mischungen recht präzise berechnen. Für den Siedeverlauf und die Gradienten des Siedeverlaufs liefert eine Berechnung nur ungenaue Werte.

Basierend auf diesem Wissen und der Kenntnis der chemisch-physikalischen Kennwerte der reinen Komponenten wurden rechnerisch binäre Mischungen konzipiert, die einen maximalen Anteil an synthetischen Komponenten enthalten und dabei die Anforderungen der Spezifikation ASTM D7566 erfüllen. Laut dieser dürfen binäre Mischungen maximal 50 %v/v HEFA bzw. maximal 30 %v/v ATJ bzw. maximal 10%v/v SIP enthalten. Im Falle von SIP konnte der maximale Mischungsanteil von 10%v/v erreicht werden (Tab. 2, Spalte BM 2). Für HEFA wurde ein Mischungsanteil von 45%v/v gewählt (Tab. 2, Spalte BM 1), um eine Sicherheitsmarge zu dem unteren Spezifikationslimit des Aromatengehalts zu wahren. Im Falle von ATJ wurden ein Mischungsanteil von 25%v/v festgelegt (Tab. 2, Spalte BM 3), da ansonsten die Gradienten der Siedekurve nur knapp das minimale Spezifikationslimit erfüllen würden.

In Tab. 2 sind die chemisch-physikalischen Kennwerte der binären Kraftstoffmischungen BM 1–BM 3 zusammengefasst. Ausgewählte, als potenziell kritisch eingestufte bzw. nicht berechenbare Kennwerte wurden experimentell bestimmt, gut berechenbare wurden in einigen Fällen berechnet (grau hinterlegt). Bei einigen Kennwerten, die seitens der reinen Mischungskomponenten bereits gut erfüllt wurden, verzichtete man an dieser Stelle auf eine erneute Bestimmung (z. B. thermische Stabilität, in den Tabellen mit X gekennzeichnet); es ist in diesen Fällen nicht davon auszugehen, dass für die Mischungen eine Verschlechterung der Kennwerte eintritt.

Tab. 2 Eigenschaften der binären Mischungen (BM)

| Eigenschaft | BM 1 | BM 2 | BM 3 | Forderung gem. ASTM D 7566 | |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|------------|
| | 45%v/v HEFA | 10%v/v SIP | 25%v/v ATJ | | |
| | 55%v/v JET A-1 | 90%v/v JET A-1 | 75%v/v JET A-1 | Wert | Einheit |
| | Wert | Wert | Wert | | |
| Säurezahl | 0,002 | 0,003 | 0,003 | max. 0,10 | mg KOH / g |
| Aromatengehalt | 8,8 | 14,4 | 12 | 8–25 | %v/v |
| Siedeverlauf | | | | | |
| Siedebeginn | 154,0 | 163,7 | 164,6 | angeben | °C |
| 10%v/v | 172,6 | 182,5 | 178,7 | max. 205 | °C |
| 50%v/v | 200,8 | 205,6 | 195,3 | angeben | °C |
| T50–T10 | 28,2 | 23,1 | 16,6 | min. 15 | °C |
| 90%v/v | 234,5 | 233,3 | 226,6 | angeben | °C |
| T90–T10 | 61,9 | 50,8 | 47,9 | min. 40 | °C |
| Siedeendpunkt | 251,1 | 248,8 | 253,0 | max. 300 | °C |
| Rückstand | 1,2 | 1,2 | 1,1 | max. 1,5 | %v/v |
| Verlust | 0,9 | 1,0 | 1,0 | max. 1,5 | %v/v |
| Flammpunkt | 45,0 | 50,0 | X | min. 38 | °C |

² Eine systematische Untersuchung binärer, teilsynthetischer Mischungen unterschiedlicher synthetischer und fossiler Kraftstoffe erfolgte in der im Auftrag der Europäischen Kommission durchgeführten HBBA-Studie [Zsc17]. Der Schwerpunkt dieser Studie lag in der Untersuchung, wie sich die Eigenschaften synthetischer Kraftstoffe auf die Eigenschaften binärer Mischungen mit fossilen Kraftstoffen auswirken. Hierfür wurden verschiedene synthetische Kerosine in hohen und variierenden Anteilen jeweils mit unterschiedlichen fossilen Kerosinen gemischt und die Eigenschaften der Mischungen untersucht.

³ Während die Kennwerte Dichte, Aromatengehalt, Säurezahl, Heizwert, Naphthalingehalt, Gesamtschwefel und Abdampfdruckstand einen linearen Zusammenhang zeigen, gehorcht die Viskosität einem logarithmischen Zusammenhang (Grunberg-Nissan-Gleichung).

| Eigenschaft | BM 1 | BM 2 | BM 3 | Forderung gem. ASTM D 7566 | |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------|
| | 45 %v/v HEFA 55 %v/v JET A-1 | 10 %v/v SIP 90 %v/v JET A-1 | 25 %v/v ATJ 75 %v/v JET A-1 | Wert | Einheit |
| | Wert | Wert | Wert | | |
| Dichte bei 15 °C | 784,6 | 807,7 | 798,5 | 775–840 | kg/m ³ |
| Gefrierpunkt | -52,5 | -83,6 | X | max. -47 | °C |
| Schmierfähigkeit (WSD) | 0,657 | 0,588 | X | max. 0,85 | mm |
| Viskosität [-20 °C] | 4,082 | 4,660 | 4,375 | max. 8 | mm ² /s |
| Viskosität [-40 °C] | 8,121 | 9,633 | 8,646 | max. 12 | mm ² /s |
| Abdampfrückstand | 1,8 | < 1 | 1,2 | max. 7 | mg/100 ml |
| therm. Stabilität | | | | | |
| Farbe, Ablagerung | X | X | X | < 3 | Note |
| Druckabfall | X | X | X | max. 25 | mm Hg |
| Heizwert | 43,623 | 43,261 | 43,389 | min. 42,8 | MJ/kg |
| Kupferkorrosion | X | X | X | max. 1 | Note |
| Rußpunkt | 31,8 | 24,5 | X | min. 25,0 ^a | mm |
| Naphthalinengehalt | 0,134 | 0,219 | 0,182 | max. 3,0 | %v/v |
| Gesamtschwefel | 0,0015 | 0,0021 | 0,0017 | max. 0,30 | %m/m |

Berechnete Werte sind in grau hinterlegt. Werte mit X wurden nicht bestimmt. ^a Mindestens 25 mm oder min. 18 mm bei Naphthalinengehalt < 3,0 %v/v.

Aus den binären Mischungen wurden ein Multiblend (Nr. 1), der alle drei binären Mischungen und somit alle verfügbaren synthetischen Kraftstoffe enthält, und drei Multiblends (Nr. 2–4), die je zwei binäre Kraftstoffmischungen enthalten, konzipiert und hergestellt. Hierbei gilt die durch die Praxis bestätigte Annahme, dass spezifikationsgerechte Kraftstoffe bzw. Kraftstoffmischungen untereinander in jedem Verhältnis gemischt werden können und dabei spezifikationsgerechte Mischungen entstehen. Die entsprechenden Anteile der binären Mischungen in den Multiblends sind in Tab. 3 zusammengestellt.

Tab. 3 Mischungsverhältnisse / Anteile der Kraftstoffe in den Multiblends

| Multiblend | Anteil binäre Mischung | | | |
|------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Nr. | BM 1 [%v/v] | BM 2 [%v/v] | BM 3 [%v/v] |
| 1 | 1 | 36,9 | 49,8 | 13,3 |
| 2 | 2 | 42,6 | 57,4 | 0,0 |
| 3 | 3 | 0,0 | 41,7 | 58,3 |
| 4 | 4 | 66,5 | 0,0 | 33,5 |

Nach Herstellung dieser Multiblends, zunächst im Labormaßstab zu 4 L pro Multiblend, wurden die relevanten chemisch-physikalischen Kennwerte ermittelt, um zu bestätigen, dass gemäß ASTM D7566 spezifikationskonforme Kraftstoffe erhalten wurden. Den Tab. 5 bis Tab. 8 kann entnommen werden, dass alle Multiblends sämtliche Forderungen erfüllen; spezifikationskonforme teilsynthetische Kraftstoffmischungen können auch aus mehreren unterschiedlichen synthetischen Kraftstoffen hergestellt werden.

Im Technikumsmaßstab wurden die Multiblends Nr. 1 und Nr. 2 zu je 900 L und Nr. 3 und Nr. 4 zu je 400 L hergestellt. Hierzu wurden Tankanlagen des Typs TA 950-A2 der Bundeswehr genutzt. Die Kraftstoffe wurden mittels einer Fasspumpe (EX50, Fa. Piusi) in die Tankanlagen überführt. Die Mengenmessung der Kraftstoffe erfolgte mit einem digitalen Durchflusszähler (K24 ATEX, Fa. Piusi). Die Kraftstoffmischungen wurden durch Umwälzen homogenisiert; hierbei wurde der Kraftstoff über Rohrleitungen vom Boden angesaugt und über den Einfüllstutzen in die Tanks zurückgeführt. Die erreichten Mischungsverhältnisse sind in Tab. 4 dargestellt.

Tab. 4 Absolute Mengen und Anteile der Einzelkomponenten in den Multiblends im Technikumsmaßstab

| Multiblend | Zusammensetzung der Mischungen | | | | | | | | |
|------------|--------------------------------|------|------|------|-----|-----|-----|------|-----|
| | JET A-1 | | HEFA | | SIP | | ATJ | | |
| | Nr. | [L] | [%] | [L] | [%] | [L] | [%] | [L] | [%] |
| 1 | 676 | 75,0 | 150 | 16,6 | 45 | 5,0 | 30 | 3,3 | |
| 2 | 676 | 75,1 | 172 | 19,1 | 52 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | |
| 3 | 325 | 81,3 | 0,0 | 0,0 | 17 | 4,2 | 58 | 14,5 | |
| 4 | 247 | 61,6 | 120 | 29,9 | 0,0 | 0,0 | 34 | 8,5 | |

Ein Vergleich der chemisch-physikalischen Kennwerte der Mischungen die im Labormaßstab und jener die im Technikumsmaßstab hergestellt wurden zeigt eine gute Übereinstimmung (Tab. 5 bis Tab. 8). Leichte Schwankungen der Werte erklären sich durch die höhere Dosiergenauigkeit im Labor und die Wiederholbarkeiten der Verfahren. Weiterhin wird beim Vergleich mit den berechneten Kennwerten (Tab. 5 bis Tab. 8) ersichtlich, dass sich analog zu binären Mischungen auch für Multiblends aus einem fossilen und mehreren synthetischen Komponenten die Kennwerte Dichte, Säurezahl, Heizwert, Gesamtschwefel, Abdampfdruckstand und Viskosität mit guter Genauigkeit berechnen lassen.

Zu Beginn und zum Ende der sechsmonatigen Auslagerungszeit erfolgte jeweils die Probenahme an jeder Kraftstoffmischung und die der entsprechenden Kennwerte, um etwaige Veränderungen der Kraftstoffqualität nachweisen zu können. Zusätzlich wurden im Verlauf der Auslagerung periodisch Proben aus unterschiedlichen Höhen der Kraftstofffüllungen untersucht, um das unwahrscheinliche Auftreten einer Entmischung auszuschließen.

Beim Vergleich der vor und nach Auslagerung ermittelten chemisch-physikalischen Kennwerte der Kraftstoffmischungen (Tab. 5 bis Tab. 8) sind keine Unterschiede im Rahmen der Wiederholbarkeit der Messverfahren erkennbar. Es kann keine Veränderung der Kraftstoffqualität beobachtet werden.

Tab. 5 Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 1
 Der Aromaten- und Naphthalin Gehalt der Mischung wurde lediglich rechnerisch ermittelt und einmalig angegeben (grau hinterlegt).

| Eigenschaft | berechnet | Labor | Technikum vor Auslagerung | Technikum nach Auslagerung | Forderung gem. ASTM D 7566 | |
|--------------------------|-----------|--------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| | Wert | Wert | Wert | Wert | Wert | Einheit |
| Säurezahl | 0,003 | X | 0,002 | 0,002 | max. 0,10 | mg KOH / g |
| Aromatengehalt | 12,0 | | | | 8–25 | %v/v |
| Siedeverlauf | | | | | | |
| Siedebeginn | 163,3 | 159,7 | 161,3 | 160,5 | angeben | °C |
| 10%v/v | 180,4 | 177,9 | 178,1 | 177,8 | max. 205 | °C |
| 50%v/v | 202,0 | 202,6 | 202,3 | 202,6 | angeben | °C |
| T50–T10 | 21,6 | 24,7 | 24,2 | 24,8 | min. 15 | °C |
| 90%v/v | 228,8 | 233,7 | 233,0 | 233,4 | angeben | °C |
| T90–T10 | 48,4 | 55,8 | 54,9 | 55,6 | min. 40 | °C |
| Siedeendpunkt | 250,6 | 254,4 | 248,6 | 252,7 | max. 300 | °C |
| Rückstand | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | max. 1,5 | %v/v |
| Verlust | 0,9 | 0,9 | 1,1 | 1,0 | max. 1,5 | %v/v |
| Flammpunkt | X | 48,5 | 48,0 | 47,0 | min. 38 | °C |
| Dichte bei 15 °C | 797,9 | 798,0 | 797,9 | 798,0 | 775–840 | kg / m ³ |
| Gefrierpunkt | X | –63,8 | –63,4 | –63,4 | max. –47 | °C |
| Schmierfähigkeit (WSD) | X | 0,671 | 0,618 | 0,616 | max. 0,85 | mm |
| Viskosität [–20 °C] | 4,455 | 4,385 | 4,365 | 4,355 | max. 8 | mm ² / s |
| Viskosität [–40 °C] | 9,071 | 8,817 | 8,753 | 8,862 | max. 12 | mm ² / s |
| Abdampfdruckstand | 1,2 | <1 | <1 | <1 | max. 7 | mg / 100 ml |
| therm. Stabilität | | | | | | |
| Farbe, Ablagerung | X | 1 | 1 | 1 | <3 | Note |
| Druckabfall | X | 0 | 0 | 0 | max. 25 | mmHg |
| Heizwert | 43,412 | 43,400 | 43,400 | 43,400 | min. 42,8 | MJ / kg |
| Kupferkorrosion | X | 1a | 1a | 1a | max. 1 | Note |
| Rußpunkt | X | X | 26,8 | 27,5 | min. 25,0 ^a | mm |
| Naphthalin Gehalt | 0,182 | | | | max. 3,0 | %v/v |
| Gesamtschwefel | 0,0018 | X | 0,0018 | 0,0019 | max. 0,30 | %m/m |

^a Mindestens 25,0 mm oder min. 18,0 mm bei Naphthalin Gehalt < 3,0 %v/v.

Tab. 6 Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 2
 Der Aromaten- und Naphthalinengehalt der Mischung wurde lediglich rechnerisch ermittelt und einmalig angegeben (grau hinterlegt).

| Eigenschaft | berechnet | Labor | Technikum vor Auslagerung | Technikum nach Auslagerung | Forderung gem. ASTM D 7566 | |
|--------------------------|-----------|--------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| | Wert | Wert | Wert | Wert | Wert | Einheit |
| Säurezahl | 0,003 | X | 0,002 | 0,002 | max. 0,10 | mg KOH/g |
| Aromatengehalt | 12,0 | | | | 8–25 | %v/v |
| Siedeverlauf | | | | | | |
| Siedebeginn | 163,2 | 159,4 | 160,3 | 159,8 | angeben | °C |
| 10%v/v | 180,5 | 177,8 | 177,3 | 177,5 | max. 205 | °C |
| 50%v/v | 202,8 | 203,9 | 203,7 | 203,7 | angeben | °C |
| T50–T10 | 22,3 | 26,1 | 26,4 | 26,2 | min. 15 | °C |
| 90%v/v | 230,1 | 234,3 | 234,3 | 234,2 | angeben | °C |
| T90–T10 | 49,5 | 56,5 | 57,0 | 56,7 | min. 40 | °C |
| Siedeendpunkt | 250,3 | 251,4 | 251,1 | 252,6 | max. 300 | °C |
| Rückstand | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | max. 1,5 | %v/v |
| Verlust | 0,9 | 0,9 | 1,1 | 1,0 | max. 1,5 | %v/v |
| Flammpunkt | X | 48,0 | 47,5 | 47,0 | min. 38 | °C |
| Dichte bei 15 °C | 797,8 | 798,1 | 797,9 | 797,9 | 775–840 | kg/m ³ |
| Gefrierpunkt | X | –62,4 | –61,9 | –62,0 | max. –47 | °C |
| Schmierfähigkeit (WSD) | X | 0,667 | 0,616 | 0,607 | max. 0,85 | mm |
| Viskosität [–20 °C] | 4,468 | 4,394 | 4,402 | 4,369 | max. 8 | mm ² /s |
| Viskosität [–40 °C] | 9,143 | 8,842 | 8,884 | 8,871 | max. 12 | mm ² /s |
| Abdampfrückstand | 1,2 | <1 | <1 | <1 | max. 7 | mg/100 ml |
| therm. Stabilität | | | | | | |
| Farbe, Ablagerung | X | 1 | 1 | 1 | <3 | Note |
| Druckabfall | X | 0 | 0 | 0 | max. 25 | mmHg |
| Heizwert | 43,416 | 43,402 | 43,401 | 43,402 | min. 42,8 | MJ/kg |
| Kupferkorrosion | X | 1a | 1a | 1a | max. 1 | Note |
| Rußpunkt | X | X | 26,3 | 27,8 | min. 25,0 ^a | mm |
| Naphthalinengehalt | 0,182 | | | | max. 3,0 | %v/v |
| Gesamtschwefel | 0,0018 | X | 0,0019 | 0,0019 | max. 0,30 | %m/m |

^a Mindestens 25,0 mm oder min. 18,0 mm bei Naphthalinengehalt < 3,0 %v/v.

Tab. 7: Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 3
 Der Aromaten- und Naphthalin Gehalt der Mischung wurde lediglich rechnerisch ermittelt und einmalig angegeben (grau hinterlegt).

| Eigenschaft | berechnet | Labor | Technikum vor Auslagerung | Technikum nach Auslagerung | Forderung gem. ASTM D 7566 | |
|--------------------------|-----------|--------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| | Wert | Wert | Wert | Wert | Wert | Einheit |
| Säurezahl | 0,003 | X | 0,003 | 0,002 | max. 0,10 | mg KOH / g |
| Aromatengehalt | 13,0 | | | | 8–25 | %v/v |
| Siedeverlauf | | | | | | |
| Siedebeginn | 165,8 | 163,2 | 165,1 | 163,9 | angeben | °C |
| 10%v/v | 182,4 | 179,6 | 180,3 | 179,7 | max. 205 | °C |
| 50%v/v | 200,0 | 199,5 | 199,4 | 199,3 | angeben | °C |
| T50–T10 | 17,6 | 19,9 | 19,1 | 19,6 | min. 15 | °C |
| 90%v/v | 223,5 | 230,1 | 230,6 | 229,7 | angeben | °C |
| T90–T10 | 41,1 | 50,5 | 50,3 | 50,0 | min. 40 | °C |
| Siedeendpunkt | 251,3 | 253,8 | 253,5 | 252,2 | max. 300 | °C |
| Rückstand | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | max. 1,5 | %v/v |
| Verlust | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | max. 1,5 | %v/v |
| Flammpunkt | X | 48,5 | 49,0 | 48,5 | min. 38 | °C |
| Dichte bei 15 °C | 802,1 | 802,4 | 802,2 | 802,2 | 775–840 | kg / m ³ |
| Gefrierpunkt | X | -84,2 | -84,2 | -84,3 | max. -47 | °C |
| Schmierfähigkeit (WSD) | X | 0,673 | 0,611 | 0,602 | max. 0,85 | mm |
| Viskosität [-20 °C] | 4,542 | 4,448 | 4,452 | 4,442 | max. 8 | mm ² / s |
| Viskosität [-40 °C] | 9,176 | 8,914 | 8,940 | 8,885 | max. 12 | mm ² / s |
| Abdampfrückstand | 1,1 | <1 | <1 | <1 | max. 7 | mg/100 ml |
| therm. Stabilität | | | | | | |
| Farbe, Ablagerung | X | 1 | 1 | 1 | <3 | Note |
| Druckabfall | X | 0 | 0 | 0 | max. 25 | mmHg |
| Heizwert | 43,337 | 43,330 | 43,331 | 43,328 | min. 42,8 | MJ / kg |
| Kupferkorrosion | X | 1a | 1a | 1a | max. 1 | Note |
| Rußpunkt | X | X | 24,4 | 24,5 | min. 25,0 ^a | mm |
| Naphthalin Gehalt | 0,197 | | | | max. 3,0 | %v/v |
| Gesamtschwefel | 0,0019 | X | 0,0019 | 0,0018 | max. 0,30 | %m/m |

^a Mindestens 25,0 mm oder min. 18,0 mm bei Naphthalin Gehalt < 3,0 %v/v.

Tab. 8: Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 4
Der Aromaten- und Naphthalinengehalt der Mischung wurde lediglich rechnerisch ermittelt und einmalig angegeben (grau hinterlegt).

| Eigenschaft | berechnet | Labor | Technikum | | Forderung gem. ASTM D 7566 | |
|--------------------------|-----------|--------|-----------------|------------------|----------------------------|--------------------|
| | Wert | Wert | vor Auslagerung | nach Auslagerung | Wert | Einheit |
| Säurezahl | 0,002 | X | 0,002 | 0,002 | max. 0,10 | mg KOH/g |
| Aromatengehalt | 9,9 | | | | 8–25 | %v/v |
| Siedeverlauf | | | | | | |
| Siedebeginn | 158,3 | 158,7 | 159,0 | 159,1 | angeben | °C |
| 10%v/v | 175,2 | 174,7 | 174,2 | 174,7 | max. 205 | °C |
| 50%v/v | 198,9 | 198,8 | 198,8 | 199,0 | angeben | °C |
| T50–T10 | 23,6 | 24,1 | 24,6 | 24,3 | min. 15 | °C |
| 90%v/v | 229,1 | 232,4 | 232,2 | 232,6 | angeben | °C |
| T90–T10 | 53,9 | 57,7 | 58,0 | 57,9 | min. 40 | °C |
| Siedeendpunkt | 251,3 | 252,6 | 251,2 | 253,0 | max. 300 | °C |
| Rückstand | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | max. 1,5 | %v/v |
| Verlust | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | max. 1,5 | %v/v |
| Flammpunkt | X | 46,0 | 45,5 | 45,5 | min. 38 | °C |
| Dichte bei 15 °C | 789,1 | 789,5 | 789,0 | 789,0 | 775–840 | kg/m ³ |
| Gefrierpunkt | X | -57,2 | -57,0 | -57,0 | max. -47 | °C |
| Schmierfähigkeit (WSD) | X | 0,698 | 0,655 | 0,665 | max. 0,85 | mm |
| Viskosität [-20 °C] | 4,178 | 4,123 | 4,198 | 4,112 | max. 8 | mm ² /s |
| Viskosität [-40 °C] | 8,287 | 8,139 | 8,142 | 8,149 | max. 12 | mm ² /s |
| Abdampfdruckstand | 1,4 | <1 | 1,2 | <1 | max. 7 | mg/100 ml |
| therm. Stabilität | | | | | | |
| Farbe, Ablagerung | X | <1 | 1 | 1 | <3 | Note |
| Druckabfall | X | 0 | 0 | 0 | max. 25 | mmHg |
| Heizwert | 43,545 | 43,521 | 43,525 | 43,527 | min. 42,8 | MJ/kg |
| Kupferkorrosion | X | 1a | 1a | 1a | max. 1 | Note |
| Rußpunkt | X | X | 28,7 | 28,3 | min. 25,0 ^a | mm |
| Naphthalinengehalt | 0,150 | | | | max. 3,0 | %v/v |
| Gesamtschwefel | 0,0016 | X | 0,0016 | 0,0016 | max. 0,30 | %m/m |

^a Mindestens 25,0 mm oder min. 18,0 mm bei Naphthalinengehalt < 3,0 %v/v.

Bei den periodisch entnommenen Proben aus unterschiedlichen Füllhöhen des Kraftstoffs sind die Dichten der Kraftstoffmischungen ebenfalls unverändert (Tab. 9). Auch bei den ermittelten Siedeverläufen sind keine relevanten Unterschiede erkennbar. Eine Entmischung der Multiblends kann somit erwartungsgemäß ausgeschlossen werden.

Tab. 9 Dichten von Proben der Multiblends Nr. 1–4 (in kg/m³)
Entnommen aus unterschiedlichen Füllhöhen über den zeitlichen Verlauf der Lagerperiode.

| Monat/Jahr der Probennahme | 04/18 | | 05/18 | | 06/18 | | 07/18 | | 08/18 | | 09/18 | | 10/18 | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | Mitte | Mitte | Oben | Mitte | Unten | Mitte | Mitte | Mitte | Oben | Mitte | Unten | Mitte | Unten | |
| Nr. 1 | 797,9 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | 798,0 | |
| Nr. 2 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | 797,9 | |
| Nr. 3 | 802,2 | 802,2 | 802,2 | —* | 802,2 | 802,2 | 802,3 | 802,3 | 802,2 | —* | 802,2 | —* | 802,2 | |
| Nr. 4 | 789,0 | 789,0 | 789,0 | —* | 789,0 | 788,9 | 789,0 | 789,0 | 789,0 | —* | 789,0 | —* | 789,1 | |

* Nicht bestimmt.

5.2 Klimakammeruntersuchungen

Ziel der Klimakammeruntersuchungen war es, den Nachweis zu erbringen, dass wechselnde klimatische Bedingungen keinen Einfluss auf die Eigenschaften und somit die Kraftstoffqualität von teilsynthetischen Kraftstoffmischungen haben. In diesem Kontext sollte eine weitere Sorte HEFA, nämlich sog. High-Freezing-Point (HFP)-HEFA (Kapitel 4.2) in die Untersuchung mit einbezogen werden. Hierzu wurden der quaternäre Multiblend Nr. 1 und eine binäre Mischung aus JET A-1 mit einem möglichst hohen Anteil an HFP-HEFA in einer Klimakammer ausgelagert. HFP-HEFA durchläuft bei der Raffination einen milderen Hydroisomerisierungsschritt als HEFA; in der Folge besitzt HFP-HEFA im Vergleich zu HEFA bzw. Kerosin höhersiedende Paraffine. HFP-HEFA ähnelt eher Dieselkraftstoff als Kerosin und zeigt schlechtere Tieftemperatureigenschaften, z. B. durch Bildung von Ausfällungen bei tiefen Temperaturen.

Für die Klimakammeruntersuchungen musste für die binäre HFP-HEFA/JET-A-1-Mischung zunächst der maximal mögliche Mischungsanteil ermittelt werden, der insbesondere die Forderungen der ASTM D7566 für den Gefrierpunkt und die Viskositäten bei -20°C und -40°C einhält. Wie Abb. 3 zu entnehmen ist, erfüllen Mischungen mit bis zu 20%v/v HFP-HEFA diese gestellten Anforderungen. Die Werte der Viskositäten und des Gefrierpunkts liegen unterhalb der Spezifikationsobergrenze (Abb. 3, Grenzwerte sind als rote Linien dargestellt). Die Anforderung an die Dichte wird für alle Mischungsverhältnisse erfüllt (Abb. 3, der minimale und maximale Grenzwert sind als rote Linien dargestellt). Alle ermittelten chemisch-physikalischen Kennwerte der 20%v/v Mischung sind in Tab. 10 zusammengefasst.

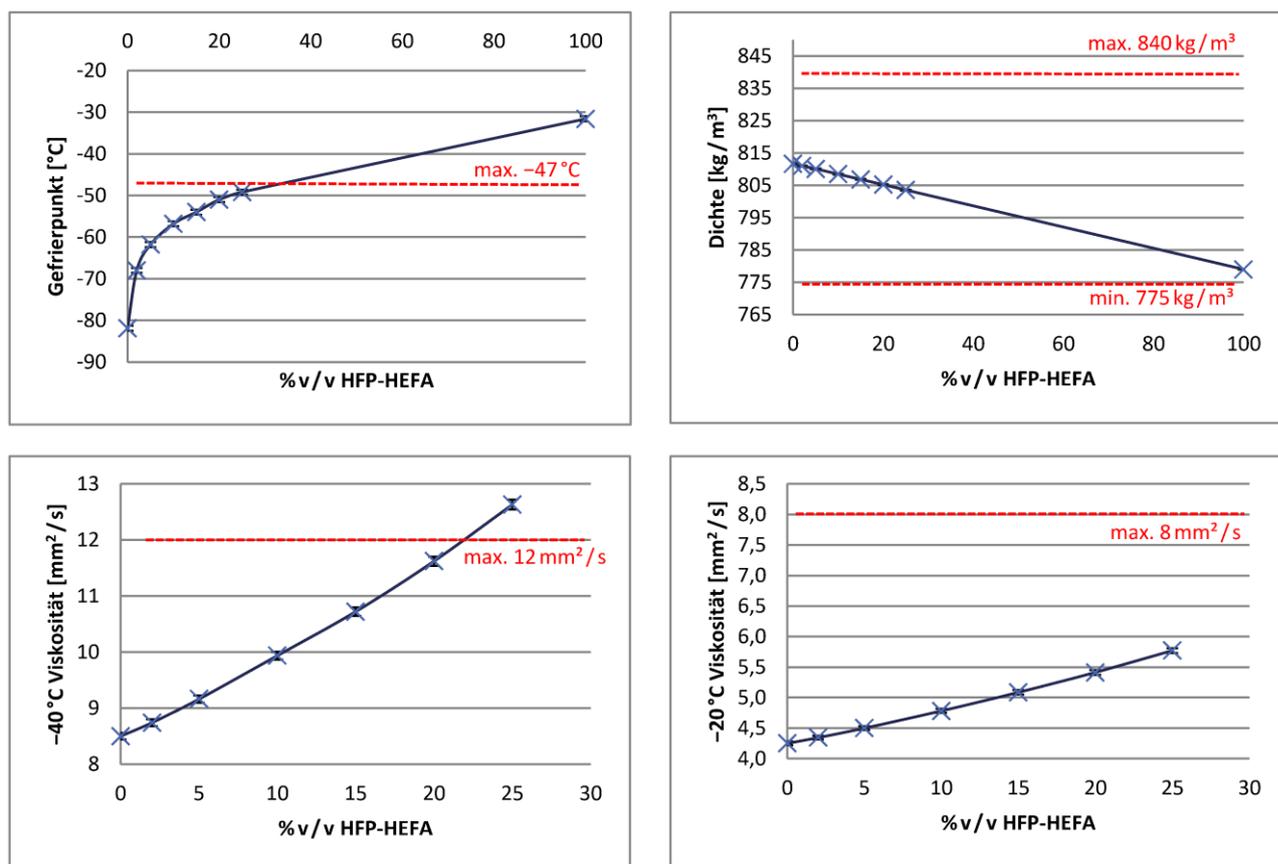


Abb. 3 Gefrierpunkte, Dichten und Viskositäten binärer HFP-HEFA/JET A-1-Mischungen

In der Klimakammer wurden der quaternäre Multiblend (Nr. 1) und eine Mischung aus 20%v/v HFP-HEFA und 80%v/v JET A-1 jeweils zehn Zyklen von je 12 Stunden bei -47°C und anschließend 12 Stunden bei 47°C im Wechsel ausgesetzt. Anschließend wurden die chemisch-physikalischen Kennwerte bestimmt und mit den

Kennwerten vor Auslagerung verglichen, um den Einfluss der wechselnden klimatischen Bedingungen auf die Kraftstoffqualität zu untersuchen. Zusätzlich wurden nach Ende der Auslagerung die Dichten auf unterschiedlichen Füllhöhen bestimmt, um eine Entmischung auszuschließen.

Ein Vergleich der chemisch-physikalischen Kennwerte der Kraftstoffmischungen vor und nach den Klimakammerversuchen (Tab. 10) zeigt, dass diese im Rahmen der Messgenauigkeit keine Veränderungen aufweisen. Folglich haben wechselnde klimatische Bedingungen keinen Einfluss auf die Kraftstoffeigenschaften; die Kraftstoffqualität wird nicht negativ beeinflusst. Die Bestimmung der Dichte auf unterschiedlichen Füllhöhen zeigt ebenfalls keine Veränderungen, das Auskristallisieren von langkettigen Paraffinen bzw. eine Entmischung durch wechselnde Temperaturen wurde nicht beobachtet.

Tab. 10 Chemisch-physikalische Eigenschaften des Multiblends Nr. 1 und einer 20%v/v HFP-HEFA-Mischung vor und nach den Klimakammerversuchen
Der Aromaten- und Naphthalinengehalt wurde rechnerisch ermittelt und jeweils einmalig angegeben (grau hinterlegt).

| Eigenschaft | Multiblend Nr. 1 vor Klimakammer | Multiblend Nr. 1 nach Klimakammer | 20%v/v HFP- HEFA/ 80%v/v JET A-1 vor Klimakammer | 20%v/v HFP- HEFA/ 80%v/v JET A-1 nach Klimakammer | Forderung gemäß ASTM D 7566 | |
|--------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| | Wert | Wert | Wert | Wert | Wert | Einheit |
| Säurezahl | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | max. 0,10 | mg KOH/g |
| Aromatengehalt | 12,0 | | 12,8 | | 8–25 | %v/v |
| Siedeverlauf | | | | | | |
| Siedebeginn | 161,3 | 159,7 | 159,7 | 161,9 | angeben | °C |
| 10%v/v | 178,1 | 177,3 | 183,7 | 183,6 | max. 205 | °C |
| 50%v/v | 202,3 | 202,5 | 211,1 | 211,1 | angeben | °C |
| T50–T10 | 24,2 | 25,2 | 27,4 | 27,5 | min. 15 | °C |
| 90%v/v | 233,0 | 233,4 | 274,0 | 273,4 | angeben | °C |
| T90–T10 | 54,9 | 56,1 | 90,3 | 89,8 | min. 40 | °C |
| Siedeendpunkt | 248,6 | 252,0 | 289,4 | 289,3 | max. 300 | °C |
| Rückstand | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | max. 1,5 | % |
| Verlust | 1,1 | 1,0 | 1,2 | 1,1 | max. 1,5 | % |
| Flammpunkt | 48,0 | 48,0 | 49,5 | 50,5 | min. 38 | °C |
| Dichte bei 15 °C | 797,9 | 798,0 | 805,2 | 805,2 | 775–840 | kg/m ³ |
| Gefrierpunkt | –63,4 | –63,4 | –50,9 | –50,8 | max. –47 | °C |
| Schmierfähigkeit (WSD) | 0,618 | 0,653 | 0,634 | 0,660 | max. 0,85 | mm |
| Viskosität [–20 °C] | 4,365 | 4,352 | 5,436 | 5,428 | max. 8 | mm ² /s |
| Viskosität [–40 °C] | 8,753 | 8,806 | 11,68 | 11,67 | max. 12 | mm ² /s |
| Abdampfrückstand | < 1 | 1,2 | 2,8 | 3,7 | max. 7 | mg/100 ml |
| therm. Stabilität | | | | | | |
| Farbe, Ablagerung | 1 | 1 | 1 | 1 | <3 | Note |
| Druckabfall | 0 | 0 | 0 | 0 | max. 25 | mmHg |
| Heizwert | 43,400 | 43,399 | 43,566 | 43,386 | min. 42,8 | MJ/kg |
| Kupferkorrosion | 1a | 1a | 1a | 1a | max. 1 | Note |
| Rußpunkt | 26,8 | 26,3 | 25,7 | 25,8 | min. 25,0 ^a | mm |
| Naphthalinengehalt | 0,182 | | 0,194 | | max. 3,0 | %v/v |
| Gesamtschwefel | 0,0018 | 0,0018 | 0,0017 | 0,0018 | max. 0,30 | %m/m |

^a Mindestens 25,0mm oder min. 18,0mm bei Naphthalinengehalt <3,0%v/v.

5.3 Fazit

Im Rahmen der Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich spezifikationsgerechte teilsynthetische Flugturbinenkraftstoffe gemäß ASTM D7566 aus mehreren unterschiedlichen synthetischen Kraftstoffen herstellen lassen. Eine Reihe chemisch-physikalischer Kennwerte von Multikomponentenmischungen lassen sich mit guter Präzision berechnen, sofern man die Kennwerte der reinen Mischungskomponenten und das Mischungsverhältnis kennt. Die im Labor bestimmten chemisch-physikalischen Kennwerte stimmen mit den berechneten gut überein. Über eine Lagerperiode von 6 Monaten findet keine Entmischung oder Veränderung der Eigenschaften statt; die Qualität der teilsynthetischen Kraftstoffmischungen wurde durch die halbjährige Lagerung nicht gemindert.

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass sich mit HFP-HEFA eine spezifikationsgerechte Mischung mit bis zu 20%v/v HFP-HEFA herstellen lässt. Untersuchungen des quaternären Multiblends Nr. 1 und einer binären Mischung aus 20%v/v HFP-HEFA und JET A-1 zeigten, dass wechselnde klimatische Bedingungen keinen Einfluss auf die Kraftstoffeigenschaften ausübten.



6 Demonstration der Produktion, Bereitstellung und Nutzung von Multiblend-JET-A-1 an einem Flughafen

Im Rahmen von DEMO-SPK sollte ein Multiblend-JET-A-1 hergestellt und dessen Einsatz in einer realen Flughafeninfrastruktur demonstriert werden. Aufgrund bestehender Regularien durfte die Herstellung dieses Multiblends nicht direkt am Flughafen stattfinden. Darüber hinaus musste Einigkeit über die Multiblend-Zusammensetzung sowie eine regularienkonforme Vorgehensweise beim Blending und Transport zum Bestimmungsort erzielt werden. Im Folgenden werden die Bereitstellung aller Mischkomponenten und die Herstellung des Multiblend-JET-A-1 (Kapitel 6.1) sowie die Logistik zur Verwendung des Multiblend-JET-A-1 am Flughafen Leipzig/Halle (LEJ) (Kapitel 6.2) thematisiert. Zudem wird eine Zusammenfassung aller notwendigen behördlichen Genehmigungen und transportrechtlichen Dokumente (Kapitel 6.3) gegeben sowie ein Fazit mit Bezug auf die Demonstration der Produktion, Bereitstellung und Nutzung von Multiblend-JET-A-1 an einem Flughafen (Kapitel 6.4) gegeben.

6.1 Bereitstellung der Komponenten und Herstellung vom Multiblend-JET-A-1

In Abb. 4 ist schematisch die durchgeführte Bereitstellungskette dargestellt. Hierbei sind für die unterschiedlichen Kerosine verschiedene Transportwege und -arten gewählt worden. Dies ist insbesondere dem Umstand geschuldet, dass die eingesetzten Kerosine an unterschiedlichen Orten hergestellt wurden (Kapitel 6.1.1). Das fossile Kerosin wurde mittels Kesselwagen über den Schienenweg (Kapitel 6.1.5) zum Mischstandort transportiert. Die erneuerbaren Kerosine wurden in ISO-Tankcontainern (Kapitel 6.1.2) über den Seeweg zum Hamburger Hafen und weiter (teils über einen Containerterminal) zum Mischstandort (Kapitel 6.1.3) geliefert. Der Ablauf der Mischung ist dem Kapitel 6.1.4 zu entnehmen. Nach dem Mischen wurde das Multiblend-JET-A-1 wiederum in Kesselwagen verladen und über den Schienenweg zum Flughafen LEJ gebracht.

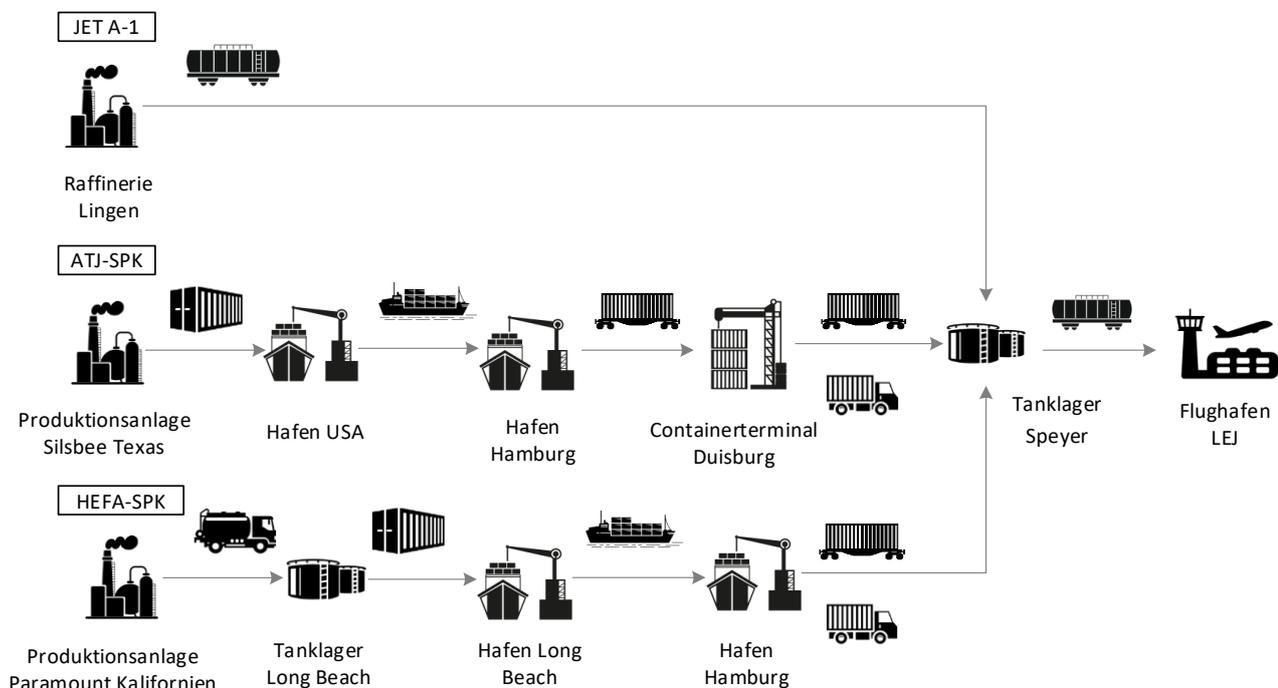


Abb. 4 Vereinfachte schematische Darstellung der durchgeführten Bereitstellungskette für die Bereitstellung des Multiblend-JET-A-1 an den Flughafen LEJ

6.1.1 Kraftstoffproduktion

Die für die Demonstration eingesetzten erneuerbaren Kerosine HEFA-SPK und ATJ-SPK sind in Kapitel 4.1 und 4.3 beschrieben. Mit der Festlegung auf die Demonstration des Multiblend-JET-A-1 am Flughafen LEJ bei DHL/EAT und den vergleichenden Emissionsmessungen mit und ohne erneuerbaren Kerosinfraktionen ergab sich die Notwendigkeit, zum Mischen das gleiche fossile JET A-1 einzusetzen wie es auch am Flughafen LEJ durch DHL genutzt wird. Dieses musste schließlich auch für die Referenzmessungen hergenommen werden, andernfalls wären die Ergebnisse des Vergleichs der Emissionen durch die Unterschiede der fossilen Kerosine verzerrt worden.

Lieferant der DHL war im Projektzeitraum die BP Europa SE. Durch die Festlegung der Belieferung für die Voruntersuchungen und die Demonstration aus einer Raffinerie (hier: Raffinerie Lingen) konnte eine nahezu gleichbleibende und vergleichbare Kraftstoffqualität sichergestellt werden. Die überdies getroffenen logistischen Voraussetzungen sind Kapitel 6.2.2 zu entnehmen.

6.1.2 Containerlogistik

Mit Bezug auf die Gesamtmenge des produzierten Multiblend-JET-A-1 nahmen die synthetischen Komponenten einen vergleichsweise kleinen Anteil ein. Ein sinnvolles Gebinde für die Bereitstellung dieser Mengen am Ort des Mischvorganges stellten Tankcontainer dar. Hier wurde eine flexiblere Handhabung im Vergleich zu Kesselwagen und Schiff tanks erwartet. Zur Erleichterung des Schienen- und Straßentransports wurde ein besonderes Augenmerk auf die Kompatibilität der Tankcontainer mit europäischen Standards gelegt (Maße, Kupplungen, Beladungsparameter).

Das erworbene ATJ-SPK konnte direkt in zwei ISO-Tankcontainern am Hamburger Hafen bereitgestellt werden. Der Kraftstoff traf Anfang Juli 2018 in Deutschland ein und wurde in einem Zolllager zwischengelagert. Mit Beginn des Mischvorganges wurden die Container in den freien Verkehr überführt und unter Energie-steueraussetzung (Kapitel 6.3.4) zum Tanklager gebracht.

Das HEFA-SPK konnte aufgrund fehlender Infrastruktur nicht direkt ab Raffinerie in Tankcontainern bereitgestellt werden. Daher wurde die bestellte Menge zunächst in Tankkraftwagen (TKW) abgefüllt. Diese wurden zu einem raffinerienahen Tanklager gefahren, um die Umfüllung von den TKW in Tankcontainer zu realisieren. Insgesamt 11 Tankcontainer wurden zum Hafen Long Beach gebracht und dort auf ein Containerschiff in Richtung Hamburger Hafen verladen. Die Tankcontainer wurden im Hafen direkt in den freien Verkehr überführt und zum Tanklager gebracht.

6.1.3 Mischstandort

Die Anforderungen an den Mischstandort ergaben sich aus den unterschiedlichen extern gegebenen Randbedingungen:

- a. Eine Herstellung der Kerosinblends an einem Raffineriestandort ist grundsätzlich das einfachste und sicherste Vorgehen, insbesondere wenn die Raffinerie sowohl fossiles als auch erneuerbares Kerosin herstellt. Im konkreten Fall war jedoch zu beachten, dass aufgrund der im Rahmen von DEMO-SPK stattfindenden Emissionsmessungen die Notwendigkeit bestand, das fossile Kerosin der Raffinerie Lingen zu verwenden (Kapitel 6.2).
- b. Die Kerosinversorgung des Flughafens LEJ erfolgt ausschließlich über den Schienenweg, weshalb eine Schienenverladung des Multiblend-JET-A-1 vorzunehmen war.
- c. Um Kontaminationen mit anderen Kraftstoffen zu vermeiden, mussten dedizierte JET-A-1-Leitungen und Erfahrungen im Handling mit JET A-1 am Mischstandort nachgewiesen werden.

- d. Da die ASTM D7566 nur das sukzessive Mischen der einzelnen synthetischen Kerosine zulässt, musste die Möglichkeit bestehen, das Material zwischen den Mischvorgängen in einem Tank zu lagern. Überdies musste zur Gewährleistung einer hinreichenden Durchmischung eine Mischvorrichtung im Tank vorhanden sein.

Kerosintanks mit einer Mischvorrichtung existieren regulär nicht und für die Zwecke von DEMO-SPK kam aufgrund des Risikos einer Kontamination mit FAME die Nutzung von Diesel-Blending-Tanks nicht in Frage. Es wurde sowohl der Bau eines neuen Misch tanks als auch die Nutzung eines Binnenschiffes in Erwägung gezogen, im Rahmen der Markterkundung optional analysiert und abschließend aufgrund des zeitlichen und v. a. des erheblichen finanziellen Aufwandes verworfen. Gesucht wurde schließlich ein geeignetes Tanklager, bei dem die Einlagerung aus Containern, die Ein- und Auslagerung aus und in Eisenbahn-Kesselwagen sowie die Lagerung und Durchmischung eines Multiblend-JET-A-1 möglich war. Diese Kriterien wurden durch das Tanklager der TanQuid GmbH & Co KG in Speyer erfüllt. Hierfür wurde die Infrastruktur des Tanklagers der Mischaufgabe angepasst und eine Mischvorrichtung in einem zuvor mehrfach gespülten Kugeltank installiert.

6.1.4 Ablauf der Mischung

Eine große Herausforderung bestand darin, dass die geltenden Spezifikationen zu Gemischen mit synthetischem Kerosin auf den Fall der Erzeugung binärer Gemische abzielen. Die Erzeugung von Multiblends mehrerer synthetischer Kerosine mit fossilem Kerosin wird nicht explizit geregelt. In den Regelungen wird nur berücksichtigt, dass nach der Herstellung eines binären Gemisches mit der Möglichkeit gerechnet werden muss, dass anschließend eine zweite Vermischung erfolgt. Dieser Fall ist explizit zugelassen.⁴ In diesem Falle erfolgt die Mischung mit den verschiedenen alternativen Kerosinen aber sukzessive; eine simultane Mischung mit mehreren alternativen Kerosinen wird hingegen nicht geregelt.

Um sich definitiv im Rahmen der geltenden Vorschriften zu bewegen, wurden bei der Erstellung des Multiblend-JET-A-1 für den Flughafen LEJ die synthetischen Kerosine nacheinander dem fossilen Kerosin beige mischt und nach jedem Mischvorgang eine Probe genommen. Der hiermit verbundene höhere Aufwand wurde in Kauf genommen, um die Einhaltung der Spezifikation auch formal sicherzustellen.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden für jedes synthetische Kerosin zunächst binäre Gemische erzeugt und der maximal vertretbare Anteil an erneuerbarem Kerosin für das binäre Gemisch ermittelt. Anschließend wurde festgesetzt, mit welchen Anteilen diese binären Gemische in die Multiblends mit zwei und drei synthetischen Komponenten eingehen sollten (Kapitel 5.1). Dies ergab dann auch den Zielanteil für das Multiblend-JET-A-1, auf dessen Basis die Mengen der einzelnen synthetischen Kerosine für die Hauptuntersuchung festgelegt und bestellt wurden. Positive Wechselwirkungen zwischen den einzelnen synthetischen Kerosinen wurden nicht berücksichtigt. Dadurch ergab sich ein niedrigerer erneuerbarer Kerosinanteil im Multiblend-JET-A-1 als er theoretisch möglich gewesen wäre.

Die ursprünglich für die Hauptuntersuchung bestellten Mengen betragen: (i) 11 Container HEFA-SPK, (ii) 3 Container SIP und (iii) 2 Container ATJ-SPK.

Diese synthetischen Kraftstoffe sollten ursprünglich mit einer Menge von 1.130 m³ fossilem Kerosin vermischt werden, was zu einer Gesamtmenge an Multiblend-JET-A-1 von etwa 1.500 m³ geführt hätte.

Die Nichtverfügbarkeit von SIP reduzierte die synthetischen Kraftstoffe auf 11 Container HEFA-SPK und zwei Container ATJ-SPK. Diese Menge wurde nicht angepasst und hätte sich zu diesem Zeitpunkt auch nicht mehr anpassen lassen, da die logistischen Vorbereitungen bereits abgeschlossen waren und im Fall von ATJ-SPK die

⁴ ASTM D7566, Abschnitt 1.2.1; DEF STAN 91-091 Ausgabe Nr. 10 vom September 2018, Annex B, Abschnitt B.1.3.

Ware bereits unterwegs nach Deutschland war. Die benötigte Menge an fossilem Kerosin wurde auf etwa die Hälfte nach unten angepasst. Diese Reduzierung fiel deshalb so stark aus, weil SIP maximal in einem Verhältnis von 1:9 mit Kerosin vermischt werden darf (d. h. maximaler Anteil 10 Vol.-%), und der Wegfall von 75 m³ SIP daher dazu führte, dass eine Menge von 675 m³ fossilem Kerosin nicht mehr benötigt wurde.

Die von World Energy und Gevo verwendeten Container wiesen jeweils ein Volumen von ca. 23 m³ auf. Insgesamt ergaben sich somit für die Demonstration folgende vermischte Mengen: (i) ca. 247 m³ HEFA-SPK, (ii) ca. 46 m³ ATJ-SPK und (iii) ca. 472,5 m³ fossiles Kerosin aus der Raffinerie Lingen⁵.

6.1.5 Schienenlogistik

Kraftstoffe für den Flugbetrieb können in das Tanklager des DHL Hub Leipzig nur über Kesselwagen (Schienenfahrzeuge) eingelagert werden. Bei den für den Transport von Kerosin eingesetzten Kesselwagen handelt es sich typischerweise um Spezialfahrzeuge die mit einer Innenbeschichtung versehen sind, um eine Kontamination des transportierten Produktes zu vermeiden. Überdies wird von einigen Raffinerien die Bedingung gestellt, dass mindestens eine JET-A-1-Vorladung vorzuweisen ist. Regulär werden solche Kesselwagen nicht kurzfristig zur Verfügung gestellt, sondern langfristig vermietet.

Im Rahmen des Projektes DEMO-SPK wurde eine Garnitur von 22 Kesselwagen über einige Monate angemietet. Hintergrund war der geplante Transport von insgesamt 1.500 m³ Multiblend-JET-A-1, der Rückhalt von etwa 160 m³ Spülkerosin (für die Leitungen des Tanklagers) sowie die Berücksichtigung eines Reservekesselwagens. Die spätere Anpassung der Multiblend-Zusammensetzung (Kapitel 6.1.4) führte zu einer Reduzierung der benötigten Kesselwagenanzahl auf 16 Stück.

6.2 Logistik zur Verwendung des Multiblend-JET-A-1 am Flughafen LEJ

Die Untersuchungen am Flughafen LEJ dienten den folgenden Zielen:

- a. Demonstration der Kompatibilität eines Multiblend-JET-A-1 mit der realen Versorgungsinfrastruktur eines Flughafens.
- b. Durchführung vergleichender Emissionsmessungen an einer Flugzeugturbine im Bodenlauf zur Eruerung des Einflusses des erneuerbaren Kerosins auf die lokalen Emissionen (Kapitel 7).

Diese zwei Zielstellungen des Projektes erforderten unterschiedlichste logistische Herangehensweisen bei der Bereitstellung des Multiblend-JET-A-1. Während ersteres Ziel bedingte, das Multiblend-JET-A-1 genauso zu behandeln wie fossiles Kerosin und somit zwangsläufig eine Vermischung mit anderen Kerosinchargen im Tanklager zuzulassen, bedurfte es zur Erfüllung des zweiten Zieles einer sortenreinen Trennung der Kraftstoffe.

6.2.1 Örtliche Gegebenheiten

Von der Entladevorrichtung des Flughafentanklagers führt eine Hauptleitung zu den Hochtanks, die mit der Betankungsanlage des DHL Hub verbunden ist. Über diese werden die am Flughafen eingesetzten Feldtankkraftwagen (FTKW) befüllt, eine direkte Überführung der Ware vom (Eisenbahn-)Kesselwagen auf die FTKW ist nicht möglich. Die Versorgung der Flugzeuge erfolgt auf dem Rollfeld über die FTKW.

Es ist möglich, die einzelnen Hochtanks des Tanklagers völlig zu entleeren, so dass im Tank selber keine Vermischung mit einem Vorprodukt stattfindet. Die zu den Hochtanks und der Betankungsanlage führenden

⁵ Dies ist die Menge an fossilem Kerosin die tatsächlich in das Gemisch einging. Nicht eingerechnet ist Kerosin, das als Spülkerosin oder als Sicherheitspuffer bezogen wurde.

Rohrleitungen können nicht mit vertretbarem Aufwand geleert werden, sondern sind stets mit dem Produkt der vorhergehenden Lieferung gefüllt.

6.2.2 Vorgehensweise

Damit der Rohrleitungsinhalt zwischen Entladestation und Tank mit Lingener Ware gefüllt war, erfolgte jeweils eine Vorladung fossilen Kerosins aus der Raffinerie Lingen vor der Einlagerung des Multiblend-JET-A-1 und des Referenzkerosins aus Lingen. So wurde vermieden, den Kraftstoff mit fremden Vorlieferungen mit nicht prognostizierbaren Eigenschaften zu vermischen. Der Effekt des Restkraftstoffes in den Rohrleitungen wurde dadurch auf eine unvermeidbare, jedoch minimale Reduzierung des erneuerbaren Kerosingehaltes des Multiblend-JET-A-1 beschränkt. Das Spülkerosin wurde in einen nicht projektrelevanten Hochtank eingebracht.

Das Multiblend-JET-A-1 sowie der fossile Referenzkraftstoff aus Lingen wurden zeitlich entkoppelt in zuvor entleerte und ausschließlich für diese Produkte separierte Hochtanks überführt. Aus diesen Tanks wurden jeweils ein zuvor entleerter und gespülter FTKW befüllt und für die Emissionsmessungen separiert. Diese Befüllungen wurden so terminiert, dass die anhand des Volumens der Rohrleitung und der Pumprate abgeschätzten Restbestände aus den Rohrleitungen zwischen Tanklager und FTKW-Betankungsstation bereits in andere Fahrzeuge befüllt worden waren.

Mit dem Inhalt der beiden FTKW wurden die vergleichenden Emissionsmessungen durchgeführt. Auf diese Art und Weise wurden beide o. g. Projektziele erreicht. Die restlichen Mengen des Multiblend-JET-A-1 und des Referenzkerosins aus Lingen wurden entsprechend den Routineverfahren an Flugzeuge der DHL vertankt und ausgeflogen.

6.2.3 Emissionsmessungen

Für die Emissionsmessungen auf dem Gelände des Flughafen LEJ wurde von der EAT ein Luftfahrzeug (Airbus A300/600) sowie der Triebwerksprobelaufstand bereitgestellt. Das Flugzeug wurde bei Ankunft enttankt und mit der Lingener Ware aus dem vorgehaltenen FTKW befüllt. Die Betankung konnte aus Sicherheitsgründen weder in noch vor dem Triebwerksprobelaufstand durchgeführt werden, weshalb die Probenahme erst aus dem Flugzeugtank stattfinden konnte. Hierfür wurde aus dem Flügeltank eine kleine Menge an Treibstoff in einen Blechkanister gefüllt, dieser dreimalig gespült und im Anschluss eine Kraftstoffprobe von etwa 10 L abgefüllt. Diese Probe lässt zusammen mit der aus dem Hochtank genommenen Probe eine Aussage über den Ausgangszustand für die Emissionsmessungen zu. Nach erfolgter Emissionsmessung für die Lingener Ware wurde das Luftfahrzeug aus dem Triebwerksprobelaufstand auf eine Parkposition geschoben, dort via FTKW enttankt und mittels des Multiblend-FTWK wieder betankt. Zurück im Triebwerksprobelaufstand wurde der Flügeltank erneut beprobt und die Emissionsmessungen durchgeführt (Kapitel 7).

Ziel bei den logistischen Operationen am Flughafen Leipzig / Halle war es, zum einen ein Referenzkerosin bereitzustellen, das dem zum Mischen verwendeten fossilen Kerosin möglichst ähnlich war, und zum anderen das Multiblend möglichst unverändert bereitzustellen und lediglich eine begrenzte Verdünnung des Biokerosingehaltes durch ein dem zum Mischen eingesetzten fossilen Kerosin möglichst ähnliches Kerosin zuzulassen. Wie Tab. 11 zeigt, ist dies geglückt.

Tab. 11 stellt das Referenzkerosin dem zum Mischen verwendeten Kerosin gegenüber. Die Eigenschaften der beiden Kerosine sind im Rahmen der normalen Messungenauigkeiten weitgehend identisch, bis auf Wassergehalt und MSEP rating, wo sich vermutlich bemerkbar gemacht hat, dass die Probe aus dem Flugzeugtank gezogen wurde. (Flugzeugtanks haben Öffnungen für den Druckausgleich und sind daher nicht vollständig

gegen die Außenluft abgeschottet. Die Anwesenheit von Kleinstmengen von Wasser in Flugzeugtanks ist daher normal.)

Ebenso stellt Tab. 11 das Multiblend im Flugzeugtank dem ursprünglichen Multiblend, dem zur Herstellung des Multiblends verwendeten fossilen Kerosin sowie dem Referenzkerosin gegenüber. Die Eigenschaften des aus dem Flugzeugtank gezogenen Multiblends entsprechen weitestgehend denen des ursprünglichen Multiblends und die Abweichungen sind überwiegend in Richtung der Eigenschaften der fossilen Kerosine. Bei Wassergehalt und MSEP rating gilt auch in diesem Falle, dass sich hier vermutlich die Bedingungen innerhalb des Flugzeugtanks bemerkbar gemacht haben.

Tab. 11 Eigenschaften Multiblend-JET-A-1 und Referenzkerosin JET A-1 aus Lingen

| Eigenschaft | Einheit | Multiblend- JET-A-1 aus Flugzeugtank | Multiblend- JET-A-1 ursprünglich | Referenzkerosin JET A-1 aus Flugzeugtank | in Multiblend enthaltenes fossiles JET A-1 |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Farbe (Saybolt) | | +30 | +30 | +30 | +30 |
| Säurezahl | mg KOH/g | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Aromatengehalt | Vol.-% | 9,9% | 9,5% | 15,5% | 14,6% |
| Olefine | Vol.-% | <0,5 | <0,5 | <0,5 | <0,5 |
| Gesamtschwefel | m-% | 0,0099 | 0,0028 | 0,0027 | 0,0029 |
| Schwefel, Mercaptan | m-% | <0,0003 | <0,0003 | <0,0003 | <0,0003 |
| Siedebeginn | °C | 152,3 | 150,3 | 152,1 | 150,2 |
| 10% VA | °C | 168,6 | 168,3 | 170,7 | 170,5 |
| 50% VA | °C | 192,2 | 191,9 | 193,7 | 193,2 |
| 90% VA | °C | 231,4 | 231,1 | 225,9 | 225,1 |
| Siedeendpunkt | °C | 256 | 254,6 | 257,8 | 253,4 |
| Rückstand | % (v/v) | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 1,1 |
| Verlust | % (v/v) | 0,8 | 0,5 | 0,7 | 0,6 |
| Flammpunkt | °C | 42 | 42,5 | 42 | 42,5 |
| Dichte bei 15 °C | kg/m ³ | 787,2 | 788,2 | 808,8 | 808,6 |
| Gefrierpunkt | °C | -58,2 | -57,9 | -72,6 | -78,3 |
| Viskosität [-20 °C] | cSt | 3,753 | 3,712 | 3,872 | 3,779 |
| Heizwert | MJ/kg | 43,527 | 43,521 | 43,187 | 43,202 |
| Rußpunkt | mm | 30 | 30 | 24 | 24 |
| Naphthalingehalt | Vol.-% | | | 0,28 | 0,3 |
| Wasserstoffgehalt | m-% | 14,3 | 14,29 | 13,72 | 13,75 |
| Kupferkorrosion | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Druckabfall | mmHg | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Ablagerungen | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Abdampfdruckstand | mg/100 ml | <1 | <1 | <1 | 2 |
| Wassergehalt | mg/kg | 50 | 25 | 50 | 5 |
| Schnittstellenbewertung | | 1b | 1b | 1b | 1b |
| Wasserabscheide- vermögen (MSEP) | | 95 | 98 | 86 | 98 |
| FAME-Kontrolle | mg/kg | <5 | <5 | <5 | <5 |
| Schmierfähigkeit (BOCLE) | mm | 0,68 | 0,66 | 0,68 | 0,67 |
| Viskosität [-40 °C] | cSt | 7,099 | 7,109 | 7,302 | 7,249 |

6.3 Behördliche Genehmigungen und transportrechtliche Dokumente

Im Folgenden werden die bei der Bereitstellung von Multiblend-JET-A-1 verschiedener Zusammensetzungen relevanten behördlichen Genehmigung und transportrechtlichen Dokumente aufgeführt und die Anwendung in DEMO-SPK unter Zuhilfenahme der gesetzlichen Bestimmungen erläutert.

6.3.1 REACH-Registrierung bzw. PPORD

Gemäß der EU-Chemikalienverordnung (EG) Nr. 1907/2006 (engl.: Regulation Concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, REACH) besteht für alle Chemikalien, die in der europäischen Gemeinschaft in Umlauf gebracht werden, die Verpflichtung zu einer Registrierung, sofern die innerhalb eines Jahres in Verkehr gebrachte Menge der Substanz eine Tonne übersteigt. Verpflichteter ist der Inverkehrbringer, d. h. bei Produktion innerhalb der EU typischerweise der Produzent und beim Import der Importeur. Die Anforderungen an die für eine Registrierung bereitzustellenden Unterlagen erhöhen sich in Abhängigkeit von der in Verkehr gebrachten Menge (bis zu 10 t, bis zu 100 t, bis zu 1.000 t, größer 1.000 t).

Grundsätzlich ist jeder Produzent verpflichtet, sein Produkt selbst zu registrieren. Für chemisch wesensgleiche Substanzen besteht aber die Möglichkeit einer sogenannten Co-Registrierung, bei der mehrere Produzenten eine gemeinsame Registrierung einreichen und sich die Kosten teilen. Von dieser Möglichkeit wird beim fossilen Kerosin Gebrauch gemacht; es existiert eine einzelne einheitliche Registrierung, an der sich sämtliche europäischen Raffinerien und Kerosinimporteure beteiligen. Die Kosten für die Registrierung verteilen sich daher auf die gesamte Menge des in Europa verteilten Kerosins (jährlich rund 50 Mio. t) und liegen deshalb umgerechnet auf die Tonne Kerosin im Eurocent-Bereich. Die dieser Co-Registrierung zugrundeliegende Produktdefinition beschränkt das Produkt ausdrücklich auf Kerosin, das aus fossilem Rohöl hergestellt wurde. Erneuerbares bzw. synthetisches Kerosin ist daher separat zu registrieren. Eine derartige Registrierung wurde zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur von Neste für HEFA-Kerosin sowie von Total für SIP vorgenommen.

Im Rahmen des Projektes DEMO-SPK wurden für die erneuerbaren Kerosine PPORD-Anmeldungen (produkt- und verfahrensorientierte Forschung und Entwicklung) gem. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) eingereicht [Eur06]. Diese Möglichkeit besteht dann, wenn Substanzen für Forschungs- oder Entwicklungszwecke eingesetzt und nicht in den allgemeinen Verkehr gebracht werden. Im Rahmen von DEMO-SPK war diese Voraussetzung erfüllt, da die Einzelsubstanzen unter Kontrolle des DBFZ vermischt wurden und das resultierende Multiblend-JET-A-1 an einen einzelnen Projektpartner ausgeliefert wurde.

6.3.2 Erstellung der Sicherheitsdatenblätter

Kerosin ist aufgrund seiner Entzündlichkeit und der von ihm potenziell ausgehenden Umweltgefährdung als Gefahrstoff klassifiziert. Bei der Einordnung ist Anhang 1 der CLP-Verordnung maßgeblich: Vorschriften für die Einstufung und Kennzeichnung von gefährlichen Stoffen und Gemischen [Eur08b]. Wie für alle Gefahrstoffe, ist auch für Kerosin ein Sicherheitsdatenblatt zu erstellen. Dies gilt für fossiles Kerosin gleichermaßen wie für erneuerbares Kerosin. Die Anforderungen an ein Sicherheitsdatenblatt gehen aus Artikel 31 der EU-Chemikalienverordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH-Verordnung) hervor [Eur06]. Für den Transport des Produktes nach Deutschland ist es ausreichend, das Sicherheitsdatenblatt des Herstellers mitzuführen, auch wenn dieses Sicherheitsdatenblatt nicht in deutscher Sprache angefertigt wurde. Für die Einlagerung oder Weiterverarbeitung eines Produktes in Deutschland ist hingegen das Vorhandensein eines Sicherheitsdatenblattes in deutscher Sprache vorgeschrieben [Eur06]. Da die erneuerbaren Kerosine in Deutschland zwischen-

gelagert und zu einem Multiblend-JET-A-1 vermischt werden sollten, war daher die Erstellung eines Sicherheitsdatenblattes in deutscher Sprache und entsprechend den deutschen Vorschriften erforderlich. Auch für das resultierende Multiblend-JET-A-1 musste ein eigenes Sicherheitsdatenblatt erstellt werden.

Im Rahmen der Gefahreneinschätzung der Gemischeigenschaften sind zunächst die Daten des Gemisches selbst als Grundlage zu nehmen. Sind diese nicht vorhanden oder liegen Gründe gemäß der EG-Verordnung Nr. 1272/2008 (CLP) Punkt (22) vor, müssen die Daten der Einzelkomponenten zugrunde gelegt werden [Eur08b].

6.3.3 *Meldung von gefährlichen Gemischen*

Gefährliche Gemische sind entsprechend Artikel 45 der GHS-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008, auch bekannt als CLP-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging), vor dem ersten Inverkehrbringen an die zuständige nationale Kontaktstelle zu melden. Die CLP-Verordnung legt Eigenschaften von Stoffen und Gemischen fest, die eine Einordnung als „gefährlich“ notwendig machen. Dem folgt auch das Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz – ChemG) in § 3 Abs. 1 ChemG. Diese Gemische und deren relevante Produktinformationen (Zusammensetzung, Handelsnamen, Kennzeichnung und deren Verwendung) sind gemäß § 16e Abs. 1 ChemG dem Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) zu melden. Ziel ist es, bei einem Stör-, Not- oder Unfall geeignete Maßnahmen anweisen zu können. Die Informationen werden an alle nationalen Giftnformationszentren weitergeleitet.

Im Falle von DEMO-SPK wurde die Meldung mithilfe eines durch das BfR zur Verfügung gestellten Formblatts durchgeführt. Darüber hinaus wurde das Sicherheitsdatenblatt des Multiblend-JET-A-1 beigelegt. In den letzten Jahren wurde das System umgestellt und die Produkt-/ Gemischmeldung kann nun elektronisch erfolgen.⁶

6.3.4 *Zollrechtliche Erfassung*

Energieerzeugnisse unterliegen im Steuergebiet der Energiesteuer, vgl. § 1 Energiesteuergesetz (EnergieStG). Die Energiesteuer ist eine Verbrauchsteuer die vom Zoll verwaltet wird. Mit Einnahmen von rund 40 Milliarden Euro ist die Energiesteuer die bedeutendste Einnahmequelle der Verbrauchssteuern für den Bundeshaushalt [Zol19].

Die Bestimmung der Steuerhöhe ist von der Beschaffenheit und der Verwendung des Energieerzeugnisses abhängig. Kerosin fällt als Ware der Position 2710 (19 21) der Kombinierten Nomenklatur (KN) unter das Energiesteuergesetz. Dies betrifft das JET A-1. Hinsichtlich der erneuerbaren Kerosine ist die Nomenklatur nicht eindeutig. Letztlich wurde im Rahmen des Projektes die Zuordnung der Ware zur Position 2901 10 der KN vorgenommen, da dies den erneuerbaren Kerosinen am nächsten kommt. Für Waren der Position 2901 ist in § 2 EnergieStG keine Steuerhöhe angegeben. Gemäß dem Ähnlichkeitsprinzip nach § 2 Abs. 4 EnergieStG wird die Steuerhöhe zugrunde gelegt, die für Energieerzeugnisse gilt, denen die SPK nach ihrem Verwendungszweck und ihrer Beschaffenheit am nächsten kommen.

Flugturbinenkraftstoff der Unterposition 2710 19 21 der KN darf in Luftfahrzeugen für die Luftfahrt steuerfrei verwendet werden. Ein Erlaubnisscheinverfahren auf Grundlage des § 27 Abs. 2 EnergieStG kann jedoch nur von Unternehmen der Luftfahrt beantragt werden. Da überwiegend ein sofortiger Transport zwischen dem Ort der Einfuhr (für die erneuerbaren Kerosine: Hamburg Hafen) und einem Steuerlager sowie zwischen zwei Steuerlagern vorgenommen werden sollte, konnte gem. § 10 Abs. 1 Nr. 1 EnergieStG der Transport unter Steueraussetzung stattfinden.

⁶ Weitere Information dazu unter http://www.bfr.bund.de/de/meldung_von_rezepturen-9375.html.

Um unter Steueraussetzung transportieren zu dürfen, muss zunächst ein Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis als registrierter Versender für Energieerzeugnisse beim zuständigen Hauptzollamt (hier: Dresden) gestellt werden. Hierbei ist auch das jeweilige zu transportierende Energieerzeugnis anzugeben. Die formale Abwicklung erfolgt über das Beförderungs- und Kontrollsystem für verbrauchssteuerpflichtige Waren (engl.: Excise Movement and Control System, EMCS). EMCS ist ein EDV-gestütztes Verfahren, welches zwingend im Warenverkehr genutzt werden muss. Hierfür muss die im Rahmen des Antrags auf registrierten Versender zugeteilte Verbrauchsteuernummer beim Stammdatenmanagement der Generalzolldirektion erfasst sein. Dies erfolgt über den „Antrag auf Erfassung/Änderung der Steuernummer/Steuer-Identifikationsnummer für die Internet-EMCS-Anwendung (IEA)“. Wirtschaftsbeteiligte die nicht selbst die Software installieren möchten, können sich eines IT-Dienstleisters bedienen. Für diesen Vorgang ist ein „Antrag zur Nutzung eines IT-Dienstleisters im Rahmen des EMCS-Nachrichtenaustauschs“ bei der Generalzolldirektion zu stellen.

In den zollrechtlich freien Verkehr überlassene Waren dürfen nur unter Steueraussetzung in ein Steuerlager oder zum Begünstigten transportiert werden (§ 10 Abs. 3 EnergieStG). Daher fand das EMCS-Verfahren zunächst nur beim Transport des HEFA-SPK, des fossilen Kerosins und des Multiblend-JET-A-1 Anwendung. Da die ATJ-Container anders als vorgesehen bereits zeitlich weit vor der geplanten Herstellung des Multiblend-JET-A-1 in Deutschland eingetroffen waren und eine Aufnahme in das Steuerlager Speyer aus lagerrechtlichen Gründen nicht möglich war, erfolgte die Abwicklung bzw. der Import des ATJ-SPK über ein Zolllager in Duisburg. Hierbei handelt es sich um ein Lager, in welchem Waren unverzollt und unversteuert 90 Tage gelagert werden dürfen. Die Waren sind im Rahmen eines T1-Versandverfahrens zollseitig erfasst. Ein T1-Versandverfahren ist ein zollrechtliches Versandverfahren welches angewandt wird, wenn Waren innerhalb der EU transportiert werden sollen, ohne dass Verzollung und Versteuerung stattfindet. Mit einer T1-Anmeldung wird die Anwendung des Verfahrens über das ATLAS-System der Zollverwaltung beantragt. Im Zollamt Duisburg wurde die Ware nach einiger Zeit zollrechtlich in den freien Verkehr überlassen und die Einfuhrabgaben entrichtet. Im Anschluss erfolgte der Transport zum Mischstandort wiederum über ein EMCS-Verfahren.

6.3.5 Begleichung der EBV-Beiträge

Auf Grundlage des Gesetzes über die Bevorratung mit Erdöl und Erdölerzeugnissen (ErdölBevG) wurde im Jahr 1978 der Erdölbevorratungsverband (EBV) gegründet. Ziel dieses Verbandes ist die Sicherung der Energieversorgung in Deutschland (§ 1 ErdölBevG) über das Halten von Vorräten an Benzin, Dieselkraftstoff, Heizöl EL und Flugturbinenkraftstoff. Hierbei werden ein spezifischer Bevorratungszeitraum sowie eine Bevorratungsmenge mit Bezug auf den durchschnittlichen nationalen Bedarf in 90 Tagen definiert (§ 3 Abs. 1 ErdölBevG). Pflichtmitglieder des EBV im Sinne des ErdölBevG sind Einführer und Hersteller von Erdölerzeugnissen, sofern sie in der EU ansässig sind und als wirtschaftliche Unternehmung mindestens 25 Tonnen pro Kalenderjahr einführen oder herstellen (§ 13 Abs. 1 ErdölBevG). Auch das Mischen und Bearbeiten von Erdölerzeugnissen stellt einen Herstellungsprozess im Sinne des ErdölBevG dar (§ 13 Abs. 6 ErdölBevG). Mitglieder sind verpflichtet, entsprechend der verarbeiteten bzw. eingeführten Mengen EBV-Beiträge zu zahlen (§ 23 Abs. 1 und 2 ErdölBevG). Die Beitragssätze werden jährlich in der Verbandssatzung bekanntgegeben.

Eine Bevorratungs- und Beitragspflicht besteht prinzipiell nur für Erdölerzeugnisse. Biokraftstoffe werden in die zu haltende Vorratshöhe des EBV jedoch einberechnet, sofern sie im Blend mit mineralischen Erzeugnissen einen maximalen Anteil von 50 m-% nicht übersteigen. Sie werden in der tatsächlichen Vorratshöhe berücksichtigt, wenn sie spezifikationskonform mit Mineralölerzeugnissen gemischt wurden oder für eine entsprechende Beimischung bestimmt sind (§ 3 Abs. 5 und § 4 Abs. 3 ErdölBevG). Eine Beitragspflicht für Biokraftstoffe ergibt sich erst, wenn sie in Blends mit max. 50 m-% Anteil in mineralölstämmigen Erzeugnissen vorliegen. Hierbei handelt es sich um einen Herstellungsprozess, der die Menge des Erdölerzeugnisses erhöht (§ 23 Abs. 4 ErdölBevG); die zugeführte Menge ist daher beitragspflichtig. Liegt der Anteil des Biokraftstoffes

im Blend über 50 m-%, ist lediglich der mineralölstämmige Anteil beitragsrelevant (§ 23 Abs. 4 ErdölBevG). Die Mitglieder sind verpflichtet, eine monatliche sowie eine jährliche Meldung über die eingeführten und hergestellten Mengen beim EBV zu machen.

6.4 Fazit

Aus den in DEMO-SPK gemachten Erfahrungen in der praktischen Umsetzung der Demonstration des Einsatzes eines Multiblend-JET-A-1 lassen sich für einzelne Teilaspekte folgendes ableiten:

- ▶ *REACH-Registrierung der erneuerbaren Kerosine.* Jeder Einführer oder Produzent von chemischen Erzeugnissen hat nach EG Nr. 1907/2006 seine Produkte bei der Europäischen Chemikalienagentur über eine sogenannte REACH-Registrierung erfassen zu lassen. Je nach Einfuhr- oder Produktionsmenge errechnen sich die Kosten für die Registrierung entsprechend. Produzenten von erneuerbarem Kerosin sind gegenwärtig überwiegend kleinere Unternehmen, die zunächst nur geringe Mengen produzieren. Die Kosten für die Registrierung wären unverhältnismäßig hoch und würden den Kraftstoffpreis untragbar steigern. Darüber hinaus ist ein erheblicher zeitlicher Aufwand für die Registrierung zu berücksichtigen. Aus diesem Grund erfolgt der Warenübergang bereits am Produktionsort, was den Abnehmer zum Importeur der Ware werden lässt. Dieser muss die Registrierung vornehmen und die Kosten tragen. Dieser zeitliche und finanzielle Aufwand für den Abnehmer kann für die flächendeckende Versorgung mit erneuerbaren Kerosinen nur hinderlich sein. Aus diesem Grund sollte für SPK entweder eine verkürzte und kostenreduzierte Registrierung oder aber eine generische Registrierung für alle synthetischen Flugkraftstoffe auf Grundlage ihrer letztendlichen Nutzung angestrebt werden.
- ▶ *Multiblendherstellung in ASTM D7566.* Das Mischen von Multiblends ist in ASTM D7566 nicht explizit geregelt, die Zulässigkeit von Multiblends lässt sich lediglich aus der Vorschrift ableiten. Allerdings trifft dies nur für den Fall des sukzessiven Hinzumischens der einzelnen synthetischen Komponenten zu. Die sukzessive Beimischung der einzelnen erneuerbaren Kerosine (d. h. (i) Herstellung eines binären Blends A, das gem. ASTM D7566-16b Abschnitt 1.2.1 somit JET A-1 entsprechend ASTM D1655 wird, (ii) Mischung von Blend A mit einer weiteren erneuerbaren Komponente zu Blend B, (iii) Mischung von Blend B mit einer weiteren erneuerbaren Komponente zu Blend C usw.) bedeutet einen erheblichen Zusatzaufwand bei der Herstellung der Multiblends im praktischen Einsatz. Hierbei sind auch die Absetzzeiten und Probenahmen zur Zertifizierung zu berücksichtigen. Im realen Einsatz würde dies dazu führen, dass keine Multiblend-JET-A-1 unterschiedlicher Mischzusammensetzungen hergestellt werden würden. Ziel sollte es daher sein, Regelungen in die ASTM D7566 aufzunehmen, die die Herstellung unterschiedlich zusammengesetzter Multiblends im Rahmen einer simultanen Beimischung mehrerer synthetischer Kerosine zulässt.
- ▶ *Energiesteuer für synthetische Kerosine.* Für synthetische Kerosine entsprechend ASTM D7566 existiert keine klare Regelung im EnergieStG zur anzuwendenden Nomenklatur und demnach zur anzusetzenden Steuerhöhe. Für die jeweiligen Importeure sind aufwändige Recherchen und Nachfragen erforderlich, bevor das Energieerzeugnis eingeführt werden darf. Abhilfe kann über das sog. Ähnlichkeitsprinzip nach § 2 Abs. 4 EnergieStG geschaffen werden. Hiernach wird diejenige Steuer angewandt, die für Energieerzeugnisse gilt, denen die erneuerbaren Kerosine nach ihrem Verwendungszweck und ihrer Beschaffenheit am nächsten stehen (hier: JET A-1). Zielführend und nachvollziehbar wäre es, die nach ASTM D7566 zertifizierten erneuerbaren Kerosine in das nationale EnergieStG aufzunehmen und im internationalen Kontext eine Harmonisierung des HS-Codes und der dt. Zolltarifnummer gemäß Kombierter Nomenklatur (KN) anzustreben.

7 Lokale Emissionen beim Einsatz von Multiblend-JET-A-1 im Flugzeug

Die Verwendung alternativer Kerosine in der Luftfahrt kann neben der Verringerung der Kohlendioxidemissionen auch zu einer verringerten Freisetzung von Ruß in die Umwelt beitragen. Dies ist von hoher Relevanz, da eine verringerte Rußemission die Bildung von Kondensstreifen reduzieren und zu einer verbesserten lokalen Luftqualität an Flughäfen beitragen kann. Im Rahmen von DEMO-SPK wurde daher eine Emissionsprüfung an einem realen Flugzeug durchgeführt, um die positiven Effekte auch für Multiblend-JET-A-1 zu demonstrieren. Darüber hinaus sollte praktisch dargestellt werden, dass die Verringerung der Rußemissionen nicht durch die Freisetzung anderer Schadstoffe (z. B. Stickoxide) erreicht wird.

7.1 Emissionsmessung Triebwerke

Die Bodenmessungen wurden am 30.09.2018 am Flughafen Leipzig/Halle in einem Triebwerksprobelaufstand ausgeführt. Dabei kam ein A300-600 (Frachtversion, Abb. 5) mit zwei Pratt & Whitney PW4158-Triebwerken zum Einsatz. Zwei aufeinanderfolgende Bodenläufe wurden anhand eines vorher festgelegten Messprotokolls durchgeführt. Zunächst erfolgte eine Referenzmessung mit einem regulären JET A-1. Anschließend wurde der im Rahmen von DEMO-SPK erstellte Multiblend vermessen. Insgesamt wurden sieben stationäre Betriebszustände des Triebwerks pro Kerosinoption angefahren und für mehrere Minuten stabil gehalten. Die Zielpunkte hinsichtlich der Triebwerksleistung wurden anhand der Drehzahl des ersten Schaufelblattrades („fan“) festgelegt (% N1). 100 % N1 entspräche dabei der maximalen Triebwerksleistung. Aus Gründen der Sicherheit wurde festgelegt, dass die maximale Leistung während des Bodenlaufes 85 % N1 („maximum continuous thrust“, MCT) betragen sollte. Neben zwei Betriebspunkten bei 23 % N1 zu Beginn der Messung und nach dem MCT-Lauf, betrug die Reihenfolge der Betriebspunkte 40 % N1 (8 min), 60 % N1 (5 min), 50 % N1 (8 min), 30 % N1 (8 min), 85 % N1 (ca. 1 min), 75 % N1 (5 min) und 23 % N1 (8 min).

Die Probenahme erfolgte über eine für das Projekt gebaute Probenahmesonde in ca. 2,5 m Höhe (Mitte der PW4158-Triebwerke). Der Abstand zwischen Sonde und Triebwerk betrug 20 m. Anhand der Spezifikationen des Triebwerkshandbuchs wurde ermittelt, dass die maximale Luftgeschwindigkeit in diesem Abstand ca. 545 km/h betragen würde. Auf dieser Basis wurde eine Sonde entworfen und anschließend gebaut. Die Sonde wurde anschließend mit Bodenankern unmittelbar vor dem Triebwerksprobelaufstand fixiert (Abb. 6).



Abb. 5 Der A300-600 für die Bodenmessung im Triebwerksprobelaufstand



Abb. 6 Probenahmesonde in Position am Triebwerksprobelaufstand

Das Abgas wurde über eine beheizte Probenahmeleitung (45 m, 120 °C) transportiert und anschließend vermessen. Die verwendeten Geräte sind in Tab. 12 beschrieben. Der Probenahmefluss wurde durch einen DI-1000-Verdünner (Dekati) und eine Kolbenpumpe erzeugt. Hinsichtlich der partikulären Emissionen wurden die Fraktion der verdampfbaren und auch der nichtverdampfbaren Partikel bestimmt. Die letztgenannte Fraktion repräsentiert die reinen Rußemissionen des Triebwerks.

Tab. 12 Übersicht der verwendeten Messgeräte für die Emissionsmessungen im Bodenlauf

| Gerät (Hersteller) | Kürzel | Parameter |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Engine Exhaust Particle Sizer (TSI) | EEPS | Nur nicht volatile Partikel; Partikelanzahl und -größenverteilung: 5,6–560 nm in 32 Kanälen |
| Kondensationspartikelzähler (TSI) | CPC | Gesamtpartikelanzahl: 7 nm bis 3 µm |
| Scanning Mobility Particle Sizer (TSI) | SMPS | Volatile und nicht volatile Partikel; Partikelanzahl und -größenverteilung: 8–279 nm in 64 Kanälen |
| Aethalometer (AethLabs) | MA-200 | Ruß als „black carbon“ |
| Optischer Partikelzähler (TSI) | OPS | Volatile und nicht volatile Partikel; Partikelanzahl und -größenverteilung: 0,3–10 µm in 12 Kanälen |
| Stickoxidmonitor (ecophysics) | CLD64 | NO, NOx (verdünnt) |
| Stickoxidmonitor (ecophysics) | CLD700 | NO, NOx (unverdünnt) |
| Enclosed Path CO ₂ /H ₂ O Analyzer (LI-COR) | LI-COR 7000 | CO ₂ , H ₂ O |
| Multigas 2030 (MKS) | FT-IR | CO ₂ , NOx, organische Verbindungen |

Die Angabe der Partikelemissionen erfolgt als Emissionsindex, d. h. die freigesetzte Partikelanzahl ist auf die Menge des verbrannten Kerosins normiert. Dies erfolgt auf Basis der gemessenen Kohlendioxidkonzentration und der bekannten Kerosinzusammensetzung. Das Vorgehen folgt den SAE-Empfehlungen in AIR6241 [E-313]. Der Emissionsindex hat den Vorteil, dass Verdünnungseffekte, die durch die Umgebungsluft erzeugt werden, keinen Einfluss haben und die Werte direkt miteinander vergleichbar sind. Bezüglich der Entwicklung der Partikelanzahlemission mit steigender Triebwerksleistung ergibt sich ein Profil mit einem Minimum bei ca. 30% N1 (Abb. 7). Der Emissionsindex des regulären Kerosins ist höher beim niedrigsten Betriebspunkt als beim höchsten. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass das Triebwerk in diesem Bereich nicht in einem optimalen Betriebszustand läuft. Durch die Verwendung des Multiblends wird bei allen Betriebspunkten eine Reduktion erreicht. Die Reduktion ist beim niedrigsten Betriebspunkt am höchsten (ca. -60%) und sinkt mit steigender Triebwerksleistung auf ca. -23% für MCT. Diese Reduktion wird nicht durch eine Verschiebung in der Partikelverteilung erreicht (Abb. 8). Die nicht volatilen Partikelanzahlemissionen des Triebwerks finden hauptsächlich im Bereich der ultrafeinen Partikel (<100 nm) statt. Über die verschiedenen gemessenen Leistungsstufen ist eine Verschiebung der Partikel von kleineren Durchmessern zu größeren Durchmessern zu beobachten. Dies ist vermutlich durch den Abstand zwischen Probenahmesonde und Triebwerk ausgelöst, da die Partikel Zeit zur Agglomeration haben. Dieser Effekt ist jedoch repräsentativ für ein gealtertes Aerosol und die Daten können daher direkt für die Abschätzung lokaler Effekte auf die Luftqualität verwendet werden.

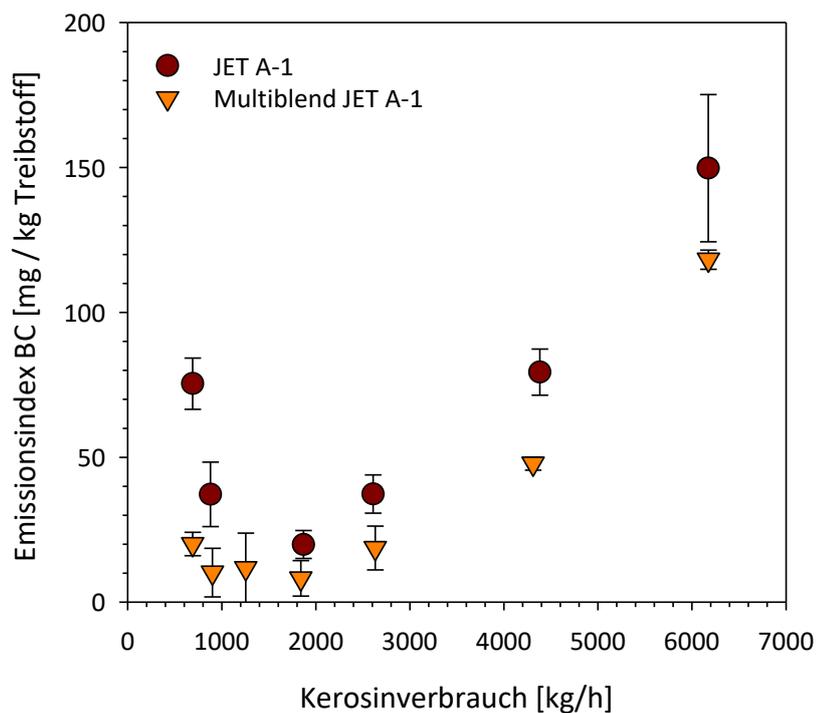


Abb. 7 Entwicklung der nicht volatilen Partikelanzahlemission in Abhängigkeit des Kerosinverbrauchs

Flüchtige Partikel im Triebwerksabgas sind häufig Indikatoren für den Schwefelgehalt des Kerosins oder nicht ideale Verbrennungszustände. Sie können die Partikelanzahl erheblich beeinflussen, da sie üblicherweise mit sehr geringen Durchmessern (<20 nm) auftreten. Der Multiblend hatte keinen Einfluss auf die Freisetzung flüchtiger Partikel. Insgesamt fanden sich ca. 30% flüchtige Partikel im Abgasstrom. Aufgrund des geringen Durchmessers hatten die flüchtigen Partikel keinen Einfluss auf die gemessene Partikelmasse. Hinsichtlich der freigesetzten Partikelmasse ist eine Abschätzung auf Basis der nach Partikelgrößen selektierenden Geräte

möglich. Allerdings müssen hierfür Annahmen hinsichtlich der Partikelform sowie der effektiven Partikeldichte gemacht werden. Frühere Experimente haben gezeigt, dass sich insbesondere der letztgenannte Parameter über die Betriebspunkte unterscheiden kann und sogar vom Treibstoff beeinflusst werden kann. Aufgrund der genannten Unsicherheiten erfolgt die Berechnung des Partikelmassenemissionsindex auf Basis der Daten des Aethalometers.

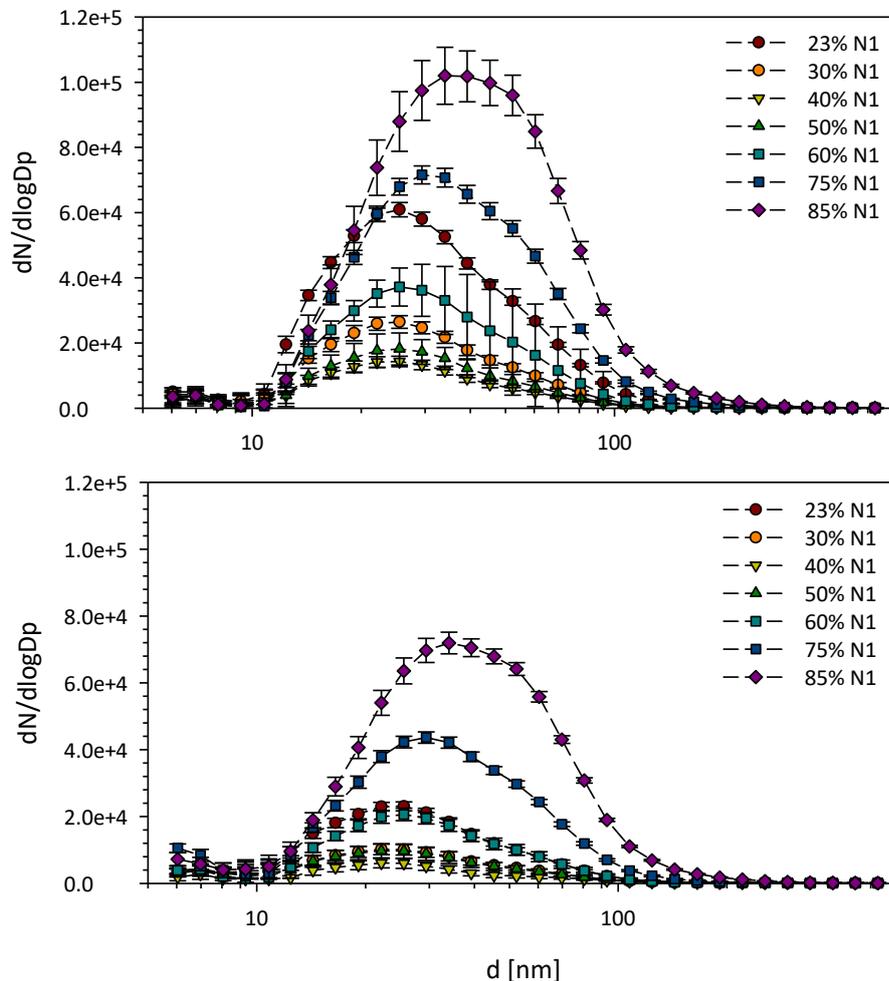


Abb. 8 Partikelanzahlverteilungen für die verschiedenen Betriebspunkte bei Verwendung des Referenzkerosins (oben) und des Multiblends (unten)

Um die Auswirkungen des Multiblends anwendungsnah zu demonstrieren, werden die ermittelten Emissionsindizes interpoliert und auf ein standardisiertes Szenario übertragen. Hierzu wird der von der ICAO festgelegte LTO-Zyklus („Landing and Take Off Cycle“) verwendet, in dem vier verschiedene Betriebszustände mit unterschiedlichen Zeitanteilen vertreten sind. Die Interpolation der gemessenen Daten erfolgt auf Basis des Treibstoffverbrauchs (Abb. 9), da dieser eine bessere Übertragung auf die LTO-Betriebszustände erlaubt als die Fangeschwindigkeit N1. Eine Bestimmung des höchsten LTO-Zustands („take off“ = 100% Schub) war am Boden aus Sicherheitsgründen nicht möglich. Daher musste dieser Wert aus den vorhandenen Daten extrapoliert werden (Tab. 13). Aufgrund der hohen Relevanz dieses Wertes für die Abschätzung der Gesamtemission wurde eine weitere Abschätzung auf Basis des ICAO-SCOPE11-Modells [Aga19] durchgeführt. Dieses Modell basiert auf der in der ICAO-Datenbank hinterlegten Rußzahl des jeweiligen Triebwerkstyps. Für das PW4158 ist aufgrund der niedrigen Emissionen lediglich die Rußzahl für den höchsten Betriebspunkt aufgeführt (8.1).

Das SCOPE11-Modell liefert für den Betriebszustand „take off“ damit 235 ± 35 mg/kg. Dieser Wert ist in sehr guter Übereinstimmung mit den Abschätzungen aus der Extrapolation. Werden also die Gesamtemissionen betrachtet die sich aus dem LTO-Zyklus ergeben würden, so ergibt sich durch die Verwendung des Multiblends eine Reduktion von -37% in der freigesetzten Partikelanzahl und -29% in der Partikelmasse. Die Bedeutung dieser Reduktion wird durch die in Tab. 13 aufgeführten Absolutzahlen unterstrichen. Die insgesamt im LTO-Zyklus emittierte Partikelmasse von ca. 95 g (ca. 0,01 m% des eingesetzten Treibstoffs) reduziert sich um ca. 28 g für nur ein Flugzeugtriebwerk. Zum Vergleich: Diese Menge entspricht der Rußmasse, die ein Diesel-Pkw, der Ruß im Bereich des Euro-6d-Grenzwertes emittiert, auf 6.200 km freisetzt.

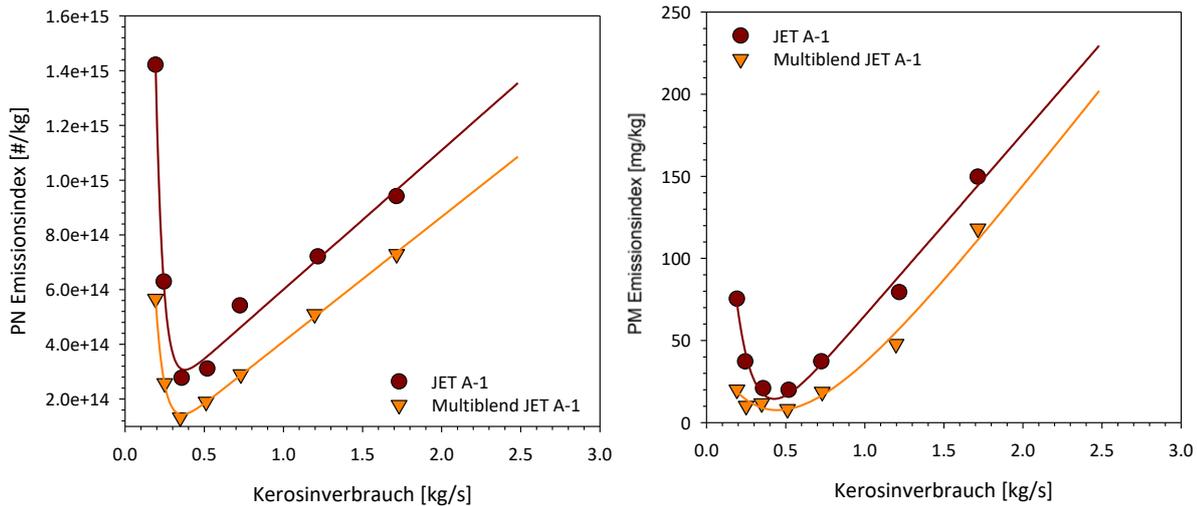


Abb. 9 Emittierte Partikelanzahl (links) und Partikelmasse (rechts) in Abhängigkeit des Kerosinverbrauchs

Tab. 13 Abschätzung der Emissionen von Partikelanzahl (PN) und Partikelmasse (PM) für den LTO-Zyklus mit Referenzkerosin und Multiblend

| LTO-Punkt | Schub [%] | t [min] | Treibstoff- verbrauch [kg/s] | PN ^a [10 ¹⁵ # / kg] | | PM ^a [mg / kg] | |
|-----------------|-----------|---------|---------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| | | | | JET A-1 | Multiblend JET A-1 | JET A-1 | Multiblend JET A-1 |
| T/O | 100 | 0,7 | 2,481 | 1,35 | 1,09 | 230 | 202 |
| Climb | 85 | 2,2 | 2,004 | 1,11 | 0,87 | 176 | 145 |
| Approach | 30 | 4 | 0,682 | 0,44 | 0,27 | 31 | 14 |
| Taxi | 7 | 26 | 0,211 | 1,00 | 0,42 | 59 | 17 |
| Gesamt | - | - | - | 836,24 | 523,01 | 95.234 | 67.227 |

^a Interpoliert.

Ein wesentlicher Aspekt in der Bewertung der beobachteten Rußminderung ist die Frage nach nachteiligen Entwicklungen bei anderen Schadstoffen im Abgas. Hierbei sind insbesondere die Stickoxide relevant („Ruß-NOx-Schere“). Ein direkter Vergleich der beiden Bodenläufe ist bei den Stickoxiden allerdings nicht möglich, da sich die Umgebungsbedingungen deutlich unterscheiden. Während die Außentemperatur beim ersten Lauf (Referenzkerosin JET A-1) 6–10 °C betrug, lag die Temperatur beim zweiten Lauf (Multiblend JET A-1) bei ca. 16 °C. Die Bildung von Stickoxiden ist hauptsächlich durch die Temperatur in der Brennkammer bedingt und wird daher von der Temperatur der eingehenden Luft beeinflusst. Die Freisetzung von Stickoxiden ist daher beim zweiten Lauf höher als beim ersten Lauf – unabhängig vom gewählten Kerosin. Um den Einfluss des Kerosins zu identifizieren, ist daher die Korrelation zwischen der Brennkammereintrittstemperatur (BKET) und dem Stickoxidemissionsindex erforderlich. Dabei zeigen sich die höheren BKET für den zweiten Lauf, welche

durch die erhöhte Außentemperatur verursacht sind. Die Korrelation zeigt keine wesentlichen Unterschiede in der Emission von Stickoxiden durch die Verwendung des Multiblends. Dieses Ergebnis entspricht auch den Erwartungen aus früheren Studien [Sch18] und wird in den unten aufgeführten Prüfstandsmessungen (Kapitel 7.3) ebenfalls bestätigt. Für das Referenzkerosin JET A-1 sind geringfügig höhere Stickoxidwerte bei den sehr niedrigen Betriebspunkten zu beobachten. Diese Unterschiede können auf Basis der vorhandenen Daten nicht erklärt werden. Hinsichtlich der Freisetzung von Kohlenmonoxid (CO) sind ebenfalls keine Unterschiede zwischen den beiden Treibstoffen erkennbar. Die Werte zeigen außerdem eine sehr gute Übereinstimmung mit den für das Triebwerk dokumentierten ICAO-Referenzwerten für die Emission von CO. Auch dieser Aspekt wird durch die Prüfstandsmessungen (Kapitel 7.3) bestätigt.

Die durchgeführte Demonstration zeigt die erwartete Rußminderung durch den Einsatz des Multiblend-JET-A-1. Die Rußminderung ist nicht mit der Verschlechterung („trade-off“) anderer Emissionsparameter verbunden. Um zu vermeiden, dass die ermittelten Ergebnisse nicht spezifisch für das getestete Triebwerk sind, wurden ergänzende Messungen im Technikum durchgeführt. Diese Untersuchungen dienen dem Nachweis, dass die fundamentalen Prozesse bei der Verbrennung im Triebwerk nicht durch die verschiedenen Multiblend-Komponenten beeinflusst werden und sind im Folgenden beschrieben.

7.2 Reaktionschemie und Rußbildungspotenzial

Ergänzend zu den Emissionsmessungen am Triebwerk war es ebenfalls Aufgabe, die chemischen Einflüsse der Kerosine auf das Reaktionsgeschehen bei der Verbrennung zu beschreiben, insbesondere des zu erwartenden Emissionsverhaltens des im Rahmen von DEMO-SPK erstellten Multiblends. Hierzu betreibt DLR-VT einen Hochtemperatur-Strömungsreaktor, in dem die ablaufenden chemischen Reaktionen entkoppelt von Strömung, Verdampfung und Mischungseffekten unter exakt definierten Randbedingungen betrachtet werden können. Der Einsatz der Molekularstrahl-Massenspektrometrie MBMS (engl. Molecular Beam Mass Spectrometry) ermöglicht dabei einen umfassenden, quantitativen Einblick in die Verbrennungschemie der Treibstoffe. Da für Schadstoffe wie Stickoxide oder Kohlenmonoxid vorrangig die Verbrennungstemperatur bzw. die Reaktionsführung bestimmende Größen sind, steht die Rußbildung im Fokus dieser Untersuchungen. Hier sind die zu erwartenden Auswirkungen der chemischen Treibstoffkomposition zudem am größten. Für eine detaillierte Beschreibung des DLR-Strömungsreaktors mit gekoppeltem MBMS wird hier auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen [Oßw15].

Untersucht wurden die beiden Kerosine (JET A-1 und Multiblend JET A-1) aus der Demonstration am Flughafen (Probenahme nach Versuch) sowie eine SIP-haltige Probe (SIP) nach den Untersuchungen im Technikumsmaßstab (Kapitel 5.1). Versuche wurden jeweils bei mageren ($\Phi = 0,8$) und fetten ($\Phi = 1,2$) Verbrennungsbedingungen durchgeführt. Die Reaktionsbedingungen sind an vorherige Untersuchungen von Luftfahrt-treibstoffen angelehnt und in Tab. 14 zusammengefasst. Der betrachtete Temperaturbereich reicht von der vollständigen Oxidation (thermisches Gleichgewicht) bis zum nicht-reagierten Kerosin und wird in Form einer kontinuierlichen Temperaturrampe abgebildet. Dabei ergibt sich für die Messung ein Temperaturintervall von 2,5 K je Datenpunkt (TOF).

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse auch mit vorangegangenen Messungen wurden Verbrennungsbedingungen unter der Vorgabe eines konstanten Kohlenstoffflusses gewählt und der Oxidator entsprechend der Stöchiometrie angepasst. Zudem wird der Trägergasfluss über alle Versuche konstant gehalten. Es ergibt sich ein Gesamtvolumenstrom von ca. 10 slm (Standardliter pro Minute). In Tab. 15 sind die spezifischen Flussraten der einzelnen Versuche für die jeweiligen Treibstoffe und den Oxidator aufgelistet. Der Argon-Trägergasstrom wurde bei allen Messungen einheitlich auf Verdampfer (6,00 g/min) und Strömungsreaktor (11,64 g/min) aufgeteilt. Hieraus ergibt sich ein Argon-Gesamtfluss von 17,64 g/min.

Tab. 14 Reaktorbedingungen für die untersuchten Verbrennungsbedingungen

| Verbrennungsbedingung | Äquivalenzverhältnis ϕ | Starttemperatur | Endtemperatur | Temperaturrampe |
|-----------------------|-----------------------------|------------------|----------------|-----------------|
| Mager | 0,8 | 1.123 K (850 °C) | 773 K (500 °C) | -200 K/h |
| Fett | 1,2 | 1.223 K (950 °C) | 773 K (500 °C) | -200 K/h |

Tab. 15 Flussraten in mg/min für die untersuchten Verbrennungsbedingungen der Treibstoffmessreihen bei konstantem Argonfluss (17,64 g/min)

| Kerosin | Kerosin [mg/min] | Oxidator O ₂ [mg/min] | Oxidator O ₂ [mg/min] |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | $\Phi=0,8$ $\Phi=1,2$ | $\Phi=0,8$ | $\Phi=1,2$ |
| Referenzkerosin JET A-1 (Ref) | 31,08 | 131,7 | 87,8 |
| Multiblend JET A-1 (MB) | 31,27 | 133,6 | 89,1 |
| Multiblend mit SIP (MB+SIP) | 31,20 | 133,0 | 88,7 |

Die Hauptspezies (stabile Produkte und Sauerstoff) sind in Abb. 10 als Funktion der Ofentemperatur zusammengestellt. Bei vergleichsweise kalten Ofentemperaturen findet im Reaktor noch keine Reaktion statt und die Reaktanden (Kerosin und Sauerstoff) durchlaufen die Reaktionsstrecke unverändert. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung technischer Kerosine sind die einzelnen Kraftstoffspezies nicht separat dargestellt. Über die aufgeprägte Temperatur wird die Reaktionsgeschwindigkeit der Oxidationsreaktionen kontinuierlich gesteigert. Die Temperaturachse kann damit im weitesten Sinne als Reaktionsfortschritt interpretiert werden. Ab einer Temperatur von etwa 800 K können die Kerosinkomponenten innerhalb der Verweilzeit im Reaktor abgebaut werden, dies geht einher mit moderatem Sauerstoffverbrauch und der Bildung erster Kohlenwasserstoffintermediate. Mit weiter steigender Temperatur wird dann Kohlenoxid und elementarer Wasserstoff gebildet. Ab einer gewissen Temperatur sorgen vermehrte Kettenverzweigungsreaktionen für die exponentielle Steigerung des vorhandenen Radikalpools und damit zu einer rapiden Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit. Es kommt zu deutlichem Sauerstoffverbrauch. Dies geht einher mit der Oxidation des Kohlenmonoxids zu Kohlendioxid. Dieser deutliche Sprung kann als „Zündung“ interpretiert werden, auch wenn innerhalb des Reaktors keine selbsterhaltende Reaktion stattfindet. Anschließend können nur noch die Reaktionsprodukte am Reaktorausgang detektiert werden.

Für die brennstoffarme Bedingung ($\Phi=0.8$) sind die Produkte lediglich CO₂ und Wasser sowie ein entsprechender Rest des überschüssigen Sauerstoffs. Die Produkte bei Brennstoffüberschuss ($\Phi=1.2$) sind zusätzlich Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Mit weiter steigender Temperatur findet eine leichte Verschiebung der Gleichgewichtskonzentrationen statt. Die Hauptspeziesprofile der drei untersuchten Kerosine weisen erwartungsgemäß in beiden Stöchiometrien identisches Verhalten auf. Dies gilt auch im Vergleich zu anderen zertifizierten Kerosinen. Die Beimischung der alternativen Kerosine führt also unter den hier untersuchten Bedingungen nicht zu einer signifikanten Änderung des globalen Reaktionsverhaltens. Dies unterstreicht auch die in Kapitel 7.1 und 7.3 bestimmte Treibstoffunabhängigkeit der Stickoxidemissionen, da hierfür vor allem die Verbrennungstemperatur (gesteuert durch die Wärmefreisetzung) in der Brennkammer relevant ist.

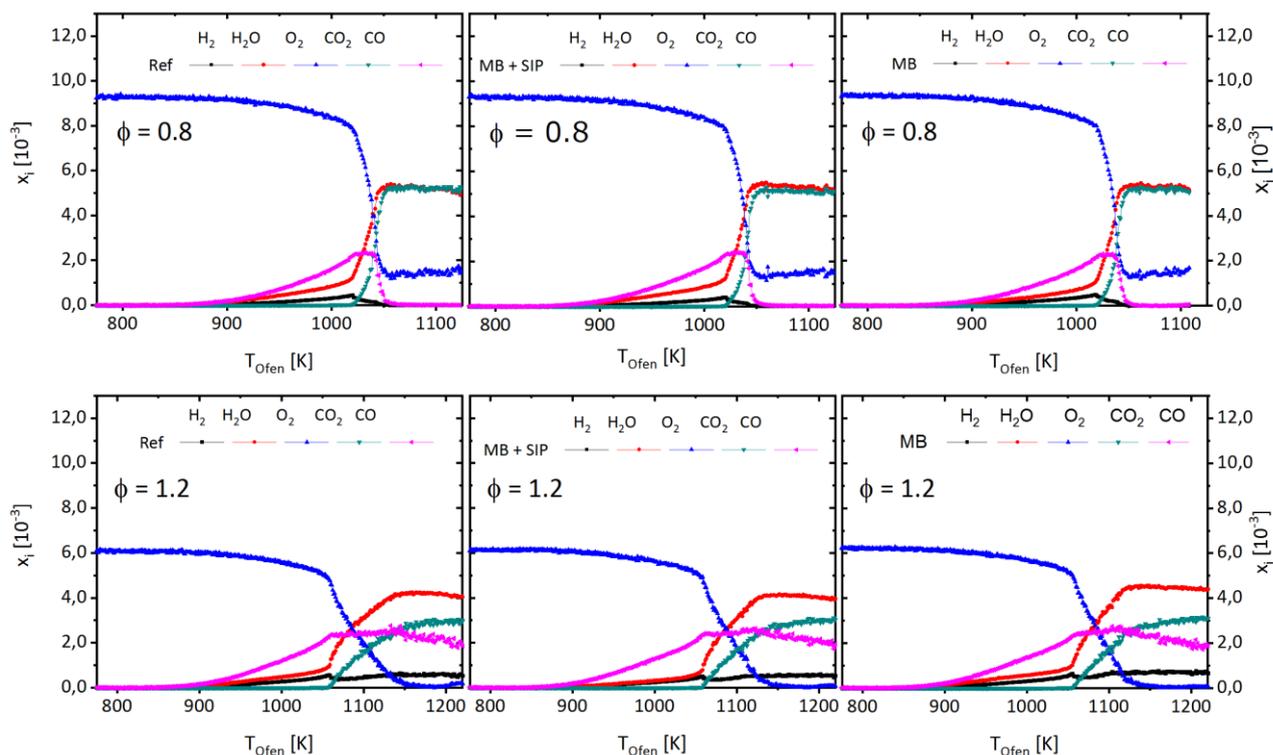


Abb. 10 Molenbruchprofile der Hauptspezies als Funktion der Ofentemperatur

Während die Hauptspezies quasi keine Unterschiede zwischen den untersuchten Kerosinen aufweisen, gilt dies nicht zwingend für die während der Verbrennungsreaktion gebildeten (und wieder abgebauten) Verbrennungsintermediate. Die Betrachtung dieser Intermediate ermöglicht daher die Abschätzung bzw. Erklärung von Schadstoffemissionsmustern, insbesondere der Rußbildung, an technischen Verbrennungssystemen. Es gilt jedoch zu beachten, dass die hier erhobenen Daten lediglich eine Aussage über die chemischen Schadstoffbildungspotenziale erlauben und in technischen Brennkammern insbesondere die Reaktionsführung den Schadstoffausstoß bestimmt.

Abb. 11 zeigt eine Auswahl typischer Verbrennungsintermediate. Bei dieser Auswahl handelt es sich um die vergleichsweise kleinen Intermediate Methan (CH_4) und Ethylen (C_2H_4) sowie die Oxygenate Formaldehyd und Acetaldehyd ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$) bzw. dessen tautomeres Enol. Diese Spezies stehen meist am Ende der Reaktionskette und treten bei der Verbrennung nahezu aller Kohlenwasserstoffe auf. Daraus erklärt sich auch die nur geringe Abhängigkeit der auftretenden Konzentrationen von der Kerosinzusammensetzung. Zur Verdeutlichung der Kraftstoffabhängigkeit sind neben den Konzentrationsprofilen auch die jeweiligen Maximalkonzentrationen als Funktion des Wasserstoffgehaltes des Kerosins als Einschub angegeben. Der Wasserstoffgehalt hat sich als nützlicher Summenparameter für die Charakterisierung komplexer Mischungen erwiesen, da hierdurch die enthaltenen chemischen Komponenten gut abgebildet werden [Sch18]. Insbesondere die Partikelemissionen zeigen sich als sensitiv für diese Größe. Für die hier untersuchten Kerosine wurde ein Wasserstoffgehalt von 13,79 m-% im Referenzkerosin JET A-1 (Ref), 14,14 m-% im Multiblend mit SIP (MB+SIP) bzw. 14,32 m-% im Multiblend-JET-A-1 (MB) bestimmt. Der Wasserstoffgehalt steigt dabei mit dem Anteil der alternativen Treibstoffkomponenten, da diese vorwiegend aliphatische Kohlenwasserstoffe enthalten.

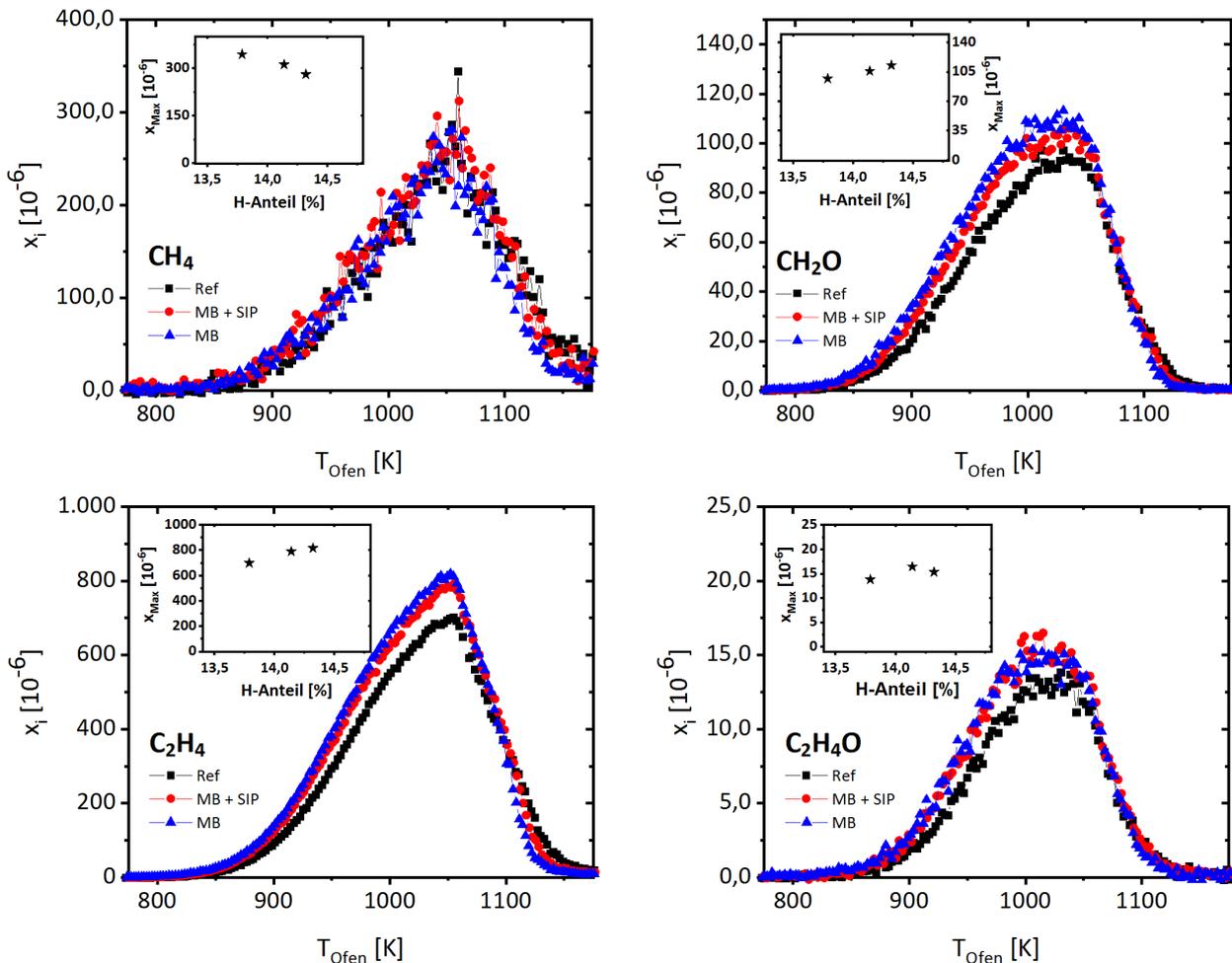


Abb. 11 Ausgewählte typische kleine Verbrennungsintermediate der brennstoffreichen Serie ($\Phi = 1.2$)
Die jeweiligen Maximalkonzentrationen sind als Funktion des Wasserstoffgehaltes der Kerosine als Einschub dargestellt.

Für Methan kann in Anbetracht des experimentellen Rauschens keine Kraftstoffabhängigkeit festgestellt werden. Ethylen zeigt eine leichte Erhöhung durch die Zugabe alternativer Komponenten. Dies kann auf die in HEFA und SIP vermehrt auftretenden Methylverzweigungen der offenkettigen Aliphaten zurückgeführt werden, da hierdurch die Abspaltung von C3-Bruchstücken tendenziell begünstigt wird. Ebenfalls eine leichte aber nachweisbare Erhöhung kann für die oxygenierten Intermediate festgestellt werden. Dies kann zu einer entsprechend leicht gesteigerten Emission von Aldehyden führen. Signifikante Konzentrationen an Form- und Acetaldehyd konnten während der Feldmessungen am A300 jedoch für keinen der untersuchten Kerosine nachgewiesen werden.

Im Folgenden soll der Abbau der Treibstoffbestandteile näher betrachtet werden. Abb. 12 zeigt dies am Beispiel der C_{12} -Moleküle. Die Summenformel $C_{12}H_{26}$ vereint dabei die linearen und verzweigten Isomere des Dodekans. Diese Spezies sind sowohl in dem fossilen Kerosin wie auch in den alternativen Komponenten HEFA und ATJ vertreten. Die Isomerenzusammensetzung unterscheidet sich hingegen deutlich. Hinter $C_{12}H_{22}$ verbergen sich aliphatische Ringstrukturen, genauer Bicyclododekanisomere. Aus dem direkten Vergleich ist ersichtlich, dass die offenkettigen Strukturen ($C_{12}H_{26}$) etwas früher, d. h. bei niedrigeren Temperaturen abgebaut werden. Die Isomere des $C_{12}H_{16}$ bilden alkylierte Tetraline ab, diese Gruppe der Cycloalkylaromaten (Naphthoaromaten) ist quasi ausschließlich Bestandteil der fossilen Kerosinkomponente. Auch hier kann ein Abbau bei wiederum etwas höheren Temperaturen beobachtet werden.

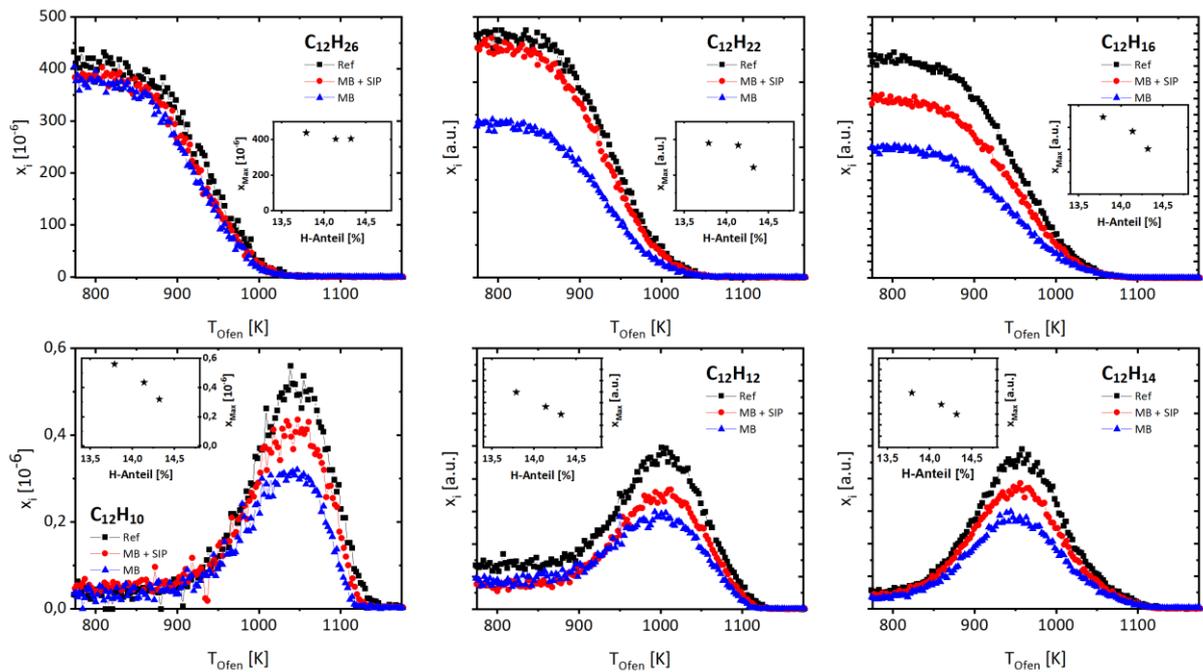


Abb. 12 Ausgewählte C_{12} -Spezies als Beispiel für Alkane ($C_{12}H_{26}$), Naphthene bzw. Cycloalkane ($C_{12}H_{22}$) hier mit Doppelringstruktur und Naphthenoaromaten ($C_{12}H_{16}$) in der oberen Reihe und aromatische Kerosinbestandteile die primär als Rußvorläufer auftreten in der unteren Reihe $C_{12}H_{10}$: Acenaphthen (1,2-Dihydroacenaphthylen); $C_{12}H_{12}$: alkylierte Naphthaline und $C_{12}H_{14}$: alkylierte Indene. Die jeweiligen maximalen Molenbrüche sind als Funktion des Wasserstoffgehaltes der Kerosine als Einschub dargestellt.

Die untere Reihe in Abb. 12 zeigt Beispiele der aromatischen C_{12} -Treibstoffkomponenten. Hierbei handelt es sich um die mehrkernigen Aromaten: Acenaphthen ($C_{12}H_{10}$), alkyliertes Naphthalin ($C_{12}H_{12}$) und alkyliertes Inden ($C_{12}H_{14}$). Diese Spezies sind jedoch nicht nur Bestandteil des fossilen Kerosins sondern ebenso an der Rußbildung beteiligt. Daher werden diese Spezies zunächst nicht abgebaut, sondern steigen in ihrer Konzentration sogar deutlich an. Sie durchlaufen dann ein Maximum und zeigen ein typisches Intermediatsprofil. Bei der Abfolge der Maximalmolenbrüche kann eine klare Korrelation zum Wasserstoffgehalt des Kerosins festgestellt werden. Dieser Trend kann für nahezu alle Rußvorläuferspezies festgestellt werden. Abb. 13 verdeutlicht den Trend anhand bedeutender Rußvorläuferspezies gemessen in der brennstoffreichen Serie ($\Phi = 1.2$): Benzol (C_6H_6), Styrol (C_8H_8), Indene (C_9H_8), Naphthalin ($C_{10}H_8$), Acenaphthylen ($C_{12}H_8$) und Antracen ($C_{14}H_{10}$). Neben der Abhängigkeit zur Treibstoffkomposition kann auch eine Abnahme der auftretenden Konzentrationen mit zunehmender Größe der Rußvorläufermoleküle festgehalten werden.

Es kann also eine deutliche Erniedrigung der Konzentration an Rußvorläuferspezies bei der Oxidation des Multiblends im Vergleich zum fossilen JET A-1 festgehalten werden. Die Reduktion beträgt für Benzol z. B. 33%. Eine ähnliche Reduktion (32%) wird auch in der mageren Serie beobachtet – wengleich hier die Konzentrationen aller Rußvorläufer entsprechend geringer ausfallen. Dies deckt sich in etwa mit der im Feld beobachteten Reduktion der Partikelkonzentration im Abgas des PW4158-Triebwerks. Die Übereinstimmung der Zahlenwerte der Reduktion der Rußvorläuferspezies und der beobachteten Reduktion im LTO-Zyklus ist jedoch zufällig und kann nicht generalisiert werden. Hingegen sind die Trends in beiden Versuchsteilen gut erkennbar. Der Trend kann ebenso anhand der Rußlumineszenz bei den Prüfstandsmessungen bestätigt werden (Kapitel 7.3). Damit kann der beobachtete Effekt der Rußreduktion durch den Einsatz der verwendeten alternativen Kerosine direkt auf die ablaufenden chemischen Reaktionen bei der Verbrennung zurückgeführt werden. Eine vorteilhafte Auswirkung der alternativen Treibstoffbestandteile auf die Partikelemissionen kann also über einen weiten Bereich verschiedener Reaktionsbedingungen erwartet werden.

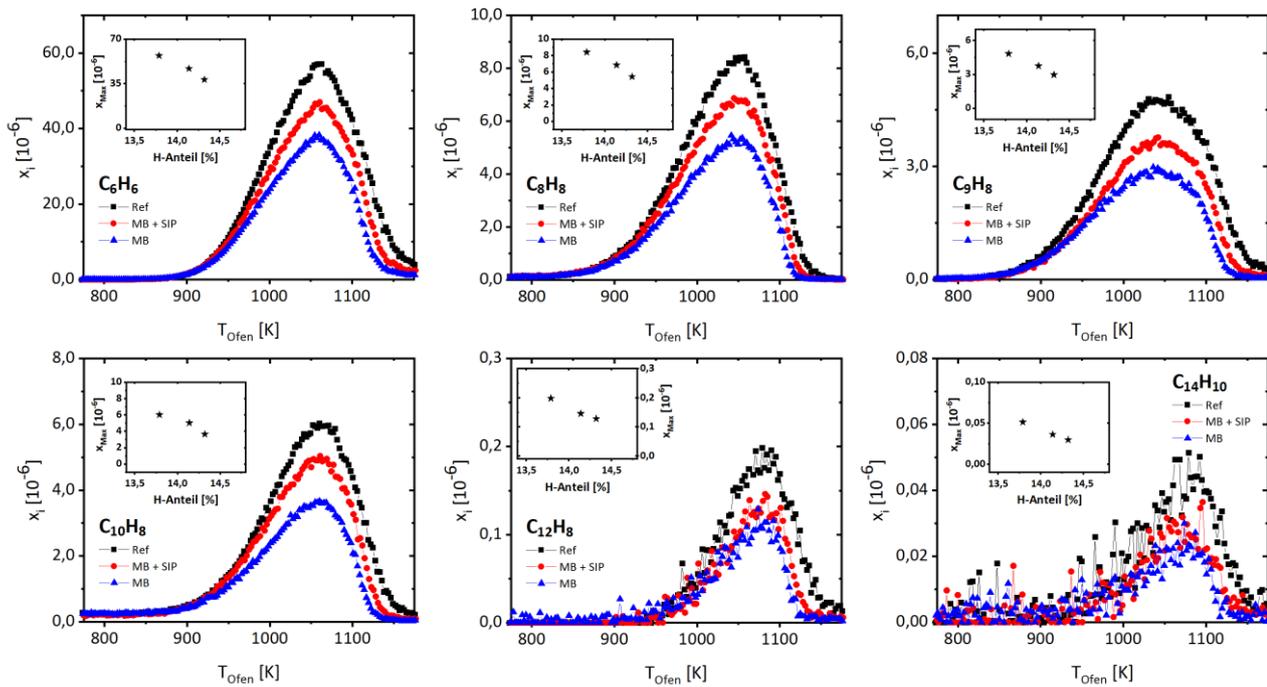


Abb. 13 Typische Rußvorläuferspezies: Benzol (C₆H₆), Styrol (C₈H₈), Indene (C₉H₈), Naphthalin (C₁₀H₈), Acenaphthylen (C₁₂H₈) und Antracen (C₁₄H₁₀) bzw. entsprechende Isomere Strukturen
Die jeweiligen maximalen Molenbrüche sind als Funktion des Wasserstoffgehaltes der Treibstoffe als Einschub dargestellt.

7.3 Reaktionschemie und Emissionsmessungen im Technikum

Zudem wurden die Auswirkung der chemischen Zusammensetzung und der physikalischen Eigenschaften der Kerosine auf ihre Verbrennungseigenschaften und auf das Emissionsverhalten (CO, NO_x) experimentell untersucht. Die Kerosine wurden in den Voruntersuchungen vom WIWeb festgelegt und geliefert (Kapitel 5.1). Die zur Festlegung der Verbrennungsstöchiometrie wichtigen Treibstoffkenngrößen und weitere Standardeigenschaften wurden zum Teil von WIWeb und zum Teil von DLR-VT bestimmt.

Als Versuchsträger diente ein luftfahrtrelevanter, drallstabilisierter Spraybrenner, der in einem Hochdruck-Verbrennungsprüfstand (HiPOT) installiert wurde. Der Prüfstand und der Versuchsträger sind in Veröffentlichungen beschrieben [Gro16, Box15, Gou16]. Im Spraybrenner wird mit einem triebwerksrelevanten, filmlegenden Airblast-Zerstäuber der Flüssigtreibstoff zu einem feinen Spray aufbereitet. Dieses Spray bzw. der dampfförmige Treibstoffanteil wird gezündet. Dann wird die Startflamme auf die gewünschte Flammenstöchiometrie und auf die gewünschten Druck- und Temperaturbedingungen eingestellt. Die Brennkammer des HiPOT ist von vier Seiten optisch zugänglich, so dass zum einen die Flamme und die thermischen Rußstrahlungsemissionen beobachtbar sind und zum anderen moderne optische und lasergestützte Messtechniken angewendet werden können, um in-situ wichtige Verbrennungskenngrößen zu erfassen. Im Gegensatz zum realen Triebwerk können so z. B. auch Validierungsdatensätze für CFD-Simulationen aus dem Brennraum und nicht nur ex-situ Daten auf Basis von Abgasmessungen zur Verfügung gestellt werden.

Am HiPOT wurden folgende Untersuchungen durchgeführt: Die Verbrennungszone (Wärmefreisetzungsgebiete) der verschiedenen Flammen wurden mit OH*-Chemilumineszenzmessungen im ultravioletten Spektralbereich erfasst. Die zeitliche Änderung des thermischen Rußeigenleuchtens im nah-infraroten Spektralbereich wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Zusätzlich wurde ein Spektrometer eingesetzt, um das Chemilumineszenzspektrum von verschiedenen intermediären Spezies, d. h. Moleküle, die als

Zwischenprodukt bei der Verbrennung auftreten, und den Anteil des thermischen Strahlungshintergrundes (die Rußwärmestrahlung) längs der Brennkammer zu vermessen. Ferner wurden simultan konventionelle Emissionsmessungen am Brennerabgas mit einem Multikomponenten-Abgasanalyzesystem, ausgestattet mit elektrochemischen Sensoren für O_2 , CO , NO , NO_2 und SO_2 sowie mit einem NDIR (Non-Dispersive Infrared Absorption)-Sensor für CO_2 , durchgeführt. Zusätzlich wurden die CO -Emissionen auch noch mit der LDAS (Laserdioden-Absorptionsspektroskopie)-Technik erfasst. Die Messtechniken werden in folgenden Publikationen beschrieben [Mos10, Mos14, Mos15, Mos12].

Die folgenden JET-A-1-Kerosine gemäß ASTM D7566 standen für die Hochdruckverbrennungsuntersuchungen zur Verfügung: ein konventionelles JET-A-1-Kerosin (Raffinerie Lingen) und zwei Blends mit synthetischen Brennstoffen (Mischung 1: 61,7 Vol.-% JET A-1 + 29,9 Vol.-% HEFA + 8,4 Vol.-% ATJ aus WIWeB Tank 1, Mischung 2: 75,1 Vol.-% JET A-1 + 16,6 Vol.-% HEFA + 3,3 Vol.-% ATJ + 5 Vol.-% SIP aus WIWeB Tank 3). Diese Kerosine wurden bei den folgenden Brennerbetriebsbedingungen untersucht: Brennkammerdrücke 5 bar und 6 bar, globale Verbrennungsstöchiometrie $\phi = 0,7$ bis $\phi = 1$, Treibstofftemperatur $20^\circ C$ und Lufteintrittstemperatur $50^\circ C$.

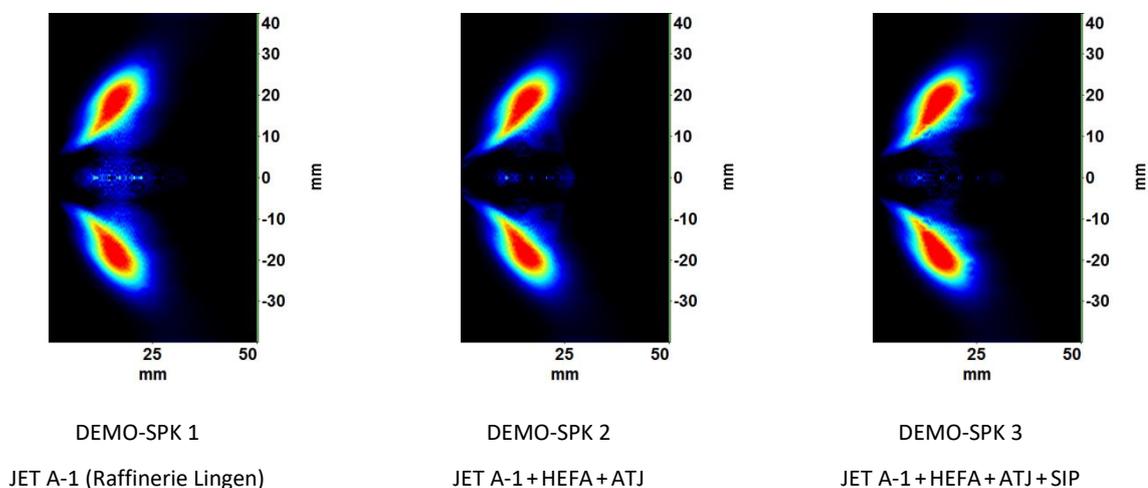


Abb. 14 Exemplarischer Vergleich der planaren OH^* -Chemilumineszenzverteilung der untersuchten Kerosine bei 6 bar Brennkammerdruck und stöchiometrischem Treibstoff-Luft-Verhältnis

Die Flammen aller drei Kerosine weisen bei gleichen Brennkammerbetriebsbedingungen gemäß der aufgenommenen räumlichen OH^* -Chemilumineszenzverteilung eine sehr ähnliche Flammenform und Flammenlage auf. Die Abb. 14 zeigt exemplarisch die OH^* -Chemilumineszenzverteilung in der axialen Ebene der Brennkammer für alle drei Treibstoffe. Es handelt sich hier um die Abel-transformierte planare Darstellung der gemessenen, sichtlinienintegrierten, axialsymmetrischen OH^* -Chemilumineszenzverteilung.

Zur weiteren Auswertung wurden die Intensitätsprofile längs der Brennkammer betrachtet: Die Position der maximalen Wärmefreisetzung liegt je nach Äquivalenzverhältnis zwischen 15 und 20 mm stromabwärts in Bezug zur Brennerstirnplatte. Der Wärmefreisetzungsbereich verschiebt sich stromaufwärts mit steigendem globalem Äquivalenzverhältnis für beide Brennkammerdrücke. Bei 5 bar wird ein minimaler Abstand der maximalen Wärmefreisetzung zur Brennerstirnplatte von 17 mm nicht unterschritten. Die Ausdehnung des Wärmefreisetzungsbereichs in der Brennkammer nimmt mit steigendem globalem Äquivalenzverhältnis zu. Signifikante Kerosinunterschiede in den genannten Kenngrößen wurden nicht beobachtet.

Die über das Brennkammervolumen integrierte OH*-Chemilumineszenz der Kerosine zeigt die erwartete funktionale Abhängigkeit vom Äquivalenzverhältnis. Der Chemilumineszenzverlauf der Kerosine bei 6 bar Brennkammerdruck ist identisch. Bei 5 bar Brennkammerdruck ist die OH*-Chemilumineszenzintensität von dem Referenz-JET-A-1 für alle globalen Äquivalenzverhältnisse im Mittel um 5 % geringer.

Zusätzlich zur bildgebenden OH*-Chemilumineszenzmesstechnik wurde das Chemilumineszenzspektrum der Flamme mit einem Spektrometer vermessen. Die integrale Chemilumineszenz (d. h. integriert über alle Spektralbereiche der Chemilumineszenzbänder der intermediären Spezies OH*, CH*, C₂* und CO₂*) der Kerosine steigt erwartungsgemäß linear mit steigender Leistung an, d. h. mit steigendem Äquivalenzverhältnis als auch mit steigendem Druck bei konstantem Äquivalenzverhältnis und konstantem Luftmassenstrom pro bar. Bei beiden Brennkammerdrücken ist die integrale Chemilumineszenz des JET-A-1-Referenzkerosins um 20 % bis 30 % niedriger verglichen mit den Multiblends, die in ihrer integralen Chemilumineszenz keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

Die Flammen zeigen bei einer Luftvorwärmtemperatur oberhalb der Endsiedetemperatur der Kerosine von z. B. $T_{\text{Air}} = 300\text{ °C}$ nur eine sehr geringe Rußneigung. Die Rußneigung nimmt mit abnehmender Luftvorwärmtemperatur deutlich zu. Luftvorwärmtemperaturen um die Start siedetemperatur der Kerosine führen zu einem instabilen Flammenverhalten. Bei einer Luftvorwärmtemperatur von $T_{\text{Air}} = 50\text{ °C}$ und einem Druck von 6 bar rußen die Flammen der Kerosine deutlich und die Flammen brennen stabil. Generell nimmt die Rußneigung aller Kerosine erwartungsgemäß mit dem Druck und dem Äquivalenzverhältnis zu. Die Auswertung des aufgenommenen Rußleuchtens zeigt, dass die Lage und Größe der rußenden Flammenbereiche der Kerosine sehr ähnlich sind. Die maximale Rußlumineszenz findet sich 30 mm stromabwärts der Brennerstirnplatte, also etwa 10 mm stromabwärts der maximalen Wärmefreisetzung. Bei diesen treibstoffreichen Flammen waren optische Messungen nur eingeschränkt möglich, da die Brennkammerinnenscheiben großflächig mit Ruß belegt wurden. Um die Kerosine hinsichtlich ihrer Rußlumineszenz vergleichen zu können, wurde daher ein kleinerer Bereich in der Brennkammer stromabwärts ausgewertet. Die Volumen-integrierte Rußlumineszenz in diesem Bereich steigt ab einem Äquivalenzverhältnis von $\phi = 0,9$ exponentiell für alle Kerosine an (Abb. 15). Die Intensität des Rußleuchtens der Treibstoffe ist bei 6 bar Brennkammerdruck um ungefähr eine Größenordnung höher als bei 5 bar Brennkammerdruck.

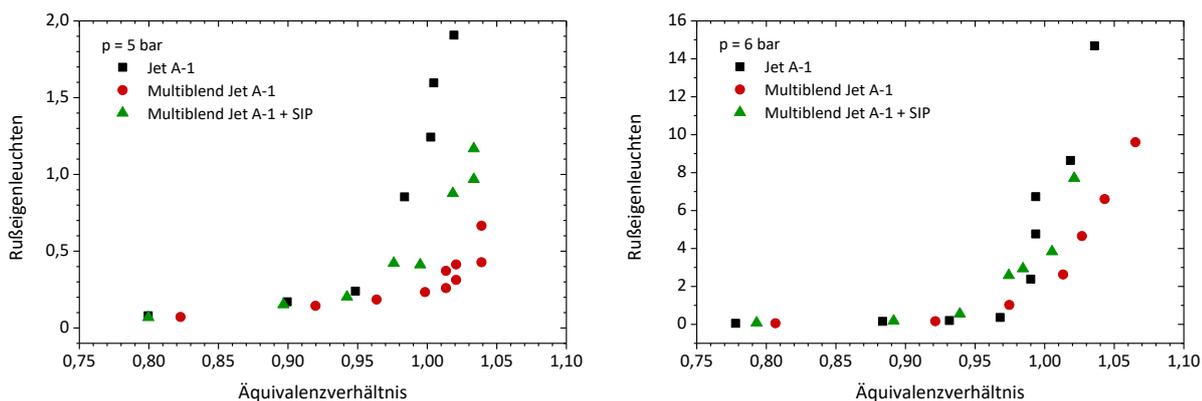


Abb. 15 Gemessene totale Rußlumineszenz der Kerosine als Funktion des Äquivalenzverhältnisses bei einem Brennkammerdruck von 5 bar (links) und 6 bar (rechts)

Die CO-Emissionen wurden mit drei verschiedenen Messgeräten bzw. Messtechniken (chemischer Sensor, LDAS, FTIR) gemessen. Die NO_x-Emissionen wurden ebenfalls mit drei verschiedenen Techniken bestimmt (chemischer Sensor, FTIR, Chemilumineszenz-Detektor). Alle Messgeräte liefern in den entsprechenden Messbereichen und Messgenauigkeiten übereinstimmende CO- und NO_x-Abgasemissionswerte. Insbesondere konnte für die untersuchten Brennkammerbetriebsbedingungen, d. h. für alle gewählten Äquivalenzverhältnisse und Drücke, kein signifikanter Unterschied zwischen den Kerosinen festgestellt werden. Abb. 16 zeigt exemplarisch die FTIR-Messungen (CO, CO₂, CO_x, NO_x) und die Messergebnisse des NO_x-Chemilumineszenz-Detektors (siehe die offenen Symbole).

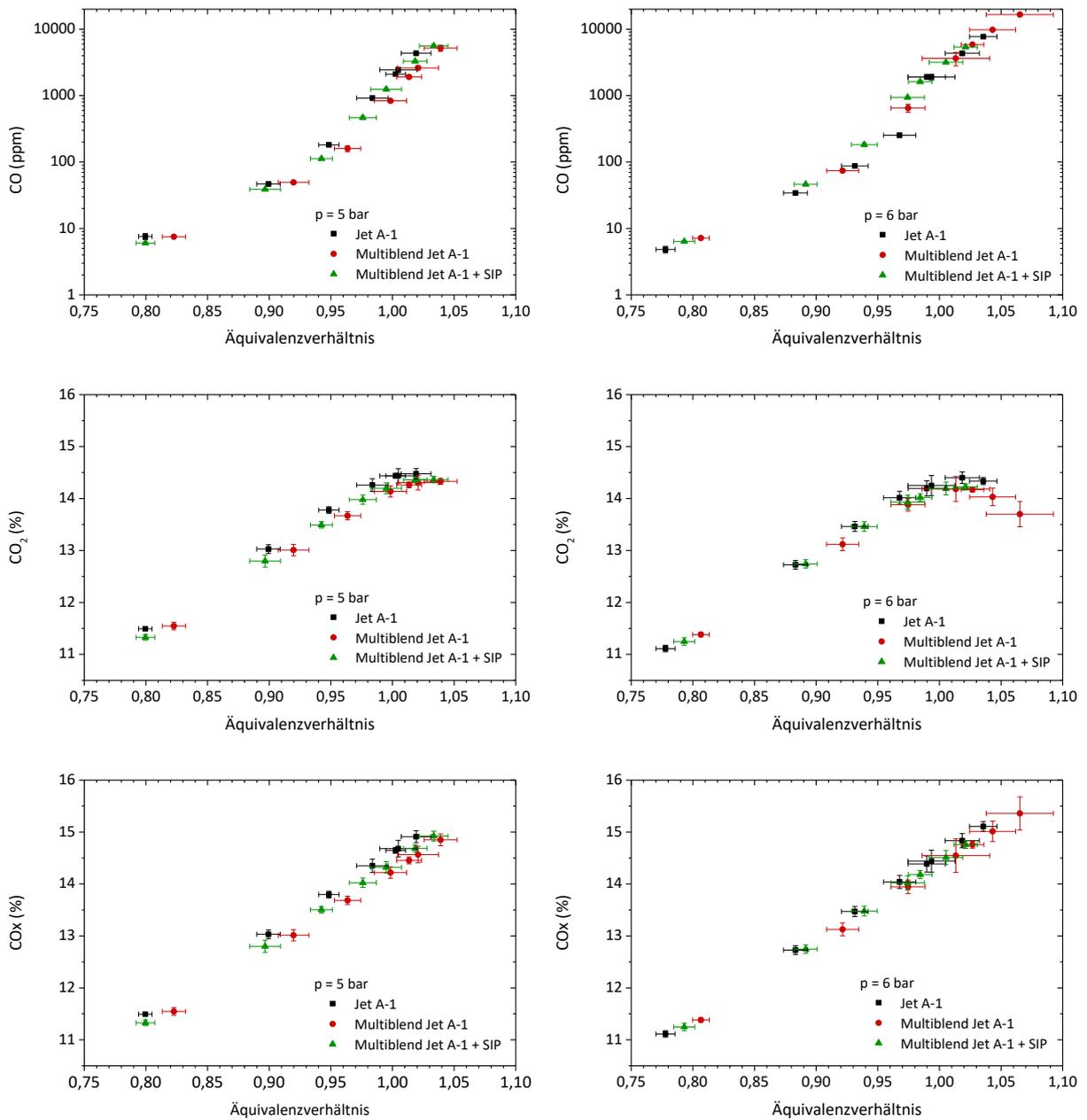


Abb. 16 Gemessene Abgasemissionen CO, CO₂, CO_x sowie NO_x der Kerosine als Funktion des Äquivalenzverhältnisses bei einem Brennkammerdruck von 5 bar (linke Spalte) und 6 bar (rechte Spalte) – Fortsetzung nächste Seite

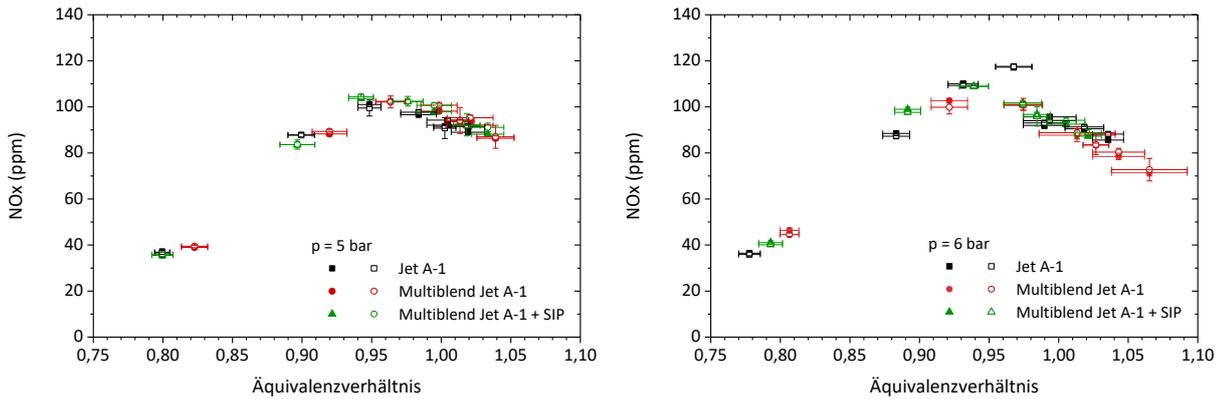


Abb. 16 Gemessene Abgasemissionen CO , CO_2 , CO_x sowie NO_x der Kerosine als Funktion des Äquivalenzverhältnisses bei einem Brennkammerdruck von 5 bar (linke Spalte) und 6 bar (rechte Spalte)

Die durchgeführten Messungen zeigten, dass Unterschiede zwischen den Kerosinen, z. B. in der Rußneigung, deutlicher werden bei treibstoffreichen, nahezu stöchiometrischen Flammen unter erhöhtem Druck sowie bei geringer Luftvorheiztemperatur und dass die Rußbildung in der Brennkammer sensitiv auf die vorliegenden experimentellen Gegebenheiten reagiert. Ferner zeigen die Messergebnisse vom Hochdruckverbrennungsprüfstand, dass obwohl in den Abgasemissionen (z. B. CO und NO_x) keine Unterschiede zwischen den untersuchten Kerosinen festgestellt werden konnte, die optischen Messtechniken doch geringe Unterschiede zwischen den Kerosinen darstellen können.

Es ist bekannt, dass die NO_x -Emissionen mit der flüssigen Treibstoffbeladung in der Brennkammer korrelieren, genauer, mit dem lokal vorliegenden Treibstoff-zu-Luft-Verhältnis, also mit der lokal vorliegenden Stöchiometrie. Die Treibstoffbeladung resultiert aus den physikalischen Treibstoffeigenschaften, die der Zerstäubung und Verdunstung des flüssigen Brennstoffs zu Grunde liegen. Größere Gebiete von treibstoffreichen, nahezu stöchiometrischen Treibstoff-Luft-Mischungen führen, trotz global mager eingestellten Verbrennungsbedingungen, zu lokal deutlich höheren Verbrennungstemperaturen und dadurch zu einer erhöhten NO_x -Bildung. Thermisch gebildetes NO_x liefert den größten Beitrag zu den NO_x -Emissionen von Gasturbinen relevanten Brennern. Die gebildete NO_x -Konzentration wird bestimmt durch die maximale Temperatur, die Aufenthaltszeit in den Gebieten erhöhter Temperatur und der lokalen Konzentrationen von Stickstoff und Sauerstoff. Die NO_x -Bildungsrate steigt mit der Quadratwurzel des Brennkammerdrucks und exponentiell mit der Temperatur an. Signifikante Mengen werden erzeugt, sobald eine Temperatur von etwa 1.700 K überschritten wird. Ferner ist die NO_x -Bildung unter global nahezu stöchiometrischen Bedingungen am größten: Fettere Verbrennungsbedingungen unterdrücken die O_2 -Dissoziation im Bildungsmechanismus und magere Bedingungen verlangsamen die Bildungsrate aufgrund der niedrigeren Flammentemperatur. Die identischen NO_x -Emissionen der untersuchten Kerosine können als Indiz für eine sehr ähnliche Treibstoffaufbereitung in der Brennkammer interpretiert werden.

Die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen bei gegebener Stöchiometrie (Treibstoff-Luft-Verhältnis bzw. Flammentemperatur) basiert auf einer komplexen chemischen Umsetzung des Ausgangskerosins in CO und dessen Oxidation zu CO_2 . Wie der CO -Oxidationsmechanismus im Detail aussieht, hängt von den Konzentrationen von H_2O , H_2 und HO_2 ab. Falls H_2O dominiert, wird CO im Wesentlichen durch OH zu CO_2 oxidiert. Die Konzentration von OH ist nichtlinear an die O_2 -Konzentration gekoppelt. Die Abnahme des Sauerstoffanteils bei steigendem Äquivalenzverhältnis führt zu einer überproportionalen Abnahme der CO -Oxidation und dementsprechend zu der gemessenen exponentiellen Zunahme von CO . Die Kerosine weisen keine signifikanten

Unterschiede im CO auf. Dies ist ein Indiz dafür, dass die wesentlichen chemischen Reaktionen und insbesondere die finalen Oxidationsreaktionen im gleichen Maße ablaufen. Dieses Ergebnis bestätigt insbesondere die während der Bodenläufe (Kapitel 7.1) ermittelten Abgaswerte.

Bekannterweise hängen die Abgasemissionen eines Kerosins außer von den gesetzten Verbrennungsbedingungen und dem gewähltem Verbrennungssystem auch von den chemischen und den physikalischen Eigenschaften ab. Kerosine mit nahezu identischen chemischen Verbrennungseigenschaften (wie Zündverzugszeit und Flammgeschwindigkeit) können sich in ihren physikalischen Eigenschaften so weit unterscheiden, dass die heterogene Verbrennung der Kerosine in technisch-relevanten Verbrennungssystemen nachweisbar unterschiedlich verläuft.

Tab. 16 Chemische Kerosinkenngößen

| Fuel | Kerosin/ Multiblend [Vol.-%] | Aromatengehalt [Vol.-%] | Wasserstoffgehalt [m-%] | H/C |
|------|--------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------|
| 1 | 100% JET A-1 (Lingen) | 16 | 13,920 | 1,927 |
| 2 | 61,7% JET A-1 + 29,9% HEFA + 8,4% ATJ | 9,9 | 14,314 | 1,991 |
| 3 | 75,1% JET A-1 + 16,6% HEFA + 3,3% ATJ + 5,0% SIP | 12 | 14,085 | 1,954 |

Die Tab. 16 gibt eine Übersicht über einige Kenngrößen, die sich aus der chemische Zusammensetzung der Kerosine ergeben. Emissionen korrelieren mit dem Aromatengehalt und mit dem H-Gehalt bzw. mit dem H/C-Verhältnis. Es ist bekannt, dass insbesondere der Aromatengehalt einen großen Einfluss auf die Rußemissionen hat. Einen zusätzlichen, kleineren Einfluss haben Cyclo-Alkane. Werden die Kerosine nach sinkenden Massenanteilen von Aromaten und Cyclo-Alkanen sortiert, so erhält man eine Rangfolge der zu erwartenden Rußneigung. Die Rangfolge der gemessenen Rußlumineszenzintensität der Kerosine folgt deren Aromatengehalt bzw. dem H/C-Verhältnis. Unter der Voraussetzung, dass die Gastemperaturen in den rußenden Bereichen nicht stark variieren, kann die lokale Rußlumineszenzintensität als Maß für den lokalen Rußvolumenbruch angesehen werden. Zu beachten hierbei ist aber, dass Kameraaufnahmen immer sichtlinienintegrierte Informationen liefern. Somit werden immer mittlere Rußlumineszenzintensitäten bzw. Rußvolumenbrüche betrachtet.

Tab. 17 Ausgewählte physikalische Kerosineigenschaften

| Fuel | Dichte (15 °C) [kg/m ³] | Brennwert [MJ/kg] | kin. Viskosität (-20 °C) [µm ² /s] | Oberflächen- spannung (20 °C) [N/m] | Siedebeginn [°C] | Siedeende [°C] |
|------|-------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| 1 | 807,0 | 43,210 | 4,957 | 25,3 | 160,9 | 250,4 |
| | 811,7 | 43,172 | 4,250 | | | |
| 2 | 789,0 | 43,525 | 4,195 | 24,3 | 159,0 | 251,2 |
| | | | 4,198 | | | |
| 3 | 797,9 | 43,400 | 4,421 | 25,0 | 161,3 | 248,6 |
| | | | 4,365 | | | |

Tab. 17 vergleicht einige ausgewählte physikalische Kerosineigenschaften. Die kinematische Viskosität zeigt die größte Variabilität. Für die Vergleichbarkeit der Verbrennungseigenschaften von unterschiedlichen Brennstoffen ist es wichtig, die Brennkammerbetriebsbedingungen konstant zu halten, was aber auf Grund der im allgemeinen unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften prinzipiell nur eingeschränkt möglich ist. So wurde der Luftmassenstrom pro bar bei allen Messungen konstant gehalten, um das Strömungsfeld in der

Brennkammer so ähnlich wie möglich zu halten. Deswegen wurde das gewünschte globale Äquivalenzverhältnis mit dem Treibstoffmassenstrom eingestellt, der auf Grund der unterschiedlichen stöchiometrischen Treibstoff- zu Luftmassenströmen entsprechend vom Kerosin abhängt. Als direkte Folge variiert in der Regel die thermische Leistung der verschiedenen Kerosinflammen. Zusätzlich beeinflussen die unterschiedliche Viskosität, Oberflächenspannung und Dichte die Spraybeladung der Brennkammer. Hinzu kommen die Kerosinparameter, die die Verdampfung der Spraytröpfchen kennzeichnen. Höhere Brennkammerdrücke und / oder höhere Luftmassenströme erleichtern in der Regel die Bewertung des Einflusses der chemischen Kerosineigenschaften auf das Verbrennungsverhalten, da die Zerstäubung und die Verdampfung weniger sensitiv auf die physikalischen Treibstoffeigenschaften werden.

Tab. 18 Betriebsparameter und physikalische Kerosineigenschaften sowie berechneter Sauterdurchmesser des Treibstoffsprays bei $\varphi=1$, $p=6$ bar

| Fuel | Treibstoffverbrauch [g/s] | thermische Energie [kW] | dyn. Viskosität (20 °C) [$\mu\text{Pa s}$] | kin. Viskosität (20 °C) [$\mu\text{m}^2/\text{s}$] | Dichte (20 °C) [kg/m^3] | Oberflächenspannung (20 °C) [N/m] | SMD [μm] |
|------|---------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 1 | 1,839 | 79,5 | 1588,4 | 1,976 | 804,0 | 25,4 | 12,7 |
| 2 | 1,828 | 79,5 | 1398,6 | 1,779 | 786,1 | 24,4 | 12,2 |
| 3 | 1,834 | 79,6 | 1464,5 | 1,842 | 794,9 | 25,1 | 12,4 |

Tab. 19 Betriebsparameter und physikalische Kerosineigenschaften sowie berechneter Sauterdurchmesser des Treibstoffsprays bei $\varphi=1$, $p=5$ bar

| Fuel | Treibstoffverbrauch [g/s] | thermische Energie [kW] | dyn. Viskosität (20 °C) [$\mu\text{Pa s}$] | kin. Viskosität (20 °C) [$\mu\text{m}^2/\text{s}$] | Dichte (20 °C) [kg/m^3] | Oberflächenspannung (20 °C) [N/m] | SMD [μm] |
|------|---------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 1 | 1,532 | 66,2 | 1588,4 | 1,976 | 804,0 | 25,4 | 13,6 |
| 2 | 1,523 | 66,3 | 1398,6 | 1,779 | 786,1 | 24,4 | 13,0 |
| 3 | 1,528 | 66,3 | 1464,5 | 1,842 | 794,9 | 25,1 | 13,3 |

Tab. 18 und Tab. 19 zeigen einige physikalischen Eigenschaften für die folgenden Brennkammerbetriebsbedingungen $\varphi=1$, $Q_{\text{Air}}=4,5$ g/s/bar, $T_{\text{Fuel}}=20$ °C, $T_{\text{Air}}=50$ °C. Eingetragen sind die Daten für den Brennkammerdruck 6 bar und 5 bar. Der MB+SIP zeigt unter den genannten Verbrennungsbedingungen generell die maximalen Unterschiede in den dargestellten Kenngrößen im Vergleich zum Referenzkerosin JET A-1. Die Viskositäten, die Oberflächenspannungen und der berechnete Sauterdurchmesser des Treibstoffsprays zeigen die größten Abweichungen. Der Sauterdurchmesser ist ein mittlerer Durchmesser einer Spraytröpfchengrößenverteilung, abgekürzt mit SMD (oder d_{32} bzw. d_s), und wird über das Volumen-zu-Oberflächen-Verhältnis aller Spraytröpfchen definiert. Zur Berechnung des Sauterdurchmessers wurde eine Standardkorrelation von Lefebvre und El-Shanawany verwendet, (Gleichung 6.31 in [Lef10]). Die Viskosität und die Oberflächenspannung der Kerosine wurden für verschiedene Temperaturen gemessen. Diese Daten wurden verwendet, um die Parameter in den Gleichungen für die Oberflächenspannung $\sigma(T) = \sigma_0 \left[\frac{1-T/T_c}{1-T_0/T_c} \right]^{11/9}$ und der kinematischen Viskosität $\eta(T) = A \exp\left(\frac{B}{T-C}\right)$ zu bestimmen. Die Temperaturabhängigkeit der Dichte wurde, wie in der DLR-Mitteilung 98-01 von Rachner [Rac98] dargestellt, berücksichtigt. Die Viskosität, die Oberflächenspannung, die Dichte und die Massenströme von Luft und Kerosin sind die wichtigen Kenngrößen für die Berechnung des Sauterdurchmessers einer Spraytröpfchengrößenverteilung. Der Sauterdurchmesser nimmt mit steigendem Luftmassenstrom und mit steigendem Brennkammerdruck bei konstantem Luftmassenstrom pro

bar exponentiell ab und wird daher immer insensitiver gegenüber Druck- und Luftmassenstromschwankungen. Die bessere Zerstäubung führt zu einer besseren Verdampfung des Sprays und zu einer homogeneren Mischung von Treibstoff und Luft. Der Einfluss der kinematischen Viskosität auf den Sauterdurchmesser nimmt mit steigendem Luftmassenstrom zu, allerdings ist der Sauterdurchmesser dann in der Regel bereits so klein, dass ein signifikanter Einfluss nur bei Kerosinen mit extrem unterschiedlichen Viskositäten zu beobachten ist. Der Unterschied in den Viskositäten der untersuchten Kerosine ist nicht so groß, dass das Verbrennungsverhalten der Treibstoffe davon beeinflusst wird.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass alle DEMO-SPK-Treibstoffe ein sehr ähnliches Verbrennungsverhalten im HiPOT zeigten. Die gemessenen CO- und NO_x-Emissionen weisen keine Treibstoffabhängigkeit auf. Die allgemeine Flammenstruktur, die Flammenlage sowie die chemischen Reaktionsbereiche der verschiedenen Treibstoffe zeigen keine Sensitivität auf den Treibstoff. Auch die Lage und Größe der Brennraumbereiche, die thermische Rußstrahlungsemissionen zeigen, sind insensitiv gegenüber den untersuchten Treibstoffen. Die Intensitäten der Rußstrahlungsemissionen der Treibstoffe sind unterschiedlich. Die Blends zeigen eine geringere Rußneigung im Vergleich zum Referenzkerosin. Die geringste Rußneigung zeigt der Multiblend-JET-A-1 ohne SIP-Anteil. Die Rangfolge der Rußlumineszenzintensität der untersuchten Kerosine folgt deren Aromatengehalt bzw. dem H/C-Verhältnis. Die Intensität der Rußlumineszenz der Treibstoffe ist bei dem Brennkammerdruck von 6 bar um ungefähr eine Größenordnung höher als bei dem Brennkammerdruck von 5 bar.

7.4 Fazit

Die begleitend zur Demonstration durchgeführten Technikumsversuche und Feldmessungen liefern Informationen zur grundlegenden Verbrennungscharakteristik des Multiblends in technischen Systemen sowie zur Schadstoffminderung. Die Feldmessungen zeigen die erwartete Minderung von Rußemissionen durch den Einsatz eines alternativen Kerosins mit höherem Wasserstoffgehalt. Eine Veränderung anderer Emissionsparameter wurde in diesem Zusammenhang nicht beobachtet. Diese Erkenntnis konnte durch Versuche am Hochdruckprüfstand validiert werden. Auch hier zeigte der Multiblend keine Veränderung in den gasförmigen Emissionen. Zusätzliche Messungen am Strömungsrohrreaktor zeigen eine Verminderung der Rußvorläuferpezies bei der Umsetzung des Multiblends. Durch diese Auswahl an Untersuchungen konnte daher nachgewiesen werden, dass die Emissionsveränderung nicht auf spezifische Triebwerkeffekte in der verwendeten Flugzeugturbine, sondern auf fundamentale Aspekte des Multiblends zurückzuführen ist.

8 Lebenszyklusanalysen für Multiblend-JET-A-1

Alternative Kraftstoffe sind ein vielversprechendes, kurzfristig verfügbares Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Flugverkehrssektor. Alternative Kraftstoffe mit hoher THG-Vermeidungsleistung können damit eine Schlüsselrolle zum Erreichen der ambitionierten Ziele des Sektors einnehmen. Eine der wesentlichen Voraussetzungen hierfür ist jedoch die Bereitstellung nachhaltiger Kraftstoffe mit nachvollziehbaren Umweltbewertungen. Ein möglicher Ansatz stellt die Verwendung von Nachhaltigkeitszertifizierungsansätzen aus dem Kontext der Erneuerbaren-Energien Richtlinie 2009/28/EC (EU RED) dar. Zwar spielt die Anrechnung von alternativen Flugkraftstoffen auf die nationalen Quotenverpflichtungen in den meisten EU-Mitgliedsstaaten bislang keine Rolle, dennoch können die generellen Nachhaltigkeitsvorgaben der EU RED, inklusive der verbindlichen THG-Einsparleistung, die Basis für die mögliche Anrechnung der alternativen Kraftstoffe in anderen Regelungen wie bspw. im Rahmen des ETS oder von CORSIA bilden.

Die Untersuchung der konkreten Treibhausgasemissionen bzw. Treibhausgasminderungseffekte für die eingesetzten SPK und Multiblend-JET-A-1 auf Basis tatsächlicher Werte war ein wesentlicher Bestandteil des DEMO-SPK-Projekts. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind Gegenstand dieses Kapitels.

Um die im Rahmen des Projekts DEMO-SPK eingesetzten SPKs und Multiblends hinsichtlich Ihrer Nachhaltigkeit umfassender bewerten zu können, wurden für alle diskutierten Kraftstoffe Lebenszyklusanalysen zur Erfassung ihrer ökologischen (Ökobilanzen, LCA) und ökonomischen (LCC) Effekte durchgeführt. Basis dafür bilden die untersuchten Bereitstellungsketten, welche zunächst übergreifend für alle Analysen dargestellt werden.

8.1 Bereitstellungsketten

Für die Lebenszyklusanalysen der Bereitstellung von Multiblend-JET-A-1 werden drei verschiedene Bereitstellungsketten betrachtet, welche im Folgenden als Fall A, Fall B und Fall C bezeichnet werden. Für alle dieser Fälle gelten die folgenden Randbedingungen:

- a. Berücksichtigung der in DEMO-SPK untersuchten erneuerbaren Kerosine,
- b. Bereitstellung der erneuerbaren Kerosine von den jeweiligen bestehenden bzw. im Bau befindlichen Standorten der Hersteller,
- c. SPK-Belieferung stets an den Flughafen Leipzig/Halle mit DHL/EAT als Abnehmer, dessen Tanklager ausschließlich über Kesselwagen beliefert wird,
- d. Berücksichtigung von JET A-1 als fossile Komponente des Multiblends.

Neben diesen Randbedingungen werden ferner fallspezifische Annahmen berücksichtigt, die im Folgenden zusammen mit den jeweiligen Fällen erläutert werden.

8.1.1 Fall A | Demonstrierte Bereitstellungskette in DEMO-SPK

Der Fall A bildet die im DEMO-SPK-Projekt real demonstrierte Bereitstellungskette ab (Kapitel 6.1). Sinngemäß sollen die Analysen eine DEMO-SPK-getreue Bereitstellungskette abbilden, weswegen projektbezogene Versand- und Logistikdokumente die wesentliche Datengrundlage bilden. Für den Fall A wurde lediglich zur Berechnung der Kerosingestehungskosten eine großtechnische Produktion der synthetischen Komponenten unterstellt.

8.1.2 Fall B | Geplante Bereitstellungskette in DEMO-SPK

Fall B bildet die ursprünglich für die Demonstration in DEMO-SPK geplante Bereitstellungskette mit einem Multiblend-JET-A-1 bestehend aus vier Komponenten (inkl. SIP) ab. Die Bereitstellungsketten des HEFA-SPK, ATJ-SPK sowie des hergestellten Multiblend-JET-A-1 sind damit kongruent zum Fall A. Im Fall B wird für die Multiblend-Herstellung den übrigen Komponenten lediglich eine vierte Komponente (SIP) hinzugemischt. Das SIP wird am Raffineriestandort in Brasilien in Tankcontainer gefüllt und nach Hamburg transportiert. Analog zu ATJ-SPK wird es über Hamburg als Import-Hafen mittels straßengebundenem Containertransport weiter nach Speyer transportiert.

8.1.3 Fall C | Beispielhafte ganzjährige Versorgung des Flughafens LEJ

In Fall C wird die theoretische, großtechnische Produktion der synthetischen Komponenten unter Berücksichtigung der im Projekt DEMO-SPK real getesteten, volumetrischen Zusammensetzung des Multiblend-JET-A-1 berücksichtigt (Fall A, Kapitel 6.1.4). Hierbei wird zugrunde gelegt, dass der Abnehmer DHL/EAT einer ganzjährigen Belieferung des Flughafens Leipzig/Halle zur Betankung der eigenen und vertraglich gebundenen Kunden zustimmt. Die Lieferkette wird basierend auf der im Fall A erprobten Variante optimiert, um somit auch reale, großtechnische Bedingungen zu berücksichtigen. Um in Fall C eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu den Fällen A und B herzustellen, werden als Produktionsstandorte der synthetischen Komponenten weiterhin die jeweiligen Standorte in den USA berücksichtigt. Je nach Projektierung der Anlagenbetreiber werden lediglich die Anlagenkapazitäten erhöht.

Die Herstellung des Multiblend-JET-A-1 (bzw. der Mischvorgang) findet in den USA im Hafen von Long Beach statt, d. h. in der Nähe des Standortes des HEFA-SPK-Produzenten (Paramount, Long Beach), um die Transporte der synthetischen Komponenten möglichst gering zu halten (das HEFA-SPK macht den größten Anteil der synthetischen Komponenten im Multiblend aus, Abb. 17). Hierbei bietet sich auch die Hafennähe für die Anlieferung der benötigten Mengen an JET A-1 an. Für den Mischvorgang wird ein Tanklager im Hafen von Long Beach genutzt. Der anschließende See-Transport des Multiblend-JET-A-1 nach Europa erfolgt mittels Produkttanker. Die Lieferung erfolgt zum Hafen von Rotterdam, wo Tanklager für den Umschlag von JET A-1 zugelassen sind und eine Kesselwagenbeladung sowie die nachfolgenden Kesselwagentransporte realisiert werden können. Im Fall C wird eine monatliche Belieferung von Multiblend-JET-A-1 aus den USA zum Tanklager im Hafen von Rotterdam angenommen. Die Anlieferung des Multiblend-JET-A-1 an das Tanklager der EAT/DHL am Flughafen LEJ erfolgt über Kesselwagen. Ferner wird in Fall C auch die Anrechnung des eingesetzten Multiblends im Europäischen Emissionshandel berücksichtigt.

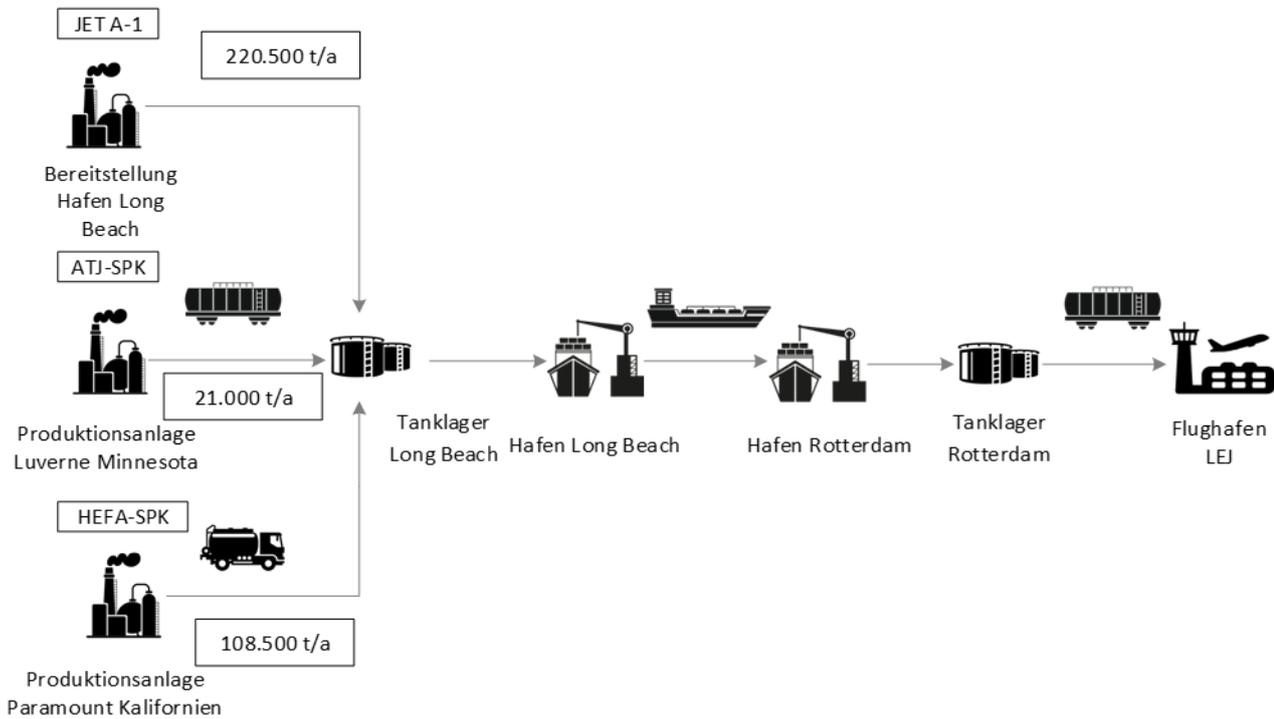


Abb. 17 Schematische Darstellung der Bereitstellungskette für Fall C

8.2 Ökobilanz

Die ökologischen Lebenszyklusanalysen wurden zunächst separat für die betrachteten erneuerbaren Kerosine erstellt. Darauf aufbauend erfolgte, unter Einbeziehung des fossilen JET A-1 und schließlich der motorischen Verbrennung der Kraftstoffe, die Analyse der gesamten Bereitstellungskette für den Multiblend. Im Rahmen dieser Lebenszyklusanalysen wurden sowohl verschiedene Umweltwirkungsbereiche (z. B. THG-Emissionen, Versauerung, Eutrophierung) betrachtet, als auch unterschiedliche methodische Ansätze verwendet. Die verwendeten Methoden orientieren sich dabei zum einen an der Nachhaltigkeitsbewertung auf wissenschaftlicher Ebene (Methodik der ISO 14040) und zum anderen am aktuellen bzw. zukünftigen politischen Rahmen für biobasierte Kraftstoffe (Methodik der EU RED) [09][Eur09c].

Für die ökologische Bewertung der hier betrachteten Bereitstellungskonzepte erneuerbaren Kerosins und des Multiblend-JET-A-1 kommt das Instrument der Ökobilanzierung (auch Life Cycle Analysis, LCA) zum Einsatz. Hierbei wird der Lebenszyklus des untersuchten Produktes von der Rohstoffherzeugung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung analysiert, um die mit diesem Produkt verbundenen potenziellen Umwelteffekte möglichst vollständig zu erfassen. Dabei werden auch alle entlang des Lebensweges verwendeten Hilfs- und Betriebsstoffe betrachtet. Die mit der Produktion und Nutzung dieser Hilfs- und Betriebsstoffe sowie der sonstigen Produkte und Dienstleistungen verbundenen Aufwendungen und Emissionen werden ebenso berücksichtigt. Die Methode der Ökobilanzierung ist definiert in den DIN ISO Standards 14040 und 14044[09][18]. Zur Anwendung der Methode nach DIN ISO 14040/14044 wurden folgende Rahmenbedingungen festgelegt:

- Bilanzgrenzen für die Bewertung der erneuerbaren Kerosine. Die Analyse der erneuerbaren Kerosine umfasst die gesamte Bereitstellungskette, von der Biomasseproduktion, über Konversionsprozesse bis zum Transport der Kerosine zum Tanklager, in dem der Multiblend erzeugt wird. Der Prozess Biomasseproduktion umfasst dabei die jeweiligen Anbau- und Bereitstellungsprozesse beim Einsatz von Anbaubiomasse. Werden für den Zweck der Biokraftstoffherzeugung Rest- und Abfallstoffe verwendet, so beginnt die Betrachtung erst mit dem Transport des Einsatzstoffes zur Konversionsanlage. Vorgelagerte Aufwendungen werden nicht berücksichtigt.
- Bilanzgrenzen für die Bewertung des Multiblend-JET-A-1. Für die betrachteten Multiblends beinhaltet der Bilanzierungsrahmen die Bereitstellungsketten der erneuerbaren Kerosine, die Bereitstellungskette des JET A-1 bis zum Tanklager, den Transport des Multiblends zum Flughafen sowie die motorische Nutzung in der Flugzeugturbine.
- Die funktionelle Einheit wurde als 1 MJ Kerosin definiert. Die funktionelle Einheit stellt die Bezugsgröße für die Ergebnisdarstellung dar. Ergebnisse der Umweltwirkungskategorie Treibhauseffekt werden demzufolge in gCO₂-Äquivalente pro MJ Kraftstoff ausgedrückt.
- Für die Wirkungsabschätzung kam die Methode ReCiPe (H) v.1.13 [Hui] zum Einsatz. Diese Methode erlaubt es, die ermittelten Emissionen nach definierten Faktoren zusammenzufassen und im Rahmen leichter verständlicher Kategorien (z. B. Treibhauseffekt) auszudrücken.
- Nebenprodukte wurde mittels Allokation nach unterem Heizwert berücksichtigt.⁷ Überschussstrom mittels Gutschrift.⁸ Diese Methoden erlauben es, die Umweltwirkungen auf die verschiedenen, erzeugten Produkte aufzuteilen um auch für Multi-Produktsysteme eine produktbezogene Bewertung zu ermöglichen. Bei der Allokation werden die ermittelten Umweltwirkungen nach einem definierten Parameter (z. B. nach dem unteren Heizwert, den Produktpreisen oder der Masse) zwischen den erzeugten Produkten aufgeteilt. Die Methode der Gutschrift geht davon aus, dass durch das erzeugte Nebenprodukt andere Produkte ersetzt werden können und damit nicht mehr produziert werden müssen. Die somit vermiedenen Emissionen werden als Gutschrift dem Produktsystem zugeschrieben.

Im Folgenden werden die Ergebnisse beschrieben und diskutiert.

8.2.1 Ökobilanzierung der erneuerbaren Kerosine gemäß DIN ISO 14040/14044

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung der erneuerbaren Kerosine sind in Abb. 18 auf Seite 62 dargestellt. Darin zu sehen sind anteilig die Wirkung der Prozessschritte Biomassebereitstellung, Transport und Konversion (des Rohstoffs zu Kerosin) an der Gesamtwirkung der jeweiligen Wirkkategorien. Für die Bewertung wurden die in Tab. 20 dargestellten Umweltwirkungskategorien betrachtet.

⁷ Da es sich bei den hier betrachteten Nebenprodukten ausschließlich um Erzeugnisse zur energetischen Nutzung handelt, wurde dieses Allokationsverfahren gewählt.

⁸ Verwendung eines Emissionsfaktors für die gleiche Art der Stromerzeugung auf Basis fossiler Brennstoffe, z. B. wird angenommen, dass Strom aus einem Biogas-BHKW die gleiche Menge Strom aus einem Erdgas-BHKW ersetzt, dementsprechend wird ein Emissionsfaktor für Strom aus einem Erdgas-BHKW für die Gutschrift verwendet.

Tab. 20 Betrachtete Wirkkategorien

| Wirkkategorie | Beschreibung |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GWP (Global warming potential) | Treibhauseffekt: Potenzial, die globalen Temperaturen durch Treibhausgasemissionen zu ändern. Einheit: kg CO ₂ -Äq. |
| ALOP (Agricultural land occupation potential) | Landwirtschaftliche Bodennutzung: bezieht sich auf die kontinuierliche Nutzung der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Einheit: m ² |
| FDP (Fossil depletion potential) | Verbrauch fossiler Ressourcen: Gibt die Abnahme der Verfügbarkeit fossiler Ressourcen an. Einheit: kg oil-Äq. |
| FEP (Freshwater eutrophication) | Frischwassereutrophierung: Ammoniak-, Nitrat-, Stickoxid- und Phosphoremissionen wirken sich auf die Eutrophierung (Aufbau einer Konzentration chemischer Nährstoffe in einem Ökosystem) aus. Einheit: kg PO ₄ ³⁻ -Äq. |
| HTPinf (Human toxicity) | Humantoxizität: Index, der die toxische Wirkung einer in die Umwelt freigesetzten chemischen Einheit auf den Menschen widerspiegelt. Einheit: kg 1,4 DB-Äq. |
| MET (Marine ecotoxicity potential) | Ökotoxizität: Auswirkungen von z. B. Schwermetallen auf das Ökosystem. Einheit: kg 1,4 DB-Äq. |
| PMFp (Particulate matter formation potential) | Partikelemissionsbildungspotenzial: Gibt das Potenzial an Emissionen extrem kleiner Partikel aus anthropogenen Prozessen, wie Verbrennung, Rohstoffgewinnung usw., an. Einheit: kg PM |
| TAP (Terrestrial acidification) | Versauerung: Versauerungspotenzial von Wasser und Böden durch SO ₂ - und NO _x -Emissionen. Einheit: Kg SO ₂ -Äq. |
| WDP (Water depletion potential) | Wasserverbrauch: Einheit: m ³ water |

Erwartungsgemäß variieren die Anteile ausgehend vom Treibhausgaspotenzial (GWP100) über die weiteren Wirkungskategorien, wie Wasserbedarf (WDP), Eutrophierungs- und Versauerungspotenzial (FEP; TAP100), der gesamten Bereitstellungskette erheblich.

Im Fall des ATJ-SPK zum Beispiel werden die Wirkungskategorien Verbrauch landwirtschaftlicher Nutzfläche (ALOP) und Wasserverbrauch (WDP) vom Prozess der Biomassebereitstellung dominiert. Dies ist in diesem Fall in erster Linie auf die Nutzung von Ackerfläche für den Maisanbau und dem mit dem Anbau verbundenen Wasserbedarf zurückzuführen. Auch das terrestrische Versauerungspotenzial für ATJ-SPK wird in erster Linie vom Prozess der Biomassebereitstellung getrieben, ursächlich sind hier die luftgetragene Ammonium- und Stickoxid-Emissionen der Anbauprozesse. Die Emissionen / Aufwendungen der Biomassebereitstellung tragen zwar auch signifikant zur Gesamtwirkung der weiteren betrachteten Kategorien bei, dominiert werden diese jedoch von den Emissionen / Aufwendungen der Konversionsprozesse. Ursächlich dafür ist die Nutzung fossiler Brennstoffe zur Prozessenergiebereitstellung. Die Nutzung ebendieser Brennstoffe und die daraus resultierenden Schwermetall- und klimarelevanten Emissionen sind verantwortlich für den hohen Anteil am Verbrauch fossiler Ressourcen (FDP), an der Humantoxizität (HTPinf) und am Treibhausgaspotenzial (GWP). Auch der hohe Anteil der Konversionsprozesse an der Marinen Ökotoxizität ist auf die Schwermetallemissionen aus der Verbrennung fossiler Ressourcen zurückzuführen. Die die Frischwassereutrophierung (FEP) verursachenden Phosphat und Phosphoremissionen entstammen sowohl den Konversions- als auch Biomassebereitstellungsprozessen, ursächlich dafür sind neben der Düngemittelapplikation der Anbauprozesse abermals die

Verbrennung fossiler Brennstoffe. Die mit der Düngemittelapplikation verbundenen klimarelevanten Lachgasemissionen wiederum haben zusammen mit den THG-Emissionen aus der Düngemittelproduktion einen signifikanten Einfluss auf das gesamte THG-Potenzial (GWP) von ATJ-SPK.



Abb. 18 LCA der betrachteten erneuerbaren Kerosine
 Folgende Wirkkategorien wurden nach ReCiPe (H) v.1.13 betrachtet: Treibhausgaspotenzial (GWP100), landwirtschaftliche Nutzfläche (ALOP), Verbrauch fossiler Energieträger (FDP), Frischwasser Eutrophierung (FEP), Humantoxizität (HTPinf), Meerwasser-Ökotoxizität (METPinf), Partikelemissionen (PMPF), terrestrisches Versauerungspotenzial (TAP100), Wasserbedarf (WDP)

Die Darstellungsweise in Abb. 18 wurde gewählt, zum einen um das Verschieben der wesentlichen Treiber innerhalb der Lebenszyklusbetrachtung einer Prozesskette, und zum anderen um die Unterschiedlichkeit der hier betrachteten erneuerbaren Kerosine aufzuzeigen. Beispielhaft wird dies nachfolgend anhand der Treibhausgasbilanzen diskutiert.

Treibhausgasbilanz. Ein ähnlich differentes Bild wie bei der Wirkungsverteilung der einzelnen Prozessschritte zeigt sich in der Höhe und Verteilung der Gesamt-THG-Emissionen der erneuerbaren Kerosine. Diese liegen in einer Bandbreite von 3,1 (HEFA-SPK) bis 35,8 g CO₂-Äq./MJ (ATJ-SPK).

Ursächlich für diese relativ großen Unterschiede ist eine Reihe von Faktoren die anhand der folgenden Abb. 19 näher erläutert werden sollen. Wesentliche Unterschiede bei der Bewertung der Emissionen aus der Biomassebereitstellung sind zum einen durch die eingesetzten Rohstoffe und zum anderen durch die diesbezüglich gewählten Systemgrenzen begründet. Während ATJ-SPK und SIP auf der Verarbeitung von Anbaubiomasse basieren, wird im Fall des HEFA-SPK mit Rindertalg ein als Abfall deklarierter Rohstoff eingesetzt. Das bedeutet, dass die Bewertung der Bereitstellungskette mit dem Transport des Rindertalgs zur Konversionsanlage beginnt, die vorgelagerten Prozesse zur Bereitstellung des Rindertalgs (z. B. die Verfügbarmachung in einer Tierkörperverwertungsanlage), liegen aufgrund der Abfalldeklaration außerhalb der gewählten Systemgrenzen. Somit sind die spezifischen Emissionen für die Rindertalgbereitstellung wesentlich geringer als die Emissionen für die Bereitstellung der Anbaubiomasse, welche im Wesentlichen auf die Emissionen aus der Düngerproduktion, die direkten Emissionen aus der N-Düngerapplikation und die Emissionen aus dem Einsatz fossiler Kraftstoffe in landwirtschaftlichen Maschinen zurückzuführen sind.

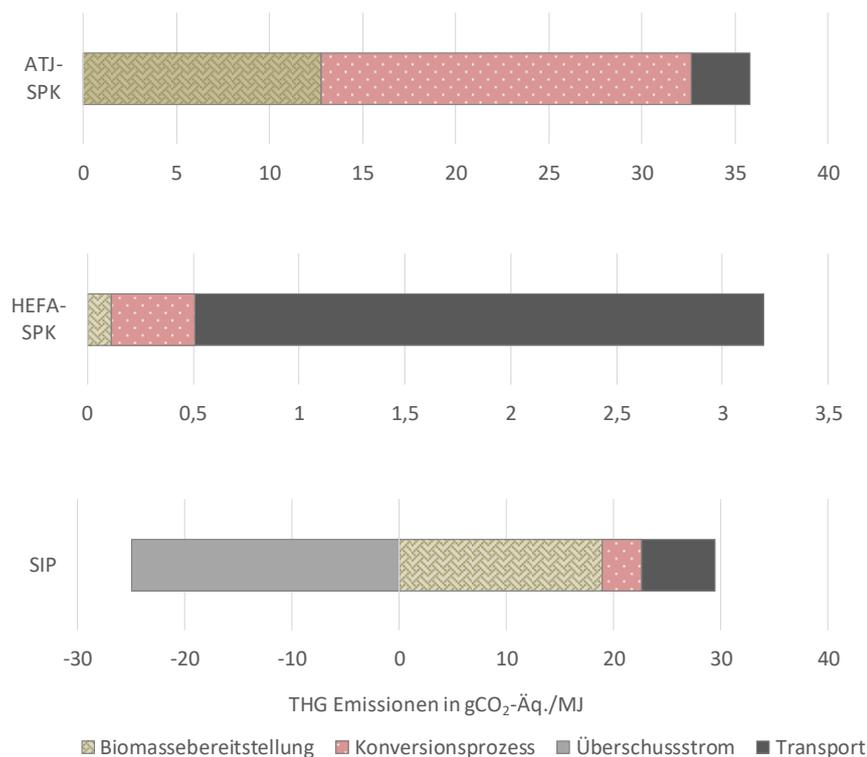


Abb. 19 Spezifische THG-Emissionen der betrachteten erneuerbaren Kerosine
Für die bessere Lesbarkeit wurde die x-Achse für die Darstellung der THG-Emissionen des HEFA-SPK um Faktor 10 vergrößert.

Auch die mit den Konversionsprozessen verbundenen Emissionen stellen sich sehr unterschiedlich dar. Und auch hier werden für HEFA-SPK die geringsten Emissionen verursacht. Ursächlich dafür ist die Nutzung von prozessintern bereitgestellten Nebenprodukten zur Erzeugung der Prozessenergie. In diesem Fall handelt es sich um die Nutzung von Naphtha, einerseits für die Dampfreformierung der Produktion des benötigten Wasserstoffs und zum anderen zur Bereitstellung von Prozessdampf. Ähnliches gilt für die konversionsbedingten THG-Emissionen für SIP. Die bei der Verarbeitung des Zuckerrohrs anfallende Bagasse wird mit weiteren landwirtschaftlichen Reststoffen als Substrat zur Biogasproduktion verwendet. Durch die nachgeschaltete Nutzung des Biogases in einem BHKW wird so die benötigte Prozessenergie bereitgestellt, was analog zu HEFA-SPK zu einer geringen Emissionsbelastung des Konversionsprozesses führt. Überschüssiger Strom kann extern genutzt werden und wird mittels Gutschrift berücksichtigt. Für die Gutschrift wurde der Emissionsfaktor eines

erdgasbetriebenen BHKW angenommen. Dies führt in Summe zu einer deutlichen Reduktion der Gesamt-THG-Emissionen für SIP-SPK.

Da eingesetzte Transportmittel, Kraftstoffverbräuche, Kraftstoffe und Fahrkilometer über alle drei Konzepte annähernd gleichen Randbedingungen (vgl. Beschreibung der Logistikketten) unterliegen, gibt es keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der mit den Transportprozessen verbundenen THG-Emissionen. Der hohe Anteil der Transportemissionen an den Gesamt-THG-Emissionen von HEFA-SPK ist, wie bereits beschrieben, auf die sehr geringen THG-Emissionen der Prozesse Biomassebereitstellung und Konversion zurückzuführen.

Die relativ hohen THG-Emissionen die durch die Konversionsprozesse für ATJ-SPK verursacht werden, resultieren in erster Linie aus der Nutzung fossiler Energieträger zur Deckung des prozessbedingten Energiebedarfs. Ein erhöhter Anteil regenerativer Energie im Prozessenergiemix könnte perspektivisch zu einer deutlichen Reduktion der Gesamt-THG-Emissionen führen, wie folgende Sensitivitätsbetrachtung zeigt. Wird, wie in Abb. 20 dargestellt, sowohl die fossile Wärme- als auch Strombereitstellung durch erneuerbare Energie realisiert, können die mit ATJ-SPK verbundenen THG-Emissionen um bis zu 43 % gegenüber dem Basisfall reduziert werden. Unterstellt wurde in diesem Fall die Wärmebereitstellung über einen Holzhackschnitzelheizkessel und die Bereitstellung von Strom über eine Photovoltaik-Anlage.

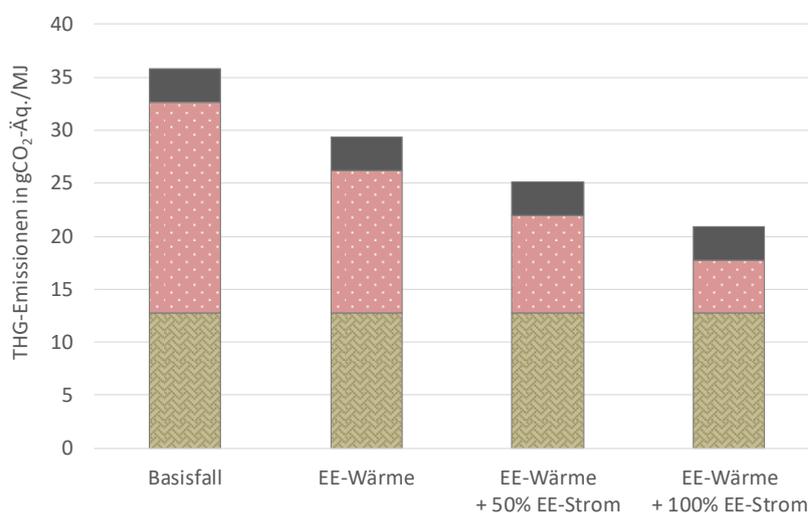


Abb. 20 Sensitivitätsbetrachtung der THG-Bilanzierung am Beispiel von ATJ-SPK

8.2.2 Ökobilanzierung von Multiblend-JET-A-1 gemäß DIN ISO 14040/14044

Auf Basis der in Kapitel 8.2.1 beschriebenen Bewertung der einzelnen erneuerbaren Kerosine und der Bewertung für die Bereitstellung des fossilen JET A-1⁹ wurden im Folgeschritt für die produzierten Multiblends, inklusive deren Transport vom Tanklager zum Flughafen LEJ und einschließlich dessen Nutzung im Flugzeug, Ökobilanzen erstellt.

Im Folgenden wird die THG-Minderung der Multiblends für die unterschiedlichen Bereitstellungsketten (Kapitel 8.1) beschrieben und diskutiert.

Abb. 21 zeigt für die Multiblends eine deutliche THG-Minderung von bis zu 35 % gegenüber dem fossilen JET A-1. Der größte Beitrag der Gesamt-THG-Emissionen wird durch die motorische Verbrennung im Flugzeug verursacht. Der THG-Effekt der Emissionen in hohen Höhen wurde hier nicht betrachtet; vereinfachend kann

⁹ Die Ökobilanzierung gemäß DIN ISO 14040/14044 ergab für die THG-Emissionen des untersuchten konventionellen JET A-1 einen Wert von 90 gCO₂-Äq./MJ.

unterstellt werden, dass dieser Effekt alle der hier betrachteten SPK und Multiblends jeweils gleich wäre. Da die biogenen CO₂-Emissionen in der THG-Bilanz nicht berücksichtigt werden¹⁰, ist hierfür der Anteil des fossilen JET A-1 maßgeblich. Das zeigen die im Gegensatz zu den Fällen A und C höheren THG-Emissionen des Falls B. Ursächlich dafür ist die niedrige Blendrate des SIP und der damit entsprechend höhere Anteil fossilen JET A-1 im Mix (Kapitel 8.1.3). Die mit der Bereitstellung der erneuerbaren Kerosine verbundenen THG-Emissionen haben in dieser Zusammensetzung keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtemissionen.

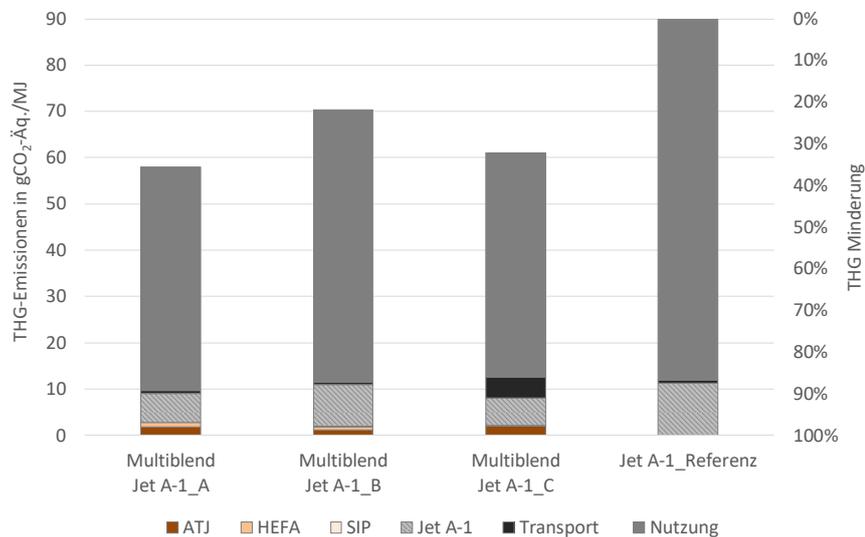


Abb. 21 Spezifische Gesamt-THG-Emissionen und THG-Minderungspotenzial der betrachteten Multiblends-JET-A-1 gegenüber konventionellem JET A-1

8.2.3 THG-Minderung der erneuerbaren Kerosine nach EU RED 2009/28/EC

Biokraftstoffe müssen, bei einer Anrechnung auf die jeweilige nationale Quote, den Nachhaltigkeitskriterien der EU RED (und ab 2021 denen der RED II) genügen (vgl. auch Kapitel 9.2.1.1). Kernpunkt dieser Kriterien ist neben Aspekten des Natur- und Flächenschutzes der Nachweis einer THG-Minderung gegenüber eines definierten fossilen Referenzwertes. Aus diesem Grund wurden für die im Projekt DEMO-SPK eingesetzten erneuerbaren Kerosine neben der ökobilanziellen Bewertung gemäß der Standards DIN ISO 14040 und 14044 (Kapitel 8.2.1) auch die THG-Emissionen und entsprechende Minderungspotentiale gemäß den Vorgaben der EU RED ermittelt. Die im Anhang V der EU RED enthaltene Methode orientiert sich im Wesentlichen an der in Kapitel 8.2.1 bereits ausführlich beschriebenen Methode der Ökobilanzierung. Die innerhalb der Phasen der Ökobilanzierung zu treffenden Festlegungen und Annahmen ermöglichen eine dem definierten Ziel entsprechend dedizierte Bilanzierung. Diese Freiheitsgrade sind aus wissenschaftlicher Sicht eine der Stärken der Ökobilanzierung, jedoch sind die Ergebnisse aufgrund der oft differenten Annahmen und Rahmenbedingungen schwer miteinander vergleichbar, was zur Anwendung in einem ordnungspolitischen Rahmen eher ungeeignet ist. Hier wird ein robuster und einheitlicher Ansatz gefordert. Aus diesem Grund enthält die EU RED die Beschreibung eines vereinfachten Ansatzes (z. B. die Vorgabe eines fossilen Referenzwertes für die Ermittlung der THG-Minderung) für die Berechnung des THG-Minderungspotenzials, das für den Biokraftstoff mindestens 50% (60% für Neuanlagen) betragen muss, um auf die nationale Quote angerechnet werden zu können. Folgende in Tab. 21 aufgelisteten Vorgaben gelten für die Ermittlung des THG-Minderungspotenzials nach den Vorgaben der EU RED.

¹⁰ Gemäß IPCC werden biogene CO₂-Emissionen nicht als klimarelevant angesehen, da davon ausgegangen wird, dass das bei der Verbrennung emittierte CO₂ beim Aufwuchs der Pflanze gebunden wurde; dies gilt implizit auch für biogene Rest-/ Abfallstoffe.

Tab. 21 Vorgaben zur Ermittlung des THG-Minderungspotenzials nach EU RED

| EU RED 2009 / 28 / EC bzw. RED-II-Richtlinie (ab 2021) | |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Systemgrenzen ¹¹ | Well-to wheel |
| Charakterisierungsfaktoren | IPCC 2001 |
| Berücksichtigung von Nebenprodukten ¹² | Allokation nach unterem Heizwert |
| Fossile Referenz zur Ermittlung der THG-Minderung | 83,8 g CO ₂ -Äq. / MJ (RED) und 94 g CO ₂ -Äq. / MJ (RED II) |

Wie aus Abb. 22 ersichtlich, erreichen die betrachteten erneuerbaren Kerosine gegenüber der definierten fossilen Referenz die erforderliche THG-Minderung von 50 %. Während durch die Nutzung von ATJ-SPK gut 57 % der THG-Emissionen vermieden werden können, sind es im Fall des HEFA-SPK aufgrund des ausschließlichen Einsatzes von als Abfall deklarierten Rindertalg sowie der Nutzung prozessintern anfallender Nebenprodukte zur Deckung des prozessspezifischen Energiebedarfs sogar 96 % THG-Minderung gegenüber der fossilen Referenz. Für die THG-Emissionen des Multiblend auf Basis der Annahmen des Multiblend-JET-A-1 Fall A würde sich unter Verwendung der gemäß RED ermittelten THG-Emissionen der erneuerbaren Kerosine und des in der RED definierten fossilen Referenzwertes für die Mischung ein THG-Minderungspotential von 35 % ergeben.

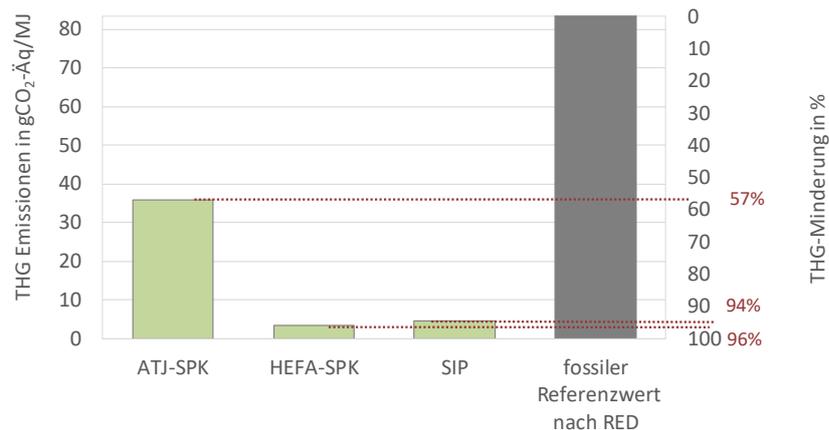


Abb. 22 Spezifische Gesamt-THG-Emissionen und THG-Minderungspotenzial der betrachteten erneuerbaren Kerosine gegenüber der fossilen Referenz gemäß EU RED

8.3 Kostenbetrachtung

Zur weiteren Bewertung der eingesetzten SPK und des Multiblends erfolgt ergänzend zur Ökobilanz eine Lebenszykluskostenanalyse. Ziel dabei ist es, die Kosten sowie die wesentlichen Kostenparameter des Multiblends für die Bereitstellungsketten zu analysieren und gegenüber einer fossilen Alternative einzuordnen. Als

¹¹ Gemäß RED werden für den Einsatz von Rest- und Abfallstoffen keine Vorkettenemissionen angenommen. Dies entspricht dem Vorgehen wie in Kapitel 8.2.1.

¹² Gemäß RED wird Überschussstrom mittel Gutschrift berücksichtigt. Dafür wird ein Emissionsfaktor für die gleiche Art der Stromerzeugung auf Basis fossiler Brennstoffe verwendet, z. B. wird angenommen, dass Strom aus einem Biogas-BHKW die gleiche Menge Strom aus einem Erdgas-BHKW ersetzt, dementsprechend wird ein Emissionsfaktor für Strom aus einem Erdgas-BHKW für die Gutschrift verwendet.

Lebenszykluskosten werden die kumulierten Kosten eines Produkts über den gesamten Lebenszyklus bezeichnet. Die Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC) stellt nach [Deu04] den Prozess der wirtschaftlichen Analyse zur Abschätzung der Beschaffungs- und Besitz- und Entsorgungskosten eines Produktes dar. Die Lebenszyklusphasen sind dabei so auszuwählen, dass sie an die speziellen Bedürfnisse der spezifischen Analyse angepasst sind [Deu04, 5 ff]. Unter den Randbedingungen in DEMO-SPK werden im Wesentlichen die Herstellung, der Transport und die Distribution, die Lagerung sowie die Anrechnung im EU ETS als Lebenszyklusphasen des Multiblends berücksichtigt.

Die Berechnung der Gestehungskosten erfolgt im Wesentlichen basierend auf der VDI-Richtlinie 6025. Die ökonomische Bilanzierung der Multiblend-Bereitstellung wird für die Fälle A, B und C vorgenommen. Zur Ermittlung des Einflusses der einzelnen Eingangsparameter auf die spezifischen Bereitstellungskosten wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei werden die Auswirkungen der wesentlichen Parameter analysiert. Es wird jeweils nur eine Eingangsgröße variiert und die Auswirkung dieser Variation auf die gesamten Bereitstellungskosten analysiert [Tur18].

Zur Bilanzierung der Multiblend-Bereitstellungskette für Fall A und B dienen projektbezogene Versand-, Logistik- und Tanklagerunterlagen als wesentliche Datengrundlage. Für die Bilanzierung des Falles C werden im Wesentlichen Frachtraten, Marktdaten und Unternehmensangaben verwendet. Das Referenzjahr der Analyse bildet das Jahr 2018. Sinngemäß werden für den Vergleich mit einer fossilen Alternative der minimale, maximale und durchschnittliche Preis für JET A-1 des Jahres 2018 als Datengrundlage verwendet.

8.3.1 Gestehungskosten der erneuerbaren Kerosine

Die berechneten Gestehungskosten der erneuerbaren Kerosine werden in Abb. 23 für die einzelnen Herstellungsverfahren verglichen. Für HEFA-SPK wurden 806 EUR/t ermittelt, leicht darüber liegen die Gestehungskosten für ATJ-SPK mit 989 EUR/t und höher liegt SIP mit 1.493 EUR/t. Alle drei Kerosingestehungskosten befinden sich im unteren Drittel der Literaturwerte nach der Zusammenstellung von [Zec16]. Gegenüber dem fossilen Kerosinpreis sind die Werte um das 1,3 bis 2,5-fache höher.

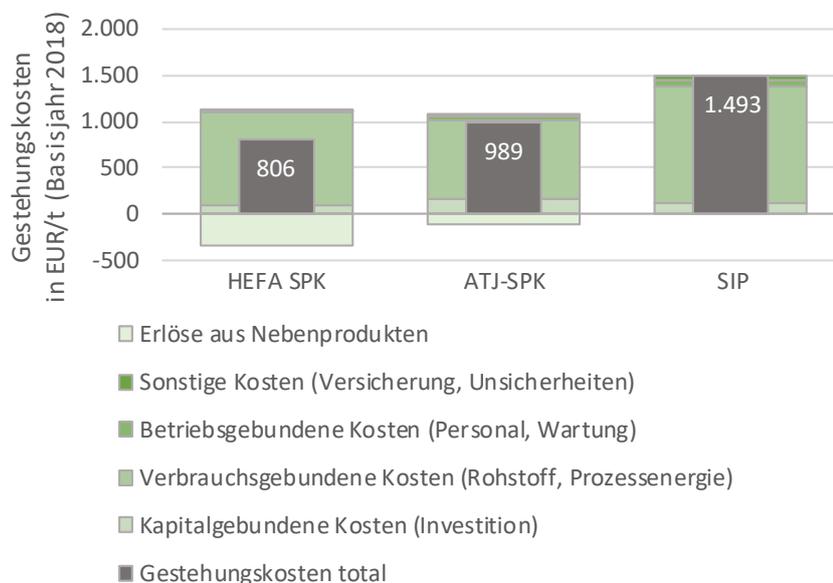


Abb. 23 Gestehungskosten erneuerbarer Kerosine

Ersichtlich ist die Abhängigkeit der Gestehungskosten von den verbrauchsabhängigen Kosten. Diese betragen jeweils mehr als 80 % der gesamten Gestehungskosten. Alle anderen Kosten belaufen sich lediglich auf 15 bis 30 % der Gesamtgestehungskosten. Einen weiteren einflussreichen Faktor bilden die Nebenprodukte, welche die Gestehungskosten vor allem bei HEFA-SPK und SIP wesentlich senken können.

Bei HEFA-SPK betragen die verbrauchsabhängigen Kosten ca. 87 % der Gesamtkosten, enthalten sind die Kosten für den Rohstoff Rindertalg von rund 98 %, da der für den Prozess benötigte Wasserstoff innerhalb der Prozesse aus der Naphtha- und Brenngasfraktion gewonnen wird und weiterer externer Hilfsstoff lediglich Speise-/Prozesswasser ist. Einen Anteil von etwa 9 % machen die kapitalgebundenen Kosten aus. Sehr geringen Einfluss haben die betriebsgebundenen und sonstigen Kosten mit 1 bis 2 %. Die Kosten werden durch die Erlöse aus Nebenprodukten teilweise reduziert, diese betragen für HEFA-SPK rund 30 % der anfallenden Kosten. Enthalten sind der Verkauf von überschüssigem Naphtha, Brenngas und Diesel aus der Produktion.

Für die ATJ-SPK-Herstellung entstehen die meisten Kosten durch den Bezug der Rohstoffe. Diese Kosten machen rund 78 % der verbrauchsabhängigen Kosten aus, welche wiederum rund 77 % der gesamten Kosten ausmachen. Als weitere verbrauchsabhängige Kosten entstehen Kosten für Wasserstoff als Hilfsstoff und Energiebereitstellung in Form von Elektrizität sowie Erdgas und Kühlwasser. Zweitgrößte Komponente sind die kapitalgebundene Kosten. Diese betragen rund 15 % der Gesamtkosten. Die Erlöse für die Nebenprodukte Maiskeimöl und Trockenschlempe summieren sich auf rund 10 % der Gesamtkosten und mindern diese entsprechend.

Bei der SIP-Herstellung wird ebenfalls der größte Teil der Aufwendungen für die Bereitstellungen des Rohstoffes verwendet. Rund 96 % der verbrauchsabhängigen Kosten entfallen für den Rohstoff. Diese betragen wiederum 84 % der Gesamtkosten. Weiterer Kostenanteil sind die kapitalgebundenen Kosten welche rund 9 % der Gesamtkosten ausmachen.

8.3.2 Bereitstellungskosten für Multiblend-JET-A-1

Abb. 24 stellt die reinen Bereitstellungskosten der erneuerbaren Kerosine bzw. des Multiblend-JET-A-1 für die Fälle A, B und C dar, welche anders als die zuvor dargestellten Gestehungskosten für die erneuerbaren Kerosine die Kosten für die nachgelagerte Bereitstellung des Multiblends umfassen. Für den Fall A liegen die ermittelten Bereitstellungskosten des Multiblends bei ca. 650 EUR/t. Mit etwa 56 % beläuft sich die Bereitstellung und Miete einer geeigneten Tanklagerinfrastruktur zur Mischung der einzelnen Komponenten bzw. Lagerung des Multiblends auf einen Großteil der für Fall A ermittelten Bereitstellungskosten. Dies ist insbesondere auf die verhältnismäßig geringen bewegten Kraftstoffmengen sowie auf die verwendete Tanklagerinfrastruktur zurückzuführen. Im Falle einer optimierten Logistikkette, in denen größere Kraftstoffmengen (kontinuierlich) bereitgestellt werden, ließe sich insbesondere dieser Anteil stark reduzieren (siehe Fall C).

Im Fall B ist der Multiblend gegenüber Fall A zum einen anders zusammengesetzt, zum anderen wird insgesamt etwa die 2-fache Menge an Multiblend bezogen. Die Reduktion der Bereitstellungskosten gegenüber Fall A (ca. 44 %) ergibt sich aus der nachgelagerten Bereitstellungskette. Für die Lagerung und das Blending sowie die Kesselwagentransporte von Speyer zum Flughafen Leipzig/Halle wären im Fall B, trotz der etwa 2-fachen Multiblend-Gesamtmenge, die gleichen bereitgestellten Tank- und Kesselwageninfrastrukturen verwendbar. Bei gleichen Preisen für die Bereitstellung und Miete dieser Infrastruktur und gleichzeitig größerer Multiblend-Gesamtmenge reduzieren sich die spezifischen Kosten und somit die gesamten Bereitstellungskosten. Der Vergleich von Fall A und B zeigt, dass die in Fall A zugrundeliegende Logistik und Infrastruktur für die transportierten Mengen an Multiblend-JET-A-1 aufgrund des ursprünglich anders geplanten Vorgehens (Kapitel 6.1.4) überdimensioniert ist und die adäquate Anpassung ein wesentliches Potenzial zur Reduktion der Multiblend-Bereitstellungskosten aufweist.

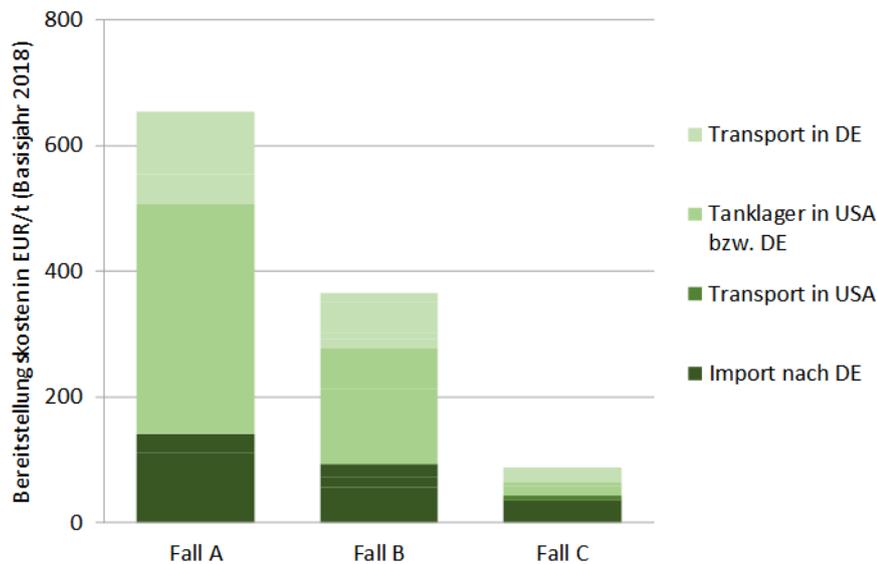


Abb. 24 Bereitstellungskosten Fall A, Fall B, Fall C

Die optimierte, auf größere Kraftstoffmengen ausgelegte Bereitstellungskette im Fall C führt gegenüber Fall A zu deutlich geringeren Bereitstellungskosten. Diese sind mit ca. 87 EUR/t gegenüber Fall A und B um etwa 87% bzw. 76% geringer.

Neben dem geringeren Anteil der Kosten für die Nutzung von Tanklagerinfrastruktur ist auch ein deutlicher Unterschied bei den Import-Kosten zu erkennen. Während sie sich in Fall A und B etwa auf 140 EUR/t und 90 EUR/t belaufen, betragen sie in Fall C lediglich etwa 35 EUR/t. Dieser Unterschied ergibt sich dadurch, dass in Fall C der Import des Multiblend-JET-A-1 via Produkttanker und für größere Kraftstoffmengen angenommen wird, was die spezifischen Transportkosten deutlich reduziert. Im Gegensatz dazu wurden in DEMO-SPK kleinere SPK-Mengen in speziellen Tankcontainern transportiert. Anhand der vergleichenden Betrachtung von Fall A, B und C ist ersichtlich, dass Kostenreduktionspotenziale vor allem durch die Bereitstellung größerer Kraftstoffmengen in Verbindung mit einer abgestimmten Bereitstellungskette nutzbar gemacht werden können.

8.3.3 Lebenszykluskosten Multiblend JET A-1

Die bezogenen Mengen erneuerbarer Kerosine sind in den Fällen A und B vergleichsweise gering – es handelt sich dabei lediglich um Kraftstoffmengen in der Größenordnung eines Demonstrationsprojektes, allerdings nicht um repräsentative Kraftstoffmengen des realen Flugbetriebs einer Fluggesellschaft. Die Lebenszykluskosten werden daher nur für den Fall C betrachtet, für den eine zukünftige, großtechnische Herstellung erneuerbarer Kerosine sowie die anschließende, darauf angepasste Bereitstellungskette angenommen wurden. Damit wird insgesamt eine angemessene Vergleichbarkeit zur fossilen Referenz abgebildet. Aus der Kombination der ermittelten Gestehungskosten und anschließenden Bereitstellungskosten für den Fall C ergeben sich für das Multiblend-JET-A-1 Lebenszykluskosten von ca. 760 EUR/t. Die Kosten für den Erwerb von EU ETS-Emissionsberechtigungen für den fossilen Anteil des Multiblends belaufen sich dabei auf weniger als 1% und sind somit vernachlässigbar gering. Der Anteil der Logistik und Bereitstellung der Multiblend-Komponenten und des Multiblends im Fall C belaufen sich auf etwa 12% der gesamten Lebenszykluskosten (Abb. 25).

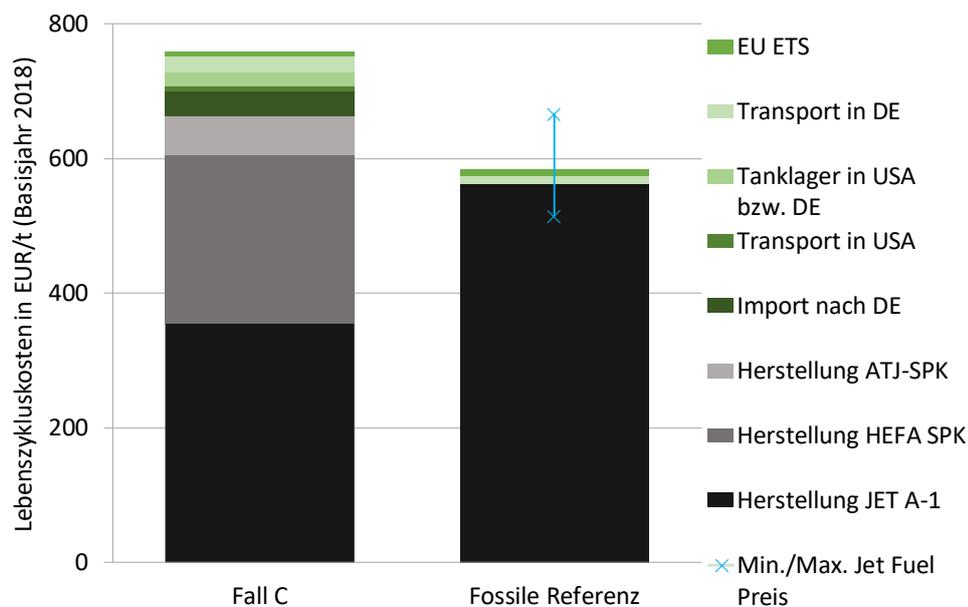


Abb. 25 Lebenszykluskosten Multiblend-JET-A-1 im Fall C in Gegenüberstellung zur fossilen Referenz JET A-1

Der Preis für fossiles JET A-1 (Ex-Refinery) lag im Jahr 2018 im Durchschnitt bei etwa 560 EUR/t [EIA19]. Unter Berücksichtigung der hier angenommenen Bereitstellung zum Flughafen LEJ und der Berücksichtigung des fossilen Kraftstoffes im EU ETS, ergeben sich Lebenszykluskosten von ca. 580 EUR/t. Dies liegt weiterhin um etwa 23 % unterhalb der ermittelten Lebenszykluskosten des Multiblend-JET-A-1 in Fall C. Aus der erzielten Emissionseinsparung durch die Verwendung des Multiblend-JET-A-1 sowie den ermittelten Lebenszykluskosten des Multiblends und der fossilen Referenz ergeben sich spezifische THG-Vermeidungskosten von ca. 128 EUR/t an eingespartem CO₂.

8.3.4 Sensitivitätsanalyse

In Abb. 26 ist eine Sensitivitätsbetrachtung der Lebenszykluskosten für Fall C dargestellt. Die Abbildung zeigt die Variation der wesentlichen Eingangsgrößen von -50% bis +50% und die einschlägige prozentuale Auswirkung auf die Lebenszykluskosten des Multiblends für Fall C.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in Abb. 26 zeigen, dass eine Veränderung der Gestehungskosten von fossilem JET A-1 sowie der Rohstoffkosten für HEFA-SPK den größten Einfluss auf die Lebenszykluskosten des Multiblends haben. Eine Steigerung und Verringerung der konventionellen JET-A-1-Herstellungskosten und Rohstoffkosten für die HEFA-Produktion um +50%/–50% führt zu etwa 23% (fossiles JET A-1) und 20% (HEFA) höheren bzw. geringeren Lebenszykluskosten. Innerhalb der Kraftstoffkomponenten hat ATJ-SPK den geringsten Anteil, was auf die tatsächlichen Anteile der verschiedenen Kraftstoffkomponenten im Multiblend zurückzuführen ist. Die weiteren Parameter für die Herstellung der Kraftstoffkomponenten, welche in der Sensitivitätsanalyse untersucht wurden, haben einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Gestehungskosten und damit auf die Bereitstellungskosten des Multiblends. Höheren Einfluss haben die Erlöse aus Nebenprodukten, insbesondere bei HEFA-SPK (Naphtha, Diesel, Brenngas) sowie die Investitionskosten.

Neben der Herstellung ist der Einfluss der übrigen Parameter wesentlich geringer. Eine entsprechende Variation der Kesselwagen-Frachtraten für den Kraftstofftransport vom Hafen von Rotterdam zum Flughafen LEJ führt zu etwa 2% höheren bzw. geringeren Lebenszykluskosten. Die Variation der übrigen Eingangsgrößen wie Tanklagergebühren, Produktanker-Frachtraten oder Preise für EU ETS-Emissionsberechtigungen führen

nur zu einer marginalen Erhöhung bzw. Verringerung der Lebenszykluskosten des Multiblends (jeweils ca. um 1 bis 2 % und weniger).

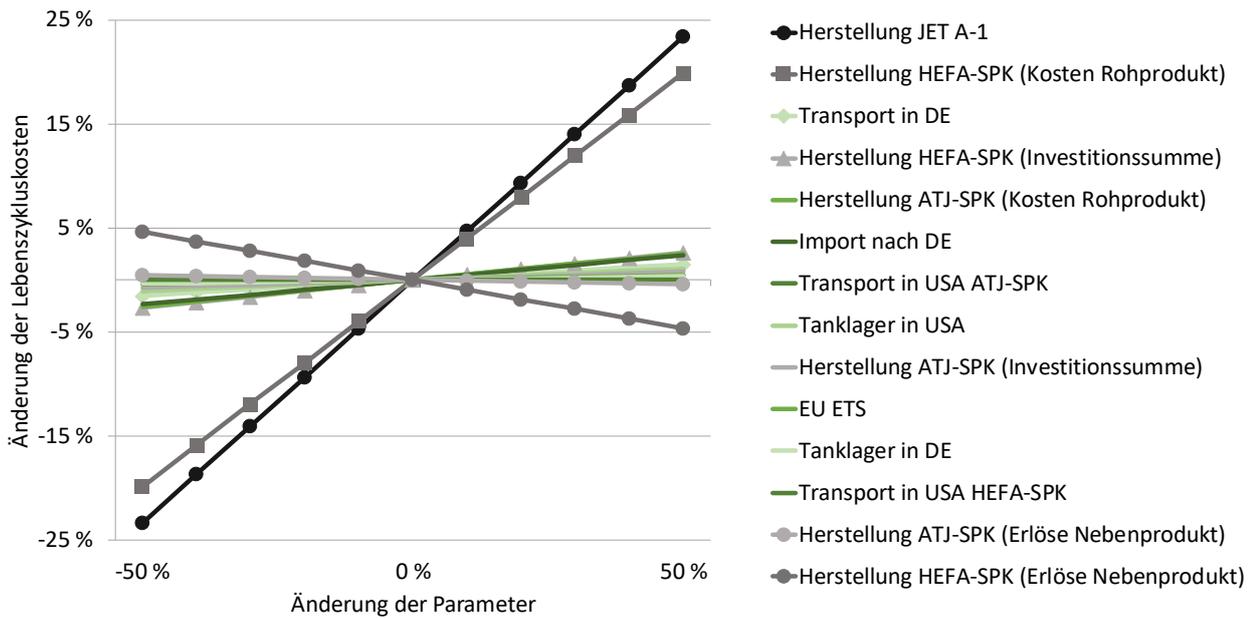


Abb. 26 Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskosten Fall C

Im Ergebnis zeigt sich, dass die Gestehungskosten des fossilen JET A-1 den wesentlichen Einfluss auf die Lebenszykluskosten des Multiblends ausüben. Sowohl für den fossilen Flugkraftstoff als auch die biogenen HEFA- und ATJ-Flugkraftstoffe stellen die Rohstoffkosten die wesentliche Kostengrößen innerhalb der Gestehungskosten dar. Diese weisen eine starke Abhängigkeit von Marktentwicklungen auf und bilden somit dynamische Kostengrößen mit entsprechenden Schwankungen. Im Rahmen einer zukünftigen Verwendung und Diskussion der hier aufgeführten Ergebnisse sollte stets die hohe Abhängigkeit der Gestehungskosten von Rohstoff- bzw. Gestehungskosten der fossilen und biogenen Multiblend-Komponenten üben die weiteren Eingangsgrößen einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Lebenszykluskosten aus.

8.4 Fazit

Die ökologische Bewertung und hier im Speziellen die Bewertung der Gesamt-THG-Emissionen ergab deutliche Vorteile auf Seiten der Multiblends. Mit den hier betrachteten Mischungen können bis zu 35 % der THG-Emissionen im Vergleich mit konventionellem fossilem JET A-1 Kerosin vermieden werden. Da der größte Teil der THG-Emissionen durch die Verbrennung des fossilen Kerosins verursacht wird, kann der fossile Anteil im Multiblend-JET-A-1 als der wesentliche Treiber der Gesamt-THG-Emissionen identifiziert werden. Multiblend-JET-A-1 Fall A weist somit mit dem höchsten Anteil an erneuerbaren Kerosinen die geringsten THG-Emissionen und mit 35 % die höchste THG-Einsparung gegenüber fossilem JET A-1 auf. Ein dezidierter Blick auf die THG-Emissionen der erneuerbaren Kerosine zeigt zum einen deutliche Vorteile für den Einsatz von Rest- und Abfallstoffen gegenüber dem Einsatz von Anbaubiomasse und zum anderen Vorteile für die Nutzung erneuerbarer Energie zur Deckung des prozessspezifischen Energiebedarfs. Dementsprechend stellt sich das Konzept HEFA-SPK als besonders vorteilhaft dar, einerseits, weil hier mit Rindertalg ein als Abfall deklarierter Rohstoff eingesetzt wird, was bedeutet, dass vorgelagerte Prozesse nicht berücksichtigt werden, und andererseits wird das prozessintern bereitgestellte Naphta sowohl für die Dampfpreformierung der Produktion des benötigten Wasserstoffs als auch zur Bereitstellung von Prozessdampf genutzt. Die relativ hohen THG-Emissionen, die

durch die Konversionsprozesse für ATJ-SPK verursacht werden, resultieren in erster Linie aus der Nutzung fossiler Energieträger zur Deckung des prozessbedingten Energiebedarfs. Ein erhöhter Anteil regenerativer Energie im Prozessenergiemix könnte perspektivisch zu einer deutlichen Reduktion der Gesamt-THG-Emissionen führen. Dies würde sich auch mit Blick auf eine entsprechende Zertifizierung gemäß der Erneuerbaren Energien Richtlinie und dem damit einhergehenden Nachweis der Einhaltung definierter THG-Minderungsziele vorteilhaft gestalten. Eine Berechnung der THG-Minderung der betrachteten erneuerbaren Kerosine entsprechend der in der RED enthaltenen Methode ergab bis zu 97 % Minderung für das HEFA-SPK-Konzept.

Die Kostenbetrachtungen bestätigen, dass auch die zukünftig großtechnische Herstellung erneuerbarer Flugkraftstoffe allein nicht gesichert ausreichen wird, um Kosten in vergleichbarer Größenordnung zu konventionellen Flugkraftstoffen zu erreichen. Es werden somit höhere Gestehungskosten für Multiblends entstehen. Aus den Kostenbetrachtungen geht die Herstellung der Kraftstoffkomponenten als wesentlicher Einflussfaktor auf die Lebenszykluskosten des Multiblend-JET-A-1 hervor. Sie bildet damit auch einen Bestandteil, der wesentlich über die Wettbewerbsfähigkeit und den Nutzen der Verwendung von Multiblends bzw. erneuerbaren Flugkraftstoffen mitentscheidet. Eine Möglichkeit, in diesem Zusammenhang die Wettbewerbsfähigkeit erneuerbarer Flugkraftstoffe zu verbessern, ist der Ausbau der weiteren Nebenprodukte aus den Herstellungsprozessen. Diese Erlöse aus diesen Nebenprodukten sind eine Möglichkeit die Gestehungskosten zu reduzieren.

Die hohen Bereitstellungskosten des Multiblends in DEMO-SPK sind insbesondere den geringen Kraftstoffmengen sowie der Kurzfristigkeit des Kraftstoffbezugs geschuldet. Die Kostenbetrachtungen zeigen, dass hier durch eine Optimierung der Bereitstellungskette ein wesentliches Potenzial zur Reduktion der Bereitstellungskosten vorliegt und für eine weitere Bereitstellung eines Multiblend-JET-A-1 oder erneuerbarer Flugkraftstoffe allgemein unbedingt umgesetzt werden sollte. Andernfalls ist deren Nutzung aus Sicht eines Endverbrauchers wirtschaftlich nicht vertretbar. Dafür ist der Bezug ausreichend großer Kraftstoffmengen erforderlich sowie Vertragsgrundlagen, die langjährige Bindungen der Vertragsparteien vereinbaren. Allerdings belaufen sich die Bereitstellungskosten auch im Falle einer verbesserten Bereitstellungskette des Multiblend-JET-A-1 auf einen verhältnismäßig geringen Anteil gemessen an den gesamten Lebenszykluskosten (in dieser Analyse lediglich auf ca. 12 %). Eine weitere Kostenreduktion innerhalb der Bereitstellung eines Multiblend-JET-A-1 ist insofern nicht ausreichend/ geeignet, um die Wettbewerbsfähigkeit eines Multiblend-JET-A-1 gegenüber konventionellen Flugkraftstoffen wesentlich zu beeinflussen.

Auch die Verpflichtung eines Luftfahrzeugbetreibers, die erzeugten CO₂-Emissionen für EU ETS relevante Flüge durch Emissionsberechtigungen zu decken, reicht nicht aus, um die Lebenszykluskosten und somit die Wettbewerbsfähigkeit vom Multiblend-JET-A-1 gegenüber der fossilen Referenz signifikant zu beeinflussen.

Solange der Kostenvorbehalt bezüglich erneuerbarer Kerosine besteht, ist, aufgrund des harten internationalen Wettbewerbs im Luftverkehr, keine große Verbreitung zu erwarten. In jedem Fall erfordert die Sicherstellung der benötigten zukünftigen Kraftstoffmenge – etwa im Fall einer zukünftigen Belieferung des Flughafens Leipzig/ Halle – einen deutlichen Ausbau der Herstellungskapazitäten für SPKs an allen betrachteten Produktionsstandorten. Die damit verbundenen Investitionen erfordern für die Kraftstoffhersteller wiederum langfristig sichere Absatzmöglichkeiten ihrer Produkte.

9 Nachhaltigkeitsdokumentation und -zertifizierung

Eine weitere, für eine breite Marktimplementierung wichtige Fragestellung in DEMO-SPK ist die Entwicklung und Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsdokumentation und -zertifizierung von erneuerbaren Flugkraftstoffen, unter den in der EU derzeit relevanten Regularien für Biokraftstoffe und Flugverkehr. Die Aufgabenstellung beinhaltet die Umsetzbarkeit einer Nachweisführung für Multiblend-JET-A-1 und erfordert im Wesentlichen die Beantwortung von zwei Fragen. Ist eine Nachweisführung und Zertifizierung für die im Vorhaben betrachteten Wertschöpfungsketten für HEFA-SPK, ATJ-SPK und FT-SPK via PTL möglich? Und wenn ja, welche Optionen einer solchen Nachweisführung bestehen im Rahmen der Regularien?

Im Hinblick auf die globale Relevanz des Flugverkehrs werden zudem einige ausgewählte Regularien in Drittländern sowie derzeit bestehende Zertifizierungssysteme und erweiterte Anforderungen für Flugkraftstoffe beleuchtet. Weiterhin werden Handreichungen zur Unterstützung des zukünftigen Umsetzungsprozesses bereitgestellt.

9.1 Anforderungen

9.1.1 Rahmenbedingungen einer Nachhaltigkeitsdokumentation für erneuerbares Kerosin

Um eine Nachhaltigkeitsdokumentation und -zertifizierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu entwickeln und sicherzustellen, müssen spezifische Rahmenbedingungen bestehen. Diese Bedingungen bilden eine Grundlage, auf der die unterschiedlichen Anforderungen an eine Nachhaltigkeitsdokumentation bzw. -zertifizierung ausgerichtet und definiert werden können:

- a. Soziale und ökologische Nachhaltigkeitskriterien (bspw. für den Anbau von Rohstoffen),
- b. Vorgaben für die Berechnung (Methodik) und Einsparung von Treibhausgasen (THG),
- c. Anforderungen an die Rückverfolgbarkeit bzw. Nachweisführung (Chain of Custody),
- d. Regularien zur Überprüfung der Einhaltung der Kriterien (Governance).

Für die Dokumentation zur Rückverfolgbarkeit stehen grundsätzlich die Optionen Segregation, Massenbilanz und Book & Claim zur Verfügung. Je nach gewähltem Chain-of-Custody-Modell unterscheiden sich die Anforderungen an die Rückverfolgbarkeit und der damit verbundene Aufwand entlang der Lieferkette.

9.1.2 Anforderungen an eine Nachhaltigkeitsdokumentation für definierte Wertschöpfungsketten (ATJ-SPK, HEFA-SPK, FT-SPK via PTL)

Die im Kapitel 9.1.1 definierten Rahmenbedingungen können auf die im DEMO-SPK-Vorhaben untersuchten Prozess- und Lieferketten angewandt werden (Kapitel 4). Die in Abb. 27 dargestellte Lieferkette zeigt die Herstellung von erneuerbarem Flugkraftstoff von ATJ-SPK, wie sie gemeinsam mit dem Praxispartner Gevo Inc. definiert wurde [Gev18]. Erster Teil der Lieferkette sind die landwirtschaftlichen Betriebe, die den Rohstoff produzieren. Für die theoretische Demonstration der Nachhaltigkeitsdokumentation ist bereits für diesen Teil der Lieferkette die Frage der Existenz von ökologischen und sozialen Nachhaltigkeitskriterien relevant. Ebenso müssen Anforderungen an die THG-Einsparungen gegenüber fossilen Kraftstoffen und die Kriterien an Rückverfolgbarkeit und Governance entlang aller Elemente der Wertschöpfungskette definiert sein. Der Ersterfasser des nachhaltigen Rohstoffes ist in diesem Fall die Verarbeitungsanlage von Gevo in Luverne, Minnesota. Im Rahmen einer Nachhaltigkeitsdokumentation bzw. -zertifizierung erfolgt die Überprüfung der Einhaltung der Nachhaltigkeitsanforderungen beim Ersterfasser. Dafür werden die zuliefernden landwirtschaftlichen Be-

etriebe stichprobenartig überprüft. Die Größe einer solchen Stichprobe ergibt sich u. a. auf Basis einer Risikoanalyse und der Gesamtzahl an zuliefernden Betrieben. In der Verarbeitungsanlage in Luverne wird, über das ATJ-Verfahren, aus dem Rohstoff zunächst erneuerbares Isobutanol gewonnen, welches dann u. a. in erneuerbaren Flugkraftstoff umgewandelt wird [Gev18]. Das fertige ATJ-SPK wird anschließend zum Hafen in Texas und über den Seeweg nach Europa (Hafen Rotterdam) transportiert. In einem Tanklager wird nachhaltiges ATJ-SPK mit fossilem JET A-1 bzw. mit weiteren erneuerbaren Kraftstoffen vermischt (engl.: Blending). Anschließend wird das Multiblend-JET-A-1 zur Betankung der Flugzeuge an das jeweilige Flughafentanklager geliefert.

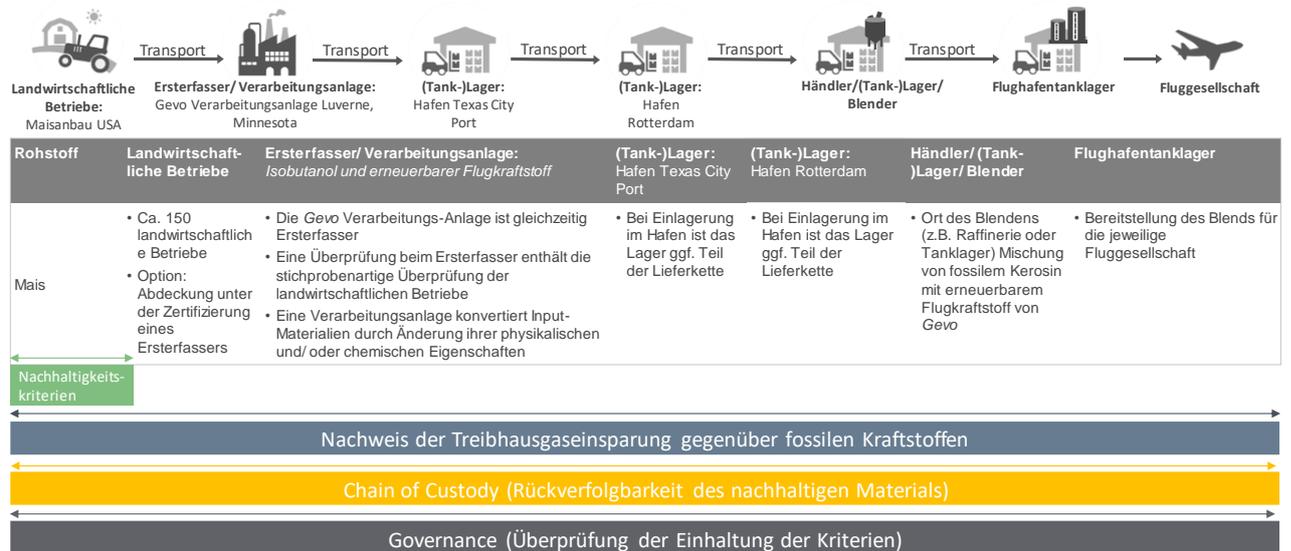


Abb. 27 Anforderungen an die Nachhaltigkeitsdokumentation einer Wertschöpfungskette für ATJ-SPK am Beispiel Gevo (Eigene Darstellung auf Basis [Gev18].)

Abb. 28 stellt die Herstellung von HEFA-SPK auf Basis von Rindertalg dar, produziert von World Energy LCC. Hier gelten die bereits für Abb. 27 beschriebenen Vorgaben, jedoch mit der Ausnahme, dass keine Nachhaltigkeitskriterien für den Anbau der Rohstoffe erfüllt sein müssen, da ausschließlich Abfall- und Reststoffe als Rohstoffe genutzt werden. Für diese muss dennoch sichergestellt sein, dass sie die Anforderungen an eine Verwendung als nachhaltiger Rohstoff erfüllen.



Abb. 28 Anforderungen an die Nachhaltigkeitsdokumentation einer Wertschöpfungskette für HEFA-SPK aus Abfall- und Reststoffen (Eigene Darstellung)

Bei dem Herstellungsverfahren zu FT-SPK via PTL (Abb. 29) existieren ebenfalls keine flächenbezogenen Anforderungen an die Nachhaltigkeit. Es gibt jedoch Vorgaben zu der Nutzung erneuerbarer Energien für die Produktion von PTL-Kraftstoffen.

Um eine Überprüfung und anschließende Zertifizierung entlang der jeweiligen Wertschöpfungskette durchführen zu können, müssen die Wirtschaftsteilnehmer umfangreiche Informationen bereitstellen, die in einem Vor-Ort-Audit jährlich überprüft werden.

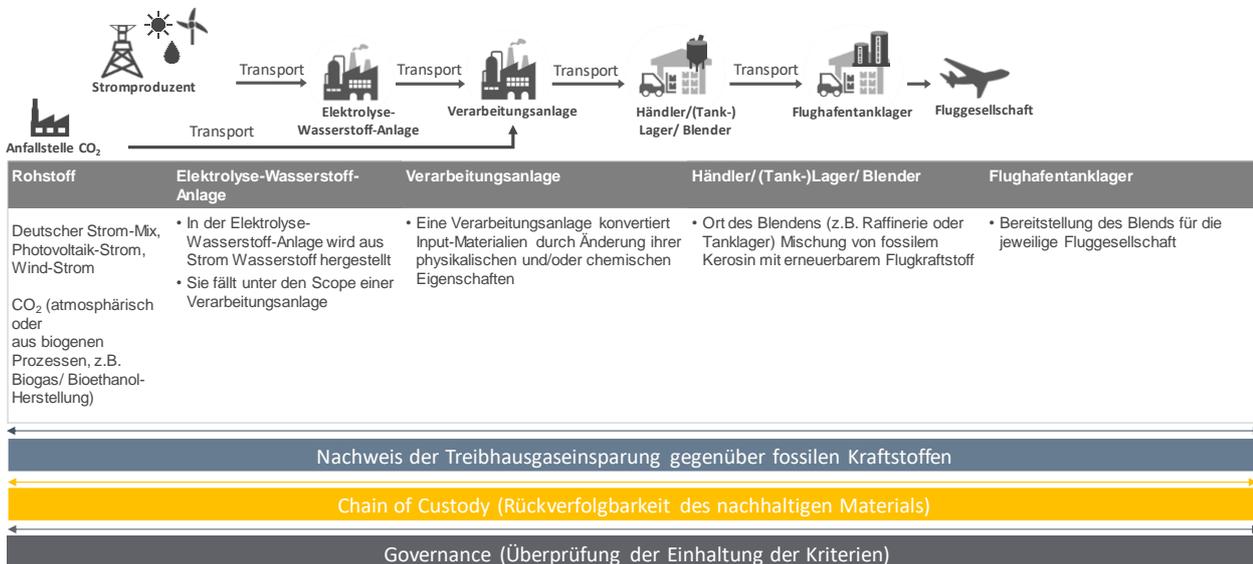


Abb. 29 Anforderungen an die Nachhaltigkeitsdokumentation einer Wertschöpfungskette für FT-SPK via Power-to-Liquid (PTL) (Eigene Darstellung)

9.1.3 Zwischenfazit

Im Rahmen der EU RED ist eine Zertifizierung aller im Projekt betrachteten Wertschöpfungsketten zur Herstellung erneuerbarer Kerosine grundsätzlich möglich. Die von der EU-Kommission anerkannten Zertifizierungssysteme sind für alle Arten von Biomasse sowie anderer erneuerbarer Rohstoffe anwendbar. Darüber hinaus entsprechen auch die für die Wertschöpfungsketten verwendeten Prozesstechnologien den technischen Anwendungen, die bereits zertifiziert werden. Durch die individuelle Auditierung und Zertifizierung der einzelnen Elemente einer Wertschöpfungskette ist jede beliebige Zusammensetzung einer Lieferkette abbildbar; die Dokumentationsanforderungen an jedes der Elemente gewährleistet eine ununterbrochene Rückverfolgbarkeit der Nachhaltigkeitsinformationen. Schließlich bietet die von der EU RED vorgegebene Methodik zur Berechnung der THG-Emissionen eine Flexibilität, die es möglich macht, jederzeit neue Produktionswege abzubilden und einzubeziehen.

9.2 Dokumentation

Das folgende Kapitel enthält eine kurze Beschreibung der auf EU-Ebene relevanten Regularien und der darauf basierenden, im Vorhaben diskutierten Optionen einer Nachweisführung für erneuerbare Flugkraftstoffe und (Multi-)Blends. Aufgrund der globalen Thematik wird zusätzlich ein Ausblick auf einige ausgewählte außer-europäische Regularien sowie derzeit relevante Zertifizierungssysteme gegeben, die als Grundlage einer Nachhaltigkeitsdokumentation für erneuerbare Flugkraftstoffe dienen können.

9.2.1 Regulative Rahmenbedingungen der Nachweisführung auf EU-Ebene

Zu den regulativen Bedingungen auf EU-Ebene gehören die EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU RED) und das EU-Emissionshandelsgesetz (EU ETS).

9.2.1.1 Zertifizierung von Biomasse und Abfall-/ Reststoffen gemäß EU RED

Die EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009 / 28 / EC) ist ein Teil des Europäischen Klima- und Energiepakets und setzt den gesetzlichen Rahmen für die Integration erneuerbarer Energien in den EU-Mitgliedsstaaten. Gekoppelt ist die Richtlinie mit den Vorgaben der Kraftstoffqualitätsrichtlinie (DIR 2009 / 30 / EC) für Mineralölindustrie und Tankstellenbetreiber mit dem Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2020 um 6 % zu senken [Eur19c]. Zur Regelung der erneuerbaren Energien nach 2020 ist im Dezember 2018 die EU RED II (DIR 2018 / 2001) verabschiedet worden. Dort wird für den Flugverkehr ein Multiplikator von 1,2 des eigentlichen Energiegehalts zur Anrechnung auf das 14 %-Ziel im Transportsektor vorgesehen [Eur18b]. Damit erneuerbare Kraftstoffe als nachhaltig gelten und auf das Ziel im Verkehrssektor angerechnet werden können, muss nachgewiesen werden, dass sie die von der EU-Kommission gesetzten Nachhaltigkeitsanforderungen erfüllen [Eur09c]. Neben den Mindesteinsparungen an THG-Emissionen gehören dazu auch flächenbezogene Nachhaltigkeitskriterien für den Anbau von Rohstoffen [Eur09c]. Biogene Rohstoffe, die zur Herstellung von Bio-kraftstoffen eingesetzt werden, dürfen nicht von Flächen mit hoher Biodiversität oder hohem Kohlenstoffgehalt gewonnen werden. Darunter fallen unter anderem Primär- und Regenwälder sowie Torfgebiete. Insbesondere für Primärwälder gilt ein Verbot der Landnutzungsänderung nach Januar 2008. Ausnahme: Handelt es sich bei dem jeweiligen Rohstoff um einen Rest- oder Abfallstoff, gelten die flächenbezogenen Nachhaltigkeitskriterien nicht [Eur09c]. Um eine transparente Rückverfolgbarkeit entlang der gesamten Produktions- und Lieferkette zu gewährleisten, sieht die EU RED Segregation oder Massenbilanzierung als Chain of Custody-Optionen vor. Ein Book & Claim-Verfahren ist nicht erlaubt [ISC16].

Die Überprüfung der genannten Nachhaltigkeitskriterien ist durch freiwillige oder nationale Zertifizierungssysteme abgedeckt, deren Einhaltung von unabhängigen Prüfstellen entlang der Lieferkette festgestellt wird.

Alle freiwilligen Zertifizierungssysteme müssen in einem Turnus von fünf Jahren von der EU-Kommission anerkannt werden. [Eur19d]

9.2.1.2 Nachweisführung im Rahmen des EU Emissions Trading System (ETS)

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) trat im Jahr 2005 in Kraft. Es beschränkt die THG-Emissionen von rund 11.000 energieintensiven Anlagen in der Stromerzeugungs- und Fertigungsindustrie in der Größenordnung ≥ 20 Megawatt sowie im Flugverkehr [ICA19b]. Im Luftverkehr ist der Emissionshandel seit 2012 verpflichtend für alle Luftfahrzeugbetreiber, die Flüge im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR: Territorium der EU Mitgliedsstaaten, Island, Norwegen und Liechtenstein) starten oder landen. Für alle Emissionen oberhalb der zulässigen Freimenge müssen CO₂-Zertifikate erworben werden [Eur16].

Die Anzahl der THG-Emissionen, die ein Teilnehmer im EU ETS ausstoßen darf, wird kontinuierlich reduziert. Für jede Tonne CO₂ muss ein Zertifikat vorlegt werden. Die Menge der zu erhaltenden Zertifikate wird jährlich verringert. CO₂-Zertifikate sind handelbar. Verfügt ein Unternehmen über mehr Zertifikate als es Emissionen ausstößt, kann es diese an andere Teilnehmer im EU ETS verkaufen. Vorschriften zur Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung der jeweiligen, ausgestoßenen Treibhausgasemissionen sind in der Monitoring-Verordnung (Verordnung 601/2012/EU; kurz: MVO) festgelegt (siehe auch Kapitel 10.1 für Details zum EU ETS).

In Bezug auf die Verwendung von Biomasse ist das EU ETS an die EU RED gekoppelt. Um beispielsweise einen Anreiz für Luftfahrzeugbetreiber zu schaffen, zunehmend auch Biomasse in Anlagen oder auch im Luftverkehr direkt zu verwenden, ist im EU ETS festgelegt, dass für die Emissionen aus EU RED-zertifizierter Biomasse keine Emissionszertifikate erworben werden müssen. [Eur17]

Abseits der EU haben weitere Staaten ETS-Systeme eingeführt, darunter die Schweiz, Norwegen, Neuseeland, China, Kanada und Südkorea [Int19c, Dah, ICA19a, Int19b, Int18a, Int19a]. Obwohl alle ETS eine ähnliche Funktion haben, gibt es Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen, u. a. bei der Berücksichtigung unterschiedlicher Treibhausgase, Emissionsobergrenzen, Zeitintervalle für die Absenkung etc. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der einzelnen Systeme. Die meisten ETS konzentrieren sich in erster Linie auf energieintensive Wirtschaftszweige, immer mehr Systeme berücksichtigen jedoch auch die zivile Luftfahrt.

9.2.2 Optionen der Nachweisführung

Im Rahmen des DEMO-SPK-Vorhabens werden verschiedene Optionen der Nachweisführung für den Einsatz und die Anrechenbarkeit erneuerbarer Flugkraftstoffe diskutiert und aufgezeigt. Hierbei geht es zum einen um die Rückverfolgbarkeit der einzelnen, im Projekt definierten Wertschöpfungsketten der SPK. Zum anderen soll auch die Weitergabe der Nachhaltigkeitsinformationen der eingesetzten erneuerbaren Flugkraftstoffe nach dem Mischvorgang mit fossilem Jet A-1 in einem Multiblend gewährleistet sein; bis hin zum Flughafen-tanklager und der anschließenden Betankung der Flugzeuge respektive Anrechenbarkeit unter dem EU ETS. Im Folgenden werden die drei Optionen einer solchen Nachweisführung beschrieben:

1. Option 1: Zertifizierung der gesamten Wertschöpfungskette des erneuerbaren Flugkraftstoffs unter der EU RED
2. Option 2: Übergang von einer EU RED-Zertifizierung in ein Book & Claim-System
3. Option 3: Übergang von einer EU RED-Zertifizierung in ein Track & Trace-System

9.2.2.1 Option 1 | Nachhaltigkeitszertifizierung unter der EU RED

In Option 1 wird die gesamte Lieferkette, vom Ursprung des Rohstoffs bis zum letzten Tanklager vor dem Flughafentanklager, zertifiziert. Gemäß der EU RED müssen alle Wirtschaftsteilnehmer einer Wertschöpfungskette zertifiziert sein (Abb. 30). Nachhaltigkeitsinformationen müssen mit dem physischen Material von einem Element in der Lieferkette zum nächsten weitergereicht werden. [Eur09c]

Analog zur Weitergabe der Nachhaltigkeitsinformationen innerhalb der Lieferkette stellt der Hersteller des SPK bei der Auslieferung einen sogenannten Nachhaltigkeitsnachweis aus (engl.: Proof of Sustainability, kurz: PoS), der zusätzliche Informationen zum Kraftstoff enthalten muss (siehe Abb. 30). Unabhängig davon, wo genau die Vermischung des reinen erneuerbaren Flugkraftstoffs mit fossilem JET A-1 stattfindet, bleiben alle relevanten Nachhaltigkeitsinformationen über das jeweilige Massenbilanzsystem der zertifizierten Lieferkettenelemente zurückverfolgbar.

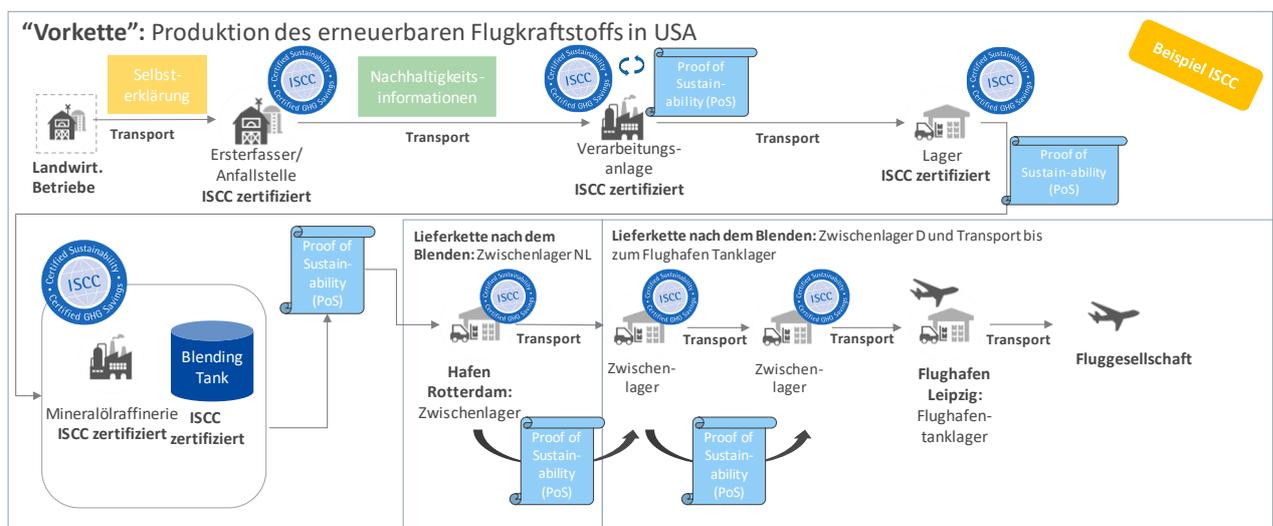


Abb. 30 Option 1: Eine EU-RED-Zertifizierung der gesamten Lieferkette bis eine Lieferstufe vor dem Flughafentanklager (Beispiel ISCC. Eigene Darstellung.)

Vorteil von Option 1 ist die Nutzung der EU-RED-Systematik, die bereits global etabliert ist und in mehr als einhundert Ländern genutzt wird [ISC19b]. Es ist anzunehmen, dass aufgrund dieser etablierten Struktur eine Weitergabe sowohl des reinen erneuerbaren Flugkraftstoffs als auch des (Multi-)Blends über alle Ländergrenzen hinweg ohne Einschränkungen (etwa durch unterschiedliche Zollvorschriften) möglich ist. Die Anrechnung der nachhaltigen Mengen im EU ETS kann dann im jeweiligen Flughafentanklager erfolgen.

Da der Übergang von einem EU-RED- auf einen EU-ETS-Nachweis prinzipiell an jeder beliebigen Stelle der Lieferkette erfolgen kann, werden im Folgenden zwei Kombinationen vorgestellt. Diese sind die in DEMO-SPK erarbeiteten Book & Claim- und Track & Trace-Optionen (vgl. Kapitel 10.2). Als Schnittstelle für den Übergang von EU RED nach EU ETS wurde der Systemnutzer gewählt, welcher als erster in der EU einen Multiblend erstellt bzw. diesen empfängt.

9.2.2.2 Option 2 | Schnittstellen der Nachhaltigkeitszertifizierung auf Basis der EU RED und Book & Claim

Die in DEMO-SPK entwickelte Option eines Book & Claim-Verfahrens stellt einen Lösungsansatz zur vereinfachten Anrechenbarkeit von erneuerbaren Flugkraftstoffen in Emissionshandelssystemen wie z. B. dem EU ETS dar (Kapitel 10.2.2). Der Ansatz sieht den Einsatz eines Systems vor, mit dessen Hilfe Fluggesellschaften einen Nachweis über gekaufte Chargen von erneuerbarem Flugkraftstoff in Form eines Herkunftsnachweises

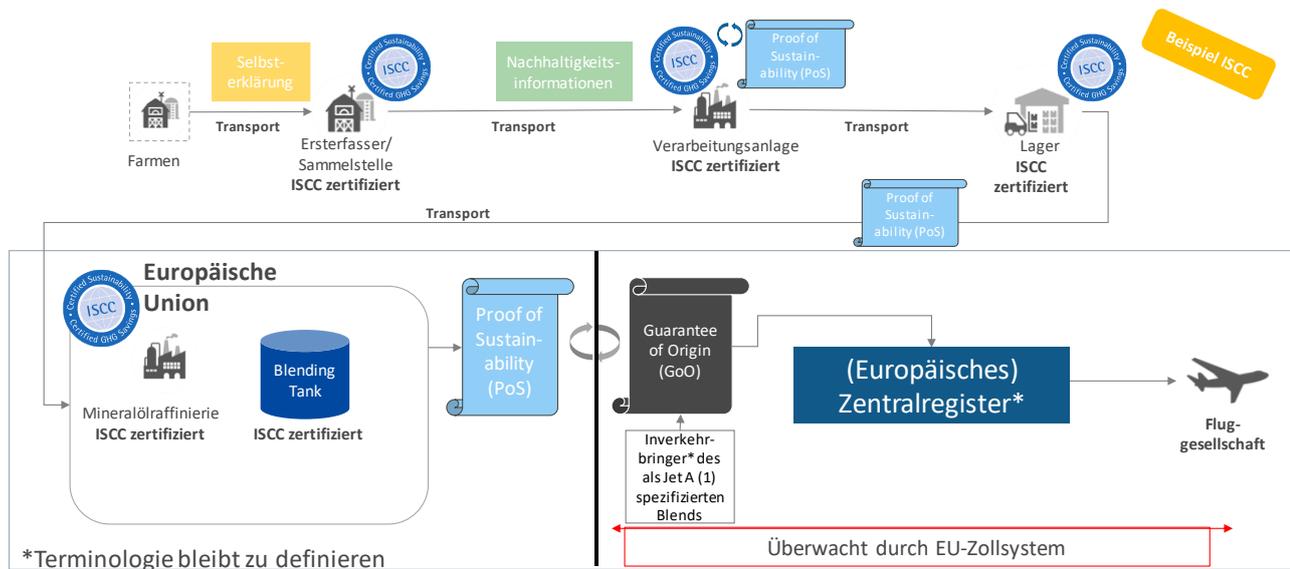


Abb. 31 Option 2: Blending EU
Wird in der EU geblendet, dann erfolgt die Ausstellung des GoO beim Blender (Beispiel ISCC. Eigene Darstellung.)

(engl.: Guarantee of Origin, kurz: GoO) anrechnen können, ohne zwangsläufig auch das physische Material getankt zu haben.

Um eine Doppelanrechnung der tatsächlich produzierten erneuerbaren Flugkraftstoffe und der ausgestellten GoOs zu vermeiden und einen barrierefreien Übergang der Nachhaltigkeitsinformationen von einem System (EU RED) in das andere (Book & Claim) zu garantieren, muss die Nachhaltigkeitsinformation der jeweiligen Charge des nachhaltigen Flugkraftstoffs von dem PoS auf den GoS übertragen und der PoS entwertet werden. Hierbei sind grundsätzlich zwei Varianten denkbar:

1. Wird der erneuerbare Kraftstoff innerhalb der EU geblendet, sodass bei der Vermischung ein als JET A-1 spezifizierter (Multi-)Blend entsteht, befindet sich die Schnittstelle der beiden Systeme am Ort des Blendens. Der Mischvorgang kann, wie in Abb. 31 dargestellt, in einer Mineralölraffinerie stattfinden, oder davon unabhängig in einem separaten Tanklager.
2. Wird der finale Kraftstoff außerhalb der EU geblendet, werden die Nachhaltigkeitsinformationen in Form des PoS, auf Basis der EU-RED-konformen Massenbilanz, mit dem physischen (Multi-)Blend mitgeführt, bis der als JET A-1 spezifizierte Blend in der EU eintrifft. Dies setzt eine EU-RED-Zertifizierung aller dazwischenliegenden Lieferkettenelemente, bis einschließlich des ersten Tanklagers in der EU, voraus (Abb. 32).

Der Aussteller des GoO ist in jedem Fall die, im Rahmen dieses Projekts als „Inverkehrbringer“ (d. h. erster abnehmender Eigentümer innerhalb der EU) des als JET A-1 spezifizierten Blends, definierte Partei. Zur Überprüfung der ordnungsgemäßen Ausstellung des GoO und der damit verbundenen Übergabe der relevanten Nachhaltigkeitsinformationen vom PoS wurden verschiedene Möglichkeiten diskutiert. In Absprache mit den Projektpartnern ist die Überprüfung vor Ort durch einen unabhängigen EU-RED-Auditor derzeit die plausibelste Lösung, da ein EU-RED-Auditor ohnehin jährliche Kontrollen vor Ort durchführt und so keine weiteren Kosten für eine zusätzliche externe Überprüfung anfallen.

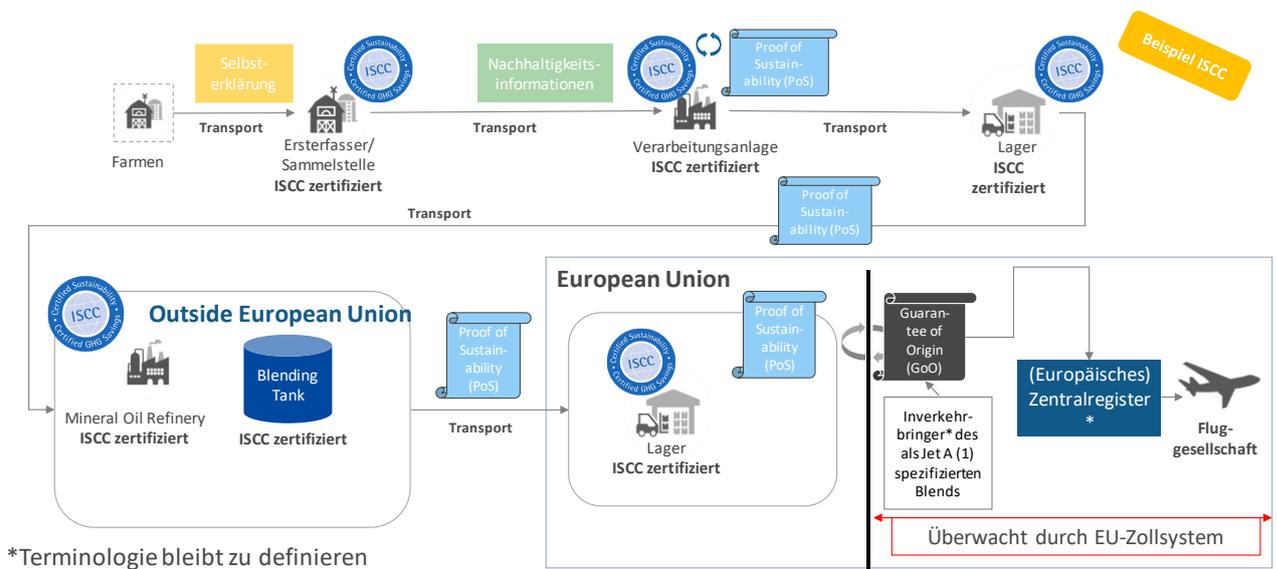


Abb. 32 Option 2: Blending non EU
 Wird außerhalb der EU geblendet, dann erfolgt die Ausstellung des GoO bei dem ersten Empfänger des Blends in der EU (Beispiel ISCC. Eigene Darstellung.)

Die ausgestellten und erworbenen GoOs werden schließlich in ein „Zentralregister“ eingepflegt, um eine Anrechenbarkeit im EU ETS zu gewährleisten (vgl. Kapitel 10.1). Die Überprüfung der eingegebenen Mengen im Register und der entsprechend angerechneten Mengen im EU ETS muss ebenfalls durch eine unabhängige Partei erfolgen.

Ein weiterer Gegenstand dieses Projekts war die Diskussion, welche Nachhaltigkeitsinformationen von einem PoS auf einen GoS übertragen werden müssen, um eine lückenlose Rückverfolgung zu garantieren. Hierzu werden folgende Informationen definiert, um alle in beiden Systemen relevanten Daten lückenlos weiterzugeben: Eindeutige Identifikationsnummer (diese wird bei der Umwandlung des PoS von diesem auf den GoO übertragen), Ausstellungsdatum und -land, Energiequelle (Rohstoffe, aus denen der erneuerbare Flugkraftstoff hergestellt wurde und Produktklassifizierung), Herstellungsbetrieb des erneuerbaren Flugkraftstoffs (Bezeichnung, Standort, Typ) und Datum der Inbetriebnahme des Herstellungsbetriebs.

Bei Einhaltung der hier beschriebenen Bedingungen, ist eine Book & Claim-Lösung im Anschluss an die EU-RED-konforme Lieferkette eine sinnvolle Möglichkeit, die verbrauchten Mengen erneuerbaren Kraftstoffs in einem ETS-System anzurechnen.

9.2.2.3 Option 3 | Schnittstellen der Nachhaltigkeitszertifizierung auf Basis der EU RED und Track & Trace

Die dritte Option einer Nachweisführung ist gemäß dem Vorschlag des Projektpartners Adeptus Green Management die Track & Trace-Methodik zur Anrechenbarkeit von erneuerbaren Flugkraftstoffen im Emissionshandel (Kapitel 10.2.1).

Eine Schnittstelle zwischen einer massenbilanz-basierten Rückverfolgbarkeit in einem EU-RED-Zertifizierungssystem und einem Track & Trace-System ist analog zu einer Schnittstelle zwischen EU-RED-System und Book & Claim-Ansatz zu betrachten. Die Nachhaltigkeitsinformationen des PoS gehen an dieser Stelle auf einen Herkunftsnachweis (engl.: Certificate of Origin, zur Abgrenzung vom GoO-Begriff im Book & Claim-Konzept; kurz: CoO) über, welcher dann als Nachweis mit dem physischen Blend weitergegeben

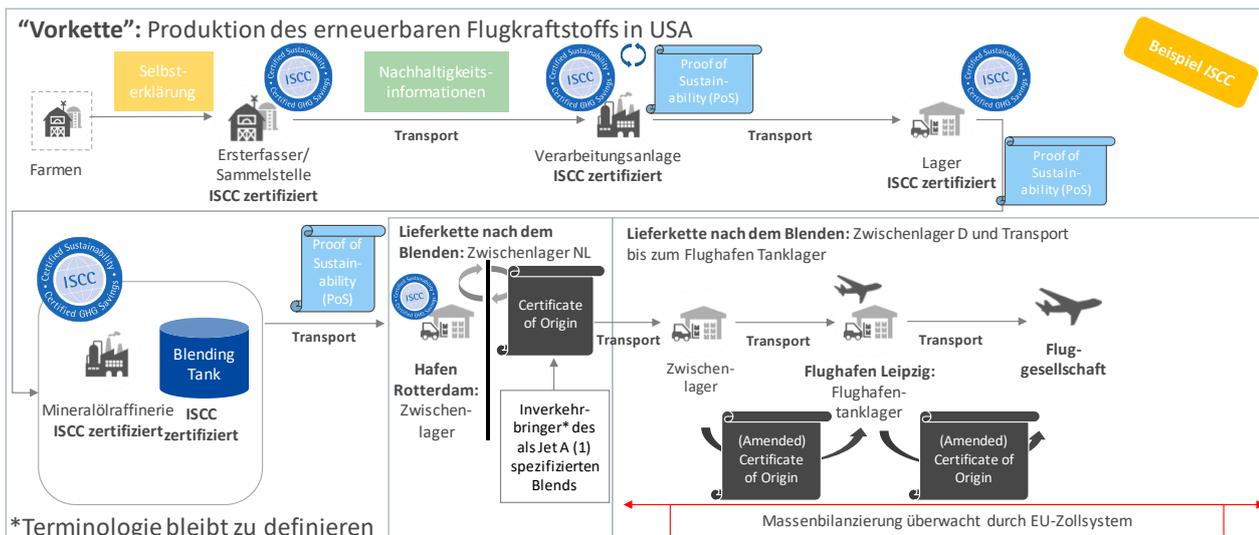


Abb. 33 Option 3: Massenbilanzierung unter Track & Trace
Beispiel der Lieferkette vor und nach dem Blenden (non EU) (Beispiel ISCC. Eigene Darstellung.)

wird. Abb. 33 zeigt den Übergang zwischen EU-RED-Zertifizierung und einer Track & Trace-Option am Beispiel eines Blend-Vorgangs außerhalb der EU. Analog zu Option 2 kann die Schnittstelle auch innerhalb der EU liegen, wenn der Flugkraftstoff erst dort geblendet wird.

Analog zu der Book & Claim-Option (Option 2) müssten die oben definierten Nachhaltigkeitsinformationen von einem PoS auf ein CoO übertragen werden.

Um eine Reduktion der Informationen auf einem GoO bzw. CoO zu erzielen, ist der Einsatz einer Datenbank für Option 2 und 3 zu diskutieren, in der die relevanten Nachhaltigkeitsinformationen mit einer eindeutigen Identifikationsnummer hinterlegt sind.

9.2.2.4 Zwischenfazit

Grundsätzlich erreichen alle drei vorgeschlagenen Optionen das gewünschte Ziel. Deshalb liegt es nahe, ihre Vorzüglichkeit anhand des zusätzlichen administrativen Aufwands zu bewerten.

Der zusätzliche Aufwand bei der Nutzung eines etablierten EU-RED-Zertifizierungssystems besteht in der Zertifizierung von Herstellern und Lagerhäusern, die bisher keine Transaktionen unter der EU RED durchgeführt haben und der Erstellung einer Massenbilanz für das EU-ETS-System.

Der zusätzliche Aufwand der Book & Claim-Option besteht in einem europaweiten Register (z. B. „Europäisches Zentralregister“) für die Überprüfung der GoOs. Annahme ist, dass dies durch eine möglichst bereits bestehende Institution bearbeitet wird. Der Mehraufwand liegt in der Erstellung des Zentralregisters (Datenbank) und dessen Betreuung.

Der zusätzliche Aufwand der Track & Trace-Option besteht in dem Aufbau eines europäischen Inventory Management and Reporting Systems (ggf. Erweiterung der bisherigen Funktionen des Zollsystems) entlang der Lieferkette (Datenbank) und der Übernahme von zusätzlichen Betreuungs- und Kontrollaufgaben durch die Hauptzollämter der Mitgliedsstaaten.

9.2.3 Regulative Rahmenbedingungen der Nachweisführung auf internationaler Ebene

Im Rahmen des DEMO-SPK-Vorhabens werden für die real zu betrachtende Lieferkette des Multiblends die EU RED sowie das EU ETS als regulative Rahmenbedingungen zugrunde gelegt. Im Hinblick auf die steigenden Emissionen im internationalen Flugverkehr und die derzeitigen Bestrebungen, unter anderem der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO), einen einheitlichen Mechanismus zur Emissionsreduktion zu entwickeln, werden im Folgenden relevante Regularien zur Nachweisführung nachhaltiger Biokraftstoffe in Drittländern sowie das von der ICAO beschlossene globale Offsetting-System CORSIA aufgezeigt.

9.2.3.1 CORSIA

Der CORSIA-Mechanismus (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) dient als Klimaschutzinstrument im internationalen Flugverkehr und ist das erste markt-basierte Abkommen eines gesamten Industriesektors für die Reduktion von Treibhausgasemissionen [Bun17]. Es konzentriert sich auf internationale Flüge. Genauer: Flüge, die in einem ICAO-Mitgliedsstaat starten und in einem anderen ICAO-Mitgliedsstaat landen. Diskutiert wird, Flüge innerhalb des EWR weiterhin unter dem EU ETS abzudecken, während Flüge zwischen dem EWR und Drittländern unter CORSIA fallen. Für internationale Flüge innerhalb des EWR gilt eine Doppel-Berichterstattung [DEH19]. Die Umsetzung von CORSIA ist in mehrere Phasen unterteilt: Monitoring-Phase (seit 2019), Pilot-Phase (2021–2023), erste Phase (2024–2026) und zweite Phase (ab 2027) [Int18b].

9.2.3.2 Ausgesuchte Regularien in Drittländern

Als Beispiele für Regularien in Drittländern (im außereuropäischen Raum) werden nationale und regionale Systeme herangezogen:

- ▶ Nationale Systeme, wie z. B. (i) USA: Renewable Fuel Standard 2 (RFS2), (ii) Kanada: Renewable Fuels Regulation, (iii) Japan: Act on the Promotion of Use of Non-fossil Energy Sources and the Effective Use of Fossil Energy Materials by Energy Suppliers des METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) & 5th Strategic Energy Plan des METI
- ▶ Regionale Systeme, wie z. B. (i) Kalifornien/USA: Low Carbon Fuel Standard (LCFS), (ii) Queensland/Australien: Liquid Fuel Supply Regulation

Da alle Systeme unterschiedliche Anforderungen an Nachhaltigkeitskriterien, THG-Berechnung und THG-Einsparungen, Governance und Chain of Custody haben, sind die Unterschiede im Folgenden kurz dargestellt:

Nachhaltigkeitskriterien. In einigen Biokraftstoffrichtlinien gibt es vorgeschriebene flächenbezogene Nachhaltigkeitskriterien, z. B. in der RED (EU) [Eur09c], RFS2 (USA) [Far19], Liquid Fuel Supply Regulation (AUS) [Sta17]. Teilweise wird die Einhaltung dieser Kriterien über unabhängige internationale Standards überprüft (z. B. in Australien durch ISCC, RSB und Bonsucro).

THG-Berechnung. Die Berechnung der Emissionen aus landwirtschaftlicher Produktion, industrieller Verarbeitung (processing) und Transport erfolgt in der EU RED anhand von Standardwerten (engl. Default Values), tatsächlichen (engl. Actual Values) oder disaggregierten Werten (engl. Disaggregated Default Values). [Eur09c] Im RFS2 (USA) werden die Emissionen über sogenannte Renewable Fuel Pathways berechnet, basierend auf den Komponenten: Ausgangsmaterial, Produktionsprozess und Kraftstofftyp. Eine Lebenszyklusanalyse (LCA) wird von der Environmental Protection Agency (EPA) durchgeführt und genehmigt [Unib]. In Australien wird die Berechnung der THG-Emissionen über die Anwendung von ISO-Standards verlangt [Sta17]. In Japan werden für den Import von Bio-Ethanol Default-Werte für Ethanol aus Brasilien und USA vom Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) bereitgestellt [ISC18].

THG-Einsparungen. Die einzelnen Verordnungen legen fest, wie hoch die THG-Einsparungen der Kraftstoffe gegenüber fossilen Energieträgern sein müssen. Während unter der EU RED Einsparungen der Kraftstoffe in Abhängigkeit ihres Produktionszeitraums vorgegeben sind (z. B. 50 % für Produktion vor 2015, 60 % ab 2015, etc.) [Eur15], sieht der RFS2 verschiedene Einsparungsziele je Kraftstoffart vor [Unic]. Grundsätzlich verfügen die meisten der analysierten Systeme über Angaben zur THG-Einsparung, beziehen sich jedoch auf unterschiedliche Referenzwerte.

Chain of Custody. Unter der EU RED sind die Anforderungen für die Chain of Custody entweder Massenbilanz oder Segregation. Unter dem RFS2 wird eine Massen- und Energiebilanz aller Haupt-, Zwischen- und Nebenprodukte zur Definition der einzelnen „Pathways“ verlangt [Unid]. Unter dem RFS2 können nach der Herstellung des finalen Biokraftstoffs sogenannte RINs (Renewable Identification Number) generiert werden. Diese können nach dem Blenden vom Kraftstoff separiert und unabhängig gehandelt werden [Unia]. Da auch das LCFS sowie die Liquid Fuel Supply Regulation (AUS) mit „Pathways“ bzw. LCA-Methoden zur Bestimmung der jeweiligen THG-Emissionen entlang der gesamten Lieferkette arbeiten, fällt eine konkrete Bestimmung der Chain-of-Custody-Methoden für diese Systeme schwer [Cal19]. In Japan ist im Rahmen einer Nachhaltigkeitszertifizierung eine Massenbilanz zur Rückverfolgbarkeit vorgesehen [ISC18].

Governance. In den meisten Verordnungen ist eine Überprüfung durch unabhängige Parteien inzwischen verpflichtend (z. B. EU RED, Liquid Fuel Supply Regulation (AUS), LCFS (Kalifornien) [Eur09c, Sta17, Sta19]. In Japan ist zumindest für Bio-Ethanol eine Überprüfung durch Drittparteien im Rahmen einer Nachhaltigkeitszertifizierung vorgesehen [ISC18]. Unter dem RFS2 wird die Genehmigung der „Pathways“ für die Bio-kraftstoffe von der EPA übernommen [Far19].

9.2.3.3 Standards in Drittländern

Nachhaltigkeitskriterien werden vermehrt in internationalen Regularien für erneuerbare Kraftstoffe berücksichtigt. Zudem werden einige der, von der EU-Kommission als freiwillige Zertifizierungssysteme anerkannten, Standards auch international angewandt, da diese nicht nur die Vorgaben der EU abdecken, sondern darüber hinaus eine Grundlage für die Erfüllung bestimmter Nachhaltigkeitskriterien bilden. Zusätzlich bietet ein international anerkannter Nachhaltigkeitsstandard die Möglichkeit, Lieferketten abzudecken, die sich über verschiedene Standorte und Länder erstrecken. So werden beispielsweise die Systeme ISCC EU und ISCC PLUS, RSB Global, RSPO oder Bonsucro durch Systemnutzer zum Nachweis von Nachhaltigkeitsanforderungen in Japan, Australien und den USA verwendet [ISC18, Sta17, ISC19a, Air].

9.2.4 Vorhandene Zertifizierungsstandards und weitere Nachhaltigkeitsanforderungen

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die Mindestanforderungen der Zertifizierungssysteme, die unter der EU RED eingesetzt und von der EU-Kommission anerkannt sind. Einige der derzeit anerkannten Systeme werden näher betrachtet und relevante Ähnlichkeit und Unterschiede beschrieben. Zusätzliche Anforderungen an eine Nachhaltigkeitszertifizierung und -dokumentation, die für die Entwicklung eines Meta-standards relevant sein können, werden vorgestellt.

9.2.4.1 EU RED-Standards

Um Biokraftstoffe, und somit auch erneuerbare Flugkraftstoffe, in die EU importieren oder dort produzieren zu dürfen, müssen diese nach Vorgabe der EU RED zertifiziert sein. Die Europäische Kommission hat dazu eine Reihe von Zertifizierungssystemen anerkannt. Die Anerkennung einzelner Systeme wird in regelmäßigen Abständen überprüft und ist auf der Homepage der EU-Kommission einsehbar. Stand Februar 2019 sind 14 Zertifizierungssysteme anerkannt [Eur19d]. Sieben der 14 anerkannten Systeme decken die gesamte Wertschöpfungskette ab (ISCC EU, Bonsucro EU, RSB EU RED, RTRS EU RED, 2BSvs, REDcert, Better Biomass) [Eur19b].

Diese sind grundsätzlich auch für eine Zertifizierung von erneuerbaren Flugkraftstoffen geeignet, unterscheiden sich aber z. T. deutlich in ihrem Anforderungsniveau an Nachhaltigkeit, Chain of Custody und Governance.

9.2.4.2 Weitere Nachhaltigkeitsanforderungen

Eine der wichtigen zukünftigen Aufgaben wird es sein, das „Nachhaltigkeitsniveau“ festzulegen, welches erneuerbare Flugkraftstoffe erfüllen sollen – z. B. über einen Metastandard. Zu den zu diskutierenden Anforderungen gehören die Änderungen der gesetzlichen Grundlage auf EU-Ebene, die sich mit Inkrafttreten der EU RED II im Jahr 2021 ergeben, etwa der Ausschluss bestimmter Kraftstoffe (z. B. solche mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderung) [Eur19a]. Weitere Themen beinhalten die Nutzung einer Datenbank und innovativen Fernerkundungs-Tools, welchen den Zertifizierungsaufwand erheblich reduzieren können sowie die Unterstützung von Kleinbauern.

9.3 Fazit

Eine Nachhaltigkeitszertifizierung von erneuerbaren Flugkraftstoffen ist grundsätzlich möglich. Sie kann für alle im Projekt definierten Wertschöpfungsketten (ATJ, HEFA, SIP und PTL) erfolgen. Für den Übergang von dem EU-RED- in das EU-ETS-Regime stehen grundsätzlich drei umsetzbare Optionen für die Nachweisführung der Nachhaltigkeit bereit. Option 1 beinhaltet die EU-RED-Zertifizierung entlang der gesamten Lieferkette bis zum Lieferanten für das Flughafenlager. In Option 2 und 3 ist die Nachhaltigkeitszertifizierung auf die Lieferkette bis zum Punkt des Blendens und / oder Eintreffens des Blends in der EU beschränkt. An diesem Punkt erfolgt dann der Übergang von einem Proof of Sustainability auf ein Guarantee of Origin bei der Book & Claim-Option bzw. Certificate of Origin bei der Track & Trace-Option.

Hilfestellung zur Implementierung nächster Schritte. Um eine reibungslose Implementierung einer der o. g. Optionen zu gewährleisten, ist es notwendig, das Niveau der Nachhaltigkeitsanforderungen in einem Stakeholder-basierten Prozess abzustimmen. Hierzu wurden Handreichungen erarbeitet, welche zukünftige Organisation und Prozessschritte unterstützen sowie ein Tool bereitgestellt, mit dem ein Metastandard erstellt werden kann, gegen den bereits etablierte Zertifizierungssysteme gebenchmarkt werden können.

Implikationen einer Umsetzung im europäischen und internationalen Rahmen. Im Hinblick auf die Entwicklung eines Metastandards ist zu beachten, dass zwischen einem europäischen und einem internationalen Ansatz differenziert werden muss, da eine europäische Lösung notwendigerweise die Vorgaben der EU RED beinhaltet. Für diesen Prozess werden zwei Fälle unterschieden. Fall A ist die Entwicklung eines Metastandards auf Basis der EU-RED-Anforderungen. Dieser erfordert entsprechend ausschließlich die Berücksichtigung der von der EU RED vorgegebenen Kriterien. Fall B bildet einen erweiterten Metastandard ab, dessen gesetzliche Grundlage jedoch weiterhin die EU RED bildet. Dieser enthält Anforderungen in den Bereichen Nachhaltigkeit, Chain of Custody und Governance, die über die EU-Kriterien hinausgehen. Die Erarbeitung solcher zusätzlichen Kriterien sollte in einem Multi-Stakeholder-Prozess erfolgen. Dabei können bereits vorhandene Metastandards, wie etwa der aireg-Metastandard sowie das verfügbare Tool, eine hilfreiche Grundlage darstellen [Avi13]. Fall C betrachtet die Entwicklung eines internationalen Metastandards. Ein solcher Standard kann sich an den relevanten gesetzlichen Anforderungen in der EU sowie in Drittländern (z. B. RFS2 in den USA, LCFS in Kalifornien etc.) und CORSIA als internationalem Mechanismus orientieren. Ziel eines solchen Ansatzes ist, solche Elemente aus den verschiedenen Systemen zu vereinen, die Ähnlichkeiten in den Bereichen Nachhaltigkeit, Chain of Custody und / oder Governance aufzeigen. Aufgrund der teilweise sehr unterschiedlichen Ansätze der Regularien kann dies jedoch nicht kurzfristig umgesetzt werden und ist vielmehr Teil einer mittelfristigen Anpassung, die zu diskutieren ist.

10 Konzeptionierung einer Anrechnungsmethodik für den Emissionshandel

Erneuerbare Flugkraftstoffe (SAF) können als Drop-In Kraftstoff sowohl in der vorhandenen Versorgungsinfrastruktur als auch in den bestehenden Flugzeugflotten uneingeschränkt eingesetzt werden. Obwohl dies vielfach demonstriert wurde, werden sie im kommerziellen Luftverkehr bisher nur eingeschränkt verwendet. Neben hohen Herstellungskosten gegenüber konventionellen Flugkraftstoffen stellt der bisher nicht ausreichend operationalisierte Umgang zur Erlangung von Emissionsminderungszertifikaten, beispielsweise im Europäischen Emissionshandel (EU ETS), eine weitere Markteintrittsbarriere dar.

Für Flüge die einem Mechanismus zur Regulation von Treibhausgasen wie dem EU ETS unterliegen, kompensieren Fluggesellschaften ihre CO₂-Emissionen durch den Erwerb von Emissionszertifikaten (z. B. EU ETS Emissionsberechtigungen). Alternativ dazu kann eine Fluggesellschaft ihre Emissionen durch den Erwerb und die Nutzung von SAF – aufgrund ihrer vorteilhaften Emissionsbilanz – reduzieren und damit den Zukauf von Emissionszertifikaten verringern oder potenziell vermeiden. Um die Nutzung von SAF als Fluggesellschaft gegenüber einer Behörde im Falle einer flächendeckenden Verwendung von SAF nachweisen und anrechnen zu können, sind praxistaugliche Verfahren erforderlich, mit denen z. B. verwendete SAF-Mengen und Nachhaltigkeitsnachweise mit geringem administrativem Aufwand dokumentiert, geprüft und entlang der Bereitstellungskette weitergegeben und nachverfolgt werden können. Diesen Anforderungen werden die bestehenden Verfahren, die weder aufeinander abgestimmt noch einen ganzheitlichen, praxistauglichen Ansatz verfolgen, nicht gerecht – was am Beispiel des EU ETS deutlich wird. Im Rahmen des Abbaus von Markteintrittsbarrieren bzw. der Wegbereitung für eine nahtlose und flächendeckende Verwendung von SAF sind somit auch praxistaugliche Verfahren für deren Nachweisführung und Anrechnung zwingend erforderlich.

10.1 Status bestehender Anrechnungssysteme im EU ETS

Der Luftverkehr wurde 2010 in das EU ETS integriert. Seit 2012 müssen Luftfahrzeugbetreiber ihre Emissionen für Flüge innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraumes durch Emissionsberechtigungen decken [Eur08a, Art. 14 (3); Anhang 1 c]. Im Gegensatz zu konventionellen Flugkraftstoffen wird für SAF im EU ETS derzeit ein Emissionsfaktor von Null verwendet, sofern sie die Nachhaltigkeitskriterien der EU RED erfüllen. Sie gelten somit als emissionsfrei [Eur18a, 35 f., Eur12, Art 38 (2)].

Im EU ETS war ursprünglich nur der physische Verbraucher von SAF anrechnungswürdig. Es wurde eine möglichst realitätsgetreue Zuordnung der verwendeten Kraftstoffe auf die jeweiligen Flüge verlangt (per flight approach). Unter Verwendung der bestehenden Kraftstoffversorgungsinfrastruktur bzw. insbesondere an großen Verkehrsflughäfen, die auf Pipelinesysteme und/oder gemeinsam betriebene Tanklager angewiesen sind¹³, ist es nur bedingt bis gar nicht erfüllbar, einen Verbrauchsnachweis über die tatsächliche physische Zusammensetzung verbrauchter Kraftstoffe zu erbringen, da es spätestens im Flughafentanklager zur kontinuierlichen Vermischung von Kraftstoffen unterschiedlicher Herkunft kommt und ins Tanklager eingelagerte SAF sowie fossile Kraftstoffmoleküle nicht mehr getrennt verfolgt werden können. Dedizierte und individuelle Luftfahrzeugbetankungen mit Kraftstoffgemischen einer gewünschten, individuellen Zusammensetzung können dabei nicht umgesetzt werden, da jede zukünftige Entnahme aus dem Flughafentanklager einen SAF-

¹³ Flugkraftstoffe sind ein standardisiertes Produkt, was die vereinheitlichte operative Handhabung ermöglicht und eine separate Logistik für verschiedene Kraftstoffchargen vermeidet. Zur Kraftstoffbereitstellung und Betankung von Flugzeugen verwenden unterschiedliche Kraftstofflieferanten/Durchsetzer daher in der Regel eine gemeinsame Infrastruktur (z. B. Tanklager und Pipelines), bei der eine Vermischung einzelner Kraftstoffchargen unvermeidlich ist. Diese kollektive Infrastrukturnutzung ist aus technischer Sicht sinnvoll und unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten vorteilhaft, da die Logistikkomplexität, der Infrastrukturbedarf sowie transportbedingte Emissionen und Kosten verringert werden.

Anteil enthält. Das System ist darauf ausgelegt, Flugkraftstoffe einer einzigen Kraftstoffsorte, ohne Separierung unterschiedlicher Kraftstoffchargen und/oder -eigenschaften, aufzunehmen [Eur18a, S. 36].

Angesichts dieser Problematik wurde die Anrechnung von SAF für Luftfahrtunternehmen durch einen mathematischen/bilanziellen Anrechnungsansatz flexibilisiert. Im realen und großtechnischen Einsatz werden SAF spätestens am Flughafen in die gemeinsame Kraftstoffinfrastruktur (Flughafentanklager, Tankwagen, Flurbetankungssysteme) eingebracht und somit auch von allen am Standort operierenden Luftfahrzeugbetreibern physisch getankt und verbraucht. Eine Anrechenbarkeit ist jedoch nur für denjenigen Luftfahrzeugbetreiber gewünscht, der den erneuerbaren Kraftstoff gekauft und somit für die nachhaltigen Eigenschaften des Kraftstoffes vergütet hat. Eine entsprechende Zuordnung zur Anrechnung der käuflich erworbenen und vergüteten SAF ist dabei nur bilanziell möglich.

Als Weiterentwicklung zum „per flight approach“ kann daher eine bilanzielle Anrechnung erfolgen, bei der die verwendeten SAF-Mengen auf Basis von Rechnungsunterlagen von Treibstofflieferanten bilanziert werden. Der SAF-Anteil ergibt sich aus den Mengen an erneuerbarem Kraftstoff, die im Namen eines Luftfahrzeugbetreibers über einen bestimmten Lieferzeitraum ins jeweilige Flughafentanklager eingeliefert wurden und der gesamten Kraftstoffmenge, die für EU ETS relevante Flüge des Luftfahrzeugbetreibers am jeweiligen Flughafen innerhalb des gleichen Zeitraums getankt wurde. Bei diesem Anrechnungsverfahren stellt der jeweilige Flughafen bzw. das jeweilige Flughafentanklager die Bilanzgrenze dar [Eur18a, Pel19].

Obleich dieser Ansatz die strenge Zuordnung von EU ETS relevanten Flügen und den physisch verbrauchten Kraftstoffen aufhebt, ist dieses Verfahren bis heute weder praxistauglich operationalisiert, noch EU ETS weit harmonisiert. Auch softwareseitig sind Systeme für die Lagerhaltung von Flugkraftstoffen nicht (flächendeckend) für das bilanzielle Anrechnungsverfahren ausgelegt, da sie nur physische Ein- und Auslagerungen messen, um den Bestand zu ermitteln und hinsichtlich der Verwendung der Verbrauchsmenge auf die Rückmeldungen der Tankdienste über deren durchgeführte Luftfahrzeugbetankungen angewiesen sind. Die Komplexität dieses Ansatzes potenziert sich zudem, wenn ein Luftfahrzeugbetreiber an einem Flughafen EU ETS relevante und nicht EU ETS relevante Flüge sowie Flüge nach verschiedenen Klimainstrumenten (z. B. EU ETS und CORSIA) durchführt. Eine differenzierte Nachweisführung und Anrechnung von Kraftstoffen sowie die Prüfung und Verifizierung der Verwendung von SAF durch anerkannte Verifizierer und zuständige Behörden für den Emissionshandel ist dabei mit den heutigen Verfahren und insbesondere im Falle der flächendeckenden Verwendung von SAF weder handhabbar noch kosteneffizient durchführbar.

Zudem muss der Luftfahrzeugbetreiber zur Anrechnung der SAF-Mengen jeweils RED-konforme Nachhaltigkeitsnachweise erbringen, ohne den die erneuerbaren Flugkraftstoffe als konventionell betrachtet werden und der Luftfahrzeugbetreiber in der Folge eine ausreichende Menge an EU-ETS-Emissionsberechtigungen erwerben muss [Eur18a, 6, 36, 58, Eur12, Art. 53, Eur09b, Art. 18, EEA19, S. 48]. Der erforderliche Nachhaltigkeitsnachweis sowie einschlägige Informationen zur Nachhaltigkeitseigenschaft eines SAF müssen dementsprechend entlang der Bereitstellungskette mit dem physischen Kraftstoff transportbegleitend bis zum Flughafentanklager mitgeführt werden. Dafür sind die derzeitige Logistik, bestehende Verfahren der Nachweisführung und einschlägige Dokumentationsgrundlagen in der Transportkette allerdings nicht ausgelegt, was eine separate Kraftstofflogistik bis zum Flughafentanklager erfordern kann. Die vorgelagerte vorhandene Infrastruktur des Kraftstoffversorgungssystems und somit auch das Drop-In-Potenzial der Kraftstoffe bleiben unter diesen Voraussetzungen ungenutzt, was technisch nicht erforderlich und ökologisch sowie ökonomisch nachteilig ist.

Insgesamt fehlt bisher ein ganzheitliches Nachweis- und Anrechnungsverfahren für SAF im EU ETS (sowie global). Eine flächendeckende Verwendung von SAF erfordert es, die EU-ETS-System-/ Bilanzgrenze auf das gesamte Kraftstoffversorgungssystem zu erweitern und geeignete Verfahren zur Nachweisführung (Chain-of-Custody¹⁴) und Anrechnung zu entwickeln.

10.2 Konzeptionierung möglicher Anrechnungsverfahren

Entscheidet sich ein Luftfahrzeugbetreiber dazu, seine Emissionen durch den Einsatz von SAF zu reduzieren, ermöglichen die Bilanzierungsoptionen Track & Trace und Book & Claim im Hinblick auf die Bilanzierung grundsätzlich eine effektive Anrechnung dieser Kraftstoffe in einem Treibhausgasregulierungssystem wie dem EU ETS. Die Grundprinzipien und verbindlichen Anforderungen beider Ansätze werden im Folgenden am Beispiel des EU ETS beschrieben.

10.2.1 Track & Trace

Im Rahmen des Track & Trace-Ansatzes muss die Identität der hergestellten Kraftstoffmenge mit der korrespondierenden Zertifikatmenge übereinstimmen. Dies wird durch eine lückenlose Verfolgung der Bereitstellungskette von SAF, d. h. von der Entstehung über dessen Lagerung, Vermischung und Transport bis zum Flughafentanklager, sichergestellt, indem eine transportbegleitende Zurverfügungstellung der erforderlichen Dokumente, die bei jeder Aus- und Einlagerung den physischen Warenstrom begleiten, umgesetzt wird. Dies kann mittels elektronischer Datenübertragung erfolgen und bedarf nicht zwingend einer transportbegleitenden Papierunterlage.

Die präzise Mengenverfolgung im Track & Trace-Verfahren findet jedoch im Flughafentanklager ein vorzeitiges Ende, weil die Ein- und Auslagerung von Mengen keiner zwingend vorgegebenen Reihenfolge gehorchen muss und zudem durch die gemeinschaftliche Lagerung verschiedener Produktionsmengen bei gleichzeitig gemeinsamer Auslagerung an alle zur Betankung anstehenden Luftfahrzeuge die Identität von Produkt und Produkteigenschaft (d. h. Emissionsvorteil) durch den Betrieb des Flughafentanklagers verloren geht. Da das Flughafentanklager zugleich der Zollüberwachung für den Verwendungsnachweis steuerbefreiten Flugturbinenkraftstoffs unterliegt und alle Treibstoffempfänger ihre Mengendaten über die Vorfeld-Tankdienste an das Flughafentanklager zurückmelden, kann der rechnerische Verwendungsnachweis im Flughafentanklager dokumentiert und lückenlos verfolgt werden. Da die Nämlichkeit des Produktes in einem Gemeinschaftstank zwangsläufig verloren geht, liegt die Besonderheit des Track & Trace-Verfahrens darin, dass der Tanklagerbetreiber unter Zugrundelegung eines herkömmlichen Verbrauchsfolgeverfahrens die SAF-Bestände mit ganz unterschiedlichen Emissionsminderungsfaktoren präzise bewerten und anhand des Gesamtverbrauchs an Flugkraftstoffen den jeweiligen Eigentümern der Produktmengen rechnerisch zurechnen und so den Verbrauch nachweisen kann. Im Hinblick auf die derzeit diskutierte Reform der EU RED durch eine Novellierung der Anrechnungsmethodik auf rohstoffspezifische Anrechnungswerte kann das Track & Trace-Verfahren auch Multiblends emissionskongruent abbilden und somit dem jeweiligen Eigentümer bzw. Verkäufer eine adäquate Zertifikatausstellung ermöglichen.

Vereinfacht ausgedrückt werden die Hersteller und nachfolgend der Eigentümer eines Kraftstoffgemischs im Rahmen des Track & Trace-Ansatzes verpflichtet, die rechnerischen Mengenanteile der nachhaltigen Flugkraftstoffe in einem Gemisch in der (Transport-)Dokumentation bis zum Flughafen-Tanklager mitzuführen,

¹⁴ Eine Chain-of-Custody bezeichnet den chronologischen physischen oder elektronischen Nachweis und/oder die Dokumentation über den Kauf, den Transport, die Kontrolle und Übertragung eines Produktes oder bestimmter Produkteigenschaften (z. B. Nachhaltigkeitseigenschaften) bzw. die Methode, Eigenschaften von Ausgangsstoffen / Zwischenprodukten (z. B. Nachhaltigkeitseigenschaften eines Rohstoffes) mit Endprodukten zu verknüpfen [IPI10, S. 13, Eur13, S. 19]. Chain-of-Custody-Konzepte werden üblicherweise in die drei Optionen „Physische Trennung“, „Massenbilanz“ und „Book & Claim“ unterschieden [Deh07, S. 52, Sta15, S. 41].

obwohl eine physische Trennung im Gemisch nicht mehr möglich ist. Im Flughafen-Tanklager wird die Mengenbuchhaltung für die Bestände einzelner Gesellschafter oder Drittdurchsetzer entsprechend erweitert.

Die Luftfahrtunternehmen und die Produktverkäufer werden regulatorisch über deren Gestattungsverträge angehalten, die mengenbezogenen Vertragsbestandteile für SAF gegenüber dem Tanklager-Betreiber und dem Zoll als Aufsichtsbehörde offen zu legen. Damit kann in der Mengenbuchhaltung des Flughafen-Tanklagers eine bilanzielle Nachweisführung über die Verbräuche dargestellt werden und diese an den Verkäufer des SAF zur Ausstellung entsprechender Zertifikate zurückgemeldet werden. Da die Mengenbuchhaltung eines Flughafen-Tanklagers wegen der Steueraussetzung im gewerblichen Luftverkehr der Zollüberwachung unterliegt, können auch die Endverbraucher-Verwendungsnachweise über SAF im Sinne des EU ETS in die Zollüberwachung eingebunden werden.

Workshop-Erkenntnisse

Zu Fragestellungen der Darstellung von Gemischanteilen in der Mengenbuchhaltung eines Lagerhalters im Rahmen eines Track & Trace-Ansatzes wurde mit Vertretern des Zolls als zuständige Behörde für die Steuerländer, Vertretern eines Dienstleisters im Bereich Flugzeugbetankung sowie mit Anbietern von Spezialsoftware für die Lagerhaltung von Flugkraftstoffen ein Workshop durchgeführt.

Die Softwareprodukte beider Anbieter werden vom Deutschen Zoll als Datenbereitstellungsgrundlage anerkannt. Somit besteht eine zugelassene Software zur Prüfung der Steueraussetzung für Flugturbinenkraftstoff. Bislang erstreckt sich der Prüfumfang des Zolls auf die Mengenverfolgung und den Verbrauch von Flugturbinenkraftstoff durch Berechtigte¹⁵. Die Überprüfung des Verbrauchs an SAF zum Zwecke der Ausstellung von Zertifikaten im Emissionshandel gehört angabegemäß derzeit nicht zu den Aufgaben des Zolls. Es liegt jedoch thematisch nahe, die Überwachungspflichten für SAF in Analogie zur Überwachung der Steueraussetzung ebenfalls beim Zoll anzusiedeln, da dieser im Auftrag des Bundesministeriums für Finanzen tätig wird und um eine nationale Behörde in die Überwachung von SAF miteinzubeziehen. Allerdings müssen in dieser Lösung die Nachweisfristen für die Steuerbefreiung und für die Emissionsanrechnung harmonisiert werden.

Im Rahmen der Mengenverfolgung auf Basis einer Massenbilanz ist zunächst festzuhalten, dass die Bestandsführung in der Lagermengenverwaltung beider Anbieter volumetrisch erfolgt. Das Ausdehnungsverhalten des Flugturbinenkraftstoffs bei längerer Verweildauer in einem Lagertank mit einer Mengenzunahme bei gleichzeitiger Dichteabnahme wird in beiden Softwareprodukten über rechnerische Korrekturfaktoren erfasst und der Mehrbestand steuerunschädlich den jeweiligen Bestandshaltern (Eigentümern) buchhalterisch zugeschrieben. Dieses Zuschreibungsverfahren ist zollseitig anerkannt. Auch der Totbestand im Pumpensumpf eines Tanks sowie der Totbestand in Leitungen und Hydrantensystemen kann zunächst unter Steueraussetzung gelagert werden, solange die endgültige Verwendungsart noch nicht feststeht. In der Mengenbuchhaltung aktiver Bestände werden diese Totbestände dem Tanklager, nicht jedoch dem Bestandsumfang einzelner Bestandshalter zugeschrieben. Für die Erfassung der erneuerbaren Kraftstoffanteile in der Bestandsführung eines Flughafentanklagers ist die Totbestandsmenge im Tanklager deshalb für die Betrachtung der erneuerbaren Kraftstoffanteile unmaßgeblich.

Lagerbestände werden in der Mengenbuchhaltung eines Tanklagerbetreibers grundsätzlich nach dem First-In-First-Out-Verfahren (FIFO) der Bestandsveränderung geführt. Demnach verlassen die eingelagerten Produktmengen das Lager physisch in der Reihenfolge ihrer Einlagerung. Dies vorausgesetzt, wird auch ein eingelagertes Gemisch respektive ein Blend aus erneuerbarem und herkömmlichen JET A-1 in der Abfolge nach FIFO in die Auslagerung überführt und der physische Bestand des Gemischs aus erneuerbarem Flugkraftstoff

¹⁵ Davon abzugrenzen sind Verbräuche, die der normalen Besteuerung unterliegen, wie z.B. Überflüge ohne Passagiere und/oder Fracht, Testflüge, Triebwerksprobeläufe oder Spülmengen nach Tankreinigungen.

und JET A-1 im Wege der gemeinschaftlichen Lagerung aller Bestände an alle Luftfahrzeuge abgegeben, die aus dem Auslagerungstank Flugturbinenkraftstoff erhalten. Da das Gemisch aus erneuerbarem Kraftstoff und JET A-1 die Zulassungsanforderungen der ASTM D1655 sowie der Spezifikation JET A-1 erfüllt, ist eine gesonderte Deklaration des Gemischs gegenüber der empfangenden Luftfahrtgesellschaft nicht erforderlich.

In der physischen Ein- und Auslagerung eines Gemischs kann insofern der körperliche Aufbewahrungsort und der Lagerabgang bis zur vollständigen Entleerung eines Tanks in groben Zügen nachverfolgt werden. Jedoch kann daraus nicht der Eigentumsübergang auf das Luftfahrzeug einer Luftfahrtgesellschaft (im Sinne des Endverbraachernachweises) nachvollzogen werden. In der Bestandsführung des Flughafentanklagers ist daher zukünftig zu berücksichtigen, dass der buchhalterische Abgang von SAF unabhängig vom physischen Abgang der Lagermenge, in der sich das Gemisch befindet, vollzogen werden kann.

Maßgeblich für den buchhalterischen Abgang sind hierbei die Lieferverträge zwischen Luftfahrtgesellschaften und Bestandhaltern im Tanklager, die eine Gemischbelieferung aus erneuerbarem Flugkraftstoff und herkömmlichem JET A-1 vertraglich vorsehen. Dabei ist die Ausgestaltung dieser Lieferverträge eine bilaterale Angelegenheit zwischen Verkäufer und Käufer, deren Verhandlungsergebnis durch den Lagerhalter des Flughafentanklagers buchhalterisch nachvollzogen werden muss. So kann beispielsweise eine Luftfahrtgesellschaft verlangen, dass alle Luftfahrzeuge der Gesellschaft an einem Flughafen mit einem vorgegebenen Prozentanteil an erneuerbarem Kraftstoff betankt werden. Alternativ könnte die Luftfahrtgesellschaft auch bestimmen, dass ihr im Laufe eines Monats eine definierte SAF-Menge in Form eines Gemischs geliefert wird. Diese vertraglichen Vorgaben lassen sich durch die täglichen Betankungsmengentrükmeldungen der Tankdienste an den Tanklagerhalter für alle Luftfahrzeugbetankungen in der buchhalterischen Bestandsführung abbilden, wenn neben der rein mengenmäßigen Zugangs- und Abgangsbewegungen die Verwaltung der SAF-Mengen in Gemischform in einer sogenannten „zweiten Buchhaltungsebene“ nachvollzogen wird.

Daraus folgt, dass für die Anerkennung des Verwendungsnachweises die Verkäufer und Endverbraucher verpflichtet werden, den mengenmäßigen Umfang und die gewählte Art der Luftfahrzeugbetankungen aus einem Liefervertrag gegenüber dem Tanklagerbetreiber offen zu legen, damit dieser den „buchhalterischen Verbrauch“ aus den Tankmengeninformationen der Tankdienste in die „zweite Buchhaltungsebene“ übertragen kann. Dies gilt sowohl für binäre Gemische/Blends aus erneuerbarem Flugkraftstoff und herkömmlichem JET A-1 als auch für Multiblends aus mehreren erneuerbaren Komponenten in einer Mischung mit JET A-1 außerhalb der physischen Vermischung durch gemeinschaftliche Lagerung mit dem JET A-1 anderer Bestandhalter in einem Flughafentanklager.

Die buchhalterische Verbrauchsdarstellung eines SAF anhand von Vertragsvorgaben entspricht nicht zwangsläufig dem physischen Verbrauch durch Auslagerung eines Tanks zum Zwecke der Luftfahrzeugbetankung. So kann buchhalterisch noch ein Bestand an SAF in der „zweiten Buchhaltungsebene“ für einen Bestandhalter vorhanden sein, obwohl der physische Bestand durch bereits erfolgte Auslagerung eines Tanks mit einem Gemisch aus erneuerbarem Kraftstoff und herkömmlichem JET A-1 schon vollständig verbraucht worden ist, weil alle Abnehmer aus diesem Tank beliefert wurden.

Für die Mengenverfolgung nach Massenbilanz im Wege des Track & Trace-Verfahrens wird daher der zollsteuerliche Lagerhalter die bei ihm eingelagerten Gemischmengen buchhalterisch in erneuerbare Komponenten und JET A-1 aufteilen, um so einen virtuellen erneuerbaren Flugkraftstoffbestand verwalten zu können. Das gilt in gleicher Weise auch für die Verwaltung von Multiblends. Dazu muss die Zusammensetzung des Multiblends bekannt sein, um die einzelnen erneuerbaren Komponenten mengenmäßig erfassen und verfolgen zu können. Die unterschiedliche Nachhaltigkeitsbewertung einzelner Komponenten ist jedoch kein zu dokumentierendes Kriterium für den Lagerhalter, der lediglich die Mengenbuchhaltung in der „zweiten Buchhaltungsebene“ quantitativ für eine von der physischen Auslagerung abweichende Mengenverwaltung dokumentiert.

Die Zuordnung von Anrechnungswerten für einzelne erneuerbare Flugkraftstoffsorten obliegt dem Verkäufer, der diesen Umstand bei der Zertifikaterstellung berücksichtigen muss. Dies gilt insbesondere für die derzeit in Arbeit befindliche Novellierung der EU RED, mit einer möglichen Begrenzung der CO₂-Gutschrift auf die tatsächliche CO₂-Ersparnis bzw. einen rohstoffspezifischen „Default-Value“, der dann zur Anwendung gelangt. Daher ist es möglich, dass SAF zukünftig nicht mehr generalisiert als „emissionsfrei“ angerechnet werden, sondern sich dessen jeweilige CO₂-Ersparnis nach EU RED im EU ETS spiegeln wird. In jedem Fall – also bei einem erneuerbaren Flugkraftstoff mit nur einer alternativen Kraftstoffsorte sowie bei Vorhandensein eines Multiblends – meldet der Lagerhalter seine Bestände in der „zweiten Buchhaltungsebene“ täglich an seine Bestandshalter zurück. Nach Maßgabe der ihm vorliegenden Lieferverträge bucht der Lagerhalter für jede Luftfahrzeugbetankung eines Vertragsnehmers, der mit SAF betankt werden möchte, den vorgegebenen Mengenabgang an SAF aus jeder Betankung als Verbrauch auch in der „zweiten Buchhaltungsebene“ und reduziert damit den SAF-Bestand eines Bestandshalters im Umfang der zu beachtenden Vertragsregeln. Die so zu ermittelnde Verbrauchsmenge an SAF eines Bestandshalters ermächtigt den Lagerhalter gegenüber dem Verkäufer der erneuerbaren Kraftstoffe (bisheriger Eigentümer) wie auch gegenüber dem Zoll als Aufsichtsorgan der Steueraussetzung eine entsprechende Verbrauchsbestätigung auszufertigen, die wiederum durch den Verkäufer in ein Zertifikat umgewandelt wird.

Da alle Verbräuche eines Tanklagers der Steueraufsicht unterliegen, kann auch die Bestätigung der SAF-Verbräuche an Luftfahrzeuge im Sinne des Endverbrauchernachweises prüffähig erbracht werden. Die Bestätigung des Tanklagerbetreibers erfolgt gegenüber dem Eigentümer, der wiederum für diese Menge Zertifikate ausstellen kann bzw. ausgestellt bekommt. Die Kongruenz von Zertifikatsmengen mit den Verbrauchsmengen eines Flughafentanklagers lässt sich daher recht einfach dokumentieren und nachweisen, sofern das Flughafentanklager in dessen Mengenebuchhaltung über eine „zweite Buchhaltungsebene“ verfügt und dem Lagerhalter die vertraglichen Vorgaben aus den Lieferverträgen offengelegt werden, um diese Regelungen in der Bestandsverwaltung eines Bestandshalters umsetzen zu können.

10.2.2 Book & Claim

Als ein alternativer, flexibler Ansatz zur Anrechnung erneuerbarer Flugkraftstoffe dient der Book & Claim-Ansatz. Dieser Ansatz ist in der Praxis beispielsweise zur Vermarktung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen, Wärme / Kälte und Biomethan im deutschen und europäischen Energiesektor etabliert [UBA17, UBA18b, den10]. Als Konzept zur Anrechnung erneuerbarer Flugkraftstoffe wird Book & Claim in Leitfäden der Verordnung 601/2012/EG (Monitoring-Verordnung) bereits aufgeführt, jedoch fehlen jegliche Ansätze einer Konzeptausgestaltung [Eur18a, S. 36]. Vor diesem Hintergrund ist die grundlegende Ausgestaltung eines Book & Claim-Konzeptes und der wesentlichen Funktionsweise unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen des (europäischen) Luftverkehrs erforderlich. Darauf aufbauend ist die detaillierte Operationalisierung dieses Ansatzes zu untersuchen und auszuarbeiten.

Gegenüber anderen Chain-of-Custody-Konzepten, wie der physischen Trennung oder einer Massenbilanz, hebt ein Book & Claim-Ansatz die Trennung von zertifizierten und nicht zertifizierten Produkten vollständig auf. Dazu werden die Nachhaltigkeitseigenschaften einer SAF-Charge an einem bestimmten Punkt in der Bereitstellungskette auf handelbare Herkunftsnachweise (GoO) übertragen. Das bisher zertifizierte Produkt (hier SAF) gilt nunmehr als nicht zertifiziert und kann mit anderen nicht zertifizierten Produkten entlang der Lieferkette gemischt werden¹⁶. Für eine in das Kraftstoffversorgungssystem eingespeiste Menge an SAF erhält

¹⁶ Da ein nach ASTM D7566 spezifikationskonformer SAF-Blend mit der Inverkehrbringung eine gewöhnliche JET A-1-Neubezeichnung nach ASTM D1655 erhält und entsprechend entlang der weiteren Bereitstellungskette wie herkömmliches JET A-1 behandelt werden

der Hersteller/Inverkehrbringer¹⁷ eine wertentsprechende Menge an SAF-Herkunftsnachweisen, die unabhängig vom originären physischen Produkt transferiert und gehandelt werden können. Mit der Einlösung eines Herkunftsnachweises durch den Endverbraucher (hier eine Fluggesellschaft) wird die Produkteigenschaft (hier die Nachhaltigkeitseigenschaften bzw. der Emissionsvorteil eines SAF) auf eine wertentsprechende Produktmenge eines anderen zertifizierten oder nicht zertifizierten Produkts übertragen. Das bedeutet, basierend auf einem gültigen und verbindlichen Kaufvertrag kann der Hersteller/Inverkehrbringer von SAF zunächst eine wertentsprechende Menge an SAF-Herkunftsnachweisen ausstellen und anschließend an die jeweiligen Fluggesellschaften als Endverbraucher übertragen, die die SAF-Herkunftsnachweise als SAF-Verbrauchsnachweis und zur Anrechnung im EU ETS verwenden können. Der erneuerbare Flugkraftstoff muss dabei nicht vom Endverbraucher selbst physisch verbraucht worden sein; die Herkunftsnachweise weisen gegenüber der zuständigen Behörde (z. B. der Deutschen Emissionshandelsstelle) nach, dass eine gleichwertige Menge an RED-konformen SAF in das Kraftstoffversorgungssystem eingespeist und damit in einem Flugzeug verbrannt wird bzw. wurde [Has09, 110 ff, Sta15, S. 41, IPI10, S. 14, ISE16, S. 16].

Für das SAF entrichtet der Endverbraucher im Vergleich zu fossilem JET A-1 einen höheren Marktpreis und erhält zur Kompensation des Mehrpreises Herkunftsnachweise – proportional zur erworbenen SAF-Menge. Alternativ kann das SAF zum Marktpreis von fossilem JET A-1 verkauft werden, wobei der Hersteller/Inverkehrbringer seinen erhöhten Herstellungsaufwand aus dem gesonderten Verkauf der Herkunftsnachweise deckt.

Eine Nachweisführung über die Einhaltung von RED-Nachhaltigkeitskriterien sowie die Nachweisführung über bestimmte SAF Produkteigenschaften (z. B. THG-Emissionseigenschaften) müssen in der Mengeneintragung des Flughafentanklagers, zumindest für die Anrechnung im EU ETS nicht abgebildet und nachverfolgt werden. Zwar kann es auch in einem Book & Claim-Konzept aus haftungs- / versicherungstechnischen Gründen erforderlich sein, die erneuerbaren / synthetischen Kraftstoffkomponenten in der Tanklagerbuchhaltung auszuweisen, z. B. zur Erfüllung des Indemnification Agreements¹⁸, allerdings ist dabei keine Nachhaltigkeitsdokumentation, sondern eine Dokumentation über „technische“ Kraftstoffeigenschaften und -qualitäten erforderlich, was insofern kein Belangen der Nachweisführung und Anrechnung von SAF im EU ETS darstellt. Die Zurechnungen von Kraftstoffen nach Luftfahrzeugbetankungen entsprechend den Vertragsbestimmungen zwischen Verkäufer und Käufer sind zwar weiterhin rechnerisch im Tanklager nachzuvollziehen und in der Mengeneintragung abzubilden, bedürfen zur Anrechnung von SAF mittels eines Book & Claim-Konzeptes allerdings keiner Anpassung.

Die wesentlichen Bestandteile des beschriebenen Book & Claim-Ansatzes sind in der nachfolgenden Abb. 34 schematisch dargestellt. Ihre Funktionen und Verknüpfungen werden im Folgenden erläutert.

kann, ist eine derartige Mischung nicht nur im Rahmen des Book & Claim-Ansatzes vereinbar, sondern auch technisch und praktisch zulässig.

¹⁷ Hier ist nicht ausschließlich eine Raffinerie bzw. ein Raffineriestandort gemeint. Gemeint ist das erste Steuerlager in der EU (z. B. eine Raffinerie / Produktionsstätte, ein Mischbetrieb oder ein Tanklager an einem Import-Hafen), an dem ein spezifikationskonformer SAF-Blend, als JET A-1 deklariert, das Gelände des Steuerlagers durch ein EMCS-Verfahren verlässt.

¹⁸ Nach dem Indemnification Agreement Consortium haftet zunächst der Verkäufer, in dessen Namen ein Luftfahrzeug betankt wurde. Diese Haftung besteht verschuldensunabhängig, um einen Schadensfall (Absturz) sehr zeitnah regulieren zu können. Dem haftenden Verkäufer bleibt es jedoch unbenommen, im Nachgang Regress bei dem tatsächlichen Verursacher des Schadens zu nehmen. Im Fall von synthetischen Kraftstoffblends muss daher die Mischungs- und Spezifikationskonformität bei der Einlagerung in das Tanklager nachgewiesen werden. Dies ist eine Obliegenheitspflicht des Tanklagerbetreibers, wenn das Tanklager unter den Rahmenbedingungen des international üblichen Indemnification Agreement Consortium betrieben wird.

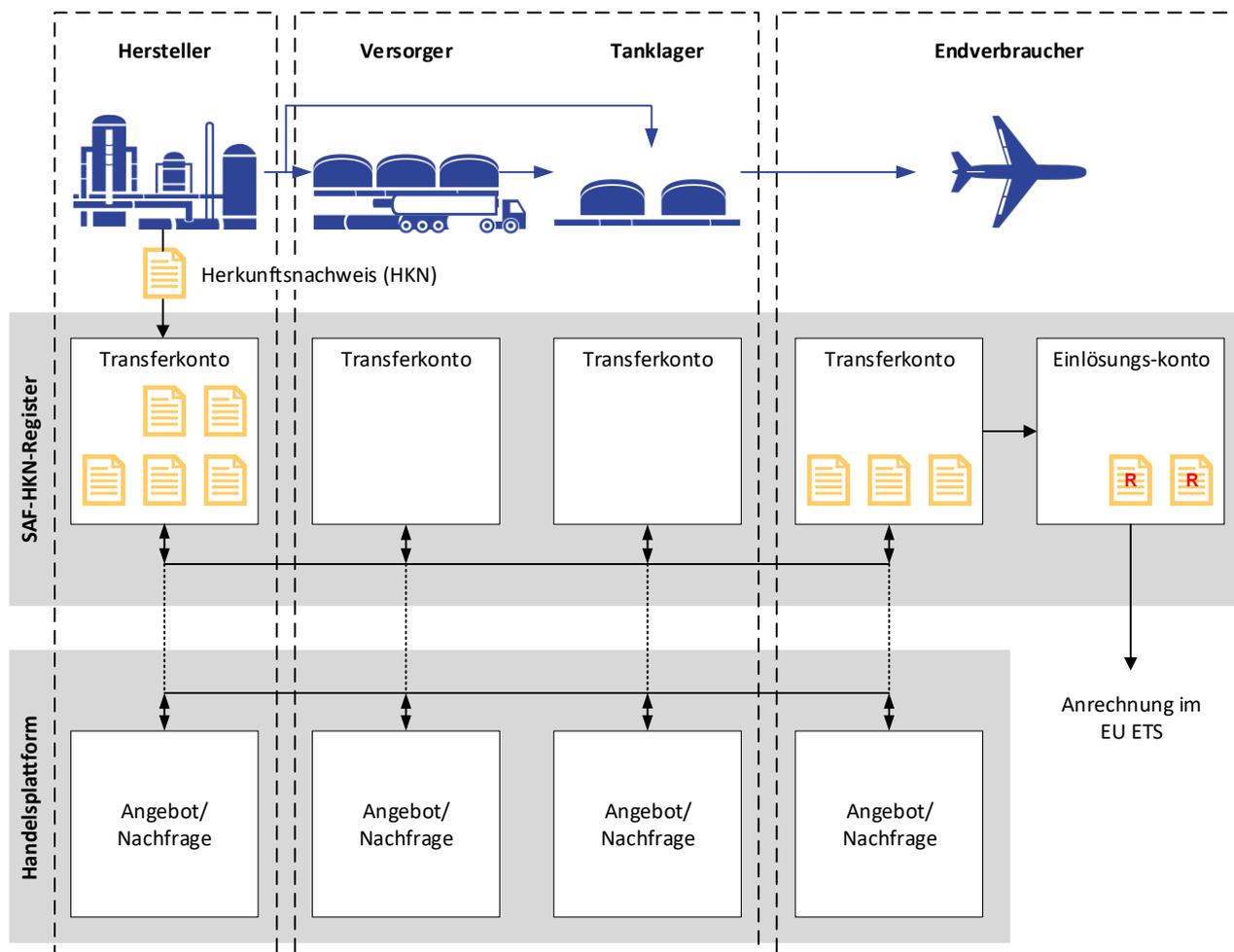


Abb. 34 Kernelemente und Funktionsweise des Book & Claim Ansatzes

Betrugsschutz und Steueraufsicht

Für ein Book & Claim-Konzept zur Anrechnung erneuerbarer Flugkraftstoffe müssen systemimmanente Möglichkeiten zum Missbrauch, insbesondere Doppel-/Mehrfachanrechnungen, ausgeschlossen werden können¹⁹. Hierfür ist ein Überwachungs- und Kontrollmechanismus erforderlich.

Kraftstoffe für den gewerblichen Luftverkehr sind von der Verbrauchsteuer (Energiesteuer) befreit [Eur03, Art 14 b]. Um potenzielle Zweckentfremdung zu verhindern, d. h. eine un versteuerte Verwendung von Flugkraftstoffen in energiesteuerrelevanten Anwendungen, wird die Beförderung von verbrauchsteuerpflichtigen Waren unter Steueraussetzung, auch Flugkraftstoffe, durch die nationalen Zollbehörden überwacht. Die jeweiligen Akteure, die mit dem steuerfreien Flugkraftstoff (außer während des Transports) in Berührung kommen, müssen sich als sogenannte „registrierte Wirtschaftsbeteiligte“ registrieren lassen. Die Dokumentation der registrierten Wirtschaftsbeteiligten wird durch eine jährliche Bestandsaufnahme im Rahmen der Steueraufsicht regelmäßig überwacht. Für die Kraftstofftransporte verwenden die beteiligten Akteure ein EDV-gestütztes Beförderungs- und Kontrollsystem – das Excise Movement and Control System (EMCS) [Gen18]. Auch die Transporte der synthetischen Kraftstoffe innerhalb von DEMO-SPK fielen unter den Kontrollbereich des EMCS, das als Schnittstelle zur Bundeszollverwaltung diente.

¹⁹ Im Rahmen eines Book & Claim-Ansatzes müssen beispielsweise Doppel- oder Mehrfachanrechnungen ausgeschlossen werden können. Hiermit ist die mehrfache Ausstellung von SAF-Herkunftsnachweisen auf Basis derselben SAF-Kraftstoffeinheit / -menge gemeint, beispielsweise durch eine unbemerkte Entnahme von SAF aus dem Kraftstoffversorgungssystem und Reintegration in selbiges. In der Folge ergäbe sich eine Diskrepanz zwischen ausgestellten Herkunftsnachweisen und der tatsächlich verwendeten SAF-Menge.

Im Rahmen von Workshops zur Nachweisführung alternativer Flugkraftstoffe wurde das EMCS-Verfahren im Zusammenhang mit einem Book & Claim-Ansatz, u. a. mit Vertretern des Zolls, diskutiert. Im Ergebnis ist diesbezüglich festzuhalten, dass durch das EMCS aus konzeptioneller Sicht ein funktionierender Überwachungsmechanismus vorhanden ist, mit dem sämtliche Flugkraftstofftransporte innerhalb der EU überwacht und Doppel-/Mehrfachanrechnungen von SAF durch eine unbemerkte Entnahme von Kraftstoff aus der Bereitstellungskette durch das EMCS im Rahmen der Steueraufsicht ausgeschlossen werden können. Hierbei bestehen Sonderfälle, wie innerdeutsche / nationale Transporte, bei denen nach derzeitiger Vorgabenlage Ausnahmen vom EMCS-Verfahren möglich sind. Hierfür sind Regelungen erforderlich, die sämtliche Vertragspartner im Rahmen der Bereitstellung von SAF innerhalb der Book & Claim-Systemgrenze verpflichtet, das EMCS-Verfahren zu verwenden und Ausnahmen in diesen Fällen – anders als heute – zu verwehren.

Der Geltungsbereich des EMCS reicht allerdings nicht aus, um eine lückenlose Verfolgung systemweit im EU ETS sicherzustellen; die Systemgrenzen des EU ETS und des EMCS sind nicht identisch, da EFTA-Staaten nicht zum Zollgebiet der EU gehören²⁰. Für Transporte von Energieerzeugnissen aus EFTA-Staaten in die EU (und umgekehrt) findet keine Beförderung unter Steueraussetzung statt und demzufolge das EMCS-Verfahren keine Anwendung. Hier kommen zunächst einfuhr- und ausfuhrrechtliche Regelungen zum Tragen [HZA18]. Die EMCS-Verordnung hat nur innerhalb der EU Gesetzescharakter und Gültigkeit [Eur09a]. Innerhalb der Systemgrenze des EU ETS ist das EMCS somit zunächst nicht universell geeignet, um eine lückenlose Verfolgung von SAF-Bewegungen zu garantieren. Obgleich in EFTA-Staaten das EMCS-Verfahren keine Anwendung findet, wird dort dennoch eine Steueraufsicht ausgeübt. In diesem Zusammenhang gilt es zu überprüfen, wie die entsprechenden Steueraufsichtsverfahren genutzt werden können, um eine Zweckentfremdung bzw. Doppel-/Mehrfachanrechnungen zu vermeiden und ob der Austausch über Kraftstoffbewegungen an den Schnittstellen zwischen EU und EFTA-Staaten eine lückenlose Verfolgung gewährleisten kann.

SAF-Herkunftsnachweisregister

Zur Überwachung und Dokumentation der Herkunftsnachweise ist innerhalb eines Book & Claim-Ansatzes eine Plattform erforderlich, die den beteiligten Akteuren gleichermaßen als gemeinsame Schnittstelle dient. Für die Überwachung und Dokumentation der Ausstellung, Übertragung und Entwertung von Herkunftsnachweisen im Book & Claim-Konzept sollte analog zum europäischen Energiesektor ein elektronisches Register betrieben werden [UBA12, S. 5, UBA18a, S. 7, Eur09b, Art. 15, Abs.4, Abs. 5, den10, den18]. Anders als im europäischen Energiesektor sollte dieses Register in Form eines einzigen und gemeinsamen SAF-Herkunftsnachweisregisters auf europäischer Ebene umgesetzt und von einzelnen nationalen Registern abgesehen werden, da Fluggesellschaften staatenübergreifend Kraftstoff beziehen.

Zur Übertragung von SAF-Herkunftsnachweisen wird ein Kontomodell verfolgt. Dies ist eine etablierte Lösung und beispielsweise im europäischen Unionsregister, Herkunftsnachweisregister für Strom aus erneuerbaren Energiequellen, Wärme/Kälte oder im Biogasregister umgesetzt [DEH16, den10, UBA14]. Die beteiligten Akteure der Bereitstellungskette (Hersteller / Inverkehrbringer, Versorgungs- und Betankungsdienstleister oder emissionshandelspflichtige Fluggesellschaften als Endverbraucher) verfügen über ein Transferkonto, auf dem sich die in ihrem Besitz befindlichen SAF-Herkunftsnachweise befinden. Die Verbraucher, d. h. Fluggesellschaften, verfügen daneben über ein Einlöschungskonto, welches als Schnittstelle zwischen der Fluggesellschaft und der zuständigen (nationalen) Behörde für den Emissionshandel fungiert und in diesem Sinne zur Anrechnung von SAF dient.

²⁰ Das EU ETS berücksichtigt Flüge innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraumes, d. h. Staaten der Europäischen Union und ferner Staaten der europäischen Freihandelszone (EFTA-Staaten). Letztere gehören nicht zum Zollgebiet der EU [DEH18a, S. 1, DEH18b, Bar18].

Für die Überwachung der Ausstellung, Übertragung und Entwertung von SAF-Herkunftsnachweisen im SAF-Herkunftsnachweisregister ist ein Registerführer zu bestimmen, d. h. eine legitimierte Stelle, Institution oder Behörde, welche die Registerführung und einschlägige Überwachungsaufgaben ausübt. Da für das SAF-Herkunftsnachweisregister von einer jeweils nationalen Registerlösung abzusehen ist und eine europaweite bzw. EU ETS weite Registerlösung anzustreben ist, sollte die Registerführung ebenfalls durch eine Institution oder Behörde mit EU weitem Geltungsbereich ausgeübt werden.

SAF-Herkunftsnachweise

Da SAF zur Anrechnung im EU ETS die RED-Nachhaltigkeitskriterien erfüllen müssen, sollten Herkunftsnachweise, die gemäß RED für den europäischen Energiesektor ausgestellt werden, als (Gestaltungs-)Grundlage dienen und damit auch den Aufwand einer möglichen Umsetzung reduzieren. Sie sollten die folgenden Mindestinformationen umfassen [Eur09b, Art. 15, Abs. 6]:

- ▶ Energiequelle: Angaben zu Rohstoffen, aus denen der SAF erzeugt wurde und zum Herstellungsverfahren (d. h. Fischer-Tropsch, Hydro-processed Esters and Fatty Acids (HEFA), Synthesized Isoparaffins (SIP), Alcohol-to-JET (ATJ))
- ▶ Angaben zum Herstellungsbetrieb des SAF: Bezeichnung, Standort, Typ
- ▶ Ausstellungsdatum und ausstellendes Land
- ▶ Eindeutige Identifikationsnummer des / der zugrundeliegenden Nachhaltigkeitsnachweises (Proof of Sustainability, PoS)
- ▶ Eindeutige Identifikationsnummer des SAF-Herkunftsnachweises

Zur Ausstellung eines SAF-Herkunftsnachweises müssen diese Informationen an der ausstellenden Schnittstelle innerhalb der Bereitstellungskette (z. B. einer Raffinerie oder ein Blending-Betrieb) verfügbar sein. Um die erforderlichen Nachhaltigkeitseigenschaften sowie einen erforderlichen RED-Nachhaltigkeitsnachweis bis zur Ausstellung eines SAF-Herkunftsnachweises bis zum jeweiligen Hersteller / Inverkehrbringer mitzuführen und das Book & Claim-Konzept nahtlos an ein vorgelagertes Chain-of-Custody-System anzugliedern, ist die vorgelagerte Kette nach einem von der EU RED zugelassenen Nachhaltigkeitszertifizierungssystem zu zertifizieren.

Analog zum Book & Claim-Konzept im europäischen Energiesektor werden SAF-Herkunftsnachweise für jeweils eine definierte, in das Kraftstoffversorgungssystem eingespeiste Kraftstoffmenge ausgestellt. Da die Emissionsberechnung im EU ETS auf Basis der Activity Data, d. h. der im Berichtsjahr verbrauchten Treibstoffmenge basiert, bietet sich ein Massenbezug mit der Einheit von einer Tonne an. Ein Herkunftsnachweis bezieht sich damit auf eine Tonne an RED-konformen reinem erneuerbaren / synthetischen Flugkraftstoff. Die Ausstellung wird wertentsprechend des reinen erneuerbaren / synthetischen Kraftstoffanteils eines binären Blends oder eines Multiblends durchgeführt. Hierbei ist insbesondere die Übertragung einer eindeutigen Identifikationsnummer des Nachhaltigkeitsnachweises bzw. der Nachhaltigkeitsnachweise (Proof of Sustainability, PoS) auf den auszustellenden SAF-Herkunftsnachweis wichtig. Mit dieser Verknüpfung wird vermieden, dass SAF-Herkunftsnachweise auf Basis eines PoS mehrfach ausgestellt werden können, ohne dass es im SAF-Herkunftsnachweisregister registriert wird. Um ferner sicherzustellen, dass ein PoS, der bereits zur Ausstellung von SAF-Herkunftsnachweisen innerhalb des Book & Claim-Systems verwendet wurde, weder im Book & Claim-System noch in einer anderen Anwendung für Anrechnungszwecke verwendet wird, muss der PoS entwertet werden, sobald auf seiner Grundlage SAF-Herkunftsnachweise ausgestellt wurden. Die ausgestellten Herkunftsnachweise werden anschließend im SAF-Herkunftsnachweisregister auf das Transferkonto des Herstellers / Inverkehrbringers gebucht. Für die Anrechnung im EU ETS gilt der SAF mit der Einspeisung ins Kraftstoffversorgungssystem und der Ausstellung dazugehöriger Herkunftsnachweise als verbraucht.

Ein SAF-Herkunftsnachweis muss ausgestellt werden, solange der reine erneuerbare / synthetische Anteil in einem binären SAF-Blend oder SAF-Multibland noch bekannt ist bzw. transportbegleitenden Dokumenten entnommen werden kann²¹. Je weiter SAF entlang der Bereitstellungskette befördert wird, desto mehr Vermischungen mit weiteren Kraftstoffchargen treten potenziell auf und desto schwieriger wird die Ermittlung des Anteils anhand von (transportbegleitenden) Kraftstoffdokumenten. Da der Anwendungsbereich des Book & Claim-Anrechnungssystems erst mit der Ausstellung eines SAF-Herkunftsnachweises erreicht ist, muss jede Schnittstelle der Bereitstellungskette bis zur Ausstellung des SAF-Herkunftsnachweises hinsichtlich der Nachhaltigkeitsdokumentation zertifiziert und überwacht werden, z. B. nach einem EU RED anerkannten Nachhaltigkeitszertifizierungssystem. Dieser potenzielle Aufwand bekräftigt abermals, dass SAF-Herkunftsnachweise so früh wie möglich in der Bereitstellungskette ausgestellt werden sollten. Zwei Bedingungen müssen dafür erfüllt sein:

1. Das SAF ist soweit aufbereitet und mit konventionellem Flugkraftstoff gemischt, dass die JET-A-1-Kraftstoffspezifikation erfüllt wird. Dies ist erforderlich, damit der Kraftstoff im Rahmen der Steueraufsicht als Fluggastkraftstoff für die Verwendung in einem Flugzeug registriert wird und nachfolgende Transporte durch das EMCS überwacht werden.
2. Das SAF befindet sich innerhalb (eines Steuerlagers) der Europäischen Union. Dies ist erforderlich, da die JET-A-1-Spezifikation auch schon außerhalb der EU erfüllt sein könnte (beispielsweise im Falle eines JET-A-1-Imports), allerdings nur innerhalb der europäischen Zollunion die Steueraufsicht mittels EMCS ausgeübt wird und potenzielle Mehrfachanrechnungen dadurch vermieden werden.

Mit Erfüllung dieser zwei Bedingungen werden die SAF-Herkunftsnachweise ausgestellt, sobald der Kraftstoff das erste Steuerlager durch ein EMCS-Verfahren und für die Verwendung in einem Flugzeug verlässt.

Für die Ausstellung der SAF-Herkunftsnachweise sind verschiedene Verfahren denkbar: Eine Ausstellung von Herkunftsnachweisen durch den jeweiligen Hersteller / Inverkehrbringer selbst oder die Ausstellung durch den Registerführer. Das erste Verfahren verlangt einen Mechanismus zur Überprüfung, dass die ausgestellten Herkunftsnachweise anzahl- und wertentsprechend lediglich für die synthetischen / erneuerbaren Kraftstoffmengen ausgestellt wurden und jeweils ein anerkannter RED-Nachhaltigkeitsnachweis vorliegt. Dies kann z. B. durch regelmäßige Audits erfolgen. Im Rahmen des zweiten Verfahrens würde die Richtigkeit der anzahl- und wertentsprechenden Ausstellung von SAF-Herkunftsnachweisen direkt durch den Registerführer vorgenommen werden.

Einlösung und Anrechnung

SAF-Herkunftsnachweise sind fortlaufend ausstellbar und durch eine Fluggesellschaft einlösbar, indem sie die Herkunftsnachweise auf das Einlösungskonto bucht. Um Mehrfachanrechnungen von Herkunftsnachweisen zu vermeiden, müssen diese Buchungen unwiderruflich sein, auch wenn eine Fluggesellschaft Aktivitäten im Rahmen des Book & Claim-Systems einstellt. Die eingelösten SAF-Herkunftsnachweise auf dem Einlösungskonto dienen den zuständigen Emissionshandelsbehörden sowie allen anderen Beteiligten als Nachweis dafür, dass eine bestimmte verbrauchte Menge an Flugkraftstoff, unabhängig vom Ursprung, von der Fluggesellschaft als „erneuerbar“ deklariert wurde und im Rahmen der EU ETS Berichtserstattung angerechnet wird.

²¹ Das vom Herstellungsbetrieb ausgestellte Refinery Certificate of Quality (RCQ) weist gemäß EI / JIG 1530 den Anteil an synthetischen Komponenten in einer Kraftstoffcharge aus. In nachstehenden Dokumenten, wie einem Certificate of Analysis (CoA) oder einem Recertification Test Certificate (RT), die im Zuge der Kraftstoffdistribution und weiteren Lagerungen erstellt werden, um zu überprüfen, dass sich die Kraftstoffqualität durch Vermischungen (commingling) und Kontamination nicht geändert hat, ist diese Information bereits nicht mehr aufgeführt [EI13, 16 ff, 138, IAT15, 11 f.]. Die Ausstellung sollte demnach so früh wie möglich nach dem Blending geschehen.

Um die SAF-Herkunftsnachweise im Rahmen der EU ETS Emissionsberechnung einzubeziehen, muss ein Luftfahrzeugbetreiber zunächst den gesamten jährlichen Treibstoffverbrauch bzw. die verbrauchte Treibstoffmasse der emissionshandlungspflichtigen Flüge ermitteln. Um SAF im EU ETS via Book & Claim anzurechnen, bucht ein Luftfahrzeugbetreiber während eines Berichtsjahres SAF-Herkunftsnachweise im SAF-Herkunftsnachweisregister vom Transferkonto auf das Einlösungskonto. Die den Herkunftsnachweisen wertentsprechende Menge an SAF wird vom ermittelten Gesamtreibstoffverbrauch des Luftfahrzeugbetreibers subtrahiert, um damit die Masse an fossilem Treibstoff und die daraus zu berechnenden THG-Emissionen zu erhalten. Für diese Menge ist eine ausreichende Anzahl an EU-ETS-Emissionsberechtigungen nachzuweisen. Ein Nachweis darüber, dass eine ausreichende Anzahl an SAF-Herkunftsnachweisen auf dem Einlösungskonto eines Endverbrauchers vorliegt, kann durch die zuständige Behörde für den Emissionshandel je nach Systemgestaltung verschiedenartig nachvollzogen werden. Mittels Zugang zu den Einlösungskonten von Luftfahrzeugbetreibern könnte die zuständige Behörde das Konto direkt überprüfen. Alternativ dazu ließe sich ein Registerauszug über das Einlösungskonto eines Endverbrauchers vom Registerführer erstellen, welcher der zuständigen Behörde zur Verfügung gestellt wird. Je nach Systemauslegung erfolgt die Einlösung von Herkunftsnachweisen im Emissionsbericht entweder explizit für ein Flugplatzpaar oder gleichmäßig verteilt über das Berichtsjahr.

Handelsplattform

Sieht ein Kaufvertrag zwischen Fluggesellschaft und Hersteller nicht vor, dass der Fluggesellschaft für ihre bezogenen SAF-Mengen auch entsprechende SAF-Herkunftsnachweise überwiesen werden, kann der Hersteller/Inverkehrbringer SAF-Herkunftsnachweise nichtsdestotrotz ausstellen, sofern die Kraftstoffe die RED-Nachhaltigkeitskriterien erfüllen. Der Hersteller/Inverkehrbringer hat in diesem Fall die Möglichkeit, die SAF-Herkunftsnachweise an Dritte oder andere Fluggesellschaften zu verkaufen. Für derartige Fälle muss das potenzielle Angebot des Herstellers/Inverkehrbringers mit einer möglichen Nachfrage eines Dritten bzw. einer anderen Fluggesellschaft zusammengebracht werden, was über eine entsprechende Handelsplattform ermöglicht werden kann²². Als Handelsplattform kommen organisierte Plattformen wie eine Over-the-Counter (OTC) Handelsplattform oder eine Zertifikatbörse in Frage.

10.3 Fazit

Das derzeitige Anrechnungsverfahren sowie die derzeitige Rechtssituation blockieren die Inverkehrsbringung von SAF in Europa, sofern der Endverbraucher diese im EU ETS anrechnen lassen möchte. Das derzeitige Verfahren zur Anrechnung von SAF verfolgt einen massenbilanziellen Ansatz auf Basis von Rechnungsunterlagen mit dem Flughafen-Tanklager als Bilanzgrenze. Zwar erlaubt dieser Ansatz die Anrechnung von erneuerbarem Flugkraftstoff, ohne ihn zwangsweise physisch zu verbrauchen, allerdings besteht dabei lediglich das jeweilige Flughafen-Tanklager als Bilanzgrenze. Hierbei ist im Einzelfall auch sicherzustellen, dass sämtliche zur Anrechnung erforderlichen Nachweise und Dokumentationen, wie EU RED konforme Nachhaltigkeitsnachweise, bis zur Einlagerung ins Flughafen-Tanklager vorliegen und entsprechend entlang der vorgelagerten Kette existieren und weitergegeben werden. Dies sicherzustellen liegt derzeit allein in der Verantwortung des Endverbrauchers (Fluggesellschaft) und geht mit einem hohen administrativen Aufwand einher, da auf kein operationalisiertes und harmonisiertes Anrechnungsverfahren zurückgegriffen werden kann. Insgesamt fehlt bisher ein ganzheitliches Nachweis- und Anrechnungsverfahren für erneuerbare Flugkraftstoffe mit der gesamten Be-

²² Eine Übereinkunft von Angebot und Nachfrage ist auch ohne Handelsplattform bilateral zwischen zwei Parteien möglich. Mittels einer Handelsplattform können Angebot und Nachfrage der Marktteilnehmer allerdings transparent platziert werden und ein größeres Spektrum potenzieller Käufer und Verkäufer abgebildet werden. Das SAF-Herkunftsnachweisregister stellt keine Handelsplattform dar. Die dortigen Transfers von Herkunftsnachweisen basieren auf individuellen und bereits vor der Ausstellung der SAF-Herkunftsnachweise vereinbarten Kaufverträgen.

reitstellungskette als System-/ Bilanzgrenze. Angesichts des Preisniveaus der heutigen SAF-Produktion ist allerdings davon auszugehen, dass SAF-Käufer vorsehen, den Mehrpreis gegenüber dem derzeitigen JET-A-1-Preisniveau durch die Verwendung von Emissionsminderungszertifikaten zu reduzieren. Solange dies unter den Bedingungen des EU ETS nicht praxistauglich möglich ist, wirkt die derzeitige Anrechnungsmethodik und Rechtslage für eine flächendeckende Verwendung der SAF prohibitiv. Vor diesem Hintergrund stellen der Track & Trace- (Massenbilanzierung) sowie der Book & Claim-Ansatz (Zertifikatlösung) zwei Ansätze zur verbesserten Anrechnung erneuerbarer Flugkraftstoffe dar. Beide Ansätze wurden im Rahmen von DEMO-SPK in verschiedenen Workshops diskutiert und ihre grundsätzliche Funktionalität bestätigt. Als logische Konsequenz verlangen die hier ausgearbeiteten Ansätze in einem weiteren Schritt ihre praktische Validierung, in der weitere Maßnahmen zur Operationalisierung identifiziert werden können sowie mögliche Schwachstellen aufgezeigt werden.

Der **Track & Trace**-Ansatz verpflichtet die Hersteller und nachfolgend den Eigentümer eines Kraftstoffgemischs, die rechnerischen Mengenanteile der erneuerbaren Flugkraftstoffe in einem Gemisch in der (Transport-)Dokumentation bis zum Flughafen-Tanklager mitzuführen, obwohl eine physische Trennung im Gemisch nicht mehr möglich ist. Im Flughafen-Tanklager wird die Mengenbuchhaltung für die Bestände einzelner Gesellschafter oder Drittdurchsetzer entsprechend erweitert. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass das Track & Trace-Verfahren auf Basis von Massenbilanzen (recht einfach) umgesetzt werden kann, um die für die Ausstellung von Zertifikaten erforderliche Nachweispflicht der Abgabe an Berechtigte manipulations sicher darzustellen. In rechtlicher Hinsicht ist die Überwachungsfunktion der Bestandsführung von erneuerbarem Flugkraftstoff dem Zoll zuzuweisen und die Dokumentationspflicht der auszugsweise überlassenen Lieferverträge für erneuerbare Flugkraftstoffmenge dem Tanklagerbetreiber vorzugeben. Letzteres kann durch Ergänzung des Miet- und Gestattungsvertrages durch die Flughafenbetreibergesellschaft mit dem Tanklagerbetreiber erfolgen bzw. als Vorgabe in die Flughafenbenutzungsordnung aufgenommen werden, um gleichermaßen einen rechtlichen Rahmen für die Ausstellung von Zertifikaten herbeizuführen.

Der **Book & Claim**-Ansatz sieht die Trennung der Nachhaltigkeitseigenschaften erneuerbarer Flugkraftstoffe vom physischen Kraftstoff an einem bestimmten Punkt in der Bereitstellungskette vor und überträgt die Eigenschaften von SAF auf transferier- und handelbare Zertifikate (Herkunftsnachweise). Die Herkunftsnachweise können anschließend an Fluggesellschaften als Käufer und Endverbraucher übertragen und zur Anrechnung einer wertentsprechenden SAF-Menge im EU ETS eingelöst werden. Gleichwohl ein Book & Claim-Ansatz zur Anrechnung der SAF höchstmögliche Flexibilität bietet, zeigt sich, dass auch in Verbindung mit dem EU weiten EMCS-Verfahren allein keine Geschlossenheit des Kraftstoffversorgungssystems innerhalb des EU ETS-Anwendungsbereiches gewährleistet ist und somit keine lückenlose Verfolgung der SAF-Bewegungen besteht. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, inwiefern eine Steueraufsicht außerhalb der EU für eine Überwachung von SAF-Transporten vorhanden ist und entsprechende Schnittstellen zum EMCS existieren, die einen lückenlosen Informationsaustausch gewährleisten. Dabei muss bezüglich eines Book & Claim-Konzeptes vor allem untersucht werden, wie ein Mechanismus zur Vermeidung von Doppel-/Mehrfachanrechnungen auch über die Grenzen des EMCS hinaus sichergestellt werden kann. Ersatzlösungen – wie beispielsweise die Verknüpfung von Nachhaltigkeitsnachweisen und SAF-Herkunftsnachweisen – müssen sowohl Doppel-/Mehrfachanrechnungen vermeiden als auch die Verwendung der SAF-Chargen in Luftfahrzeugen sicherstellen oder gar rechtskonform nachweisen können.

Neben den hier dargestellten Track & Trace- und Book & Claim-Ansätzen ist ferner zu untersuchen, inwiefern eine geschlossene Nachweisführung und Anrechnung von SAF entlang der gesamten Bereitstellungskette auch durch ein EU RED anerkanntes Massenbilanzsystem möglich und sinnvoll wäre.

Die hier dargestellten Konzepte wurden zunächst für den Geltungsbereich des EU ETS konzipiert und untersucht. Die zukünftig flächendeckende Verwendung von SAF verlangt darüberhinausgehend die Untersuchung für Betankungen mit SAF außerhalb dieses Geltungsbereiches. Analog zum EU ETS existiert auch für CORSIA bislang kein probates und operationalisiertes Konzept zur Anrechnung erneuerbarer Flugkraftstoffe; dies erschwert ihren zukünftigen Markteintritt sowie ihre großtechnische Nutzung. Regulatorische Anforderungen zur Nachweisführung und Anrechnung erneuerbarer Flugkraftstoffe unterscheiden sich bisher national und/oder regional voneinander. Demgegenüber kann die Kraftstoffaufnahme von Luftfahrtgesellschaften in ihrem gesamten Streckennetz (d. h. global) stattfinden. In dieser heterogenen Angebotssituation ist nicht davon auszugehen, dass global aufgenommene erneuerbare Flugkraftstoffe nach dem jeweiligen Anrechnungsverfahren im Heimatmarkt in jedem Fall anrechnungswürdig sind. Um diesen Rahmenbedingungen adäquat Rechnung zu tragen und erneuerbare Flugkraftstoffe im globalen kommerziellen Luftverkehr nahtlos einsetzen zu können, bedarf es analog zu den hier vorgestellten Ansätzen der Entwicklung, Bewertung und Implementierung geeigneter Konzepte auf internationaler Ebene.

Die Arbeiten in DEMO-SPK haben gezeigt, dass die Nachweisführung und Anrechnung erneuerbarer Flugkraftstoffe den Kompetenzbereich unterschiedlicher Beteiligter tangiert, z. B. Kraftstoffhersteller und Inverkehrbringer, Versorgungs- und Betankungsdienstleister, Luftfahrtgesellschaften aber auch Zollbehörden, Behörden für den Emissionshandel, Emissionshandelsverifizierer und Nachhaltigkeitszertifizierungsorganisationen. Derzeit fehlt ein Adressat, dessen Aufgaben- und Kompetenzbereich alle relevanten Fragestellungen adäquat zusammenfasst. Für die Implementierung eines geeigneten Anrechnungsverfahrens sollte die Thematik der Nachweisführung und Anrechnung erneuerbarer Flugkraftstoffe folglich bei einem politischen/regulatorischen Entscheidungsträger angesiedelt und in Verbindung mit allen beteiligten Akteuren ganzheitlich bearbeitet werden. Ohne die zukünftige Weiterentwicklung des heutigen Anrechnungsansatzes und der derzeitigen Rechtslage wird eine eingeschränkte Anrechenbarkeit den Zukauf von SAF-Mengen weiter unterbinden sowie die Möglichkeit hemmen, die Klimabilanz des Luftverkehrs durch emissionsarme Flugkraftstoffe intrasektoral zu verbessern.

11 Exkurs | FT-SPK via PTL

Neben den untersuchten erneuerbaren Kerosinen auf biogener Rohstoffbasis wird perspektivisch auch Kerosin auf der Basis von erneuerbarem Strom und CO₂ (PTL, Kapitel 4.5) eine Rolle spielen. Daher wurde PTL im Rahmen von DEMO-SPK unter zwei Gesichtspunkten untersucht, die nachfolgend im Sinne eines Exkurses zusammenfassend erläutert werden. PTL steht im in DEMO-SPK näher untersuchten Fall für Zwischenprodukte aus der Demonstrationsanlage der Sunfire GmbH, die basierend auf der Fischer-Tropsch-Synthese (FT) erzeugt worden. Produkte dieses Syntheseverfahrens sind organische Vielstoffgemische mit einer sehr breiten Siedepunktverteilung.

11.1 Herstellung und Produktanalyse

Um international erstmals den Nachweis der Herstellung von spezifikationskonformen FT-SPK zu führen, erfolgten an der TU Bergakademie Freiberg und durch die ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH Untersuchungen zur Aufbereitung von ca. 30 Litern eines Fischer-Tropsch-Zwischenproduktes (hier der Dieselschnitt) der Sunfire GmbH zu FT-SPK unter verschiedenen Prozessbedingungen einschließlich der entsprechenden Produktanalytik (Abb. 35). Gleichzeitig sollten Aussagen zum Einfluss wichtiger Prozessparameter auf die Produkteigenschaften und -ausbeuten ermöglicht werden.

Das o. g. FT-Produkt wurde zunächst einer Hydroisomerisierung bei unterschiedlichen Reaktionstemperaturen unterzogen. Der Prozess der Hydroisomerisierung dient vordergründig der Wandlung unverzweigter n-Alkane in verzweigte iso-Alkane, die sich durch vergleichsweise tiefe Schmelztemperaturen auszeichnen. Der Prozess ist hinsichtlich der Reaktionstemperatur sehr sensibel. Eine Temperaturveränderung von nur wenigen Kelvin kann zu erheblichen Unterschieden in der Produktverteilung bzw. -zusammensetzung führen; daher wurden 230 °C („milde“ Isomerisierung) und 238 °C („scharfe“ Isomerisierung) gewählt. Zudem wurde auf die ursprünglich vorgesehene Abtrennung der leichtsiedenden Benzinfraktion vor der Isomerisierung verzichtet, da die Mitverarbeitung des Benzinschnitts zu einer Verbesserung der Benzinqualität (Klopffestigkeit) führt und eine Beeinflussung des Reaktionsablaufs für die Kerosin- und Dieselfraktionen nicht zu erwarten war. Alternativ zur Isomerisierung wurde ergänzend ein Teil des Eduktes einem milden Hydrocracken unterzogen.

Die nach der Isomerisierung im Produkt verbliebenen höhersiedenden Diesel- und Wachsanteile wurden abgetrennt und in einem zweiten Prozessschritt einem Hydrocracken unterworfen, um die Ausbeuten an SPK zu erhöhen. Verwendet wurden in den kontinuierlich arbeitenden Technikumsanlagen analog zu industriellen Raffinerieprozessen Wasserstoff und sog. bifunktionale Katalysatoren.

Die umfangreichen Ergebnisse der Untersuchungen werden nachfolgend auszugsweise und mit Fokus auf das hergestellte PTL-SPK vorgestellt.

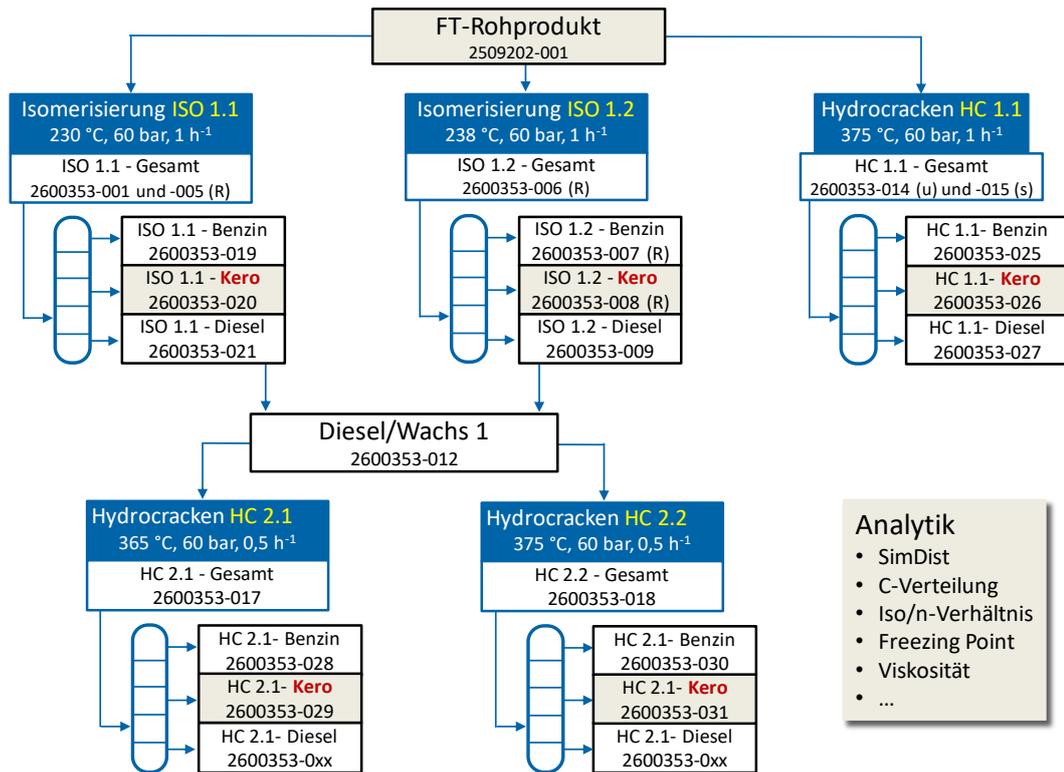


Abb. 35 Vereinfachtes Aufbereitungs- und Analyseschema für PTL-SPK (© TUBAF)

Siedeverlauf nach Isomerisierung

Die Erhöhung der Isomerisierungstemperatur um nur 8 °C bewirkt einen deutlichen Rückgang des Kristallisationspunktes von -31,9 °C (nicht spezifikationskonform) auf -43,4 °C (spezifikationskonform für JET A und für FT-Kerosin). Auch die Viskosität bei -40 °C liegt nach der Isomerisierung bei 230 °C oberhalb des Spezifikationsmaximums von 12 cST, nach der Isomerisierung bei 238 °C hingegen deutlich darunter (siehe Tab. 22 auf Seite 103). Das Siedeverhalten des FT-Rohprodukts und der Isomerisate zeigt, dass die Behandlung bei milden Bedingungen nur zu einer geringfügigen Verschiebung der Siedelage führt. Dagegen nimmt der Anteil an Diesel und Wachsen unter schärferen Isomerisierungsbedingungen deutlich ab. Gleichzeitig erhöht sich der Anteil an Naphtha im Produkt (Abb. 36).

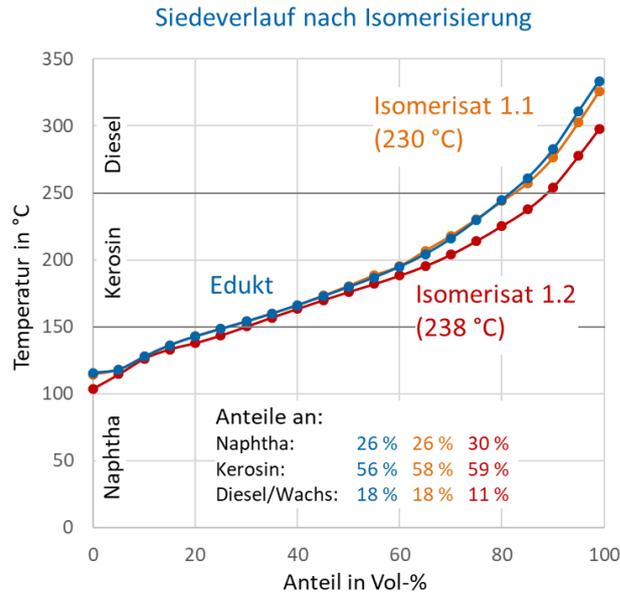


Abb. 36 Siedeverhalten nach Hydroisomerisierung (Gesamtprodukt)

Siedeverlauf nach Hydrocracken

Für die Charakterisierung der Einzelfractionen wurden die Gesamtproben HC 2.1 und HC 2.2 fraktioniert. Die Siedekurven der Gesamtprodukte sowie der einzelnen Fraktionen zeigt Abb. 37.

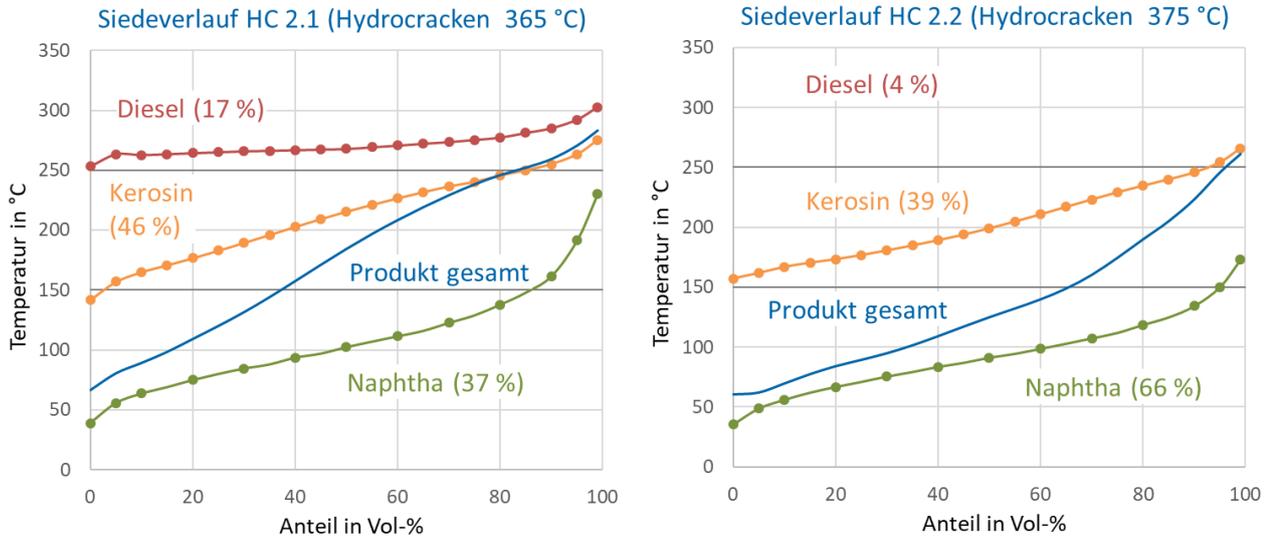


Abb. 37 Siedeverläufe für Einzelfractionen nach Hydrocracken der Schwersieder

Mengenbilanz

Die Ergebnisse der Mengenbilanzierung für die einzelnen Prozessstufen sowie die gesamte Kette vom FT-Zwischenprodukt zum PTL-SPK zeigt Abb. 38. Deutlich wird, dass ein erheblicher Anteil des Diesels in leichtere Produkte (Kerosin, Naphtha, Gas) überführt werden konnte. Die Kerosinausbeute kann auf über 60 m-% gesteigert werden. Die Qualität der zusätzlich gewonnenen Kerosinanteile ist ausgezeichnet.

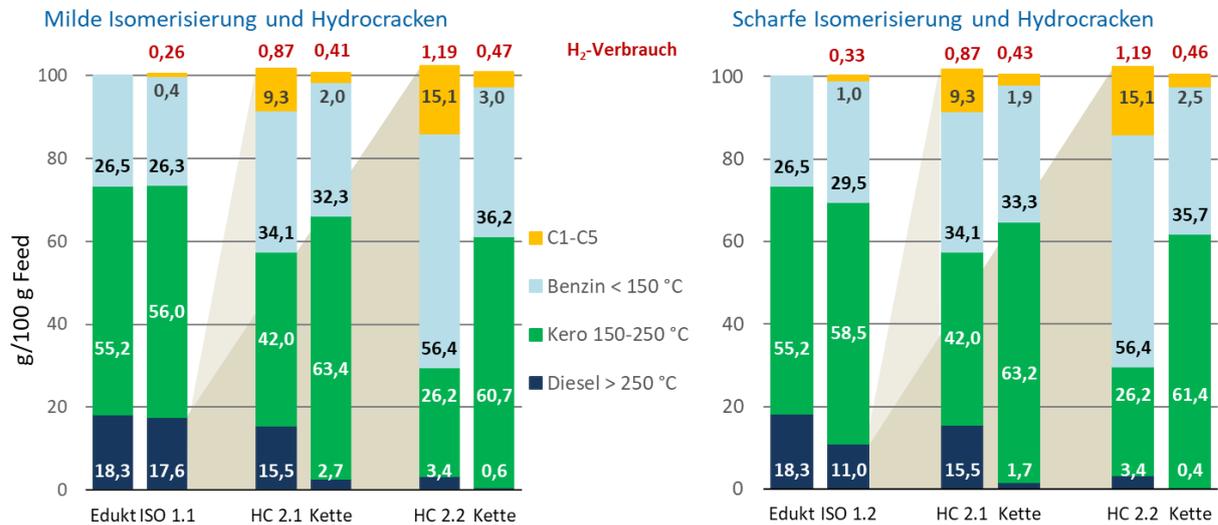


Abb. 38 Mengenbilanz ausgehend vom FT-Zwischenprodukt zum PTL-SPK (Links: Isomerisierung bei 230 °C und Hydrocracken; rechts für Isomerisierung bei 238 °C und Hydrocracken.)

Zu beachten ist, dass das FT-Rohprodukt bereits ca. 30 m-% an Naphthakomponenten enthielt, die für die Kerosingewinnung nicht nutzbar sind, jedoch als Koppelprodukt vermarktet werden können. Der Wasserstoffverbrauch beträgt bei einer einfachen Isomerisierung ca. 0,3 g / 100 g Feed; für die gesamte Prozesskette einschließlich dem Hydrocracken der Schwersieder sind etwa 0,5 g / 100 g FT-Rohprodukt erforderlich.

Kerosineigenschaften

Die Ergebnisse der anwendungstechnischen Charakterisierung der unter den verschiedenen Prozessbedingungen hergestellten Kerosinfraktionen sind in Tab. 22 zusammengefasst und mit den Anforderungen gemäß ASTM D7566-19 [AST19d, Tabelle A1.1, Fischer-Tropsch Hydro-processed SPK] verglichen.

Der Kristallisationspunkt als Kriterium für das Kälteverhalten der Kerosine hat sich als der kritische Parameter herausgestellt. Damit der Grenzwert nach ASTM für paraffinische synthetische Produkte von -40 °C eingehalten werden kann, sind ausreichend scharfe Reaktionsbedingungen bei der Hydroisomerisierung des FT-Rohproduktes erforderlich. Die anderen Kenngrößen (Flammpunkt, Dichte, Viskosität und wohl auch thermische Stabilität und Säurezahl) können im Zuge des Upgradings von Fischer-Tropsch-Produkten problemlos erreicht werden.

Auch das Mischprodukt der Isomerisierung bei 238 °C und bei 230 °C erfüllt in allen Punkten die Anforderungen der ASTM, auch hinsichtlich der Kälteeigenschaften.

Das in der zweiten Prozessstufe zusätzlich aus höhersiedenden Komponenten gewonnene Produkt weist mit Kristallisationspunkten von -44 °C bzw. -52 °C hervorragende Kälteeigenschaften auf. So könnten Isomerisierungsprodukte mit ggf. nicht ausreichenden Kristallisationstemperaturen in Mischung mit Hydrocrack-Kerosin zu normgerechten Produkten aufgewertet werden.

| Parameter | | ASTM-Norm | Anforderungen ASTM D7566-13 | ISO 1.1 230 °C | ISO 1.2 238 °C | ISO 1 Mix ¹ | HC 1.1 Charge 1 | HC 1.1 Charge 2 | HC 2.1 365 °C | HC 2.2 375 °C |
|--------------------------|--------------------|-----------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------------|
| Kristallisationspunkt | °C | D7153 | max. -40 | -31,9 | -43,4 | -42,9 | -47,0 | -39,8 | -44,1 | -51,7 |
| Flammpunkt | °C | D7094 | min. 38 | 38,6 | 42,5 | 51,5 | 52,5 | 39,5 | 40,5 | n. b. ² |
| Dichte (15 °C) | kg/m ³ | D4052 | 730–770 | 743,4 | 745,0 | 744,5 | 749,8 | 745,6 | 756,2 | n. b. ² |
| Säurezahl | mg KOH/g | D3242 | max. 0,015 | — | — | 0,006 | — | — | — | — |
| kin. Viskosität (-40 °C) | mm ² /s | | | 13,260 | 6,379 | 6,447 | 7,047 | 6,395 | 9,356 | 8,234 |
| kin. Viskosität (-30 °C) | mm ² /s | | | 4,517 | 4,572 | 4,668 | 4,970 | 4,587 | 6,319 | 5,652 |
| kin. Viskosität (-20 °C) | mm ² /s | | | 3,467 | 3,48 | 3,776 | 3,733 | 3,495 | 4,588 | 4,157 |
| kin. Viskosität (-10 °C) | mm ² /s | | | 2,759 | 2,756 | 2,9 | 2,926 | 2,768 | 3,053 | 3,205 |
| kin. Viskosität (0 °C) | mm ² /s | D7042 | max. 8 | 2,257 | 2,249 | 2,326 | 2,368 | 2,26 | 2,777 | 2,563 |
| kin. Viskosität (10 °C) | mm ² /s | | | 1,889 | 1,879 | 1,925 | 1,965 | 1,899 | 2,266 | 2,106 |
| kin. Viskosität (20 °C) | mm ² /s | | | 1,612 | 1,598 | 1,625 | 1,662 | 1,607 | 1,893 | 1,769 |
| kin. Viskosität (30 °C) | mm ² /s | | | 1,390 | 1,381 | 1,404 | 1,429 | 1,389 | 1,61 | 1,512 |
| kin. Viskosität (40 °C) | mm ² /s | | | 1,216 | 1,12 | 1,249 | 1,252 | 1,216 | 1,391 | 1,312 |
| 10 % Temperatur | °C | | max. 205 | 153,4 | 157,4 | 172,6 | 173,3 | 157,9 | 165,0 | 167,0 |
| 50 % Temperatur | °C | | anzugeben | 195,0 | 194,6 | 192,4 | 195,9 | 196,0 | 215,4 | 199,1 |
| 90 % Temperatur | °C | D2887 | anzugeben | 244,3 | 242,8 | 218,7 | 230,0 | 243,1 | 255,1 | 245,8 |
| Siedeendtemperatur | °C | | max. 300 | 285,1 | 279,2 | 235,6 | 256,2 | 277,3 | 275,2 | 267,5 |
| T90–T10 | K | | min. 22 | 90,9 | 85,4 | 46,1 | 56,7 | 85,2 | 90,1 | 78,8 |

¹ Die Kerosinfraktion ISO 1-Mix wurde durch Vermischung der Gesamtprodukte ISO 1.1 und ISO 1.2 und Fraktionierung der Mischung gewonnen. Es handelt sich also nicht um eine Mischung der einzelnen Kerosinfraktionen. Da die Cut-Punkte bei den Fraktionierungen etwas differieren entsprechen die ermittelten Eigenschaften der Kerosinfraktionen nicht den mittleren Werten. Im Extremfall können Werte außerhalb der durch die Einzelfraktionen vorgegeben Grenzen liegen (Flammpunkt).

² Für die Bestimmung von Dichte und Flammpunkt stand nicht ausreichend Probematerial zur Verfügung.

11.2 Lebenszyklusanalysen

Ergänzend zu den Lebenszyklusanalysen für die erneuerbaren Kerosine biogenen Ursprungs (Kapitel 8) wurden selbige ebenso exemplarisch für das aufbereitete PTL-SPK (auf der Basis der Fischer-Tropsch-Synthese) durchgeführt. Untersucht wurden dabei die spezifischen THG-Emissionen als entscheidende Wirkungskategorie in Bezug auf Reduzierung von CO₂-Äq.-Emissionen.

Für die Berechnung der THG-Emissionen des PTL-SPK wurden die methodische Vorgehensweise sowie die Grundannahmen analog zu den biogenen Kerosinen verwendet (Kapitel 8.2). Im Unterschied dazu werden für das PTL-SPK lediglich die Emissionen der Kraftstoffproduktion ohne eine anschließende Kraftstofflogistik betrachtet. Die benötigten Daten zum Erstellen des Lebenszyklusinventars (primär die Massen- und Energiebilanz des Herstellungsprozesses) wurden mit Hilfe einer Fließbild-Prozesssimulation, in Anlehnung an den Prozess der Sunfire GmbH, ermittelt. Dabei wurde eine Produktionskapazität von ca. 141 MW bezogen auf den unteren Heizwert angenommen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung der THG-Emissionen nach EU RED 2009/28/EC beschrieben. Hierbei wurden sechs unterschiedliche Konzepte betrachtet, basierend auf dem Einsatz von zwei unterschiedlichen CO₂-Quellen (Abtrennung aus Biomethananlagen, Abscheidung aus Umgebungsluft) sowie drei unterschiedliche Stromquellen (Deutscher Strommix, Strom aus PV-Anlagen, Strom aus Windenergieanlagen). Die Ergebnisse der THG-Emissionen sowie die resultierenden THG-Minderungen bezogen auf die fossile Referenz zeigt Abb. 39.

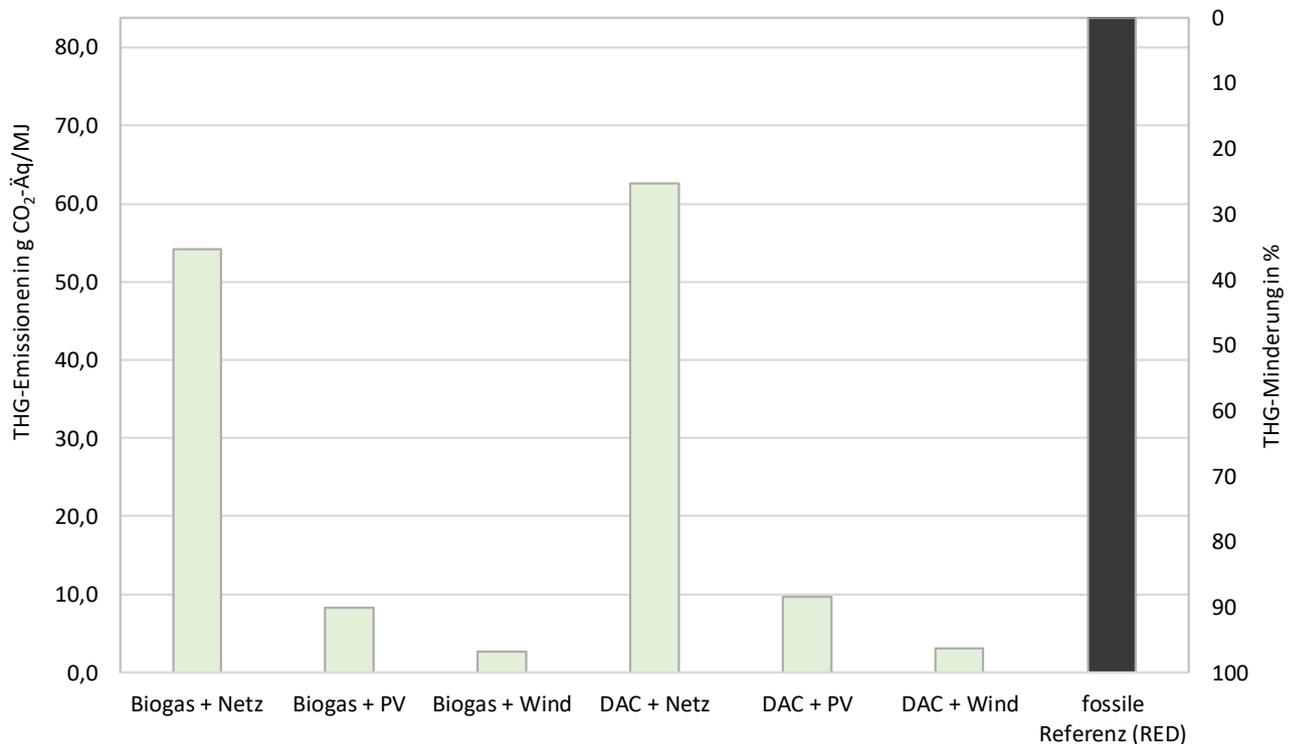


Abb. 39 Spezifische THG-Emissionen und THG-Minderungspotenzial der betrachteten FT-SPK-Konzepte gegenüber der fossilen Referenz der EU RED

Die Ergebnisse sind nicht getrennt nach den Anteilen der Strombereitstellung, der CO₂-Bereitstellung sowie der Umwandlung dargestellt, da für alle Szenarien die THG-Emissionen der Strombereitstellung die Gesamtemissionen mit einem Anteil von über 99,7 % dominieren. Der Unterschied bei den Gesamtemissionen resultiert hier im Wesentlichen aus dem höheren Energieaufwand für die Abtrennung des CO₂ aus der Umgebungsluft. Da die im PTL-Prozess durch die exothermen Reaktionen der Fischer-Tropsch-Synthese freiwerdende Wärme nicht ausreicht, um sowohl die Hochtemperatur-Elektrolyse als auch die Luftabscheidung zu versorgen, wird zusätzliche thermische Energie benötigt. Um diese zusätzliche Energie bereitzustellen, wurde ebenfalls Strom als Ausgangsstoff angesetzt, um sicherzustellen, dass der Prozess vollständig mit Strom aus erneuerbaren Energien versorgt werden kann und keine zusätzlichen Energiequellen benötigt.

Insgesamt wird deutlich, dass die THG-Minderung für beide CO₂-Quellen beim Einsatz von Strom bei der Nutzung von Netzstrom und den damit verbundenen Emissionen des deutschen Strommixes nicht ausreichen, um im Rahmen der EU RED als erneuerbarer Kraftstoff anerkannt zu werden. Dafür wäre eine THG-Einsparung von mindestens 60 % gegenüber der fossilen Referenz erforderlich²³. Die Konzepte für den reinen Einsatz von Wind- bzw. Photovoltaik-Strom können dahingegen deutlich höhere Emissionsreduktionen erreichen. Hierbei erreichen die PV-Konzepte eine Emissionsminderung von ca. 90 % und die Konzepte zum Einsatz von Windenergie Minderungen von ca. 95 %. Da das resultierende FT-Kerosin dem fossilen Kerosin mit einem Maximalanteil von 50 % beigemischt werden darf, ergeben sich somit für das im Luftverkehr zum Einsatz kommende Kerosingemisch Emissionsminderungen von bis zu 45 % bzw. 47,5 %.

Zu beachten ist allerdings, dass FT-Anlagen im Dauerbetrieb laufen. Ein Abschalten in Zeiten nicht vorhandener Wind- oder Sonnenenergie ist nicht möglich. Dies bedeutet, dass Fluktuationen durch Solar- oder PV-Anlagen z. B. durch Wasserstoffspeicherung abgepuffert werden müssen, um den Betrieb einer PTL-Anlage zu ermöglichen. Die hiermit verbundenen Konversionsverluste sind in den vorstehenden Berechnungen nicht berücksichtigt. Alternativ wären grundsätzlich im Falle einer Netzanbindung auch bilanzielle Lösungen z. B. durch Direktvermarktungsverträge und entsprechende Zertifizierungsmechanismen denkbar, die den durchgängigen Betrieb sicherstellen könnten.

²³ Entsprechend der RED II müssen erneuerbare Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs ab dem 1. Januar 2021 eine THG Einsparung von mind. 70 % nachweisen. Allerdings bezieht sich dieser Wert auch auf einen höheren fossilen Referenzwert von 94 g CO₂-Äq./MJ im Vergleich zur RED I.



12 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Im Rahmen des vom BMVI beauftragten MKS-Modellvorhabens DEMO-SPK wurde international erstmals der Einsatz von Multiblend-JET-A-1 in der allgemeinen Kraftstoffversorgungsinfrastruktur von der Beschaffung bis zur Betankung im Flugzeug erfolgreich demonstriert. Neben Analysen zu den Kerosineigenschaften erfolgten zudem Emissionsmessungen, Lebenszyklusanalysen, praktikable Nachhaltigkeitsdokumentationen sowie Anrechnungsverfahren im Emissionshandel. Ermöglicht haben dieses Vorhaben mehr als 20 internationale Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft.

Dieser Endbericht zum Vorhaben fasst mit besonderem Fokus auf die erzielten Ergebnisse die umfangreichen Arbeiten im Rahmen der Voruntersuchungen, der Demonstration und der begleitenden Untersuchungen (siehe Abb. 1 auf Seite 10) zusammen.

Nachfolgend werden mit Bezug auf die untersuchten Schwerpunkte die aus dem Vorhaben abzuleitenden Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen erläutert:

Validierung der chemisch-physikalischen Eigenschaften teilsynthetischer Multiblends aus mehreren unterschiedlichen synthetischen Kraftstoffen während der Voruntersuchungen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass sich auch aus mehreren unterschiedlichen synthetischen Kraftstoffen spezifikationsgerechte Multiblends herstellen lassen unter der Voraussetzung, dass hierbei nur gemäß ASTM D7566 zugelassene synthetische Kraftstoffe eingesetzt werden. Eine entsprechende Zulassung beinhaltet für die Einzelkomponenten und variable Blendzusammensetzungen bereits detaillierte analytische Untersuchungen. Es konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass sich die chemisch-physikalischen Eigenschaften der ternären und quaternären Mischungen präzise berechnen lassen. Nach einer Lagerzeit von sechs Monaten sind die chemisch-physikalischen Kennwerte unverändert zu denen vor der Auslagerung; es ist keine Veränderung der Kraftstoffqualität erkennbar. Wechselnde klimatische Bedingungen haben keine Auswirkung auf die Kraftstoffeigenschaften. Weiterhin ist zu konstatieren, dass eine Änderung der Multiblend-Zusammensetzung im Rahmen der zu diesem Zeitpunkt ASTM-zugelassenen und untersuchten Einzelkomponenten keine Wiederholung bzw. Nachstellung der Untersuchungen aus DEMO-SPK bedingt, die Ergebnisse sind übertragbar.

International erstmalig erfolgreiche Demonstration der Produktion, Bereitstellung und Nutzung von Multiblend-JET-A-1 an einem Flughafen.

Dank dem Engagement der Projektpartner, konnte die Beschaffung von erneuerbarem Kerosin, dessen Mischung mit fossilem JET A-1 zu Multiblend-JET-A-1 sowie Bereitstellung und Nutzung in der Kraftstoffinfrastruktur eines Großflughafens erfolgreich demonstriert werden. Dabei wurden knapp 600 Tonnen Multiblend-JET-A-1 bereitgestellt und verfliegen. Gezeigt werden konnte, dass die technische Umsetzbarkeit grundsätzlich gegeben und machbar ist; im Bereich der Mischvorrichtungen für die Herstellung des Multiblend-JET-A-1 sind – je nach Standort und örtlicher Gegebenheiten – weitere infrastrukturelle Ergänzungen erforderlich, da Misch tanks für Kerosin regulär nicht verfügbar sind. Während der Vorbereitung und Durchführung der Demonstration wurden umfangreiche Erfahrungen gesammelt, die nicht nur zahlreiche Hinweise für das operative Projektmanagement geben, sondern auch Lücken respektive Klarstellungsbedarf identifiziert haben, die für eine erfolgreiche breitere Marktimplementierung zu schließen sind. Dazu zählen:

- ▶ *Erweiterung ASTM D7566 um Option Multiblendherstellung.* Obgleich die Herstellung eines Multiblend-JET-A-1 ASTM-konform möglich ist, ist der mit der jeweils sukzessiven Beimischung verbundene operative und zeitliche Zusatzaufwand ungleich hoch und damit kontraproduktiv für eine breite Marktimplementierung. Angeregt wird daher, Regelungen in die ASTM D7566 aufzunehmen, die die Herstellung unterschiedlich zusammengesetzter Multiblends im Rahmen einer simultanen Beimischung mehrerer synthetischer Kerosine zulässt.
- ▶ *Vereinfachte REACH-Registrierung der erneuerbaren Kerosine.* Mit Verweis darauf, dass Produzenten von erneuerbarem Kerosin gegenwärtig kleinere Unternehmen sind, die zunächst vergleichsweise geringe Mengen produzieren, sind sowohl Zeitaufwand als auch Kosten für eine Registrierung unverhältnismäßig hoch. *Wünschenswert wäre es für SPK entweder eine verkürzte und kostenreduzierte Registrierung, oder aber eine generische Registrierung für alle synthetischen Flugkraftstoffe auf Grundlage ihrer Nutzung anzustreben.*
- ▶ *Ergänzungen im Energiesteuergesetz.* In Ermangelung klarer Regelungen im EnergieStG zur anzuwendenden Nomenklatur und demnach zur anzusetzenden Steuerhöhe für Multiblend-JET-A-1 wird angeregt, Abhilfe über das sog. Ähnlichkeitsprinzip nach § 2 Abs. 4 EnergieStG zu schaffen. Für die breitere praktische Implementierung wird als zielführend erachtet, die nach ASTM D7566 zertifizierten erneuerbaren Kerosine in das nationale EnergieStG aufzunehmen und im internationalen Kontext eine Harmonisierung des HS-Codes und der deutschen Zolltarifnummer gemäß Kombiniertes Nomenklatur anzustreben.

Deutliche Reduzierung der lokalen Schadstoffemissionen (insbes. Rußpartikel um 30 bis 60% je nach Betriebspunkt) an einem Flughafen möglich.

Teil der Demonstration waren ebenso vergleichende Messungen von Schadstoffemissionen in einem Triebwerksprobelaufstand mit einem A300-600 (Frachtversion). Durchgeführt wurden zwei aufeinanderfolgende Bodenläufe anhand eines festgelegten Messprotokolls, wobei zunächst eine Referenzmessung mit einem fossilem JET A-1 und anschließend eine Messung mit dem Multiblend-JET-A-1 erfolgte. Nachgewiesen werden konnte die erwartete Rußminderung durch den Einsatz des Multiblend-JET-A-1; diese lag bezogen auf die Partikelmasse bei ca. 30 bis 60% für unterschiedliche Betriebspunkte. Die Rußminderung ist nicht mit der Verschlechterung („trade-off“) anderer Emissionsparameter verbunden. Um zu vermeiden, dass die ermittelten Ergebnisse nur spezifisch für das getestete Triebwerk sind, wurden ergänzende Messungen im Technikum durchgeführt. So konnte eine deutliche Reduktion der Konzentration an Rußvorläuferspezies bei der Oxidation des Multiblend-JET-A-1 im Vergleich zum fossilen JET A-1 festgehalten werden. Durch die ergänzenden Untersuchungen bzgl. der Reaktionschemie und des Rußbildungspotenzials im Technikumsmaßstab konnte darüber hinaus nachgewiesen werden, dass die dort erlangten Erkenntnisse zur Verbesserung der lokalen Luftqualität an Flughäfen durch alternative Multiblends in ein reales Anwendungsszenario übertragen werden können. Zudem wurde gezeigt, dass eine gute Vorhersagbarkeit der triebwerksbedingten, lokalen Emissionen über mathematische Modelle möglich ist.

Lebenszyklusanalysen für Multiblend-JET-A-1 zeigen ein Treibhausgasreduzierungs-potenzial von mind. 35% gegenüber der fossilen Referenz.

Da der größte Teil der THG-Emissionen durch die Verbrennung des fossilen Kerosins verursacht wird, kann der fossile Anteil im Multiblend-JET-A-1 als der wesentliche Treiber der Gesamt-THG-Emissionen identifiziert werden. Multiblend-JET-A-1 weist somit mit dem höchsten Anteil an erneuerbaren Kerosinen die geringsten THG-Emissionen und mit 35% die höchste THG-Einsparung gegenüber fossilem JET A-1 auf. Ein dezidiertes Blick auf die THG-Emissionen der erneuerbaren Kerosine zeigt zum einen deutliche Vorteile für den Einsatz

von Rest- und Abfallstoffen gegenüber dem Einsatz von Anbaubiomasse und zum anderen Vorteile für die Nutzung erneuerbarer Energien zur Deckung des prozessspezifischen Energiebedarfs. Die verwandten Methoden LCA nach DIN ISO 14040 und THG-Bilanzierung gemäß der EU RED sind etablierte Methoden und stellen in ihrer Anwendung für Bewertungs- und Zertifizierungsprozesse im Bereich der erneuerbaren Kerosine und Multiblend-JET-A-1 keine außerordentliche Herausforderung dar.

Kostenreduktionspotenziale bei breiter Implementierung von Multiblend-JET-A-1.

Die dezidierten Kostenbetrachtungen zu den erneuerbaren Kerosinen bestätigen, dass perspektivisch auch eine großtechnische Herstellung erneuerbarer Kerosine allein nicht ausreichen wird, um eine Annäherung der Kosten an konventionellen Kerosinkosten zu erreichen. Gleiches gilt für die in den unterschiedlichen Bereitstellungsketten untersuchten Lebenszykluskosten des Multiblend-JET-A-1. Die Kosten sind signifikant höher, verglichen mit fossilem JET A-1, jedoch gibt es Potenziale für Kostenreduktionen bei breiterer Implementierung (z. B. bei ganzjähriger Versorgung eines Großflughafens mit Multiblend-JET-A-1). Solange der Kostenvorbehalt bezüglich erneuerbarer Kerosine besteht, ist aufgrund des harten internationalen Wettbewerbs im Luftverkehr keine breite Implementierung über Einzelbeispiele hinaus zu erwarten. In jedem Fall erfordert die Sicherstellung der benötigten zukünftigen Kraftstoffmenge – etwa im Fall einer zukünftigen Belieferung des Flughafens Leipzig/Halle – einen deutlichen Ausbau der Herstellungskapazitäten für SPKs an allen betrachteten Produktionsstandorten. Die damit verbundenen Investitionen erfordern für die Kraftstoffhersteller wiederum langfristig sichere Absatzmöglichkeiten ihrer Produkte.

Die bislang für Biokraftstoffe bekannte Nachhaltigkeitsdokumentation im Zertifizierungssystem kann auf erneuerbare Kerosine und Multiblend-JET-A-1 übertragen werden.

Für Biokraftstoffe wurden in den letzten Jahren verschiedene Nachhaltigkeitsframeworks und Zertifizierungssysteme etabliert. Diese Systeme unterscheiden sich dabei teils deutlich in Bezug auf die enthaltenen Kriterien und ihre Zielmärkte. Im Rahmen von DEMO-SPK konnte die Nachhaltigkeitsdokumentation als Grundlage einer umfassenden Nachhaltigkeitszertifizierung für alle untersuchten alternativen Flugkraftstoffe nachvollzogen werden. Die Nachhaltigkeitszertifizierung, aus bestehenden Systemen und Strukturen heraus, ist damit auch für erneuerbare Kerosine darstellbar und stellt kein grundsätzliches Hindernis für deren Marktimplementierung dar. Die Arbeiten in DEMO-SPK zeigen auch, dass sich die Nachhaltigkeitsanforderungen und -standards global teilweise deutlich unterscheiden. Dies kann bei einem wachsenden globalen Markt für erneuerbare Kerosine zu zusätzlichen administrativen Anforderungen für die Marktbeteiligten führen. Ein möglicher Umgang mit diesen Herausforderungen könnte in der zunehmenden gegenseitigen Anerkennung bestehender Systeme und in der Entwicklung so genannter Metastandards liegen. Diese Ansätze sind entsprechend weiter zu entwickeln. Ein weiterer wichtiger Punkt für die Marktimplementierung von erneuerbaren Kerosinen stellt die Schnittstelle zwischen der Nachhaltigkeitszertifizierung und -dokumentation mit ihrem Massenbilanzsystem auf der einen Seite und der Anrechnung biogener Kraftstoffe im ETS auf der anderen Seite dar. Im Rahmen von DEMO-SPK wurde für die Ausgestaltung dieser Schnittstelle ein entsprechender Vorschlag entwickelt.

Konzeptionierte Ansätze der Anrechnungsmethodik für den Emissionshandel bedürfen der Validierung in der Praxis.

Dass trotz der mehrfach demonstrierten technischen Machbarkeit des Einsatzes von erneuerbarem Kerosin keine breite Marktimplementierung erfolgt, hat neben den hohen Kosten für das Kerosin auch mit dem bisher nicht ausreichend operationalisiertem Umgang zur Erlangung von Emissionsminderungszertifikaten, beispielsweise im europäischen Emissionshandel (EU ETS), zu tun. In DEMO-SPK wurden die verschiedenen mög-

lichen Ansätze zur verbesserten Anrechnung im Emissionshandel konzeptioniert (sog. Track & Trace bzw. Massenbilanzierung und Book & Claim bzw. Zertifikatlösung) und deren Für und Wider auch in verschiedenen Workshops diskutiert und ihre grundsätzliche Funktionalität bestätigt. Zu konstatieren ist, dass ohne Weiterentwicklung des heutigen Anrechnungsansatzes und der derzeitigen Rechtslage eine eingeschränkte Anrechenbarkeit den Zukauf von erneuerbaren Kerosinen weiter unterbinden sowie die Möglichkeit hemmen wird, die Klimabilanz des Luftverkehrs durch emissionsarme Flugkraftstoffe intrasektoral zu verbessern. Als logische Konsequenz verlangen die hier ausgearbeiteten Ansätze in einem weiteren Schritt ihre praktische Validierung, in der weitere Maßnahmen zur Operationalisierung identifiziert werden können sowie mögliche Schwachstellen aufgezeigt werden.

International erstmalig ASTM-konformes PTL-Kerosin (FT-SPK) aufbereitet.

PTL wird als wichtiges erneuerbares Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft angesehen und ist über die Fischer-Tropsch-Syntheseroute grundsätzlich im ASTM bereits zugelassen. Der Nachweis, im Technikumsmaßstab Zwischenprodukte aus der Fischer-Tropsch-Synthese von CO₂ und elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff aus erneuerbarem Strom zu FT-SPK aufzubereiten, konnte erstmals in DEMO-SPK erbracht werden. Wichtige Prozessparameter für eine Maximierung der Kerosinausbeute konnten identifiziert werden, was eine unverzichtbare Grundlage für weitere Schritte der Technologieentwicklung liefert. Das so aufbereitete Kerosin erfüllt die festgelegten Eigenschaften gemäß ASTM-Spezifikation. Zudem wurden unter Berücksichtigung verschiedener Ansätze für die CO₂- und Strombereitstellung THG-Minderungen berechnet, die im günstigen Fall in Größenordnungen von 95 % gegenüber der fossilen Referenz liegen und damit in einer vergleichbaren Größenordnung, wie sie auch mit HEFA-SPK aus Reststoffen möglich sind.

13 Referenzverzeichnis

- [09] DIN EN ISO 14040:2009-11, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14040:2006. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [18] DIN EN ISO 14044:2018-05, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Anforderungen und Anleitungen (ISO_14044:2006_+ Amd_1:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006_+ A1:2018. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [Aga19] Agarwal, A. et al.: SCOPE11 Method for Estimating Aircraft Black Carbon Mass and Particle Number Emissions. In *Environmental science & technology*, 2019, 53; S. 1364–1373.
- [Air] Air Resources Board State of California: Staff White Paper. Framework for Development of a Low Carbon Fuel Standard Verification Program.
- [AST14a] ASTM D5001: Test Method for Measurement of Lubricity of Aviation Turbine Fuels by the Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluator (BOCLE). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [AST14b] ASTM D3338: Test Method for Estimation of Net Heat of Combustion of Aviation Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [AST15] ASTM D7153: Test Method for Freezing Point of Aviation Fuels (Automatic Laser Method). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [AST17a] ASTM D3242: Test Method for Acidity in Aviation Turbine Fuel. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [AST17b] ASTM D381: Test Method for Gum Content in Fuels by Jet Evaporation. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [AST17c] ASTM D1840: Test Method for Naphthalene Hydrocarbons in Aviation Turbine Fuels by Ultraviolet Spectrophotometry. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [AST18a] ASTM D4052: Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [AST18b] ASTM D86: Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [AST18c] ASTM D1322: Test Method for Smoke Point of Kerosine and Aviation Turbine Fuel. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [AST18d] ASTM D1319: Test Method for Hydrocarbon Types in Liquid Petroleum Products by Fluorescent Indicator Adsorption. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [AST19a] ASTM D3241: Test Method for Thermal Oxidation Stability of Aviation Turbine Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [AST19b] ASTM D130: Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [AST19c] ASTM D445: Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

- [AST19d] ASTM D7566-19: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [AST19e] ASTM D1655-19: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [AST19f] ASTM INTERNATIONAL: ASTM International - Standards Worldwide. <https://www.astm.org/>, 09.07.2019.
- [Avi13] Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany eV. (aireg); Meo Carbon Solutions: Nachhaltigkeitskriterien des Luftfahrtsektors, Arbeitspaket 1 innerhalb des Forschungsvorhaben Nr. 50.0354/2012: Abschätzung eines möglichen Beitrags Deutschlands zur Senkung der CO₂-Emissionen im Luftverkehr durch den Einsatz von Biokraftstoffen, 2013.
- [Bar18] Bartczak, K.; Garcés, F.: Der Europäische Wirtschaftsraum (EWR), die Schweiz und der Norden, 2018.
- [Box15] Boxx, I. et al.: 3 kHz PIV/OH-PLIF measurements in a gas turbine combustor at elevated pressure. In Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35; S. 3793–3802.
- [Bun17] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V.: CORSIA. Globales marktbasierendes Klimaschutzinstrument für den internationalen Luftverkehr, Vorstellung und Positionierung. <https://www.bdl.aero/wp-content/uploads/2018/08/BDL-Positionspapier-zum-ICAO-Klimaschutzinstrument-CORSIA-Juni-2017.pdf>.
- [Cal19] California Air Resources Board: Low Carbon Fuel Standard. <https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/background/basics-notes.pdf>, 2019-05-20.
- [Dah] Dahan, L. et al.: Norway. An Emission Trading Case Study.
- [Deh07] Dehue, B.; Meyer, S.; Hamelinck, C.: Towards a harmonised sustainable biomass certification scheme, Utrecht, 2007.
- [DEH16] DEHST: Aufbau des Unionsregisters. <https://www.dehst.de/DE/service/unionsregister/Registerarchitektur/registerarchitektur-node.html>, 24.01.2019.
- [DEH18a] DEHST: Emissionshandel im Luftverkehr. Factsheet, Berlin, 2018.
- [DEH18b] DEHST: Emissionshandel im Luftverkehr: Verordnung zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG in Kraft getreten (03/2018). https://www.dehst.de/SharedDocs/mailling/DE/2018/2018-01-22_Luftverkehr-Aenderung-Richtlinie.html, 19.07.2018.
- [DEH19] DEHST: CORSIA/ EU-ETS Tutorial. <https://www.dehst.de/DE/Als-Betreiber-teilnehmen/Luftfahrzeugbetreiber/Corsia/corsia-node.html>, 2019-04-18.
- [den10] dena: Das Biogasregister Deutschland, Berlin, 2010.
- [den18] dena: Über das Biogasregister. <https://www.biogasregister.de/ueber-das-biogasregister.html>, 13.09.2018.
- [Deu04] Deutsches Institut für Normung: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004), 2004.
- [Die17] Dietrich, S. et al.: Machbarkeitsanalyse für eine PTG-HEFA-Hybridraffinerie in Deutschland. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS), Leipzig, 2017.

- [DIN07] DIN EN ISO 14596:2007-12,: Mineralölerzeugnisse_ - Bestimmung des Schwefelgehaltes_ - Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenz-Analyse (ISO_14596:2007). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007.
- [E-313] E-31P Particulate Matter Committee: Procedure for the Continuous Sampling and Measurement of Non-Volatile Particle Emissions from Aircraft Turbine Engines. SAE International, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2013.
- [EEA19] EEA; EASA: European Aviation Environmental Report 2019, Kopenhagen, Cologne, 2019.
- [EI13] EI; JIG: Quality assurance requirements for the manufacture, storage and distribution of aviation fuel to airports. EI/JIG Standard 1530, London, 2013.
- [EIA19] EIA: Los Angeles, CA Ultra-Low Sulfur CARB Diesel Spot Price (Dollars per Gallon). https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s=eer_epd2dc_pf4_y05la_dpg&f=m, 25.02.2019.
- [Eur03] Richtlinie 2003/96/EG zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom. RL 2003/96/EG, 2003.
- [Eur06] Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission. REACH-Verordnung, 2006.
- [Eur08a] Europäische Union (EU): Richtlinie 2008/101/EG zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Einbeziehung des Luftverkehrs in das System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft. RL 2008/101/EG, 2008.
- [Eur08b] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006. CLP-Verordnung, 2008.
- [Eur09a] Europäische Union (EU): Verordnung (EG) Nr. 684/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2008/118/EG des Rates in Bezug auf die EDV-gestützten Verfahren für die Beförderung verbrauchsteuerpflichtiger Waren unter Steueraussetzung. VO (EU) Nr. 684/2009, 2009.
- [Eur09b] Amt für Veröffentlichungen: Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. RL 2009/28/EG, 2009.
- [Eur09c] Kommission, E.: Richtlinie (EU) 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. Richtlinie (EU) 2009/28/EG, 2009.
- [Eur12] Verordnung (EU) Nr. 601/2012 über die Überwachung von und die Berichterstattung über Treibhausgasemissionen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. VO (EU) Nr. 601/2012, 2012.

- [Eur13] Europäische Kommission: Report from the Commission to the European Parliament and the Council. Renewable energy progress report, Brüssel, 2013.
- [Eur15] Kommission, E.: Richtlinie (EU) 2015/1513 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Richtlinie (EU) 2015/1513, 2015.
- [Eur16] Europäische Kommission: Das Emissionshandelssystem der EU (EU-ETS). https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet_ets_de.pdf, 2019-05-13.
- [Eur17] Europäische Kommission: Directorate-General Climate Action Directorate C - Climate Strategy, Governance; Governance, Emissions from non-trading sectors Unit C. 2. -.; Sharing, Effort Biomass issues in the EU ETS. https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/monitoring/docs/gd3_biomass_issues_en.pdf.
- [Eur18a] Europäische Kommission: Guidance Document: The Monitoring and Reporting Regulation – General guidance for Aircraft Operators. MRR Guidance Document No. 2. Updated Version, 11 January 2018, Brüssel, 2018.
- [Eur18b] Kommission, E.: RICHTLINIE (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Directive (EU) 2018/2001, 2018.
- [Eur19a] Kommission, E.: Regulation (EU) 2019/807 supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council as regards the determination of high indirect land-use change-risk feedstock for which a significant expansion of the production area into land with high carbon stock is observed and the certification of low indirect land-use change-risk biofuels, bioliquids and biomass fuels, 2019.
- [Eur19b] Kommission, E.: Overview table on updates for recognised voluntary schemes, 2019.
- [Eur19c] Europäische Kommission: Fuel Quality. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/fuel_en, 2019-05-29.
- [Eur19d] Europäische Kommission: Voluntary schemes. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/biofuels/voluntary-schemes>, 2019-02-22.
- [Far19] Farm Energy: Renewable Fuel Standard (RFS2) Basics for Biodiesel. <https://farm-energy.extension.org/renewable-fuel-standard-rfs2-basics-for-biodiesel/>, 2019-05-13.
- [Gen18] Generalzolldirektion: Einführung in das IT-Verfahren EMCS. http://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/EMCS/Einfuehrung/einfuehrung_node.html, 30.07.2018.
- [Gev18] Gevo Inc.: Persönliche Kommunikation, 2018.
- [Gou16] Gounder, J. D. et al.: Spray Characteristics Measured in a New FLOX[®] Based Low Emission Combustor for Liquid Fuels Using Laser and Optical Diagnostics: Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition - 2016. Presented at the ASME Turbo Expo 2016: Turbine Technical Conference and Exposition, June 13-17, 2016, Seoul, South Korea. The American Society of Mechanical Engineers, New York, N.Y., 2016; V04AT04A036.
- [Gro16] Grohmann, J. et al.: Comparison of the Combustion Characteristics of Liquid Single-Component Fuels in a Gas Turbine Model Combustor: Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbine Tech-

- nical Conference and Exposition - 2016. Presented at the ASME Turbo Expo 2016: Turbine Technical Conference and Exposition, June 13-17, 2016, Seoul, South Korea. The American Society of Mechanical Engineers, New York, N.Y., 2016; V04AT04A010.
- [Has09] Hasenberg, V.: Biokraftstoffe: Potenziale, Herausforderungen und Wege einer nachhaltigen Nutzung. Diplomica Verlag, 2009.
- [Hui] Huijbregts, M. et al.: ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. In International Journal of LCA.
- [HZA18] HZA Hamburg-Stadt: Fragen bzgl. der Steueraufsicht von Flugkraftstoffen, Beförderung in festen Rohrleitungen. Private E-Mail vom 6. November 2018 (nicht veröffentlicht), Hamburg, 2018.
- [IAT15] IATA: IATA Guidance Material for Sustainable Aviation Fuel Management. 2nd Edition, Montréal, Genf, 2015.
- [ICA19a] Partnership, I. C. A.: New Zealand Emissions Trading Scheme, 2019.
- [ICA19b] ICAP: EU Emissions Trading System (EU ETS). https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_etsmap&task=export&format=pdf&layout=list&systems=43, 06.05.2019.
- [Int18a] International Carbon Action Partnership: Emissions Trading Worldwide Status Report 2018. https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_attach&task=download&id=547.
- [Int18b] International Air Transport Association: An Airline Handbook on CORSIA. <https://www.iata.org/policy/environment/Documents/corsia-handbook.pdf>.
- [Int19a] International Carbon Action Partnership: Korea Emissions Trading Scheme. https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_etsmap&task=export&format=pdf&layout=list&systems%5b%5d=47, 2019-05-13.
- [Int19b] International Carbon Action Partnership: China National ETS. https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_etsmap&task=export&format=pdf&layout=list&systems=55, 2019-05-13.
- [Int19c] International Carbon Action Partnership: Swiss ETS. https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_etsmap&task=export&format=pdf&layout=list&systems=64, 2019-05-13.
- [IP 13] IP 170: Determination of flash point - Abel closed-cup method, 2013.
- [IPI10] IPIECA: Chain of custody options for sustainable biofuels. Operations and fuels 2010, London, 2010.
- [ISC16] ISCC: ISCC 203 Traceability and Chain of Custody. Version 3.0. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2017/02/ISCC_203_Traceability_and_Chain-of-Custody_3.0.pdf.
- [ISC18] Sustainability, I.; Certification, C.: ISCC PLUS 201-1 — Guidance for Deliveries of Biofuels to Japan. Version 1.0. ISCC System GmbH, 2018.
- [ISC19a] ISCC: Recognitions. ISCC is working to harmonise new or emerging sustainability requirements – modular add-ons allow perfect fit. <https://www.iscc-system.org/about/recognitions/>, 2019-04-11.
- [ISC19b] ISCC: Transparency & impact. <https://www.iscc-system.org/about/impact/>, 2019-05-28.

- [ISE16] ISEAL Alliance: Chain of Custody Models and Definitions. A reference document for sustainability standards systems, and to complement ISEAL's Sustainability Claims Good Practice Guide. Version 1.0, London, 2016.
- [Lef10] Lefebvre, A. H.; Ballal, D. R.: Gas turbine combustion. Alternative fuels and emissions. CRC, Boca Raton Fla. u.a., 2010.
- [Leu18] Leuty, R.: Once a cleantech darling, this East Bay company looks to pour it on with syn-bio sweetener. <https://www.bizjournals.com/sanfrancisco/news/2018/12/03/amyris-sweetener-sugar-amrs-cleantech-syn-bio.html>.
- [MKS13] IFOK GmbH: Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Energie auf neuen Wegen, Berlin, 2013.
- [Mos10] Mosbach, T. et al.: Experimental Analysis of Altitude Relight Under Realistic Conditions Using Laser and High-Speed Video Techniques: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010. Presented at the 2010 ASME Turbo Expo, June 14 - 18, 2010, Glasgow, UK. ASME, New York, NY, 2010; S. 523–532.
- [Mos12] Mosbach, T. et al.: Investigation of GTL-Like Jet Fuel Composition on GT Engine Altitude Ignition and Combustion Performance. Part II—Detailed Diagnostics: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011. ASME, New York, N.Y., 2012; S. 507–517.
- [Mos14] Mosbach, T.; Burger, V.; Gunasekaran, B.: Fuel Influence on Targeted Gas Turbine Combustion Properties. Part I — Detailed Diagnostics. In (Hodson, H. Hrsg.): Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition - 2014. Presented at the ASME 2014 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition; June 16 - 20, 2014, Düsseldorf, Germany. ASME, New York, NY, 2014; V04AT04A006.
- [Mos15] Mosbach, T.; Burger, V.; Gunasekaran, B.: Fuel Composition Influence on Gas Turbine Ignition and Combustion Performance: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015. Turbine Technical Conference and Exposition, June 15-19, 2015, Montreal, Quebec, Canada. ASME, New York, N.Y., 2015; V04BT04A002.
- [Oßw15] Oßwald, P.; Köhler, M.: An atmospheric pressure high-temperature laminar flow reactor for investigation of combustion and related gas phase reaction systems. In The Review of scientific instruments, 2015, 86; S. 105109.
- [Pel19] Pelchen, A.: Accounting for Biokerosene in the ETS: A Verifier's View, Hamburg, 2019.
- [Rac98] Rachner, M.: Die Stoffeigenschaften von Kerosin Jet A-1, 1998.
- [Sch18] Schripp, T. et al.: Impact of Alternative Jet Fuels on Engine Exhaust Composition During the 2015 ECLIF Ground-Based Measurements Campaign. In Environmental science & technology, 2018, 52; S. 4969–4978.
- [Sta15] Stanley, L. et al.: The Potential of Voluntary Sustainability Initiatives to Reduce Emissions from Deforestation and Forest Degradation, Ohne Ortsangabe, 2015.
- [Sta16] Starck, L. et al.: Production of Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) – Optimisation of Process Yield. In Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles, 2016, 71; S. 10.

- [Sta17] State of Queensland: Liquid Fuel Supply Regulation 2016. <https://cabinet.qld.gov.au/documents/2016/Oct/LiqFuelReg/Attachments/Reg.PDF>.
- [Sta19] Requirements for Validation and Verification Services. 17 CCR § 95501 § 95501., 2019.
- [Tur18] Turton, R. et al.: Analysis, synthesis, and design of chemical processes. Prentice Hall, Boston, 2018.
- [UBA12] UBA: Herkunftsnachweisregister (HKNR): Häufig gestellte Fragen, Dessau-Roßlau, 2012.
- [UBA14] UBA: Das Herkunftsnachweisregister (HKNR) im Umweltbundesamt. für Strom aus erneuerbaren Energien, Dessau-Roßlau, 2014.
- [UBA17] UBA: Das Herkunftsnachweisregister für Strom aus erneuerbaren Energiequellen. Wer wir sind und was wir tun, Dessau-Roßlau, 2017.
- [UBA18a] UBA: EECS Electricity Domain Protocol for Germany. Based on EECS Rules Release 7 v6. Release [2] [2018], Dessau-Roßlau, 2018.
- [UBA18b] UBA: Stromkennzeichnung mit Herkunftsnachweisen, Dessau-Roßlau, 2018.
- [Unia] United States Environmental Protection Agency: Renewable Identification Numbers (RINs) under the Renewable Fuel Standard Program. In Renewable Fuel Standard Program.
- [Unib] United States Environmental Protection Agency: What is a fuel pathway? In Renewable Fuel Standard Program.
- [Unic] United States Environmental Protection Agency: Overview for Renewable Fuel Standard. In Renewable Fuel Standard Program.
- [Unid] United States Environmental Protection Agency: 40 CFR Part 80 Regulation of Fuels and Fuel Additives. Changes to Renewable Fuel Standard Program; Final Rule.
- [Zec16] Zech, K. et al.: Biokerosin und EE - Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft – von der Theorie zu Pilotvorhaben. Studie im Rahmen des Auftrags Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffe und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Leipzig, München, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Zol19] Zoll: "Energiesteuer". https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/verbrauchssteuern_node.html;jsessionid=4B6D0325208DCD933D26B9DE4D2931D0.live4402, 13.05.2019.
- [Zsc17] Zschocke, A.; Scheuermann, S.; Ortner, J.: High Biofuel Blends in Aviation (HBBA). ENER/C2/2012/420-1. Final Report, 2017.

Forschungs- und Demonstrationsvorhaben
zum Einsatz von erneuerbarem Kerosin am
Flughafen Leipzig/Halle (DEMO-SPK)

DEMO-SPK wird finanziert durch



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur



www.mks-dialog.de

