

Kurzbericht

Forschungsvorhaben Nr. 50.0354/2012

Abschätzung eines möglichen Beitrags Deutschlands zur Senkung der CO₂-Emissionen im Luftverkehr durch den Einsatz von Biokraftstoffen

Alternativen Kraftstoffen wird eine bedeutende Rolle bei Reduktion der CO₂-Emissionen des Luftverkehrs beigemessen. Doch welchen Beitrag können sie in Deutschland wirklich leisten und von welchen Voraussetzungen hängt das ab? Der vorliegende Bericht untersucht alle Segmente der Wertschöpfungskette, beschreibt den aktuellen Entwicklungsstand und entwickelt Szenarien für die zu erwartende Marktdurchdringung.

Nachhaltigkeitskriterien

Die Luftfahrtindustrie hat sich für die Zukunft ambitionierte **Klimaziele** gesetzt. Ab dem Jahr 2020 soll das Wachstum der Luftfahrt, welches 4,5 % pro Jahr (Passagier und Fracht) beträgt, CO₂-neutral sein. Bis zum Jahr 2050 sollen die CO₂-Emissionen im Vergleich zu 2005 um 50% reduziert werden. Da die Luftfahrt auf mittlere Sicht keine Alternativen zur Kerosinnutzung hat, wird der Einsatz von Biokerosin einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen dieser Klimaziele leisten. In Deutschland haben sich die Mitglieder von aireg - Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V. vorgenommen bis zum Jahr 2025 mindestens 10% Biokraftstoffe einzusetzen.

Die Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen und damit zusammenhängende Themen wie z.B. Flächenknappheit, Ernährungssicherheit und Treibhausgasemissionen werden in Politik, Forschung und Gesellschaft debattiert. Deshalb wurden wichtige ökologische, soziale und ökonomische Probleme der Biokraftstoffproduktion identifiziert. In einem **Metastandard** wurden Ziele und Kriterien für eine nachhaltige Rohstoffproduktion und -verarbeitung festgelegt. Dieser soll als **Basis für einen Vergleich bestehender Zertifizierungssysteme** dienen. Über diesen Ansatz des Metastandards soll sichergestellt werden, dass eine einfache Umsetzung der Kriterien mit bereits etablierten Systemen erfolgen kann. Zu diesem Zweck wurden auf Basis des aktuellen Forschungsstandes geeignete, international harmonisierbare Nachhaltigkeitskriterien für die Wertschöpfungskette von Biokraftstoffen identifiziert und deren Umsetzung in etablierten Zertifizierungssystemen analysiert.

Auf Basis einer Literaturanalyse und einer Diskussion beteiligter Fachkreise wurden in dem Metastandard Anforderungen in den Dimensionen Nachhaltigkeit, Rückverfolgbarkeit und Governance definiert und nach Relevanz in verpflichtende Hauptkriterien (Major Must) und wichtige Kriterien 2. Ordnung (Minor Must) kategorisiert.

Um den Metastandard mit bestehenden Initiativen und Rahmenbedingungen der Luftfahrt zu harmonisieren, wurden sowohl verpflichtende als auch freiwillige Rahmenbedingungen identifiziert und analysiert. Mehrere der identifizierten Initiativen verweisen auf die Erneuerbaren Energien Richtlinie (Renewable Energies Directive, RED), die verpflichtende Mindestanforderungen für den Einsatz von Biokraftstoffen in den Ländern der EU vorgibt. Darüber hinaus existieren auch in den USA verpflichtende Rahmenbedingungen für Biokraftstoffe unter der Regulation of Fuels and Fuels Additives 2 (RFS2). Es konnten vier Konfliktfelder zwischen RED und RFS2 identifiziert werden. Da die Initiativen verschiedene Ansätze für den Nachweis der THG-Einsparung gewählt haben (RED: individuelle Berechnung,

RFS2: Einreichung relevanter Daten zu Berechnung durch US-Umweltbehörde (EPA)), wäre eine Harmonisierung hier mittelfristig möglich. Es besteht außerdem Handlungsbedarf in den Bereichen Flächenhistorie, Nachhaltigkeitskriterien und Systemsteuerung. Vor allem bei der Systemsteuerung ist aufgrund der unterschiedlichen Herangehensweisen der unabhängigen Überprüfung (RED: Freiwillige Zertifizierungssysteme und Drittparteienüberprüfung durch Zertifizierungsstellen, RFS2: Überprüfung durch EPA) eine Harmonisierung momentan nur mit erheblichem Mehraufwand möglich.

Der an die rechtlichen Rahmenbedingungen adaptierte Metastandard diene als Grundlage für ein Benchmark von bestehenden Zertifizierungssystemen. Das Benchmark ergab, dass momentan keines der Zertifizierungssysteme alle Anforderungen des aireg-Metastandards erfüllt. Vier im Detail untersuchte Systeme (RSPO-RED, RTRS EU RED, RSB EU RED, ISCC EU) erfüllen einen Großteil der Anforderungen. Unter anderem bewerten die Systeme die Relevanz der geforderten Kriterien unterschiedlich. Hier sollte bei den Systemen gegebenenfalls eine Restrukturierung gemäß definierter Anforderungen erfolgen. Einige der festgelegten Kriterien in den Dimensionen Rückverfolgbarkeit und Systemsteuerung sind momentan zu hoch aggregiert um zu bewerten, ob die gebenchmarkten Systeme diese ausreichend abdecken. Hier wäre die Definitionen von Zielen und Mindestanforderungen notwendig, um eine Bewertung der Systeme vorzunehmen.

Aufgrund der Vielzahl der Initiativen zur Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen ist die **internationale Harmonisierung** bestehender Initiativen ein wichtiger Schritt für eine Vereinheitlichung der Anforderungen auf globalem Niveau. Die Lückenanalyse des erstellten Metastandards mit den Initiativen GBEP, BEFSCI, CSBP, IDB-Scorecard und SAFUG ergab, dass hier eine recht große Übereinstimmung bezüglich der zu adressierenden Kriterien herrscht. Problematisch ist jedoch das unterschiedliche Aggregationsniveau der Standards. Bei einigen der Nachhaltigkeitskriterien, wie THG-Emissionen, könnten Indikatoren helfen, die Ziele des Metastandards zu verfeinern. Nicht alle der Kriterien sind jedoch geeignet, auf Indikatorebene ausgelegt zu werden.

Lebenszyklusanalyse

Im Rahmen einer Literaturstudie wurden bestehende Studien zu dem Thema **Ökobilanzen von Biokraftstoffen** speziell für die Luftfahrt mit Fokus auf das Treibhauspotential durchgeführt. Dazu wurden in einem ersten Schritt die Biokraftstoffrouten **HEFA auf Jatropha** und **BioGTL** zur genaueren Analyse selektiert.

Beide Prozessrouten besitzen das Potenzial, am schnellsten einen Beitrag zur Biokerosinherstellung leisten zu können, während Jatropha durch seine weltweit potentiell großen Anbauflächen und als nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelindustrie stehend als Rohstoff ausgewählt wurde.

In einem zweiten Schritt wurden Bewertungskriterien für die Auswahl und Auswertung der vorhandenen Literaturstudien erarbeitet. Anschließend wurden die Ergebnisse der als vergleichbar eingestuften Studien gegenübergestellt und Bandbreiten ermittelt und in einem abschließenden Arbeitsschritt die Harmonisierung der Berechnungsmethodik diskutiert.

Während für den HEFA-Prozess aus Jatropha die Ergebnisse verschiedener Studien direkt miteinander verglichen werden konnten, wurden zur Gesamtbewertung des BioGTL-Prozesses die als vergleichbar eingestuften Werte für die Biomethanherstellung mit den verwendbaren Werten für den GTL-Prozess aggregiert. Durch die damit zusammenhängende Unsicherheit empfiehlt es sich für eine abschließende Bewertung des BioGTL-Prozesses die gesamte Route genauer zu untersuchen. Aber auch bei Betrachtung der Ergebnisse des HEFA-Prozesses mit

Jatropha wurde deutlich, dass selbst innerhalb der wenigen vergleichbaren Studien noch Schwankungen in den Ergebnissen auftreten, welche zwar die Interpretation von Tendenzen erlauben, das Formulieren von qualitativen Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen aber nicht zulassen.

Der Vergleich von Ökobilanzergebnissen verschiedener Biokraftstoffe aus verschiedenen Studien ist daher nicht zu empfehlen. Zusätzlich wird die reine Betrachtung der Treibhausgasbilanz dem ökobilanziellen Gedanken nicht gerecht, da vor allem bei Prozessen mit Flächennutzung wie hier der Biokraftstoffherstellung Umweltauswirkungen entstehen, die erst durch die Berücksichtigung weiterer Wirkungskategorien sichtbar werden. In diesem Zusammenhang wurde in einem abschließenden Arbeitsschritt eine qualitative Diskussion von weiteren ökologischen Effekten der verstärkten Nutzung von Biokraftstoffen im Luftverkehr innerhalb der Themen Landnutzung, Biodiversität, Regionalisierung und Wasser durchgeführt.

Für eine qualitative Bewertung und einen Vergleich verschiedener Biokraftstoffoptionen empfiehlt sich daher die Durchführung einer vollständigen Ökobilanz auf Basis einer einheitlichen Datengrundlage, Methodik und Rahmenbedingungen, wobei sich hier die Erweiterung des Fokus auf weitere Routen anbietet.

Bioraffinerietechnologien

Auf Basis der durchgeführten Analysen können sowohl **GtL-** (Gas to Liquid) also auch **HEFA-Kerosine** im Vergleich zu Biokerosin aus alternativen Verfahren kurzfristig den **größten Beitrag zur globalen Biokerosinerzeugung** leisten. Während beim HEFA-Prozess vor allem die zur Verfügung stehende Biomasse ein Problem darstellen kann, besteht beim GtL-Prozess noch Forschungsbedarf bezüglich der wirtschaftlichen Umsetzung kleiner Anlagen. Beim BtL-Prozess (Biomass to Liquid) bestehen neben dem Problem der Biomasseverfügbarkeit noch größere, technische Probleme. Der AtJ-Prozess (Alcohol to Jet) steht noch so weit am Anfang, dass Aussagen über den Zeitraum bis zur großmaßstäblichen Verfügbarkeit der Technologie und die Kosten sehr schwierig sind. Weiterhin zeigt sich, dass die Biokerosingestehungskosten sowohl für den GtL-Prozess als auch den HEFA-Prozess noch deutlich über dem Marktpreis für Kerosin auf fossiler Basis liegen. Der größte Kostenfaktor beim GtL-Prozess ist das Biomethan, aber auch die vergleichsweise kleine, betrachtete Anlagengröße bringt finanzielle Nachteile mit sich. Daher ist sowohl bei der Erzeugung von Biomethan als auch bei der weiteren Entwicklung des GtL-Prozesses noch Forschungsbedarf vorhanden. Beim HEFA-Prozess sind ebenfalls die Rohstoffkosten der entscheidende Faktor. Die hier betrachtete Anlage hat allerdings in Anlehnung an bestehende Anlagen einen deutlich größeren Maßstab, wodurch sich Kostenvorteile ergeben. Insgesamt wird beim HEFA-Prozess eine größere Menge des Einsatzstoffes in das Zielprodukt Kerosin umgewandelt, als dies beim GtL-Prozess der Fall ist. Bei den anderen vorgestellten Verfahren sind gesicherte Aussagen über den Zeitraum der Zulassung, den möglichen Beitrag zur Versorgung mit Kerosin sowie die Kosten für das erzeugte Endprodukt zum jetzigen Zeitpunkt noch schwer möglich.

In Anbetracht des technologischen Fortschritts und der Wirtschaftlichkeit sind daher GtL- und HEFA-Prozesse vorerst zu favorisieren, wenn es um eine baldige Markteinführung und die gezielte Forschung zur Optimierung der Prozesse und der Kostenreduktion der Produkte geht.

Praktische Fragen der Kraftstoffverwendung

Ausgehend von den politischen Zielsetzungen der Bundesregierung und der europäischen Union zur Reduzierung der CO₂-Emissionen sowie den Klimaschutzzielen der deutschen und internationalen Luftverkehrswirtschaft wurde eine Abschätzung des deutschen Gesamtbedarfs an Biokerosin abgeleitet. Auf dieser Basis wird der Biokerosinbedarf im Jahr 2020 mit 167.000 bis 322.000 Tonnen beziffert. Aus emissionsbilanziellen und logistischen Gründen kann diese Menge nicht auf alle Flughäfen Deutschlands verteilt werden. Insbesondere sind der **Standort der Raffinerie** sowie die **Anbindung und Kraftstoffdurchsatz der Flughäfen** von Bedeutung.

Zur Ermittlung der Kosten zur Deckung des Biokerosinbedarfs werden die Gestehungskosten der untersuchten Bioraffinerietechnologien herangezogen. Je nach Herstellungsverfahren variieren diese teils erheblich. Gegenüber fossilem Kerosin entstehen für die für 2020 abgeleitete Zielmenge Zusatzkosten von mindestens 215 Millionen Euro, wenn der geringere Bedarf unterstellt wird. Wird der höhere Bedarf zu Grunde gelegt, sind es mindestens 414 Millionen Euro.

Derzeit ist Biokerosin folglich nicht wettbewerbsfähig zu konventionellem Kerosin. Um die Wettbewerbsfähigkeit zu erlangen, werden beispielhaft Maßnahmen vorgeschlagen. So könnte die Rohstoffversorgung über bilaterale Rahmenverträge erleichtert und die Errichtung einer designierten Bioraffinerie mit Investitionszuschüssen begleitet werden. Durch die so erzielten Skaleneffekte und einer über die ICAO international einheitlich festgelegten Anerkennung der Biokraftstoffnutzung ließe sich der Kostennachteil signifikant reduzieren.

Aus technischer Sicht steht dem Einsatz von Biokerosin in Deutschland nichts mehr im Wege. Durch das „**Drop-in**“-Konzept kann es in die bestehende Versorgungsinfrastruktur eingespeist werden. Einzig aus regulatorischer Sicht gibt es Handlungsbedarf: Die **Anrechnung im Emissionshandel** bedarf Nachbesserungen. Zu diesem Zweck wäre ein „book and claim“-Ansatz zielführend.

Sicherstellung der Kraftstoffqualität

In einem weiteren Abschnitt des Berichts stehen die Sicherstellung der Kraftstoffqualität und Sicherheitsaspekte beim Einsatz von Biokerosin im Vordergrund. In diesem Zusammenhang ist insbesondere das **Blending** (Beimischung) des Biokerosin-Reinstoffs mit fossilem Kerosin relevant. Zunächst wird daher ein Blick auf die Eigenschaften und Spezifikationen des Standardkraftstoffs JET A1 geworfen. Dabei ist auch dessen chemische Zusammensetzung relevant.

Zwischen erdölbasierten Kraftstoffen und herkömmlichen Biokraftstoffen für den Straßenverkehr bestehen deutliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Zusammensetzung: Die Kraftstoffmoleküle unterscheiden sich grundlegend. Dies hat in der Vergangenheit zu technischen Problemen geführt. Beim Einsatz von Biokerosin stellt sich die Situation grundlegend anders dar. Biokerosin-Reinstoff besteht nahezu vollständig aus Alkanen. Alkane bilden auch den Hauptbestandteil von erdölbasiertem Kerosin. Mit anderen Worten wird beim Blending ausschließlich der Anteil bestimmter Moleküle im Kraftstoff beeinflusst, es werden keine andersartigen Moleküle hinzugefügt. Durch die dem Blending folgenden Analysen wird sichergestellt, dass die Kraftstoffeigenschaften der Spezifikation entsprechen. Dies wird teilweise durch Moleküle beeinflusst, die im Biokerosin-Reinstoff nicht enthalten sind, beispielsweise Aromaten. Daneben gibt es Anforderungen an den Siedekurvenverlauf, die Schmierfähigkeit und die Fließeigenschaften.

Deshalb kommt der fossilen Blendingkomponente eine besondere Bedeutung zu: Sie ist in einer Weise zu wählen, dass der entstehende Blend spezifikationskonform ist. Doch auch zwischen den konventionellen Kerosinen existieren – je nach Erdölverarbeitungsverfahren innerhalb der Raffinerie – Unterschiede in der Zusammensetzung. Wie andere Studien zeigen, ist nicht jedes fossile Kerosin zum Blending mit Biokerosin-Reinstoff geeignet. Es wird aufgezeigt, welche Parameter bei der Herstellung den größten Einfluss besitzen und an welchen Stellen weiterer Forschungsbedarf besteht.

Um die Qualitätsanforderungen an den Biokerosin-Reinstoff zu gewährleisten, sind an verschiedenen Stellen innerhalb der Produktions- und Versorgungskette Kontrollen erforderlich. Diese wurden bereits in einem anderen Forschungsvorhaben dargelegt (QuaNatBioL). Nach dem Blending – sobald JET A1 vorliegt – unterscheidet sich die Qualitätssicherung nicht mehr von der bisherigen Praxis für konventionelles Kerosin.

Abschließend wird der **Zulassungsprozess** für Biokerosin beschrieben. Derzeit befinden sich mehrere Herstellungsverfahren in unterschiedlichen Phasen der Zulassung. Sie unterscheiden sich teilweise grundlegend von den bereits zugelassenen Verfahren. Aus diesem Grund ist erforderlich, die Spezifikationen fortlaufend an den Stand der technischen Entwicklung anzupassen, um künftig auch höhere Beimischungsverhältnisse bei gleichbleibender oder höherer Kraftstoffqualität zu ermöglichen.

Emissionsreduktionspotential anhand verschiedener Zielszenarien

Die Übertragung der gewonnenen Ergebnisse auf verschiedene Zielszenarien in Deutschland bis zum Jahr 2050 zeigt, dass der Einsatz von alternativen Flugkraftstoffen in Deutschland einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Luftverkehr leisten kann. Allerdings sind die **Ziele** für die Verwendung alternativer Kraftstoffe eine große Herausforderung und **erfordern gemeinsame Anstrengungen von allen Beteiligten**. Das Ziel zur Nutzung von europaweit 2 Mio. t Biokerosin im Jahr 2020 entspräche gemäß dem Anteil am Kerosinverbrauch in Deutschland etwa einer Menge von 320.000 t Biokerosin. Bisher liegen die projektierten Produktionskapazitäten jedoch deutlich darunter. Für das Ziel des CO₂-neutralen Wachstums wären in 2030 bereits Biokerosinmengen von 1,6 Mt erforderlich, unter der Annahme eines Einsparpotentials von 60% gegenüber konventionellem Flugturbinenkraftstoff.

Für die Untersuchungen wurde ein Referenzszenario für den zukünftigen Kraftstoffbedarf des Luftverkehrs in Deutschland betrachtet, bei welchem der Flugturbinenkraftstoffbedarf bis zum Jahr 2050 von 8,5 Mio. t im Jahr 2010 auf 13,4 Mio. t ansteigt. Für die Entwicklung und Bewertung von Szenarien wurden wesentliche Eigenschaften der untersuchten Biokerosinoptionen nach den Kriterien Diversität, Nachhaltigkeit und Kosten in einer Parameter-Matrix zusammengestellt. Für die Verfügbarkeit von Biokraftstoffen werden maßgeblich die Kosten, das Biomassepotential und die Produktionskapazitäten entscheidend sein, wobei die Gewichtung der einzelnen Faktoren zeitlichen Veränderungen unterliegt und entsprechend unterschiedlich in den entwickelten Mittel- und Langfristszenarien berücksichtigt wurden. Bei der Einführung alternativer Kraftstoffe sind **in erster Linie die Produktionskapazitäten kritisch**. Erfolgt kein entsprechend zügiger Aufbau, werden die tatsächlichen Biokerosinmengen hinter dem Mittelfristszenario zur Biokraftstoffverfügbarkeit mit 1,09 Mt im Jahr 2030 zurückbleiben.

Derzeit können Biokerosine noch nicht zu konkurrenzfähigen Preisen hergestellt werden, so dass für den Aufbau von Produktionskapazitäten zunächst gezielte Markteinführungsprogramme unerlässlich sind, um zukünftig die selbstgesteckten Ziele und Quoten nicht zu verfehlen. Im **Langfristszenario bis 2050** könnte die Biokerosinmenge zwischen 1,91 Mt und 3,81 Mt betragen was einem Anteil von **bis zu 23%** am gesamten Flugturbinenkraftstoffbedarf

in Deutschland entspricht. Allerdings unterliegt dieses Szenario erheblichen Unsicherheiten, da die Entwicklungen bzgl. der Verarbeitungstechnologien, Verfügbarkeit von Rohstoffen, Kosten und Treibhausgasminderungspotentiale heutzutage noch nicht abgeschätzt werden können.

Die betrachteten Szenarien zeigen darüber hinaus, dass nicht alle Emissionsreduktionsziele direkt auf den Luftverkehr übertragbar sind. So müsste bspw. im Jahr 2050 der gesamte deutsche Flugverkehr Biokerosin mit einem Einsparpotential von 84% gegenüber konventionellem Flugturbinenkraftstoff nutzen, um die Vorgaben aus dem Europäischen Weißbuch Verkehr – CO₂-Minderungsziel von 60% im Jahr 2050 gegenüber 1990 – zu erfüllen. Dieses Szenario kann als eher spekulativ betrachtet werden.

Die Analysen unterstreichen, dass neben der Verwendung von Biokraftstoffen mit einem entsprechend hohen Treibhausgasminderungspotential, weitere Verbesserungen im Bereich der technologischen Entwicklung und der operationellen Maßnahmen erfolgen müssen um die Emissionen vom Verkehrswachstum zu entkoppeln.
