

// Sebastian Rausch (ZEW, Universität Heidelberg), Anna Straubinger (ZEW),
Mirko Hornung (Bauhaus Luftfahrt, TU München)

Turbulenzen voraus: Effektive und effiziente Klimapolitik im Luftverkehr

Die Dekarbonisierung des Luftverkehrs stellt eine erhebliche Herausforderung dar und erfordert entschlossene politische Maßnahmen sowie starke Anreize für den Einsatz nachhaltiger Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF). Derzeit kommen sowohl marktbasierende als auch regulative Instrumente zum Einsatz – etwa das europäische Emissionshandelssystem (EU ETS), die EU-weite SAF-Quote und das internationale Kompensationssystem CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). Eine neue ZEW-Studie zeigt: Die Marktstruktur und der Wettbewerbsgrad haben entscheidenden Einfluss auf die Kosteneffektivität klimapolitischer Instrumente. Unter Bedingungen des vollkommenen Wettbewerbs sind CO₂-Steuern ein kosteneffektiver Weg, um Emissionen zu mindern. Haben Fluggesellschaften jedoch Marktmacht, sind SAF-Quoten vorteilhafter, da sie die Nachfrage stabilisieren und zugleich den Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe fördern. Die klimapolitischen Maßnahmen der EU im Luftverkehrssektor sind geeignet, um Emissionen zu reduzieren. Ihre globale Wirkung bleibt jedoch begrenzt. Das stark steigende Passagieraufkommen treibt die Kosten für die Erreichung eines Netto-Null-Emissionswachstums erheblich und unterstreicht, dass internationale Maßnahmen sowie regulatorische Anreize für den Einsatz von SAF unverzichtbar sind. Sollten die im Rahmen von CORSIA verwendeten Offsetting-Zertifikate keine echten Emissionseinsparungen bewirken, besteht die Gefahr, dass die Abhängigkeit von fossilen Flugkraftstoffen fortgeschrieben und die Dekarbonisierung des Luftverkehrs verzögert wird.



ZENTRALE ERGEBNISSE

- Marktstruktur und Wettbewerb sind zentral für das Design klimapolitischer Instrumente; im Luftverkehr herrscht meist unvollkommener Wettbewerb. SAF-Quoten sind unter diesen Bedingungen kosteneffektiver als eine CO₂-Steuer: Sie setzen Anreize für den Klimaschutz und mindern Wettbewerbsverzerrungen.
- Das 2035 EU-Klimapaket für den Luftverkehr (EU Emissionshandel + SAF-Quote) senkt Emissionen zu durchschnittlichen Kosten von 377 Euro pro vermiedener Tonne CO₂; Tickets verteuern sich um zwölf Prozent. Nur EU Emissionshandel ohne SAF-Quote bringt geringe Emissionsreduktionen bei hohen Kosten.
- Selbst bei hoher Stringenz der EU-Maßnahmen (CO₂-Preis von 300 Euro im Emissionshandel und SAF-Quote von 35 Prozent) sinken globale Luftverkehrsemissionen um weniger als sieben Prozent.
- Wegen starken Passagierwachstums braucht es globale Maßnahmen: Zur Stabilisierung auf 2019 wäre weltweit 59 Prozent Emissionsreduktion nötig; ohne technologische Durchbrüche ist dies nur durch Einsatz von SAF möglich.
- Liefert Carbon Offsetting (z.B. CORSIA) keine realen Minderungen, drohen Pfadabhängigkeiten, die Transformation bremsen und Abhängigkeit von fossilen Flugkraftstoffen verfestigen.

DEKARBONISIERUNG DES LUFTVERKEHRS

Der Luftverkehr stellt aufgrund seiner technologischen und strukturellen Besonderheiten einen besonders schwer zu dekarbonisierenden Sektor dar. Er ist stark von fossilen Flugkraftstoffen abhängig und hat nur wenige Ausweichmöglichkeiten auf alternative Energiequellen, etwa Elektrifizierung. Hohe Kapitalkosten und strukturelle Marktzutrittsschranken führen in vielen globalen Luftverkehrsmärkten zu unvollständigem Wettbewerb. Begrenzte Flughafenskapazitäten, zugangskontrollierte Slots und hohe Flugzeugkosten schränken den Wettbewerb zusätzlich ein, sodass in der Regel nur wenige Fluggesellschaften auf einer bestimmten Strecke konkurrieren. Ohne grundlegende technologische Durchbrüche sind marktbasierende Instrumente und gezielte Anreize für Emissionsreduktionen und den Einsatz von SAF entscheidend, um die Dekarbonisierung effektiv und kosteneffizient voranzutreiben.

Es gibt aktuell verschiedene klimapolitische Maßnahmen, die darauf abzielen, die Emissionen des Luftverkehrs zu reduzieren. Wichtige Beispiele sind das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) und die EU SAF-Quote. Die einzige global ausgerichtete Maßnahme ist das Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA).

Das EU ETS deckt Flüge (mit Start- und Zielflughäfen) innerhalb Europas ab. Airlines müssen für jede ausgestoßene Tonne CO₂ ein Zertifikat halten. Aufgrund der sinkenden Obergrenze im EU ETS ist die Erwartung, dass ein steigender CO₂-Preis Emissionsreduktionen marktwirtschaftlich kostengünstig anreizt.

Die EU SAF-Quote wurde im Rahmen der ReFuelEU-Initiative eingeführt und gilt seit Januar 2025. Sie schreibt einen schrittweise steigenden Anteil von SAF für alle Flüge ab EU-Flughäfen, unabhängig vom Zielflughafen, vor und beschleunigt damit die Abkehr von fossilen Flugkraftstoffen. Als bisher einzige globale Initiative verpflichtet CORSIA Fluggesellschaften, Emissionen über 85 Prozent des Niveaus von 2019 auszugleichen. Ihre Wirksamkeit bleibt jedoch durch eine schwache Durchsetzung sowie durch die fragwürdige Klimawirkung vieler Offsets, mit aktuell überwiegend niedrigen CO₂-Offset-Preisen, begrenzt.

Dekarbonisierung des Luftverkehrs: Technologische und ökonomische Herausforderungen und Klimapolitik

Bestehende Maßnahmen sind stark auf Europa ausgerichtet

Das EU ETS gilt nur für Flüge innerhalb Europas

Eine erste globale marktbasierende Maßnahme: CORSIA

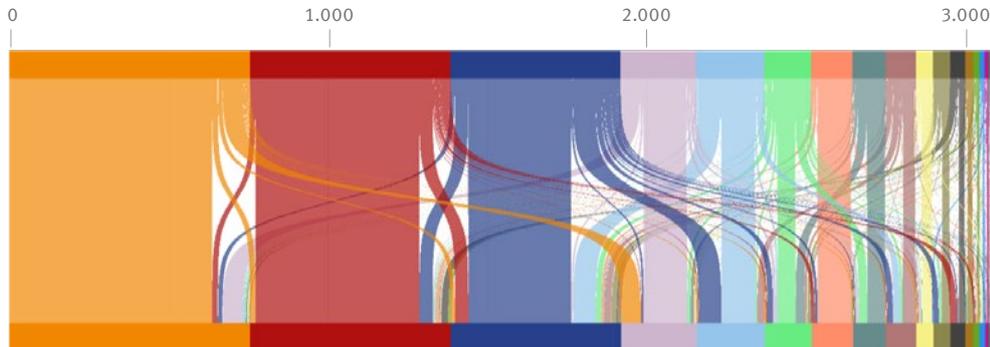
Globale klimapolitische Instrumente für den Luftverkehr

Eine neue ZEW-Studie untersucht, wie sich Klimapolitik auf Luftverkehrsemissionen, Ticketpreise und Wohlfahrt auswirkt. Hierzu werden ökonomische Theorie und quantitativ-empirische Simulationsanalysen kombiniert. Ein umfangreiches ökonomisches Modell der Luftverkehrsmärkte wird entwickelt, welches das weltweite Netzwerk von Hub- und Nicht-Hubflughäfen abbildet, in dem Full-Service-Network-Carriers (z.B. Lufthansa, Air France, United Airlines) und Billigfluggesellschaften (z.B. Ryanair, easyJet, Wizz Air) auf Direkt- und Umsteigeverbindungen miteinander unter unvollkommenen Wettbewerbsbedingungen konkurrieren. Die Fluggesellschaften wählen zwischen konventionellen Flugkraftstoffen (conventional jet fuels, CJF) und SAF und passen sowohl ihre Flugvolumina – und damit indirekt die Ticketpreise – als auch ihren Treibstoffmix an, um kosteneffizient auf Treibstoffpreise, die Nachfrage nach Transportdienstleistungen und unterschiedliche Klimaregulierung zu reagieren. Das Modell wird mit detaillierten Buchungsdaten zu Ticketpreisen und Passagierflüssen (auf Basis der SABRE-Daten) aus dem Jahr 2019 kalibriert, die 96 Prozent der weltweiten Flüge abdecken. Das Modell erlaubt somit zum ersten Mal eine volkswirtschaftliche Bewertung der globalen Markt- und Emissionseffekte verschiedener regulatorischer Ansätze zur Dekarbonisierung des Flugverkehrs. Der weltweite Flugverkehr konzentriert sich auf Ostasien, Nordamerika und Westeuropa, während Afrika und Zentralasien einen geringeren Anteil ausmachen (siehe Abbildung 1).

Ökonomisches Simulationsmodell der globalen Luftverkehrsmärkte

ABBILDUNG 1: MATRIX DER PASSAGIERSTRÖME ZWISCHEN HERKUNFTS- UND ZIELORTEN IN DEN REGIONEN

ANZAHL DER PASSAGIERE (MIO)



HERKUNFTS- ODER ZIELORT



Zwei klimapolitische Instrumente werden verglichen:

- » CO₂-Steuer: erhöht die Kosten für durch fossile Flugkraftstoffe ausgestoßene Emissionen und überlässt Airlines die Wahl, ob sie die Menge von Flügen anpassen oder (teilweise) CJF mit SAF substituieren.
- » SAF-Quote: verpflichtet Airlines dazu, einen vorgeschriebenen Anteil SAF (bezogen auf die insgesamt eingesetzte Kraftstoffmenge) zu verwenden.

**Zwei klimapolitische Maßnahmen:
Steuern vs. Vorschriften**

Ein Vergleich der globalen Varianten dieser beiden Formen der Klimaregulierung ergibt Folgendes: Unter Bedingungen des vollkommenen Wettbewerbs ist eine CO₂-Steuer das kostengünstigste Instrument, um eine gegebene Emissionsreduktion zu erreichen. Sie ermöglicht es den Fluggesellschaften, den effizienten Weg zur Emissionsminderung zu wählen (siehe Abbildung 2), sei es durch eine Verringerung der Passagierzahlen bzw. Menge der Flüge oder durch die (teilweise) Umstellung auf SAF. Die durchschnittlichen Wohlfahrtskosten pro vermiedener Tonne CO₂ sind niedriger als bei einer SAF-Quote. Eine SAF-Quote dagegen verpflichtet die Fluggesellschaften, einen bestimmten Mindestanteil an SAF einzusetzen. Diese Vorgabe beschränkt die Möglichkeiten zur kostengünstigen Emissionsreduktion über die Anpassung des Flugkraftstoffmixes und führt zu höheren Wohlfahrtskosten. Dies folgt der bekannten Logik, dass eine CO₂-Externalität volkswirtschaftlich kosteneffektiv über die direkte Bepreisung von CO₂-Emissionen in den Entscheidungen der Fluggesellschaften, Flugkraftstoffanbieter und Passagiere internalisiert wird. Wenn Fluggesellschaften ihre Transportdienstleistungen (Tickets) im unvollkommenen Wettbewerb anbieten, verändern sich die Ergebnisse grundlegend. Bereits ohne klimapolitische Maßnahmen liegt die angebotene bzw. nachgefragte Menge an Flügen aufgrund des unvollständigen Wettbewerbs deutlich unter dem Niveau eines vollkommenen Marktes und die Preise liegen deutlich darüber. Eine CO₂-Steuer, die weitgehend über höhere Ticketpreise an die Passagierinnen und Passagiere weitergegeben wird, erhöht die Preise und senkt die nachgefragte Menge zusätzlich. Dies führt zu hohen Wohlfahrtsverlusten.

Unter vollkommenen Wettbewerbsbedingungen ist die CO₂-Steuer die kosteneffektivste Klimapolitik

Im unvollkommenen Wettbewerb ist eine SAF-Quote einer CO₂-Steuer überlegen

Die Quote, die einen Anteil $x = \text{Menge SAF} / \text{Gesamtmenge Flugkraftstoffe}$ vorschreibt, wirkt im Gegensatz dazu wie eine implizite Steuer auf die Gesamtmenge der Flugkraftstoffe und wie eine implizite Subvention auf SAF. Diese implizite Subventionskomponente gleicht die durch den unvollkommenen Wettbewerb verursachte zu niedrige Menge an Flügen bzw. Passagieren teilweise aus und führt somit insgesamt zu niedrigeren Wohlfahrtskosten (siehe Abbildung 3).

Bei einer Emissionsminderung von 25 Prozent liegen die durchschnittlichen Wohlfahrtskosten mit einer SAF-Quote bei 480 EUR/tCO₂, rund 40 Prozent niedriger als unter einer globalen CO₂-Steuer. Die Ticketpreise steigen dabei nur um acht Prozent statt um 63 Prozent.

ABBILDUNG 2:
DURCHSCHNITTliche WOHLFAHRTSKOSTEN DER EMISSIONSMINDERUNG BEI VOLLKOMMENEM WETTBEWERB

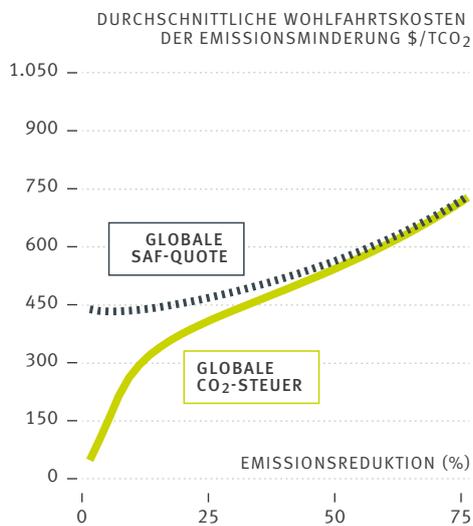
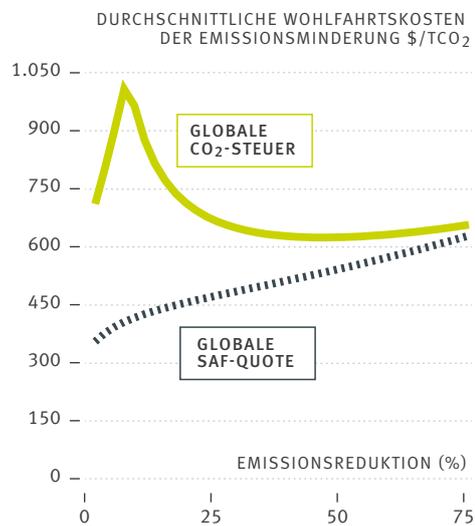


ABBILDUNG 3:
DURCHSCHNITTliche WOHLFAHRTSKOSTEN DER EMISSIONSMINDERUNG BEI UNVOLLKOMMENEM WETTBEWERB



Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Vernachlässigung von Marktmacht die Bewertung klimapolitischer Maßnahmen sowohl absolut als auch relativ stark verzerren kann. Bei einer CO₂-Steuer liegen die geschätzten Wohlfahrtskosten bei unvollkommenem Wettbewerb je nach Stringenz der Politik 1,6- bis 15,6-mal höher als unter Bedingungen vollkommenen Wettbewerbs.

EU-KLIMAPOLITIK IM LUFTVERKEHR

Selbst ambitionierte EU-Maßnahmen zeigen nur eine begrenzte Wirkung auf die globalen Luftverkehrsemissionen. Bis 2035 würden das EU ETS, die EU SAF-Quote oder ihre Kombination die weltweiten Emissionen um weniger als fünf Prozent senken:

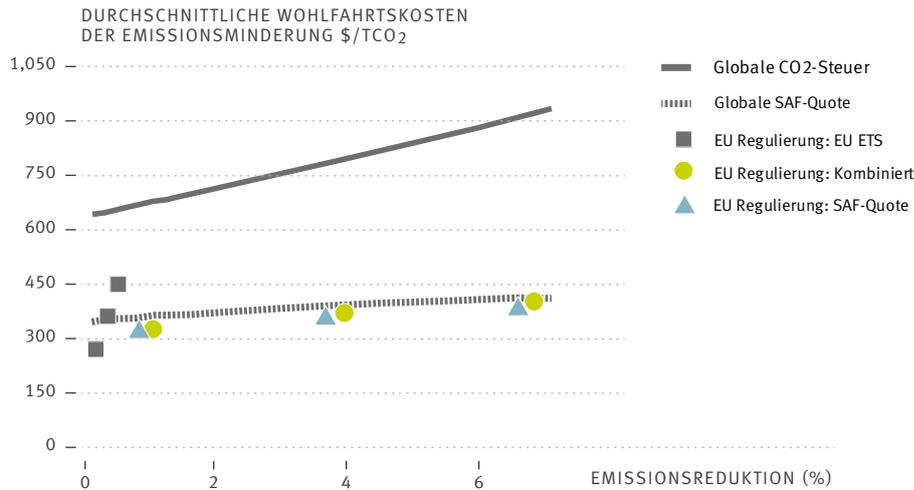
- » EU ETS (bei 200 EUR/tCO₂) erzielt lediglich eine globale Reduktion von 0,4 Prozent (Abbildung 4, dunkelgraues Quadrat)
- » EU SAF-Quote von 20 Prozent führt zu einer Verringerung um 3,8 Prozent (Abbildung 4, hellblaue Dreiecke)
- » Die Kombination beider Maßnahmen reduziert die Emissionen um 3,9 Prozent (Abbildung 4, grüner Kreis)

Begrenzte Auswirkungen der EU-Klimapolitik auf globale Luftverkehrsemissionen

Die Wohlfahrtskosten des EU ETS steigen mit stringenteren Emissionsreduktionszielen deutlich an. Dies liegt an dem regional begrenzten Geltungsbereich des EU ETS, das lediglich Flüge innerhalb der EU reguliert: Eine striktere Emissionsobergrenze wirkt sich daher stark auf die Kosten und Nachfrage innerhalb der EU aus und führt zu höheren Kosten im Vergleich zu globalen Maßnahmen mit einem breiteren Geltungsbereich.

Die Kosten des EU ETS steigen mit den Reduktionszielen stark an

ABBILDUNG 4: DURCHSCHNITTLICHE WOHLFAHRTSKOSTEN DER EMISSIONSMINDERUNG DURCH EU-KLIMAPOLITIK



Die relative Kosteneffektivität der klimapolitischen Instrumente (CO₂-Steuer vs. SAF-Quote) gilt auch für die Analyse der EU-Klimapolitik im Luftverkehrssektor. Im Lichte unvollkommener Wettbewerbsbedingungen erweist sich die EU SAF-Quote als kosteneffektiv gegenüber dem EU ETS. Ein CO₂-Preis von 100 EUR/tCO₂ im EU ETS würde die Ticketpreise für regulierte Flüge um etwa sechs Prozent erhöhen. Dagegen würde eine SAF-Quote von 20 Prozent, die eine neunmal höhere Emissionsreduktion bewirkt, die Ticketpreise um nur weniger als fünf Prozent steigen lassen. Seit 2012 wird der europäische Luftverkehr durch das EU ETS reguliert. Die Einführung der SAF-Quote im Jahr 2025 hat zu einer Überschneidung der beiden Maßnahmen geführt. Entgegen der gängigen Theorie dass überlappende Regulierung zu höheren Kosten führt, zeigt unsere Studie, dass diese Kombination unter Bedingungen unvollständigen Wettbewerbs zu besseren Ergebnissen führen kann. Dies ist auf die Kosteneffektivität der EU SAF-Quote zurückzuführen, die den Instrumentenmix neu ergänzt. Bis 2035 reduziert die Kombination beider Maßnahmen die Emissionen zu durchschnittlichen Wohlfahrtskosten von 377 EUR/tCO₂, während die Ticketpreise lediglich um zwölf Prozent steigen – deutlich weniger als bei einer Klimapolitik, die ausschließlich auf eine CO₂-Bepreisung über das EU ETS setzt.

Ergänzung des EU ETS durch die EU SAF-Quote erhöht Kosteneffizienz

TIEFGREIFENDE DEKARBONISIERUNG DES GLOBALEN LUFTVERKEHRS

Die Dekarbonisierung des Luftverkehrs ist bereits bei den aktuellen Passagierzahlen eine erhebliche Herausforderung. Das für die kommenden Jahre erwartete dynamische Wachstum verstärkt diesen Druck zusätzlich. Aufgrund der wachsenden globalen Mittelschicht und der fortschreitenden Globalisierung werden jährliche Zuwachsraten von 3,1 bis 4,0 Prozent erwartet, was bis 2050 zu einem Anstieg der Passagierzahlen um mindestens 143 Prozent führen dürfte.

Selbst bei global abgestimmten Klimamaßnahmen mit vollständiger weltweiter Abdeckung würde eine Stabilisierung der Emissionen auf dem Niveau von 2019 – wie im „Net-Zero-Growth“-Pfad vorgesehen – in diesem Szenario hohe Kosten verursachen:

- » Eine globale CO₂-Steuer von 856 EUR/tCO₂ würde zu durchschnittlichen Wohlfahrtskosten von 950 EUR/tCO₂ führen.
- » Eine globale SAF-Quote von 53 Prozent würde durchschnittliche Wohlfahrtskosten von 760 EUR/tCO₂ verursachen.

Unter beiden Maßnahmen würde der Einsatz von SAF erheblich steigen. Allerdings würde die Passagierfrage bei einer CO₂-Steuer stärker zurückgehen als bei einer SAF-Quote (minus 16 vs. minus elf Prozent).

Ein weiterer, der CO₂-Bepreisung verwandter Ansatz ist das internationale Kompensationssystem CORSIA. Entscheidend ist dabei die Frage, ob die im Rahmen von CORSIA verwendeten Offsets tatsächlich reale Emissionsreduktionen bewirken. Die Studie analysiert hierzu drei CORSIA-Szenarien, die jeweils in Kombination mit zukünftigen EU-Klimamaßnahmen im Luftverkehr betrachtet werden:

- » Wirksame CORSIA-Offsetting-Zertifikate: Es kommt zu tatsächlichen Emissionsreduktionen durch Offsets¹, der Preis der Zertifikate liegt bei 110 EUR/tCO₂. Dies führt zu durchschnittlichen Wohlfahrtskosten von 113 EUR/tCO₂, einem Emissionsrückgang von 65 Prozent und einer Nachfragereduktion von drei Prozent.
- » Unwirksame CORSIA-Offsets: Es erfolgen keine tatsächlichen Emissionsreduktionen durch die Ausgleichszahlungen. Die durchschnittlichen Wohlfahrtskosten steigen auf 505 EUR/tCO₂, die Emissionen sinken lediglich um 15 Prozent, und es bestehen sehr geringe Anreize für den Einsatz von SAF.
- » „CORSIA-Steuer“-Szenario: Die Offsets werden durch eine globale CO₂-Steuer für alle Flüge ersetzt, die nicht dem EU ETS unterliegen. Um ein Netto-Null-Wachstum (Reduktion um 59 Prozent) zu erreichen, wäre eine Steuer von 964 EUR/tCO₂ erforderlich, bei durchschnittlichen Wohlfahrtskosten von 858 EUR/tCO₂.

Wenn die Offsets keine realen Emissionsreduktionen bewirken, besteht die Gefahr, dass CORSIA den Sektor weiterhin an fossile Flugkraftstoffe bindet und eine Dekarbonisierung des Flugverkehrs verzögert.

Ist eine Dekarbonisierung bei steigenden Passagierzahlen möglich?

Zu welchen Kosten?

Was kann CORSIA als globale Maßnahme bewirken?

¹ Durch die Finanzierung externer Projekte, die CO₂ an anderer Stelle reduzieren oder beseitigen, werden Emissionen kompensiert, sodass Fluggesellschaften ihren Betrieb ohne direkte Emissionsminderung aufrechterhalten können.

FAZIT

Eine wirksame Klimapolitik im Luftverkehr muss sowohl den unvollkommenen Wettbewerb zwischen den Fluggesellschaften und die damit verbundene Marktmacht vieler Fluggesellschaften als auch die globalen Verflechtungen des Sektors berücksichtigen. Unter realistischen Wettbewerbsbedingungen erweist sich eine SAF-Quote als kosteneffektives Instrument, da sie nicht nur Emissionen reduziert, sondern gleichzeitig wettbewerbsbedingte Verzerrungen abmildert. Regionale Maßnahmen wie EU ETS und EU SAF-Quote leisten wichtige Beiträge, können jedoch die globale Dynamik des Luftverkehrs nur begrenzt beeinflussen.

Um die Dekarbonisierung des Sektors entscheidend voranzubringen, sind daher international wirksame Strategien und robuste Anreize zum Hochlauf nachhaltiger Flugkraftstoffe unverzichtbar. Eine zentrale Herausforderung bleibt die Glaubwürdigkeit globaler Maßnahmen: Wenn Offsetting-Programme wie CORSIA keine realen Emissionsminderungen erzielen, drohen Pfadabhängigkeiten, die die notwendige Transformation verzögern und die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen weiter verfestigen. Eine ambitionierte Weiterentwicklung globaler Regulierungsansätze, mit klaren Qualitätsstandards für Offsets und einem starken Fokus auf SAF, ist daher entscheidend, um das langfristige Ziel einer klimaneutralen Luftfahrt zu erreichen.

SAF-Quote als wirkungsvolles und kosteneffektives klimapolitisches Instrument zur Dekarbonisierung des Luftverkehrs

LITERATUR

Rausch Sebastian, Straubinger Anna (2025): Turbulence Ahead: Economic Policies for Decarbonizing Aviation, ZEW Discussion Paper Nr. 25-064, Mannheim.



Impressum

Autoren: Sebastian Rausch (ZEW, Universität Heidelberg), Anna Straubinger (ZEW), Mirko Hornung (Bauhaus Luftfahrt, TU München)

Herausgeber: ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung
L 7, 1 · 68161 Mannheim · Deutschland · info@zew.de · www.zew.de · x.com/zew

Präsident: Prof. Achim Wambach, PhD · Kaufmännische Geschäftsführerin: Claudia von Schuttenbach

Ansprechpartner in der Pressestelle: Bastian Thüne · presse@zew.de

Anmerkung zum Zitieren aus dem Text: Es ist gestattet, Auszüge aus dem Text in der Originalsprache zu zitieren, insofern diese durch eine Quellenangabe kenntlich gemacht werden.

© ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH Mannheim

ZEW

Leibniz
Leibniz
Gemeinschaft