



Klimawirksamkeit des Luftverkehrs – Berücksichtigung des Einflusses von Kondensstreifen

Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesminister für Digitales und Verkehr

Der internationale Luftverkehr wird trotz seines insgesamt geringen Anteils an den anthropogenen CO₂-Emissionen (2 % der weltweiten Gesamtemissionen entsprechend 1,2 Gt CO₂-eq nach IPCC-AR6 2023, die 3-5 % des anthropogenen Netto-Klimaantriebs entsprechen), als relevant für den individuellen ökologischen Fußabdruck eines Menschen eingestuft. Diese Beurteilung ist insofern bedeutsam, als dass sie – über die Effekte durch Covid-19 hinaus – zu einem deutlichen Rückgang im Luftverkehr führte, die allerdings nur temporär bis etwa zum Jahr 2021 wirkten. Seitdem ist auch in Deutschland wieder ein deutlicher Zuwachs im Luftverkehrsaufkommen festzustellen.

Die kritische Beurteilung des Luftverkehrs ist zudem dadurch begründet, dass durch die erheblichen Distanzen, die mit dem Flugzeug überwunden werden können, erhebliche absolute Mengen an Emissionen generiert werden. So kann ein einzelner Langstreckenflug die Bemühungen eines Menschen zunichtemachen, ein Jahr lang auf die Nutzung des PKW zugunsten des ÖPNV oder des Fahrrades auf kurzen Strecken im Stadtverkehr zur Senkung seines ökologischen Fußabdrucks zu verzichten. Auch ist festzuhalten, dass anders als die durch den Industriesektor erzeugten Emissionen jene des Luftverkehrs bis dato nur durch einen kleinen Teil aller Menschen verursacht werden.

Wie erwähnt, steigt der Verkehrsdurchsatz im Luftverkehr (Passagier und Fracht) seit 2022 wieder deutlich an, sodass in Deutschland im Jahr 2023 etwa 80% der Vor-Covid-19 Verkehrsleistung erreicht wurden (europäischer Durchschnitt: 96%). Die Lufthansa erholte sich wirtschaftlich rasch, zahlte die Einlagen 1 und 2 des Wirtschaftsstabilisierungsfonds bereits im Jahr 2021 zurück. Offensichtlich rückt neuerlich ins Bewusstsein, dass Luftverkehr eine globale physische Vernetzung der Menschen und damit Kulturen und Wirtschaften mit vertretbaren Reisezeiten zu verbinden erlaubt. Der Wissenschaftliche Beirat geht infolgedessen davon aus, dass der kommerzielle Luftverkehr in der Mobilität insbesondere

über weite Strecken auch langfristig eine tragende Rolle spielen wird.

Zunehmende Erkenntnis ist aber auch, dass die „wahre“ Klimawirksamkeit des Luftverkehrs noch nicht korrekt erfasst ist. In der laufenden Atmosphären- und Luftfahrtforschung lässt sich sicher feststellen, dass CO₂-Emissionen und jene, die bis dato in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt werden, den anthropogenen Beitrag des Luftverkehrs zur Klimaänderung nicht vollständig abbilden. Ursache ist die Verbrennung von Kerosin in Strahltriebwerken heutiger kommerziell genutzter Luftfahrzeuge, einem Gemisch verschiedener Kohlenstoff-/Wasserstoffmakromoleküle (typisch C₁₂H₂₆) in einer Flughöhe von 9-11 km dicht unterhalb der Tropopause. Bei stöchiometrischer, optimaler Verbrennung saugt ein im heutigen Luftverkehr häufig genutztes Triebwerk mit einem Nebenstromverhältnis von 9:1 ca. 500 t Luft pro Stunde im Reiseflug an und verbrennt dabei ca. 1,6 t Kraftstoff. Das Triebwerk verlassen in dieser Zeit 50.000 kg heiße Gase (Kerntriebwerk) und 450.000 kg kalte Luft (Nebenstrom). Davon sind ca. 5000 kg Kohlendioxid, 2000 kg Wasserdampf, 17 kg Stickoxide, 1,5 kg Schwefeldioxid, 1,2 kg Kohlenmonoxid, 0,2 kg Kohlenwasserstoffe und 0,05 kg Feinpartikel. Die spezifischen Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs resultieren also nicht nur aus dem reinen CO₂-Ausstoß, sondern ergeben sich auch aus weiteren vermutlich klimaverändernden Wirkungen durch Stickoxide, Ruß und eben auch Kondensstreifen und Zirruswolken, sog. Nicht-CO₂-bedingte Auswirkungen der Luftfahrt.

Inzwischen drängt auch die EU-Kommission ausgehend von ihrem Fit-für-55-Programm unter dem Dach des sog. Green Deals als auch dem weiteren Zwischenziel, 90% CO₂-Reduktion bis 2040 zu erreichen, auf Klärung der Frage, inwieweit die Emissionshöhe – im Reiseflug nahe der Tropopause und damit an den Grenzen des dynamischen Wettergeschehens liegend – besonderer Betrachtung bei der Beurteilung bedarf. Die bereits länger vorliegenden Erkenntnisse der Forschung, dass nicht nur wie bis dato die durch fossile, vollständige als auch unvollständige Verbrennung erzeugten Abgase über CO₂ und weitere verbrennungsbezogene Emissionen (in CO₂-Äquivalenten bemessen) für die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs zu berücksichtigen sind, dringen auch in die Politik: Die EU-Kommission wollte in 2023 einen Rahmen für die Überwachung, Meldung und Prüfung (MRV) Nicht-CO₂-bedingter Auswirkungen der Luftfahrt schaffen. Die Richtlinie 2003/87/EG wurden in diesem Sinne um eine Klausel zum Monitoring und Reporting derartiger Auswirkungen ergänzt (Artikel 14), die bis 08/2024 in eine Durchführungsverordnung

umgesetzt werden muss, um den Prozess durch die Luftfahrtunternehmen ab 2025 beginnen zu lassen.

Der Beitrag der Nicht-CO₂-bedingten Auswirkungen ist dabei sehr unterschiedlich; je nach Bezugszeitraum schwankt er von deutlich unter einem bis zu 30 Prozent. Bereits im Jahr 2001 wurde auf das Phänomen durch Luftverkehr induzierter künstlicher Bewölkung in Form von Zirren hingewiesen. Dies sind die bekannten und oft sichtbaren Kondensstreifen, in Englisch Condensation Trails oder kurz „Contrails“. Mittlerweile ist gesichert, dass eisübersättigte Gebiete, in welche die heißen Abgaspartikel der Triebwerke als Kondensationskeime eindringen, Kristallisation verursachen, die zur Bildung von Kondensstreifen führen können. Dieses Phänomen wird auch beim zukünftigen Einsatz von SAF (Sustainable Aviation Fuel), also Kraftstoff aus Biomasse oder PTL-Prozessen) nicht vollständig verschwinden, wenn auch durch den möglichen Entzug von Aromaten in SAF die Anzahl an Kristallisationskeimen statistisch gesenkt werden kann. Weiterführend konnte nachgewiesen werden, dass diese Wolken, wenn in größerer Menge und unter ungünstigen atmosphärischen Bedingungen persistent erzeugt, eine im Mittel dreistündige Lebensdauer aufweisen und damit eine Änderung des Strahlungsantriebs (Radiative Forcing, RF gemessen in W/m²) auf der Erde verursachen. Die Wirkung dieser den Nicht-CO₂-Emissionen zugeordneten Effekte wird seitdem intensiv beforscht.

Die Bundesregierung reagierte hierauf im Jahr 2022 mit der Gründung des „Arbeitskreis klimaneutrale Luftfahrt“ bestehend aus drei Arbeitsgruppen (AG), von denen sich AG3 mit „Effizientem Luftverkehr“ und hier auch mit möglichen quick wins beschäftigt, zu denen die Vermeidung von Kondensstreifen gehört, weil durch operative Eingriffe in die Flugtrajektorie direkt der Entstehung von Kondensstreifen entgegengewirkt werden kann. Grund hierfür ist das häufig schmale Höhenband mit nur wenigen 100 m vertikaler Ausdehnung, in dem starke Eisübersättigung, d.h. stark unterkühlter Wasserdampf, in der Atmosphäre (sog. Ice Super Saturated Regions, ISSR) gegeben ist. Üblicherweise sehen Vermeidungsstrategien das jeweilige Unterfliegen dieser Gebiete vor.

Hieraus leitet sich eine deutlich größere Komplexität bei der Ermittlung der Klimawirkung des Luftverkehrs ab. Dies gilt offensichtlich gleichermaßen für die Frage, ob bzw. wie ein Erreichen von Klimaneutralität im Luftverkehr möglich wird, denn das Unterfliegen der Luftschichten mit hoher Eisübersättigung hat auch Nachteile. So bedeutet Fliegen in geringerer Flughöhe i.d.R. eine

reduzierte Effizienz, also eine Steigerung des Kraftstoffverbrauchs und damit direkt auch der CO₂-Emissionen sowie der weiteren verbrennungsbezogenen Nicht-CO₂-Emissionen. Dieser relative Effekt wächst mit abnehmendem Fluggewicht und ist damit, der Massenabnahme des Luftfahrzeugs durch Kraftstoffverbrauch geschuldet, auf dem letzten Teil des Streckenflugsegments dominant. Die somit vorliegende negative Korrelation von potenzieller persistenter Kondensstreifenbildung und CO₂-Emissionen erfordert eine Anpassung der Flugtrajektorie, für deren Kostenabwägung sowohl chemisch-physikalische Zusammenhänge in der jeweiligen Flughöhe und -zeit als auch ordnungspolitische Komponenten zu berücksichtigen sind. Für eine Betrachtung des gesamten Fluges von Start- bis Zielort ergänzen sich sodann weitere Nicht-CO₂-Emissionsparameter (i.w. SOx, NOx) sowie Fluglärm im An- und insbesondere Abflug sowie die lokale Luftqualität in direkter Bodennähe um die genutzten Flugplätze, die z. B. durch (Ultra-)Feinstaub und Grobstaub – verursacht durch unverbrannten Kohlenwasserstoff – beeinträchtigt werden kann. Eine Anlastung der Emissionen an die Flugplatzunternehmen erfolgt hierbei jedoch bis dato nur innerhalb des sog. ICAO-Start-/Landezyklus (LTO) mit Ausnahme des Fluglärms, der anderweitig gesetzlich geregelt ist. Flugplätze sind in der Ratsempfehlung wohl auch deshalb bisher nicht thematisiert.

Im Juni 2023 wurde dem Verkehrsausschuss des Bundestags ein Sachstandsbericht des o.g. Arbeitskreises vorgelegt, in dem auf die Bedeutung von Nicht-CO₂ Emissionen hingewiesen wird, der jedoch noch keine Vorschläge zur Erhebungsmethodik enthält. Hier empfiehlt der Wissenschaftliche Beirat folgende methodische sowie ordnungspolitische Maßnahmen.

Methodisch:

- Die bis dato erfolgende Berechnung von Kondensstreifen für Verkehrsflüsse, d. h. strecken- oder luftraumspezifisch über den Zeitraum eines Tages akkumulierter Flüge, muss deutlich detaillierter auf Einzelflugebene in Entsprechung von 2003/87/EG erfolgen, die sodann räumlich zu aggregieren ist (landesspezifisch und ganz Europa). Zu beachten hierbei ist die Abhängigkeit der Klimawirksamkeit von Kondensstreifen nicht nur von der Höhe, sondern auch vom relativen Sonnenstandwinkel und damit der Uhrzeit, der Flugrichtung und der Lebensdauer, die auch auf der lokalen Turbulenz in der Atmosphäre beruht. All diese Variablen sind flugspezifisch und können nicht hinreichend präzise gemittelt auf Verkehrsflüssebene errechnet werden. Ist-Daten jedes Fluges liegen hierfür vor

und sollten genutzt werden. Ein entsprechendes Monitoring sollte aufgebaut und z. B. durch die Deutsche Flugsicherung betrieben werden. Ein zugehöriges Reporting über die Deutsche Emissionshandelsstelle DEHSt könnte mittels ordnungspolitischer Maßnahmen (s.u.) umgesetzt werden.

- Der Wertebereich dieser Parameter ist groß, so dass sich die Wirkung von Kondensstreifen auf die mittlere globale Temperatur am Boden (Absolute Global Temperature Change Potential, AGTP) gar im Vorzeichen umkehren kann. So können diese in wenigen Fällen und tagsüber (bei überwiegender Wirkung der Reflektion solarer, hochfrequenter Lichtwellen) gegenüber der Reflektion bis zur Extinktion terrestrischer (also vom Erdboden emittierter) Strahlung auch kühlend wirken. Eine Incentivierung diesbezüglich günstiger Flugzeiten im Rahmen des Emissionshandels, also in der Zuordnung von Emissionsgebühren zu einzelnen Flügen wird angeregt.
- Relevant sind zuvorderst Mittel-/Langstreckenflüge, da diese lange im Streckenflug und damit in großen Höhen nahe der Tropopause operieren. Somit ist hier die Wahrscheinlichkeit für den Durchflug eisübersättigter Gebiete grundsätzlich höher. Für eine effiziente Implementierung emissionsmindernder Flugrouten sowie die präzise Berechnung der Klimawirkung von Einzelflügen braucht es möglichst großflächig kontrollierter Lufträume wie sie als Funktionale Luftraumblöcke (FAB) in Europa etabliert sind. Der Wissenschaftliche Beirat empfiehlt die politische Unterstützung des in Bezug auf Effizienz zunehmend in die Kritik geratenen FAB-Konzeptes auch unter diesem Gesichtspunkt.
- Erfassung aller potenziellen persistenten Kondensstreifen: Zur Ermittlung der Nicht-CO₂-Klimawirkung müssen alle Kondensstreifen im Luftraumsegment berücksichtigt werden. Da sich Kondensstreifen thermodynamisch betrachtet gegenseitig beeinflussen, ist diese Akkumulationsrechnung nichtlinear und damit komplex zum effektiven Strahlungsantrieb (effective RF, eRF) zu überführen. Auch dies unterstreicht das Gebot von Berechnungen auf Einzelflugebene. Die Bereitstellung weiter verbesserter, verlässlicher und möglichst hoch aufgelöster Wetterdaten, insbesondere Feuchtedaten der Atmosphäre, sollte durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) in Abstimmung mit der World Meteorological Organization (WMO) sowie insitu Beobachtungen mittels Sensorinstallationen direkt am

Luftfahrzeug durch den Verkehrsminister vorangetrieben werden.

Ordnungspolitisch:

- Weder EU ETS noch CORSIA berücksichtigen bis dato Nicht-CO₂-Emissionen in der Verkehrsleistungsbewertung. Der Wissenschaftliche Beirat plädiert für eine entsprechende Erweiterung der Bewertungsgrößen und deren Kennzahlen für den Verkehrssektor.
- Die Erhebungsmethodik sollte transparent und uniform für ganz Europa, zunächst pro Land mit der Möglichkeit der o.g. weiteren Aggregation erfolgen. Hierzu sollten die etablierten Emissionsberechnungssysteme erweitert werden, wie sie für durch kommerziellen Luftverkehr verursachte CO₂- und weitere verbrennungsinduzierte Nicht-CO₂-Emissionen seit 2016 bei der Deutschen Flugsicherung im Einsatz sind. Damit wäre eine verbesserte Beurteilung der Klimawirkung des Luftverkehrs möglich und die Anwendung geeigneter Minderungsstrategien durch die Luftraumnutzer im Rahmen der Flugplanung sowie operativ durch die Flugsicherung möglich.
- Die Umrechnung des effektiven, um die aktuelle Wettersituation bereinigten Strahlungsantriebes in ein CO₂-Äquivalent sollte auf Einzelflugebene standardisiert umgesetzt werden, um eine transparente Bewertung für Kostenabwägungen bei der Trajektorienbestimmung für alle Luftraumnutzer gleichermaßen zu gewährleisten. Hierbei ist der gewählte Bezugszeitraum sehr sensitiv und damit sorgfältig zu wählen. Der Wissenschaftliche Beirat sieht den über 20 Jahre akkumulierten Temperaturänderungseffekt (AGTP20) als guten Kandidaten an, um gesellschaftliche Praktikabilität (innerhalb eines Menschenlebens) und die verschiedenen Verweilzeiten von Kondensstreifen und Emissionen sachgerecht zu berücksichtigen. Damit befände sich die Bewertung auch im gewählten Bewertungsbereich nach IPPC von 1 bis 100 Jahren.
- Zudem sollte auf diesem Wege ein ordnungspolitischer Konsens über die Frage der „Optimalität“ für Trajektorien gefunden werden. Erst dann ist es möglich, eine objektive Bewertung einzelner Verkehrssteuerungseinheiten sowie einzelner Luftraumnutzer vorzunehmen.
- Hierbei ist auch der Bewertung von Nicht-CO₂-Emissionen weiteres Augenmerk zu widmen: Aktuelle Leistungskennzahlen sollten von rein CO₂-emissionsorientierten, zweidimensionalen Metriken (z. B. Horizontal Flight Efficiency – HFE, Vertical Flight Efficiency – VFE) durch dreidimensionale Metriken

ersetzt werden, da Vertikal- und Horizontalprofiloptimierung gekoppelt sind. Zudem sollten Wetterparameter in die Leistungsrechnung integriert werden (Wind, Temperatur, Luftdruck, Feuchtedaten der Atmosphäre), da diese die Ergebnisse erheblich beeinflussen und insofern bis dato die Vergleichbarkeit stark begrenzt ist.

Der Wissenschaftliche Beirat ist überzeugt, dass die aufgezeigten Maßnahmen erforderlich sind, um die richtigen Anreize für Luftraumnutzer, die Flugsicherungen in Deutschland bzw. im FAB-EC, in dem Deutschland Mitglied ist, und darüber hinaus europaweit sowie für den Europäischen Network Manager zur Erreichung der erklärten Klimaziele zu setzen. Die mit diesen Maßnahmen verbundene internationale Perspektive ist dabei unbedingt im Blick zu behalten, um die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands im Luftverkehr zu wahren. ■

Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesminister für Digitales und Verkehr

Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein	Aachen
Prof. Dr.-Ing. Hannes Federrath	Hamburg
Prof. Dr.-Ing. Hartmut Fricke	Dresden
Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich	Stuttgart
Prof. Dr. Astrid Günemann	Wien
Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Dietrich Haas	Bremen
Prof. Dr.-Ing. Evi Hartmann	Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Carlos Jahn	Hamburg
Prof. Dr. Meike Jipp	Berlin
Prof. Dr. Natalia Kliewer	Berlin
Prof. Dr. Matthias Knauff	Jena
Prof. Dr. Dr. h.c. Andreas Knorr	Speyer
Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin	Stuttgart
Prof. Dr. Kay Mitusch	Karlsruhe
Prof. Dr. Stefan Oeter	Hamburg
Prof. Dr. Tibor Petzoldt	Dresden
Prof. Dr.-Ing. Stefan Siedentop	Dortmund
Prof. Dr. Gernot Sieg (Vorsitzender)	Münster
Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch	Karlsruhe

Eingangsbildung: © iStock.com/Alberto Masnovo