

CLIMATE CHANGE

28/2024

Abschlussbericht

Umsetzung der Clusterung in TREMOD

von:

Florian Wozny, Janina Scheelhaase
DLR Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr, Köln

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 28/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 42 502 0
FB001292

Abschlussbericht

Umsetzung der Clusterung in TREMOD

von

Florian Wozny, Janina Scheelhaase

DLR Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr, Köln

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

DLR Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr
Linder Höhe
51147 Köln

Abschlussdatum:

Mai 2022

Redaktion:

Fachgebiet V 3.6 Luftverkehr
Kay Köhler

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juli 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Umsetzung der Clusterung in TREMOD

Das Emissionsberechnungsmodell „TREMOD“ (Transport Emission Model) des Umweltbundesamtes ermöglicht über das Modul TREMOD-AV eine Abschätzung der jährlichen deutschen Luftverkehrsemissionen und deren Klimawirkung. Dieser Bericht beschreibt ein Anwendungskonzept, mithilfe dessen sich die Erkenntnisse der Clusteranalyse des Projekts 3720 42 502 0 "Untersuchung der praktischen Umsetzung der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten des Luftverkehrs in das EU-ETS einschließlich Clusteranalyse" in TREMOD-AV integrieren lassen, um die Klimawirkung in TREMOD-AV genauer zu bestimmen. Zunächst werden hierfür die aktuelle Datengrundlage und Methodik von TREMOD-AV dargestellt. Nachfolgend werden notwendige Anpassungen erläutert, um ein realistischeres Abbild der Klimawirkung deutscher Luftverkehrsemissionen zu erhalten. Des Weiteren werden die Herausforderungen einer solchen Anpassung beschrieben.

Abstract: Implementing Clustering in TREMOD

The emission calculation model "TREMOD" (Transport Emission Model) of the German Environment Agency estimates the annual German air traffic emissions and their climate impact via the module TREMOD-AV. This report presents an application concept, with the help of which the findings of the cluster analysis of the project 3720 42 502 0 "Untersuchung der praktischen Umsetzung der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten des Luftverkehrs in das EU-ETS einschließlich Clusteranalyse" can be integrated into TREMOD-AV in order to determine the climate impact in TREMOD-AV more precisely. First, the current data basis and methodology of TREMOD-AV are presented. Subsequently, necessary adjustments are explained in order to obtain a more realistic picture of the climate impact of German air traffic emissions. Furthermore, the challenges of such an adjustment are described.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	7
2	Derzeitige Datengrundlage und Methode	8
3	Anwendungskonzept	9
4	Fazit	12
5	Literaturverzeichnis	13

1 Ausgangslage

Das Emissionsberechnungsmodell „TREMOD“ (Transport Emission Model) des Umweltbundesamtes ermöglicht über das Modul TREMOD-AV eine Abschätzung der jährlichen deutschen Luftverkehrsemissionen und deren Klimawirkung (Knörr et al. 2012). Der nachfolgende Bericht beschreibt ein Anwendungskonzept, mithilfe dessen die Klimawirkung in TREMOD-AV durch die Erkenntnisse der Clusteranalyse des Projekts 3720 42 502 0 "Untersuchung der praktischen Umsetzung der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten des Luftverkehrs in das EU-ETS einschließlich Clusteranalyse" genauer bestimmt werden kann.

Die Klimawirkung von Luftverkehrsemissionen ist vergleichsweise komplex. Sie ergibt sich aus der Emission des Treibhausgases CO₂ und den Nicht-CO₂-Effekten - vor allem durch die Emission von Stickoxiden und Wasserdampf in hohen Luftschichten (Lee et al. 2009). CO₂-Emissionen haben eine ortonabhängige Klimawirkung, welche sich direkt aus dem Treibstoffverbrauch errechnen lässt. Bei der Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte sind die aktuellen Bedingungen am Emissionsort relevant, weshalb zusätzliche Parameter neben dem Treibstoffverbrauch benötigt werden (Dahlmann et al. 2021). Eine möglichst genaue Bestimmung der klimawirksamen Emissionsbestandteile des Luftverkehrs ist wichtig, da es ansonsten zu Fehlanreizen kommen kann, wenn zum Beispiel Flugzeugantriebe entwickelt werden, die CO₂ reduzieren, dabei aber gleichzeitig den Stickoxidausstoß erhöhen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der hohen Wachstumsraten des Luftverkehrssektors relevant, wodurch sein Anteil an den weltweiten Gesamtemissionen kontinuierlich steigt (Cames et al. 2015).

Die CO₂-Emissionen der deutschen Luftverkehrsemissionen können durch TREMOD-AV mithilfe von differenzierten Verkehrsdaten relativ genau bestimmt werden. Die Nicht-CO₂-Effekte der Luftverkehrsemissionen werden bisher mit einem allgemeinen Zuschlagsfaktor abgebildet. Eine solche Approximation kann unter Umständen jedoch sehr ungenau sein (Forster et al. 2006). Konkret bedeutet die Anwendung eines allgemeinen Zuschlagsfaktors, dass die einzelflugspezifischen Klimaeffekte nicht hinreichend berücksichtigt werden, für deren Berechnung nicht nur die Emissionen der Luftfahrzeuge, sondern auch die Hintergrundbedingungen von unterschiedlichen Klimazonen, Winden und Wetter benötigt werden. Die im Folgenden näher erläuterte Clusteranalyse bietet eine flugzeugtypenspezifische und flugroutengenaue Bestimmung von Nicht-CO₂-Effekten und somit notwendige Informationen, um die Klimawirkung in TREMOD-AV realistischer zu berechnen.

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden ein Anwendungskonzept beschrieben, mithilfe dessen sich die Erkenntnisse der Clusteranalyse in TREMOD-AV integrieren lassen. Zunächst werden hierfür die aktuelle Datengrundlage und Methodik von TREMOD-AV dargestellt. Nachfolgend werden notwendige Anpassungen erläutert, um ein realistischeres Abbild der Klimawirkung deutscher Luftverkehrsemissionen zu erhalten. Des Weiteren werden die Herausforderungen einer solchen Anpassung beschrieben.

2 Derzeitige Datengrundlage und Methode

TREMOD-AV wurde mit dem Ziel entwickelt, der Emissionsberichterstattung der Quellgruppe 1.A.3.a Ziviler Luftverkehr gerecht zu werden, zu der sich Deutschland als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention und der Genfer Luftreinhalte-Protokolle verpflichtet hat. Die Basis der geforderten Berichterstattung stellt die in Deutschland getankte Kraftstoffmenge im Luftverkehr dar. Diese ist jedoch nicht, wie gefordert, nach nationalem und internationalem Flugverkehr differenziert, weshalb eine Aufteilung anhand der in TREMOD-AV ermittelten Verbräuche erfolgt. Aus diesem Grund ist in TREMOD-AV der von Deutschland abgehende Flugverkehr Grundlage der Emissionsberechnungen, da dieser die in Deutschland getankten Kraftstoffmengen am besten abbildet (Knörr et al. 2012). Somit unterliegt die in TREMOD-AV ermittelte Emissionsmenge und die daraus berechnete Klimawirkung einer engen Definition. Emissionen von internationalen Flügen mit dem Ziel Deutschland finden in diesem Modell keine Beachtung.

Verkehrsdaten sind die Grundlage für die Verbrauchs- und Emissionsberechnung in TREMOD-AV. Die Verbrauchs- und Emissionsberechnung erfolgt flugzeugtypenspezifisch auf Basis der Anzahl geflogener Distanzklassen ab Deutschland und bilden den nationalen und internationalen Personen- und Güterverkehr ab. Die Verkehrsdaten werden von DESTATIS für deutsche Hauptverkehrsflughäfen in einer Sonderauswertung der Fachserie 8 Reihen 6.1 seit 1990 jährlich zur Verfügung gestellt. Ergänzt wird der nicht-gewerbliche Flugverkehr und der gewerbliche Flugverkehr auf den sonstigen Flugplätzen über die Fachserie 8 Reihe 6.2.

Diese Daten enthalten für nationale und internationale Flüge die Anzahl der Starts und Passagiere sowie die transportierte Gütermenge. Die Distanzklassen sind hierbei durch die Großkreismethode zwischen Start- und Zielflughäfen definiert. In der Realität sind die zurückgelegten Distanzen jedoch länger, da Flugrouten nicht zwangsläufig der kürzesten Distanz folgen und außerplanmäßige Umwege und Warteschleifen auftreten. Dies wird bei der Berechnung der Emissionen mit Hilfe eines Umwegefaktors berücksichtigt.

Zur Emissionsbestimmung des Flugverkehrs wird in TREMOD-AV auf flugzeugtypenspezifische Emissionskennzahlen zurückgegriffen, welche flugphasen- und distanzabhängig sind. Bilanziert werden bisher die Emissionskomponenten Black Carbon, Benzol, CH₄, CO, CO₂, CO₂-Äquivalente, HC, N₂O, NH₃, NMHC, NO_x, Partikel, SO₂, Toluol und Xylol. Der Energieverbrauch und die Emissionen werden überwiegend mit den Kennzahlen der EMEP/EEA berechnet, die in der Differenzierung nach Flugzeugtypen und Flugphasen vorliegen. Jedem Flugzeugtyp der DESTATIS-Verkehrsdatenbank wird ein Set an Emissionsfaktoren zugeordnet. Fehlende Werte werden zum Teil anhand passender Vergleichsgruppen übernommen oder es wird auf andere Datenbanken (ICAO Turbinendatenbank, Datenbank der FOCA) zurückgegriffen. Zudem werden die auf den Flughäfen sehr unterschiedlichen Taxi-Zeiten über Statistiken von EUROCONTROL und DESTATIS berücksichtigt. Um den Nicht-CO₂-Effekt auf das Klima abzubilden, werden die CO₂-Emissionen auf Grundlage der Information über die Flugphasen mithilfe eines pauschalen Multiplikators von 2,4 oberhalb einer Flughöhe von 9 km multipliziert.

Die zusammengefassten Werte des Flugverkehrs werden anschließend in das TREMOD-Gesamtmodell überführt, wo sie für die Emissionsberichterstattung aufbereitet werden. Zusätzlich ist es möglich Flugverkehrsszenarien zu berechnen. Die Szenarien basieren auf Annahmen zur Verkehrsleistungsentwicklung, Flottenentwicklung und Auslastung. Aktuell können Szenarien bis zum Jahr 2050 berechnet und als Ergebnis in der gleichen Struktur wie die Realdaten dargestellt werden (Knörr et al. 2012).

3 Anwendungskonzept

Im Folgenden wird auf Basis der im Projekt 3720 42 502 0 "Untersuchung der praktischen Umsetzung der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten des Luftverkehrs in das EU-ETS einschließlich Clusteranalyse" durchgeführten Clusteranalyse, ein Anwendungskonzept zur realistischeren Abbildung von Nicht-CO₂-Effekten in TREMOD-AV entwickelt. Die Clusteranalyse dient als Berechnungsmethode zur Abschätzung von Nicht-CO₂-Effekten des Luftverkehrs. Da die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte stark von der geografischen Breite und der Flughöhe abhängt, können vergleichbare Flüge in den mittleren Breiten zu einer anderen Klimawirkung führen als in den Tropen, zum Beispiel durch unterschiedliche photochemische Prozesse der Sonneneinstrahlung (Dahlmann et al. 2021). Um diese Problematik bestmöglich in der Clusteranalyse zu berücksichtigen, wurden die einzelnen weltweit stattfindenden Flugverbindungen differenziert nach Flugzeugtyp und Flugregion, hinsichtlich ihrer Klimawirkung in einzelne Regionen kategorisiert.

Die Berechnung erfolgt unter Rückgriff realer Flugverbindungen aus dem Jahr 2012 mit 47.057 Flughafensaaren und 30,9 Millionen Flügen, die 95% der weltweiten angebotenen Sitzplatzkilometer abbilden, dessen Flug- und Emissionsprofil realitätsnah simuliert wird. Die Klimawirkung eines Fluges wird dann mit Hilfe des Klimamodells AirClim berechnet. Hierdurch ist es möglich, die Ortsabhängigkeit der Nicht-CO₂-Effekte abzubilden. Außerdem werden fünf verschiedene Flugzeuggrößen berücksichtigt, um den von ihnen verursachten Emissionszusammensetzungen gerecht zu werden. Das hieraus gebildeten Emissionskataster weltweiter Flugverbindungen mit simulierten Flugleistungsinformationen wie zum Beispiel Flugdistanz, Flughöhe, Kraftstoffverbrauch und Emissionsmengen stellt die Grundlage der Clusteranalyse dar. Im Ergebnis liefert die Clusteranalyse eine Funktion, welche in Abhängigkeit von Flugdistanz, Flugzeugtyp und der mittleren Breite von Abflug- und Zielflughafen für NO_x, Kondensstreifen und H₂O die CO₂-Äquivalente erstellt.

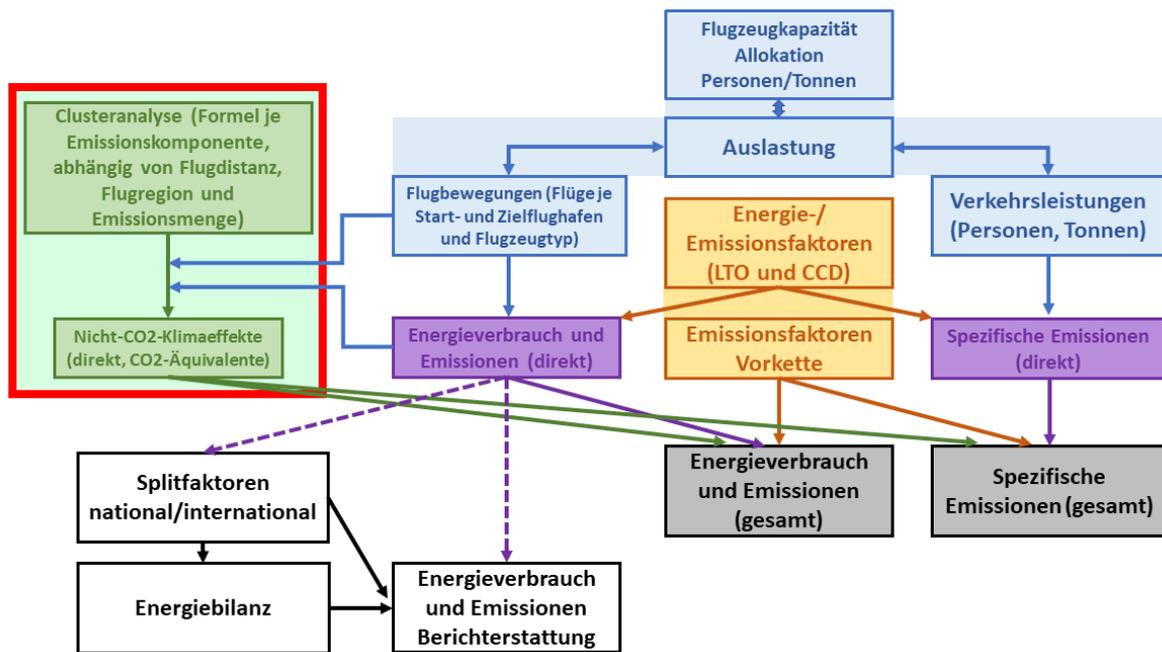
Das bisherige Verkehrsmengengerüst von TREMOD-AV, basierend auf der Anzahl der Flüge nach Distanzklassen und Flugzeugtypen, muss somit um die Informationen zu Flugrelationen erweitert werden. Die Sonderauswertung von DESTATIS kann um diese Information ergänzt werden. Ob auch rückwirkend die Flugrouten ergänzt werden können, ist bei DESTATIS noch zu erfragen. Da die Datenmenge und der Rechenaufwand hierdurch erheblich steigen werden und technische Engpässe bei Access (aktuell für TREMOD verwendete Plattform) zu erwarten sind, ist eine Integration bzw. Umsetzung in TREMOD-AV zu prüfen. An dieser Stelle wäre jedoch darauf zu achten, dass sich die Kategorisierung der Flugzeugtypen zwischen der Clusteranalyse und den DESTATIS-Daten unterscheidet und sie deshalb angepasst werden müssen. Während sich die DESTATIS-Daten am Flugzeugtyp orientieren, erfolgt die Kategorisierung in der Clusteranalyse anhand der Sitzplätze. Eine Eingruppierung von Flugzeugtypen in Sitzklassen sollte jedoch kein Hindernis darstellen.

Eine andere geeignete Datenquelle wären Flugpläne, welche alle weltweiten Flugverbindungen des zivilen Personenluftverkehrs detailliert auf der Start-/Ziel-Ebene abbilden und Informationen zu dem verwendeten Flugzeugtyp liefern. Ähnlich wie bei den DESTATIS-Daten, müsste eine Einteilung der Flugzeugtypen in die Anzahl der Sitzplätze auch hier vorgenommen werden. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich um Flugplandaten handelt, die somit die geplanten und nicht

die tatsächlichen Verkehrsleistungen abbilden. Dies kann zu Messfehlern der Verkehrsleistung führen, wenn geplante Flüge nicht stattfinden, wodurch der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen überschätzt werden. Außerdem sind in der Regel keine Informationen zum Frachtverkehr vorhanden. Weitere geeignete Datenquellen sollten deshalb geprüft werden. Womöglich bietet sich auch eine Kombination unterschiedlicher Datenquellen an. Generell sollte jedoch darauf geachtet werden, dass eine Vergleichbarkeit mit aktuellen Emissions- und Verbrauchswerten von TREMOD-AV gewährleistet ist, um Zeitreihen fortführen zu können. Je stärker sich die Struktur neuer Daten von den bisherigen Daten unterscheidet, desto schwerer ist dies umzusetzen. Zusätzlich müssen die aktuellen Daten zeitnah zur Verfügung stehen, um den Berichtsanforderungen gerecht zu werden. Generell sollte zwischen der kontinuierlichen Funktionalität von TREMOD-AV und einer Genauigkeitssteigerung der Abbildung des Klimaeffekts abgewogen werden. Wenn für kleine Teilbereiche, wie zum Beispiel dem Frachtverkehr, keine entsprechenden relationsbezogenen Daten zur Verfügung stehen sollten, dann könnte an dieser Stelle ein allgemeiner Multiplikator verwendet werden, während im Teilbereich Personenverkehr flugrelationspezifische Klimaeffekte Berücksichtigung finden.

Eine Erweiterung des Verkehrsmengengerüsts um relationsbezogene Informationen erhöht die Datenmenge, welche unter Umständen mit der bestehenden Softwarearchitektur nicht verarbeitet werden kann. Es kann somit sinnvoll sein, dass Teile von TREMOD-AV neu programmiert werden, oder eine Vorverarbeitung der Eingangsdaten in einem leistungsfähigeren Softwareumfeld stattfindet und die Daten erst dann Eingang in TREMOD-AV finden. Eine vollständige Neuentwicklung von TREMOD-AV erscheint jedoch nicht notwendig, da die Funktionsweise der Clusteranalyse im Ergebnis sehr gut auf die Funktionsweise von TREMOD-AV abgestimmt ist. Dies spricht eher dafür, ein integriertes Modell zu erstellen und nicht mit definierten Schnittstellen zwischen Clustermodell und TREMOD zu arbeiten. Es bietet sich somit an, die Verkehrsleistungs- sowie die Emissionsberechnung wie gehabt in TREMOD-AV distanz- und flugzeugtypenspezifisch zu berechnen. Zusätzlich können sodann die flugrelationspezifischen und flugzeugtypenspezifisch Nicht-CO₂-Effekte berechnet und aggregiert werden. Danach fließen diese in die Berechnung der Klimawirkung als CO₂-Äquivalente mit ein. Es bietet sich an, im Anschluss die Differenz zwischen neuer und alter Berechnungsmethode der Nicht-CO₂-Effekte zu dokumentieren, um die Relevanz der Berechnung granularer Klimaeffekte für aggregierte Ergebnisse zu bestimmen. In der nachfolgenden Abbildung wird eine Integration der Clusteranalyse (roter Kasten) in die vorhandene Struktur von TREMOD-AV dargestellt.

Abbildung 1: Integration der Clusteranalyse in TREMOD-AV



Quelle: DLR Institut für Flughafenwesen und Luftverkehr, Institut für Energie- und Umweltforschung

4 Fazit

Der vorliegende Bericht beschreibt ein Anwendungskonzept zur realistischeren Abbildung von Nicht-CO₂-Effekten in TREMOD-AV. Mithilfe von differenzierten Verkehrsdaten können CO₂-Effekte in TREMOD-AV relativ genau bestimmt werden. Die Nicht-CO₂-Effekte der Luftverkehrsemissionen werden bisher mit einem allgemeinen Zuschlagsfaktor abgebildet. Die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte hängt jedoch stark von der geografischen Breite und der Flughöhe ab. Vergleichbare Flüge können in den mittleren Breiten zu einer anderen Klimawirkung führen als in den Tropen.

Die Clusteranalyse des Projekts 3720 42 502 0 "Untersuchung der praktischen Umsetzung der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten des Luftverkehrs in das EU-ETS einschließlich Clusteranalyse" stellt dem Umweltbundesamt eine Berechnungsmethodik zur Abschätzung von Nicht-CO₂-Klimaeffekten des deutschen Luftverkehrs bereit. Grundlage hierfür sind reale Flugverbindungen aus dem Jahr 2012, die 95% der weltweiten angebotenen Sitzplatzkilometer abbilden, deren Flug- und Emissionsprofil simuliert wird. Die Klimawirkung eines Fluges wird dann anhand eines Klimamodells berechnet. Im Ergebnis liefert die Clusteranalyse eine Funktion, welche in Abhängigkeit von Flugdistanz, Flugzeugtyp und der mittleren Breite von Abflug- und Zielflughafen für NO_x, Kondensstreifen und H₂O die CO₂-Äquivalente erstellt.

Für eine realistischere Abbildung von Nicht-CO₂-Effekten lassen sich die Ergebnisse der Clusteranalyse in TREMOD-AV integrieren. Bisher basiert TREMOD-AV auf einem Verkehrsmengengerüst, welches mit der Anzahl von Flügen nach Distanzklassen und Flugzeugtypen arbeitet. Zur Integration der Funktion der Clusteranalyse muss die Datenbasis somit um die Informationen zu Flugrelationen erweitert werden. Grundsätzlich ist die Funktionsweise der Clusteranalyse jedoch sehr gut auf die Anforderungen von TREMOD-AV abgestimmt, weshalb eine Umsetzung trotz beschriebener Herausforderungen methodisch gut möglich sein sollte. Die Differenzen zwischen neuer und alter Berechnungsmethode sollten dokumentiert werden, um die Relevanz der relationsbezogenen Klimaeffekte für aggregierte Ergebnisse zu bestimmen.

5 Literaturverzeichnis

Knörr, W. & Schacht, A. & Gores, S. (2012). Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs –TREMODO AV. Umweltbundesamt.

Dahlmann, K., Grewe, V., Matthes, S., & Yamashita, H. (2021). Climate assessment of single flights: Deduction of route specific equivalent CO₂ emissions. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1-12.

Cames, M., Graichen, J., Siemons, A., & Cook, V. (2015). Emission reduction targets for international aviation and shipping. Policy Department A: Economic and Scientific Policy, European Parliament, B-1047 Brussels.

Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., Owen, B., & Sausen, R. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43(22), 3520–3537.

Forster, P. M. d. F., Shine, K. P., & Stuber, N. (2006). It is premature to include non-CO₂ effects of aviation in emission trading schemes. *Atmospheric Environment*, 40(6), 1117–1121.