

TEXTE

153/2024

Abschlussbericht

Weiterentwicklung TREMOD – Clustermodell Flugverkehr

Integration von Nicht-CO2-Effekten in TREMOD-AV

von:

Michel Allekotte, Jan Kräck, Wolfram Knörr
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg

Florian Wozny

DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Institut für Luftverkehr, Köln

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 153/2024

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

Forschungskennzahl 3721 57 104 0
FB001501

Abschlussbericht

Weiterentwicklung TREMOD – Clustermodell Flugverkehr

Integration von Nicht-CO₂-Effekten in TREMOD-AV

von

Michel Allekotte, Jan Kräck, Wolfram Knörr
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
gGmbH, Heidelberg

Florian Wozny
DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für 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:

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Luftverkehr
Linder Höhe
51147 Köln

Abschlussdatum:

Mai 2024

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Gunnar Gohlisch

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, November 2024

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

Kurzbeschreibung: Weiterentwicklung TREMOD – Clustermodell Flugverkehr

Die Klimawirkung des Luftverkehrs entsteht durch Treibhausgasemissionen, besonders CO₂, und durch Nicht-CO₂-Effekte hervorgerufen durch Emissionen von Stickoxiden, Wasserdampf und Partikeln in hohen Luftschichten. CO₂-Emissionen und deren Klimawirkung können direkt aus dem Treibstoffverbrauch berechnet werden. Die Klimawirkungen der Nicht-CO₂-Effekte sind komplizierter zu ermitteln, da sie je nach Emissionsort und Umgebungsbedingungen variieren. Im Durchschnitt machen die Nicht-CO₂-Effekte ca. 66 % der Gesamtklimawirkung des weltweiten Luftverkehrs aus (Lee et al. 2023).

Ziel des hier vorliegenden Projekts „Weiterentwicklung TREMOD – Clustermodell Flugverkehr“ ist es, eine genauere Erfassung der Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte des Flugverkehrs in TREMOD-AV zu ermöglichen. Das Emissionsberechnungsmodell TREMOD (Transport Emission Model) des Umweltbundesamts ermöglicht über das Modul TREMOD-AV eine Abschätzung der jährlichen deutschen Luftverkehrsemissionen und deren Klimawirkung.

Die verbesserte Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte erfolgt auf Basis des Clustermodells aus dem Projekt 3720 42 502 0 „Untersuchung der praktischen Umsetzung der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten des Luftverkehrs in das EU-ETS einschließlich Clusteranalyse“. Die Integration des Clustermodells verbessert die Genauigkeit der Nicht-CO₂-Effekte in TREMOD-AV erheblich. Bisher wurden diese grob durch einen konstanten Gewichtungsfaktor berechnet, bezogen auf die direkten CO₂-Emissionen. Nun verwendet TREMOD-AV das Clustermodell des DLR.

Abstract: Further development of TREMOD - air traffic cluster model

The climate impact of air transport is caused by greenhouse gas emissions, especially CO₂, and by non-CO₂ effects caused by emissions of nitrogen oxides, water vapor and particles at higher altitudes. CO₂ emissions and their climate impact can be calculated directly from fuel consumption. Determining the climate impact of non-CO₂ effects is more challenging, as it varies depending on the emission location and environmental conditions. On average, non-CO₂ effects account for around 66% of the total climate impact of global aviation (Lee et al. 2023).

The objective of the present project "Weiterentwicklung TREMOD – Clustermodell Flugverkehr " is to allow a more accurate assessment of the climate impact of the non-CO₂ effects of air transport in TREMOD-AV. The Federal Environment Agency's emissions calculation model TREMOD (Transport Emission Model) utilizes the TREMOD-AV module to estimate annual German air transport emissions and their impact on the climate.

The improved estimation of the non-CO₂ effects is based on the cluster model from 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". The integration of the cluster model significantly improves the accuracy of the non-CO₂ effects in TREMOD-AV. Previously, these were roughly calculated using a constant weighting factor related to direct CO₂ emissions. Now TREMOD-AV utilizes the DLR cluster model.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Zusammenfassung.....	12
Summary.....	20
1 Randbedingungen und Zielsetzung des Projekts.....	26
2 Beschreibung – TREMOD-AV.....	28
2.1 Bilanzierung der Verbräuche und Emissionen.....	28
2.2 Bilanzierung der Nicht-CO ₂ -Effekte.....	29
2.3 Datenbasis Verkehrsmengen.....	30
2.4 Datenbasis Emissionsfaktoren.....	32
3 Beschreibung – Clustermodell zur Berechnung der Nicht-CO ₂ -Effekte.....	33
3.1 Physikalische Hintergründe.....	33
3.2 Metriken.....	34
3.3 Clusteranalyse des DLR.....	35
4 Durchgeführte Anpassungen an TREMOD-AV.....	41
4.1 Methodikanpassungen und Auswirkungen auf Emissionen.....	41
4.1.1 Datenbasis für Verkehrsmengen und Großkreisdistanzberechnung.....	41
4.1.2 Anpassungen an den Taxi-Zeiten.....	46
4.1.3 Anpassungen am sonstigen Flugverkehr.....	48
4.1.4 Allokation der Emissionen auf die Transportart.....	51
4.1.5 Gesamtänderung der Emissionsberechnung durch Methodikanpassung.....	52
4.2 Integration des Clustermodells in TREMOD-AV.....	58
4.2.1 Bestimmung der Clusterzugehörigkeit der Flüge.....	59
4.2.2 Nicht zum Clustermodell zuordbare Flüge.....	60
4.2.3 Anwendung des Clustermodells auf den sonstigen Flugverkehr.....	62
4.2.4 Einbindung der Nicht-CO ₂ -Effekte in die Routine von TREMOD-AV und Migration.....	62
4.2.5 Szenariointegration.....	65
4.2.5.1 Kurzübersicht DLR LV Luftverkehrsprognosemodell.....	65
4.2.5.2 Einbindung des Szenarios in TREMOD-AV.....	67
5 Gesamte Klimawirkung des deutschen Flugverkehrs.....	71
5.1 Detailergebnisse.....	71
5.2 Abgleich mit dem DLR-Rechner.....	74

5.3	Ableich mit bisheriger Methode	76
6	Resümee und Ausblicke	79
7	Quellenverzeichnis	82

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Relative Änderungen der Starts und Flug-km durch die neuen Daten auf HVF.....	45
Abbildung 2:	Relative Emissionsänderung durch die neuen Daten auf HVF .	45
Abbildung 3:	Relative Änderungen der Emissionen durch die Anpassung der Taxi-Zeiten	47
Abbildung 4:	Relative Änderung der Emissionen durch die Korrektur der Doppelbilanzierung.....	49
Abbildung 5:	Relative Änderungen durch die Anpassungen der Annahmen des sonstigen Flugverkehrs	51
Abbildung 6:	Relative Änderungen der nationalen Emissionen in der LTO-Phase	53
Abbildung 7:	Relative Änderungen der internationalen Emissionen in der LTO-Phase	53
Abbildung 8:	Relative Änderungen der Emissionen in der LTO-Phase	54
Abbildung 9:	Relative Änderungen der nationalen Emissionen in der CCD-Phase	55
Abbildung 10:	Relative Änderungen der internationalen Emissionen in der CCD-Phase	55
Abbildung 11:	Relative Änderungen der Emissionen in der CCD-Phase.....	56
Abbildung 12:	Relative Änderungen der gesamten nationalen Emissionen ...	57
Abbildung 13:	Relative Änderungen der gesamten internationalen Emissionen	57
Abbildung 14:	Relative Änderungen der gesamten Emissionen.....	58
Abbildung 15:	Schematische Ablauf und Einbindung der Berechnung der Nicht-CO ₂ -Effekte in TREMOD-AV	64
Abbildung 16:	Kurzübersicht DLR LV Luftverkehrsprognosemodell	66
Abbildung 17:	Ablauf des DLR LV Luftverkehrsprognosemodells.....	67
Abbildung 18:	Klimawirkung (ATR100) des gesamten deutschen Flugverkehrs 1990-2023 nach Treibhausgasen und Nicht-CO ₂ -Effekte differenziert.....	71
Abbildung 19:	Klimawirkung (ATR100) des gesamten deutschen Flugverkehrs pro Zielkontinent 1990-2023	72
Abbildung 20:	Spezifische Klimawirkung (ATR100) pro Pkm pro Zielkontinent 1990-2023.....	73
Abbildung 21:	Klimawirkung (ATR100) des gesamten deutschen Flugverkehrs 2015-2050.....	74
Abbildung 22:	Äquivalenzfaktor der Klimawirkung (EWF vs. ATR100) bezogen auf die CO ₂ -Emissionen neu vs. alt 1990-2023.....	77
Abbildung 23:	Spezifische Klimawirkung (ATR100) in Abhängigkeit der Flughöhe für die Relation Detroit-Frankfurt	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anteil der Flugdistanz in der CCD-Phase oberhalb von 9 km Flughöhe	29
Tabelle 2:	Exemplarischer Auszug der aktuell in TREMOD verwendeten Verkehrsdaten	31
Tabelle 3:	Exemplarischer Auszug (Verbrauch) der verwendeten Emissionsfaktoren	32
Tabelle 4:	Kategorisierung der Flugzeuge bei der Clusteranalyse	36
Tabelle 5:	Umrechnungsfaktoren von ATR100 (increasing emissions) zu den anderen Metriken.....	37
Tabelle 6:	Koeffizienten der Clusterfunktionen – Kleinflugzeug (<i>r</i>)	39
Tabelle 7:	Koeffizienten der Clusterfunktionen – Kurzflug (<i>s</i>)	40
Tabelle 7:	Koeffizienten der Clusterfunktionen – Mittlere Breite (<i>m</i>)	40
Tabelle 8:	Koeffizienten der Clusterfunktionen – Tropen (<i>t</i>)	40
Tabelle 10:	Exemplarischer Auszug der Verkehrsdaten in TREMOD-AV.....	42
Tabelle 11:	Exemplarischer Auszug der geplanten Flughafentabelle in TREMOD	43
Tabelle 12:	Einteilung des MTOW in Wake Turbulence Class.....	46
Tabelle 13:	Neue Annahmen für den sonstigen Flugverkehr.....	50
Tabelle 14:	Exemplarischer Auszug der Verkehrsmengen des gewerblichen Flugverkehrs auf den sonstigen Flugplätzen in TREMOD-AV ...	50
Tabelle 15:	Allokationsfaktoren auf die Transportart pro Relation im Jahr 2019 (auf HVF)	52
Tabelle 16:	Beispiel für mittlere Faktoren zur Bestimmung der Nicht-CO ₂ - Effekte nach Distanzklassen für Flüge außerhalb der Definition des Clustermodells	61
Tabelle 17:	Zuordnung MTOW zu Sitzplatzkategorien.....	62
Tabelle 18:	Entwicklung Starts auf HVF im Szenario.....	68
Tabelle 19:	Entwicklung Passagieraufkommen auf HVF im Szenario	69
Tabelle 20:	Vergleich der Ergebnisse nach DLR-Rechner und TREMOD-AV (Jahr 2019)	75
Tabelle 21:	Abweichung der km-spez. Emissionsfaktoren von TREMOD-AV zu DLR (Jahr 2019)	75
Tabelle 22:	Abweichung der km-spezifischen Emissionsfaktoren vom MEC zu DLR	76
Tabelle 23:	Nicht-CO ₂ -Effekte von Deutschland abgehender Flüge im Jahr 2019 berechnet mit unterschiedlichen Metriken	81

Abkürzungsverzeichnis

AGWP	Absolute Global Warming Potential (absolutes Treibhauspotenzial)
ATR	Average Temperature Response
BAZL	Bundesamt für Zivilluftfahrt der Schweiz
BC	Black Carbon (Ruß)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CCD	Climb, Cruise and Descent (Steigflug, Reiseflug und Sinkflug)
CH₄	Methan
ciC	Contrail-induced cloudiness (kondensstreifeninduzierte Bewölkung)
CO	Kohlenstoffmonoxid
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
DB	Datenbank
DEA	Data Envelopment Analysis
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EAGWP	Efficacy weighted Absolute Global Warming Potential (wirksamkeitsgewichtetes absolutes Treibhauspotenzial)
EEA	European Environment Agency (Europäische Umweltagentur)
EF	Emissionsfaktor
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
ETS	European Union Emissions Trading System (EU-Emissionshandelssystem)
EFW	Emission Weighting Factor
EWR	Europäischer Wirtschaftsraum
GKD	Großkreisdistanz
GV	Güterverkehr
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
HC	Flüchtige organische Substanzen aus Kohlenwasserstoffen
HVF	Hauptverkehrsflughafen
ICA	Initial Cruise Altitude (Flughöhe)
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
LTO	Landing and Take Off
MEC	Master Emission Calculator
mKr	Masse Kraftstoff
MTOW	Maximum Take-off Weight (Höchstabfluggewicht)
N₂O	Lachgas
NH₃	Ammoniak

AGWP	Absolute Global Warming Potential (absolutes Treibhauspotenzial)
NMVOC	Non-methane volatile organic compounds (Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan)
NO_x	Stickoxide
PM₁₀	Partikel <10 µm
PM_{2,5}	Partikel <2,5 µm
PMO	Primary Mode Ozone
PV	Personenverkehr
SO₂	Schwefeldioxid
TREMOD	Transport Emission Model
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
VJS	Vorjahresschätzung
WTC	Wake Turbulence Class

Zusammenfassung

Die Klimawirkung des Luftverkehrs ergibt sich aus den Treibhausgasemissionen, insbesondere CO₂, und den Nicht-CO₂-Effekten durch Emissionen von Stickoxiden, Wasserdampf und Partikeln in höheren Luftschichten. Die CO₂-Emissionen und ihre Klimawirkung können direkt aus dem Treibstoffverbrauch berechnet werden. Die Emissionen, die für die Nicht-CO₂-Effekte verantwortlich sind, müssen komplizierter ermittelt werden. Zudem variieren die Nicht-CO₂-Effekte je nach Emissionsort und Umgebungsbedingungen. Im Durchschnitt machen die Nicht-CO₂-Effekte etwa 66 % der gesamten Klimawirkung des weltweiten Luftverkehrs aus (Lee et al. 2023).

Das Emissionsberechnungsmodell TREMOD (Transport Emission Model) des Umweltbundesamts ermöglicht durch das Modul TREMOD-AV eine Abschätzung der jährlichen deutschen Luftverkehrsemissionen und ihrer Klimawirkung (Knörr, Wolfram et al. 2012). TREMOD-AV kann die CO₂-Emissionen des in Deutschland startenden Luftverkehrs mithilfe differenzierter Verkehrsdaten relativ genau bestimmen. Bisher werden die Nicht-CO₂-Effekte der Luftverkehrsemissionen im Modell jedoch stark vereinfacht mit einem allgemeinen Faktor abgebildet, der die gesamte Klimawirkung zum CO₂ ins Verhältnis setzt. Eine solche Approximation kann jedoch sehr ungenau sein (Forster et al. 2006). Das bedeutet, dass die spezifischen Klimaeffekte von Flugverbindungen nicht ausreichend berücksichtigt werden. Eine genaue Berücksichtigung dieser Emissionsbestandteile ist wichtig, um mögliche regulatorische Fehlanreize zu vermeiden. Zum Beispiel könnten Flugzeugantriebe entwickelt werden, die zwar CO₂-Emissionen reduzieren, aber gleichzeitig den Stickoxidausstoß überproportional erhöhen, wodurch die Gesamtklimawirkung steigt.

Ziel des hier vorliegenden Projekts „Weiterentwicklung TREMOD – Clustermodell Flugverkehr“ ist es, eine genauere Erfassung der Klimawirkung – insbesondere der Nicht-CO₂-Effekte – des Flugverkehrs in TREMOD-AV zu ermöglichen. Hierbei fließen 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“ mit ein. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Bericht die Anpassungen an TREMOD-AV beschrieben, mit deren Hilfe sich die Bestimmung von Nicht-CO₂-Effekten der Clusteranalyse in TREMOD-AV integrieren lässt. Außerdem wird analysiert, wie sich die Ergebnisse der CO₂ und Nicht-CO₂-Effekte in TREMOD-AV durch die Anpassungen und die Integration der Clusteranalyse verändern und worauf dies zurückzuführen ist.

TREMOD-AV wurde entwickelt, um den Berichtsanforderungen der Quellgruppe 1.A.3.a Ziviler Luftverkehr zu entsprechen, für die Deutschland als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention und des Genfer Luftreinhalte-Protokolls verantwortlich ist. Die Basis der Berichterstattung ist der Kraftstoffabsatz in Deutschland im Luftverkehr, der jedoch nicht differenziert nach nationalem und internationalem Flugverkehr vorliegt. Daher erfolgt in TREMOD eine Aufteilung des Kraftstoffabsatzes basierend auf Verbrauchsberechnungen. Die Emissionsberechnung stützt sich auf den deutschen Abflugverkehr, da er die getankte Kraftstoffmenge in Deutschland am besten repräsentiert. Dabei unterliegen die ermittelten Emissionen und ihre Klimawirkung einem festgelegten Rahmen. Internationale Flüge mit Ziel Deutschland werden in diesem Modell nicht berücksichtigt und den jeweiligen Startländern zugewiesen. Die aggregierten Werte des Flugverkehrs werden in das TREMOD-Gesamtmodell übertragen, wo sie für die

Emissionsberichterstattung aufbereitet werden. TREMOD-AV ermöglicht standardisierte Datenabfragen und kann auch Szenarien zur Verkehrsleistungsentwicklung bis 2050 berechnen.

Die aktuelle Berechnung der Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte erfolgt in TREMOD-AV vereinfacht. Sie berücksichtigt weder Randbedingungen wie die Flugroute noch spezifische Emissionen wie H₂O und NO_x. Stattdessen basiert sie auf einer Pauschalberechnung, die sich auf CO₂-Emissionen, den Emissions Weighting Factor (EWF) und den Anteil der Flugkilometer oberhalb von 9 km stützt. In TREMOD-AV ist für jede Distanzklasse festgelegt, welcher Anteil der Flugkilometer oberhalb von 9 km liegt. Die CO₂-Emissionen oberhalb von 9 km werden mit dem EWF multipliziert, um eine Approximation der Nicht-CO₂-Effekte zu erhalten. Der EWF ist in TREMOD mit einem festen Wert in Höhe von 2,4 angenommen. Die gesamte Klimawirkung eines Fluges setzt sich aus den Treibhausgasen CO₂, N₂O und CH₄ (in CO₂-Äquivalenten) sowie den Nicht-CO₂-Effekten zusammen.

Die Abschätzung der Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs wird durch ein verbessertes Verständnis physikalischer und chemischer Prozesse in der Atmosphäre genauer, bleibt aber wegen der starken Variation meteorologischer Bedingungen unsicher (Lee et al. 2021). Nicht-CO₂-Effekte machen etwa zwei Drittel des Gesamtklimaeffekts des Luftverkehrs aus und werden vor allem durch Wasserdampf (H₂O), Stickoxide (NO_x) und Aerosole verursacht. Wasserdampf hat eine direkte wärmende Wirkung und bildet Kondensstreifen, deren Einfluss vom Breitengrad und der Tageszeit abhängt. Stickoxide führen zur Ozonbildung, was einerseits wärmend und andererseits kühlend wirkt. Die Erderwärmung durch NO_x nimmt mit den Breitengraden zu und steigt mit der Flughöhe der Emissionen. Insgesamt tragen NO_x-Emissionen zum Erderwärmungseffekt bei, wobei dieser mit zunehmender Flughöhe verstärkt wird.

Das DLR entwickelte eine Clusteranalyse, die auf wenigen Informationen basiert, um die Nicht-CO₂-Effekte von Flügen detaillierter zu berechnen (Thor et al. 2023). Flugplandaten aus dem Jahr 2012 dienten als Grundlage. Trajektorien von 57.631 Flügen wurden simuliert und in sieben Flugzeugkategorien unterteilt, basierend auf Passagierkapazität und Flugzeugtyp. Die Verteilung von NO_x, CO₂ und H₂O wurde entlang der Flugbahnen berechnet. AirClim, ein Klimamodell, wurde verwendet, um die Klimaeffekte dieser Emissionen zu bestimmen. Aufgrund der großen Varianz des Einflusses der Klimaeffektkomponenten je Emissionsort, wäre es nicht präzise genug, die Nicht-CO₂-Effekte anhand einer einzigen Funktion abzubilden. Daher wird ein K-Means-Clustering-Algorithmus angewendet, um die Flüge in mehrere Cluster zu unterteilen. Dadurch wird sichergestellt, dass Flüge in einem bestimmten Cluster ähnliche Klimaeffektmerkmale aufweisen. Es wurden vier Cluster gebildet: Kurzstreckenflug, tropische Flüge, Mittelbreitenflüge und Kleinflugzeuge. Jedes Cluster hat spezifische Klimaeffektbeiträge. Die Clusterfunktionen berücksichtigen den Einfluss von NO_x, H₂O und Kondensstreifen.

Basierend auf den ermittelten Klimaeinflüssen werden Klimaeffektfunktionen abgeleitet, die als Regressionsformeln den gesamten Klimaeffekt abbilden. Eingangsgrößen sind die Flugdistanz entlang eines Großkreises, mittlere Breite entlang des Großkreises, Kraftstoffverbrauch zur Berechnung von CO₂- und H₂O- sowie NO_x-Emissionen. Die Koeffizienten der Funktionen variieren je nach Flugzeugtyp und Cluster. Die aus der Clusteranalyse abgeleiteten Berechnungsvorschriften werden direkt in TREMOD-AV implementiert. Es wird betont, dass die Funktionen konstant bleiben, obwohl sie sich in der Realität über die Zeit ändern könnten. Die Funktionen und ihre Parameter wurden anhand von Flugplandaten aus dem Jahr 2012 ermittelt.

Jedoch ändern sich stetig einige Aspekte, die sich vom Jahr 2012 unterscheiden können. Zu nennen sind technologische Entwicklungen an Flugzeugen und Änderungen am Emissionsverhalten, Flugroutenanpassungen und Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck etc.). Die genannten Größen haben einen Einfluss auf die Nicht-CO₂-Effekte. Demnach wäre zu prüfen, wann und in welcher Form die Klimawirkungsberechnung anzupassen wäre. Insgesamt ermöglicht die Clusteranalyse aber eine präzisere Abschätzung der Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs und unterstützt die Entwicklung von Strategien zur Reduzierung der Klimaauswirkungen.

Zur Bewertung der Klimawirkung werden Metriken verwendet, die den Zusammenhang zwischen Emissionen und ihren Auswirkungen darstellen. Eine allgemeine Metrik für alle Eigenschaften existiert nicht, daher werden verschiedene Metriken je nach Fragestellung verwendet. Für eine Vergleichbarkeit der Klimawirkung von Nicht-CO₂-Effekten mit CO₂-Emissionen werden Metriken wie Average Temperature Response (ATR) und Absolute Global Warming Potential (AGWP) verwendet. Die Wahl der Metrik hängt vom betrachteten Zeitraum ab. Kurzfristige Metriken fokussieren auf Nicht-CO₂-Effekte, während langfristige eher CO₂-Effekte betrachten. ATR berücksichtigt Lebenszeiten, Klimasensitivitäten und die Trägheit des Klimasystems und wird für die Bewertung von Nicht-CO₂-Effekten im Emissionshandel empfohlen. Im Vergleich zum AGWP hat ATR einen direkteren Bezug zur Temperaturänderung und bewertet Pulsemissionen und kontinuierliche Emissionen gleich. Mit dem Clustermodell des DLR kann die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte über den ATR100 und AGWP100 integriert werden, also die Klimawirkung über 100 Jahre.

Allgemein ändert sich durch die Integration des Clustermodells nichts an der Methode zur Bilanzierung der Emissionen und Verbräuche in TREMOD-AV. Dadurch wird unter anderem gewährleistet, dass die Emissionsberechnung analog zu den Vorjahren erfolgen kann und es zu keinen statistischen Brüchen durch die Integration der Nicht-CO₂-Effekte kommt. Im Rahmen des Projekts wurden jedoch einige Modellanpassungen vorgenommen. Diese waren zum Teil nötig, um die neue Methode zur Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte zu integrieren. Zu nennen sind hier insbesondere die Strukturänderung der Verkehrsmengen und die Berechnung der Großkreisdistanzen (GKD). Es gab allerdings auch einige Modellanpassungen, die nicht unmittelbar mit den Nicht-CO₂-Effekten in Verbindung stehen. Es wurden Anpassungen an der Berechnung der Emissionen im LTO-Zyklus, am sonstigen Flugverkehr (gewerblicher Verkehr auf Kleinflughäfen und nicht-gewerblicher Verkehr) und der Allokation der Emissionen auf die Transportarten (Personen und Güterverkehr) vorgenommen. Die genannten Modellanpassungen führen zu kleinen Änderungen der ermittelten Emissionen des Flugverkehrs auch abseits der Nicht-CO₂-Effekte. Neue Funktionen wurden implementiert, darunter die Berechnung der mittleren Breite der Start-Ziel-Verbindungen entlang der verbindenden Großkreislinie und die Bestimmung der Clusterzugehörigkeit anhand verschiedener Parameter wie Flugdistanz und Flugzeugtyp. Dies bestimmt die Gewichtungsfaktoren für die Wirkkomponenten H₂O, NO_x und Zirruswolkenbildung. TREMOD-AV berechnet auch die Nicht-CO₂-Effekte für Flüge, die nicht durch das Clustermodell definiert sind, basierend auf einem mittleren Gewichtungsfaktor. Durch diese Neuerungen wird die Emissionsberechnung des Luftverkehrs präziser und realitätsnäher.

Um die Ergebnisse der Clusteranalyse zu integrieren, wird TREMOD-AV um Flugroutendaten erweitert. TREMOD-AV verwendet die Start- und Zielflughafenkoordinaten, um die Flüge einem

der Cluster zuzuweisen. Die Berechnung der Mittelpunkte zwischen den Flughäfen wird mithilfe von pyproj durchgeführt. Destatis (Statistische Bundesamt) lieferte eine neue Datenstruktur mit Start-Ziel-Verbindungen, die historische Daten bis 1990 umfasst. Diese ermöglicht die Berechnung von Großkreisdistanzen und Verkehrsleistungen für Passagiere und Fracht. Durch diese Erweiterung ist die Integration des Clustermodells möglich und sie ersetzt die bisherige Aggregation nach Distanzklassen. Die Berechnung der Großkreisdistanz ist auch die Grundlage für die Emissionsberechnung in der CCD-Phase, jedoch wird hier wie bisher ein Umweg miteingerechnet. Die Datenqualität für den sonstigen Flugverkehr wurde überarbeitet, während die gewerblichen Verkehrsmengen auf Hauptverkehrsflughäfen (HVF) teilweise von den alten Daten abweichen. Diese Abweichungen zeigen sich besonders vor 1997, während sie danach minimal sind. Die mittlere Flugdistanz wird nun anhand der Start- und Zielorte berechnet, was zu kleineren Abweichungen führt. Vorher wurden Mittelwerte für Flugdistanzklassen genutzt, die nicht immer repräsentativ waren. Diese Änderungen spiegeln sich auch in den Emissionen wider, wobei vor 1997 größere Unterschiede auftreten, während sie danach sehr gering sind. Die genauen Ursachen für die Abweichungen konnten im Rahmen des Projekts nicht vollständig geklärt werden, aber die Datenqualität verbessert sich insgesamt.

Zwar konnte das Clustermodell ohne große methodische Probleme in TREMOD-AV implementiert werden, aber da TREMOD-AV auch Flüge enthält, die nicht über das Clustermodell abgedeckt sind, entstehen Lücken in der Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte. Dies betrifft Flugzeuge, die keine Strahlantriebe haben – Hubschrauber und Propellermaschinen. Bei Hubschraubern und Propellermaschinen mit Kolbenmotor wird die Annahme getroffen, dass keine Nicht-CO₂-Effekte entstehen. Aufgrund der Flughöhen und Distanzen ist diese Annahmen durchaus zulässig, wobei die Klimawirkung Gegenstand weiterer Untersuchungen sein könnte. Bei Turbopropellermaschinen ist eine Annahme deutlich schwieriger zu treffen, da wie bei Strahlantrieben ebenfalls eine Gasturbine eingesetzt wird und somit vergleichbare Emissionsverhältnisse entstehen und ähnlich Flughöhen erreicht werden. Da jedoch beide Aspekte abweichend von repräsentativen Passagiermaschinen im DLR-Modell sind, wäre die Anwendbarkeit des Clustermodells zu prüfen. In der aktuellen Implementierung wird die Anwendbarkeit unterstellt.

TREMOD-AV berechnet CO₂- und NO_x-Emissionen pro Flugzeugtyp, anstatt pro Größenklasse wie in der Clusteranalyse vorgesehen. Dies ermöglicht eine präzisere Berücksichtigung unterschiedlicher Emissionsprofile. Hierdurch kann es jedoch zu Zuweisungsproblemen kommen, zum Beispiel bei Frachtmaschinen, die keiner Sitzplatzklasse eindeutig zugewiesen werden können. Dies gilt auch im Hinblick unterschiedlicher Sitzplatzkonfigurationen eines Flugzeugtyps. Hier entstehen Zuordnungsprobleme, wenn ein Flugzeugtyp am Rande von zwei Sitzplatzkategorien liegt und somit je nach Annahme der Sitzplatzanzahl (in TREMOD-AV pro Flugzeugtyp statisch angenommen) in eine der zwei Kategorien fallen könnte. Somit würde je nach Annahme der Sitzplatzanzahl je Flugzeugtyp eine andere Funktion mit unterschiedlichen Parametern im Clustermodell verwendet.

Die Implementierung des Clustermodell in TREMOD-AV erfolgt beim sonstigen Flugverkehr eingeschränkt. Da für den sonstigen Flugverkehr in den Daten keine Information zu Start-Ziel-Verbindungen vorliegen, wird für diesen Bereich die Funktion des Clusters „Kurzflug“ genutzt. Somit können die Nicht-CO₂-Effekte von Flugzeugen mit Strahltriebwerk und Turboprop anhand der angenommenen Flugdistanz abgeschätzt werden. Diese Methode basiert auf einer Regressionsfunktion, welche in der Clusteranalyse für Kurzstreckenflüge entwickelt wurde.

Obwohl die genaue Start-Ziel-Verbindung fehlt, ermöglicht die angenommene Distanz eine grobe Abschätzung der Nicht-CO₂-Effekte für den sonstigen Flugverkehr. Ansonsten gelten beim sonstigen Flugverkehr dieselben Einschränkungen und Annahmen wie beim gewerblichen Flugverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen.

Die Ergebnisse aus den Berechnungen aus TREMOD-AV werden weiterhin jährlich in aggregierter Form an das TREMOD-Hauptmodul übergeben. Diese Schnittstelle bleibt demnach erhalten. Nun ist jedoch auch das Szenario Bestandteil von TREMOD-AV und wird demnach zusätzlich an das TREMOD-Hauptmodul übergeben. Vorher fand die Szenarienberechnung ausschließlich im Hauptmodul statt. Die Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte erfolgt wie zuvor auch für die Szenariojahre bis zum Jahr 2050 bleibt unverändert, jedoch müssen Anpassungen an die detailliertere Darstellung des Szenarios vorgenommen werden.

Die alte Struktur der Szenarienberechnung berücksichtigt keine Informationen über zukünftige Start-Ziel-Verbindungen, die notwendig für die Implementierung der Clusteranalyse sind. Das neue Szenario verwendet deshalb das DLR-Luftverkehrsprognosemodell, um künftige Entwicklungen von Start-Ziel-Verbindungen zu berücksichtigen. Das DLR-Luftverkehrsprognosemodell erstellt eine Prognose des Passagier- und Flugwachstums für weltweite Flughafenpaare. Die Prognose basiert auf Ist-Daten von kommerziellen Anbietern wie Sabre Market Intelligence und wird mithilfe eines ökonomischen Gravity-Modells durchgeführt. Treiber des Luftverkehrsaufkommens sind das BIP pro Kopf, die Bevölkerungsgröße und der Ticketpreis. Zukünftige Flughafen- und Flugzeugkapazitäten werden prognostiziert, wobei Kapazitätsengpässe und Externalitäten berücksichtigt werden. Die Flottenprognose bezieht sich auf die Bestandsflotte, das Aircraft Retirement und potenzielle neue Flugzeugtypen. Somit bietet das DLR-Luftverkehrsprognosemodell detaillierte Prognosen des gewerblichen Personenflugverkehrs bis 2050, differenziert nach Start- und Zielflughäfen, Flugzeuggrößen und Passagieraufkommen.

Die Struktur des DLR-Luftverkehrsprognosemodells passt zu den Destatis-Daten. Die Kombination von Detailtiefe und Prognosefähigkeit des DLR-Luftverkehrsprognosemodells mit der Struktur von Destatis-Daten ermöglicht eine präzise Analyse und Voraussage der Flugverkehrsentwicklung in Deutschland bis 2050. Dennoch gibt es einige Einschränkungen. Bei der Integration des DLR-Luftverkehrsprognosemodells fielen Abweichungen bei den Systemgrenzen und zum Teil den Daten auf. Dieses Problem konnte mit Aggregationen zunächst verkleinert werden, allerdings ist bei künftigen Aktualisierungen des Szenarios darauf zu achten, dass die realen Stützjahre auf derselben Datenbasis beruhen, die Systemgrenzen adäquat abgesteckt werden können und dieselben Definitionen von Flugzeugtypen zugrunde liegen. Die Flugzeugemissionen basieren auf den bisherigen Annahmen des TREMOD-Trendszenarios, mit jährlichen Verbesserungen für Kraftstoffverbrauch, NO_x und PM. Das DLR-Luftverkehrsprognosemodell liefert nur für Personenverkehr Daten, daher werden Güterverkehr und nicht-gewerblicher Flugverkehr ergänzt. Für den Güterverkehr orientieren sich die relativen Entwicklungen an vergangenen Trends, mit Annahmen für Beifracht und Frachtflugzeuge. Für nicht-gewerblichen Flugverkehr gelten dieselben Annahmen wie für gewerblichen Flugverkehr.

Durch die Integration der Clusteranalyse ist es notwendig, TREMOD-AV von Access nach Python zu migrieren. Aufgrund von Engpässen bei der Datenverarbeitung und der geringen Ausführungsgeschwindigkeit von Access ist dieser Schritt notwendig. Das neue Python-Programm bietet Flexibilität und verkürzt die Rechenzeiten erheblich. Das Modell integriert

Flughafenkoordinaten, Clusterzugehörigkeit, Effektbestimmung, Berechnung der Großkreisdistanz, Flugdistanz, Gewichtungsfaktoren und die Bestimmung von Treibhausgas-Äquivalenten.

Mit der aktualisierten TREMOD-AV Version, die das Clustermodell für die Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte beinhaltet, wird die Klimawirkung des Luftverkehrs seit 1990 berechnet. Die dargestellten Ergebnisse bieten Einblicke in die Entwicklung und Zusammensetzung der Klimawirkungen des deutschen Flugverkehrs und tragen dazu bei, die Auswirkungen des Luftverkehrs auf den Klimawandel besser zu verstehen. Des Weiteren erlaubt die Neuberechnung der Historischen Werte einen Abgleich mit der alten Berechnungsmethode.

Die Klimawirkungen des Flugverkehrs ab Deutschland zeigen einen deutlichen Anstieg von 1990 bis 2019. Während die Treibhausgasemissionen von 13,6 auf 29,7 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent (CO_{2eq}) stiegen (+119 %), erhöhte sich die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte von 33,4 auf 74,7 Millionen Tonnen CO_{2eq} (+184 %), wobei besonders die NO_x-Emissionen eine bedeutende Rolle spielten. Der Anteil der Nicht-CO₂-Effekte an der Gesamtklimawirkung stieg von 71 % auf 76 %, was hauptsächlich auf den starken Anstieg internationaler Flüge zurückzuführen ist. Bei der Betrachtung der Nicht-CO₂-Effekte machen die NO_x-Emissionen fast zwei Drittel aus, während Wasser und die Bildung von Zirruswolken jeweils etwa 10 % bzw. 27 % ausmachen. Der Trend zeigt eine leichte Abnahme der H₂O-Effekte aufgrund steigender Kraftstoffeffizienz.

Im Jahr 2023 machten internationale Flüge 98 % der Klimawirkung aller von Deutschland abgehenden Flüge aus. Bezogen auf die Treibhausgasemissionen machten internationale Flüge 95 % aus. Europäische Flüge (exklusive nationaler Flüge) hatten den größten Anteil an der Klimawirkung (33 %), gefolgt von Flügen nach Asien und Amerika mit jeweils 28 %. Flüge mit Landung außerhalb Europas wiesen nicht nur längere Flugstrecken auf, sondern hatten auch höhere Nicht-CO₂-Effekte. Im Jahr 2023 hatte ein Flug auf einen anderen Kontinent einen ATR100-Faktor von etwa 5, während Flüge nach Europa einen Faktor von nur 3,4 aufwiesen. Wenn jedoch die Klimawirkung pro Passagierkilometer betrachtet wird, unterscheiden sich die Effekte zwischen den Zielkontinenten weniger stark. Europäische und nationale Flüge haben einen höheren Anteil an Emissionen in der Phase des Startens, Landens und Rollens (LTO) im Vergleich zu anderen Phasen des Fluges.

Gegenüber des vorher genutzten EWF ist die Klimawirkung des Flugverkehrs nun deutlich höher. Statt eines Gewichtungsfaktors (bezogen auf die direkten CO₂-Emissionen) von 2,1 nach der alten Methode ergibt sich nun ein Faktor von 4,3 für das Jahr 2023. Somit machen die Nicht-CO₂-Effekte für Flüge ab Deutschland einen Anteil von 77 % an der Klimawirkung aus. (Lee et al. 2023) beziehungsweise (Arrowsmith et al. 2020) beziffern den Anteil für weltweite Flüge auf ca. 66 %. An den Nicht-CO₂-Effekten weisen die Komponenten NO_x, Zirruswolkenbildung und H₂O durchschnittlich einen Anteil von 63 %, 27 % beziehungsweise 10 % auf.

Das Szenario bis zum Jahr 2050 zeigt eine Steigerung der Klimawirkung des Flugverkehrs nach den Coronajahren. Bis zum Jahr 2035 wird das Niveau von 2019 wieder erreicht, nachdem es bis 2025 deutlich angestiegen war. Die Verkehrsleistung stagniert dann bis 2030 und steigt danach wieder. Die Klimawirkung sinkt während des Stagnationszeitraums 2025-2030, bedingt durch die Annahme einer stetigen Verbesserung der Triebwerkseffizienz und der spezifischen NO_x-Emissionen. Nach 2030 steigt die Klimawirkung wieder, da die Verkehrsleistung stark ansteigt.

Die spezifische Klimawirkung sinkt von 478 g CO₂eq/Pkm (2023) auf 310 g CO₂eq/Pkm (2050), wobei der Anteil der Nicht-CO₂-Effekte an den gesamten Klimawirkungen von 77 % (2030) auf 58 % (2050) sinkt. Dies geschieht hauptsächlich aufgrund der überproportionalen Verbesserung der NO_x-Emissionen im Vergleich zum Kraftstoffverbrauch. Hierdurch verringert sich der ATR100 von 4,3 im Jahr 2023 auf 3,9 im Jahr 2050.

Theoretisch ist eine Erweiterung des Szenarienmoduls möglich. Denkbar wären Berechnungen von weiteren Szenarien mit Maßnahmen wie Flugroutenanpassungen zur Reduktion der gesamten Klimawirkung oder dem Einsatz von alternativen Kraftstoffen. Es ist jedoch fraglich, inwieweit beziehungsweise mit welcher Genauigkeit das Clustermodell robuste Ergebnisse liefert, sofern man sich zu weit von den modellierten Flugzeugtypen entfernt. Geplant ist, dass die Nicht-CO₂-Effekte ab 2025 zunächst über ein Überwachungs-, Berichts- und Verifizierungssystem und später mit einer Abgabepflicht in den EU-ETS einbezogen werden. Dies spiegelt die (zukünftige) Rolle der Nicht-CO₂-Effekte wider. Die Berechnung in TREMOD-AV eignet sich für die genaue Bilanzierung von Einzelflügen und somit für das geplante Monitoring nicht. Es enthält demnach keine Informationen zu den flugspezifischen Routen, Umweltbedingungen und Emissionen, die für ein Monitoring nötig wären. Demgegenüber stellt es lediglich eine valide Berechnung von Durchschnittswerten dar und weist auf Einzelflugebene große Unsicherheiten auf, siehe auch (Dahlmann et al. 2023). Eine detaillierte Berechnung auf Einzelflugebene ist prinzipiell in der aktuellen verwendeten Systemarchitektur denkbar und TREMOD-AV dahingehend erweiterbar, allerdings würde dies eine umfassende Anpassung der Methodik sowie der Eingangsdaten implizieren. Aktuell verwendet werden Daten von Destatis mit Start-Ziel-Informationen, die keine expliziten Informationen zu den Flugrouten enthalten.

Das DLR hat im Rahmen der Clusteranalyse ein Excel-Rechner zur Verfügung gestellt, mit dessen Hilfe sich die Nicht-CO₂-Effekte eines Fluges bestimmen lassen. Dieser Rechner wird zur Plausibilisierung der Ergebnisse von TREMOD-AV herangezogen. Der Rechner weist dieselbe Methodik auf, jedoch gibt es zwei Unterschiede zur Berechnung in TREMOD-AV. Für den Abgleich wurde exemplarisch das Jahr 2019 herangezogen und sämtliche Flüge aus der Betrachtung herausgenommen, die über den DLR-Rechner nicht definiert sind. Somit können knapp 950.000 Flüge des Jahres 2019 verglichen werden. Es können deutliche Abweichungen zwischen beiden Modellen identifiziert werden. Die CO₂-Emissionen und somit der Kraftstoffverbrauch ist in TREMOD-AV um 12 % höher als beim Excel-Rechner. Dies bewirkt bereits, dass die gesamte Klimawirkung in TREMOD-AV höher ist. Zum anderen sind die deutlich höheren NO_x-Emissionen bei TREMOD-AV zu nennen, die einen noch größeren Einfluss haben. Diese sind in TREMOD-AV um ca. 45 % höher als im Excel-Rechner und somit auch die Klimawirkung.

Die Abweichung ist hauptsächlich auf unterschiedliche Emissionsfaktoren zurückzuführen. Die Datenbasis für die Emissionsfaktoren in TREMOD-AV ist hauptsächlich der „Master Emissions Calculator (MEC)“ (EEA 2019). Beim Vergleich der Emissionsfaktoren des Excel-Rechner mit den Faktoren der jeweiligen Flugzeugtypen aus dem MEC ergeben sich beim MEC signifikante höhere Werte für CO₂ und NO_x pro Flugzeugkilometer. Die Ursache für die deutlichen Abweichungen sowie die Auswirkungen auf die Nicht-CO₂-Effekte können im Rahmen des Projekts nicht abschließend geklärt werden. Inwiefern die Integration des DLR-Modells in TREMOD-AV aufgrund dieser Unstimmigkeiten zu weiteren Unsicherheiten bei der Berechnung der Klimawirkung führt, bleibt demnach offen und kann nicht im Rahmen des Projekts umfassend geklärt werden.

Bei einer künftigen Anpassung der Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte oder auch bei den jährlichen TREMOD-Aktualisierungen können weitere Verbesserungen an dem Modell vorgenommen werden. Dazu gehören unter anderem auch die Integration anderer Klimametrien. Aktuell ist der ATR100 als Standard (Basis der dargestellten Berechnungsergebnisse) sowie der AGWP100 implementiert. Die Einbindung bspw. des EAGWP100 ist aufgrund der gegebenen Umrechnungstabellen in der Clusteranalyse ohne großen Aufwand möglich. Allgemein ist zu überlegen welche Klimametrik in welchem Kontext zu verwenden ist. Die Resultate je nach angewandter Metrik fallen sehr unterschiedlich aus.

Summary

The climate impact of air transport results from greenhouse gas emissions, in particular CO₂, and the non-CO₂ effects from emissions of nitrogen oxides, water vapour and particles at higher altitude. CO₂ emissions and their climate impact can be estimated directly from fuel consumption. Estimating emissions causing non-CO₂ effects is more complicated. In addition, the non-CO₂ effects vary depending on the emission location and environmental conditions. On average, non-CO₂ effects account for around 66% of the total climate impact of global air transport (Lee et al. 2023).

The Federal Environment Agency's emissions calculation model TREMOD (Transport Emission Model) utilizes the TREMOD-AV module to estimate annual German air transport emissions and their climate impact (ifeu and Öko-Institut 2010). TREMOD-AV can accurately determine the CO₂ emissions of air traffic departing from Germany using detailed traffic data. However, the non-CO₂ effects of air transport emissions have been modeled in a highly simplified manner, employing a general factor that relates the overall climate impact to CO₂. However, this approximation can be imprecise (Forster et al. 2006). This means that the specific climate effects of flight connections are not sufficiently taken into account. A precise consideration of these emission components is important in order to avoid adverse effects. For example, aircraft engines could be designed to reduce CO₂ emissions but simultaneously cause a disproportionate increase in nitrogen oxide emissions, which would ultimately increase the overall climate impact.

The objective of the project "Weiterentwicklung TREMOD – Clustermodell Flugverkehr " is to enhance the accuracy of estimating aviation's climate impact in TREMOD-AV, particularly the non-CO₂ effects. This project integrates findings from the cluster analysis of project 3720 42 502 0 "Untersuchung der praktischen Umsetzung der Einbindung von Nicht-CO₂-Treibhausgas-Effekten des Luftverkehrs in das EU-ETS einschließlich Clusteranalyse". This report outlines the adjustments made to TREMOD-AV to incorporate the determination of non-CO₂ effects from the cluster analysis. It also examines how these adjustments and the integration of the cluster analysis affect the results for CO₂ and non-CO₂ effects in TREMOD-AV, explaining the reasons for these changes.

TREMOD-AV was developed to comply with the reporting requirements for Source Category 1.A.3.a Civil Aviation, for which Germany is responsible under the Framework Convention on Climate Change and the Geneva Convention on Air Pollution. Reporting is based on the amount of fuel used by air transport in Germany, without differentiating between national and international air traffic. TREMOD-AV breaks down fuel sales using consumption calculations. The emissions calculation is based on German departure traffic, as this best represents the amount of fuel refueled in Germany. The emissions determined and their climate impact are governed by a fixed framework. International flights arriving in Germany are excluded from this model and are attributed to their countries of origin. Aggregated air traffic values are integrated into the overall TREMOD model for emissions reporting. TREMOD-AV enables standardized data queries and can also project traffic performance scenarios up to 2050.

The current calculation of non-CO₂ effects in TREMOD-AV is simplified. It does not consider variables such as flight route or specific emissions like H₂O and NO_x. Instead, it uses a lump sum calculation based on CO₂ emissions, the Emissions Weighting Factor (EWF), and the proportion of flight kilometers above 9 km. In TREMOD-AV, the flight kilometers above 9 km are defined for each distance class. CO₂ emissions above 9 km are multiplied by the EWF to approximate non-CO₂ effects. In TREMOD-AV a fixed EWF value of 2.4 is assumed. The total climate impact of a flight includes CO₂, N₂O, and CH₄ (in CO₂ equivalents) and non-CO₂ effects.

Estimating non-CO₂ effects of aviation is becoming more precise due to an improved understanding of physical and chemical processes in the atmosphere. However, it remains uncertain due to strong variation in meteorological conditions (Lee et al. 2021). Non-CO₂ effects account for about two-thirds of the total climate effect of aviation and are primary caused by water vapor (H₂O), nitrogen oxides (NO_x) and aerosols. Water vapor has a direct warming effect and forms contrails, the influence of which depends on latitude and time of day. Nitrogen oxides lead to the formation of ozone, which has both a warming and a cooling effect. Global warming caused by NO_x increases with latitude and altitude of emissions. Overall, NO_x emissions contribute to the global warming effect, whereby this is intensified with increasing altitude.

DLR developed a robust method using limited information to calculate flights' non-CO₂ effects (Thor et al. 2023). It is based on flight schedule data of 2012. Trajectories of 57,631 flights were simulated and categorized into seven groups based on passenger capacity and aircraft type. NO_x, CO₂, and H₂O distributions were calculated along trajectories. The AirClim model determined the climate effects of these emissions. Due to the high variance in climate effects per emission location, a single-function model for non-CO₂ effects is inaccurate. Therefore, a K-Means clustering algorithm grouped flights into four clusters: short-haul, tropical, mid-latitude, and small aircraft. Each cluster has specific climate effect contributions, considering NO_x, H₂O, and contrails.

Based on the estimated climate effects, climate effect functions are derived that represent the entire climate effect as regression formulas. Input variables are the flight distance along a great circle, mean latitude along the great circle and fuel consumption for calculating CO₂, H₂O and NO_x emissions. The coefficients of the functions vary depending on the aircraft type and cluster. The calculation rules derived from the cluster analysis are implemented directly in TREMOD-AV. It is emphasized that the functions remain constant, although in reality they might change over time. The functions and their parameters were estimated using flight plan data from 2012. However, some aspects are constantly changing and may differ from 2012. These include technological developments in aircraft and changes in emissions behavior, flight route adjustments and environmental conditions (temperature, air pressure, etc.). These aspects might have an influence on non-CO₂ effects. It would therefore be desirable to check when and how the climate impact calculation should be adjusted. Overall, however, the cluster analysis enables a more precise assessment of the non-CO₂ effects of air transport and supports the development of strategies to reduce climate impacts.

To assess the climate impact, metrics are used to represent the relationship between emissions and their effects. A general metric for all properties does not exist, so different metrics are used depending on the issue. Metrics such as Average Temperature Response (ATR) and Absolute Global Warming Potential (AGWP) are used to compare the climate impact of non-CO₂ effects with CO₂ emissions. The choice of metric depends on the time period under consideration. Short-term metrics focus on non-CO₂ effects, while long-term metrics weight CO₂ effects more. ATR takes into account lifetimes, climate sensitivities and the inertia of the climate system and is recommended for the assessment of non-CO₂ effects in emissions trading. Compared to the AGWP, ATR has a more direct link to temperature change and evaluates pulse emissions and continuous emissions in the same way. With the DLR cluster model, the climate impact of non-CO₂ effects can be integrated over the ATR100 and AGWP100, i.e., the climate impact over 100 years.

In general, the integration of the cluster model does not change the method for accounting emissions and fuel consumption of TREMOD-AV. Among other things, this ensures that emissions can be calculated in the same way as in previous years and that there are no statistical breaks due to the integration of non-CO₂ effects. However, some model adjustments were made

as part of the project. Some of these were necessary in order to integrate the new method for calculating the non-CO₂ effects. In particular, the structural change in traffic volumes and the calculation of the great circle distances (GKD) should be mentioned here. However, there were also some model adjustments that are not directly related to the non-CO₂ effects. Adjustments were made to the calculation of emissions in the LTO cycle, to other air traffic (commercial traffic at small airports and non-commercial traffic) and to the allocation of emissions to the types of transport (passenger and freight traffic). The model adjustments lead to small changes in the calculated emissions from air traffic, even apart from the non-CO₂ effects. New functions were implemented, including the calculation of the average latitude of airport-pairs and the determination of the cluster based on various parameters such as flight distance and aircraft type. This determines the weighting factors for the impact components H₂O, NO_x and cirrus cloud formation. TREMOD-AV also calculates the non-CO₂ effects for flights not defined by the cluster model based on an average weighting factor. This increases the precision of the air transport emissions calculation.

In order to integrate the results of the cluster analysis, TREMOD-AV is extended with flight route data. TREMOD-AV uses the departure and destination airport coordinates to assign the flights to one of the clusters. The calculation of the center points between the airports is carried out using pyproj. Destatis (Federal Statistical Office) provided a new data structure with origin-destination airport-pairs that includes historical data up to 1990. This allows the calculation of great circle distances and traffic performance for passengers and freight. The extension enables the integration of the cluster model and replaces the previous aggregation according to distance classes. The calculation of the great circle distance is also the basis for the emissions calculation in the CCD phase, but a detour is included here as before. The data quality for other air traffic has been revised. The commercial traffic volumes at main airports (HVF) deviate in part from the old data. These deviations are particularly evident before 1997, while they are minimal thereafter. The mean flight distance is now calculated based on departure and destination airports, which leads to smaller deviations. Previously, mean values for flight distance classes were used, which were not always representative. These changes are also reflected in the emissions, with larger differences occurring before 1997, while they are very small afterwards. The exact causes of the deviations could not be fully clarified during the project, but the overall data quality has improved.

Although the cluster model could be implemented in TREMOD-AV without major methodological problems, there are gaps in the calculation of non-CO₂ effects because TREMOD-AV also contains flights that are not covered by the cluster model. This concerns aircraft that do not have jet engines - helicopters and propeller aircraft. For helicopters and propeller aircraft with piston engines, the assumption is made that no non-CO₂ effects arise. Due to the flight altitudes and distances involved, this assumption seems valid, although the climate impact could be the subject of further studies. In the case of turboprop aircraft, such an assumption is less obvious, as with jet engines, a gas turbine is also used and therefore comparable emission conditions arise and similar flight altitudes are reached. However, as both aspects differ from representative passenger aircraft in the DLR model, the applicability of the cluster model would have to be examined. Applicability is, however, assumed in the current implementation.

TREMOD-AV calculates CO₂ and NO_x emissions per aircraft type instead of seat class as in the cluster analysis. This allows a more precise utilization of different emission profiles. However, this could cause allocation problems, for example with cargo aircraft that cannot be clearly assigned to seat classes. This also applies to different seat configurations of an aircraft type. Assignment problems arise if an aircraft type is on the edge of two seating categories and could therefore fall into one of the two categories depending on the assumption of the number of seats

(statically assumed in TREMOD-AV for each aircraft type). Thus, depending on the assumption of the number of seats per aircraft type, a different function with different parameters would be used in the cluster model.

The implementation of the cluster model in TREMOD-AV is limited in case of further air transport at small airports. As the data for further air transport does not contain any information on origin and destination airports, the "short flight" cluster function is used for this type of air transport. This allows the non-CO₂ effects of aircraft with jet engines and turboprops to be estimated based on the assumed flight distance. This method is based on a regression function developed in the cluster analysis for short-haul flights. Although the exact origin-destination information is missing, the assumed distance allows a rough estimate of the non-CO₂ effects for further air transport. Otherwise, the same restrictions and assumptions apply to further air transport as to commercial air traffic at main airports.

The estimations of TREMOD-AV will be transferred annually in aggregated form to the TREMOD main module. This interface is therefore retained. However, the scenario is now also part of TREMOD-AV and is therefore also transferred to the TREMOD main module. Previously, the scenario calculation took place in the main module. The calculation of the non-CO₂ effects remains the same as before for the scenario years up to 2050, but adjustments must be made to the more detailed representation of the scenario.

The old structure of the scenario calculation does not consider any information on origin-destination airports, which are necessary for the implementation of the cluster analysis. The new scenario therefore uses the DLR air traffic forecast model to take future developments of origin-destination airports into account. The DLR air traffic forecasting model provides a forecast of passenger and flight growth for worldwide airport pairs. The forecast is based on booking data from commercial providers such as Sabre Market Intelligence and is carried out using an econometric gravity model. Drivers of air traffic volumes are GDP per capita, population size and ticket price. Future airport and aircraft capacities are forecast, considering capacity constraints and externalities. The fleet forecast refers to the existing fleet, aircraft retirement and potential new aircraft types. The DLR air traffic forecast model thus offers detailed forecasts of commercial passenger air traffic up to 2050, differentiated by departure and destination airports, aircraft sizes and passenger volumes.

The structure of the DLR air traffic forecast model matches the Destatis data. The level of detail and forecasting capability of the DLR air traffic forecast model with the structure of Destatis data enables a precise analysis and forecast of air traffic development in Germany up to 2050. Nevertheless, there are some limitations. During the integration of the DLR air traffic forecast model, deviations in the system boundaries and, in some cases, the data became apparent.

This problem has been reduced by aggregations, but future updates of the scenario should ensure that the baseline years are based on the same database, that the system boundaries can be adequately defined and that the same definitions of aircraft types are used. Aircraft emissions are based on the previous assumptions of the TREMOD trend scenario, with annual improvements for fuel consumption, NO_x and PM. The DLR air traffic forecast model only provides data for passenger traffic, so freight traffic and non-commercial air traffic are added. For freight traffic, the relative developments are based on past trends, with assumptions for by-cargo and cargo aircraft. For non-commercial air traffic, the same assumptions apply as for commercial air traffic.

Due to the integration of the cluster analysis, it is necessary to migrate TREMOD-AV from Access to Python. This step is necessary due to bottlenecks in data processing and the low execution speed of Access. The new Python program offers flexibility and significantly shortens computing

times. The model integrates airport coordinates, cluster membership, effect determination, calculation of great circle distance, flight distance, weighting factors and the determination of greenhouse gas equivalents.

The updated TREMOD-AV version, which includes the cluster model for the calculation of non-CO₂ effects, is used to calculate the climate impact of air traffic since 1990. The results presented offer insights into the development and composition of the climate impact of German air traffic and contribute to a better understanding of the effects of air traffic on climate change. Furthermore, the recalculation of the historical values allows a comparison with the old calculation method.

The climate impact of air traffic from Germany shows a significant increase from 1990 to 2019. While greenhouse gas emissions rose from 13.6 to 29.7 million tons of CO₂ equivalent (CO_{2eq}) (+119%), the climate impact of non-CO₂ effects increased from 33.4 to 74.7 million tons of CO_{2eq} (+184%), with NO_x emissions playing a particularly significant role. The share of non-CO₂ effects in the overall climate impact rose from 71% to 76%, which is mainly due to the sharp increase in international flights. In terms of non-CO₂ effects, NO_x emissions account for almost two thirds, while water and cirrus cloud formation each account for around 10% and 27% respectively. The trend shows a slight decrease in H₂O effects due to increasing fuel efficiency.

In 2023, international flights accounted for 98% of the climate impact of all flights departing from Germany. In terms of greenhouse gas emissions, international flights accounted for 95%. European flights (excluding national flights) had the largest share of the climate impact (33%), followed by flights to Asia and America with 28% each. Flights landing outside Europe not only had longer flight distances, but also higher non-CO₂ effects. In 2023, a flight to another continent had an ATR100 factor of around 5, while flights to Europe had a factor of only 3.4. However, when the climate impact per passenger kilometer is considered, the effects differ less between the destination continents. European and domestic flights have a higher share of emissions in the take-off, landing and taxiing (LTO) phase compared to other phases of the flight.

Compared to the previously used EWF, the climate impact of air traffic is now significantly higher. Instead of a weighting factor (in relation to direct CO₂ emissions) of 2.1 according to the old method, this now results in a factor of 4.3 for the year 2023. This means that the non-CO₂ effects for flights from Germany account for 77% of the climate impact. (Lee et al. 2023) and (Arrowsmith et al. 2020) put the share for global flights at approx. 66 %. The components NO_x, cirrus cloud formation and H₂O account for an average of 63%, 27% and 10% of the non-CO₂ effects respectively.

The scenario up to 2050 shows an increase in the climate impact of air traffic after the coronavirus years. By 2035, the 2019 level is reached again, having risen significantly by 2025. The traffic volume then stagnates until 2030 and then increases again. The climate impact decreases during the stagnation period 2025-2030, due to the assumption of a steady improvement in engine efficiency and specific NO_x emissions. After 2030, the climate impact increases again, as traffic performance rises sharply. The specific climate impact falls from 478 g CO_{2eq}/km (2023) to 310 g CO_{2eq}/km (2050), with the share of non-CO₂ effects in the total climate impact falling from 77% (2030) to 58% (2050). This is mainly due to the disproportionate improvement in NO_x emissions compared to fuel consumption. This reduces the ATR100 from 4.3 in 2023 to 3.9 in 2050.

Theoretically, it is possible to extend the scenario module. It would be conceivable to calculate further scenarios with measures such as flight route adjustments to reduce the overall climate impact or the use of alternative fuels. However, it is questionable to what extent or with what accuracy the cluster model delivers robust results if one moves too far away from the modeled

aircraft types. It is planned that the non-CO₂ effects will initially be included in the EU ETS from 2025 via a monitoring, reporting and verification system and later with a levy obligation. This reflects the (future) role of non-CO₂ effects. The calculation in TREMOD-AV is not suitable for the precise balancing of individual flights and therefore not suitable for the planned monitoring. It therefore contains no information on the flight-specific routes, environmental conditions and emissions that would be necessary for monitoring. In contrast, it only represents a valid calculation of average values and has large uncertainties at individual flight level, see also (Dahlmann et al. 2023). A detailed calculation at individual flow level is conceivable in principle in the current system architecture used and TREMOD-AV can be extended to this end, but this would imply a comprehensive adaptation of the methodology and the input data. Currently, data from Destatis with origin-destination information is used, which does not contain any explicit information on flight routes.

As part of the cluster analysis, DLR has provided an Excel calculator that can be used to determine the non-CO₂ effects of a flight. This calculator is used to check the plausibility of the TREMOD-AV results. The calculator uses the same methodology, but there are two differences to the calculation in TREMOD-AV. For the comparison, the year 2019 was used as an example and all flights that are not defined by the DLR calculator were excluded from the analysis. This means that almost 950,000 flights in 2019 can be compared. Significant differences between the two models can be identified. The CO₂ emissions and thus the fuel consumptions are 12% higher in TREMOD-AV than in the Excel calculator. This already means that the overall climate impact is higher in TREMOD-AV. On the other hand, the significantly higher NO_x emissions in TREMOD-AV have an even greater impact. These are approx. 45% higher in TREMOD-AV than in the Excel calculator and therefore also the climate impact.

The deviation is mainly due to different emission factors. The data basis for the emission factors in TREMOD-AV is mainly the "Master Emissions Calculator (MEC)" (EEA 2019). When comparing the emission factors of the Excel calculator with the factors of the respective aircraft types from the MEC, the MEC results in significantly higher values for CO₂ and NO_x per aircraft kilometer. The cause of the significant deviations and the impact on the non-CO₂ effects cannot be conclusively clarified within the scope of the project. The extent to which the integration of the DLR model in TREMOD-AV leads to further uncertainties in the calculation of the climate impact due to these discrepancies therefore remains open and cannot be fully clarified within the scope of the project.

Further improvements can be made to the model in future adjustments to the calculation of non-CO₂ effects or in the annual TREMOD updates. These include, among other things, the integration of other climate metrics. The ATR100 is currently implemented as the standard (basis of the calculation results shown) as well as the AGWP100. The integration of the EAGWP100, for example, is possible without great effort due to the given conversion tables in the cluster analysis. In general, it is important to consider which climate metric should be used in which context. The results vary greatly depending on the metric used.

1 Randbedingungen und Zielsetzung des Projekts

Die Klimawirkung von Luftverkehrsemissionen ist vergleichsweise komplex. Sie ergibt sich aus der Emission von Treibhausgasen (insb. CO₂) sowie den sogenannten Nicht-CO₂-Effekten. Diese Effekte resultieren vor allem durch die Emission von Stickoxiden, Wasserdampf und Partikeln in hohen Luftschichten (Lee et al. 2009). CO₂-Emissionen haben eine vom Emissionsort unabhängige Klimawirkung. Die CO₂-Emissionen lassen sich direkt aus dem Treibstoffverbrauch errechnen. Das Entstehen der Nicht-CO₂-Effekte und die resultierende Klimawirkung ist hingegen ortsabhängig. Den Effekt beeinflussen die Umgebungsbedingungen am Emissionsort, weshalb zusätzliche Parameter – neben dem Treibstoffverbrauch – benötigt werden (Dahlmann et al. 2023). Eine möglichst genaue Berücksichtigung der klimawirksamen Emissionsbestandteile des Luftverkehrs ist wichtig, da es ansonsten zu Fehlanreizen kommen kann, wenn zum Beispiel Flugzeugantriebe entwickelt werden, die zwar CO₂-Emissionen reduzieren, dabei aber gleichzeitig den Stickoxidausstoß überproportional erhöhen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der hohen Wachstumsraten des Luftverkehrssektors relevant, wodurch sein Anteil an den weltweiten Gesamtemissionen kontinuierlich steigt (Siemons et al. 2015).

Das Emissionsberechnungsmodell TREMOD (Transport Emission Model) des Umweltbundesamts ermöglicht über das Modul TREMOD-AV eine Abschätzung der jährlichen deutschen Luftverkehrsemissionen und deren Klimawirkung (Knörr, Wolfram et al. 2012). Das nachfolgende Umsetzungskonzept bildet die Grundlage, um eine genauere Erfassung der Klimawirkung – insb. der Nicht-CO₂-Effekte – des Flugverkehrs in TREMOD-AV zu ermöglichen. Hierbei fließen 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“ mit ein.

Die CO₂-Emissionen des in Deutschland startenden Luftverkehrs können durch TREMOD-AV mithilfe von differenzierten Verkehrsdaten relativ genau bestimmt werden. Die Nicht-CO₂-Effekte der Luftverkehrsemissionen werden im Modell bisher stark vereinfacht mit einem allgemeinen Faktor (Emission Weighting Factor: EWF) abgebildet, der die gesamte Klimawirkung zum CO₂ ins Verhältnis setzt. Eine solche Approximation kann unter Umständen jedoch sehr ungenau sein (Forster et al. 2006). Konkret bedeutet die Anwendung eines allgemeinen Faktors, dass die einzelflugspezifischen Klimateffekte nicht hinreichend berücksichtigt werden. Für deren präzise Berechnung werden nicht nur die Emissionen der Luftfahrzeuge, sondern auch die Hintergrundbedingungen von unterschiedlichen Klimazonen, Winden und Wetter benötigt.

Vor diesem Hintergrund werden in diesem Bericht die Anpassungen an TREMOD-AV beschrieben, mit deren Hilfe sich die Bestimmung von Nicht-CO₂-Effekten anhand der Start-Ziel-Verbindungen aus der Clusteranalyse (Projekt 3720 42 502 0) in TREMOD-AV integrieren lässt. Die Flugroute ist hierbei durch die Start-Ziel-Flughafenkombination definiert.

Zunächst wird die bisher verwendete Methodik zur Berechnung der Emissionen und der Nicht-CO₂-Effekte in TREMOD-AV beschrieben (Abschnitt 2). Im Kapitel 3 erfolgt die Erläuterung des Clustermodells, das in TREMOD-AV zu integrieren ist. Im drauf folgenden Abschnitt 4 werden die nötigen Anpassungen an TREMOD-AV sowie den Eingangsdaten beschrieben.

Abschnitt 5 stellt die Klimawirkungen inkl. der Nicht-CO₂-Effekte des deutschen Flugverkehrs nach TREMOD-AV unter Berücksichtigung der integrierten Clusteranalyse dar. Es wird zudem ein Vergleich mit der alten Methodik unter Verwendung des EWF gezogen.

Abschließend erfolgt im Resümee und Ausblick (Kapitel 6) eine kritische Würdigung der Ergebnisse. Hier werden die Grenzen sowie Ungenauigkeiten des Modells und der weitere Forschungsbedarf dargelegt.

Abgesehen kleiner Flugzeugtypen (z. B. Sitzplatzanzahl 20-100), die immer dem Cluster „Kleinflugzeuge“ zugeordnet werden, erfolgt die Zuweisung wie folgt:

- ▶ Flüge mit einer Flugdistanz (Realdistanz) unter 462 Kilometern werden allgemein dem Kurzflug-Cluster zugeordnet.
- ▶ Flüge dessen geographischer Mittelpunkt zwischen dem $-29,7^\circ$ und $+29,7^\circ$ Breite liegen werden dem Tropen-Cluster zugeordnet.
- ▶ Die sonstigen Flüge werden dem Cluster der „Mittleren Breiten“ zugeteilt.

2 Beschreibung – TREMOD-AV

2.1 Bilanzierung der Verbräuche und Emissionen

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 und ist über (AG Energiebilanzen o.J.) gegeben. Diese ist jedoch nicht, wie gefordert, nach nationalem und internationalem Flugverkehr differenziert, weshalb eine Aufteilung anhand der in TREMOD-AV ermittelten Verbräuche erfolgt. Grundlage für die Berechnung sind die Verbräuche der von Deutschland abgehenden Flüge, da diese die in Deutschland getankten Kraftstoffmengen am besten abbilden (Knörr, Wolfram et al. 2012). Somit unterliegt die in TREMOD-AV ermittelte Emissionsmenge und die daraus berechnete Klimawirkung einem vorgegebenen Rahmen. Emissionen von internationalen Flügen mit dem Ziel Deutschland finden in der Emissionsbilanzierung des deutschen Flugverkehrs keine Beachtung und werden dem jeweiligen Startland zugeteilt. Es werden lediglich internationale Flüge mit Start von einem deutschen Flughafen bis zur ersten (Zwischen-)Landung bilanziert.

Verkehrsdaten und Emissionsfaktoren stellen die Grundlage für die Verbrauchs- und Emissionsberechnung in TREMOD-AV dar. Allgemein kann ein Flug in zwei Phasen eingeteilt werden. Zum einen in den Landing and Take-off cycle (LTO) und zum anderen in die Climb Cruise Descent-Phase (CCD). Die Emissionen innerhalb einer Flugphase ergeben sich aus dem Produkt der jeweiligen verkehrlichen Größe und den dazugehörigen flugzeugtypenspezifischen Emissionsfaktoren. Die Gesamtemission bzw. -verbrauch eines Flugs setzt sich aus der Summe beider Phasen zusammen und wird pro Flugzeugtyp über die folgenden Gleichungen dargestellt.

$$\text{Gesamt: } E = E_{LTO} + E_{CCD} \quad (\text{I})$$

$$\text{LTO: } E_{LTO} = E_{LTO,ohneTaxi} + t \cdot e_{LTO,Taxi} \quad (\text{II})$$

$$\text{CCD: } E_{CCD} = d \cdot e_{CCD} \quad (\text{III})$$

mit

E	-	Gesamtemissionen des Flugs [kg]
E_{LTO}	-	Emissionen in der LTO-Phase [kg]
E_{CCD}	-	Emissionen in der CCD-Phase [kg]
$E_{LTO,ohneTaxi}$	-	Emissionen während Take-off, Climb-out und Approach [kg]
t	-	Dauer von Taxi-out und Taxi-in [s]
$e_{LTO,Taxi}$	-	Emissionen während Taxi-out und Taxi-in [kg/s]
d	-	Flugdistanz [km]
e_{CCD}	-	Spezifische Emissionen während der Flugphase [kg/km]

In TREMOD-AV wird eine Vielzahl an THG- und Schadstoffemissionen bilanziert. Neben den Treibhausgasen CO₂, N₂O und CH₄ werden u. a. auch für die Nicht-CO₂-Effekte relevanten Emissionen NO_x, CH₄ und H₂O bilanziert. Die Berechnung der Emissionen erfolgt auf Flugzeugtypenebene. Das heißt über Statistiken ist bekannt, welche Flugzeugtypen (z. B. Airbus A320) von welchem Flughafen wie oft starten, wie weit sie fliegen (z. B. 900-1.000 km) und ob die Flüge national oder international sind. Diese Angaben werden verwendet, um die jeweilige

Größe (Anzahl Starts, Flugzeug-km, durchschnittliche Taxi-Zeit) mit dem jeweiligen Emissionsfaktor des Flugzeugtyps nach o. g. Berechnungslogik zu multiplizieren. Man erhält die Emissionen pro Flugzeugtyp, Distanzklasse und Relation. Die Gesamtwerte für Deutschland ergeben sich aus der Summe aller Einzelflüge, die von deutschen Flughäfen starten.

Die zusammengefassten Werte des Flugverkehrs werden anschließend über eine Schnittstelle in das TREMOD-Gesamtmodell überführt, wo sie für die Emissionsberichterstattung aufbereitet werden. Im TREMOD-Hauptmodul werden ggü. TREMOD-AV Flugzeugtypen zusammengefasst und Flugdistanzen gröber aggregiert.¹ Zusätzlich ist es in TREMOD (nicht aber in TREMOD-AV) möglich Flugverkehrsszenarien zu berechnen. Die Szenarien basieren auf Annahmen zur Verkehrsleistungsentwicklung, Flottenentwicklung und Auslastung. Aktuell können Szenarien bis zum Jahr 2050 berechnet werden (Knörr, Wolfram et al. 2012).

Wie das TREMOD Hauptmodul ist auch TREMOD-AV zurzeit in MS Access implementiert. Neben der genannten Datenschnittstelle zum Hauptmodul bietet TREMOD-AV auch ein Formular, das standardisierte Datenabfragen ermöglicht.

2.2 Bilanzierung der Nicht-CO₂-Effekte

Der Nicht-CO₂-Effekt bzw. die hieraus resultierende Klimawirkung werden aktuell in vereinfachter Form ermittelt. Hierbei werden weder Randbedingungen wie Flugroute, Winde etc. noch die flugspezifischen Emissionen (z. B. H₂O, NO_x) in der Berechnung der zusätzlichen Klimawirkung berücksichtigt. Stattdessen wird eine pauschale Berechnung vorgenommen, die auf Basis der CO₂-Emissionen, des EWF und des Anteils der Flugkilometer oberhalb von 9 km erfolgt. In TREMOD-AV ist jeder Distanzklasse der Anteil der Flugkilometer definiert, der oberhalb von 9 km stattfindet. In Tabelle 1 ist ein Auszug dieser Anteile gegeben.

Tabelle 1: Anteil der Flugdistanz in der CCD-Phase oberhalb von 9 km Flughöhe

Distanzklasse	Anteil CCD<9km ($a_{CCD<9km}$)	Anteil CCD≥9km, ($a_{CCD≥9km}$)
≤500km	100%	0%
500-600km	82%	18%
...
900-1.000km	32%	68%
1.000-1.100km	25%	75%
1.100-1.200km	24%	76%
1.200-1.300km	23%	77%
1.300-1.400km	22%	78%
1.400-1.500km	21%	79%
...

Quelle: TREMOD-AV. Anmerkung: Wegen der Übersichtlichkeit wurde lediglich ein Auszug der Anteile dargestellt. Generell gilt: Je weiter die Flugdistanz desto höher ist der Fluganteil oberhalb von 9 km.

¹ Zum Beispiel für das Referenzjahr 2020: 158 Flugzeugtypen in TREMOD-AV ggü. 56 Flugzeugklassen in TREMOD (z. B. „Cessna 210“, „Beech A36“ etc. zu „Other Props“) und 38 Distanzklassen in TREMOD-AV ggü. 6 Distanzklassen in TREMOD (z. B. „100-200km“, „200-300km“ etc. zu „≤500km“).

Der Nicht-CO₂-Effekt (*NonCO₂*) entspricht den CO₂-Emissionen in der CCD-Phase multipliziert mit dem Anteil Flugstrecke oberhalb von 9 km und dem festgelegten EWF-1:

$$NonCO_2 = CO_{2,CCD} \cdot a_{CCD \geq 9km} \cdot (EWF - 1) \quad (IV)$$

mit

<i>NonCO₂</i>	-	Klimawirkung durch Nicht-CO ₂ -Effekte
<i>CO_{2,CCD}</i>	-	CO ₂ -Emissionen in der CCD-Phase [kg]
<i>a_{CCD ≥ 9km}</i>	-	Anteil der Flugstrecke der CCD-Phase oberhalb von 9 km Flughöhe [-]
<i>EWF</i>	-	Emission Weighting Factor = 2,4 [-]

Der EWF ist in TREMOD mit einem festen Wert in Höhe von 2,4 angenommen. Die gesamte Klimawirkung eines Fluges setzt sich aus den Treibhausgasen CO₂, N₂O und CH₄ (in CO₂-Äquivalenten) sowie den Nicht-CO₂-Effekten zusammen. Die Klimawirkung wird aktuell in TREMOD-AV über folgende Gleichung errechnet:

$$CO_{2,ewf} = CO_{2,LTO} + CO_{2,CCD} + f_{N_2O} \cdot N_2O + f_{CH_4} \cdot CH_4 + NonCO_2 \quad (V)$$

mit

<i>CO_{2,ewf}</i>	-	Gesamte Klimawirkung [kg CO ₂ -Äquivalente]
<i>CO_{2,LTO}</i>	-	CO ₂ -Emissionen in der LTO-Phase [kg]
<i>CO_{2,CCD}</i>	-	CO ₂ -Emissionen in der CCD-Phase [kg]
<i>f_{N₂O}</i>	-	Treibhauspotenzial N ₂ O [kg CO _{2eq} /kg N ₂ O]
<i>N₂O</i>	-	N ₂ O-Emissionen in beiden Phasen [kg]
<i>f_{CH₄}</i>	-	Treibhauspotenzial CH ₄ [kg CO _{2eq} /kg CH ₄]
<i>CH₄</i>	-	CH ₄ -Emissionen in beiden Phasen [kg]
<i>NonCO₂</i>	-	Klimawirkung durch Nicht-CO ₂ -Effekte

Bezieht man die gesamte Klimawirkung auf die gesamten CO₂-Emissionen eines Jahres erhält man einen Faktor von ca. 2. Dieser variiert zwischen den Jahren um max. 5 %. Der Faktor ist kleiner als der angegebene EWF, da die Emissionen unterhalb von 9 km nicht gewichtet werden.

2.3 Datenbasis Verkehrsmengen

Die Verbrauchs- und Emissionsberechnung erfolgt flugzeugtypenspezifisch auf Basis der aggregierten Anzahl an gewerblichen Starts und des Verkehrsaufkommens aus Deutschland abgehender Flüge pro Distanzklassen und Relation. Die Relation richtet sich in diesem Kontext nach der Lage des Zielflughafens: national, international. Anhand der Daten erfolgt eine Aufteilung der Verbräuche und Emissionen auf den nationalen bzw. internationalen Personen- und Güterverkehr. Die Verkehrsdaten werden von Destatis für deutsche Hauptverkehrsflughäfen (HVF) in einer Sonderauswertung jährlich zur Verfügung gestellt und liegen für den Zeitraum seit 1990 vor. Tabelle 2 zeigt exemplarisch einen Auszug der Daten aus der Sonderauswertung für das Jahr 2020.

Die Distanzklassen sind in der Statistik 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 in TREMOD-AV berücksichtigt, siehe (Knörr, Wolfram et al. 2012).

Tabelle 2: Exemplarischer Auszug der aktuell in TREMOD verwendeten Verkehrsdaten

Dargestellt ist ein Auszug der Verkehrsmengen des Jahres 2020 auf den HVF (Starts und Aufkommen)

Flugzeugtyp	km-Stufen*	Relation	Starts	Passagiere	Fracht** [t]
Boeing B 737-600	1.201-1.300	international	3	191	0
Boeing B 737-600	1.601-1.700	international	21	1.649	0
Boeing B 737-600	2.001-2.500	international	14	1.289	0
Airbus A321-100	3.001-3.500	international	72	12.118	3
Airbus A321-100	301-400	national	24	1.997	0
Boeing B 757-300	1.501-1.600	international	3	624	0
Boeing B 757-300	2.001-2.500	international	172	40.018	5
Boeing B 757-300	201-300	national	2	206	0
Boeing B 757-300	901-1.000	international	2	193	0
Airbus A380	5.001-5.500	international	163	56.396	2.001
Airbus A380	6.001-6.500	international	105	32.437	700
Airbus A380	8.001-8.500	international	65	26.752	529
...

Quelle: Sonderauswertung der Daten, aggregiert enthalten in (Destatis 2021). Anmerkung: *In TREMOD wird aktuell vereinfacht der Mittelwert aus Ober- und Untergrenze der km-Stufe für die Emissionsberechnung verwendet; **Inkl. Post.

In der Sonderauswertung sind neben den oben beschriebenen Verkehrsdaten zusätzlich die Anzahl Starts differenziert nach Flugzeugtyp und Relation pro Hauptverkehrsflughafen gegeben (z. B. 117 internationale Starts des Airbus A320neo von Berlin-Brandenburg im Jahr 2020). Diese Tabelle weist keine Verknüpfung zu den o. g. Daten (Tabelle 2) auf und somit können keine Rückschlüsse auf die spezifischen Start-Ziel-Verbindungen gezogen werden. Diese Information wird aktuell lediglich für die Ermittlung der durchschnittlichen Taxi-Zeiten pro Flugzeugtyp verwendet. Die Taxi-Zeiten pro Flughafen sind über Statistiken von EUROCONTROL (Eurocontrol 2021) in TREMOD-AV integriert. Somit weist jeder Flugzeugtyp spezifische Taxi-Zeiten auf, die für die Berechnung der Emissionen in der LTO-Phase verwendet werden (Allekotte et al. 2020).

Die Starts des nicht-gewerblichen Flugverkehrs und des gewerblichen Flugverkehrs auf den sonstigen Flugplätzen sind in der o. g. Sonderauswertung (nur gewerbliche Starts auf HVF) nicht enthalten und werden über (Statistisches Bundesamt (Destatis), und Genesis-Online 2023) erfasst. Verglichen mit den Hauptverkehrsflughäfen liegen beim sonstigen Flugverkehr weniger Informationen vor, sodass hier Annahmen z. B. bezüglich der Flugdistanzen und Relation getroffen werden. Der sonstige Flugverkehr weist nur geringe Anteile an den Gesamtemissionen auf. Dadurch haben die Ungenauigkeiten keine signifikanten Auswirkungen auf das Gesamtergebnis.

Der sonstige Flugverkehr ist über die Anzahl Starts pro Größenklasse gegeben. Es werden folgende sieben Größenklassen (MTOW) bei den gewerblichen Flügen auf kleinen Flugplätzen sowie dem nicht-gewerblichen Verkehr differenziert: „Motorflugzeuge bis 2t“, „Motorflugzeuge >2t bis 5,7t“, „Motorflugzeuge >5,7t bis 14t“, „Motorflugzeuge >14t bis 20t“, „Motorflugzeuge größer 20t“, „Hubschrauber“ und „Luftschiffe“.

Bisher wurden jährlich die sechs am häufigsten auf den HVF gestarteten Flugzeugtypen (IDAC) innerhalb einer Größenklasse herangezogen, um die Anzahl Starts je Größenklasse auf Anzahl Starts je Flugzeugtypen zu beziehen. Zudem wurden Anteile für die Relation (national, international), die Flugweite (Distanzklasse) und das Verkehrsaufkommen (nur PV, kein GV) je Größenklasse angenommen. Somit konnte der sonstige Flugverkehr in die Form der HVF übertragen werden und analog berechnet werden.

2.4 Datenbasis Emissionsfaktoren

Zur Emissionsbestimmung des Flugverkehrs wird in TREMOD-AV auf flugzeugtypenspezifische Emissionskennzahlen zurückgegriffen, welche flugphasen- und distanzabhängig sind. Bilanziert werden bisher die Emissionskomponenten Ruß, Benzol, CH₄, CO, CO₂, CO₂-Äquivalente, HC, N₂O, NH₃, NMHC, NO_x, Partikel, SO₂, H₂O, Toluol und Xylol. Der Energieverbrauch und die Emissionen werden überwiegend mit den Kennzahlen der EMEP/EEA (EEA 2019) berechnet, die in der Differenzierung nach Flugzeugtypen und Flugphasen vorliegen. Jedem Flugzeugtyp der Destatis-Verkehrsdatenbank wird ein Set an Emissionsfaktoren zugeordnet. Die Emissionsfaktoren liegen in der Struktur nach Tabelle 3 vor.

Tabelle 3: Exemplarischer Auszug (Verbrauch) der verwendeten Emissionsfaktoren

Dargestellt ist ein Auszug der Emissionsfaktoren; hier am Beispiel des Verbrauchs. Die Faktoren sind pro Flugzeugtyp zudem für die o. g. Emissionen gegeben. Die Bezeichnungen folgen den oben beschriebenen Gleichungen.

Flugzeugtyp	e _{LTO,ohneTaxi} [kg/Start]	e _{LTO,Taxi} [kg/s]	e _{CCD125} [*] [kg/km]	e _{CCD250} [*] [kg/km]	...
Boeing B 737-600	408	0,2	3,65	3,29	...
Airbus A321-100	605	0,273	4,94	4,39	...
Boeing 757-300	864	0,38	6,00	5,42	...
Airbus A380	2.260	1,2	19,44	17,51	...
...

Quellen: Abgeleitet überwiegend aus (EEA 2019) und ergänzt durch (BAZL 2009), (BAZL 2017) und (ICAO 2019). Anmerkung:

*Die Emissionsfaktoren pro Distanzklasse werden in der Quelle in nautischen Meilen angegeben, aber hier dargestellt in km. Diese werden in TREMOD-AV den zugehörigen Distanzklassen in km nach Destatis zugeordnet.

Fehlende Werte werden zum Teil anhand passender Vergleichsgruppen oder anderer Datenbanken wie der ICAO Turbinendatenbank (ICAO 2019) oder der Datenbanken des BAZL (BAZL 2009) und (BAZL 2017) ergänzt. Die Angaben des BAZL beziehen sich auf Propellermaschinen und Hubschrauber. Beide weisen keinen hohen Anteil an den Klimawirkungen auf. Zudem wird die Turbinendatenbank verwendet, um Turbinen- und Turbo-Prop-Maschinen, die nicht über die EMEP/EEA gegeben sind, zu ergänzen. Die Emissionsfaktoren dieser ergänzenden Quellen werden in dasselbe Format wie in Tabelle 3 überführt.

3 Beschreibung – Clustermodell zur Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte

3.1 Physikalische Hintergründe

Für ein besseres Verständnis der Clusteranalyse werden zunächst die physikalischen Hintergründe der Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs beschrieben. Im Luftverkehr tragen neben CO₂-Emissionen auch Nicht-CO₂-Emissionen zur Erderwärmung bei. Aufgrund ihrer Langlebigkeit werden CO₂-Emissionen gleichmäßig in der Atmosphäre verteilt, weshalb ihr Klimaeffekt unabhängig vom Ort der Emission ist. Im Gegensatz zur Wirkung von CO₂ hängen die Auswirkungen von Nicht-CO₂-Emissionen, abgesehen von den emittierten Mengen, vom Emissionsort ab, insbesondere von der Flughöhe und der geografischen Breite, an der die Emission stattfindet. Nicht-CO₂-Effekte sind für etwa zwei Drittel des Gesamtklimaeffekts des Luftverkehrs verantwortlich und werden vor allem durch die Emission von Wasserdampf (H₂O), Stickoxiden (NO_x) und Aerosolen verursacht. Vor allem die Auswirkungen von Kondensstreifen und NO_x-Emissionen erhöhen hierbei den Klimaeffekt (Lee et al. 2021).

Der Wasserdampf hat zum einen eine direkte wärmende Wirkung, indem er verhindert, dass die von der Erde abgestrahlte Wärme ins Weltall entweicht. Der Einfluss von H₂O-Emissionen nimmt mit der Höhe beim Annähern an die Tropopause stark zu, da die atmosphärische Verweilzeit in der Troposphäre erheblich kürzer ist als in der Stratosphäre. Da die Höhe der Tropopause mit zunehmendem Breitengrad abnimmt, steigt der Einfluss von H₂O-Emissionen in gleicher Höhe mit dem Breitengrad. Zum anderen können sich durch den Wasserdampf Kondensstreifen bilden. Kondensstreifen bilden sich, wenn die Wasserdampfemissionen der Flugzeuge in der kalten, hohen Atmosphäre auf Kondensationskerne treffen und gefrieren. Diese Wolken können das Erdklima beeinflussen. Sie wirken einerseits kühlend, indem sie Sonnenlicht reflektieren, andererseits wärmend, indem sie abstrahlende Wärme zurückhalten. Der Nettoeffekt hängt unter anderem von der Tageszeit oder der Meteorologie ab (Grewe et al. 2014). Des Weiteren ist der Klimaeffekt abhängig von Ort und Höhe. In Regionen mit dichtem Luftverkehr treten Sättigungseffekte auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bildung von Kondensstreifen den umgebenden Wasserdampf reduziert und somit die Möglichkeit zur Bildung zusätzlicher Kondensstreifen in derselben Region verringert. Darüber hinaus haben zusätzliche Kondensstreifen über oder unter bereits bestehenden Kondensstreifen einen geringeren Strahlungseinfluss. Bei kurzen Flugdistanzen ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Kondensstreifen bilden geringer, da in niedrigen Flughöhen die Temperatur zu hoch für die Bildung von Kondensstreifen ist (Dahlmann et al. 2023).

Weitere wichtige Nicht-CO₂-Effekte entstehen durch Stickoxidemissionen. Diese Gase tragen zur Ozonbildung (O₃) bei, wodurch es zu einem wärmenden Effekt kommt, da die Wärmeabstrahlung der Erde gehemmt wird. Zusätzlich führen indirekte NO_x-Effekte zum Abbau von Methan (CH₄). Methan ist ein Vorläufer für Ozon, so dass eine Abnahme von Methan zu einer Verringerung des Hintergrundozons, das als PMO (primary mode ozone) bezeichnet wird, führt. Die heraus folgende Reduktion des Ozons hat einen kühlenden Effekt. Im Durchschnitt überwiegt der Erwärmungseffekt jedoch deutlich (Søvde et al. 2014). Die durch Ozonbildung verursachte Erderwärmung nimmt mit zunehmenden Breitengraden ab, aufgrund der abnehmenden photochemischen Aktivität der Atmosphäre. Andererseits ist der Methanabbau in den Tropen größer und in höheren Breiten geringer. Insgesamt steigt der Erderwärmungseffekt

durch NO_x -Emission mit den Breitengraden. Aufgrund der niedrigeren Hintergrundkonzentrationen von NO_x in der südlichen Hemisphäre ist der Erderwärmungseffekt von NO_x -Emissionen hier höher (Köhler et al. 2013). Der Erderwärmungseffekt von NO_x steigt mit der Höhe, in welcher die Emissionen ausgestoßen werden, da der Effekt durch Ozonbildung den Effekt des Methanabbaus mit zunehmender Höhe immer stärker überwiegt (Dahlmann et al. 2016).

3.2 Metriken

In (Dahlmann et al. 2023) werden die Grundlagen der Metriken für Klimawirkungsberechnung geschaffen. Der folgende Abschnitt fasst die relevantesten Informationen zusammen.

Die Klimawirkung des Luftverkehrs setzt sich aus der Wirkung einer Reihe von Klimaspezies zusammen, die in unterschiedlicher Art auf die Strahlungsbilanz wirken. Des Weiteren haben sie unterschiedliche Verweildauern, wodurch sie nicht unmittelbar in ihrer Wirkung vergleichbar sind. Zur Bewertung der Klimawirkung verschiedener Spurenstoffemissionen ist es daher notwendig, ein Maß (Metrik genannt) für den Vergleich zu haben. Dabei stellt eine Metrik den direkten Zusammenhang zwischen der Emission und der zu betrachtenden Wirkung (z. B. Strahlungsantrieb, Temperaturänderung oder Schaden) dar.

Eine allgemeine Metrik, mit der Emissionen in allen ihren Eigenschaften verglichen werden können, existiert nicht. Bezieht man sich jedoch auf lediglich eine Eigenschaft, so lassen sich unterschiedliche Emissionen miteinander vergleichen. Problematisch bei einer Metrik zum Vergleich der Klimawirkung ist, dass es keine genaue Definition des Begriffs „Klimawirkung“ gibt. Hierbei ist weder festgelegt, welche Wirkung untersucht wird (z. B. Temperaturänderung, Strahlungsantrieb), noch für welchen Zeitpunkt oder -raum die Wirkung zu betrachten sind. Für spezifische Fragen wie bspw. nach der Temperaturänderung im Jahr 2050, kann jedoch eine eindeutige Metrik angegeben werden.

Häufig wird die Klimawirkungen unterschiedlicher Klimaspezies anhand ihres jeweiligen Strahlungsantriebes verglichen. Aus der Multiplikation des Strahlungsantriebes mit der Klimasensitivität lässt sich die global gemittelte bodennahe Temperaturänderung bestimmen. Für Kondensstreifen-Zirren ist die Klimasensitivität zum Beispiel deutlich geringer als für Ozon.

Die Klimasensitivität ist zudem von den Emissionskonzentrationen abhängig. Sofern in künftigen Jahren die Emissionen weiter steigen, so ändert sich auch die Klimasensitivität und somit auch die Klimawirkung der Stoffe. Die Wirkung der Nicht- CO_2 -Effekte im Verhältnis zur Wirkung von CO_2 hängt zudem davon ab, für welchen Zeitpunkt/-raum die Temperaturänderung betrachtet wird.

CO_2 hat in den ersten Jahren nur einen geringen Einfluss auf die Temperatur. Da es sich durch die lange Verweildauer in der Atmosphäre anreichert, nimmt die Wirkung mit der Zeit zu. Auch die Wirkung von NO_x auf CH_4 zeigt zu Beginn eine geringe Wirkung, verstärkt sich allerdings in den folgenden Jahren und nimmt anschließend wieder ab. Die Temperaturverläufe von Kondensstreifen-Zirren, die von NO_x verursachte O_3 und H_2O sind ähnlich. Die Wirkung ist zu Beginn sehr stark, nimmt dann aber im Laufe der Zeit ab. In den ersten etwa 30 Jahren dominieren Kondensstreifen-Zirren und Ozon die Temperaturänderung, also die Nicht- CO_2 -Effekte, während anschließend die CO_2 -Effekte überwiegen.

Eine Möglichkeit, die Abhängigkeit vom Zeitraum zu reduzieren, ist die Mittelung der Wirkung über einen Zeitraum, wie es z. B. bei den Metriken Average Temperature Response (ATR) und Absolute Global Warming Potential (AGWP) gemacht wird. Allerdings beeinflusst auch hier der Zeitraum, über den gemittelt wird, das Verhältnis der Wirkungen von Nicht-CO₂-Effekten zu CO₂. Ein kurzer Zeitraum legt den Fokus auf Nicht-CO₂-Effekte, wogegen ein langer Zeitraum den Fokus auf CO₂ legt.

Für die Verringerung der Folgen des Klimawandels spielen sowohl die kurzen als auch die langen Zeiträume eine Rolle. Ein Mittelweg ist daher die Verwendung einer mittelnden Metrik mit einem langen Zeitraum, da dann sowohl die kurzfristigen als auch die langfristigen Effekte berücksichtigt werden. Eine Metrik, die sowohl kurz- als auch langfristige Temperaturänderungen berücksichtigt, ist z. B. der Average Temperature Response über 100 Jahre (ATR100).

In (Niklaß et al. 2020) werden Metriken beschrieben wie absolute Emissionen, Radiative Forcing (RF), Global Temperature Potential (GTP) und den genannten ATR und AGWP. Eine wichtige Eigenschaft ist, dass eine Metrik für Pulsemissionen, also Einzelemissionen in einem Jahr, und Emissionen über einen längeren Zeitraum das gleiche Szenario als klimafreundlich bewerten soll, da eine anhaltende Emission nur eine Summe von Pulsemissionen ist.

Für die Bestimmung der Klimawirkung von Nicht-CO₂-Effekten und möglichen Einbeziehungen in den Emissionshandel wird der ATR mit einem Zeithorizont von 100 Jahren empfohlen. ATR berücksichtigt neben den unterschiedlichen Lebenszeiten der Klimaspezies auch ihre unterschiedlichen Klimasensitivitäten sowie die Trägheit des Klimasystems. ATR ist im Vergleich zum viel verwendeten (A-)GWP in der Ursache-Wirkungskette weiter unten anzusiedeln und leichter verständlich als das GWP, das einem integrierten RF entspricht und keinen unmittelbaren Bezug zur Temperaturänderung hat. Zudem ist der ATR nicht so stark vom Zeithorizont abhängig und Pulsemissionen und kontinuierliche Emissionen liefern ein qualitativ gleiches Ergebnis. ATR ist nicht so weit verbreitet wie das GWP. Eine Umrechnung von ATR zu GWP ist generell möglich.

3.3 Clusteranalyse des DLR

Durch ein besseres Verständnis von physikalischen und chemischen Prozessen in der Atmosphäre wurden die Abschätzungen der Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs stetig präzisiert. Unsicherheiten bleiben jedoch bestehen, weil vor allem Nicht-CO₂-Effekte maßgeblich von meteorologischen Umweltbedingungen abhängen, die einer starken Variation unterliegen (Lee et al. 2021).

Die Clusteranalyse des DLR ermöglicht es, die komplexen Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs für einzelne Flüge deutlich detaillierter als bisher mit vergleichsweise wenig Informationen berechnen zu können (Thor et al. 2023). Der Ansatz wird dadurch motiviert, dass detaillierte Informationen über die tatsächlichen Flugrouten und entsprechenden Wetterbedingungen eines Fluges nicht immer verfügbar sind und die Verarbeitung dieser Informationen sehr rechenintensiv ist. Basierend auf Informationen zu Flugzeugkategorien und Start- und Zielflughäfen bietet die Clusteranalyse einen vereinfachten, aber dennoch belastbaren Ansatz zur Abschätzung der Klimaeffekte einzelner Flüge.

Die Simulationsgrundlage bilden Flugplandaten aus dem Jahr 2012. Mögliche Probleme, die durch die Nutzung der Flugplandaten aus 2012 resultieren könnten, werden in Kapitel 6 thematisiert. Auf Basis dieser Verbindungen wurden weltweit Trajektorien von 57.631 Flügen

simuliert. Die Simulation erfolgte zunächst für fünf verschiedene Flugzeuggrößenkategorien und wurde im Entwicklungsverlauf (Version 108) auf sieben erweitert, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Kategorisierung der Flugzeuge bei der Clusteranalyse

Flugzeugkategorie	Sitzplätze	Flugzeugart	Verbreitetste Flugzeugtypen
1	20-50	Regional	ERJ-135/140, CRJ200
2	51-100	Regional	ERJ-170/175, Fokker 70
3	101-151	Standardrumpfflugzeug	A320-231, A330-223
4	152-201	Standardrumpfflugzeug	737-800, 787-8
5	202-251	Großraumflugzeug	767-300ER, A340-541
6	252-301	Großraumflugzeug	A330-321, 777-200LR
7	302-600	Großraumflugzeug	747-400

Jede Größenkategorie wurde mit einem repräsentativen Flugzeugtyp modelliert. Durch Parameter wie Schub und Kraftstofffluss wurde die Verteilung der Motorabgasemissionen von NO_x entlang der Flugbahn durch die Anwendung der Boeing Fuel Flow Methode 2 (DuBois und Paynter 2006) ermittelt. Die Menge der CO₂- und H₂O-Emissionen wird unter der Annahme einer linearen Beziehung zum Kraftstoffverbrauch berechnet. Hieraus entsteht eine Emissionsverteilung nach Geographischer Breite, Länge sowie Flughöhe. Jede Trajektorie wurden anschließend mit dem nichtlinearen Klimareaktionsmodell AirClim (Grewé und Stenke 2008) verarbeitet, um die Klimaeffekte je Emissionsart für jeden Flug zu ermitteln. AirClim kombiniert Flugzeugemissionsdaten (Längen- und Breitengrade sowie Höhe) mit einem Satz vorab berechneter, nichtlinearer Emissions-Reaktions-Beziehungen für verschiedene atmosphärische Standorte, um die zeitliche Entwicklung der globalen Temperaturänderung in Erdoberflächennähe zu berechnen. AirClim beinhaltet die Auswirkungen der Emissionsstoffe CO₂, H₂O, CH₄ und O₃ (die letzten beiden resultieren aus NO_x-Emissionen) sowie kondensstreifeninduzierte Bewölkung (CiC).² Bei der Berechnung des Klimaeinflusses wird ein klimatologischer Ansatz verfolgt, was bedeutet, dass die berechneten Werte für den Klimaeinfluss einen Mittelwert über alle Wettersituationen darstellen.

Basierend auf den ermittelten Klimaeinflüssen werden Klimaeffektfunktionen abgeleitet, die als Regressionsformeln den gesamten Klimaeffekt abbilden. Eingangsgrößen sind die Flugdistanz entlang eines Großkreises, mittlere Breite entlang des Großkreises, Kraftstoffverbrauch zur Berechnung von CO₂ und H₂O sowie NO_x-Emissionen. Der Gesamtklimaeffekt resultiert aus den Klimaeffektkomponenten CO₂, H₂O, CiC, O₃, PMO and CH₄. Der Klimaeinfluss kann über verschiedene Klimametrien quantifiziert werden. In der zur Clusteranalyse erstellten Excel-Applikation des DLR können in der aktuellsten Version 1.11 die Emissionen nach vier Metriken berechnet werden:

- ▶ ATR100 (increasing emissions)
- ▶ ATR100 (pulse emissions)
- ▶ AGWP100 (increasing emissions)

² In AirClim wird der unmittelbare Nicht-CO₂-Effekt von Partikeln nicht berücksichtigt (Grewé und Stenke 2008).

► EAGWP100 (increasing emissions)

Die Applikations-Version 108, die der Integration der Clusteranalyse in TREMOD zu Grunde lag, enthielt lediglich zwei Metriken, nämlich ATR100 und AGWP100. Hierbei entspricht der ATR100 der Metrik ATR 100 (increasing emissions) und das AGWP100 dem AGWP100 (increasing emissions) in der aktuellen Applikation.

Im vorliegenden Bericht werden die Klimawirkungen nach dem ATR100 (increasing emissions) quantifiziert, was der mittleren nahe der Oberfläche liegenden Temperaturänderung über 100 Jahre entspricht. Zudem wurde in TREMOD-AV neben dem ATR100 auch die Klimawirkung über das AGWP100 (increasing emissions), welches das absolute Treibhauspotenzial über 100 Jahre abbildet, integriert. Alle genannten Metriken können über Umrechnungsfaktoren in andere Metriken überführt werden. Die Umrechnungsfaktoren sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Tabelle 5: Umrechnungsfaktoren von ATR100 (increasing emissions) zu den anderen Metriken

	ATR100 (pulse em.)	AGWP100 (incr. em.)	EAGWP100 (incr. em.)
CO ₂	0,0167	260,16	1,00
H ₂ O	0,0087	198,41	1,14
NO _x	0,0083	140,61	1,44
CiC	0,0103	371,06	0,59

Quelle: DLR-Applikation Version 1.11. In der für die Integration des Clustermodells in TREMOD-AV verwendeten Version 108 gab es lediglich die Umrechnungsfaktoren für den ATR100 (increasing emissions) zum AGWP100 (increasing emissions). Umrechnungsfaktoren für O₃, CH₄ und PMO sind zwar in der Applikation gegeben, aber werden in der Clusteranalyse nicht weiterverwendet und werden demnach nicht dargestellt.

Aufgrund der großen Varianz des Einflusses der Klimaeffektcomponenten je Emissionsort und -zeit, wäre es nicht präzise genug, den Nicht-CO₂-Effekt anhand einer einzigen Funktion abzubilden. Daher wird ein K-Means-Clustering-Algorithmus angewendet, um die Flüge in mehrere Cluster zu unterteilen. Dadurch wird sichergestellt, dass Flüge in einem bestimmten Cluster ähnliche Klimaeffektmerkmale aufweisen. Es wurde festgestellt, dass eine Aufteilung in vier Cluster am nützlichsten ist, da eine größere Anzahl von Clustern zu einigen Clustern führt, deren Unterscheidungen keine klare physikalische Interpretation haben. Die resultierenden vier Cluster gliedern unterschiedliche Bereiche nach Flugdistanz and Geografischer Breite. Unterhalb von 462,5 km werden Flüge dem Kurzstreckenflug-Cluster zugeordnet. Die verbleibenden Flüge deren Mittelpunkt (der Ort, an dem die Distanz zwischen dem Start- und Zielflughafen identisch ist), zwischen dem Start- und Zielflughafen zwischen den Breiten ±29,7° liegen werden dem tropischen Cluster zugeordnet. Alle anderen Flüge werden dem Mittelbreiten-Cluster zugeordnet, sofern sie nicht den zwei kleinsten Flugzeugkategorien zugeordnet sind. Aufgrund der wesentlich geringeren Flughöhe der zwei kleinsten Flugzeugkategorien zwischen 20 und 100 Sitzen (siehe Tabelle 4), wird hierfür ein weiteres Cluster ermittelt. Für diese Cluster werden sodann Regressionsformeln ermittelt, mit denen sich für jeden Flug (innerhalb der definierten Grenzen) die Nicht-CO₂-Effekte abschätzen lassen.

Die Cluster haben unterschiedliche Merkmale. Der Kurzstreckenflug-Cluster hat einen vernachlässigbaren Beitrag von Kondensstreifen zum Klimaeffekt bei einem Durchschnitt von 3,5 % des Gesamtklimaeffekts und einen starken Beitrag von CO₂ bei einem Durchschnitt von 57,4 % des Gesamtklimaeffekts. Flüge in diesem Cluster sind sehr kurz und erreichen daher oft nicht die Flughöhe ab der ein überproportionaler Anstieg der Nicht-CO₂-Effekte entsteht, siehe

(Dahlmann et al. 2023). Der Klimaeffekt des tropischen Clusters wird von Kondensstreifen dominiert (durchschnittlicher Beitrag von 56,6 %), weil starke Kondensstreifenbildung in tropischen Breiten auftritt. Der Mittelbreiten-Cluster enthält die verbleibenden Flüge und hat relativ große Klimaeffektbeiträge von NO_x und H₂O (durchschnittliche Beiträge von 49,1 % bzw. 6,8 %).

In der zur Clusteranalyse zugehörigen Excel-Applikation (Version 108) werden als Eingangsgrößen die o. g. Flugzeuggrößenklasse sowie die Start- und Ziel-Koordinaten benötigt, um die Flugdistanz, die mittlere Breite und somit die Clusterzugehörigkeit zu bestimmen. Demnach hängen in der Applikation die Nicht-CO₂-Effekte lediglich von der Größenklasse und der Start-Ziel-Verbindung ab.

Die Funktionen der Clusteranalyse leiten sich aus (Dahlmann et al. 2023) ab und ergeben in Summe:

$$ATR100_{tot} = \frac{c_{CO_2} \cdot f + c_{NO_x}(d, \bar{\phi}) \cdot e + c_{H_2O}(d, \bar{\phi}) \cdot f + c_{CiC}(d, \bar{\phi}) \cdot d}{c_{CO_2} \cdot f} \quad (VI)$$

mit

$ATR100_{tot}$	-	Average Temperature Response über 100 Jahre [kg CO _{2eq} /kg CO ₂]
f	-	Kraftstoffverbrauch [kg]
e	-	NO _x -Emissionen [kg]
d	-	Flugdistanz [km]
c_{CO_2}	-	Emissionsfaktor für CO ₂ [kg CO ₂ /kg Kraftstoff]
c_{NO_x}	-	Clusterabhängige Regressionsformeln für NO _x [kg CO _{2eq} /kg NO _x]
c_{H_2O}	-	Clusterabhängige Regressionsformeln für H ₂ O [kg CO _{2eq} /kg H ₂ O]
c_{CiC}	-	Clusterabhängige Regressionsformeln für Wolkenbildung [kg CO _{2eq} /km]
$\bar{\phi}$	-	Mittlerer Breitengrad [rad]

Im Ergebnis berücksichtigen die Nicht-CO₂-Effekte der Clusteranalyse den Klimaeffekt, der durch das Emittieren von NO_x, H₂O und CiC (Wolkenbildung durch Kondensstreifen³) entsteht. Somit sind der Kerosinverbrauch, die NO_x-Emissionen, die geflogene Distanz und die mittlere Breite eines Fluges notwendige Parameter, um die Nicht-CO₂-Effekte anhand der Clusteranalyse vollständig bestimmen zu können. Der Kerosinverbrauch sowie die NO_x-Emissionen werden in der Excel-Applikation pro Größenklasse und Flugdistanz errechnet. Für die Berechnung des CO₂-Equivalentents wird der ATR100 je Spurenstoff durch den ATR100 von CO₂ geteilt.

Die clusterabhängigen Funktionen sind:

Kleinflugzeug (20-100 Sitzplätze):

$$c_{NO_x,r} = (a_{NO_x,r,0} + a_{NO_x,r,1} \cdot d + a_{NO_x,r,2} \cdot d^2) \quad (VII)$$

$$c_{H_2O,r} = (a_{H_2O,r,0} + a_{H_2O,r,1} \cdot d + a_{H_2O,r,2} \cdot d^2 + a_{H_2O,r,3} \cdot d^3) \cdot (1 + a_{H_2O,r,4} \cdot \bar{\phi}^2) \quad (VIII)$$

$$c_{CiC,r} = (a_{CiC,r,0} + a_{CiC,r,1} \cdot d + a_{CiC,r,2} \cdot d^2) \cdot (1 + a_{CiC,r,3} \cdot \bar{\phi}^2 + a_{CiC,r,4} \cdot \bar{\phi}^4 + a_{CiC,r,5} \cdot \bar{\phi}^6) \quad (IX)$$

Kurzflug:

³ Durch CiC wird die Wärmestrahlung der Erde abgeschirmt und führt zur Erwärmung wie in einem Treibhaus.

$$c_{NO_x,s} = (a_{NO_x,s,0} \cdot d + a_{NO_x,s,1}) (a_{NO_x,s,2} \cdot \bar{\phi}^4 + a_{NO_x,s,3} \cdot \bar{\phi}^3 + a_{NO_x,s,4} \cdot \bar{\phi}^2 + a_{NO_x,s,5} \cdot \bar{\phi} + a_{NO_x,s,6}) \quad (X)$$

$$c_{H_2O,s} = a_{H_2O,s,0} \quad (XI)$$

$$c_{CiC,s} = (a_{CiC,s,0} \cdot d^2 + a_{CiC,s,1} \cdot d + a_{CiC,s,2}) \cdot \bar{\phi}^2 \quad (XII)$$

Mittlere Breite:

$$c_{NO_x,m} = a_{NO_x,m,0} \cdot \tan^{-1}(a_{NO_x,m,1} \cdot d) + a_{NO_x,m,2} \cdot d + a_{NO_x,m,3} \quad (XIII)$$

$$c_{H_2O,m} = (a_{H_2O,m,0} \cdot \tan^{-1}(a_{H_2O,m,1} \cdot d)) (a_{H_2O,m,2} \cdot \bar{\phi}^2 + a_{H_2O,m,3}) \quad (XIV)$$

$$c_{CiC,m} = (a_{CiC,m,0} \cdot d^2 + a_{CiC,m,1} \cdot d + a_{CiC,m,2}) (a_{CiC,m,3} \cdot \bar{\phi}^4 + a_{CiC,m,4} \cdot \bar{\phi}^3 + a_{CiC,m,5} \cdot \bar{\phi}^2 + a_{CiC,m,6} \cdot \bar{\phi} + a_{CiC,m,7}) \quad (XV)$$

Tropen:

$$c_{NO_x,t} = (a_{NO_x,t,0} \cdot \tan^{-1}(a_{NO_x,t,1} \cdot d) + a_{NO_x,t,2}) \cdot (a_{NO_x,t,3} \cdot \bar{\phi}^2 + a_{NO_x,t,4} \cdot \bar{\phi} + a_{NO_x,t,5}) \quad (XIII)$$

$$c_{H_2O,t} = (a_{H_2O,t,0} \cdot \tan^{-1}(a_{H_2O,t,1} \cdot d)) \cdot (a_{H_2O,t,2} \cdot \bar{\phi}^2 + a_{H_2O,t,3}) \quad (XIV)$$

$$c_{CiC,t} = (a_{CiC,t,0} \cdot \tan^{-1}(a_{CiC,t,1} \cdot d) + a_{CiC,t,2} \cdot d + a_{CiC,t,3}) \cdot (a_{CiC,t,4} \cdot \bar{\phi}^4 + a_{CiC,t,5} \cdot \bar{\phi}^2 + a_{CiC,t,6}) \quad (XV)$$

Die in den Funktionen enthaltenen Koeffizienten können je Cluster und Spurenstoff den folgenden Tabellen entnommen werden. Die Koeffizienten für NO_x sind in mK/kg(NO₂) angegeben, Koeffizienten für H₂O in mK/kg(fuel) und die Koeffizienten für CiC in mK/km.

Tabelle 6: Koeffizienten der Clusterfunktionen – Kleinflugzeug (r)

	NO _x	H ₂ O	CiC
0	-1,10*10 ⁻³	-4,17*10 ⁻⁶	-1,33*10 ⁻³
1	1,41*10 ⁻⁵	1,59*10 ⁻⁸	7,07*10 ⁻⁶
2	-3,62*10 ⁻⁹	-1,04*10 ⁻¹¹	-2,68*10 ⁻⁹
3	-	3,04*10 ⁻¹⁵	-1,53*10 ⁻³
4	-	2,03*10 ⁻³	5,71*10 ⁻⁷
5	-		-5,52*10 ⁻¹¹

Tabelle 7: Koeffizienten der Clusterfunktionen – Kurzflug (s)

	NO _x	H ₂ O	CiC
0	2,00*10 ⁻¹⁵	9,03*10 ⁻¹³	4,56*10 ⁻¹⁹
1	-7,14*10 ⁻¹⁴	-	-1,96*10 ⁻¹⁷
2	2,37*10 ⁻⁴	-	-1,46*10 ⁻¹⁴
3	1,54*10 ⁻⁴	-	-
4	-1,46	-	-
5	1,17	-	-
6	6,47*10 ³	-	-

Tabelle 8: Koeffizienten der Clusterfunktionen – Mittlere Breite (m)

	NO _x	H ₂ O	CiC
0	4,79*10 ⁻⁴	1,12*10 ⁻¹²	2,57*10 ⁻²¹
1	1,29*10 ²	1,44*10 ⁻³	-5,84*10 ⁻¹⁷
2	5,28*10 ⁻¹⁴	5,91*10 ⁻³	-3,03*10 ⁻¹⁴
3	-7,52*10 ⁻⁴	4,86	-1,37*10 ⁻³
4	-	-	-1,18*10 ⁻²
5	-	-	5,45
6	-	-	5,03*10
7	-	-	-7,73*10 ³

Tabelle 9: Koeffizienten der Clusterfunktionen – Tropen (t)

	NO _x	H ₂ O	CiC
0	1,41*10 ⁻¹	4,64*10 ⁻¹³	3,59*10 ⁻⁵
1	1,16*10 ⁻³	1,35*10 ⁻³	2,19*10
2	4,93*10 ⁻²	1,72*10 ⁻²	-1,91*10 ⁻¹³
3	6,06*10 ⁻¹²	6,66	-5,64*10 ⁻⁵
4	-2,90*10 ⁻¹⁰	-	5,92*10 ⁻⁷
5	5,03*10 ⁻⁸	-	-1,64*10 ⁻³
6	-	-	1,14

4 Durchgeführte Anpassungen an TREMOD-AV

4.1 Methodikanpassungen und Auswirkungen auf Emissionen

Im Rahmen des Projekts wurden einigen Modellanpassungen vorgenommen. Diese waren zum Teil nötig, um die neue Methode zur Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte zu integrieren (Abschnitt 4.1.5). Zu nennen sind hier insbesondere die Strukturänderung der Verkehrsmengen und die Berechnung der Großkreisdistanzen (GKD) in TREMOD, siehe Abschnitt 4.1.1.

Es gab allerdings auch einige Modellanpassungen, die nicht unmittelbar mit den Nicht-CO₂-Effekten in Verbindung stehen. Es wurden Anpassungen an der Berechnung der LTO-Emissionen, am sonstigen Flugverkehr und der Allokation der Emissionen auf die Transportarten (PV, GV) vorgenommen.

Die genannten Modellanpassungen führen zu Änderungen der ermittelten Emissionen des Flugverkehrs auch abseits der Nicht-CO₂-Effekte. Im Folgenden werden die durchgeführten Anpassungen erläutert und die Auswirkungen auf die Emissionen exemplarisch für CO₂, NO_x und PM₁₀ dargestellt. Verglichen werden die neuen Ergebnisse (Version 091) mit der letzten offiziellen TREMOD-AV-Version 089 für das Emissionsinventar 2022.

4.1.1 Datenbasis für Verkehrsmengen und Großkreisdistanzberechnung

Das bisherige Verkehrsmengengerüst von TREMOD-AV enthält keine Daten zu den Flugrouten (Start-Ziel-Verbindung). Da jedoch diese Information nötig ist, um die Nicht-CO₂-Effekte nach der Clusteranalyse zu integrieren (siehe Abschnitt 1), muss TREMOD-AV dahingehend erweitert werden. Im Rahmen der Frühschätzung der Klimagasemissionen des Verkehrssektors (Allekotte et al. 2023a) des Jahres 2021 wurde die Destatis Sonderauswertung im Februar 2022 erstmals auf Anfrage in der um Start-Ziel-Verbindung erweiterten Form im xlsx-Format geliefert. Für die Frühschätzung wurde die detaillierte Auswertung zwar nicht benötigt und auf die bisher verwendete Form aggregiert, aber die Überprüfung der Daten zeigt, dass diese exakt der geforderten Struktur zur Integration des Clustermodells entsprechen. Somit kann TREMOD-AV künftig um die Start-Ziel-Verbindung erweitert und die Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte über das Clustermodell durchgeführt werden. Die zweite Sonderauswertung, die Destatis jährlich zur Verfügung stellte und welche die Anzahl Starts pro Flughafen beinhaltet, entfällt somit, da alle Informationen auch in der neuen Auswertung enthalten sind. Die historischen Jahre des Zeitraums 1990-2020 wurden ebenfalls im neuen detaillierten Format von Destatis zur Verfügung gestellt, sodass die Nicht-CO₂-Effekte auch rückwirkend ermittelt werden können. Tabelle 10 stellt die neue Struktur der Verkehrsdatengrundlage nach Destatis dar. Diese Daten decken den gewerblichen Flugverkehr auf den Hauptverkehrsflughäfen analog zur alten Struktur (siehe Tabelle 2) ab, jedoch zusätzlich differenziert nach Start- und Zielflughafen. Die Information über die Start- und Landflughäfen ersetzen somit die Aggregation nach Distanzklasse. Anhand der Start- und Landflughäfen unter Berücksichtigung der geographischen Koordinaten kann die Großkreisdistanz (GKD) pro Start-Ziel-Verbindungen errechnet werden. Die Verkehrsleistung für Personen- und Güterverkehr ergibt sich aus der GKD multipliziert mit dem Aufkommen (Passagiere bzw. Fracht).

Tabelle 10: Exemplarischer Auszug der Verkehrsdaten in TREMOD-AV

Dargestellt ist ein Auszug der Verkehrsmengen des Jahres 2021 (Starts und Aufkommen)

Flugzeugtyp (AC)	Starthafen ¹	Landehafen ¹	Starts	Passagiere	Fracht ²	Entfernung ³
Boeing B 737-600	EDDL	DTTA	10	916	1 t	1.636 km
Boeing B 737-600	EDDM	DTTJ	6	476	0 t	1.613 km
Boeing B 737-600	EDDH	DTMB	10	824	0 t	2.198 km
Airbus A321-100	EDDF	LEBL	69	12.114	18 t	1.094 km
Airbus A321-100	EDDS	EDDF	5	819	0 t	157 km
Boeing B 757-300	EDDM	LGPZ	4	813	0 t	1.268 km
Boeing B 757-300	EDDF	LGKV	12	1.943	0 t	1.604 km
Boeing B 757-300	EDDF	LGAV	1	270	0 t	1.808 km
Boeing B 757-300	EDDB	BIKF	12	1.992	1 t	2.432 km
Airbus A380	EDDF	OMDB	306	74.507	3.505 t	4.843 km
Airbus A380	EDDF	EGLL	26	2.373	387 t	655 km
...

Quelle: Sonderauswertung der Daten, aggregiert enthalten in (Destatis 2021). Anmerkungen: ¹ICAO-Code der Flughäfen; ²Inkl. Post; ³nach Großkreisdistanz.

Ergänzend zu der Tabelle mit den Verkehrsdaten werden von Destatis auch die benötigten Flughafeninformationen gegeben. Die folgende Tabelle zeigt einen Auszug der Flughafeninformationen, die alle Flughäfen aus Tabelle 10 enthält. Diese werden mit den Flughafeninformationen des DLR weitestgehend abgeglichen sowie ggf. zusätzlich mit den Flughafenkoordinaten von Openflights⁴ plausibilisiert. Über die Koordinaten werden zum einen die GKD berechnet und zum anderen sind diese relevant für die Einordnung der Flüge zu den jeweiligen Clustern über die mittlere Breite (vgl. Abschnitt 3.3).

⁴ <https://openflights.org/data.php>

Tabelle 11: Exemplarischer Auszug der geplanten Flughafentabelle in TREMOD

Dargestellt ist ein Auszug der Flughafentabelle des Jahres 2021

ICAO	IATA	Name	Land	Kontinent	Länge*	Breite*
BIKF	KEF	Reykjavik-Keflavik	Island	Europa	+63°59′	-22°37′
DTMB	MIR	Monastir	Tunesien	Afrika	+33°52′	+10°46′
DTTA	TUN	Tunis	Tunesien	Afrika	+36°51′	+10°47′
DTTJ	DJE	Djerba	Tunesien	Afrika	+33°52′	+10°46′
EDDB	BER	Berlin-Brandenburg	Deutschland	Europa	+52°22′	+13°30′
EDDF	FRA	Frankfurt/Main	Deutschland	Europa	+50°02′	+08°34′
EDDH	HAM	Hamburg	Deutschland	Europa	+53°38′	+09°59′
EDDL	DUS	Düsseldorf	Deutschland	Europa	+51°17′	+06°45′
EDDM	MUC	München	Deutschland	Europa	+48°21′	+11°47′
EDDS	STR	Stuttgart	Deutschland	Europa	+48°41′	+09°13′
EGLL	LHR	London-Heathrow	UK	Europa	+51°27′	-00°28′
LEBL	BCN	Barcelona	Spanien	Europa	+41°18′	-02°05′
LGAV	ATH	Athen	Griechenland	Europa	+37°54′	+23°44′
LGKV	KVA	Kavala	Griechenland	Europa	+40°55′	+24°37′
LGPZ	PVK	Preveza	Griechenland	Europa	+38°57′	+20°44′
OMDB	DXB	Dubai	VAE	Asien	+25°15′	+55°22′
...

Quelle: Sonderauswertung Destatis. Anmerkung: *Süden und Westen sind negativ definiert.

Da in der neuen Struktur die Flugdistanzen der Flüge auf den HVF nicht mehr über die Distanzklassen von Destatis gegeben sind, ist die Berechnung der Großkreisdistanz in TREMOD-AV zu integrieren. Die Großkreisdistanz ergibt sich für jede Start-Ziel-Verbindung über die folgende Gleichung:

$$a = \sin^2\left(\frac{Lat_A - Lat_B}{2}\right),$$

$$b = \cos(Lat_A),$$

$$c = \cos(Lat_B),$$

$$d = \sin^2\left(\frac{Lon_A - Lon_B}{2}\right),$$

$$GKD = 2 \cdot r_E \cdot \arcsin(\sqrt{a + b \cdot c \cdot d}) \tag{XVI}$$

mit

a, b, c, d - Hilfsvariablen

GKD - Großkreisdistanz in km

Lat - Geographische Breite [°]

<i>Lon</i>	-	Geographische Länge [°]
<i>A</i>	-	Startflughafen
<i>B</i>	-	Zielflughafen
<i>r_E</i>	-	Erdradius [km] (ca. 6.371km)

Zur Emissionsberechnung wird die Großkreisdistanz über einen Umwegfaktor angepasst. Im Rahmen des Projekts wurde die Berechnung des Umweges jedoch nicht angepasst. Demnach wird weiterhin auf Flüge $\leq 185,2$ km ein Umweg von 60 km ggü. der GKD hinzugerechnet und bei Flügen $> 185,2$ km ergibt sich die Realdistanz zu $(\text{GKD} - 185,2 \text{ km}) \cdot 1,04 + 245,2 \text{ km}$, siehe (Knörr, Wolfram et al. 2012),

Für den sonstigen Flugverkehr liegen – abgesehen von den gewerblichen Flügen von den sonstigen Flughäfen zu den HVF – keine detaillierteren Informationen vor. Der sonstige Flugverkehr spielt jedoch aufgrund der geringen Anteile an den Gesamtemissionen eine untergeordnete Rolle. Beim sonstigen Flugverkehr bleibt die Datenquelle dieselbe, wobei die Annahmen bezüglich der Flugdistanzen und Relationen des sonstigen Flugverkehrs sowie die Datenstruktur im Rahmen des Projekts überarbeitet wurden, siehe Abschnitt 0.

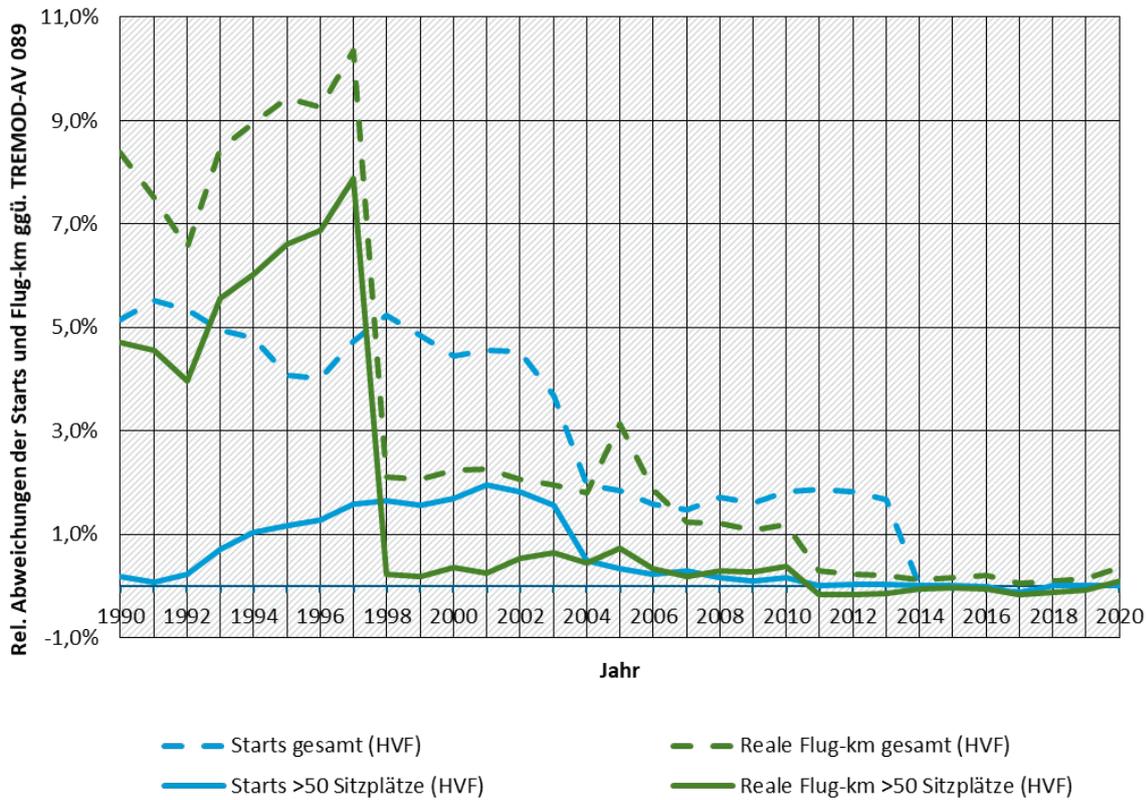
Zwar sollten die gewerblichen Verkehrsmengen auf den HVF (zzgl. gewerbliche Flüge von sonstigen Flughäfen auf HVF) in der neuen Datenabfrage mit den alten Daten näherungsweise übereinstimmen, allerdings ist dies für einige Jahre nicht der Fall. Abbildung 1 zeigt die Abweichung der neuen Verkehrsmengen (gesamten Starts sowie reale Flugzeugkilometer auf HVF) ggü. den alten Daten. Bis 2013 gibt es bei den gesamten gewerblichen Starts auf den HVF Abweichungen von 1-5 %. Danach passen die Werte gut. Bei den gesamten Flug-km sind deutliche Unterschiede bis 1997 erkennbar (bis 11 %). Danach ist der Unterschied bei unter 3 % mit sinkender Tendenz bis 2020. Diese Abweichungen relativieren sich etwas sofern nur Flugzeuge mit mehr als 50 Sitzplätzen betrachtet werden, die die höchste Relevanz für die Emissionen haben. Hier sind die Unterschiede generell deutlich geringer und ab 1998 sind die Abweichungen zu den ursprünglichen Daten klein. Bei noch größeren Flugzeugen (mehr als 100 Plätze) reduzieren sich die Unterschiede zwischen beiden Datenquellen weiter.

Bei der mittleren Flugdistanz kann es durchaus zu Abweichungen zur alten TREMOD-AV Version durch die Integration der Großkreisdistanzberechnung kommen. Vorher wurden die Anzahl der Flüge pro Distanzklasse angegeben. Für alle Flüge dieser Distanzklasse wurde dieselbe Flugdistanz angenommen. Auch wurde bis jetzt immer der Mittelwert aus Unter- und Obergrenze einer Flugdistanz angenommen, die nicht zwangsläufig auch der Mittelwert aller Flüge innerhalb der Distanzklasse sein muss. So gab es bspw. im Jahr 2020 vier innerdeutsche Starts mit dem Typ „Learjet 31“ in der Distanzklasse 301-400 km. In TREMOD-AV wurden bisher für diese vier Starts eine Großkreisdistanz von 350 km angenommen. Der tatsächliche Mittelwert betrug jedoch 373 km.⁵ Da im neuen TREMOD-AV die Distanzberechnung anhand der Start-Ziel-Flughäfen erfolgt, würde sich dieser Mittelwert der genannten vier Flüge ergeben.

Dieser Unterschied spiegelt sich auch in den Emissionen wider, wie Abbildung 2 zeigt. Die Abweichungen können nicht endgültig geklärt werden. Die Werte nach 1997 weisen lediglich kleine Unterschiede von weniger als 1,5 % auf. Insbesondere seit 2007 sind die Unterschiede zwischen alter und neuer Berechnung vernachlässigbar gering.

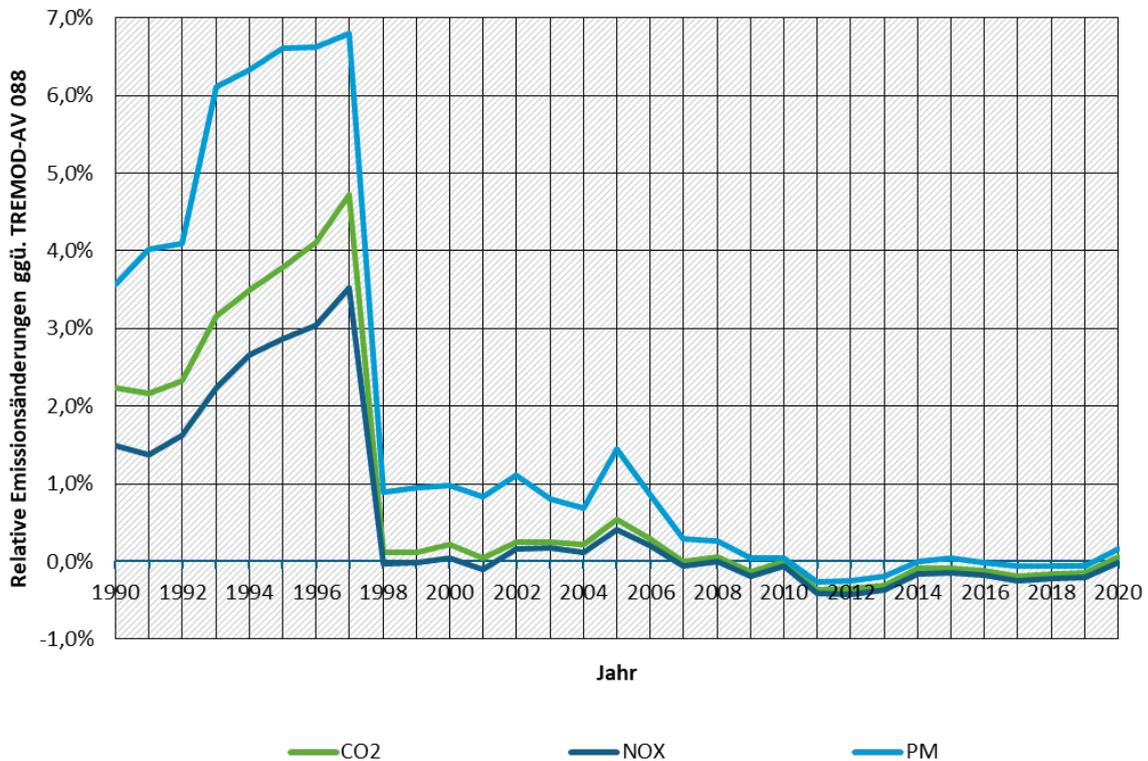
⁵ Der Wert geht aus Angaben von Destatis hervor, wurde bisher aber in TREMOD-AV nicht verwendet.

Abbildung 1: Relative Änderungen der Starts und Flug-km durch die neuen Daten auf HVF



Quelle: Eigene Ermittlung anhand TREMOD-AV 089 und Destatis. Anmerkung: Abgebildet werden die gewerblichen Starts von HVF sowie von sonstigen Flugplätzen zu HVF.

Abbildung 2: Relative Emissionsänderung durch die neuen Daten auf HVF



Quelle: Eigene Ermittlung anhand TREMOD-AV 089 und Destatis. Anmerkung: Abgebildet werden die gewerblichen Starts von HVF sowie von sonstigen Flugplätzen zu HVF.

4.1.2 Anpassungen an den Taxi-Zeiten

Seit der TREMOD-AV Version für das Berichtsjahr 2017 werden für die Berechnung der LTO-Emissionen flughafenfeine Taxi-Zeiten verwendet, siehe (Allekotte et al. 2020). Bei dieser Methodik werden nach (Eurocontrol 2021) pro Flughafen einheitliche Taxi-Zeiten für alle Flugzeuggrößenklassen verwendet. Eurocontrol gibt allerdings auch spezifische Taxi-Zeiten je „Wake Turbulence Class“ (WTC) an. Es gibt die vier WTC:

Tabelle 12: Einteilung des MTOW in Wake Turbulence Class

WTC	MTOW min [t]	MTOW max [t]
L ¹	>0	<7
M	≥7	<136
H	≥136	<560
J	≥560	

Anmerkung: ¹Für L werden keine weiteren Angaben von Eurocontrol gemacht. Diese WTC wird bei den Berechnungen vereinfachend wie die Klasse M behandelt.

(Eurocontrol 2021) liefert die Taxi-Zeiten halbjährig. Diese Werte wurden im Zeitraum zwischen Sommer 2014 bis Winter 2022/2023 für die folgenden Flughäfen ausgewertet: Hamburg, Stuttgart, Berlin Tegel, München, Düsseldorf, Köln/Bonn, Berlin-Brandenburg, Frankfurt. Aus der Analyse ergeben sich die folgenden Korrekturfunktionen je WTC bezogen auf die mittlere Taxi-Zeit ($Taxi_{\phi}$) eines Flughafens:

$$Taxi_M[\min] = (10,236 \cdot \ln(0,67 \cdot Taxi_{\phi}[\min]) - 13,57)/0,68 \quad (XVII)$$

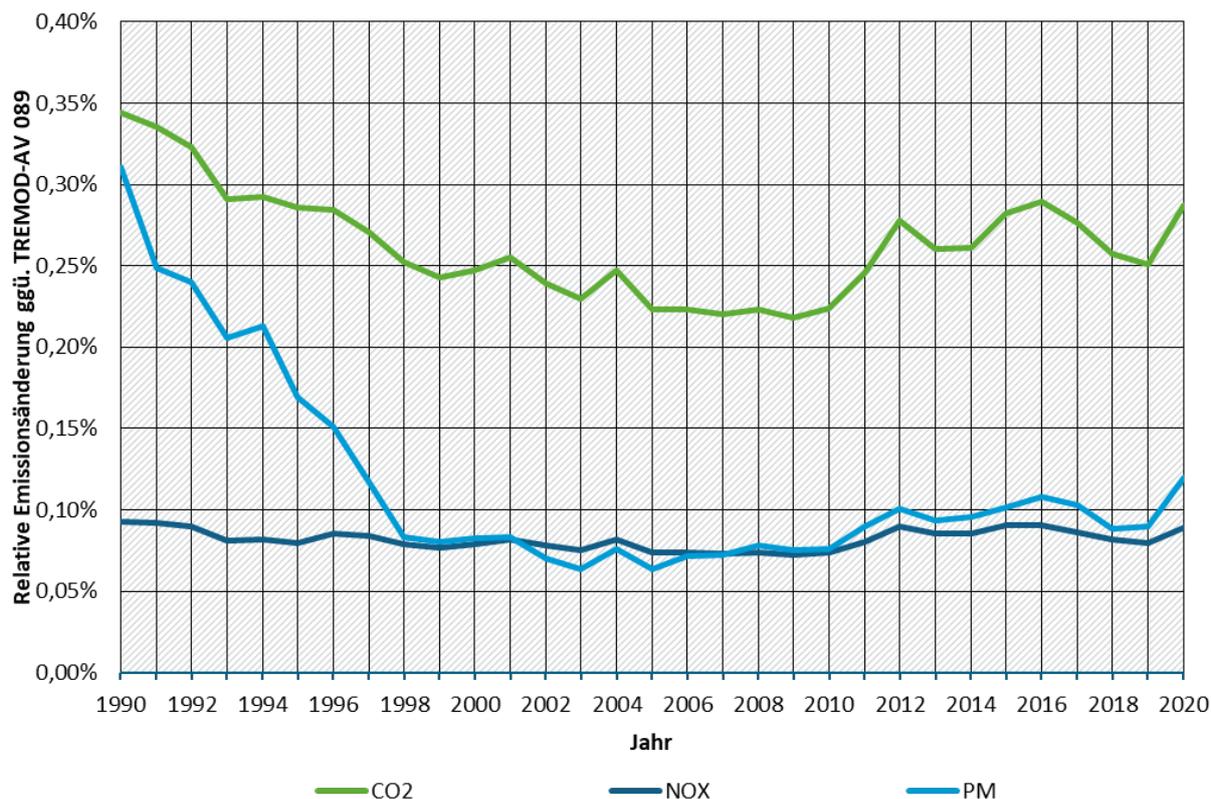
$$Taxi_H[\min] = (5,7047 \cdot e^{0,0831 \cdot 0,67 \cdot Taxi_{\phi}[\min]})/0,65 \quad (XVIII)$$

$$Taxi_J[\min] = (6,3571 \cdot e^{0,0860 \cdot 0,67 \cdot Taxi_{\phi}[\min]})/0,68 \quad (XIX)$$

Die Taxi-Zeiten wurden bisher für die Klasse M um ca. 2 % leicht überschätzt, allerdings lagen die Werte für die Klassen H und J ca. 25 % bzw. 34 % oberhalb der bisher angenommenen Taxi-Zeiten. Da jedoch die Emissionen in der Taxi-Phase nur einen geringen Anteil (<20 %) an den gesamten LTO-Emissionen aufweisen, sind die Gesamtauswirkungen als gering einzustufen wie die folgende Analyse verdeutlicht.

Abbildung 3 zeigt die relativen Änderungen der gesamten Emissionen (LTO+CCD) durch die Anpassungen. Sämtliche Abweichungen liegen im Bereich von unter 0,35 %. Bezogen nur auf die LTO-Emissionen liegen je nach Jahr die Abweichungen bei +2,2 bis +3,3 % bei CO₂, +0,8 bis +1,1 % bei NO_x und +0,8 bis +2,8 % bei PM. Demnach wurden die Emissionen bisher tendenziell unterschätzt, wobei die Abweichung relativ gering ausfällt, da insbesondere im Verhältnis zu den Gesamtemissionen – also inkl. Flugphase (CCD) – die Änderungen vernachlässigbar sind. Es ergeben sich über die gesamte Zeitreihe lediglich Abweichungen von <0,35 % bei den CO₂-Emissionen bzw. <0,1 % bei NO_x. Demnach hat die Anpassung keine signifikanten Einflüsse auf die ermittelten Gesamtemissionen.

Abbildung 3: Relative Änderungen der Emissionen durch die Anpassung der Taxi-Zeiten



Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089.

Des Weiteren ändert sich methodisch die Berücksichtigung der Taxi-Zeiten aufgrund der neuen detaillierteren Struktur der Verkehrsdaten. Bisher waren beide Eingangstabellen (1. Starts pro Flugzeugtyp, Relation, Distanzklasse und 2. Starts pro Flugzeugtyp, Relation Startflughafen) nicht miteinander Verknüpft. Das bedeutet, dass keine Rückschlüsse gezogen werden konnten, wie hoch die durchschnittliche Taxi-Zeit pro Flugzeugtyp, Relation und Distanzklasse ist. Demnach wurde bis jetzt anhand der zweiten Eingangstabelle die durchschnittlichen Taxi-Zeiten pro Flugzeugtyp ermittelt und diese einheitlich auf die erste Eingangstabelle übertragen zur Ermittlung der gesamten Emissionen (LTO+CCD).

Da nun aber durch die neue Struktur die Informationen beider alten Eingangstabellen verknüpft sind, können nun die durchschnittlichen Taxi-Zeiten pro Flugzeugtyp und Start-Ziel-Verbindung angegeben werden.

Schlussendlich können sich verglichen zur alten Berechnung bei einigen Aggregationsstufen, z. B. pro Distanzklasse oder pro Relation, die Taxi-Zeiten und somit auch die LTO-Emissionen unterscheiden. Der Unterschied ist wie oben beschrieben jedoch vernachlässigbar klein bei den jeweiligen Aggregationsstufen, wobei die Gesamtemissionen sich durch die methodische Änderung nicht ändern. Die CO₂-Emissionen während der LTO-Phase verringern sich bspw. beim nationalen Flugverkehr um weniger als -1 % und bei internationalen Flügen steigen sie um weniger als 0,1 %.

4.1.3 Anpassungen am sonstigen Flugverkehr

Beim sonstigen Flugverkehr (gewerblicher Verkehr auf kleinen Flughäfen und der gesamte nicht-gewerbliche Verkehr) wurden ebenfalls Anpassungen vorgenommen:

1. Korrektur der Doppelbilanzierung von gewerblichen Flügen von einem kleinen Flughafen zu einem Hauptverkehrsflughafen (bereits in der letzten Inventarversion überwiegend korrigiert)
2. Anpassungen bei den Flugdistanzen und zugeordneten Flugzeugtypen.

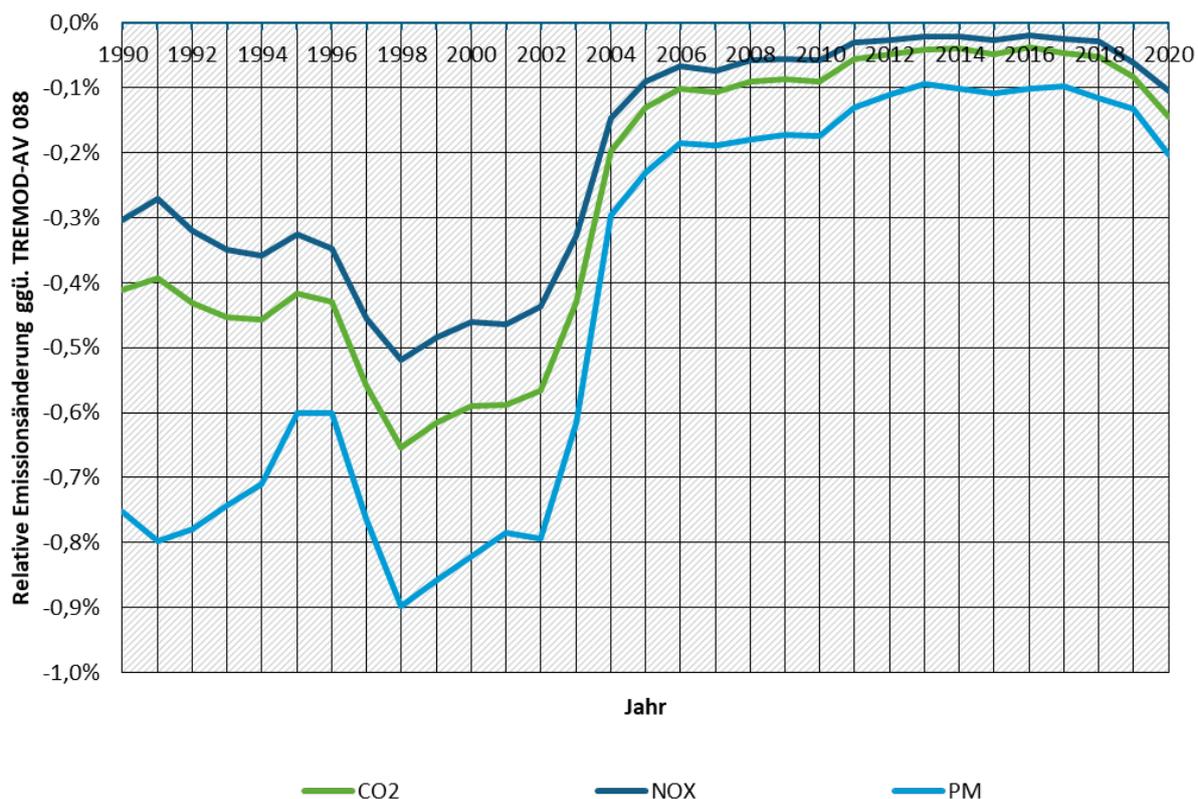
1) Doppelbilanzierung

Der gewerbliche Verkehr auf den HVF und der sonstige Flugverkehr werden statistisch unterschiedlich erhoben. Destatis liefert detaillierte Daten zu den HVF über eine Sonderauswertung, wogegen der sonstige Flugverkehr über die GENESIS DB abgerufen werden kann. Im Rahmen der TREMOD-Aktualisierung für die Vorjahresschätzung 2022 fiel auf, dass in der Sonderauswertung neben den gewerblichen Starts abgehend von den HVF auch die gewerblichen Flüge von den kleinen Flugplätzen zu den HVF enthalten sind. Diese sind jedoch auch in der Statistik zum sonstigen Flugverkehr der GENESIS DB enthalten. Demnach wurden diese Flüge bis zur Version 088 (VJS 2022) doppelt bilanziert. Dieser Fehler wurde grob im Rahmen des Emissionsinventars 2022 in der TREMOD-AV-Version 089 behoben, soll aber nun in der neuen Version gänzlich beseitigt werden.

Da der Anteil des gewerblichen Flugverkehrs von kleinen Flugplätzen zu HVF lediglich einen Anteil von ca. 1,1 % an den CO₂-Emissionen ausmacht (vor der Korrektur), ist der bis zur Korrektur entstandene Fehler durch die Doppelbilanzierung gering. Abbildung 4 zeigt die Änderung durch die Korrektur bezogen auf die gesamten Emissionen der gewerblichen Starts von den sonstigen Flugplätzen. Die Emissionen reduzieren sich auf den sonstigen Flugplätzen demnach je nach Jahr und Schadstoff um 5-35 %. Der Gesamtfehler lag demnach bei ca. 0,2 % bezogen auf die gesamten Emissionen des Flugverkehrs.

Die beschriebenen Unterschiede beziehen sich hier auf die Version 088. Gegenüber der Version 089 entstehen in der neuen Version 091 vernachlässigbare Änderungen.

Abbildung 4: Relative Änderung der Emissionen durch die Korrektur der Doppelbilanzierung



Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 088.

2) Zuordnung der Starts zu Distanzen, Relation und Flugzeugtypen

Im neuen TREMOD-AV ändert sich an der Herangehensweise zur Bestimmung der Relation, Flugweite, Aufkommen und eingesetzte Flugzeugtypen je Größenklasse nichts. Jedoch werden die jeweiligen Werte anhand der neuen Daten zu den HVF für den Zeitraum 1990-2022 aktualisiert. Die Datenstruktur ist vergleichbar zur bisherigen Struktur, allerdings wird nun entgegen der Distanzklasse die Großkreisdistanz angegeben. Die folgenden Annahmen wurden je Größenklasse von den HVF abgeleitet und auf den sonstigen Flugverkehr angewendet:

Tabelle 13: Neue Annahmen für den sonstigen Flugverkehr

Größenklasse	Flugzeugtypen (IDAC)	Relation	Flugdistanz
MTOW ≤2t	100% IDAC=1	nat.=98%, internat.=2%	nat.=73km, internat.=1.851km
MTOW >2t-5,7t	6% IDAC=322, 82% IDAC=2, 12% IDAC=247	nat.=82%, internat.=18%	nat.=176km, internat.=1.235km
MTOW >5,7t-14t	77% IDAC=12, 23% IDAC=24	nat.=57%, internat.=43%	nat.=324km, internat.=896km
MTOW >14t-20t	95% IDAC=48, 5% IDAC=54	nat.=61%, internat.=39%	nat.=355km, internat.=655km
MTOW >20t	7% IDAC=66, 79% IDAC=163, 14% IDAC=201	nat.=30%, internat.=70%	nat.=407km, internat.=1.625km
Hubschrauber	85% IDAC=317, 14% IDAC=248, 1% IDAC=33	nat.=99%, internat.=1%	nat.=83km, internat.=3.824km
Luftschiffe	100% IDAC=35	nat.=97%, internat.=3%	nat.=51km, internat.=348km

Das Aufkommen ist für den gewerblichen Flugverkehr auf den sonstigen Flugplätzen gegeben. Dieses wird auf die jeweiligen Größenklassen gewichtet anhand der durchschnittlich transportierten Personen bzw. Güter auf den HVF je Größenklasse aufgeteilt. Beim nicht-gewerblichen Flugverkehr wird derselbe Besetzungsgrad (PV) je Größenklasse wie auf den HVF angenommen. Es wird von keinem Güteraufkommen beim nicht-gewerblichen Verkehr ausgegangen. Tabelle 14 zeigt die Datenstruktur für die Verkehrsmengen des sonstigen Flugverkehrs. Somit liegt eine andere Struktur vor als bei den HVF. Es liegen keine detaillierten Geoinformationen vor, statt der Start-Ziel-Verbindung ist die Relation und die Entfernung (GKD) gegeben.

Tabelle 14: Exemplarischer Auszug der Verkehrsmengen des gewerblichen Flugverkehrs auf den sonstigen Flugplätzen in TREMOD-AV

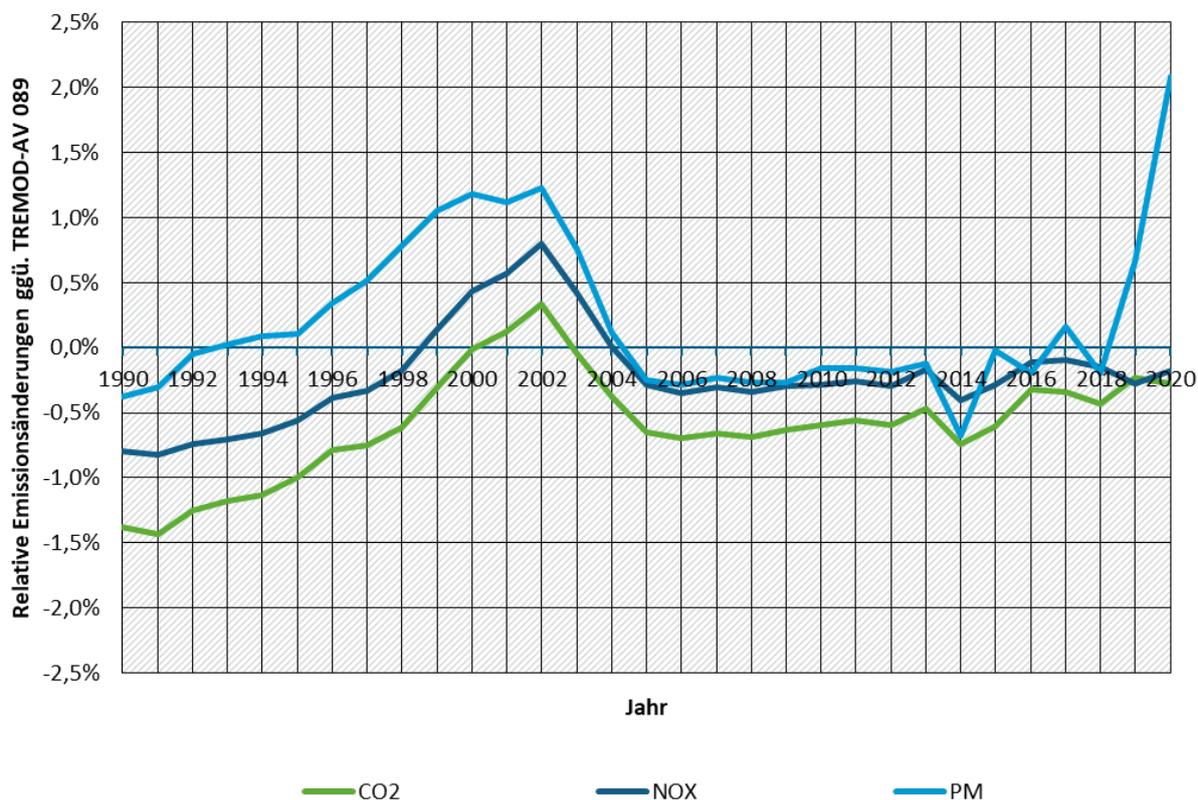
Dargestellt ist ein Auszug der Verkehrsmengen des Jahres 2022 (Starts und Aufkommen)

Flugzeugtyp	Relation ¹	Starts	Passagiere	Fracht*	Entfernung
1	nat.	286.503	32.840	22 t	73 km
322	nat.	3.035	3.574	4 t	176 km
2	nat.	41.487	48.868	66 t	176 km
...					
248	internat.	300	146	0 t	3.824 km
33	internat.	21	9	0 t	3.824 km
35	internat.	2	9	0 t	348 km

Quelle: Eigene Auswertung anhand Destatis. Anmerkungen: *inkl. Post.

Aus den Änderungen der Annahmen ergeben sich folgende Abweichungen zur alten TREMOD-Version 089.

Abbildung 5: Relative Änderungen durch die Anpassungen der Annahmen des sonstigen Flugverkehrs



Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089.

4.1.4 Allokation der Emissionen auf die Transportart

Auch auf die Aufteilung der Emissionen auf den Personen- (PV) und Güterverkehr (GV) hat die neue Datenstruktur eine Auswirkung. Zuvor wurden die Emissionen auf dem Aggregationsniveau Flugzeugtyp, Relation und Distanzklasse auf den PV und GV allokiert. Hierbei wird ein Pkm mit 0,1 multipliziert, um das Äquivalent in tkm zu erhalten (1 Person = 100 kg). Beispiel: Der Typ „Airbus A300-600“ hatte bei internationalen Flügen in der Distanzklasse „2.500-3.000km“ ein Aufkommen von 5.648 Passagieren und 260 t Fracht. Somit wurden die in TREMOD-AV berechneten Emissionen bei dieser Differenzierung zu $5.648 \cdot 0,1 / (5.648 \cdot 0,1 + 260) = 68\%$ dem PV und zu 32 % dem GV zugerechnet. Leerflüge wurden zwar bei der Berechnung der Gesamtemissionsmengen berücksichtigt, jedoch entfielen diese bei der Allokation der Emissionen auf die Transportart. Da Leerflüge lediglich einen Anteil an den Gesamtemissionen von <0,5 % aufweisen, ist diese Vereinfachung nicht signifikant.

Durch die neue Datenstruktur kann statt auf Ebene Distanzklasse+Relation (Relation hier: national oder international) nun die Allokation pro Flugzeugtyp auf Start-Ziel-Verbindungsebene vorgenommen werden. Zudem werden nun Leerflüge ebenfalls auf die Transportart allokiert. Sofern keine Verkehrsleistung von einem Flugzeugtyp auf einer Start-Ziel-Verbindung erbracht wird, werden diese dem Personenverkehr zugerechnet außer es

handelt sich bei dem Flugzeugtyp um ein reines Frachtflugzeug (z. B. A300 F)⁶. In diesem Fall werden die Emissionen des Leerflugs dem GV zugerechnet.

Da in der alten TREMOD-AV Version die Verkehrsaufkommen auf einer anderen Aggregationsebene gegeben sind als in der neuen Version, entstehen hierdurch abweichende Allokationsfaktoren zum einen auf der Aggregationsstufe Relation+Distanzklasse und zum anderen bezogen auf die gesamten Emissionen Deutschlands. Die resultierenden Unterschiede sind jedoch sehr gering. In Tabelle 15 sind für das Jahr 2019 exemplarisch die Allokationsfaktoren der Gesamtemissionen pro Relation (für die HVF) gegeben. Die Allokation der Emissionen national verschiebt sich im Jahr 2019 leicht zum Güterverkehr und international leicht zum Personenverkehr. Demnach ändern sich durch die methodische Anpassung in diesem Jahr die spezifischen Emissionen im GV (g/tkm) um +1,0 % national und -0,4 % international und im PV (g/Pkm) um -0,1 % national und +0,2 % international.

Tabelle 15: Allokationsfaktoren auf die Transportart pro Relation im Jahr 2019 (auf HVF)

Relation	Personenverkehr national	Personenverkehr international	Güterverkehr* national	Güterverkehr* international
Alte Methodik	94,99%	73,65%	5,01%	26,35%
Neue Methodik	94,94%	73,76%	5,06%	26,24%

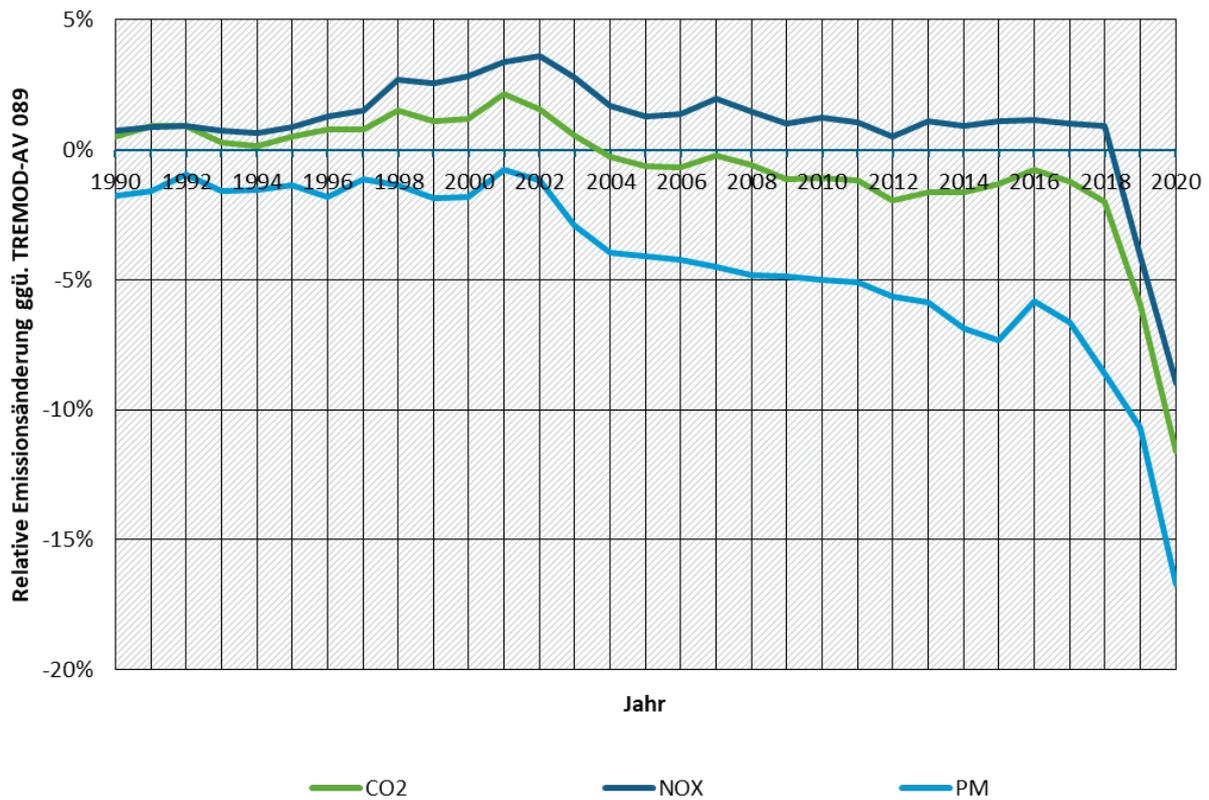
Quelle: Abgeleitet aus TREMOD. Anmerkungen: Bei der alten Methodik müssen die Summen nicht zwangsläufig 100 % ergeben, da Leerflüge nicht allokiert werden. *In den Zahlen wird die transportierte Post dem Güterverkehr hinzugerechnet. TREMOD-AV bietet jedoch eine weitere Differenzierung des Güterverkehrs nach Post und (sonstige) Güter.

4.1.5 Gesamtänderung der Emissionsberechnung durch Methodikanpassung

Wie in den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.4 beschrieben, ändert sich abseits von der Integration des Clustermodells auch die Emissionsberechnung. Es wurden daher die berechneten Emissionen des alten Access-Modells dem neuen Python-Modell gegenübergestellt. Da die relativen Änderungen der genannten Einzelaspekte nicht additiv sind, wurde eine Gesamtberechnung mit allen Methodikänderungen durchgeführt. Die Abbildung 6 bis Abbildung 8 zeigen die Änderung der LTO-Emissionen für die Stoffe NO_x, PM und CO₂ für nationale, internationale sowie alle Flüge. Zu erkennen ist, dass bei nationalen Flügen tendenziell die LTO-Emissionen nun niedriger sind. Dies liegt insbesondere an den Anpassungen an den Taxi-Zeiten über die WTC. Dieser Effekt ist besonders in den Coronajahren deutlich, denn hier war das durchschnittliche Abfluggewicht deutlich niedriger als in den anderen Jahren und somit wurden die Emissionen in der Taxi-Phase nach der neuen Methodik deutlich nach unten korrigiert. Demgegenüber liegen die Emissionen in der LTO-Phase bei internationalen Flügen etwas höher, da die Flugzeuge im Schnitt schwerer sind und über die Korrektur nach WTC nun höhere Emissionen in der Taxi-Phase erhalten. Insgesamt über alle Starts ändern sich die Emissionen in der LTO-Phase nur geringfügig.

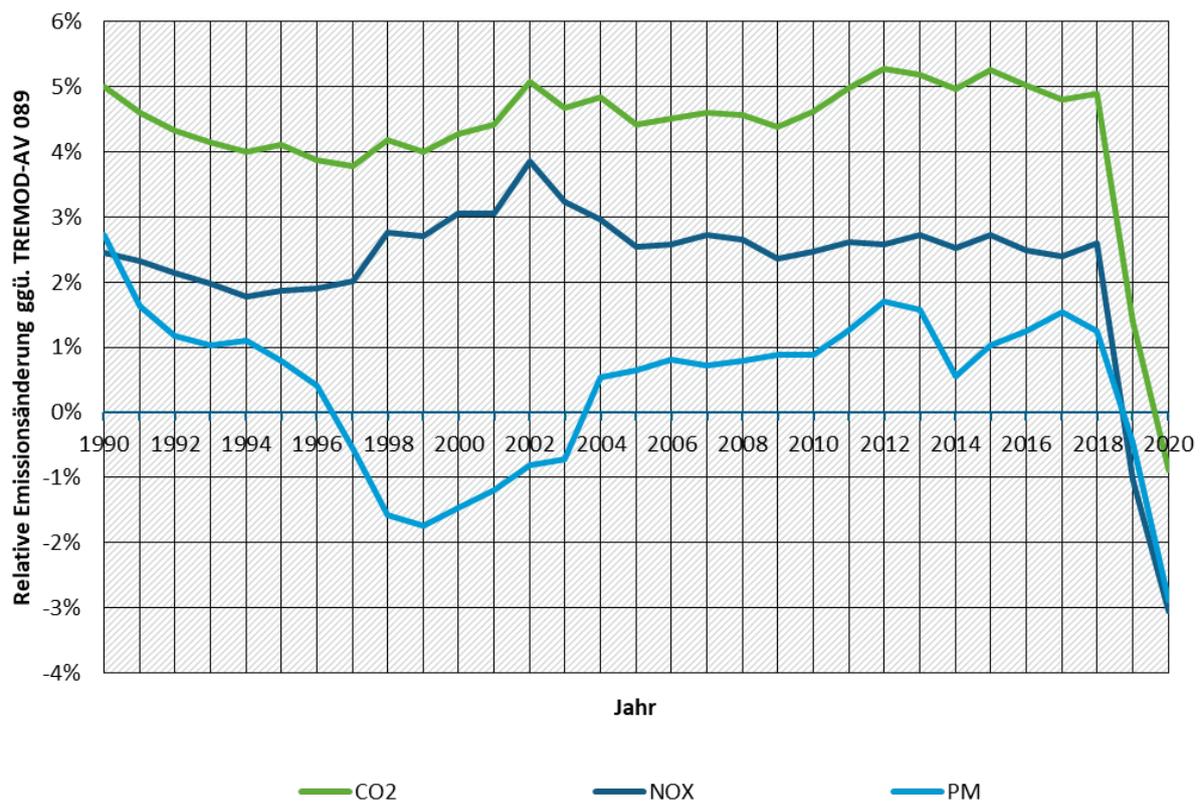
⁶ In TREMOD-AV wird bei jedem definierten Flugzeugtyp (AC) angegeben, ob es sich um eine reine Frachtmaschine handelt.

Abbildung 6: Relative Änderungen der nationalen Emissionen in der LTO-Phase



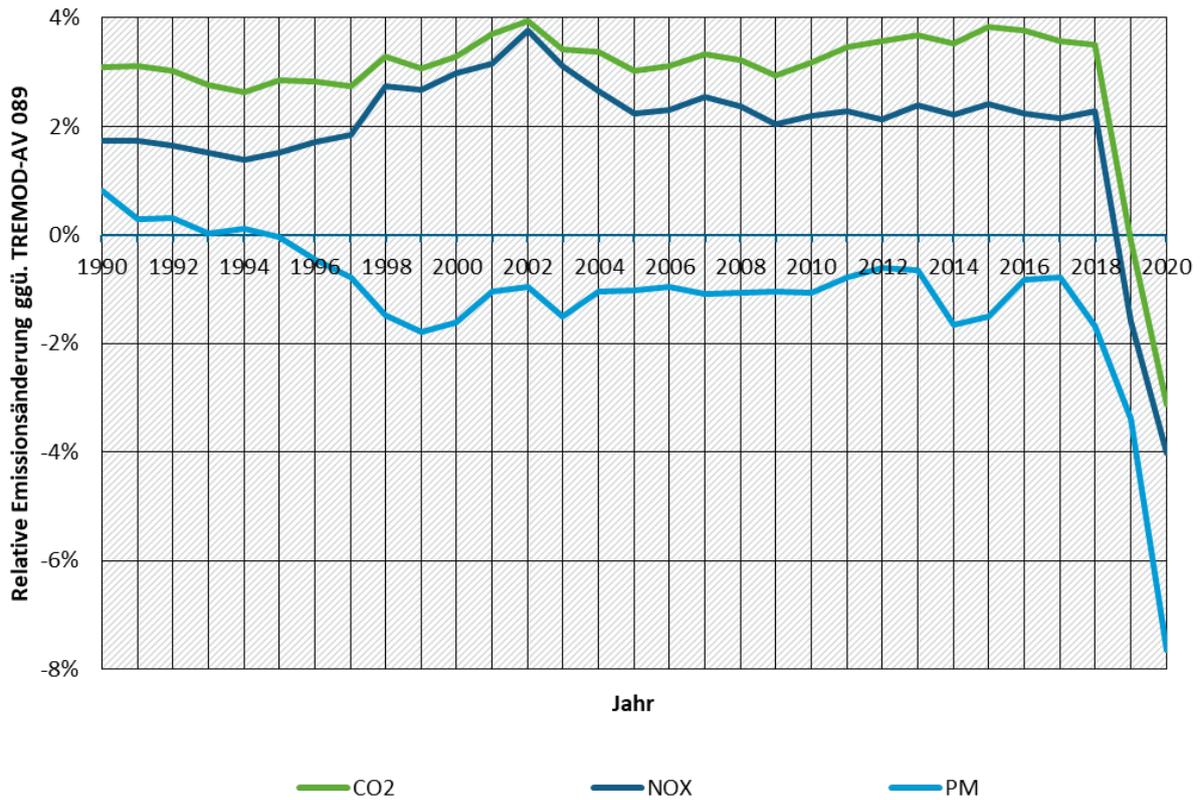
Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089 und 091.

Abbildung 7: Relative Änderungen der internationalen Emissionen in der LTO-Phase



Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089 und 091.

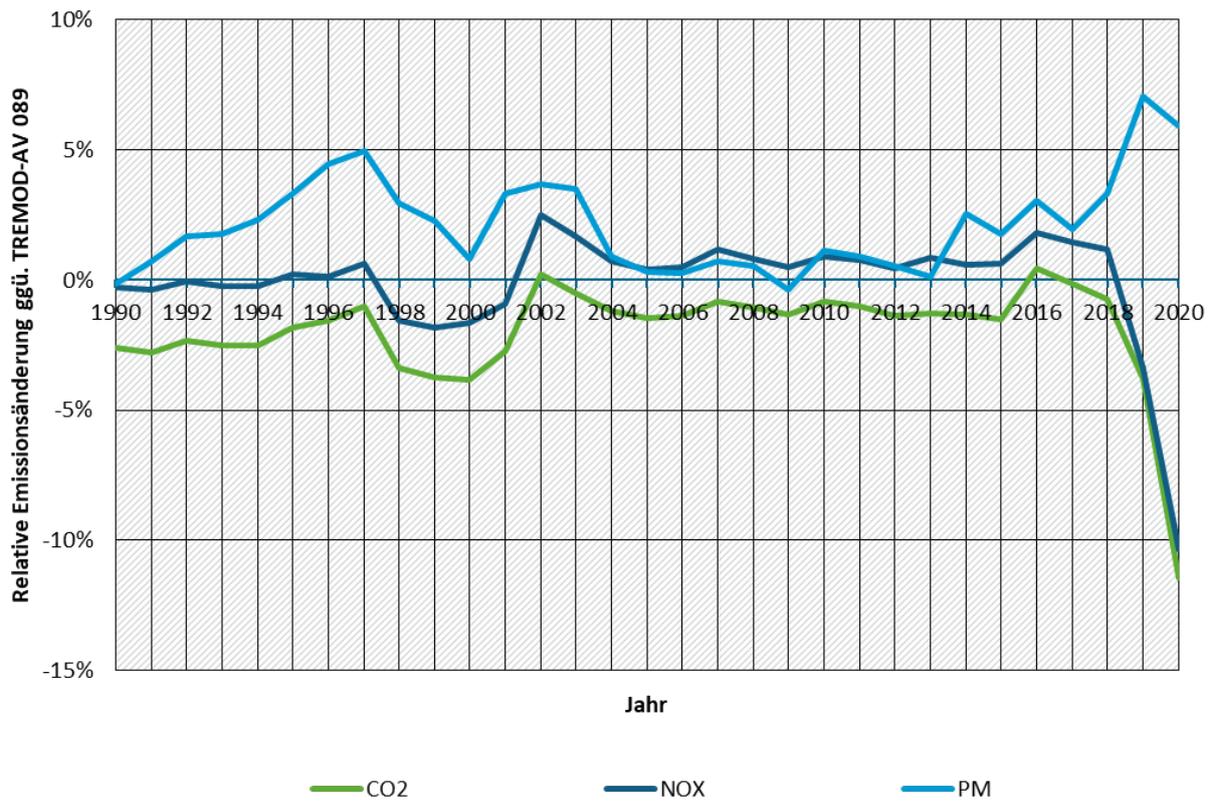
Abbildung 8: Relative Änderungen der Emissionen in der LTO-Phase



Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089 und 091.

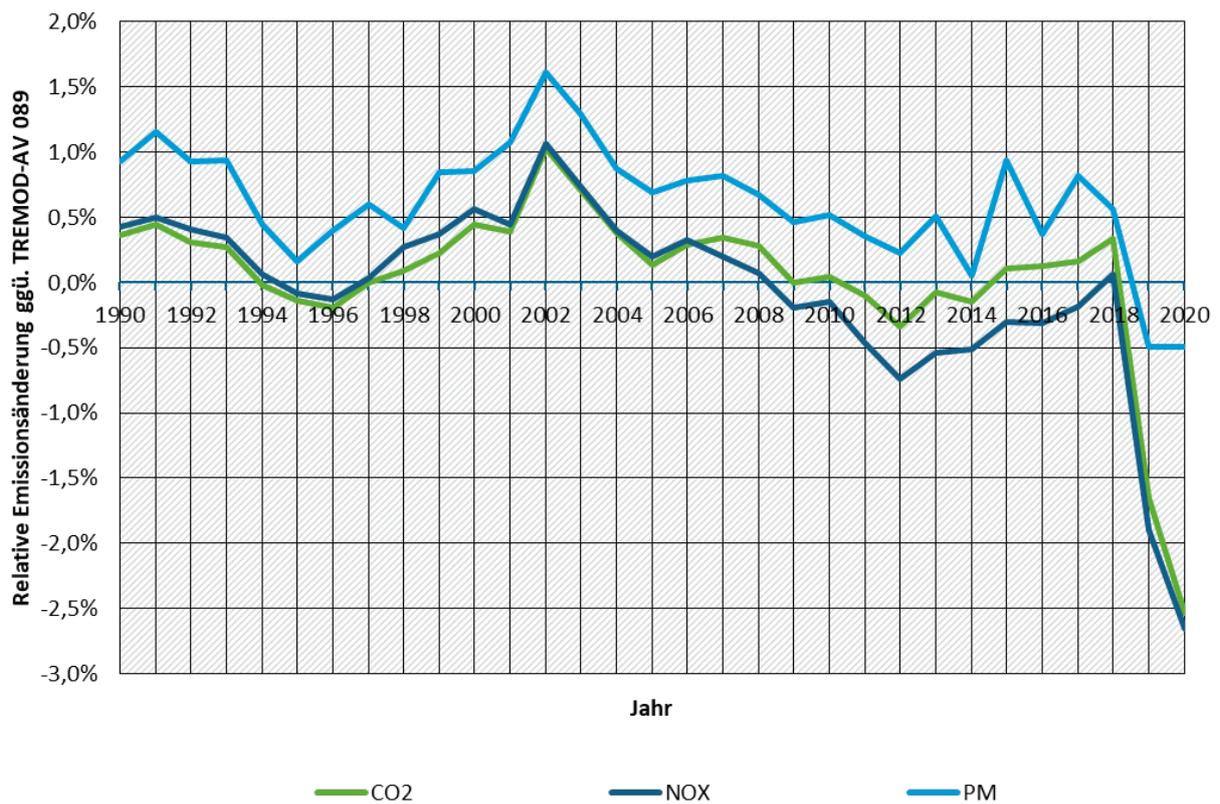
Bei der CCD-Phase fallen die Unterschiede im Schnitt niedriger aus. Hier entstehen die Unterschiede insbesondere aufgrund der Anpassungen des sonstigen Flugverkehrs. Auch hier sind Unterschiede in den Coronajahren am höchsten, da der sonstige Flugverkehr nicht so stark von den Maßnahmen betroffen war wie der gewerbliche Verkehr auf den HVF. Demnach sind die Auswirkungen der Methodikänderungen hier deutlich sichtbar. In den restlichen Jahren hingegen ist der Anteil des sonstigen Flugverkehrs deutlich geringer und somit ist der Einfluss von Änderungen am sonstigen Flugverkehr auf die Gesamtemissionen in diesen Jahren deutlich niedriger. Die folgenden Abbildungen zeigen die Änderungen der Emissionen von NO_x, PM und CO₂ in der CCD-Phase.

Abbildung 9: Relative Änderungen der nationalen Emissionen in der CCD-Phase



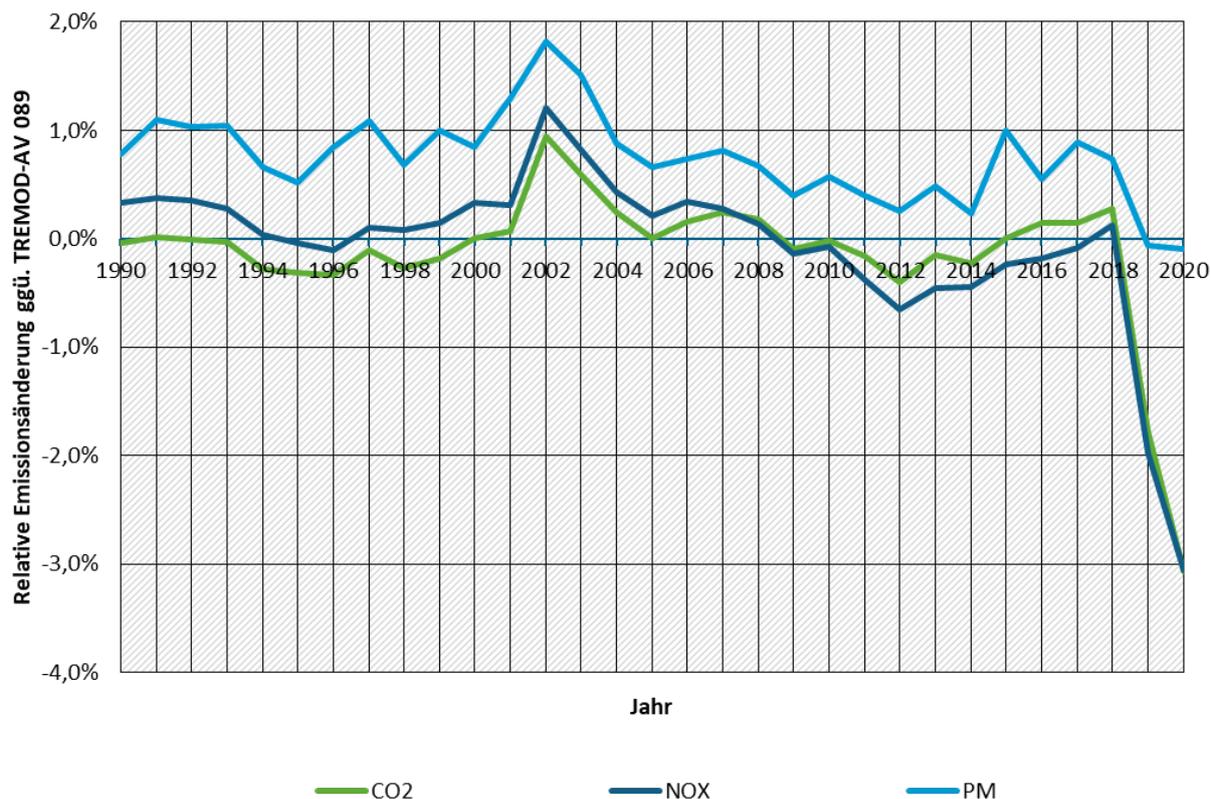
Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089 und 091.

Abbildung 10: Relative Änderungen der internationalen Emissionen in der CCD-Phase



Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089 und 091.

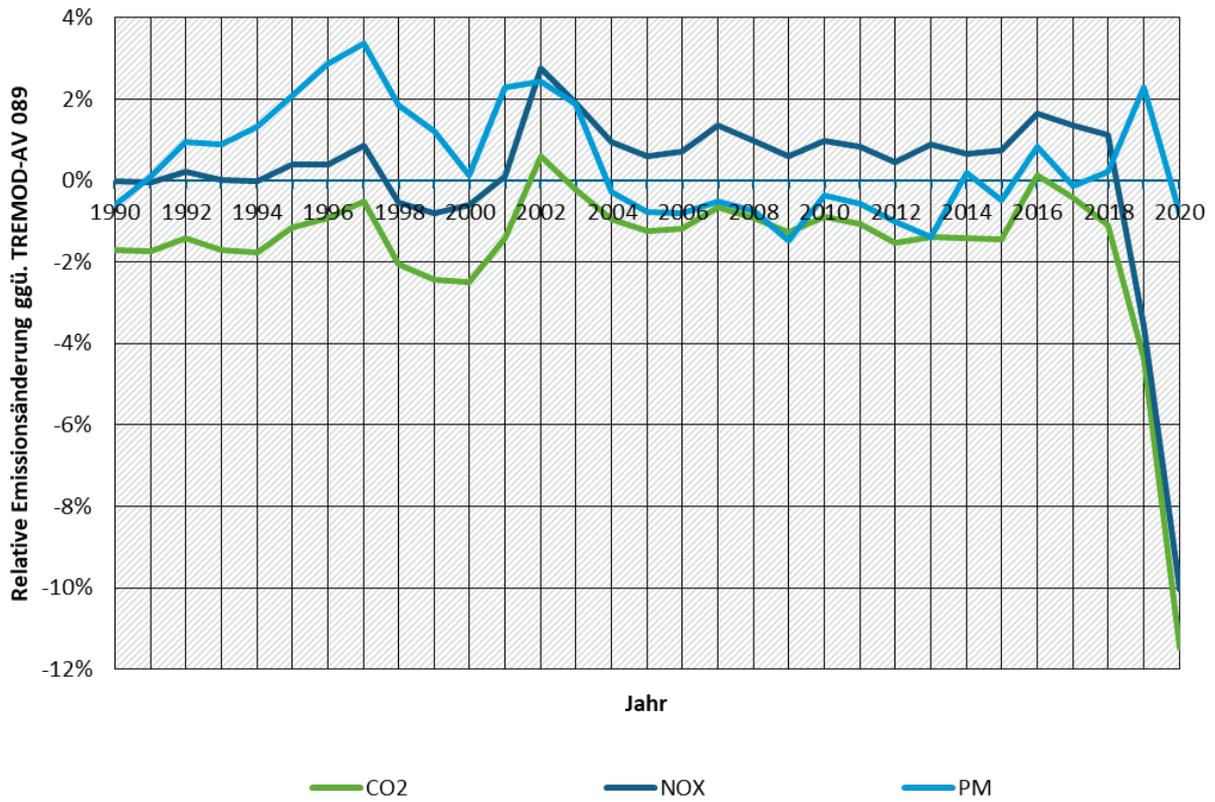
Abbildung 11: Relative Änderungen der Emissionen in der CCD-Phase



Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089 und 091.

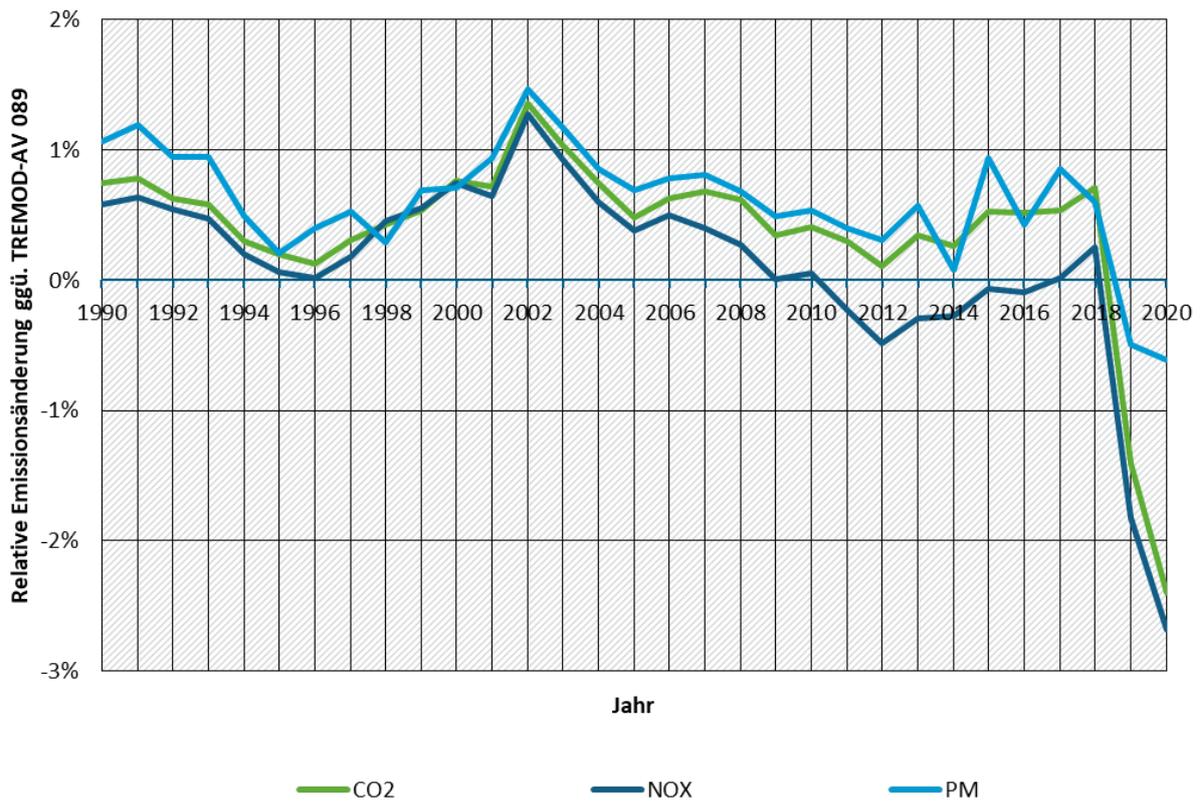
Werden die Gesamtemissionen (LTO + CCD) betrachtet, so ergeben sich nur sehr geringe Unterschiede. Lediglich in den Coronajahren weichen die Gesamtemissionen beim nationalen Flugverkehr spürbar von den Emissionen berechnet nach der alten Methode ab. Die Abweichungen liegen hier im Bereich von ca. 10 %. In den restlichen Jahren liegen die Abweichungen je nach Jahr und Stoff zwischen -4 % und +3 %. Beim internationalen Flugverkehr sind die Unterschiede noch geringer. Abseits von den Coronajahren ist die Abweichung bei -2 % bis +1 %. In den Coronajahren gibt es Unterschiede von +/- 3 %. Insgesamt ändern sich die berechneten Gesamtemissionen durch die Methodikanpassungen kaum. Die folgenden Abbildungen fassen die Änderungen der Gesamtemissionen (LTO + CCD) zusammen.

Abbildung 12: Relative Änderungen der gesamten nationalen Emissionen



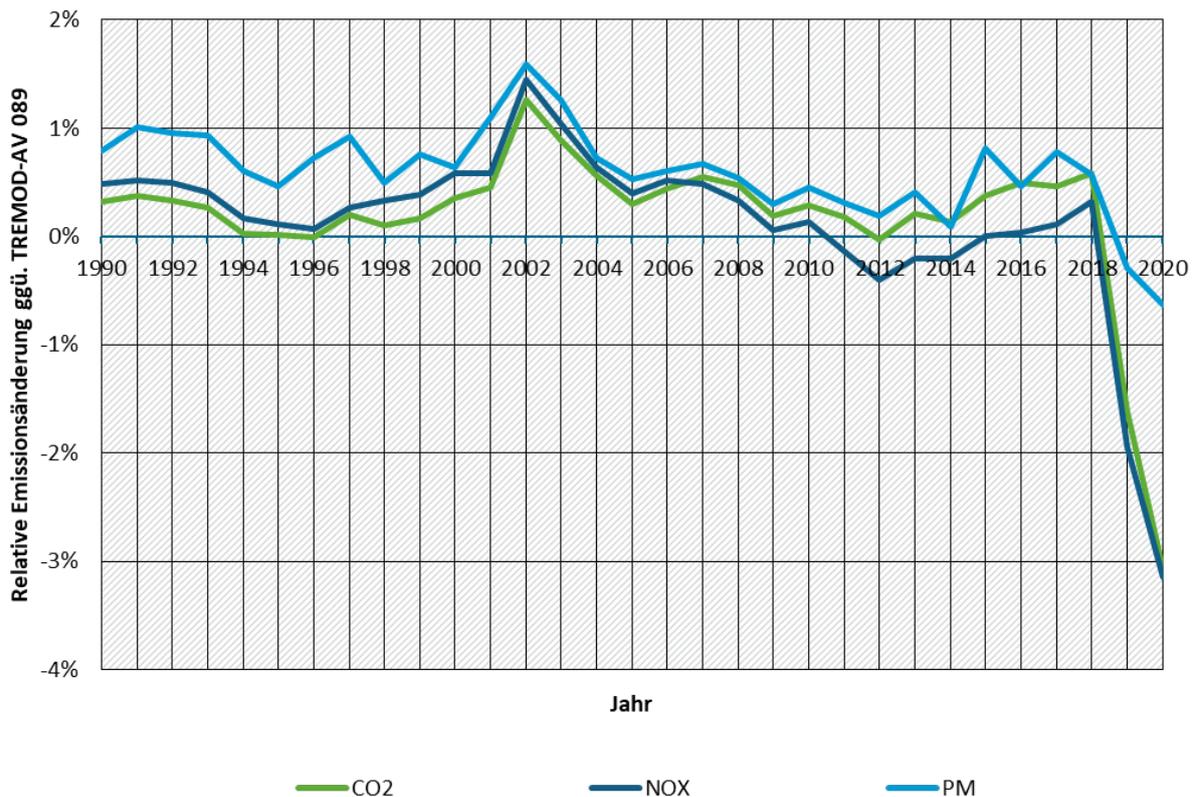
Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089 und 091.

Abbildung 13: Relative Änderungen der gesamten internationalen Emissionen



Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089 und 091.

Abbildung 14: Relative Änderungen der gesamten Emissionen



Quelle: Eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 089 und 091.

4.2 Integration des Clustermodells in TREMOD-AV

Mithilfe der Ergebnisse der Clusteranalyse lässt sich die Berechnungsgenauigkeit der Nicht-CO₂-Effekte in TREMOD-AV steigern. Bis dato wurden die Nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs in TREMOD-AV grob mit einem konstanten Faktor (EWF) berechnet, der mit der CO₂-Emission multipliziert wurde (siehe Abschnitt 2.2). Nun wird das Clustermodell vom DLR verwendet, um die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte über den ATR100 besser abzubilden. Zudem wurde auch die Berechnung über den AGWP100 in TREMOD-AV integriert. Die berechneten und in Abschnitt 5 dargestellten Ergebnisse beziehen sich lediglich auf den ATR100. Im Abschnitt 6 werden die Ergebnisse bei Verwendung unterschiedlicher Metriken diskutiert.

Seitens des DLR wurde die Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte anhand einiger exemplarischer Flüge in einer MS-Excel-Applikation implementiert. Diese dient als prototypische Vorlage, um die Routine in TREMOD-AV zu überführen. Hierzu wurden im Wesentlichen folgende Funktionen neu in TREMOD-AV implementiert:

- ▶ Berechnung der mittleren Breite der Start-Ziel-Verbindungen entlang der verbindenden Großkreislinie.
- ▶ Funktion zur Ermittlung der Clusterzugehörigkeit anhand der mittleren Breite, der Flugdistanz sowie der Größenklasse des eingesetzten Flugzeuges. Die Clusterzugehörigkeit bestimmt hierbei die jeweils auszuwählenden Parameter für die Berechnung der einzelnen Gewichtungsfaktoren der Wirkkomponenten H₂O, NO_x und Zirruswolkenbildung. Bestimmung der jeweiligen Gewichtungsfaktoren der Wirkkomponenten je Start-Ziel-Flughafenpaar und Flugzeugtyp in Abhängigkeit der Clusterzugehörigkeit, der Flugdistanz, der mittleren Breite, dem Kraftstoffverbrauch und der NO_x-Emissionen.

- Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte für Flüge, die nicht über das Clustermodell definiert sind, aber aufgrund ihrer Einsatz- und Antriebsart einen Beitrag leisten. Dies erfolgt durch Ableitung eines distanzabhängigen, mittleren Gewichtungsfaktors, basierend auf den zuvor bestimmten Werten je Wirkkomponente im Bilanzjahr.

4.2.1 Bestimmung der Clusterzugehörigkeit der Flüge

Da die Nicht-CO₂-Effekte für die vier Cluster differenziert angegeben werden, ist eine geographische Lokalisierung in TREMOD-AV zu integrieren. Dies erfolgt über die Geokoordinaten der Start- und Zielflughäfen. Anhand des geographischen Mittelpunktes des Breitengrades zwischen dem Start- und Zielflughafen, der Flugzeuggrößenklasse und der Flugdistanz erfolgt die Zuweisung zu einem der Cluster „Kleinflugzeug“, „Kurzflug“, „Tropen“ oder „Mittlere Breite“. Der geographische Mittelpunkt entspricht dabei dem numerischen Mittel über äquidistante Punkte auf dem Großkreis zwischen dem Start- und Zielflughafen. Das heißt, dass der Großkreis zwischen dem Start- und Zielflughafen in viele Teilabschnitte unterteilt wird und für jeden Teilabschnitt der geometrische Mittelpunkt des Breitengrades berechnet wird. Das numerische Mittel dieser Mittelpunkte ergibt sodann den geographischen Mittelpunkt des Breitengrades zwischen dem Start- und Zielflughafen. Diese Mittelpunktberechnung wurde in TREMOD-AV mithilfe pyproj⁷ integriert.

Abgesehen kleiner Flugzeugtypen (z. B. Sitzplatzanzahl 20-100), die immer dem Cluster „Kleinflugzeuge“ zugeordnet werden, erfolgt die Zuweisung wie folgt:

- Flüge mit einer Flugdistanz (Realdistanz) unter 462 Kilometern werden allgemein dem Kurzflug-Cluster zugeordnet.
- Flüge dessen geographischer Mittelpunkt zwischen dem -29,7° und +29,7° Breite liegen werden dem Tropen-Cluster zugeordnet.
- Die sonstigen Flüge werden dem Cluster der „Mittleren Breiten“ zugeteilt.

Die hier aufgezeigte Zuweisung wurde in der Clusteranalyse festgelegt und wird somit auch für TREMOD-AV übernommen. Es werden in TREMOD-AV die Funktionen und Parameter des Clustermodells (siehe Abschnitt 3.3) verwendet.

Die Flugdistanz wird über die Großkreisdistanz zwischen den beiden Flughäfen und dem Umwegfaktor ermittelt, siehe Abschnitt 4.1.1.

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, ist es notwendig den Flugroutenverlauf anhand der Start- und Zielkoordinaten der Flughäfen zu bestimmen. Da diese bisher keine Berücksichtigung finden, werden folgende Anpassungen getroffen:

Erweiterung der Übergabestruktur bzw. des Datensatzschemas der Eingangsdaten an TREMOD-AV, um dem neuen Datensatzformat mitsamt seiner zusätzlichen Variablen gerecht zu werden, damit diese in den darauffolgenden Berechnungen adäquat berücksichtigt werden können. Hierzu zählen vor allem die Variablen der Koordinaten für Start- und Zielflughäfen. Aber auch die Parametersätze der Funktionen der Cluster und Schadstoffkomponenten zur Bestimmung der Nicht-CO₂-Effekte. Während ersteres als Erweiterung des bisherigen Schemas umgesetzt wird, wird für die Berechnungsparameter der Funktionen der Nicht-CO₂-Effekte die Formeln und Werte aus der Clusteranalyse (siehe Abschnitt 3.3) implementiert.

⁷ Python-Schnittstelle zu PROJ (Bibliothek für kartographische Projektionen und Koordinatentransformationen).

Im Ergebnis berücksichtigen die Nicht-CO₂-Effekte der Clusteranalyse den Klimaeffekt, der durch das Emittieren von NO_x, H₂O und CiC (Wolkenbildung durch Kondensstreifen⁸) entsteht. Somit sind der Kerosinverbrauch, die NO_x-Emissionen, die geflogene Distanz und die mittlere Breite eines Fluges notwendige Parameter, um die Nicht-CO₂-Effekte eines Fluges anhand der Clusteranalyse vollständig bestimmen zu können. Für die Kommunikation wird die gesamte Klimawirkung (Summe aus CO_{2eq} und Nicht-CO₂-Effekte) auf die CO₂-Emissionen bezogen analog zum Konzept des RFI oder EWF.

Entgegen der Excel-Applikation des Clustermodells werden in TREMOD-AV die CO₂- und NO_x-Emissionen nicht pro Größenklasse angegeben, sondern pro Flugzeugtyp spezifisch errechnet.

So können die Emissionen (z. B. NO_x, H₂O) eines Flugzeugtyps (z. B. Airbus A320) direkt verwendet und über Funktionen die dazugehörigen Effekte (Klimawirkungen) berechnet werden statt – wie in der Applikation – nur das typische Emissionsverhalten pro Flugzeuggrößenklasse (z. B. 101-151 Sitzplätze) zu verwenden.

Die differenzierte Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte pro Komponente weist Vorteile ggü. einem pauschalen Wert pro Flugzeuggrößenklasse (DLR Excel-Applikation) auf. Zum einen weisen Flugzeugtypen, die in dieselbe Größenklasse fallen (z. B. Airbus A320neo und Boeing B737 MAX 8) unterschiedliche Emissionen auf, sodass auch die Nicht-CO₂-Effekte bei beiden Typen unterschiedlich sind. Zum anderen könnten sich die spezifischen Emissionen der Flugzeuge künftig (im Szenario) ändern. Das heißt, bspw. die NO_x-Emissionen reduzieren sich in Zukunft überproportional zu den anderen Stoffen durch schärfere Grenzwerte und dadurch reduziert sich auch der Nicht-CO₂-Effekt durch NO_x. Des Weiteren könnte der Einsatz von Wasserstoff oder PtL dazu führen, dass das Emissionsverhalten der Flugzeuge sich künftig ändert. In dem letztgenannten Beispiel wäre jedoch zu überprüfen, ob die Funktionen hierauf übertragbar sind, da eine Änderung des Kraftstoffes und des Triebwerks zu anderen Verbrennungsmechanismen führt, die das Emissionsverhalten (z. B. NO_x-Emissionen) gänzlich ändern können.

Die aus der Clusteranalyse angepassten Funktionen und Berechnungsvorschriften werden in TREMOD-AV direkt implementiert und in die bestehende Bilanzmethode und deren Berechnungsablauf als Ergänzung an entsprechenden Stellen integriert. Siehe hierzu Abschnitt 2.1. Anzumerken ist, dass die Funktionen zeitlich konstant angenommen werden. Dies ist auch so in der Clusteranalyse gegeben. Nichtsdestotrotz können sich die Effekte (und somit auch die Funktionen) in der Realität ändern, da sich die klimatischen Bedingungen ändern (z. B. Lufttemperatur).

Gefordert sind neben der Quantifizierung der Realjahre seit 1990 auch die Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte für die Szenariojahre bis 2050. Die Datenstruktur des Szenarios bleibt für die Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte identisch und es werden lediglich Verbesserungen bei den Emissionsfaktoren (und Verkehrsmengen) angenommen. Daher erfolgt die Berechnung unverändert. Da jedoch aufgrund des Clustermodells nun das Szenario detaillierter abzubilden ist, sind Anpassungen hieran nötig, siehe Abschnitt 4.2.5.

4.2.2 Nicht zum Clustermodell zuordbare Flüge

Im Clustermodell sind nicht alle Flüge enthalten, die in TREMOD-AV bilanziert werden. Zum einen sind dies Flüge, die außerhalb der definierten Distanzen des Clustermodells liegen. So können hierüber lediglich die Nicht-CO₂-Effekte Flüge mit den folgenden Spezifika berechnet werden:

⁸ Durch CiC wird die Wärmestrahlung der Erde abgeschirmt und führt zur Erwärmung wie in einem Treibhaus.

1. Strahlflugzeuge (Jets)
2. Minimale Flugweite von 150 km
3. Flugzeuge mit mehr als 20 Sitzplätzen
4. Maximale Flugweite je Sitzplatzkategorie
5. Nur Passagierverkehr (über Sitzplatzkategorien)

Zu 1.: In TREMOD-AV gibt es neben Strahlflugzeuge auch Propellermaschinen mit Kolbenmotor, Flugzeuge mit Turboprop-Antrieb und Hubschrauber. Da das Emissionsverhalten, Abgastemperatur und insbesondere die Flughöhen sich deutlich bei den genannten Technologien unterscheiden, ist eine Verwendung des Clustermodells abseits der Strahlflugzeuge nicht ohne Einschränkungen möglich. Daher wurde angenommen, dass bei Flugzeugen mit Kolbenmotor sowie bei Hubschraubern keine Nicht-CO₂-Effekte entstehen. Bei Turboprop-Flugzeugen wird demgegenüber das Clustermodell verwendet, da zum einen dieselbe Verbrennungskraftmaschine verwendet wird (Gasturbine) und zum anderen Flughöhen von ca. 8 km erreicht werden, bei denen bereits ein Großteil der Nicht-CO₂-Effekte entstehen, siehe (Dahlmann et al. 2023). Es wurde demnach überprüft, ob die Anwendung des Clustermodells auf Turboprop-Maschinen zu plausiblen Ergebnissen führt. Dies konnte bestätigt werden.

Zu 2.: Es wird angenommen, dass Flüge mit weniger als 150 km Flugweite keine Nicht-CO₂-Effekte aufweisen.

Zu 3. und 4.: Bei Flugzeugen mit 20 oder weniger Sitzplätzen und Flügen, die die maximale Flugweite nach dem DLR Modell überschreiten, werden die Nicht-CO₂-Effekte über mittlere Faktoren je Wirkkomponente (H₂O, NO_x und Zirrusbildung) und 14 Distanzklassen bestimmt, wie sie exemplarisch in Tabelle 16 dargestellt sind. Diese mittleren Werte werden je Bezugsjahr anhand der Faktoren berechnet, die innerhalb der definierten Grenzen des DLR-Clustermodells ermittelt wurden.

Tabelle 16: Beispiel für mittlere Faktoren zur Bestimmung der Nicht-CO₂-Effekte nach Distanzklassen für Flüge außerhalb der Definition des Clustermodells

Distanzklasse	Faktor ATR100 (NO _x)	Faktor ATR100 (H ₂ O)	Faktor ATR100 (Zirrus)	Faktor ATR100 (gesamt, inkl. CO ₂)
150 ... 250km	0,17	0	0,1	1,27
250 ... 500km	0,43	0,05	0,04	1,53
500 ... 750km	0,77	0,18	0,08	2,04
...
5.000km ... 7.500km	2,2	0,35	0,97	4,52
7.500km ... 10.000km	2,33	0,36	1,39	5,09
> 10.000km	2,46	0,19	1,73	5,39

Zu 5.: Frachtflugzeuge können nicht in der DLR-Applikation zum Clustermodell eingetragen werden, da diese keiner Sitzplatzkategorie zugeordnet werden können. Daher wurde eine Zuordnung der Sitzplatzkategorien zu Größenklassen nach MTOW über die Angaben zu den Sitzplätzen und MTOW pro Flugzeugtyp in TREMOD-AV vorgenommen. Tabelle 17 zeigt die

Zuordnung. Anhand dieser Zuordnung können Frachtmaschinen über ihr MTOW einer der Sitzplatzkategorien nach DLR zugeteilt und berechnet werden.

Tabelle 17: Zuordnung MTOW zu Sitzplatzkategorien

Sitzplatzkategorie	MTOW [kg] min	MTOW [kg] max
20-50	20.430	22.215
51-100	22.215	62.390
101-151	62.390	73.200
152-201	73.200	162.685
202-251	162.685	249.450
252-301	249.450	286.900
302-600	286.900	395.000

Neben den genannten Einschränkungen des Clustermodells liegt auch eine Einschränkung bei der Verwendbarkeit beim sonstigen Flugverkehr (gewerblicher Verkehr auf sonstigen Flugplätzen und nicht-gewerblicher Flugverkehr) vor. Da der sonstige Flugverkehr abgesehen von den gewerblichen Flügen von den sonstigen Flugplätzen zu den HVF keine Informationen zur Start-Ziel-Verbindung aufweist, sondern nur zur geflogenen Distanz und Relation (national, international), wird die o. g. Regressionsfunktion für das Cluster „Kurzflug“ verwendet. So können über die angenommene Flugdistanz die Nicht-CO₂-Effekte von Flugzeugen mit Strahltriebwerk und Turboprop über die Funktion abgeschätzt werden.

4.2.3 Anwendung des Clustermodells auf den sonstigen Flugverkehr

Beim sonstigen Flugverkehr (außer gewerbliche Flüge zu HVF) liegen keine Informationen zur Flugroute vor. Es sind lediglich Angaben zu den Starts pro Größenklasse vor. Um Emissionen berechnen zu können, werden die Größenklassen spezifischen Flugzeugtypen zugeteilt, durchschnittliche Flugdistanzen angenommen und die Relation (national, international) angenommen, vgl. Abschnitt 0.

Zur Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte wird die im Abschnitt 4.2.2 erwähnte Methode zur Abschätzung anhand mittlerer Werte je Distanzklasse verwendet, da hier keine Zielkoordinaten der Flüge bekannt sind, um einer genauere Clusterzuordnung zu bewerkstelligen. Ansonsten gelten beim sonstigen Flugverkehr dieselben Einschränkungen und Annahmen wie beim gewerblichen Flugverkehr auf HVF, siehe Abschnitt 4.2.2.

4.2.4 Einbindung der Nicht-CO₂-Effekte in die Routine von TREMOD-AV und Migration

Da die Datenmenge durch Erweiterung des Verkehrsmengengerüsts um Start-Ziel-bezogene Informationen sowie die genauere Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte erheblich gestiegen ist, entstehen technische Engpässe bei Access (aktuell für TREMOD-AV verwendete Plattform). Daher war eine Migration von TREMOD-AV in eine neue Systemarchitektur notwendig.

Eine teilweise Migration des Modells wurde bereits im Rahmen des UBA-Projekts „Neubewertung der Unsicherheiten der mit den zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor verwendeten Parameter und Methoden“ (Allekotte et al. 2023b) durchgeführt. Notwendig wurde dieser Schritt aufgrund der relativ geringeren

Ausführungsgeschwindigkeit des Access-Bilanzierungstools und der notwendigen Anzahl an Iterationen zur Bestimmung der Unsicherheiten sowie unzureichender numerischer sowie statistischer Bibliotheken für Access-VBA/-SQL. Um dem zu entgegen, wurde das Rechenmodell von MS Access in ein Python-Programm überführt und anhand des bestehenden Access-Programms validiert. Dies ermöglichte einerseits eine höhere Flexibilität bei Anpassungen am Berechnungsvorgang als auch eine erhebliche Verkürzung der Rechenzeiten. Die im Rahmen von (Allekotte et al. 2023b) nach Python überführte Berechnung berücksichtigte zum einen nur ein Bilanzjahr und zum anderen nur den Modellteil, der für das Emissionsinventar relevant ist. Somit fehlten einige Aspekte wie bspw. die Verkehrsleistungen bzw. die Allokation der Emissionen auf die Transportarten.

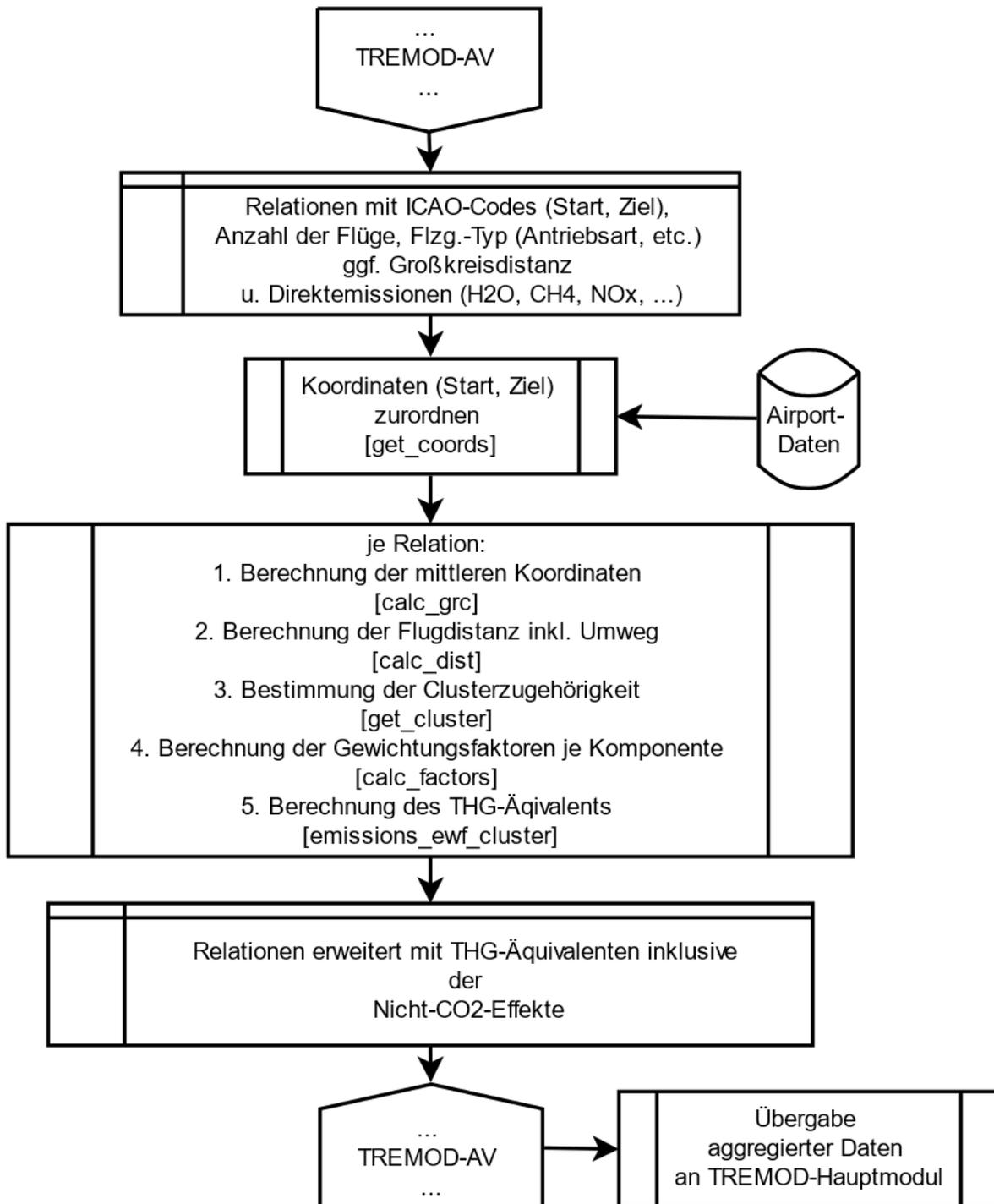
Um den Modellanforderungen hinsichtlich Berechnungs- und Datenstruktur sowie Datenmenge in der Umsetzung der Clusteranalyse in TREMOD-AV gerecht zu werden, war es demnach vorteilhaft gänzlich auf dem Python-Programm zur Integration der Erkenntnisse der Clusteranalyse aufzusetzen. Eine vollständige Neuentwicklung von TREMOD-AV erschien nicht notwendig, da die Funktionsweise des Clustermodells im Ergebnis sehr gut auf die Funktionsweise von TREMOD-AV abgestimmt ist. Dies sprach dafür, ein integriertes Modell zu erstellen und nicht mit definierten Schnittstellen zwischen Clustermodell und TREMOD-AV zu arbeiten.

Zur Integration des Clustermodells bietet es sich an, aufgrund der in dem Projekt (Allekotte et al. 2023b) in wesentlichen Teilen stattgefundenen Migration von TREMOD-AV von MS-Access zu Python ein Modul mit einer Klasse (*NonCO2Effects*) zu programmieren, die – grob strukturiert – wie folgt aufgebaut ist und sich direkt in den bestehenden Code integrieren lässt:

- ▶ Datenvariable (*airports*) mit Informationen zu Flughafenkoordinaten.
- ▶ Parametervariable (*p_cluster*) zur Bestimmung der Clusterzugehörigkeit, die aus der Tabelle mit den Grenzkordinaten-Informationen gespeist wird.
- ▶ Parametervariable(n) (*p_effect[cluster, effect]*) zur Effektbestimmung durch NO_x, H₂O und Cirr, je Cluster.
- ▶ Methode (*get_coords*) zur Bestimmung der Koordinaten auf Basis der Eingabe der ICAO-Kennung mittels *airports*.
- ▶ Methode (*calc_grc*) zur Berechnung der Großkreisdistanz und des geographischen Mittelpunkts auf Basis der Start-Ziel-Koordinaten.
- ▶ Methode (*calc_dist*) zur Bestimmung der Flugdistanz inklusive Umwegzuschlag.
- ▶ Methode (*get_cluster*) zur Bestimmung der Clusterzugehörigkeit auf Basis der Mittleren Koordinate aus *calc_grc* und der Flugdistanz aus *calc_dist*.
- ▶ Methode (*calc_factors*) zur Berechnung der Gewichtungsfaktoren je Komponente auf Basis des zuvor ermittelten Parametersatzes, der Flugdistanz und der Emissionen der Komponenten.
- ▶ Methode (*emissions_ewf_cluster*) die auf Basis der Direkt-CO₂-Emissionen und den/m Gewichtungsfaktor(en) die THG-Äquivalente inklusive der Nicht-CO₂-Effekte bestimmt.

Der zu implementierende Berechnungsablauf wird anhand nachstehender Abbildung 15 illustriert.

Abbildung 15: Schematische Ablauf und Einbindung der Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte in TREMOD-AV



Quelle: eigene Darstellung (ifeu). Anmerkung: Dargestellt werden die Anpassungen an TREMOD-AV. Die Nicht-CO₂-Effekte für die Szenarienjahre werden im TREMOD Hauptmodul implementiert.

Allgemein ändert sich durch die Integration des Clustermodells nichts an der Methode zur Bilanzierung der Emissionen und Verbräuche in TREMOD-AV. Dadurch wird u. a. gewährleistet, dass die Emissionsberechnung analog zu den Vorjahren erfolgen kann und es keine statistischen Brüche durch die Integration der Nicht-CO₂-Effekte kommt.

Die Ergebnisse aus den Berechnungen aus TREMOD-AV werden weiterhin jährlich in aggregierter Form an das TREMOD-Hauptmodul übergeben. Diese Schnittstelle bleibt demnach erhalten. Nun ist jedoch auch das Szenario Bestandteil von TREMOD-AV und wird demnach zusätzlich an das TREMOD-Hauptmodul übergeben. Vorher fand die Szenarienberechnung ausschließlich im Hauptmodul statt.

4.2.5 Szenariointegration

Neben der Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte für die Realjahre wurde ebenfalls auch für die Szenarienjahre bis 2050 die Klimawirkung berechnet. Da hierfür die Differenzierung der alten Datenstruktur nicht mehr ausreichend war, musste das Szenario gegenüber der letzten TREMOD-Version angepasst werden.

Im alten Szenario wurden keine Informationen über die künftige Entwicklung der Flugrouten gegeben. Es wurden lediglich relative Entwicklungen der Verkehrsleistung, des Besetzungsgrads und somit auch der Flugzeugkilometer pro Relation (national, international) angegeben. Dies ermöglicht jedoch zum einen keine Zuordnung zu den Clustern und zum anderen gab es keine detaillierte Verteilung von Flugweiten, sondern lediglich Mittelwerte für jeweils nationale und internationale Flüge. Beide Aspekte sind jedoch relevant für die Klimawirkung. Daher müssen im Szenario nun auch künftige Entwicklungen von Start-Ziel-Verbindungen berücksichtigt werden. Hierfür wurde das Luftverkehrsprognosemodell vom DLR verwendet (Abschnitt 4.2.5.1).

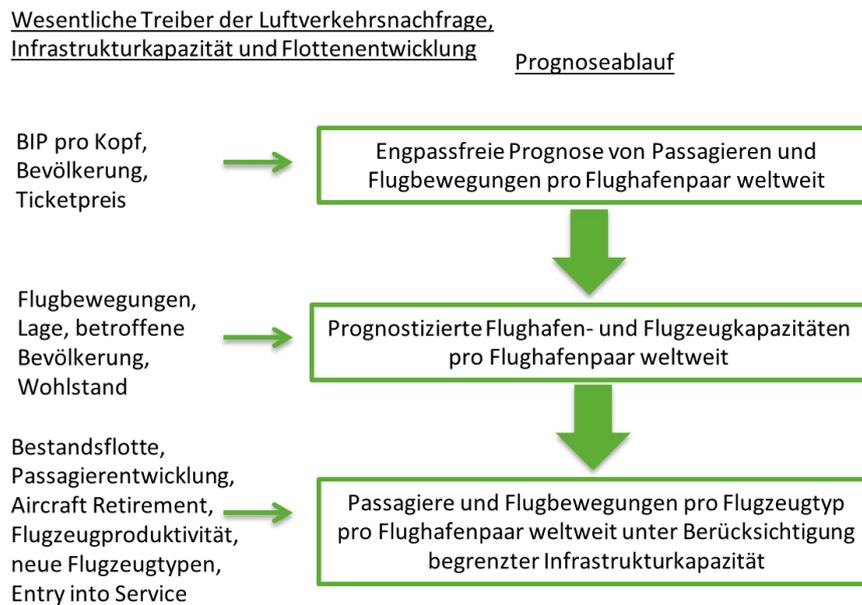
Neben den Verkehrsmengen werden im Szenario auch die Entwicklungen der spezifischen Emissionen (z. B. CO₂, NO_x etc.) angegeben. Die Annahmen werden ggü. der alten TREMOD Version nicht angepasst.

Die Szenarioberechnung erfolgt nun in TREMOD-AV und nicht mehr in TREMOD. Zuvor wurde das Szenario lediglich im TREMOD-Hauptmodul berechnet und war nicht in TREMOD-AV enthalten. Da nun jedoch die Szenarioberechnung deutlich aufwendiger ist, wird diese in der neuen Python-Umgebung durchgeführt und an das Hauptmodul übergeben.

4.2.5.1 Kurzübersicht DLR LV Luftverkehrsprognosemodell

Das DLR LV Luftverkehrsprognosemodell (Gelhausen et al. 2019) besteht aus verschiedenen Teilmodellen, die im nachfolgenden kurz beschrieben werden. Abbildung 16 zeigt die grundsätzliche Vorgehensweise: In einem ersten Schritt wird für jedes weltweite Flughafenpaar eine Prognose des Passagier- und Flugwachstums erstellt. Dies erfolgt unter der Annahme, dass keine Kapazitätsengpässe an den Flughäfen existieren. Den Ausgangspunkt der Prognose bilden Ist-Daten zu Passagier- und Flugaufkommen zwischen Flughafenpaaren eines zu wählenden Basisjahres. Eine solche Detailtiefe der Daten bieten zum Beispiel kommerzielle Anbieter wie Sabre Market Intelligence, auf dessen Daten hier zurückgegriffen wird. Mithilfe des Modells werden sodann für diese Flughafenpaare Wachstumsfaktoren berechnet, sodass die Ausgangsdaten des Basisjahres in Prognosewerte transformiert werden. Diese Wachstumsfaktoren werden durch ein ökonometrisch geschätztes Gravity-Modell ermittelt. Die Treiber der Passagier- und Flugentwicklung sind typischerweise das Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf, die Bevölkerungsgröße und der Ticketpreis, welcher mit einem eigenen Modell bestimmt wird. Für die Entwicklung des Ticketpreises spielen die Kerosinpreis- und BIP-pro-Kopf-Entwicklung eine entscheidende Rolle. Wir nehmen an, dass der reale, d. h. der inflationsbereinigte Ticketpreis in Zukunft im Durchschnitt weiter sinken wird. Wie stark das der Fall ist, hängt von der regionalen Entwicklung ab.

Abbildung 16: Kurzübersicht DLR LV Luftverkehrsprognosemodell



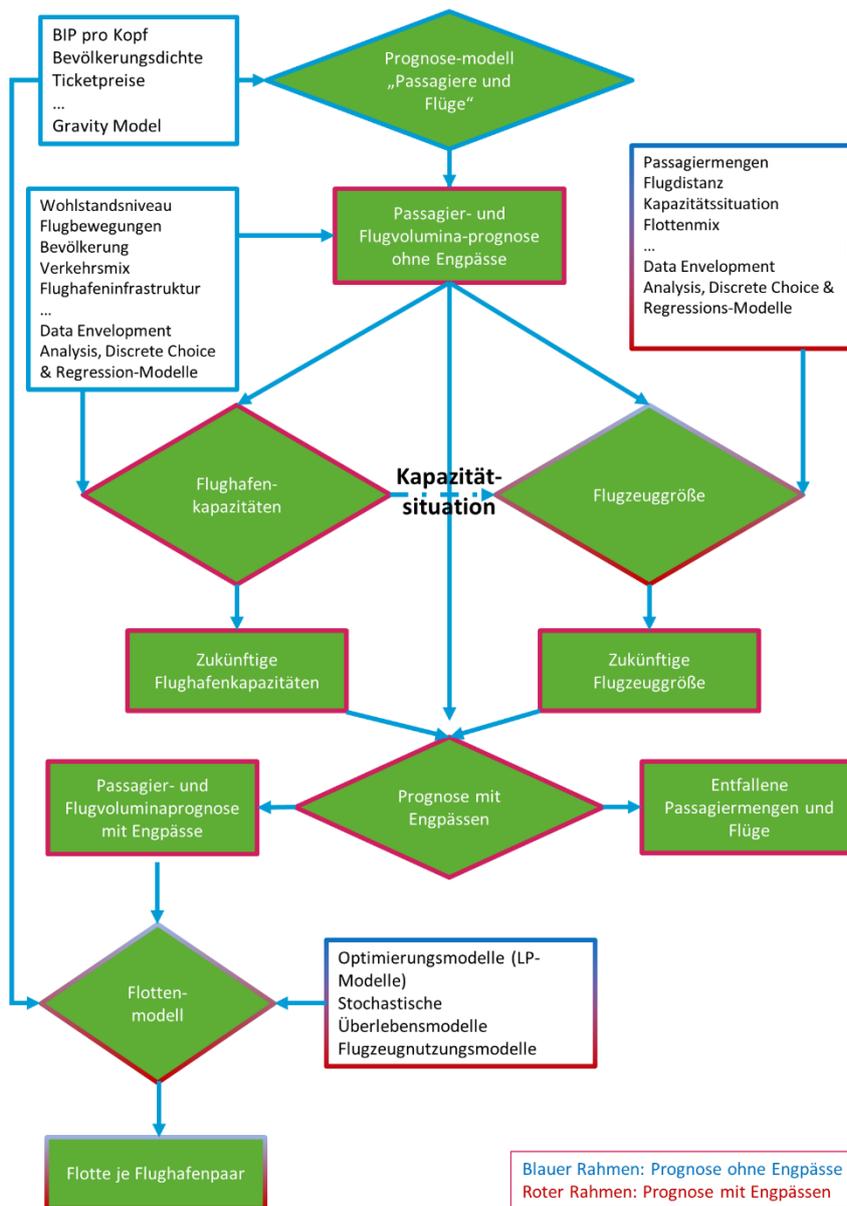
Quelle: (Gelhausen et al. 2019).

In einem zweiten Schritt werden zukünftige Flughafen- und Flugzeugkapazitäten auf den einzelnen Flughafenpaaren prognostiziert. Die Entwicklung der Flughafenkapazitäten ist entscheidend durch die vom Flughafen verursachten Externalitäten beeinflusst. Kapazitätserweiterungen können folglich zu einer Ablehnung in der umliegenden Bevölkerung führen, sofern diese in Summe nicht von der Erweiterung profitiert. Folglich ist eine Kapazitätserweiterung in hoch entwickelten demokratischen Volkswirtschaften unwahrscheinlicher als in einem Schwellenland.

Das unter Berücksichtigung von Kapazitätsengpässen prognostizierten Wachstum, wird sodann auf die prognostizierte Flotte umgelegt. Hier spielen insbesondere die Bestandsflotte, das Aircraft Retirement, die Flugzeugproduktivität sowie der mögliche Markteintritt neuer Flugzeugtypen eine wichtige Rolle. Welches Flugzeug auf welcher Strecke eingesetzt wird, hängt von dem Verhältnis von Passagieren zu Flügen ab, welches wiederum durch die Kapazitätssituation an den Flughäfen beeinflusst wird. Die Streckenlänge spielt ebenfalls eine Rolle, da das Flugzeug die Distanz bewältigen können muss. So finden sich größere Flugzeuge tendenziell auf langen Strecken, die durch ein großes Verhältnis von Passagieren zu Flügen gekennzeichnet sind.

Abbildung 17 zeigt den Prognoseablauf in etwas detaillierter Form. Hier wird auch deutlich, dass sowohl für die engpassfreie als auch engpassinklusive Prognose eine Flottenprognose möglich ist. Dies dient üblicherweise nur Vergleichszwecken mit anderen Prognosen, welche Kapazitätsengpässe tendenziell weniger berücksichtigen. In Abbildung 17 sind auch weitere Hinweise zu verwendeten Daten und Modellen aufgeführt, so dass neben den bereits erwähnten Gravity Models auch Data Envelopment Analysis (DEA), Discrete Choice Models und weitere Regressionsmodelle verwendet werden. Einzelheiten hierzu finden sich in (Gelhausen et al. 2019).

Abbildung 17: Ablauf des DLR LV Luftverkehrsprognosemodells



Quelle: (Gelhausen et al. 2019).

4.2.5.2 Einbindung des Szenarios in TREMOD-AV

Das DLR LV Modell liefert die Entwicklung des gewerblichen Personenflugverkehrs pro Jahr bis 2050 in der folgenden Differenzierung:

- ▶ Startflughafen über IATA-Codes (aktuell 31 Flughäfen in Deutschland)
- ▶ Zielflughafen über IATA-Code (aktuell ca. 460 Flughäfen)
- ▶ Größenklasse der Flugzeuge (aktuell 13 Sitzplatzkategorien)
- ▶ Passagieraufkommen
- ▶ Anzahl Flüge

Die Datenstruktur passt gut zu der aktuellen Struktur der Realjahre von Destatis (vgl. Abschnitt 4.1.1). Jedoch gibt es für die Realjahre (2022, 2023) bereits so große Abweichungen zwischen Destatis und dem DLR LV Modell, wenn man die Daten auf der höchsten Detaillierungsstufe vergleicht, dass die Szenarienwerte zunächst aggregiert werden.

Die Aggregation erfolgt über das Startland (Deutschland) und den Zielkontinent (definiert über den Zielflughafen). Auf Start-Ziel-Relationsebene, aber auch auf Ziellandebene, liegen keine ausreichenden Übereinstimmungen vor. Schlussendlich liegen nach der Aggregation das Passagieraufkommen und Anzahl Flüge pro Größenklasse und Zielkontinent (national, Europa, Amerika, Afrika, Asien, Australien/Ozeanien) vor.

Im darauffolgenden Schritt werden die in TREMOD-AV definierten Flugzeugtypen den Größenklassen im DLR LV Modell zugeteilt. Die Einordnung in die Größenklassen erfolgt über die Sitzplatzanzahl, die pro Flugzeugtyp in TREMOD-AV definiert ist. Pro Größenklasse erhalten somit alle Flugzeugtypen dieselbe relative Entwicklung im Szenario.

Im Falle von Relationen für deren Sitzplatzgrößenklasse keine Entwicklung in den Szenariendaten vorhanden ist, werden diese konstant fortgeschrieben. Liegen in den Zeitreihen der Szenarien Relationen mit zugehöriger Sitzplatzgrößenklasse ohne Entsprechung in den statistischen Daten des Basisjahres vor, werden diese der nächstkleineren zugeordnet, was jedoch nur einen verschwindend geringen Anteil der Flüge betrifft. Die folgenden Tabellen zeigen die Entwicklung der Starts und des Passagieraufkommen, die vom Realjahr 2023 nach Destatis und dem Szenario nach DLR abgeleitet sind. Es wird im Szenario angenommen, dass die durchschnittliche Sitzplatzkapazität deutlich steigt.

Tabelle 18: Entwicklung Starts auf HVF im Szenario

Jahr	national	Europa	Amerika	Afrika	Asien
2023	184.969	529.282	30.296	22.535	34.716
2025	256.176	623.821	34.434	22.191	42.823
2030	245.184	641.349	35.613	23.076	42.963
2035	318.292	729.068	40.919	23.881	55.850
2040	335.312	763.264	43.955	24.881	60.223
2045	354.740	799.892	47.259	26.223	65.123
2050	376.317	839.260	50.968	27.659	70.859

Quelle: Eigene Auswertung anhand Realjahr 2023 nach Destatis und DLR LV Modell. Anmerkungen: Es gibt keine Direktflüge nach Australien/Ozeanien.

Tabelle 19: Entwicklung Passagieraufkommen auf HVF im Szenario

Jahr	national	Europa	Amerika	Afrika	Asien
2023	11,6 Mio.	67,7 Mio.	7,6 Mio.	3,8 Mio.	7,6 Mio.
2025	19,5 Mio.	69,7 Mio.	10,1 Mio.	3,8 Mio.	10,3 Mio.
2030	19,0 Mio.	75,3 Mio.	10,5 Mio.	4,0 Mio.	10,4 Mio.
2035	31,7 Mio.	88,1 Mio.	13,1 Mio.	4,6 Mio.	16,1 Mio.
2040	35,5 Mio.	96,4 Mio.	14,6 Mio.	5,1 Mio.	18,0 Mio.
2045	39,7 Mio.	105,7 Mio.	16,2 Mio.	5,6 Mio.	20,2 Mio.
2050	44,4 Mio.	116,2 Mio.	18,2 Mio.	6,3 Mio.	22,8 Mio.

Quelle: Eigene Auswertung anhand Realjahr 2023 nach Destatis und DLR LV Modell. Anmerkungen: Es gibt keine Direktflüge nach Australien/Ozeanien.

Demgegenüber wird beim gewerblichen Personenverkehr auf den sonstigen Flugplätzen die relative Entwicklung aller Flughäfen differenziert nach Relation (national, international) und nicht nach Zielkontinent bezogen auf 2023 aus der ermittelten Entwicklung der Hauptverkehrsflughäfen abgeleitet. und entsprechend übertragen.

Das DLR LV Modell liefert nur Entwicklungen für den gewerblichen Personenverkehr. Demnach sind noch der Güterverkehr sowie der nicht-gewerbliche Flugverkehr zu ergänzen. Beim Güterverkehr sind die relativen Entwicklungen an das letzte TREMOD-Trendszenario angelehnt. Hierbei wurden die Entwicklungen der letzten zwei Jahrzehnte herangezogen, um hieraus einen Trend abzuleiten. Dieser Ansatz führt zu folgenden Annahmen:

- ▶ Beifracht
 - Beladung pro Start: konstant auf Niveau von 2023
- ▶ Frachtflugzeuge
 - National:
 - Beladung pro Start: +0,29 % p. a.
 - Starts: -0,43 % p. a.
 - International:
 - Beladung pro Start: +0,39 % p. a.
 - Starts: -0,51 % p. a.

Eine Differenzierung nach Start-Ziel-Verbindung wird nicht vorgenommen. Bei Flugzeugen mit Beifracht wird angenommen, dass die Beladung pro Flug konstant bleibt. Änderungen beim Güteraufkommen bei Flügen mit Beifracht ergeben sich somit aus Änderungen beim gewerblichen Personenflugverkehr nach dem DLR LV Modell.

Für den nicht-gewerblichen Flugverkehr liegen keine Informationen vor. Hier werden dieselben Annahmen wie für den gewerblichen Personenflugverkehr auf den sonstigen Flugplätzen verwendet.

Bei den Emissionsfaktoren lehnen sich die Annahmen an das letzte TREMOD-Trendszenario an. Folgende Annahmen wurden hier getroffen: Bezüglich der Kraftstoffverbräuche und somit auch der kraftstoffspezifischen Emissionen (u. a. CO₂) wird eine Verbesserung von 1 % p. a. bezogen auf die Verkehrsleistung angenommen. Bei den NO_x-Emissionen werden Verbesserungen in Höhe von 2,0 % p. a. und bei PM 1,1 % p. a. angenommen. Für die sonstigen Schadstoffe liegen keine Werte vor. Hier werden vereinfachend die Minderungen vom Kraftstoffverbrauch verwendet. Bei Flügen mit Beifracht werden nach Konvention Personen mit 0,1 t angesetzt.

5 Gesamte Klimawirkung des deutschen Flugverkehrs

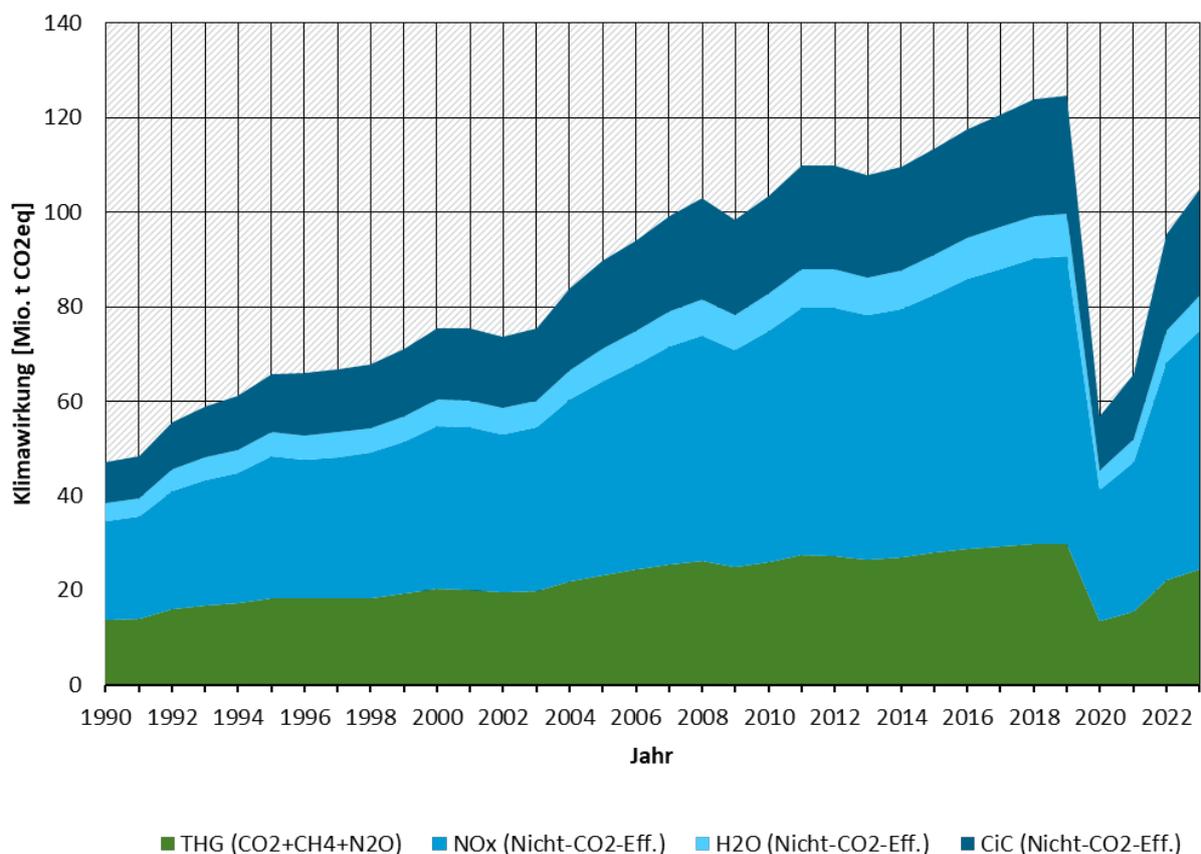
5.1 Detailergebnisse

Im Folgenden werden die Klimawirkungen des deutschen Flugverkehrs (von Deutschland abgehende Flüge) dargestellt. Diese wurden anhand der neuen TREMOD-AV Version 091 in Python gerechnet und enthalten das oben beschriebene Clustermodell zur Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte.

Abbildung 18 zeigt die gesamten Klimawirkungen differenziert nach CO_{2eq} und Nicht-CO₂-Effekten für den Zeitraum 1990-2023. Es ist ersichtlich, dass die Klimawirkung der von Deutschland abgehenden Flüge von 1990 bis 2019 deutlich gestiegen ist. Während die THG-Emissionen von 13,6 auf 29,7 Mio. t CO_{2eq} anstiegen (+119 %), erhöhte sich die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Effekte überproportional. Diese stiegen von 33,4 auf 74,7 Mio. t CO_{2eq} (+184 %). Der Anteil der Nicht-CO₂-Effekte stieg somit von 71 % auf 76 %. Die ist insbesondere auf die Flugrelationen zurückzuführen (deutlicher Anstieg beim Anteil internationaler Flüge).

Werden lediglich die Nicht-CO₂-Effekte betrachtet, so liegt der Anteil der Effekte aufgrund der NO_x-Emissionen bei knapp zwei Drittel. Die Anteile von Wasser und der Zirruswolkenbildung liegen bei ca. 10 % bzw. 27 %. Die Anteile variieren nur geringfügig über die Zeitreihe, wobei zu erkennen ist, dass der Trend von H₂O aufgrund der steigenden Kraftstoffeffizienz leicht sinkend ist.

Abbildung 18: Klimawirkung (ATR100) des gesamten deutschen Flugverkehrs 1990-2023 nach Treibhausgasen und Nicht-CO₂-Effekte differenziert

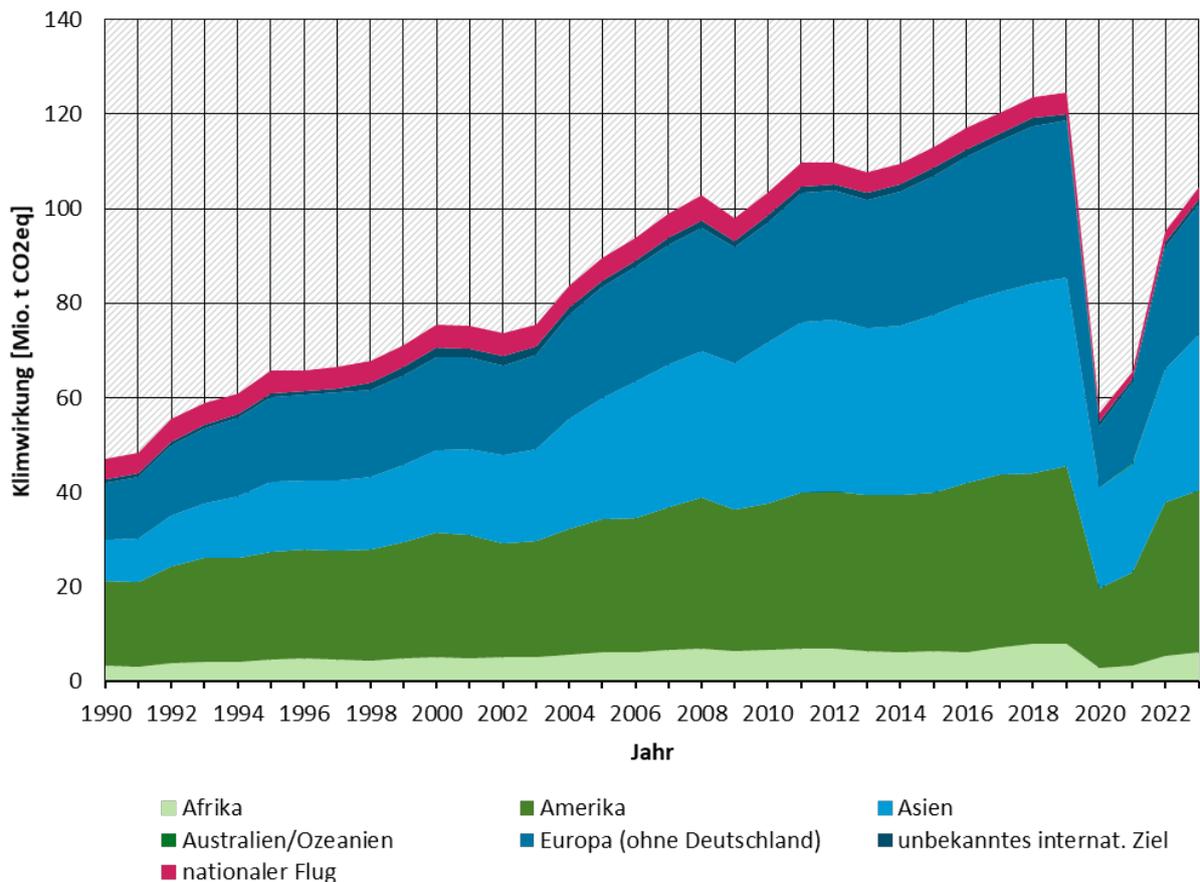


Quelle: eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 091.

Die Klimawirkung der internationalen Flüge machte im Jahr 2023 98 % der Klimawirkung aller von Deutschland abgehenden Flüge aus und ist damit deutlich höher als die Wirkung von nationalen Flügen, siehe Abbildung 19. Demgegenüber machen die internationalen Flüge einen Anteil von 95 % an den Treibhausgasen aus. Den größten Anteil an der Klimawirkung haben 2023 europäische Flüge (exkl. nationale Flüge) mit 33 %. Jeweils 28 % sind auf Flüge nach Asien bzw. Amerika zurückzuführen.

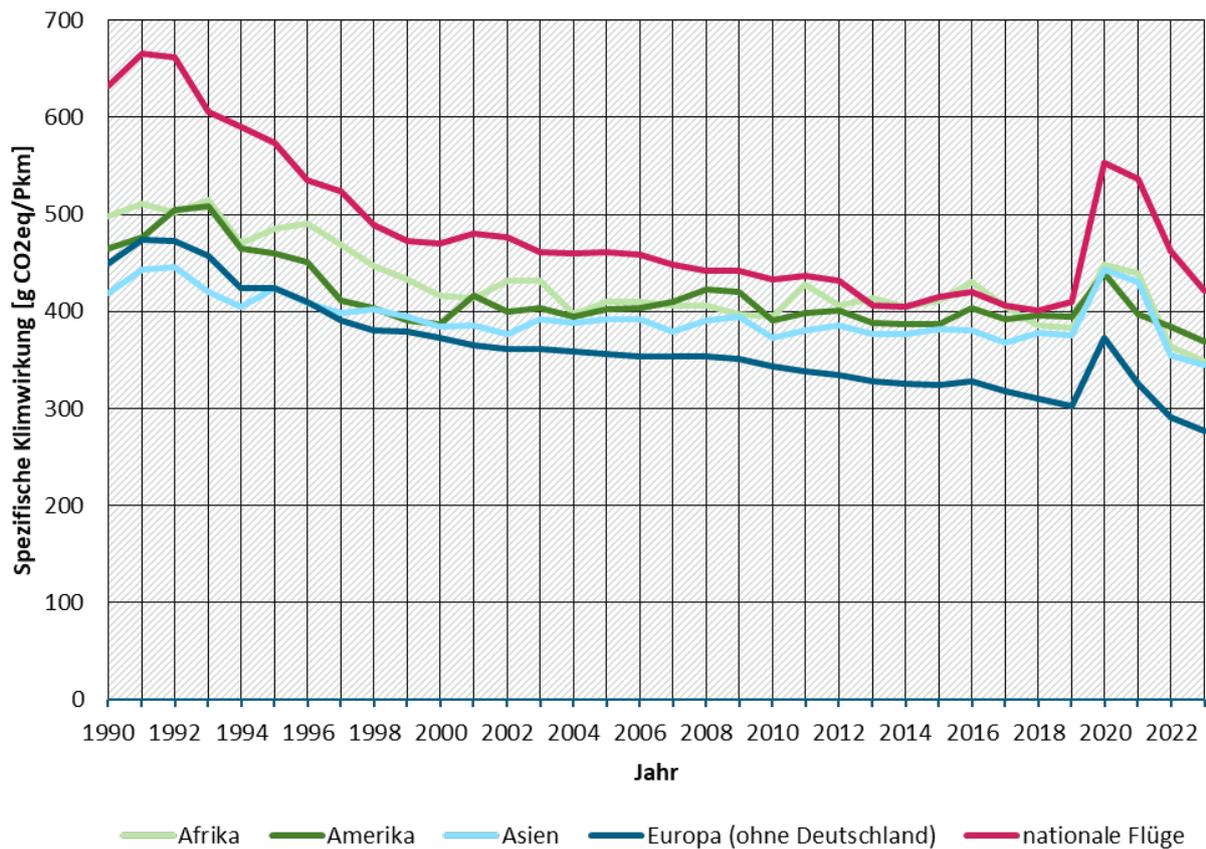
Flüge mit Landung außerhalb Europas weisen nicht nur höhere Flugweiten auf, sondern hier sind auch die Nicht-CO₂-Effekte höher. Flüge auf andere Kontinente hatten 2023 einen ATR100-Faktor von ca. 5. Flüge nach Europa hingegen wiesen lediglich einen Faktor von 3,4 auf. Setzt man jedoch die Klimawirkung ins Verhältnis zu den transportierten Passagieren, so unterscheiden sich die Klimawirkungen pro Personenkilometer nicht mehr ganz so stark zwischen den Zielkontinenten. Dies wird in Abbildung 20 gezeigt. Der geringeren Klimawirkung durch Nicht-CO₂-Effekte bei europäischen und nationalen Flügen steht ein höherer Anteil von Emissionen in der LTO-Phase gegenüber.

Abbildung 19: Klimawirkung (ATR100) des gesamten deutschen Flugverkehrs pro Zielkontinent 1990-2023



Quelle: eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 091.

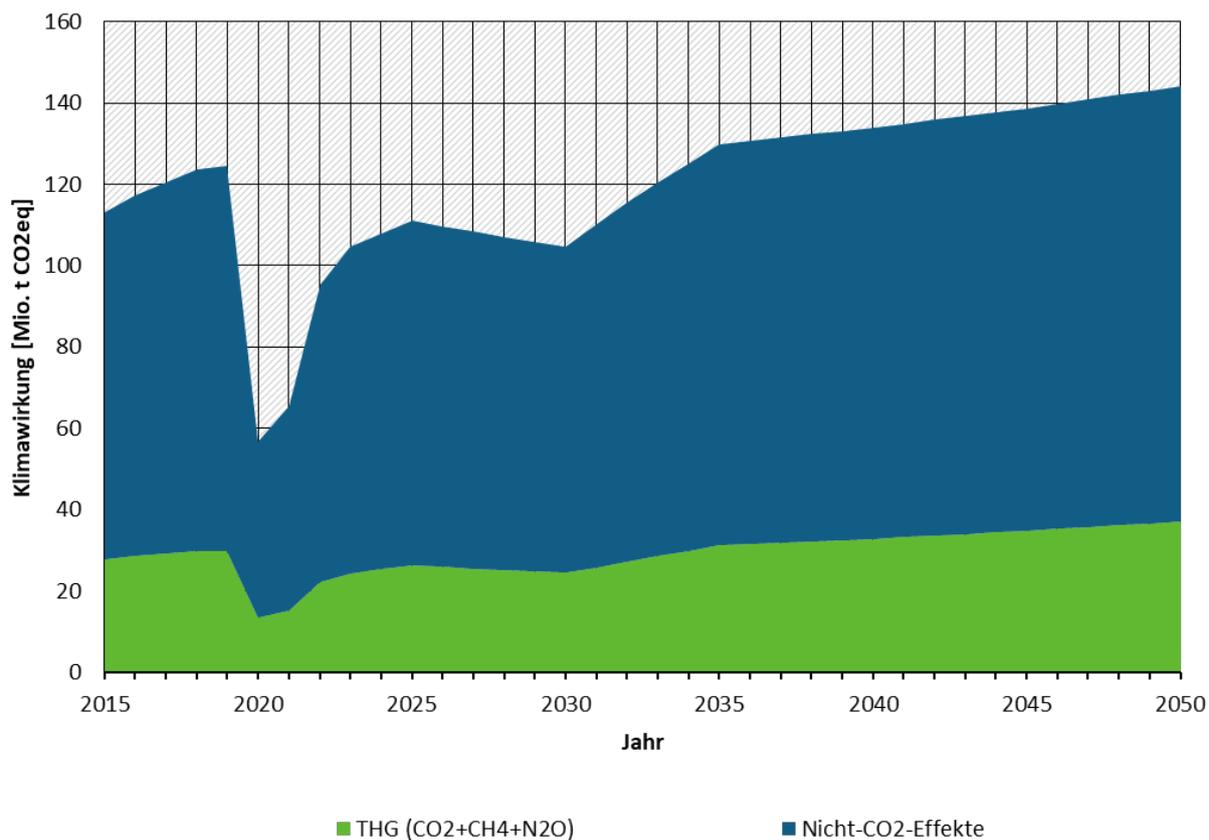
Abbildung 20: Spezifische Klimawirkung (ATR100) pro Pkm pro Zielkontinent 1990-2023



Quelle: eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 091.

Neben den Realjahren wurde zudem das Szenario bis 2050 gerechnet. Abbildung 21 zeigt die Entwicklung zwischen 2015 und 2050. Es ist zu sehen, dass die Klimawirkung des Flugverkehrs nach den Coronajahren zwar steigt, aber erst im Jahr 2035 das Niveau des Jahres 2019 wieder erreicht. Bis 2025 steigt die Verkehrsleistung ggü. 2023 deutlich an. Danach stagniert sie bis 2030, um im Anschluss wieder zu steigen. Da im Szenario eine stetige Verbesserung bei der Triebwerkseffizienz und den spezifischen NO_x-Emissionen angenommen wird, sinken während des Stagnationszeitraums 2025-2030 die gesamte Klimawirkung (vgl. Abschnitt 4.2.5). Nach 2030 steigt die gesamte Klimawirkung wieder an. Zwar wird einerseits weiterhin eine Verbesserung der spezifischen Emissionsfaktoren angenommen, andererseits kommt es zu einem Anstieg bei der Verkehrsleistung um 100 % zwischen 2050 und 2030. Die spezifische Klimawirkung (inkl. Nicht-CO₂-Effekte) sinkt von 480 g CO_{2eq}/Pkm im Jahr 2023 auf 262 g CO_{2eq}/Pkm im Jahr 2050. Dabei sinkt der Anteil der Nicht-CO₂-Effekte an den gesamten Klimawirkungen insbesondere aufgrund der überproportionalen Verbesserung der NO_x-Emissionen vgl. mit der Verbesserung beim Kraftstoffverbrauch. Der Anteil der Nicht-CO₂-Effekte an der gesamten Klimawirkung lag im Jahr 2023 bei 77 % und 2050 nur noch bei 74 %.

Abbildung 21: Klimawirkung (ATR100) des gesamten deutschen Flugverkehrs 2015-2050



Quelle: eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 091. Anmerkung: bis 2023 real, danach Szenario.

5.2 Abgleich mit dem DLR-Rechner

Da für die Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte vom DLR ein Excel-Rechner zur Verfügung gestellt wird, kann dieser zur Plausibilisierung der Ergebnisse herangezogen werden. Der Rechner weist dieselbe Methodik auf, jedoch gibt es zwei Unterschiede zur Berechnung in TREMOD-AV:

1. Abweichender Zuschlagsfaktor auf die Großkreisdistanz für die Berechnung der Realdistanz
2. Nutzung anderer Emissionsfaktoren pro Flugzeugkilometer

Zu 1.: Bei der Berechnung wird wie bei TREMOD-AV zunächst die Großkreisdistanz zwischen den beiden Flughäfen ermittelt und die Realdistanz über einen Zuschlag erhöht. Dieser ist pauschal beim DLR-Rechner bei 95 km. In TREMOD-AV ist dieser flugweitenabhängig, siehe Abschnitt 2.3.

Zu 2.: Im DLR-Rechner wird pro Sitzplatzklasse ein repräsentativer Flugzeugtyp herangezogen und die Klimawirkung hierüber berechnet. TREMOD-AV rechnet hingegen flugzeugtypenfein und daher genauer.

Für den Abgleich wurde exemplarisch das Jahr 2019 herangezogen und sämtliche Flüge aus der Betrachtung herausgenommen, die über den DLR-Rechner nicht definiert sind (siehe Abschnitt 4.2.2). Somit konnten knapp 950.000 Flüge des Jahres 2019 verglichen werden. Tabelle 20 stellt die Ergebnisse gegenüber.

Tabelle 20: Vergleich der Ergebnisse nach DLR-Rechner und TREMOD-AV (Jahr 2019)

	TREMOD-AV	DLR	Abweichung
Klimawirkung	107,1 Mio. t CO _{2eq}	86,7 Mio. t CO _{2eq}	24%
CO ₂ -Emissionen	25,3 Mio. t CO ₂	22,6 Mio. t CO ₂	12%
Nicht-CO ₂ -Effekte	81,8 Mio. t CO _{2eq}	64,0 Mio. t CO _{2eq}	28%
CO _{2eq} -Faktor	4,23	3,83	10%
NO _x -Emissionen	128,7 Mio. kg	88,6 Mio.	45%
Flug-km	1.504 Mio. km	1.486 Mio. km	1%

Quelle: Eigene Auswertung anhand Realjahr 2019 nach TREMOD-AV und DLR-Rechner zu Nicht-CO₂-Effekte (v108). Anmerkungen: Es gibt keine Direktflüge nach Australien/Ozeanien. Anmerkung: Klimawirkung nach ATR100.

Es können deutliche Abweichungen zwischen beiden Modellen identifiziert werden. Die Flugdistanzberechnung kann hier ausgeschlossen werden, da die Flugzeug-km nur um 1 % zwischen beiden Modellen abweichen. Insgesamt ist der CO_{2eq}-Faktor (Klimawirkung geteilt durch CO₂-Emissionen) in TREMOD-AV deutlich höher. Zum einen sind die CO₂-Emissionen und somit der Verbrauch bei TREMOD-AV um 12 % höher als im DLR-Rechner. Dies bewirkt bereits, dass die gesamte Klimawirkung höher in TREMOD sein wird. Zum anderen sind die deutlich höheren NO_x-Emissionen bei TREMOD zu nennen, die einen noch größeren Einfluss haben. Diese sind in TREMOD ca. 45 % höher als im DLR-Rechner und somit auch die Klimawirkung.

Die Abweichung könnten theoretisch aufgrund einer fehlerhaften Zuteilung der Größenklassen nach TREMOD zu den Sitzplatzkategorien nach DLR zurückzuführen sein. Daher werden die km-spezifischen Emissionen pro Sitzplatzkategorie gegenübergestellt, siehe Tabelle 21. Eine fehlerhafte Zuordnung zu den Sitzplatzkategorien kann die Unterschiede bei der Klimawirkung (zumindest in dieser Höhe) nicht erklären, da pro Sitzplatzkategorie bereits die km-spezifischen Emissionen abgesehen von der Kategorie 101-151 deutlich voneinander abweichen.

Tabelle 21: Abweichung der km-spez. Emissionsfaktoren von TREMOD-AV zu DLR (Jahr 2019)

Sitzplatzkategorie	CO ₂	NO _x
20-50	+6%	+43%
51-100	+10%	+15%
101-151	+7%	-6%
152-201	+19%	+65%
202-251	+12%	+40%
252-301	+14%	+71%
302-600	-1%	+33%

Quelle: Eigene Auswertung anhand Realjahr 2019 nach TREMOD-AV und DLR-Rechner zu Nicht-CO₂-Effekte (v108). Anmerkungen: Es gibt keine Direktflüge nach Australien/Ozeanien. Klimametrik: ATR100.

Datenbasis für die Emissionsfaktoren in TREMOD-AV ist hauptsächlich der „Master Emissions Calculator (MEC)“ (EEA 2019). Vergleicht man die Emissionsfaktoren über die „most common

AC Types“ pro Größenklasse im DLR-Rechner⁹ mit den Faktoren der jeweiligen Flugzeugtypen aus dem MEC, so ergeben sich die Abweichungen für CO₂ und NO_x pro Flugzeugkilometer aus Tabelle 22. Bei diesem Vergleich ergeben sich bereits signifikante Unterschiede, die die oben beschriebenen Tendenzen (leicht höhere EF in TREMOD-AV bei CO₂ und deutlich höhere bei NO_x) bestätigen. Die Ursache für die deutlichen Abweichungen sowie die Auswirkungen auf die Nicht-CO₂-Effekte können im Rahmen des Projekts nicht abschließend geklärt werden. Inwiefern die Integration des DLR-Modells in TREMOD-AV aufgrund dieser Unstimmigkeiten zu weiteren Unsicherheiten bei der Berechnung der Klimawirkung führt bleibt demnach offen und kann nicht im Rahmen des Projekts umfassend geklärt werden.

Tabelle 22: Abweichung der km-spezifischen Emissionsfaktoren vom MEC zu DLR

Sitzplatzkategorie	Most common AC type nach DLR	Aircraft code im MEC	CO ₂	NO _x
20-50	ERJ-135	E135	+7%	-2%
51-100	ERJ-170	E170	-7%	-9%
101-151	A320-200	A320	+4%	+11%
152-201	737-800	B737	+3%	+40%
202-251	767-300ER	B763	+7%	+65%
252-301	A330-300	A333	+1%	+42%
302-600	747-400	B744	+3%	+42%

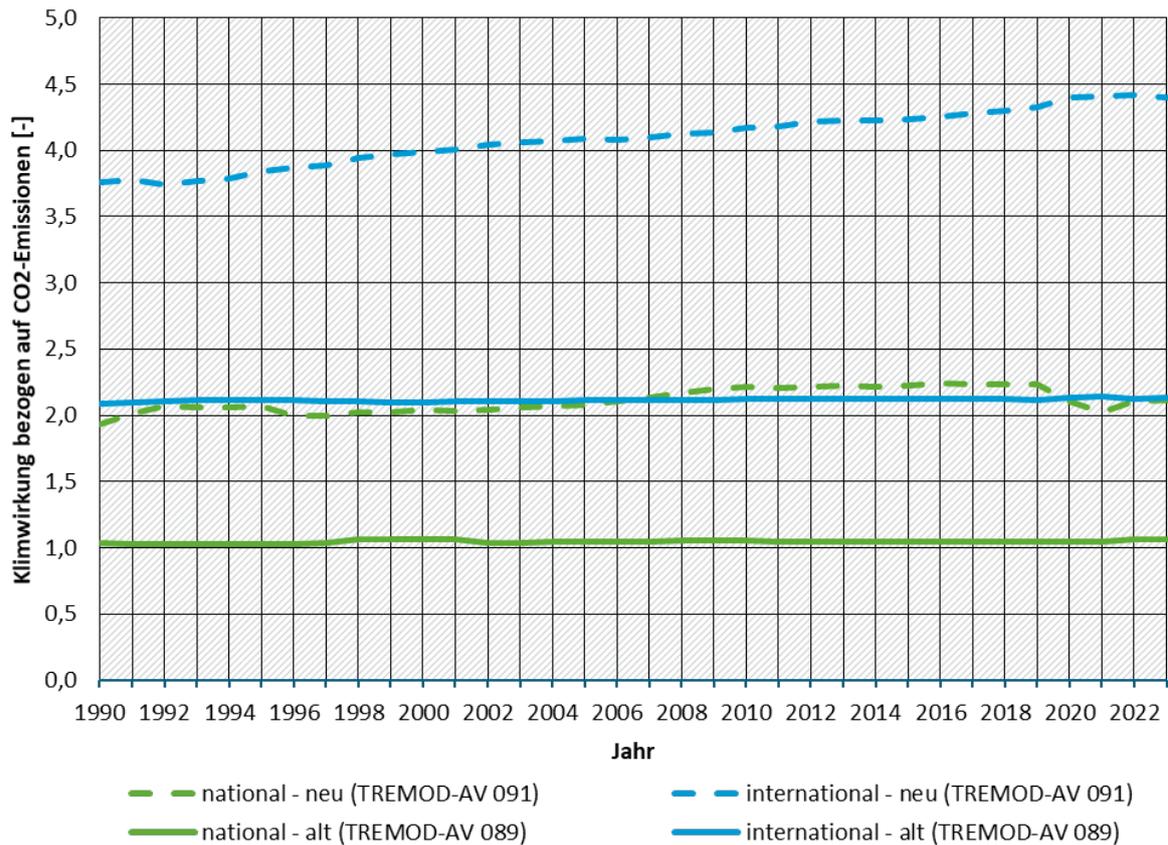
Quelle: Eigene Auswertung anhand (EEA 2019) und DLR-Rechner zu Nicht-CO₂-Effekte (v108). Anmerkungen: Es wurde pro Sitzplatzkategorie die Emissionsfaktoren der halben maximalen Reichweite berechnet und verglichen. Im MEC wurden für die LTO-Emissionen die Werte für einen typischen europäischen Flughafen verwendet.

5.3 Abgleich mit bisheriger Methode

Um die Relevanz der aktuellen Änderungen in der Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte zu bewerten sowie eine Vergleichbarkeit mit den bisherigen Ergebnissen für interessierte Gruppen und bisherige Nutzerinnen und Nutzern zu diesen Einflüssen herzustellen, werden die Ergebnisse auf Basis Emission Weighting Factors (EWF) mit den neuen Ergebnissen (ATR100) im direkten Vergleich auf Relationsebene (national, international) für die Realjahre 1990-2023 gegenübergestellt. Abbildung 22 zeigt die Gegenüberstellung. Die Unterschiede sind deutlich. Sowohl national als auch international verdoppelt sich der Faktor der gesamten Klimawirkung bezogen auf die CO₂-Emissionen. Während nach der alten Methode (EWF) die Faktoren national und international in etwa konstant bei 1,1 bzw. 2,1 lagen, so liegen die Faktoren nach der neuen Methode (ATR100) in etwa jeweils doppelt so hoch. Beim nationalen Flugverkehr bleibt der Wert in etwa bei 2,1 konstant. Internationale Flüge wiesen einen ATR100 von 3,8 im Jahr 1990 auf und der Wert stieg bis 2023 auf 4,4. Auch hier kann als Grund sich ändernde Flugrelationen genannt werden.

⁹ Für den repräsentativen Verbrauch je Seat Category wurde der Flugzeugtyp verwendet, der in 2012 laut Flugplan die meisten angebotenen Sitzplatzkilometer hatte. Bei Kategorie 101-151 bspw. der A320-200. Für diesen Typen wurden dann mit einer 4D Flugleistungssimulation der Kraftstoffverbrauch berechnet. Im Anschluss wurden die NO_x-Emissionen mit der Boeing Fuel Flow Methode 2 berechnet.

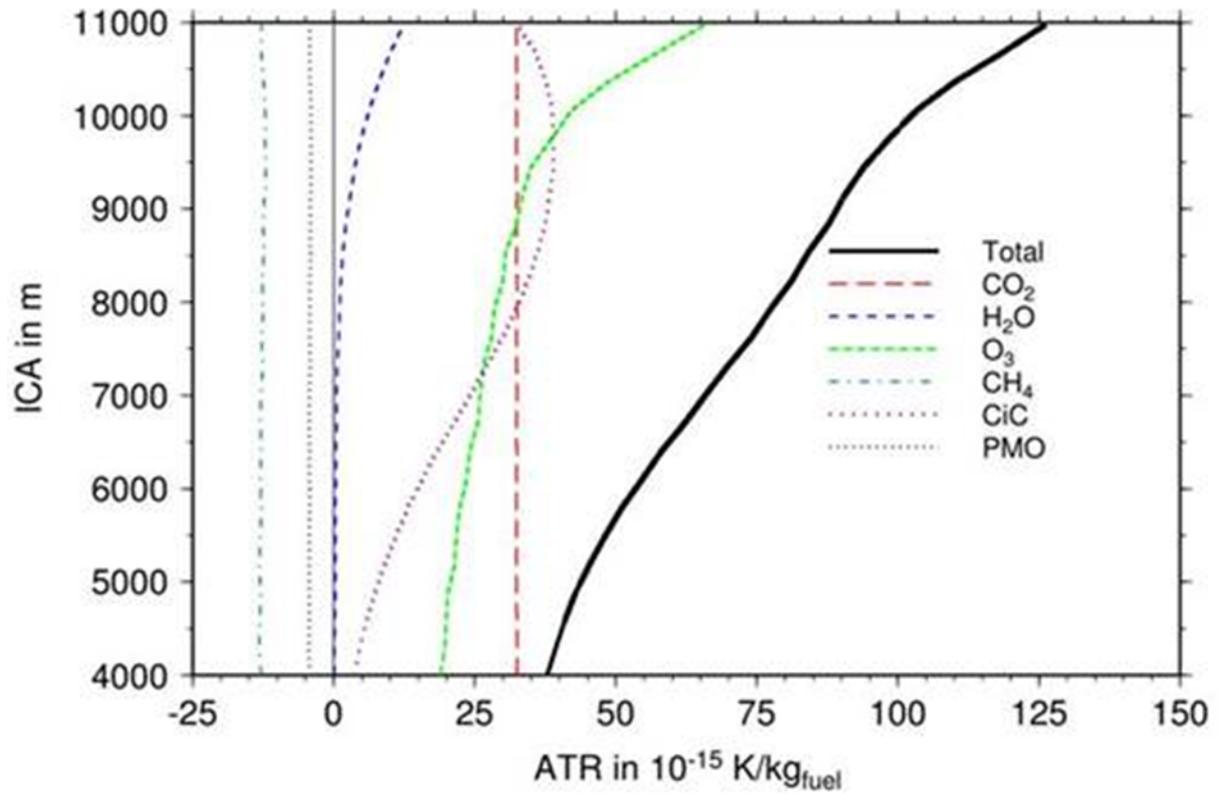
Abbildung 22: Äquivalenzfaktor der Klimawirkung (EWF vs. ATR100) bezogen auf die CO₂-Emissionen neu vs. alt 1990-2023



Quelle: eigene Berechnung anhand TREMOD-AV 091.

Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die bisher verwendete Methode zur Berücksichtigung der Nicht-CO₂-Effekte bzw. die bisher getroffenen Annahmen die Klimawirkung deutlich unterschätzt hat und demnach nicht dem aktuellen Stand der Wissenschaft entspricht. Zum einen treten deutliche Klimawirkungen auch unterhalb der bisher angenommenen 9 km-Grenze auf, siehe Abbildung 23. So beträgt der ATR100-Faktor bei einer Flughöhe von 7 km auf der Relation Frankfurt-Detroit bereits ca. 2. Zum anderen ist der Äquivalenzfaktor oberhalb von 9km nach neuem Kenntnisstand deutlich höher als der bisher verwendete Faktor von 2,4. Bei der Reiseflughöhe von 11 km auf der Beispielrelation liegt der ATR100-Faktor bei ca. 3,8.

Abbildung 23: Spezifische Klimawirkung (ATR100) in Abhängigkeit der Flughöhe für die Relation Detroit-Frankfurt



Quelle: (Dahlmann et al. 2023).

6 Resümee und Ausblicke

Die Integration des DLR Clustermodells in TREMOD-AV ermöglicht eine detailliertere Abbildung der Nicht-CO₂-Effekte des deutschen Flugverkehrs. Gegenüber des bis dahin genutzten EWF ist die Klimawirkung des Flugverkehrs nun deutlich höher. Statt eines Gewichtungsfaktors (bezogen auf die direkten CO₂-Emissionen) von 2,1 nach der alten Methode ergibt sich nun ein Faktor von 4,3 für das Jahr 2023. Somit machen die Nicht-CO₂-Effekte einen Anteil von 77 % an der Klimawirkung aus. (Lee et al. 2023) bzw. (Arrowsmith et al. 2020) beziffern den Anteil auf ca. 66 %. An den Nicht-CO₂-Effekten weisen die Komponenten NO_x, Zirruswolkenbildung und H₂O durchschnittlich einen Anteil von 63 %, 27 % bzw. 10 % auf.

Geplant ist, dass die Nicht-CO₂-Effekte ab 2025 zunächst über ein Überwachungs-, Berichts- und Verifizierungssystem und später mit einer Abgabepflicht in den EU-ETS einbezogen werden. Dies spiegelt die (zukünftige) Rolle der Nicht-CO₂-Effekte wider. Die Berechnung in TREMOD-AV eignet sich für die genaue Bilanzierung von Einzelflügen und somit für das geplante Monitoring nicht. Es enthält demnach keine Informationen zu den flugspezifischen Routen, Umweltbedingungen und Emissionen, die für ein Monitoring nötig wären. Demgegenüber stellt es lediglich eine valide Berechnung von Durchschnittswerten dar und weist auf Einzelflugebene große Unsicherheiten auf, siehe auch (Dahlmann et al. 2023). Eine detaillierte Berechnung auf Einzelflugebene würde ist prinzipiell in der aktuellen verwendeten Systemarchitektur denkbar und TREMOD-AV dahingehend erweiterbar, allerdings würde dies eine umfassende Anpassung der Methodik sowie der Eingangsdaten implizieren. Aktuell verwendet werden Daten von Destatis mit Start-Ziel-Informationen, die keine expliziten Informationen zu den Flugrouten enthalten.

Zwar konnte das Clustermodell ohne große methodische Probleme in TREMOD-AV implementiert werden, aber da TREMOD-AV auch Flüge enthält, die nicht über das Clustermodell abgedeckt sind, entstehen Lücken in der Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte. Dies betrifft Flugzeuge, die keine Strahlantriebe haben – Hubschrauber und Propellermaschinen. Bei Hubschraubern und Propellermaschinen mit Kolbenmotor wird die Annahme getroffen, dass keine Nicht-CO₂-Effekte entstehen. Aufgrund der Flughöhen und Distanzen ist diese Annahmen durchaus zulässig, wobei die Klimawirkung Gegenstand weiterer Untersuchungen sein könnte. Bei Turbopropellermaschinen ist eine Annahme deutlich schwieriger zu treffen, da wie bei Strahlantrieben ebenfalls eine Gasturbine eingesetzt wird und somit vergleichbare Emissionsverhältnisse entstehen und ähnlich Flughöhen erreicht werden. Da jedoch beide Aspekte abweichend von repräsentativen Passagiermaschinen im DLR-Modell sind, wäre die Anwendbarkeit des Clustermodells zu prüfen. In der aktuellen Implementierung wird die Anwendbarkeit unterstellt.

Zudem weist das Clustermodell pro Sitzplatzklasse Einschränkungen bzgl. der Flugdistanz auf. Demnach können keine Flüge unterhalb von 150 km bzw. Flüge oberhalb einer definierten maximalen Flugdistanz (z. B. 7.000 km für 152-201 Sitzplätze) berechnet werden. Für Flüge oberhalb dieser maximalen Distanzen werden Regressionsfunktionen verwendet. Eine Erweiterung des DLR-Modells wäre hier wünschenswert. Auch gab es Zuweisungsprobleme bei Frachtmaschinen, die keiner Sitzplatzklasse eindeutig zugewiesen werden können. Eine Zuweisung erfolgt nun über das MTOW. Eine Definition der zu verwendenden Formeln zur Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte im DLR-Modell über das MTOW wäre demnach universeller und eindeutiger einsetzbar. Dies gilt auch im Hinblick unterschiedlicher Sitzplatzkonfigurationen eines Flugzeugtyps. Hier entstehen Zuordnungsprobleme, wenn ein Flugzeugtyp am Rande von zwei Sitzplatzkategorien liegt und somit je nach Annahme des Sitzplatzanzahl (in TREMOD-AV pro Flugzeugtyp statisch angenommen) in eine der zwei

Kategorien fallen könnte. Somit würde je nach Annahme der Sitzplatzanzahl je Flugzeugtyp eine andere Funktion mit unterschiedlichen Parametern im Clustermodell verwendet.

Neben den Realjahren können auch die Nicht-CO₂-Effekte in Szenarien berechnet werden. So werden bereits in der aktuellen Implementierung im Trendszenario Verbesserungen bei den Verbräuchen und NO_x-Emissionen angenommen, die in der Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte einfließen. Denkbar wäre auch die Berechnung von weiteren Szenarien mit Maßnahmen wie Flugroutenanpassungen zur Reduktion der gesamten Klimawirkung oder dem Einsatz von alternativen Kraftstoffen. Fraglich hierbei ist jedoch, inwieweit bzw. mit welcher Genauigkeit das Clustermodell robuste Ergebnisse liefert, sofern man sich zu weit von den modellierten repräsentativen Flugzeugtypen entfernt (vgl. Abschnitt 3.3). Das Clustermodell eignet sich nicht uneingeschränkt für die Bewertung von Minderungsmaßnahmen. Bei der Szenarioberechnung ändert sich der ATR100 von 4,3 im Jahr 2023 auf 3,9 im Jahr 2050. Hintergrund der sinkenden Tendenz sind insbesondere die angenommenen Verbesserungen bzgl. der spezifischen NO_x-Emissionen.

Für die Berechnung des Szenarios wird nun aufgrund der neuen Methodik eine detailliertere Datenstruktur benötigt als im vorherigen TREMOD. Daher wird nun das DLR LV Luftverkehrsprognosemodell für die Hauptverkehrsflughäfen verwendet. Zwar weist dieses Modell eine vergleichbare Datenstruktur auf wie TREMOD, allerdings fielen bei der Integration Abweichungen bei den Systemgrenzen und z. T. den Daten auf. Dieses Problem konnte mit Aggregationen zunächst verkleinert werden, allerdings ist bei künftigen Aktualisierungen des Szenarios darauf zu achten, dass die realen Stützjahre auf derselben Datenbasis beruhen, die Systemgrenzen adäquat abgesteckt werden können und dieselben Definitionen von Flugzeugtypen zugrunde liegen.

Grundlegend bleibt die Frage in welcher Häufigkeit die Regressionsparameter des Clustermodells zu aktualisieren bzw. diese als zeitlich variabel zu gestalten sind. Aktuell sind die Funktionen des Clustermodells zeitlich konstant angenommen. Die Funktionen und ihre Parameter wurden anhand von knapp 60.000 Flügen im Jahr 2012 ermittelt. Jedoch ändern sich stetig einige Aspekte, die sich vom Jahr 2012 unterscheiden können. Zu nennen sind technologische Entwicklungen an Flugzeugen und Änderungen am Emissionsverhalten, Flugroutenanpassungen und Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck etc.). Die genannten Größen haben einen Einfluss auf die Nicht-CO₂-Effekte. Demnach wäre zu prüfen wann und in welcher Form die Klimawirkungsberechnung anzupassen wäre. Allgemein ist zudem zu klären wie Unterschiede bei den CO₂- und NO_x-Emissionen und somit auch bei der Klimawirkung pro Sitzplatzkategorie zwischen TREMOD-AV und dem Excelrechner von DLR zu erklären sind. Da die Regressionsfunktionen im Clustermodell pro Sitzplatzkategorie über repräsentative Flugzeugtypen hergeleitet wurde und die Emissionsfaktoren dieser Typen deutlich von den Werten in TREMOD-AV abweichen, ist die Übertragbarkeit der Regressionsfunktionen und Parameter nicht gänzlich geklärt.

Bei einer künftigen Anpassung der Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte oder auch bei den jährlichen TREMOD-Aktualisierungen können weitere Verbesserungen an dem Modell vorgenommen werden. Dazu gehören u. a. auch die Integration anderer Klimametrien. Aktuell ist der ATR100 als Standard sowie der AGWP100 implementiert. Die Einbindung bspw. des EAGWP100 ist aufgrund der gegebenen Umrechnungstabellen in der Clusteranalyse (siehe Tabelle 5) ohne großen Aufwand möglich. Allgemein ist zu überlegen welche Klimametrik in welchem Kontext zu verwenden ist. Die Resultate je nach angewandter Metrik fallen sehr unterschiedlich aus. Die folgende Tabelle zeigt die Wirkung der Nicht-CO₂-Effekte der Flüge im Jahr 2019 (vgl. Abschnitt 5.2), die sich aus der DLR-Applikation (Version 1.11) bei Verwendung unterschiedlicher Metriken ergeben.

Tabelle 23: Nicht-CO₂-Effekte von Deutschland abgehender Flüge im Jahr 2019 berechnet mit unterschiedlichen Metriken

Metrik	Klimafaktor	Anteil H ₂ O an Nicht-CO ₂ -Effekten	Anteil NO _x an Nicht-CO ₂ -Effekten	Anteil CiC an Nicht-CO ₂ -Effekten
ATR100 (incr. emissions)*	3,8	11%	56%	34%
ATR100 (pulse emissions)	2,5	10%	51%	38%
AGWP100*	3,4	10%	35%	56%
EAGWP100	4,4	10%	66%	23%

Quelle: Eigene Berechnung über DLR-Excelapplikation zur Clusteranalyse Version 1.11. Anmerkung: *in TREMOD-AV implementiert.

Der Klimafaktor variiert für dieselben Flüge je nach Metrik im Bereich zwischen 2,5 und 4,4. Die Eignung der einzelnen Klimametrien für spezifische Anwendungsfälle (bspw. Integration der Nicht-CO₂-Effekte ins EU-ETS) wurde im Rahmen des Projekts nicht behandelt.

Neben der Berechnung der Nicht-CO₂-Effekte entstehen durch die Modellanpassungen nur geringe Unterschiede abseits der Coronajahren bei den relevanten Emissionen CO₂, NO_x und PM. Diese liegen bei nationalen Flügen <2 % und bei internationalen Flügen <1 %. Während den Coronajahren sind die Abweichungen größer. Dies liegt insbesondere an den Anpassungen an den Annahmen des sonstigen Flugverkehrs. Da der sonstige Flugverkehr in diesen Jahren deutlich weniger zurückgegangen ist als der gewerbliche Verkehr auf den HVF, sind die Unterschiede hier nennenswert. Allgemein ist beim sonstigen Flugverkehr die Datenverfügbarkeit nicht so detailliert wie bei den HVF, sodass auch die Ermittlung der Nicht-CO₂-Effekte hier nicht direkt über das Clustermodell erfolgen kann. Zwar werden die Effekte abgeschätzt, aber die Genauigkeit der Berechnung könnte über eine fundierte Erweiterung der Annahmen verbessert werden, obgleich der Anteil des sonstigen Flugverkehrs an den Gesamtemissionen des Flugverkehrs gering ist und somit Ungenauigkeiten keinen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben.

7 Quellenverzeichnis

- AG Energiebilanzen (o.J.): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Erscheinungsweise jährlich. https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2021-2030&wpv_aux_current_post_id=45&wpv_aux_parent_post_id=45&wpv_view_count=2753-CATTRe4257049c177cf191052746afc46d0a3 (10.10.2023).
- Allekotte, M.; Colson, M.; Biemann, K.; Heidt, C.; Knörr, W. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) - Berichtsteil „TREMOD“. Umweltbundesamt, Dessau -Roßlau. S. 205. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-tremod-2019> (19.02.2021).
- Allekotte, M.; Colson, M.; Heidt, C.; Knörr, W.; Kräck, J. (2023a): Verbesserung der Vorjahresschätzung der Klimagasemissionen des Verkehrssektors. ifeu im Auftrag des Umweltbundesamts, Heidelberg. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/165_2023_klimagasemissionen_des_verkehrssektors_0.pdf (05.02.2024).
- Allekotte, M.; Knörr, W.; Kräck, J.; Notter, B.; Schäppi, B.; Soini, M.; Hausberger, S.; Tödling, M.; Schadler, D. (2023b): Neubewertung der Unsicherheiten der mit den zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor verwendeten Parameter und Methoden. ifeu, INFRAS und FVT im Auftrag des Umweltbundesamtes, Heidelberg, Bern, Graz. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/152_2023_texte_neubewertung_der_unsicherheiten.pdf (06.02.2024).
- Arrowsmith, S.; Lee, D. S.; Owen, B.; Faber, J.; van Wijngaarden, L.; Boucher, O.; Celikel, A.; Deransy, R.; Fuglestvedt, J.; Laukia, J.; Lund, M. T.; Sausen, R.; Schaefer, M.; Skowron, A.; Stromatas, S.; Watt, A. (2020): Updated analysis of the non-CO2 climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). EASA, Brüssel. <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/120860/en> (22.02.2024).
- BAZL (2009): Datenbank für Flugzeugkolbenmotoren. Bundesamt für Zivilluftfahrt der Schweiz. <https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/fachleute/regulation-und-grundlagen/umwelt/schadstoffemissionen/triebwerkemissionen/zusammenfassender-bericht--anhaenge-und-datenblaetter.html> (19.02.2018).
- BAZL (2017): Anleitung zur Abschätzung von Helikopteremissionen - Helicopter Emissions Table. Bundesamt für Zivilluftfahrt der Schweiz. <https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/themen/umwelt/schadstoffe/triebwerkemissionen/anleitung-zur-abschaetzung-von-helikopteremissionen.html> (19.09.2023).
- Dahlmann, K.; Grewe, V.; Matthes, S.; Yamashita, H. (2023): Climate assessment of single flights: Deduction of route specific equivalent CO2 emissions. International Journal of Sustainable Transportation, 17(1), 29-40 DOI: 10.1080/15568318.2021.1979136.
- Dahlmann, K.; Koch, A.; Linke, F.; Lührs, B.; Grewe, V.; Otten, T.; Seider, D.; Gollnick, V.; Schumann, U. (2016): Climate-Compatible Air Transport System—Climate Impact Mitigation Potential for Actual and Future Aircraft. In: *Aerospace*. Vol. 3, No. 4. DOI: 10.3390/aerospace3040038.
- Destatis (2021): Fachserie 8 - Verkehr 6 - Luftverkehr 1 - Luftverkehr auf Hauptverkehrsflughäfen. Wiesbaden. https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DESerie_mods_00000094 (02.11.2021).
- DuBois, D.; Paynter, G. (2006): „Fuel Flow Method2“ for Estimating Aircraft Emissions. SAE 2006 Transactions Journal of Aerospace-V115-1 DOI: 10.4271/2006-01-1987.

- EEA (2019): 1.A.3.a Aviation 1 Master emissions calculator 2019.
<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1/view>. (11.03.2021).
- Eurocontrol (2021): Seasonal taxi time statistics. In: *Eurocontrol - Supporting European Aviation*.
<https://www.eurocontrol.int/publication/taxi-times-winter-2020-2021>. (27.10.2021).
- Forster, P. M. de F.; Shine, K. P.; Stuber, N. (2006): It is premature to include non-CO2 effects of aviation in emission trading schemes. In: *Atmospheric Environment*. Vol. 40, No. 6, S. 1117–1121. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.11.005.
- Gelhausen, M.; Berster, P.; Wilken, D. (2019): Airport Capacity Constraints And Strategies For Mitigation: A Global Perspective. Köln.
- Grewe, V.; Champougny, T.; Matthes, S.; Frömming, C.; Brinkop, S.; Søvde, O. A.; Irvine, E.; Halscheidt, L. (2014): Reduction of the air traffic's contribution to climate change: A REACT4C case study. In: *Atmospheric Environment*. No. 94, S. 616–625. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.05.059.
- Grewe, V.; Stenke, A. (2008): AirClim: An efficient tool for climate evaluation of aircraft technology. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 8, No. 16, S. 4621–4639. DOI: 10.5194/acp-8-4621-2008.
- ICAO (2019): Aircraft Engine Emissions Databank. International Civil Aviation Organization.
<https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
 (29.04.2019).
- Knörr, Wolfram; Schacht, Alexander; Gores, Sabine (2012): Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs (TREMODO-AV). Umweltbundesamt, Heidelberg, Berlin.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-eines-modells-zur-berechnung>.
- Köhler, M. O.; Rädcl, G.; Shine, K. P.; Rogers, H. L.; Pyle, J. A. (2013): Latitudinal variation of the effect of aviation NOx emissions on atmospheric ozone and methane and related climate metrics. *Atmospheric environment*, 64, 1-9 DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.09.013.
- Lee, D. S.; Allen, M. R.; Cumpsty, N.; Owen, B.; Shine, K. P.; Skowron, A. (2023): Uncertainties in mitigating aviation non-CO2-emissions for climate and air quality using hydrocarbon fuels. S. 1693–1740.
<http://xlink.rsc.org/?DOI=D3EA00091E> (22.02.2024).
- 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* Vol. 43, No. 22–23, S. 3520–3537. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024.
- Lee, D. S.; Fahey, D. W.; Skowron, A.; Allen, M. R.; Burkhardt, U.; Chen, Q.; Doherty, S. J.; Freeman, S.; Forster, P. M.; Fuglestvedt, J.; Gettelman, A.; De León, R. R.; Lim, L. L.; Lund, M. T.; Millar, R. J.; Owen, B.; Penner, J. E.; Pitari, G.; Prather, M. J.; Sausen, R.; Wilcox, L. J. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment* No. 244. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.
- Niklaß, M.; Dahlmann, K.; Grewe, V.; Maertens, S.; Plohr, M.; Scheelhaase, J.; Schwieger, J.; Brodmann, U.; Kurzböck, C.; Repmann, M.; Schweizer, N.; von Unger, M. (2020): Integration of Non-CO2 Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA - Final Report. DLR, First Climate AG und Coastland Climate Policy LLC im Auftrag des Umweltbundesamts.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-28_climatechange_20-2020_integrationofnonco2effects_finalreport_.pdf (15.04.2024).
- Siemons, A.; Cook, V.; Cames, M.; Graichen, J. (2015): Emission reduction targets for international aviation and shipping. European Parliament, Directorate-General for Internal Policies of the Union, Brüssel. S. 52.
<https://data.europa.eu/doi/10.2861/256940> (28.04.2022).

Søvde, O. A.; Matthes, S.; Skowron, A.; Iachetti, D.; Lim, L.; Owen, B.; Hodnebrog, Ø.; Genova, G. D.; Pitari, G.; Lee, D. S.; Myhre, G.; Isaksen, I. S. A. (2014): Aircraft emission mitigation by changing route altitude: A multi-model estimate of aircraft NO_x emission impact on O₃ photochemistry. In: *Atmospheric Environment*. Vol. 95, S. 468–479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.049>.

Statistisches Bundesamt (Destatis); Genesis-Online (2023): Tabelle 46421-0051. <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=46421-0051>. (10.12.2021).

Thor, R. N.; Niklaß, M.; Dahlmann, K.; Linke, F.; Grewe, V.; Matthes, S. (2023): The CO₂ and non-CO₂ climate effects of individual flights: simplified estimation of CO₂ equivalent emission factors. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2023, 1-24 DOI: [10.5194/gmd-2023-126](https://doi.org/10.5194/gmd-2023-126).