

Betriebliche Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs – Ein Vergleich

Zarah Lea Zengerling

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Luftverkehr
Hamburg



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Forschungsbericht 2026-09

Betriebliche Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs – Ein Vergleich

Zarah Lea Zengerling

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Luftverkehr
Hamburg

212 Seiten
90 Bilder
32 Tabellen
328 Literaturstellen



Herausgeber:

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Wissenschaftliche Information
Linder Höhe
D-51147 Köln

ISSN 1434-8454
ISRN DLR-FB-2026-09
Erscheinungsjahr 2026
DOI: [10.57676/67xq-6t07](https://doi.org/10.57676/67xq-6t07)

Erklärung des Herausgebers

Dieses Werk – ausgenommen anderweitig gekennzeichnete Teile – ist lizenziert unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0), abrufbar über <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

Lizenz



Creative Commons Attribution 4.0 International

Luftverkehr, Klimawandel, Minderungsoptionen, Betrieb, Trajektorienrechnung, Emissionen, Klimabewertung

Zarah Lea ZENGERLING
DLR, Institut für Luftverkehr, Hamburg

Betriebliche Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs – Ein Vergleich

Technische Universität Hamburg

Die ökologische Nachhaltigkeit des Luftverkehrs wird vor allem durch die Betriebsphase getrieben, in welcher die Emissionen verschiedener Spezies wie CO₂, Stickoxiden und Ruß entlang von Flugtrajektorien die Strahlungsbilanz der Erde beeinflusst und somit zur Veränderung des Klimas beiträgt. Dabei sind insbesondere Nicht-CO₂-Effekte, welche nicht nur von der Menge des verbrauchten Kraftstoffs, sondern auch von Missionscharakteristika wie Emissionsort, -zeit und meteorologischen Randbedingungen abhängen, für einen Großteil des Effekts verantwortlich. Um den Beitrag des Luftverkehrs zum menschengemachten Klimawandel im Kontext ambitionierter Klimaziele zu reduzieren, werden verschiedene Mitigationsansätze untersucht. Neben technologischen Innovationen sind auch betriebliche Maßnahmen vielversprechend, da diese unmittelbar implementiert werden können und keine langen Entwicklungszeiten benötigen. Darüber hinaus sind betriebliche Maßnahmen besonders geeignet, um die regional, zeitlich und meteorologisch variierende Klimasensitivität von Nicht-CO₂-Effekten zu adressieren. Um besonders effektive oder effiziente Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung zu identifizieren, ist ein Vergleich dieser betrieblichen Maßnahmen notwendig, was bisher aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen einzelner Studien zur Maßnahmenbewertung in der Literatur nicht möglich war.

Im Rahmen dieser Arbeit wird dafür eine detaillierte Simulationskette zur Bewertung von betrieblichen Innovationen im Luftverkehr entwickelt. Diese setzt sich aus Modellen für die Flugtrajektorien-simulation, die Emissionsrechnung, die Klimabewertung sowie die Analyse der Auswirkungen auf die Interessensgruppen zusammen. Die Methode dieser Arbeit geht dabei über den aktuellen Stand der Forschung hinaus, indem die Vergleichbarkeit von Maßnahmen in einer identischen Simulationsumgebung sichergestellt wird und durch verschiedene Submodule unterschiedliche Randbedingungen berücksichtigt werden können. Die Bewertungskette wird durch eine Skalierungsmethodik komplettiert, mit welcher Studienerkenntnisse zu betrieblichen Klimawirkungsminderungsmaßnahmen des Luftverkehrs ohne Detailbewertung anhand einfacher Kennzahlen ebenfalls dem Vergleich zugeführt werden. Eine umfassende Verifikation und Validierung der Modellkette sowie der Skalierungsmethode erfolgt über externe Daten und Modelle sowie anhand der Literatur. Die Anwendung der entwickelten Modellkette sowie der Vergleichsmethodik demonstriert den Einsatz zu Bewertung und Vergleich verschiedener betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs. Zum Beispiel wird so das Konzept des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs entwickelt, bei welchem Zwischenlandeflughafen und Flughöhe auf Basis der Klimawirkung ausgewählt werden. Ein Vergleich verschiedener Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung zeigt die Abhängigkeit des Maßnahmenvergleichs von den Charakteristika der Referenzmission, wie lateraler Ausdehnung, Missionsdistanz, Flugzeugtyp und meteorologischer Situation, sodass keine der untersuchten Maßnahmen für alle betrachteten Missionen vorteilhaft gegenüber den übrigen Maßnahmen ist. Allerdings erweist sich die Reduktion von Flughöhe und Fluggeschwindigkeit im Vergleich zu den übrigen betrachteten Maßnahmen lateraler Routenverschiebung, Mehrstufenbetrieb und Formationsflug mit Mittel als besonders geeignet.

Für weitere Forschung können die Mitigationspotentiale auf europäischer oder globaler Skala in Szenarien zur Bestimmung der Mitigationspotentiale des Luftverkehrs über die Zeit berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann auf dieser Basis die Untersuchung der Effektivität von umweltpolitischen Maßnahmen durchgeführt werden. Die Interpretation der Ergebnisse muss allerdings stets im Kontext der Unsicherheiten der Modelle insbesondere hinsichtlich der Klimawirkungsquantifizierung von Nicht-CO₂-Effekten erfolgen.

Air transport, climate change, mitigation options, operations, trajectory calculation, emissions, climate impact assessment

(Published in German)

Zarah Lea ZENGERLING

German Aerospace Center (DLR), Institute of Air Transport, Hamburg

Operational measures to reduce aviation's climate impact – A comparison

Hamburg University of Technology

The environmental sustainability of air traffic is primarily driven by operations, during which the emission of various species such as CO₂, nitrogen oxides, and soot along flight trajectories influences the earth's radiative balance and thus contributes to climate change. In particular, non-CO₂ effects are responsible for a large part of the effect. These effects depend not only on the amount of fuel consumed but also on mission characteristics such as emission location, time, and meteorological boundary conditions. In order to reduce the contribution of air traffic to anthropogenic climate change in the context of ambitious climate targets, various mitigation approaches are currently being investigated. In addition to technological innovations, operational measures are also promising, as they can be implemented immediately and do not require long development times. Furthermore, operational measures are particularly suitable for addressing the regional, temporal, and meteorologically varying climate sensitivity of non-CO₂ effects. In order to identify particularly effective or efficient measures for climate impact mitigation, a comparison of these operational measures is necessary, which has not been possible so far due to different boundary conditions of individual studies in the literature.

To this end, a detailed simulation chain is developed in this thesis to evaluate operational measures in air transport. This consists of models for flight trajectory simulation, emissions calculation, climate assessment, and analysis of the effects on stakeholders. The method of this work goes beyond the current state of research by ensuring the comparability of measures in an identical simulation environment and allowing different boundary conditions to be taken into account through various submodules. The assessment chain is completed by a scaling methodology with which study findings on operational climate mitigation measures in aviation can also be compared without detailed evaluation using simple key figures. A comprehensive verification and validation of both the modelling chain and the scaling method is carried out using external data and models as well as literature results. The application of the developed modelling chain and the scaling methodology demonstrates the use for the evaluation and comparison of different operational measures to reduce the climate impact of aviation. For example, the concept of climate-optimized intermediate stop operations is defined, in which stopover airport and flight altitude are selected based on climate impact. A comparison of different climate mitigation measures shows the dependence of effectiveness and efficiency on the characteristics of the reference mission, such as lateral extent, mission distance, aircraft type, and meteorological situation. Hence, none of the measures examined is advantageous over the other measures for all of the missions considered. However, the reduction of flight altitude and airspeed proves to be particularly suitable on average compared to the other measures considered: lateral route shifting, intermediate stop operations, and formation flight.

The results of this work form the basis for future research. The mitigation potentials on a European or global scale can be used in scenarios to determine the climate mitigation potentials of aviation over time. In addition, the efficiency of regulatory measures for climate impact mitigation can be investigated on this basis. However, the results must always be interpreted in the context of the models' uncertainties, particularly with regard to the quantification of non-CO₂ climate effects.

Betriebliche Verfahren zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs - Ein Vergleich

Vom Promotionsausschuss
der Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation (Monografie)

von
Zarah Lea Zengerling

aus
Darmstadt

2026

Übersicht der Gutachter:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick |
| 2. Gutachter: | Prof. Dr. rer. nat. Volker Grewe |
| Vorsitzender des Prüfungsausschusses: | Prof. Dr. rer. nat. Alexander Schlaich |

Tag der mündlichen Prüfung: 24.03.2026

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Luftverkehr des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in der Abteilung Flugbetriebskonzepte in Hamburg. Ich möchte mich herzlich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Volker Gollnick von der Technischen Universität Hamburg, welcher mich in den zurückliegenden Jahren im stetigen wissenschaftlichen Austausch unterstützt hat. Ohne seine engagierte Betreuung meines Promotionsvorhabens im Zuge vieler intensiver Gespräche wäre diese Arbeit nicht entstanden. Darüber hinaus danke ich Prof. Dr. Volker Grewe für die Übernahme des Zweitgutachtens und Prof. Dr. Alexander Schlaich für die Übernahme des Vorsitz des Prüfungsausschusses.

Des Weiteren möchte ich dem Team am DLR-Institut für Luftverkehr sowie am Institut für Lufttransportsysteme an der TU Hamburg danken. Besonderer Dank gilt hierbei meinen Vorgesetzten Dr. Florian Linke und Dr. Alexander Lau, die die richtigen Randbedingungen für mein Promotionsvorhaben geschaffen und mir die notwendigen Freiräume eingeräumt haben. Darüber hinaus haben mich zahlreiche Kolleg*innen im Rahmen dieser Arbeit unterstützt. Besonders herausheben möchte ich Katrin Bistreck, Hannes Bruder, Kuno Buchtal, Maximilian Clococeanu, Maximilian Mendiguchia Meuser, Dr. Malte Niklaß, Kaushik Radhakrishnan, Jan Tomalka und Christian Weder. Einige von Ihnen sind über die Zeit zu guten Freunden geworden und haben nicht nur fachlich, sondern auch durch ihre emotionale Unterstützung in herausfordernden Phasen zum erfolgreichen Abschluss meiner Promotion beigetragen.

Schließlich möchte ich meinen engen Freund*innen und meiner Familie herzlich danken. Insbesondere meine Eltern, meine Schwester Zita und mein Mann Thorben haben mich in meiner Entscheidung zu promovieren bestärkt und gaben mir während der gesamten Zeit Halt bei allen beruflichen und privaten Herausforderungen. Ihre uneingeschränkte und liebevolle Unterstützung hat mir das notwendige Durchhaltevermögen zum Abschluss dieser Arbeit gegeben.

Hamburg, März 2026
Zarah Zengerling

Zusammenfassung

Die ökologische Nachhaltigkeit des Luftverkehrs wird vor allem durch die Betriebsphase getrieben, in welcher die Emissionen verschiedener Spezies wie CO₂, Stickoxiden und Ruß entlang von Flugtrajektorien die Strahlungsbilanz der Erde beeinflusst und somit zur Veränderung des Klimas beiträgt. Dabei sind insbesondere Nicht-CO₂-Effekte, welche nicht nur von der Menge des verbrauchten Kraftstoffs, sondern auch von Missionscharakteristika wie Emissionsort, -zeit und meteorologischen Randbedingungen abhängen, für einen Großteil des Effekts verantwortlich. Um den Beitrag des Luftverkehrs zum menschengemachten Klimawandel im Kontext ambitionierter Klimaziele zu reduzieren, werden verschiedene Mitigationsansätze untersucht. Neben technologischen Innovationen sind auch betriebliche Maßnahmen vielversprechend, da diese unmittelbar implementiert werden können und keine langen Entwicklungszeiten benötigen. Darüber hinaus sind betriebliche Maßnahmen besonders geeignet, um die regional, zeitlich und meteorologisch variierende Klimasensitivität von Nicht-CO₂-Effekten zu adressieren. Um besonders effektive oder effiziente Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung zu identifizieren, ist ein Vergleich dieser betrieblichen Maßnahmen notwendig, was bisher aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen einzelner Studien zur Maßnahmenbewertung in der Literatur nicht möglich war.

Im Rahmen dieser Arbeit wird dafür eine detaillierte Simulationskette zur Bewertung von betrieblichen Innovationen im Luftverkehr entwickelt. Diese setzt sich aus Modellen für die Flugtrajektorien-simulation, die Emissionsrechnung, die Klimabewertung sowie die Analyse der Auswirkungen auf die Interessensgruppen zusammen. Die Methode dieser Arbeit geht dabei über den aktuellen Stand der Forschung hinaus, indem die Vergleichbarkeit von Maßnahmen in einer identischen Simulationsumgebung sichergestellt wird und durch verschiedene Submodule unterschiedliche Randbedingungen berücksichtigt werden können. Die Bewertungskette wird durch eine Skalierungsmethodik komplettiert, mit welcher Studienerkenntnisse zu betrieblichen Klimawirkungsminderungsmaßnahmen des Luftverkehrs ohne Detailbewertung anhand einfacher Kennzahlen ebenfalls dem Vergleich zugeführt werden. Eine umfassende Verifikation und Validierung der Modellkette sowie der Skalierungsmethode erfolgt über externe Daten und Modelle sowie anhand der Literatur. Die Anwendung der entwickelten Modellkette sowie der Vergleichsmethodik demonstriert den Einsatz zu Bewertung und Vergleich verschiedener betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs. Zum Beispiel wird so das Konzept des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs entwickelt, bei welchem Zwischenlandeflughafen und Flughöhe auf Basis der Klimawirkung ausgewählt werden. Ein Vergleich verschiedener Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung zeigt die Abhängigkeit des Maßnahmenvergleichs von den Charakteristika der Referenzmission, wie lateraler Ausdehnung, Missionsdistanz, Flugzeugtyp und meteorologischer Situation, sodass keine der untersuchten Maßnahmen für alle betrachteten Missionen vorteilhaft gegenüber den übrigen Maßnahmen ist. Allerdings erweist sich die Reduktion von Flughöhe und Fluggeschwindigkeit im Vergleich zu den übrigen betrachteten Maßnahmen lateraler Routenverschiebung, Mehrstufenbetrieb und Formationsflug mit Mittel als besonders geeignet.

Für weitere Forschung können die Mitigationspotentiale auf europäischer oder globaler Skala in Szenarien zur Bestimmung der Mitigationspotentiale des Luftverkehrs über die Zeit berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann auf dieser Basis die Untersuchung der Effektivität von umweltpolitischen Maßnahmen durchgeführt werden. Die Interpretation der Ergebnisse muss allerdings stets im Kontext der Unsicherheiten der Modelle insbesondere hinsichtlich der Klimawirkungsquantifizierung von Nicht-CO₂-Effekten erfolgen.

Abstract

The environmental sustainability of air traffic is primarily driven by operations, during which the emission of various species such as CO₂, nitrogen oxides, and soot along flight trajectories influences the earth's radiative balance and thus contributes to climate change. In particular, non-CO₂ effects are responsible for a large part of the effect. These effects depend not only on the amount of fuel consumed but also on mission characteristics such as emission location, time, and meteorological boundary conditions. In order to reduce the contribution of air traffic to anthropogenic climate change in the context of ambitious climate targets, various mitigation approaches are currently being investigated. In addition to technological innovations, operational measures are also promising, as they can be implemented immediately and do not require long development times. Furthermore, operational measures are particularly suitable for addressing the regional, temporal, and meteorologically varying climate sensitivity of non-CO₂ effects. In order to identify particularly effective or efficient measures for climate impact mitigation, a comparison of these operational measures is necessary, which has not been possible so far due to different boundary conditions of individual studies in the literature.

To this end, a detailed simulation chain is developed in this thesis to evaluate operational measures in air transport. This consists of models for flight trajectory simulation, emissions calculation, climate assessment, and analysis of the effects on stakeholders. The method of this work goes beyond the current state of research by ensuring the comparability of measures in an identical simulation environment and allowing different boundary conditions to be taken into account through various submodules. The assessment chain is completed by a scaling methodology with which study findings on operational climate mitigation measures in aviation can also be compared without detailed evaluation using simple key figures. A comprehensive verification and validation of both the modelling chain and the scaling method is carried out using external data and models as well as literature results. The application of the developed modelling chain and the scaling methodology demonstrates the use for the evaluation and comparison of different operational measures to reduce the climate impact of aviation. For example, the concept of climate-optimized intermediate stop operations is defined, in which stopover airport and flight altitude are selected based on climate impact. A comparison of different climate mitigation measures shows the dependence of effectiveness and efficiency on the characteristics of the reference mission, such as lateral extent, mission distance, aircraft type, and meteorological situation. Hence, none of the measures examined is advantageous over the other measures for all of the missions considered. However, the reduction of flight altitude and airspeed proves to be particularly suitable on average compared to the other measures considered: lateral route shifting, intermediate stop operations, and formation flight.

The results of this work form the basis for future research. The mitigation potentials on a European or global scale can be used in scenarios to determine the climate mitigation potentials of aviation over time. In addition, the efficiency of regulatory measures for climate impact mitigation can be investigated on this basis. However, the results must always be interpreted in the context of the models' uncertainties, particularly with regard to the quantification of non-CO₂ climate effects.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	vii
Nomenklatur	ix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungskontext	6
1.3 Ziel und Struktur der Arbeit	8
2 Grundlagen: Luftverkehr und Klima	11
2.1 Nachhaltigkeit	11
2.2 Treibhauseffekt und Klimawandel	13
2.3 Emissionen des Luftverkehrs und deren Wirkung	14
2.3.1 Kohlenstoffdioxid	16
2.3.2 Wasserdampf	17
2.3.3 Stickoxide	18
2.3.4 Kondensstreifeneffekte	19
2.3.5 Aerosole	20
2.4 Metriken zur Beurteilung der Klimawirkung	21
2.4.1 Indikatoren zur Bewertung der Klimawirkung	22
2.4.2 Gegenüberstellung verschiedener Metriken	25
2.5 Betriebliche Aspekte des Luftverkehrs	26
2.6 Zwischenfazit: Ökologische Nachhaltigkeit im Betrieb des Luftverkehrs	27
3 Stand der Technik: Ansätze zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs	29
3.1 Systemgrenzen der Betrachtung	29
3.2 Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs	30
3.2.1 Technische Ansätze und alternative Kraftstoffe	32
3.2.2 Betriebliche Ansätze	34
3.2.3 Regulatorische Maßnahmen	35
3.3 Literaturübersicht: Betriebliche Mitigationsansätze und Potentiale	36
3.3.1 Mitigationspotentiale verschiedener betrieblicher Maßnahmen	37
3.3.2 Kategorisierung und Vergleich der angewendeten Methoden	40
3.3.3 Vergleich verschiedener Maßnahmen	43
3.4 Maßnahmenzenarien und Roadmaps	46
3.5 Zwischenfazit: Stand der Forschung und Ableitung der Forschungslücke	49
4 Modellbildung: Entwicklung der Bewertungs- und Vergleichsmethodik	51
4.1 Konzeptionelle Anforderungen an die Methodik	51
4.2 Modellkette zur detaillierten Bewertung betrieblicher Maßnahmen	52
4.2.1 Trajektorien-simulation und Flugleistungsrechnung	54
4.2.2 Emissionsrechnung und -rasterung	63
4.2.3 Klimawirkungssimulation	68
4.2.4 Bewertung der betrieblichen Auswirkungen	76

4.3	Ansätze zum Maßnahmenvergleich	77
4.4	Modellqualifizierung, Verifikation und Validierung	81
4.4.1	Modellqualifizierung	82
4.4.2	Verifikation der Modellbildung	84
4.4.3	Validierung der Modellbildung	85
4.5	Zwischenfazit: Bewertung der neuen Methodik	92
5	Ergebnisse: Bewertung und Vergleich betrieblicher Maßnahmen	93
5.1	Definitionen zur Durchführung der Experimente	93
5.1.1	Definition des Studienfokus	93
5.1.2	Auswahl der betrieblichen Maßnahmen	95
5.1.3	Struktur der Fallstudien	97
5.2	Individuelle Bewertung betrieblicher Maßnahmen	98
5.2.1	Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit	99
5.2.2	Klimaoptimierter Mehrstufenbetrieb	102
5.3	Vergleich von betrieblichen Maßnahmen durch Detailmodellierung	105
5.4	Generalisierung des Vergleichs von betrieblichen Maßnahmen	115
5.4.1	Vergleich verschiedener Maßnahmen durch Skalierung	117
5.4.2	Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems	119
5.4.3	Einfluss des Implementierungszeitpunkts	120
5.5	Zwischenfazit: Bewertung der Ergebnisse und operationelle Empfehlung	122
6	Diskussion und Ausblick	125
6.1	Zusammenfassung und Diskussion der Erkenntnisse	125
6.2	Ausblick auf weitere Forschungsfragestellungen	128
6.3	Fazit	131
	Anhang	132
A	Das Projekt ClimOP	132
B	Ergänzende Betrachtungen zur Methode und Ergebnissen	135
B.1	Ergänzungen zur Studiendefinition	135
B.2	Ansätze zur Trajektorienoptimierung	142
B.3	Vergleich verschiedener Routenadaptionen im Kontext variierender Meteorologie	143
B.4	Erläuterungen zum klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb	145
B.5	Vergleich betrieblicher Maßnahmen im Kontext technologischer Wei- terentwicklungen	149
B.6	Ansätze zur Internalisierung von Klimakosten	151
C	Ergänzende Betrachtungen zu den Stakeholderauswirkungen	155
D	Unsicherheiten	161
	Literaturverzeichnis	165

Abbildungsverzeichnis

1.1	Wachstum des Luftverkehrs als Entwicklung der globalen RPK seit 1940.	1
1.2	Jährliche Abweichung der durchschnittlichen globalen Temperatur im Vergleich zur Durchschnittstemperatur von 1901 bis 1960.	2
1.3	Globale Temperaturänderung durch den Luftverkehr.	4
1.4	Ansatzpunkte zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs.	5
1.5	Struktur der Arbeit.	10
2.1	Nachhaltigkeitsdimensionen.	11
2.2	Ursache-Wirkungs-Beziehung von Emissionen bis zum Klimawandel und den verursachten Schäden.	14
2.3	Direkte und indirekte Wirkung der Luftverkehrsemissionen auf den Strahlungsantrieb.	15
2.4	Effektiver Strahlungsantrieb der verschiedenen Emissionspezies des Luftverkehrs.	16
2.5	Globaler und jährlicher mittlerer Strahlungsantrieb verschiedener Nicht-CO ₂ -Effekte in Abhängigkeit des Emissionsorts.	18
2.6	Definition der passenden Klimametrik.	21
2.7	Auswirkungen unterschiedlicher Emissionsverläufe und Zeithorizonte auf Klimametriken.	22
2.8	Stakeholder des Luftverkehrssystems.	27
3.1	Übersicht verschiedener Maßnahmenkategorien zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs und die dazugehörigen Einflussfaktoren.	31
3.2	Technische Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung, dazugehörige Einflussfaktoren und Beispiele.	32
3.3	Energiefluss von der Primär- zur Nutzenergie	33
3.4	Betriebliche Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung, dazugehörige Einflussfaktoren und Beispiele.	34
3.5	Regulatorische Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung, Ansätze und Beispiele.	35
3.6	Modellkette zur Bewertung von Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs.	40
3.7	Methoden und Modelle zur Trajektorienrechnung.	41
3.8	Methoden und Modelle zur Bewertung der Klimawirkung.	42
3.9	Multidimensionaler Vergleich verschiedener Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung aus dem Projekt WeCare.	45
3.10	Szenarien zur Entwicklung der Klimawirkung des Luftverkehrs durch Kombination verschiedener Kohlenstoff-, Nachfrage- und Energieintensitätsszenarien.	47
3.11	Szenarien zur Entwicklung der Klimawirkung des Luftverkehrs unter Berücksichtigung der Coronapandemie.	48
3.12	Verschiedene Szenarien zur Entwicklung der Klimawirkung des Luftverkehrs aus dem DLR-Projekt DEPA2050.	48
3.13	Einzelstudien zur betrieblichen Minderung der Klimawirkung nach Studienumfang und Mitigationpotential.	50
4.1	Modellkette zur Bewertung von Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung am DLR-Institut für Luftverkehr.	53
4.2	Schema zur Bewertungsmethode von Einzelmaßnahmen.	54
4.3	Vereinfachter Programmablauf des iTCMs.	55

4.4	Kräfte im Gesamtenergieansatz.	56
4.5	Vergleich der Trajektorienenergieergebnisse verschiedener Flugleistungsmodelle.	58
4.6	Winddreieck in der horizontalen Ebene.	59
4.7	Regelkreis im iTCM für Flughöhe und Geschwindigkeit.	60
4.8	Globales Emissionskataster der CO ₂ -Emissionen des Luftverkehrs von 2019 aus dem DLR-Projekt ELK.	64
4.9	Emissionsberechnungsmethoden.	65
4.10	Schema der Funktionsweise von Kraftstoffflusskorrelationsmethoden.	65
4.11	Visualisierung von Boeing- und DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode für ein PW1127G-Triebwerk.	66
4.12	Schematische Darstellung der charakteristischen Punkte des RedEmPs für eine Langstreckentrajektorie.	67
4.13	Beispiel einer zusammengeführten CCF für eine Sommerwettersituation.	69
4.14	Beispiel einer zusammengeführten aCCF für p-ATR20 im Nordatlantik.	70
4.15	Visualisierung des Schmidt-Appelmann-Kriteriums und Bestimmung der Kondensstreifenpersistenz.	72
4.16	Schematische Darstellung der Methode in AirClim.	75
4.17	Korrelation der CO ₂ e der betrachteten Nicht-CO ₂ -Effekte nach Berechnung mit Regressionsformeln im Vergleich zu AirClim.	76
4.18	Ansätze zum Vergleich verschiedener Maßnahmen und Studien.	77
4.19	Schematische Darstellung des Skalierungsansatzes zum Vergleich verschiedener Maßnahmen mit unterschiedlichen Untersuchungsflugplänen.	80
4.20	Aggregation der Temperaturantwort für CO ₂ -Puls-Emissionen pro Jahr zum Gesamttemperaturverlauf.	81
4.21	Abgrenzung der Begriffe Verifikation und Validierung.	82
4.22	Verifikation der Trajektorien- und Emissionsrechnung mithilfe von RedEmPs.	85
4.23	Vergleich der Trajektorienparameter Schub und Kraftstofffluss für verschiedene Flugleistungsmodelle und Trajektorienrechner.	87
4.24	Klimawirkungsabschätzung für den europäischen Langstreckenverkehr über verschiedene Stichprobengrößen des Referenzflugplans frequenzbasiert sowie unter Berücksichtigung von ASK und CO ₂ e.	89
4.25	Variation in der Klimawirkungsabschätzung für den europäischen Langstreckenverkehr über verschiedene verzerrte Referenzflugpläne mit unterschiedlichen Skalierungsansätzen.	90
4.26	Validierung des vereinfachten Ansatzes zur Temperaturentwicklung	91
5.1	Struktur der Ergebnisdarstellung in Kapitel 5.	93
5.2	Übersicht zur Definition der Randbedingungen des Experiments.	94
5.3	Veränderung der Klimawirkung je Spezies durch reduzierte Flughöhen und Geschwindigkeiten.	101
5.4	Veränderung der Klimawirkungsminderung in Abhängigkeit des zulässigen Betriebskostenanstiegs je Mission für die Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit.	101
5.5	Potential zur Minderung der Klimawirkung durch klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb.	103
5.6	Paretofront für klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb und Flughöhenreduktion im Vergleich.	105
5.7	Auswahl fünfzig repräsentativer Missionen anhand von Distanz, Sitzplatzkapazität und geografischer Ausdehnung.	107

5.8	Ergebnisse des missionsindividuellen Vergleichs für ausgewählte Beispielmissionen.	108
5.9	Normierte Gesamtklimawirkung im Relation zur Referenzmission und Veränderung der Klimawirkung je Spezies für ausgewählte Maßnahmen des missionsindividuellen Vergleichs anhand einer Beispielmission.	109
5.10	Klimawirkungsänderung und Kostenanstieg für den Maßnahmenvergleich der Fünfzig-Missionen-Fallstudie.	110
5.11	Normierte Gesamtklimawirkung im Relation zur Referenzmission und Veränderung der Klimawirkung je Spezies für verschiedene Maßnahmen der Fünfzig-Missionen-Fallstudie.	111
5.12	Kombinierte Paretofront der betrachteten Maßnahmen der Fünfzig-Missionen-Fallstudie.	112
5.13	Ergebnisse des missionsindividuellen Vergleichs für zwei nordatlantische Beispielmissionen unter Berücksichtigung der tatsächlich geflogenen Route und der Wettersituation.	115
5.14	Klimasensitivität aus aCCFs entlang ausgewählter nordatlantischer Beispielmissionen.	116
5.15	Sensitivität der globalen Mitigationspotentiale sowie Veränderungen in den direkten Betriebskosten für unterschiedliche missionsindividuelle DOC-Penalties des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs sowie unterschiedliche Flugplananteile, für die eine Durchführung des Formationsflugs möglich ist. . .	119
5.16	Einfluss unterschiedlicher Implementierungszeitpunkte für die ausgewählten Maßnahmen auf die Temperaturveränderung durch den Luftverkehr in verschiedenen Szenarien	121
5.17	Einfluss unterschiedlicher Implementierungszeitpunkte für die ausgewählten Maßnahmen zur Reduktion des globalen Temperaturanstiegs durch den Luftverkehr im Jahr 2050.	122
6.1	Veränderung der Effizienz verschiedener betrieblicher Maßnahmen in Relation zum Referenzfall durch die Einführung der Bepreisung von Nicht-CO ₂ -Effekten für eine Beispielroute.	128
6.2	Kombination verschiedener Maßnahmen zur Minderung der CO ₂ -äquivalenten Emissionen im zeitlichen Verlauf.	130
A.1	Vorgehensweise im Projekt ClimOP.	132
A.2	Semi-quantitative Zusammenfassung der Maßnahmenbewertung im Projekt ClimOP.	134
A.3	Klimasensitivität aus aCCFs für den Nordatlantik mit unterschiedlichen Klimametrien.	135
A.4	Ergebnisse des missionsindividuellen Vergleichs der Klimawirkung für unterschiedliche Klimametrien	136
A.5	Bewertung betrieblicher Maßnahmen aus der Literatur hinsichtlich ausgewählter Muss- und Wertungskriterien	139
A.6	Bewertung der Ähnlichkeit ausgewählter betrieblicher Maßnahmen.	140
A.7	Auswahl der Maßnahmen für die weitere Betrachtung	141
A.8	Trajektorienoptimierung für eine Beispielroute im Vergleich zur tatsächlich geflogenen Referenztrajektorie	143
A.9	Klimawirkung je Spezies entlang der Referenztrajektorie sowie Mitigationspotential durch kleinskalige vertikale Trajektorienverschiebung für eine Beispielmission im Juni und Dezember 2018.	144

A.10 Bestimmung der Minstdistanz im Mehrstufenbetrieb.	146
A.11 Auswahl der Zwischenlandeflughäfen in der Konzeptbewertung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs entlang einer Beispielmission.	147
A.12 Effekte durch die Einführung einer CO ₂ e-Bepreisung auf die klimaoptimierte Flugplanung für eine kondensstreifenintensive Beispielmission.	152
A.13 Veränderungen im ATR-DOC-Diagramm durch die Einführung eines Schemas zur Bepreisung von Nicht-CO ₂ -Effekten für unterschiedliche CO ₂ e-Preise entlang einer Beispielmission.	154
A.14 Ergebnisse der Passagierumfrage zur Akzeptanz der Auswirkungen betrieblicher Mitigationsmaßnahmen.	156
A.15 Veränderungen in der Luftraumauslastung für die vertikale Trajektorienadaption.	158
A.16 Verteilung der Klimawirkung über betrachtete Missionen und Trajektorienanpassung im vertikalen Adaptionsszenario.	159
A.17 Ergebnisse der Hotspot-Analyse für die vertikale und zeitliche Trajektorienadaption.	159
A.18 Unsicherheiten in den meteorologischen Bedingungen und der daraus resultierenden Klimawirkung.	163
A.19 Unterschiede in den Mitigationspotentialen verschiedener Maßnahmen bei unterschiedlicher Gewichtung der Nicht-CO ₂ -Effekte zur Berücksichtigung von Unsicherheiten.	164

Tabellenverzeichnis

2.1	Emissionsindizes pro Kilogramm verbranntem Kraftstoff.	15
2.2	Wirksamkeiten verschiedener Klimawirkungsspezies.	23
2.3	Eigenschaften verschiedener Indikatoren zur Bewertung der Klimawirkung.	25
3.1	Konstante CO ₂ -Äquivalente in F-ATR100 für verschiedene Emissionsspezies.	42
3.2	Literaturübersicht zu Vergleichen betrieblicher Maßnahmen im Luftverkehr.	44
3.3	Studien zur Kombination verschiedener Maßnahmen in Szenarien.	46
4.1	Beispiel für die Definition der Flugphasen sowie der dazugehörigen Ziel- und Abbruchbedingungen der Flugphasentabelle im iTCM.	61
4.2	Stützstellen für Kraftstoffflusskorrelationsmethoden.	65
4.3	Wirksamkeit, AirClim-Skalierungsfaktor und Metriken-Skalierung verschiedener Emissionsspezies in aCCFs.	71
4.4	Abgleich der Ergebnisse verschiedener Studien mit Anwendung des iTCMs im Vergleich zu Erkenntnissen aus der Literatur.	86
4.5	Abgleich verschiedener Flugleistungsmodelle im iTCM anhand der Abweichung des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zum Standardflugleistungsmodell.	87
4.6	Mittelwert und Standardabweichung bei der Berechnung des Potentials der Klimawirkungsminderung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs mit der Skalierungsmethode im Vergleich zu den Ergebnissen für den Referenzflugplan ohne Skalierung.	90
5.1	Ausgewählte betriebliche Maßnahmen zur weiteren Untersuchung.	96
5.2	Betrachtete Maßnahmen in den unterschiedlichen Fallstudien.	98
5.3	Randbedingungen der Fallstudien zur Detailbewertung der Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit sowie des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs.	99
5.4	Effekte der Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit	100
5.5	Effekte des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs	102
5.6	Vergleich des kraftstoff- und klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs mit den Betrieb auf niedrigeren Flughöhen und Geschwindigkeiten	104
5.7	Randbedingungen der Fallstudie zum Maßnahmenvergleich unter konsistenten Studienrandbedingungen durch detaillierte Modellierung in klimatologischer Betrachtung.	107
5.8	Vergleich relevanter Kennzahlen für die ausgewählten Maßnahmen in der Fünzig-Missionen-Fallstudie.	110
5.9	Randbedingungen der Fallstudie zum Maßnahmenvergleich unter konsistenten Studienrandbedingungen durch detaillierte Modellierung in meteorologischer Betrachtung.	114
5.10	Vergleich der relativen Mitigationspotentiale und Veränderung in Betriebskosten durch die Implementierung der betrachteten Maßnahmen im Langstreckenluftverkehr.	118
A.1	Relative Veränderungen des Luftverkehrsaufkommens und des Alters der Weltflotte im Zuge der COVID19-Pandemie.	137
A.2	Veränderungen im Luftverkehr durch die Ukraine-Krise	138
A.3	Veränderung in Kraftstoffverbrauch und Klimawirkung durch ein und zwei Zwischenlandungen für eine Beispielmision relativ zur direkten Referenzmission.	148

A.4	Veränderung in Kraftstoffverbrauch und Klimawirkung durch unterschiedliche Flugzeugzuordnungen für zwei ausgewählte Beispielmmissionen in Relation zur direkten Referenzmission.	149
A.5	Veränderung in Kraftstoffverbrauch und Klimawirkung durch den Einsatz verbesserter Flugzeugentwürfe im klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb. . .	149
A.6	Veränderung des effektiven Strahlungsantrieb von Kondensstreifen durch unterschiedliche Trajektorienadaptionen für eine Beispielmmission in Abhängigkeit unterschiedlicher Antriebstypen	150
A.7	Veränderung verschiedener Missionskennzahlen durch unterschiedliche Trajektorienadaptionen in Abhängigkeit des Flugzeugtyps.	151
A.8	Veränderung verschiedener Netzwerkkennzahlen durch Gewinnoptimierung im Verhältnis zur Klimawirkung in Relation zum gewinnoptimierten Referenznetzwerk in der Hochsaison.	157
A.9	Veränderung luftraumspezifischer Kennzahlen durch Einführung eines unkonditionierten Luftraums für unterschiedliche Zielfunktionen der Routenoptimierung in Relation zur konditionierten Referenz.	160
A.10	Auswirkungen von Ungenauigkeiten in der Trajektorien- und Emissionsrechnung mit RedEmPs.	162

Nomenklatur

Abkürzungsverzeichnis

aCCC	algorithmische Kostenfunktion für Klimawandel (<i>Algorithmic cost functions for climate change</i>)
aCCF	algorithmische Klimawirkungsfunktion (<i>Algorithmic climate change function</i>)
aDOC	angepasste direkte Betriebskosten (<i>Adjusted direct operating cost</i>)
ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance Broadcast</i>
AGWP	absolutes globales Erderwärmungspotential (<i>Absolute global warming potential</i>)
AGTP	absolutes globales Temperaturpotential (<i>Absolute global temperature potential</i>)
ANS	Flugsicherungsdienste (<i>Air navigation services</i>)
AO	Flugzeugbetreiber (<i>Aircraft operators</i>)
Ar	Argon
ARTP	absolutes regionales Temperaturänderungspotential (<i>Absolute regional temperature change potential</i>)
ASK	verfügbare Sitzplatzkilometer (<i>Available seat kilometers</i>)
ATAG	<i>Air Transport Action Group</i>
ATM	Luftverkehrsmanagement (<i>Air traffic management</i>)
ATR	durchschnittliche Temperaturantwort (<i>Average temperature response</i>)
ATRH	durchschnittliche Temperaturantwort über Zeithorizont H
BADA	<i>Base of aircraft data</i>
BADA3	<i>Base of aircraft data, Version 3</i>
BADA4	<i>Base of aircraft data, Version 4</i>
BAU	Szenario üblicher Entwicklung (<i>Business as usual</i>)
BC	Rußpartikel (<i>Black carbon</i>)
BFFM2	Boeing-Kraftstoffflusskorrelationsmethode 2 (<i>Boeing Fuel Flow Method 2</i>)
CAS	kalibrierte Luftgeschwindigkeit (<i>Calibrated air speed</i>)
CATS	Projekt <i>Climate compatible air transport system</i>
CCA	Bepreisung klimasensitiver Gebiete (<i>Climate charged areas</i>)
CCF	Klimawirkungsfunktionen (<i>Climate change functions</i>)
CEDS	<i>Community Emissions Data System</i>
CGTP	kombiniertes globales Temperaturpotential (<i>Combined global temperature potential</i>)
CGWP	kombiniertes globales Erderwärmungspotential (<i>Combined global warming potential</i>)
CH ₄	Methan
CI	Kostenindex (<i>Cost index</i>)
CiC	Kondensstreifenzirren (<i>Contrail-induced cirrus</i>)

ClimOP	Projekt <i>Climate assessment of innovative mitigation strategies towards operational improvements in aviation</i>
CNS	Kommunikation, Navigation und Überwachung (<i>Communication, Navigation and Surveillance</i>)
CO	Kohlenstoffmonoxid
COA	Übergangsflughöhe (<i>Crossover altitude</i>)
COC	Barbetriebskosten (<i>Cash operating cost</i>)
CoCiP	<i>Contrail Cirrus Prediction Tool</i>
COD	optische Dicke von Kondensstreifen (<i>Contrail optical depth</i>)
CORSIA	<i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i>
COVID19	Coronavirus SARS-CoV-2
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente (<i>CO₂ equivalents</i>)
CurTec	Szenario aktueller Technologie (<i>Current technology</i>)
DEPA2050	Projekt <i>Development pathways for aviation up to 2050</i>
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOC	direkte Betriebskosten (<i>Direct operating cost</i>)
ECAC	Europäische Zivilluftfahrt-Konferenz (<i>European civil aviation conference</i>)
ECMWF	<i>European Center for Medium-Range Weather Forecast</i>
EED	<i>Engine emissions data bank</i>
EF	Energieantrieb (<i>Energy forcing</i>)
EI	Emissionsindex
ELK	Projekt Emissionslandkarte
EMAC	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Hamburg (ECHAM) /Modular Earth Submodel System (MESSy) Atmospheric Chemistry</i>
EOL	Lebensende (<i>End of life</i>)
ERF	effektiver Strahlungsantrieb (<i>Effective radiative forcing</i>)
ESF	<i>Energy-sharing factor</i>
EU	Europäische Union
EU ETS	Emissionshandelssystem (<i>Emissions Trading System</i>) der EU
FFM	Kraftstoffflusskorrelationsmethoden (<i>Fuel flow correlation methods</i>)
FL	Flugfläche (<i>Flight level</i>)
FMS	<i>Flight management system</i>
FRA	<i>Free-route airspace</i>
F-Metrik	Metrik-Berechnung unter Annahme eines zukünftigen Emissionsszenarios
GA	allgemeine Luftfahrt (<i>General aviation</i>)
GC	Großkreis (<i>Great circle</i>)
GHG	Treibhausgase (<i>Greenhouse gases</i>)
GRIDLAB	<i>Global Air Traffic Emission Distribution Laboratory</i>
GTP	globales Temperaturpotential (<i>Global temperature potential</i>)
GWP	globales Erderwärmungspotential (<i>Global warming potential</i>)
HC	Kohlenwasserstoffe (<i>Hydrocarbons</i>)

H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser, Wasserdampf
IATA	Internationale Lufttransportvereinigung (<i>International Air Transport Association</i>)
ICAO	Internationale zivile Luftfahrtorganisation (<i>International Civil Aviation Organisation</i>)
ILT	Institut für Lufttransportsysteme
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IOC	indirekte Betriebskosten (<i>Indirect operating cost</i>)
ISA	Internationale Standardatmosphäre
ISO	Mehrstufenbetrieb (<i>Intermediate stop operations</i>)
ISSR	Eis-übersättigte Gebiete (<i>Ice super-saturated regions</i>)
iTCM	integriertes TCM
LAQ	lokale Luftqualität (<i>Local air quality</i>)
LC	Lineare Kondensstreifen (<i>Linear contrails</i>)
LCA	Lebenszyklusanalyse (<i>Life cycle assessment</i>)
LTO	An- und Abflug (<i>Landing take-off</i>)
LV	Institut für Luftverkehr (DLR)
L/D	Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand (<i>Lift over drag ratio</i>)
KPI	Schlüsselkennzahlen (<i>Key performance indicators</i>)
medFL	Hauptflugfläche (<i>Median flight level</i>)
MMS	Mit-Maßnahme-Szenario
MRV	Überwachungs-, Melde- und Verifikationsrahmenwerk (<i>Monitoring, reporting and verification framework</i>)
MSE	Mittlere quadratische Abweichung (<i>Mean squared error</i>)
NATS	Nordatlantisches Spursystem (<i>North atlantic track system</i>)
NO _x	Stickoxide
N ₂	Stickstoff
OEM	Hersteller (<i>Original equipment manufacturers</i>)
OEW	Betriebsleermasse (<i>Operating empty weight</i>)
OI	betriebliche Verbesserung (<i>Operational improvements</i>)
OpenAP	Modell <i>Open Aircraft Performance</i>
O ₂	Sauerstoff
O ₃	Ozon
PACOTS	<i>Pacific Organized Track System</i>
PI-Regelung	Proportional-Integral-Regelung
PM	Feststoffteilchen (<i>Particulate matters</i>)
PMO	langfristige Ozon-Produktion (<i>Primary mode ozone</i>)
PS-Modell	Poll-Schumann-Modell
pyTOM	<i>Trajectory Optimization Module in python</i>
p-Metrik	Metrik-Berechnung unter Annahme eines Puls-Emissionsszenarios

RCE	verteilte Integrationsumgebung (<i>Remote component environment</i>)
RedEmP	Reduzierte Emissionsprofile (<i>Reduced emission profiles</i>)
REACT4C	Projekt <i>Reducing emissions from aviation by changing trajectories for the benefit of climate</i>
RF	Strahlungsantrieb (<i>Radiative forcing</i>)
ROCD	Steig- bzw. Sinkrate (<i>Rate of climb/descent</i>)
RPK	Verkaufte Passagierkilometer (<i>Revenue passenger kilometres</i>)
Sabre MI	<i>Sabre Market Intelligence</i>
SAC	Schmidt-Appleman-Kriterium (<i>Schmidt-Appleman criterion</i>)
SAF	Nachhaltiger Flugzeugkraftstoff (<i>Sustainable aviation fuel</i>)
SDG	Nachhaltige Entwicklungsziele (<i>Sustainable development goals</i>)
sDOC	vereinfachte direkte Betriebskosten (<i>Simplified direct operating cost</i>)
SO _x	Schwefeloxide
SR	spezifischer Reichweitenfaktor (<i>Specific range factor</i>)
S-Metrik	Metrik-Berechnung unter Annahme eines anhaltenden Emissionsszenarios
TCM	<i>Trajectory Calculation Module</i>
TEM	Gesamtenergieansatz (<i>Total energy model</i>)
TGT	<i>Trajectory Generation Tool</i>
TMA	Nahverkehrsbereich <i>Terminal Maneuvering Area</i>
TOC	Gesamtbetriebskosten (<i>Total operating cost</i>)
TOM	<i>Trajectory Optimization Module</i>
TOW	Abflugmasse (<i>Take-off weight</i>)
TraK	Projekt Transport und Klima
TUHH	Technische Universität Hamburg
UN	Vereinte Nationen (<i>United Nations</i>)
UTC	Koordinierte Weltzeit (<i>Universal Time Coordinated</i>)
UTLS	Region der oberen Troposphäre und der unteren Stratosphäre (<i>Upper troposphere, lower stratosphere</i>)

Formelzeichen

A	Fläche
b	Breite
c	Einheitskosten
c_D	Widerstandskoeffizient
c_{clim}	Klima-Gewichtungsfaktor in Optimierung
c_{fuel}	kraftstoffspezifische Kosten
c_p	spezifische Wärmekapazität von Luft
c_{SOC}	Kosten-Gewichtungsfaktor in Optimierung
c_{time}	zeitspezifische Kosten
C_{fix}	Fixkosten

CO_2e	CO ₂ -Äquivalent
d	Tag
D	Widerstand (in Flugleistungsrechnung)
D	Zielflughafen (<i>Destination</i> , in ISO-Konzeptbewertung)
e	Wirksamkeit
e_{Sat}^I	Sättigungsdampfdruck über Eis
e_{Sat}^W	Sättigungsdampfdruck über Wasser
f_a	verkehrsspezifischer Skalierungsfaktor
f_c	klimawirkungsspezifischer Skalierungsfaktor
f_{detour}	Umwegfaktor
f_{offset}	Versatzfaktor
F_{in}	einfallende Sonnenstrahlung
g	Erdbeschleunigung
G	Steigung der Mischgeraden (SAC)
h	Höhe
H	Zeithorizont
l	Länge
L	Auftrieb
m	Masse
m_{CO_2e}	CO ₂ -äquivalente Emissionsmenge
m_{Fuel}	Kraftstoffmasse
\dot{m}_{Fuel}	Kraftstofffluss
Ma	Machzahl
N	Stichprobengröße
O	Startflughafen (<i>Origin</i>)
OLR	Ausgehende langwellige Strahlung (<i>Outgoing longwave radiation</i>)
p	Druck
p_{amb}	Umgebungsdruck
p_{CO_2e}	CO ₂ e-Preis
PV	Potentielle Vortizität (<i>Potential vorticity</i>)
Q	spezifische Verbrennungswärme
r	Schubspezifischer Korrekturfaktor (BFFM2)
R	Reichweite
R^2	Bestimmtheitsmaß
RH	relative Feuchte
RF_{LW}	langwelliger Strahlungsantrieb
RF_{SW}	kurzwelliger Strahlungsantrieb
s	Distanz
s_{ground}	Distanz über Grund
S	Zwischenlandflughafen
SFC	spezifischer Kraftstoffverbrauch

SR	Spezifischer Reichweitenfaktor (<i>Specific range</i>)
t	Zeit
T	Temperatur
T_{amb}	Umgebungstemperatur
T_{LC}	kritische Temperatur (SAC)
Th	Schub
v	Geschwindigkeit
v_{CAS}	kalibrierte Fluggeschwindigkeit (<i>Calibrated air speed</i>)
v_{GS}	Geschwindigkeit über Grund (<i>Ground speed</i>)
v_{TAS}	wahre Fluggeschwindigkeit (<i>True air speed</i>)
v_u	östliche Komponente der Windgeschwindigkeit
v_v	nördliche Komponente der Windgeschwindigkeit
v_W	Windgeschwindigkeit
w	Gewichtung
x	Emissionspezies
α	Klimasensitivitätsparameter
γ	Bahnneigungswinkel
ϵ	Verhältnis der molaren Massen von Wasser zu Luft
η	Antriebseffizienz, Wirkungsgrad
λ	Längengrad
μ	Mittelwert
ϕ	Geopotential
φ	Breitengrad
$\bar{\varphi}$	Mittlerer Breitengrad
ψ	Klimawirkung
σ	Standardabweichung
τ	Simulationszeitschritt
χ_C	Flugkurs
χ_h	Steuerkurs
χ_W	Winkel der Windrichtung

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Bedeutung der zivilen Luftfahrt hat seit ihrer Einführung zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts stetig zugenommen (vgl. Abb. 1.1). Die absolut verkauften Passagierkilometer (*Revenue passenger kilometers, RPK*) stiegen von 1979 bis 2017 von 1,1 auf 8,2 Billionen, was einem Wachstum von ca. 5 % pro Jahr entspricht [1, 2]. Auch globale Krisen, wie die Weltfinanzkrise oder infolge des 11. Septembers 2001, haben dieses Wachstum nur kurzfristig gehemmt [3]. Selbst aktuell einschneidende Ereignisse, wie die globale COVID19-Pandemie, die insbesondere im Jahr 2020 zu einem fast vollständigen Erliegen des globalen Luftverkehrs geführt hat [4, 5, 6], oder die Ukraine-Krise in 2022, werden voraussichtlich keine langfristigen Auswirkungen auf das globale Luftverkehrswachstum haben [3, 7, 8]. Prognosen gehen davon aus, dass die RPK zwischen 2025 und 2026 wieder das Niveau von 2019 erreichen und der Wachstumstrend anschließend weiter fortgesetzt wird [8, 9]. Die signifikanten Treiber der mittelfristig steigenden Passagiernachfrage werden auch in Zukunft durch das Wachstum der Gesamtbevölkerung im Allgemeinen, eine absolute und relative Zunahme der Mittelklasse der Bevölkerung im globalen Kontext sowie langfristiges Wirtschaftswachstum beschrieben. Die größten Wachstumsraten werden hierbei auf dem asiatischen Markt und insbesondere in China erwartet [10, 11]. Andererseits werden auch steigende Energiekosten, veränderte Geschäftsreisemodelle und das zunehmende Umweltbewusstsein von Passagieren die Nachfrage beeinflussen [10].

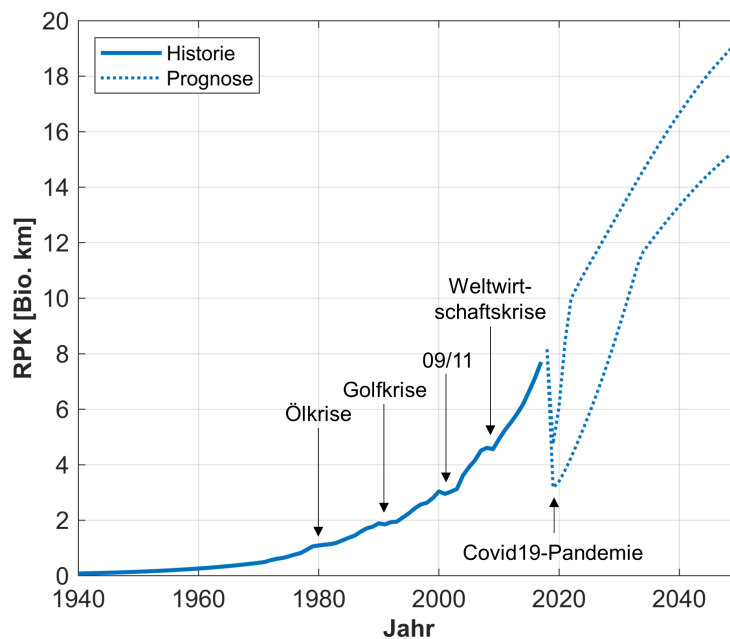


Abbildung 1.1: Wachstum des Luftverkehrs als Entwicklung der globalen RPK seit 1940, Prognose ab 2018 [eigene Darstellung nach 1, 2].

Die Luftfahrtindustrie leistet einen signifikanten gesellschaftlichen Beitrag, u. a. durch die Bereitstellung von Passagier- und Frachtmobilität, die Generierung von Wirtschaftswachstum, die Schaffung von Arbeitsplätzen, die Entwicklung von Innovationen und die Bereitstellung von Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen [12]. Insgesamt trägt dieser Industriesektor direkt mit Umsätzen von etwa 1 % des weltweiten Bruttoinlandsprodukts

und Millionen von Arbeitsplätzen zur globalen Wirtschaft bei [13]. Die indirekten Auswirkungen auf Zulieferer und den Erfolg der Tourismusbranche sind darüber hinaus von wirtschaftlicher Bedeutung [14]. Diese Relevanz des Luftverkehrs wird im Vergleich zu anderen Transportmodi auch durch die Alternativlosigkeit im Interkontinentalverkehr bedingt: Während kurze Flugstrecken im inländischen oder innereuropäischen Bereich beispielsweise durch Hochgeschwindigkeitszüge ersetzt werden können, gibt es für Langstreckenflüge aufgrund des Mangels an effizienten Alternativen keine Konkurrenz [15, 16, 17, 18].

So wie die Relevanz des Luftverkehrs im Kontext des individuellen Reisens im privaten und geschäftlichen Bereich in den letzten Jahrzehnten deutlich angestiegen ist, ist auch der globale Klimawandel in den Mittelpunkt des öffentlichen Interesses gerückt. Der durch den Menschen verursachte Anstieg an Treibhausgasen in der Atmosphäre hat in den letzten hundert Jahren um ein Vielfaches zugenommen [19]. Die Emissionen u. a. von Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan oder Stickoxiden verändern die Zusammensetzung der Atmosphäre und erhöhen somit den Strahlungsantrieb (*Radiative forcing, RF*). Diese Veränderung der Energiebilanz führt wiederum zum Anstieg der Temperatur und damit zur Veränderung des Klimas [19, 20]. Die Berichte des *Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC)*, welches sich seit 1988 mit dem anthropogenen Klimawandel befasst, stellen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem menschlichen Einfluss und der Erwärmung von Atmosphäre, Ozean und Landmassen fest. Die Verstärkung des Treibhauseffekts hat dazu geführt, dass die globale Oberflächentemperatur zwischen 2010 und 2019 um 0,8 bis 1,3 °C über den Werten zwischen 1880 bis 1900 lag (vgl. Abb. 1.2). Dieser Anstieg ist für die letzten zwei Jahrtausende beispiellos [19, 21, 22].

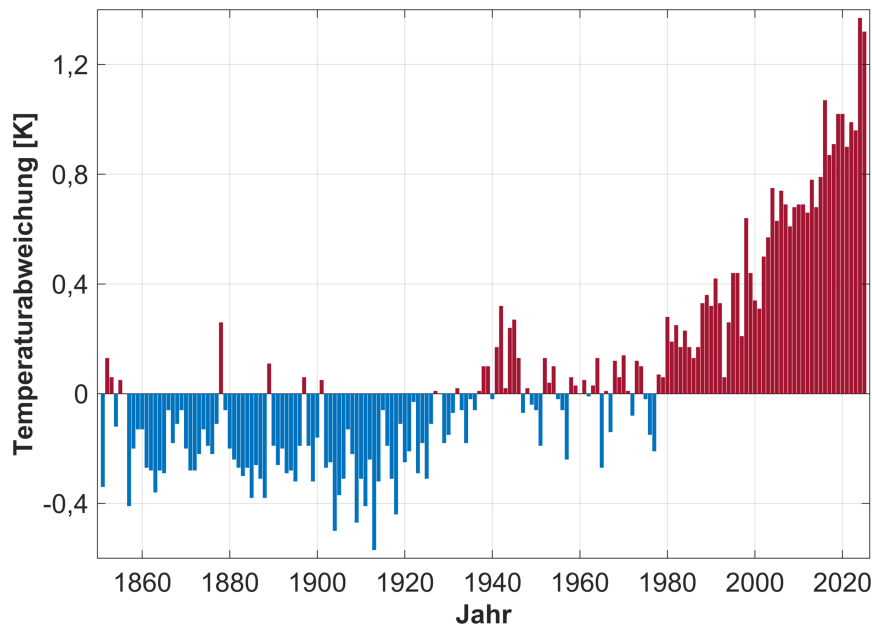


Abbildung 1.2: Jährliche Abweichung der durchschnittlichen globalen Temperatur im Vergleich zur Durchschnittstemperatur von 1901 bis 1960 [eigene Darstellung nach 23].

Um die Temperaturerhöhung und die Folgen, wie die Mehrung von Wetterextremen (u. a. Dürren, Hitzewellen, Starkniederschläge und Wirbelstürme) oder den Anstieg des Meeresspiegels, zu begrenzen, wurden verschiedene internationale Abkommen geschlossen. Diese zielen einerseits darauf ab, die globalen Emissionen und die daraus resultierende Erderwärmung zu begrenzen und andererseits die Anpassung an den Klimawandel zu er-

möglichen sowie die Folgen abzumildern. Beispielsweise zielt das Abkommen von Paris, welches im Rahmen der 24. Klimakonferenz der Vereinten Nationen (*United Nations, UN*) im Dezember 2015 geschlossen und mittlerweile durch 195 Staaten ratifiziert wurde [24], auf eine Begrenzung der Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf deutlich unter 2 °C ab. Dafür soll der globale Scheitelpunkt der Treibhausgasemissionen möglichst bald erreicht und in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ein Gleichgewicht zwischen Ausstoß und Aufnahme von Treibhausgasen, die sogenannte Treibhausgasneutralität, erreicht werden [25, 26]. Der Luftverkehr bleibt in diesem Abkommen aufgrund seines internationalen Charakters weitgehend unberührt und wird in die Verantwortung der Internationalen zivilen Luftfahrtorganisation (*International Civil Aviation Organisation, ICAO*) übertragen [27].

Durch den Transport von Passagieren und Fracht mit verschiedensten Verkehrsträgern werden große Mengen an direkten Treibhausgasen freigesetzt. Dieser Industriesektor macht mit 7,1 Gt an CO₂-Äquivalenten pro Jahr einen Anteil von 23 % an den globalen Treibhausgasemissionen aus und trägt somit signifikant zur Erderwärmung bei [19]. Trotz verbesserter Effizienzen der Transportmittel auf Straße, Schiene, im Wasser und in der Luft ist der Anteil an den gesamten CO₂-Emissionen seit 2010 angestiegen [28]. Während der Straßenverkehr mit 72 % den größten Anteil an der Menge der direkten Treibhausgasemissionen des Transportsektors hat, kommt dem Luftverkehr mit dem zweitgrößten Anteil von 11 % der Emissionsmenge ebenfalls eine zentrale Bedeutung in diesem Bereich zu [28, 29, 30].

Im Vergleich zum Verkehr auf Straße und Schiene ist im Luftverkehr das Verhältnis der Klimawirkung aus Nicht-CO₂- zu CO₂-Emissionen deutlich höher [31, 30]. Diese Nicht-CO₂-Effekte von Emissionsspezies wie Stickoxiden, Wasserdampf, Sulfat- und Rußpartikeln machen im Luftverkehr etwa zwei Drittel des gesamten Strahlungsantriebs aus [32, 33]. Während CO₂-Emissionen über viele Jahrhunderte in der Atmosphäre verbleiben, ist die Wirkung von Nicht-CO₂-Effekten zeitlich sehr unterschiedlich und dauert von wenigen Stunden bis zu mehreren Jahrzehnten [33]. Darüber hinaus ist diese Klimawirkung nicht nur von der Emissionsmenge, sondern auch von Emissionsort, -zeit und atmosphärischen Umgebungsbedingungen abhängig [33, 34]. Die Bestimmung der Nicht-CO₂-Effekte unterliegt dabei deutlich größeren Unsicherheiten als bei CO₂-Effekten [32].

Insgesamt wird der Beitrag des Luftverkehrs zum gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb aktuell auf etwa 3,5 % geschätzt [32]. Verschiedene Vorhersageszenarien gehen von einer Zunahme dieses Anteils bis 2050 trotz des Verkehrseinbruchs in Folge der globalen COVID19-Pandemie aus [35]. Einerseits zeigen die Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte, dass sich der Kraftstoffverbrauch und die damit einhergehenden CO₂-Emissionen pro Passagierkilometer im Zeitraum von 2005 bis 2017 um mehr als 20 % reduziert haben. Das wurde im Wesentlichen durch die Verwendung von neuen und effizienteren Flugzeugtypen und -triebwerken sowie nachrangig auch durch die Einführung von nachhaltigem Treibstoff (*Sustainable aviation fuel, SAF*) erreicht [36, 37, 38]. Andererseits nahm der Luftverkehr im gleichen Zeitraum um etwa 60 % zu, sodass die Einsparungen durch verbesserte Effizienzen vom generellen Verkehrswachstum überkompensiert wurden [35, 37].

In diesem Kontext hat sich die ICAO 2019 zu CO₂-neutralem Wachstum und einer jährlich zunehmenden Kraftstoffeffizienz von 2 % verpflichtet [39]. Auch die Internationale Lufttransportvereinigung (*International Air Transport Association, IATA*) und die *Air Transport Action Group (ATAG)* haben sich zu den Zielen aus dem Pariser Abkommen verpflichtet und Netto-Null-Emissionen bis 2050 als Ziel ausgerufen [36, 40]. Während die Nicht-CO₂-Emissionen der Luftfahrt nicht im Pariser Abkommen adressiert wurden [26], definierte die Europäische Kommission im Jahr 2010 den „*Flightpath 2050*“ Ziele zur Re-

duktion der CO₂- und Stickoxid-Emissionen [12]. Im Jahr 2022 wurden diese europäischen Ziele mit „Fly the Green Deal“ um eine vollständige Klimaneutralität bis 2050 erweitert. Dabei sollen nicht nur die CO₂-Effekte, sondern auch die wärmenden Nicht-CO₂-Effekte im Luftverkehr umfassend berücksichtigt werden [41].

Nichtsdestotrotz werden die existierenden Richtlinien und Maßnahmen im Bereich der Luftfahrt derzeit als ungenügend eingeschätzt, um die Emissionsmengen ausreichend zu senken sowie das ambitionierte 2°-Ziel des Pariser Klimaabkommens einzuhalten. Grewe et al. (2021) gehen davon aus, dass die durch den Luftverkehr verursachte Temperaturänderung schon in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts den zulässigen Beitrag aus dem Pariser Abkommen übersteigen wird (vgl. Abb. 1.3), wenn nicht zügig weitere radikale Maßnahmen im technischen und betrieblichen Bereich umgesetzt werden [2].

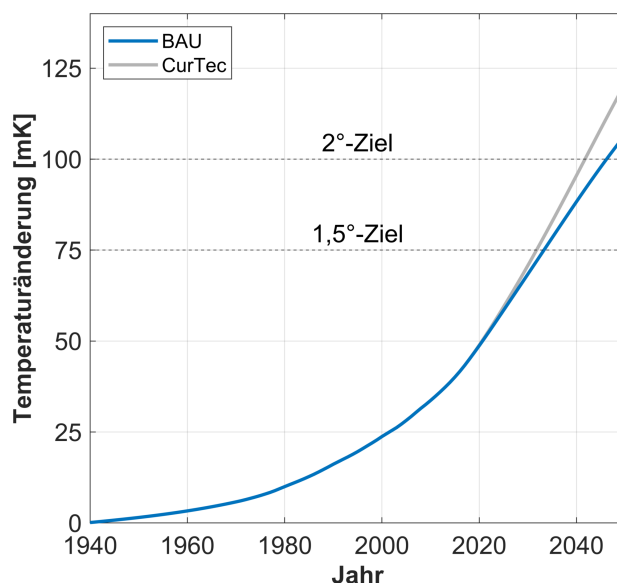


Abbildung 1.3: Globale Temperaturänderung durch den Luftverkehr im Vergleich zum 1,5°- bzw. 2°-Ziel für übliche Entwicklung (*Business as usual*, BAU) sowie mit heutiger Technologie (*Current technology*, CurTec) [eigene Darstellung nach 2].

Um die Klimawirkung des Luftverkehrs zu reduzieren, können verschiedene Einflussfaktoren durch Maßnahmen adressiert werden. Neben einer Reduktion der Emissionsmengen können auch Emissionsart, -ort und -zeit modifiziert und dadurch eine Änderung der Klimawirkung erzielt werden. Neben einer solchen unmittelbaren Einflussnahme kann der Effekt auch indirekt durch eine Kompensation in anderen Bereichen erreicht werden (vgl. Abb. 1.4). In diesem Kontext haben sich eine Vielzahl von Innovationen und Verbesserungsansätzen entwickelt, die sich in technische und betriebliche Ansätze wie folgt kategorisieren lassen: **Technische Weiterentwicklungen** von Flugzeugen und Triebwerken dienen der Reduktion von Kraftstoffverbrauch, Emissionen und damit der resultierenden Klimawirkung, z. B. durch Gewichtseinsparungen, effizientere Triebwerke und neue Antriebstechnologien wie elektrische, hybride oder Wasserstoff-Antriebe [36, 42, 43]. Der **Einsatz von SAF** nimmt eine Sonderrolle im Bereich der neuen Antriebskonzepte ein, da diese Kraftstoffe auch mit der existierenden Weltflotte genutzt und konventionellem Treibstoff zugemischt werden können. Damit wird während des Reiseflugs zwar wie bei konventionellem Treibstoff CO₂ emittiert, die Emissionen aber bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus reduziert. Durch die Erzeugung von SAF aus Biomasse oder durch strombasierte Verfah-

ren werden bei der Verbrennung im Triebwerk nur die CO₂-Emissionen freigesetzt, die zuvor der Atmosphäre entzogen wurden. Darüber hinaus können durch den Einsatz von SAF auch die Emissionen von Spezies wie Schwefeldioxid und Feststoffteilchen (*Particulate matters*, *PM*) reduziert und damit Einfluss auf die Bildung und Klimawirkung von Kondensstreifen genommen werden [36, 44, 45]. **Betriebliche Verbesserungen** können durch Fluggesellschaften, Flughäfen und im Luftverkehrsmanagement implementiert werden. Diese Ansätze zielen darauf ab, die operationelle Effizienz zu erhöhen oder die Klimawirkung der Emissionen durch veränderte Betriebsverfahren zu reduzieren. Dabei kann beispielsweise die Reduktion der Emissionsmenge durch höhere Kraftstoffeffizienz im Rahmen von effizienteren Routen oder eine Verringerung der Klimawirkung durch veränderten Ort und Zeitpunkt der Emissionen erzielt werden [36, 42, 43].

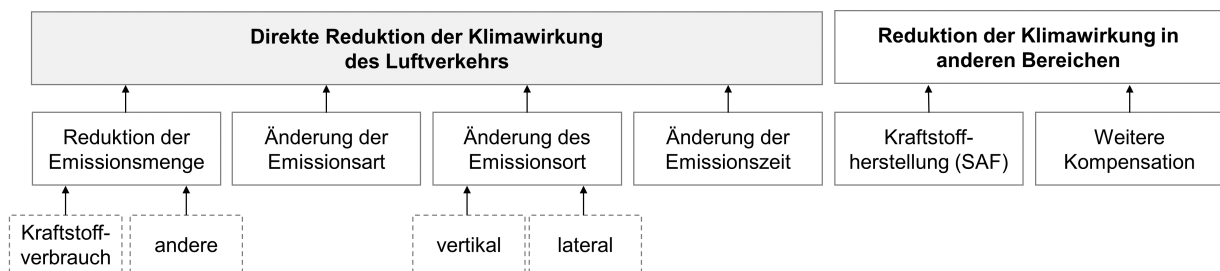


Abbildung 1.4: Ansatzpunkte zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs.

Eine Umsetzung der zuvor genannten Maßnahmen kann durch **marktbasierte oder regulatorische Ansätze** motiviert werden. Durch das Etablieren von Emissionshandelsystemen wie dem Emissionshandelssystem der Europäischen Union (EU), dem EU ETS (*EU Emission Trading System*), oder CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA*), dem globalen Ansatz der ICAO, sind für CO₂-Emissionen entsprechende Zertifikate vorgesehen, die erworben werden müssen, am Markt gehandelt werden können und somit für einen finanziellen Ausgleich sorgen [37, 46]. Weitere regulatorische Maßnahmen, wie die Verpflichtung zur Teilnahme am Emissionshandel oder strengere Zertifizierungsrichtlinien, die z. B. technische Verbesserungen notwendig machen, können ebenfalls die Umsetzung technischer oder betrieblicher Maßnahmen erzwingen [42, 47].

Die Implementierung von betrieblichen Ansätzen ist insbesondere durch ihre schnelle Umsetzbarkeit im Vergleich zu technologischen Ansätzen und die Möglichkeit zur Reduktion von Nicht-CO₂-Effekten vorteilhaft. Während radikale technische Maßnahmen, wie neue Antriebstechnologien z. B. mit Wasserstoff oder elektrischer Energie, oder ein flächendeckender Einsatz von SAF erst in den nächsten Jahrzehnten und im Falle innovativer Antriebe auf der Langstrecke frühestens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts realistisch sind [13, 44], können operationelle Maßnahmen von kurzen Entwicklungs- und Einführungszeiten profitieren. Diese Maßnahmen können mit der aktuellen Weltflotte umgesetzt werden und somit unmittelbar zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs beitragen. Im Gegensatz dazu gehen technische Verbesserungen mit der langfristigen Entwicklung neuer Flugzeugtypen einher. So sagt Airbus für 2040 zwar überwiegend Auslieferungen von effizienteren Flugzeugen neuer Generationen voraus (z. B. A320neo, A350), radikal erneuerte Antriebstechnologien sind in diesen Vorhersagen aber bisher nicht vorgesehen [10]. Zusätzlich limitiert die älter werdende Weltflotte mit verlängerten Produktlebenszeiten und späteren Außerdienststellungen [48] die zügige Realisierung technischer Verbesserun-

gen. Analysen zu verschiedenen Szenarien von ATAG und ICAO gehen davon aus, dass bis 2050 insbesondere der Einsatz von SAF (50 bis 70 % der Reduktion) sowie technologische Maßnahmen (10 bis 30 %) einen Großteil der CO₂-Emissionen reduzieren, während operationelle Ansätze insbesondere in den Jahren bis etwa 2035 eine wichtige Rolle einnehmen werden [36, 40].

Darüber hinaus zielen technologische Ansätze primär auf eine Erhöhung der Kraftstoffeffizienz sowie der Einsatz von SAF auf eine Vermeidung von Netto-CO₂-Emissionen ab. Die Reduktion von Nicht-CO₂-Effekte ist dabei häufig nicht das primäre Ziel [35, 49]. So können neuere Strahltriebwerke mit höherer Antriebseffizienz beispielsweise schon bei geringeren Temperaturen zur Bildung von klimawirksamen Kondensstreifen führen, deren wärmen-der Effekt die Reduktion anderer Emissionsspezies übersteigen kann [50]. Folglich ist eine Implementierung von operationellen Verbesserungen, welche auch die Nicht-CO₂-Effekte adressieren, sowohl kurz- als auch mittelfristig und in Kombination mit neuen Technologiekonzepten relevant.

1.2 Forschungskontext

Im Wesentlichen lässt sich die Reduktion der Klimawirkung durch operationelle Ansätze in drei Kategorien einteilen (vgl. Abb. 1.4):

- (1) Durch veränderte Betriebsverfahren kann die **Emissionsmenge** reduziert werden, indem beispielsweise die Kraftstoffeffizienz erhöht wird.
- (2) Durch eine Veränderung des horizontalen oder lateralen **Emissionsorts** kann die Wirkung der Emissionen verringert werden, falls diese in weniger klimasensitiven Regionen freigesetzt werden.
- (3) Durch die Änderung der **Emissionszeit** können zeitliche Zusammenhänge, wie beispielsweise Sättigungseffekte oder tageszeitabhängige Effekte, genutzt werden.

Der aktuelle Stand der Forschung umfasst eine Vielzahl an Studien zu betrieblichen Verbesserungsansätzen, die auf eine Erhöhung der Kraftstoffeffizienz und damit auch auf eine Reduktion der Klimawirkung durch verringerte Emissionsmengen abzielen. Dabei steht meist die Wirkung der CO₂-Emissionen im Fokus, welche direkt vom Kraftstoffverbrauch abhängt. In diesem Zuge sind beispielsweise die Reduktion der Flugzeugmasse durch veränderte Tankverfahren wie den Mehrstufenbetrieb (*Intermediate stop operations, ISO*) [51, 52] oder Luftbetankung [53, 54] untersucht worden. Auch Effizienzverbesserungen durch direkte Routenführung [55] oder windoptimale Flugplanung können zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs beitragen [56, 57]. Des Weiteren können innovative Betriebskonzepte, wie der Formationsflug durch reduzierten Schubbedarf, den Kraftstoffverbrauch verringern [58, 59].

Nichtsdestotrotz geht die Umsetzung solcher Maßnahmen zur Effizienzsteigerung nicht notwendigerweise mit einer Reduktion der Gesamtklimawirkung einher, da eine Reduktion von CO₂-Effekten durch die Wirkung von Nicht-CO₂-Effekten überkompensiert werden kann. Das kann beispielsweise durch längeres Durchfliegen von Gebieten höherer Klimasensitivität hervorgerufen werden [52, 60]. Alternativ werden deshalb auch solche Maßnahmen untersucht, die durch Veränderung von Höhe, Position oder Zeitpunkt der Emission auf eine Reduktion der Klimawirkung durch Nicht-CO₂-Effekte abzielen. Hierzu zählt beispielsweise die Reduktion der Flughöhe [60, 61] sowie die Vermeidung von Kondensstreifengebieten durch eine veränderte Routenführung [62]. In diesem Kontext haben sich

auch Ansätze entwickelt, die auf eine Minimierung der Gesamtklimawirkung aus CO₂- und Nicht-CO₂-Effekten durch klimaoptimierte Trajektorien abzielen [63, 64]. Kombinationen aus kraftstoff- und klimaeffizienten Maßnahmen stellen darüber hinaus einen Kompromiss aus ökonomischen und ökologischen Interessen dar. So trägt der Formationsflug beispielsweise nicht nur zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch bei, sondern kann durch gezielte Nutzung von Sättigungseffekten u. a. auch den Einfluss von Kondensstreifen reduzieren [58].

Solche Verbesserungsansätze werden in der Literatur meist individuell analysiert, da je nach Maßnahme unterschiedliche Annahmen bezüglich der zugrunde liegenden Stichprobe sowie der Methodik zur Bewertung des Mitigationspotentials getroffen werden. Diese unterschiedlichen Annahmen können wie folgt strukturiert werden:

- (1) **Definition des Referenzfalls:** Die betrachteten Luftverkehrsszenarien, welche für die Maßnahmenimplementierung untersucht werden, können sich folgendermaßen unterscheiden:
 - a. **Geografischer Umfang:** Existierende Studien legen den Fokus auf bestimmte geografische Regionen (z. B. den Nordatlantik, Europa, ein bestimmtes Land, oder ausgewählte Flughafenkombinationen) oder die Analyse des globalen Luftverkehrs. In diesem Zuge variiert auch die Anzahl der Flüge, die innerhalb der verschiedenen Studien betrachtet werden [58, 62, 63, 65].
 - b. **Zeitlicher Umfang:** Die Betrachtung kann in die Analyse einzelner Tage mit spezifischen Wetterlagen oder die Betrachtung größerer Zeiträume (z. B. ein Kalenderjahr) unterteilt werden. Dies beeinflusst üblicherweise auch, inwiefern detaillierte meteorologische Randbedingungen berücksichtigt werden [66, 67].
 - c. **Weitere Einschränkungen des Flugplans:** Je nach Studienfokus finden sich in der Literatur weitere Restriktionen des Referenzfalls, z. B. bezüglich des betrachteten Flugzeugtyps oder der Missionslänge sowie ein möglicher Fokus auf besonders relevante Flüge [51, 64, 65, 68].
- (2) **Bewertungsmethodik:** Der Modellierungsansatz unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Studien hinsichtlich der getroffenen Annahmen (z. B. Berücksichtigung von tatsächlicher Routenführung), der Berechnung der Flugleistungsparameter sowie der Emissionen und der Klimawirkung.
- (3) **Ergebnisdarstellung:** Zum einen werden unterschiedliche Klimametriken und Kennzahlen zur Quantifizierung der Klimawirkung herangezogen (u. a. Emissionsmengen, RF oder Temperatur), deren Veränderung über unterschiedliche Zeithorizonte (z. B. 20 oder 100 Jahre) und in verschiedenen Emissionsszenarien untersucht wird [32, 69, 70, 71, 72]. Zum anderen unterscheidet sich die Ergebnisdarstellung, indem entweder die maximalen Reduktionspotentiale einer Maßnahme hinsichtlich der Klimawirkung bestimmt werden oder diese direkt zu Nicht-Klima-Kennzahlen, wie Veränderungen in den Betriebskosten, ins Verhältnis gesetzt werden [52, 63].

Die Ergebnisse von maßnahmenindividuellen Studien können aufgrund dieser unterschiedlichen Annahmen häufig nicht direkt miteinander verglichen werden, um besonders geeignete Maßnahmen auszuwählen. Das ist allerdings notwendig, um eine sinnvolle Implementierung von betrieblichen Ansätzen und die damit einhergehende Reduktion der Klimawirkung zu ermöglichen. Aus regulatorischer Perspektive bildet ein solcher Vergleich

der Reduktionspotentiale die Basis für die Entwicklung sinnvoller Regelungen und Richtlinien zur Erreichung der definierten Klimaziele. Insbesondere im Zuge der europäischen Ziele, die auf Klimaneutralität von CO₂- und Nicht-CO₂-Effekten abzielen, ist eine umfassende Bewertung der Klimawirkung, welche über den Kraftstoffverbrauch und die damit einhergehenden Effekte von CO₂-Emissionen hinausgeht, notwendig. Aus betrieblicher Perspektive ist es wichtig, die Effizienz der verschiedenen Maßnahmen und deren Auswirkungen auf den Luftverkehr vergleichen und somit passende Maßnahmen umsetzen zu können.

Existierende Ansätze zum Vergleich verschiedener Maßnahmen des Luftverkehrs in der Literatur beschränken sich aktuell auf wenige Studien. Bisherige Analysen fokussieren den Vergleich häufig auf wenige ähnliche Maßnahmen. Dabei ist der direkte Maßnahmenvergleich meist nicht das übergeordnete Ziel. Stattdessen werden existierende Ansätze durch weitere Freiheitsgrade erweitert, um so zusätzliche Potentiale erreichen zu können. Der direkte Vergleich verschiedener Ansätze ist in diesen Studien aufgrund identischer Referenzfälle und Methodiken möglich [65, 68]. Umfassende quantitative Vergleiche sind bisher im Wesentlichen für technische Weiterentwicklungen hinsichtlich Kraftstoffverbrauch, Emissionsmenge und Lärmbelastung [73] sowie Klimawirkung [70] durchgeführt worden. Die Erweiterung der Betrachtung um betriebliche Maßnahmen erfolgt unter anderem bei Green (2006) und Langhans et al. (2013), verbleibt aber qualitativ [53, 74]. Im Rahmen des DLR-Projektes WeCare wurde das Klimawirkungsminderungspotential für verschiedene technische sowie betriebliche Maßnahmen quantifiziert und den Aufwänden zur Umsetzung der Maßnahmen gegenübergestellt [75]. Als Bewertungskriterien wurden u. a. die Reduktion der Klimawirkung, die Veränderung von Betriebskosten oder der frühestmögliche Implementierungszeitpunkt herangezogen. Allerdings konnte in diesem Kontext keine besonders effiziente Maßnahme identifiziert werden, da durch unterschiedliche Rahmenbedingungen kein direkter Vergleich möglich war. Dies folgte u. a. aus unterschiedliche Investitionskosten und Implementierungszeiträumen. Ein Vergleich der Vor- und Nachteile der verschiedenen Maßnahmen über die ausgewählten Kriterien verbleibt folglich qualitativ [76, 75].

Dem aktuellen Stand der Forschung fehlt aktuell somit eine Gegenüberstellung von mehr als zwei betrieblichen Maßnahmen auf Basis vergleichbarer Annahmen und Randbedingungen. Dies ist der Ansatzpunkt des EU-Horizon-2020-Projekts ClimOP (*Climate assessment of innovative mitigation strategies towards operational improvements in aviation*), welches verschiedene betriebliche Mitigationsmaßnahmen analysiert (vgl. Anhang A). Übergeordnetes Ziel ist im Anschluss an eine Klimabewertung einen Vergleich der verschiedenen betrieblichen Verbesserungen durch identische Randbedingungen und Annahmen. Auf dieser Basis werden schließlich Empfehlungen für Regularien und Richtlinien entwickelt, welche die Umsetzung von vielversprechenden Maßnahmen befördern sollen. Dabei werden auch die Auswirkungen auf das Lufttransportsystem (z. B. ökonomische Konsequenzen für Airlines und Präferenzen der Passagiere) analysiert. Die verschiedenen Partner untersuchen dabei sowohl flugspezifische als auch bodenbezogene Maßnahmen [77]. Der Inhalt der vorliegenden Arbeit stützt sich wesentlich auf Arbeiten im Kontext des ClimOP-Projekts.

1.3 Ziel und Struktur der Arbeit

Die dargestellte Forschungslücke zur quantitativen Gegenüberstellung einer Vielzahl von betrieblichen Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung bildet den Ansatzpunkt dieser Arbeit. Auf Basis des breiten Spektrums an bereits existierenden Studien zur Bewertung von betrieblichen Verbesserungsansätzen gilt es, eine Vergleichsmethodik zu entwickeln, um

besonders geeignete Ansätze zur Mitigation der Klimawirkung im Luftverkehr identifizieren zu können. Dafür werden die folgenden Teilziele angestrebt:

- (1) **Strukturierung der existierenden Ansätze in der Literatur hinsichtlich operationeller Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs und Systematisierung der jeweils zugrundeliegenden Annahmen und Bewertungsansätze.** Infolge dessen werden besonders interessante Maßnahmen und relevante Randbedingungen für die folgenden Untersuchungen identifiziert.
- (2) **Entwicklung einer validierten Methodik zum Vergleich verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs.** Die Vergleichsmethodik soll sowohl unterschiedliche Definitionen des Referenzfalls (geografisch, zeitlich, flugplanspezifisch) als auch der ausgewählten Metriken und Modellierungsannahmen berücksichtigen. Eine Anwendbarkeit für weitere Maßnahmen, die im Folgenden nicht näher betrachtet werden, ist sicherzustellen.
- (3) **Anwendung der entwickelten Methodik zur Beantwortung der folgenden Forschungsfragen:**
 - Welche betrieblichen Verbesserungen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs sind besonders effektiv bzw. effizient?
 - Welches Mitigationspotential kann durch die Umsetzung von umfassenden betrieblichen Maßnahmen im Luftverkehr realisiert werden?

Hierfür werden im Anschluss an diese Einleitung die Grundlagen zur Nachhaltigkeit und Klimawirkung des Luftverkehrs sowie betriebliche Aspekte des Luftverkehrssystems dargestellt (Kapitel 2). Kapitel 3 gibt anschließend einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf bereits untersuchte Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs sowie existierende Studien und Ansätze zum Vergleich individueller Maßnahmen. In diesem Kontext wird eine strukturierte Literaturübersicht zu bisherigen Bewertungsstudien, welche die Mitigationspotentiale verschiedener betrieblicher Maßnahmen analysiert haben, erstellt und die verwendeten Modelle und Verfahren werden systematisiert. Anschließend wird die Methodik zur Maßnahmenbewertung und zum Vergleich hergeleitet und validiert (Kapitel 4), bevor die entwickelte Modellkette in Kapitel 5 zur Anwendung kommt. Hierbei wird zunächst die Implementierung des Experiments hinsichtlich Referenzfall und Auswahl der zu untersuchenden Maßnahmen definiert. Darauf folgt die Analyse maßnahmenindividueller Mitigationspotentiale, bevor diese einander gegenübergestellt werden. Letztlich werden die Ergebnisse in Kapitel 6 hinsichtlich der Erreichung der Forschungsziele zusammengefasst und diskutiert. Eine Übersicht über die Struktur dieser Arbeit ist in Abbildung 1.5 dargestellt.

Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

Diese Arbeit beschränkt sich auf operationelle Maßnahmen, die darauf abzielen, die Klimawirkung während des Fluges zu reduzieren. Operationelle Maßnahmen werden gem. ICAO als solche definiert, die das Fliegen, die Steuerung und das Überwachen von Flugzeugen durch das Luftverkehrsmanagementsystem (*Air traffic management, ATM*) sowie die Durchführung verschiedenster Aktivitäten am Flughafen betreffen [78]. In Abgrenzung zu technischen Maßnahmen, welche im Folgenden nicht näher betrachtet werden, ist keine Einführung neuer Ausrüstung oder Technologien notwendig. Stattdessen können die



Abbildung 1.5: Struktur der Arbeit.

Maßnahmen mit Flugzeugen, die bereits im Dienst sind, etabliert werden. Darüber hinaus bedeutet der Fokus auf die Klimawirkung während des Fluges, dass bodengebundene Maßnahmen wie innovative Schleppkonzepte oder Verbesserungen der Flughafeninfrastruktur unberücksichtigt bleiben.

Darüber hinaus werden die Auswirkungen auf die Stakeholder außerhalb des direkten Betriebs der Flugzeuge bewusst ausgeklammert. Netzwerk- und Flotteneffekte sowie Auswirkungen auf die Flughafen- und Luftrauminfrastruktur werden nicht quantitativ berücksichtigt. Der Fokus liegt außerdem auf dem Passagiertransport, sodass Fracht- und militärische Lufttransportkonzepte nicht betrachtet werden. Gleiches gilt für Maßnahmen, welche sich mit einem Wechsel des Transportmodus (z. B. auf den Schienenverkehr) befassen oder eine generelle Reduktion des Luftverkehrs anstreben.

Im Rahmen der Analyse wird der Fokus auf die Klimawirkung, das heißt die Beschreibung der Veränderungen des globalen Strahlungsantriebs sowie der oberflächennahen Temperatur, gelegt. Lokale Effekte wie Lärm und lokale Luftqualität (*Local air quality, LAQ*) werden nicht weiter betrachtet.

2 Grundlagen: Luftverkehr und Klima

Die Motivation dieser Arbeit basiert auf dem Beitrag des Luftverkehrs zum anthropogenen Klimawandel, welcher im Widerspruch zu den definierten globalen Nachhaltigkeitszielen steht. Im folgenden Kapitel werden die relevanten wissenschaftlichen Grundlagen zusammengefasst: Zunächst wird dafür der Begriff der Nachhaltigkeit erläutert und eine Übersicht über die relevanten Aspekte im Luftverkehr gegeben (Kapitel 2.1), bevor der Bezug zur ökologischen Nachhaltigkeit durch den Treibhauseffekt und den resultierenden Klimawandel hergestellt wird (Kapitel 2.2). Anschließend werden die Emissionen des Luftverkehrs und deren Klimawirkung erläutert (Kapitel 2.3) und verschiedene Metriken zur Bewertung der Klimawirkung vorgestellt (Kapitel 2.4). Des Weiteren werden die betrieblichen Charakteristika des Luftverkehrssystems zusammengefasst (Kapitel 2.5). Abschließend werden die relevanten Grundlagen, die den Ausgangspunkt dieser Arbeit definieren, in einem Zwischenfazit zusammengefasst (Kapitel 2.6).

2.1 Nachhaltigkeit

Nachhaltige Entwicklung (*Sustainable development*) wird im Brundtland-Bericht 1987 erstmals definiert und als Entwicklung bezeichnet, die „die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse befriedigen können“ [79, 80, 81]. In diesen Kontext werden neben der globalen Orientierung auch die intra- und intergenerationelle Gerechtigkeit eingeführt. Nachhaltigkeit kann so u.a. durch Effizienzsteigerungen, eine Reduktion des Bevölkerungswachstums, eine Nord-Süd-Umverteilung sowie nachhaltiges Wirtschaftswachstum angestrebt werden [81]. Obwohl die ökologische Nachhaltigkeit als Lebens- und Wirtschaftsgrundlage bei vielen Nachhaltigkeitskonzepten im Vordergrund steht und damit den Widerspruch zwischen kurz- und langfristigen Zielen thematisiert, sind auch die ökonomischen und sozialen Aspekte relevant und werden im sogenannten Drei-Dimensionen-Modell der Nachhaltigkeit zusammengeführt [81, 82]. Auf dieser Basis wird der Umweltschutz auch als wesentlicher Bestandteil von wirtschaftlicher und sozialer Entwicklung angesehen [83, 84, 85]. Mögliche Strukturen des Drei-Dimensionen-Modells der Nachhaltigkeit sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

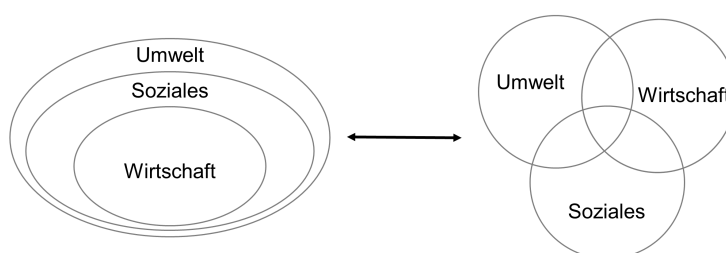


Abbildung 2.1: Nachhaltigkeitsdimensionen [eigene Darstellung nach 83].

Im Jahr 2015 wurden durch die UN 17 nachhaltige Entwicklungsziele (*Sustainable development goals, SDGs*), auch als globale Ziele (*Global goals*) bezeichnet, verabschiedet, welche bis 2030 neben dem Schutz des Planeten ein globales Leben in Frieden und Wohlstand ermöglichen sollen. Zu diesen Zielen zählen unter anderem Geschlechtergerechtigkeit, nachhaltige Städte und Gemeinschaften, das Ende von Armut, verantwortungsvoller Konsum und Produktion sowie die Bekämpfung des Klimawandels [86].

Nachhaltigkeit im Luftverkehr

Dem Luftverkehr kommt mit seiner elementaren Bedeutung für die globale Wirtschaft und der Bedeutung für die internationale Zusammenarbeit sowie den assoziierten ökologischen Auswirkungen eine zentrale Rolle im Bereich nachhaltiger Entwicklung zu. Allerdings fehlt bisher eine abgestimmte Nachhaltigkeitsdefinition für den Luftverkehrssektor [87]. Viele der definierten SDGs betreffen auch die Luftfahrtindustrie und ihre Stakeholder, wie z. B. Flugzeug- und Triebwerkshersteller sowie die betreibenden Luftverkehrsgesellschaften [88]. Einerseits trägt die Luftfahrtindustrie direkt oder indirekt zur Erreichung von 15 der 17 SDGs bei, z. B. durch den Aufbau resilienter Infrastrukturen, die Förderung von Innovationen, den Beitrag zum weltweiten Handel sowie die Bereitstellung von Beschäftigung und den entsprechenden Ausbildungen [88, 89]. In diesem Zuge hat sich auch die ICAO zu den SDGs der UN verpflichtet und widmet sich dem Beitrag der Luftfahrt zu den entsprechenden Zielen mit dem Fokus auf die Weiterentwicklung und Innovationen im Transportbereich [90]. Andererseits wird durch den Verbrauch von Ressourcen und die Emission von Treibhausgasen, gesundheitsschädlichen Partikeln und Lärm die Umwelt negativ beeinflusst [88, 28, 30].

Verschiedene Aspekte der Nachhaltigkeit in der Luftfahrtindustrie lassen sich entlang des Lebenszyklus charakterisieren. In der Entwicklungs- und Produktionsphase wird durch ökonomische und personelle Ressourcen sowie Rohstoffe und Energie das Flugzeug als Produkt bereitgestellt. In diesen Phasen werden nach Schäfer (2017) einerseits nur sehr geringe Mengen an Emissionen, Lärm und Kosten verursacht. Andererseits werden insbesondere in der Entwicklungsphase die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen entlang des Lebenszyklus bestimmt [87]. In der anschließenden Betriebsphase werden durch den Betrieb des Flugzeugs im Luftverkehrssystem ein Großteil der Kosten (96,6 % der Gesamtkosten) und der ökologischen Auswirkungen (99,6 % der Emissionen) verursacht [87]. Die Emissionen wirken dabei nicht nur als Treibhausgase (*Greenhouse gases, GHG*) auf das Klima, sondern auch im Flughafennahbereich, beispielsweise im Falle von Stickoxiden und Partikeln, auf die menschliche Gesundheit, was mit dem Begriff lokale Luftqualität (*Local air quality, LAQ*) beschrieben wird. Darüber hinaus wirken die Lärmemissionen ebenfalls auf die Umwelt sowie die menschliche Gesundheit. Zum Lebensende des Produkts (*End of life, EOL*) ist insbesondere der Aspekt Recycling und Wiederverwertung im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft (*Circular economy*) relevant und nimmt so wiederum Einfluss auf die Nachhaltigkeit in der Produktionsphase.

Eine integrierte Betrachtung aller Phasen des Lebenszyklus (*Life cycle assessment, LCA*) ist somit u.a. im Zuge der Verwendung von neuen Materialien wie Verbundwerkstoffen (*Composites*), batterieelektrischen Antrieben oder alternativen Kraftstoffen relevant [vgl. 91, 92, 93]. Diese neuen Technologien helfen zwar, Emissionen und die resultierende Klimawirkung im Betrieb zu reduzieren, erhöhen andererseits aber die Umweltwirkungen in anderen Phasen des Lebenszyklus u. a. durch veränderte Materialgewinnung und Energieflüsse [91]. So sind elektrische Flugzeuge beispielsweise im Betrieb sowohl ökologisch als auch ökonomisch nachhaltiger. Ökologisch folgt das aus der Reduktion der Emissionen während des Betriebs, ökonomisch reduzieren sich sowohl die Wartungsaufwände als auch die Kosten für die Energie, die zum Antrieb benötigt wird. Dem gegenüber steht die aufwändigere Herstellung und das Recycling solcher Flugzeuge. Außerdem erfolgt die Gewinnung der Rohstoffe für die Batterieherstellung zum Teil unter hohen Risiken und kritischen Arbeitsbedingungen mit negativen Implikationen für soziale Aspekte der Nachhaltigkeit. Des Weiteren konkurriert der Anbau von geeigneten Rohstoffen für die Produktion von biologischen Kraftstoffen mit der von Nahrungsmitteln [94, 95, 91], sodass soziale

Nachhaltigkeitsaspekte beeinflusst werden.

Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus zeigt, dass die Nachhaltigkeit von Produkten auch durch deren Lebenszeit beeinflusst wird. Glöser-Chahoud et al. (2021) untersuchen das beispielhaft für ausgewählte Konsumgüter und zeigen, dass nicht notwendigerweise ein früher Austausch von Produkten durch effizientere Nachfolger den Beitrag zur globalen Erwärmung reduziert [96]. Stattdessen können längere Lebenszeiten für eine Vielzahl von Produkten die ökologische Nachhaltigkeit erhöhen [96, 97]. Im Gegensatz zu anderen Industrien, z. B. im Bereich von Konsumgütern oder dem Straßenverkehr, sind die Lebenszyklen in der Luftfahrt mit mehreren Jahrzehnten für Flugzeuge sehr lang, was nicht nur die zügige Erneuerung der Flotte mit effizienteren Technologien erschwert, sondern auch weitere Emissionen impliziert, bevor radikale Innovationen realisiert werden können [91, 98]. Die Kombination aus langen Lebenszyklen und den hohen Emissionen im Betrieb gegenüber der Produktion unterstreicht folglich die Bedeutung von betrieblichen Maßnahmen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit im Luftverkehr.

2.2 Treibhauseffekt und Klimawandel

Im Kontext der ökologischen Nachhaltigkeit nehmen die Auswirkungen von anthropogenen Emissionen auf das Klima eine zentrale Rolle ein. Verschiedene GHG, die beispielsweise durch den Transport von Gütern und Dienstleistungen, oder in Produktionsprozessen entstehen, werden in die Atmosphäre freigesetzt. Dadurch ändert sich die Zusammensetzung der Erdatmosphäre, welche hauptsächlich aus den Gasen Stickstoff (N_2 , 78,1 %), Sauerstoff (O_2 , 20,9 %) und Argon (Ar, 0,9 %), besteht. Diese Gase interagieren nur sehr begrenzt mit der einfallenden solaren kurzwelligen Strahlung und wirken nicht auf die ausgehende terrestrische langwellige Strahlung. Im Gegensatz dazu haben verschiedene Spurengase in der Atmosphäre, wie Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Wasserdampf (H_2O) oder Ozon (O_3) signifikante Auswirkungen auf die Strahlungsbilanz, indem sie die langwellige terrestrische Strahlung sowie teilweise kurzwellige solare Strahlung absorbieren und gleichzeitig langwellige terrestrische Strahlung reflektieren und somit die Energiebilanz der Atmosphäre beeinflussen und zur Erwärmung beitragen [99]. Seit der industriellen Revolution (um 1850) ist der Anteil dieser Treibhausgase in der Atmosphäre stark angestiegen. Zum Beispiel hat sich die Menge an CO_2 in der Atmosphäre um mehr als 30 % und die Menge an troposphärischem Ozon um mehr als 40 % gegenüber der vorindustriellen Zeit erhöht und steigt weiter an [99].

Das beeinflusst den Strahlungsantrieb (*Radiative forcing, RF*) und führt somit zu einer Veränderung des Klimas. Die Konsequenzen zeigen sich in allen Komponenten des Klimasystems, u. a. durch die Erwärmung von Atmosphäre und Ozeanen, einen Rückgang von Schnee- und Eisflächen, den Anstieg des Meeresspiegels und eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts der Ozeane [19]. Darüber hinaus gehören zu den Klimaveränderungen auch Veränderungen von Niederschlägen und die Mehrung von Extremwetterlagen, wie häufigere Starkniederschlagsereignisse oder verstärkte kontinentale Sommertrockenheit und das damit verbundene Dürreerisiko [99]. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die aktuellen Entwicklungen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu einer deutlichen Überschreitung des 1,5°-Ziels des Pariser Klimaabkommens führen [100].

Daraus folgen wiederum eine Veränderung der Ökosysteme sowie Auswirkungen auf soziale Systeme. So führen vermehrte Trockenheiten und die daraus resultierende Nahrungsmittelknappheit in bestimmten Regionen beispielsweise zu größeren Fluchtbewegungen. Aus dem Anstieg des Meeresspiegels folgt unter anderem, dass bestimmte Regionen ohne

weitere Anpassungsmaßnahmen unbewohnbar werden. Damit werden enorme Investitionen notwendig, um die Konsequenzen des Klimawandels und dessen Schäden für die Weltgemeinschaft abzuwenden. Die entsprechende Wirkungskette ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

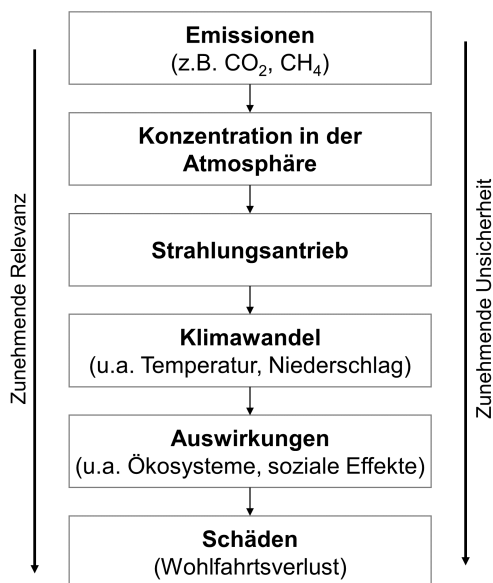
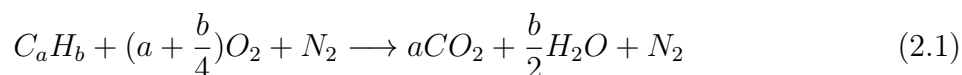


Abbildung 2.2: Ursache-Wirkungs-Beziehung von Emissionen bis zum Klimawandel und den verursachten Schäden [eigene Darstellung nach 20].

2.3 Emissionen des Luftverkehrs und deren Wirkung

Durch die Verbrennung von Kerosin (C_aH_b ¹) in konventionellen Flugzeugtriebwerken werden verschiedene Reaktionsprodukte in die Atmosphäre emittiert. Geht man von einer idealen stöchiometrischen Oxidation (vgl. Gleichung 2.1) mit atmosphärischem Sauerstoff und Stickstoff aus, entstehen je Kilogramm *JET A-1* Flugkerosin ca. 3,16 kg CO_2 und 1,23 kg H_2O als Reaktionsprodukte (vgl. Tabelle 2.1) [33]. In der Realität entstehen durch die sehr hohen Temperaturen in der Brennkammer und die nicht vollständige Durchmischung des Brennstoff-Luft-Gemisches Nebenprodukte wie Stickoxide (NO und NO_2 , zusammengefasst zu NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (*hydrocarbons*, HC), Ruß sowie Schwefeloxide (SO_x , insbesondere SO_2) durch den Schwefelgehalt im Kraftstoff (vgl. Gleichung 2.2).

Ideale Verbrennung:



Reale unvollständige Verbrennung:



Obwohl die Emissionsmengen der Nebenprodukte wie NO_x oder Ruß (vgl. Tabelle 2.1) deutlich unter denen der primären Oxidationsprodukte liegen, haben diese eine signifikante Wirkung auf das Klima [33, 32].

¹je nach Quelle etwa $C_{12}H_{23}$ [101]

	Emissionsindex	Referenz
CO₂	3,16 kg/kg Kraftstoff	ICAO (2018) [102]
H₂O	1,23 kg/kg Kraftstoff	Barrett et al. (2010) [103]
NO_x	15,14 g/kg Kraftstoff	Fleming & Ziegler (2016) [104]
	14,12 g/kg Kraftstoff	Barrett et al. (2010) [103]
Ruß	0,03 g/kg Kraftstoff	Barrett et al. (2010) [103]
SO₂	1,2 g/kg Kraftstoff	Miller et al. (2010) [105]
CO	3 g/kg Kraftstoff	Kim et al. (2007) [106]
HC	0,4 g/kg Kraftstoff	Kim et al. (2007) [106]

Tabelle 2.1: Emissionsindizes pro Kilogramm verbranntem Kraftstoff [32, 33].

Die emittierten Reaktionsprodukte beeinflussen durch unterschiedliche Effekte den globalen Strahlungsantrieb und somit die globale Oberflächentemperatur. Die Wirkmechanismen, die sich im Wesentlichen in den direkten und den indirekten Treibhausgaseffekt sowie den direkten Aerosoleffekt und den (indirekten) Wolkeneffekt kategorisieren lassen, sind in Abbildung 2.5 schematisch den verschiedenen Emissionsspezies zugeordnet.

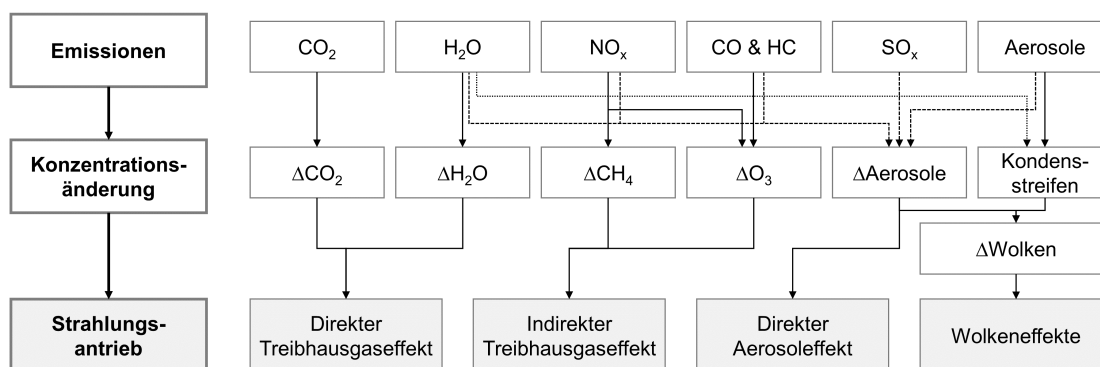


Abbildung 2.3: Direkte und indirekte Wirkung der Luftverkehrsemissionen auf den Strahlungsantrieb [eigene Darstellung nach 107, 108].

Die Wirkung der Nicht-CO₂-Emissionen im Luftverkehr unterscheidet sich signifikant von der Wirkung anderer Transportmodi oder Industriesektoren, da die Emissionen des konventionellen Unterschallluftverkehrs üblicherweise in der oberen Troposphäre bzw. der unteren Stratosphäre (*upper troposphere/lower stratosphere, UTLS*) freigesetzt werden. Gleichzeitig variiert die räumliche und zeitliche Verteilung von atmosphärischen Störungen durch Nicht-CO₂-Emissionen der Luftfahrt stark. So wirken Kondensstreifen nur sehr lokal entlang der Flugtrajektorie, während induzierte Änderungen der Methankonzentration Auswirkungen auf globaler Skala haben. Zeitlich wirken Kondensstreifen bis zu wenige Stunden nach ihrer Bildung, wohingegen Aerosole und Ozonkonzentrationsänderungen durch NO_x-Emissionen wenige Tage bis mehrere Monate in der Atmosphäre wirken und die Veränderungen der Methankonzentration über mehrere Jahre andauern [107]. Ebenso unterscheidet sich das aktuelle wissenschaftliche Verständnis der Klimawirkung durch verschiedene Emissionsspezies deutlich [107, 32].

Nach Lee et al. (2021) wird mehr als die Hälfte des effektiven Strahlungsantriebs der Luftfahrt durch Nicht-CO₂-Effekte hervorgerufen (ca. 66 % im Zeitraum von 1940 bis 2018) [32]. Die Effekte fokussieren sich im konventionellen Unterschallluftverkehr auf die Wirkung

der Spezies CO_2 , NO_x (Ozon- und Methanefekte), Aerosoleffekte (insbesondere durch Sulfate und Ruß) sowie Kondensstreifen und daraus resultierende Kondensstreifenzirren [33]. Die Studie gibt außerdem an, dass der größte wärmende Effekt von Kondensstreifen und Kondensstreifenzirren ausgeht, gefolgt von CO_2 und NO_x -induzierter Klimawirkung. Der Netto-RF von Aerosolen wird negativ angegeben. Insgesamt unterliegt die Quantifizierung der Nicht- CO_2 -Effekte sehr hohen Unsicherheiten, die etwa das Achtfache der Unsicherheit von CO_2 -Effekten betragen. Gerade die Unsicherheiten bei der Quantifizierung von Kondensstreifen- und Aerosoleffekten sind besonders hoch. Die Klimawirkung der relevanten Luftverkehrsemissionen wird in Abbildung 2.4 für die Klimatreiber CO_2 , H_2O , NO_x , Kondensstreifen und Aerosole dargestellt [32].

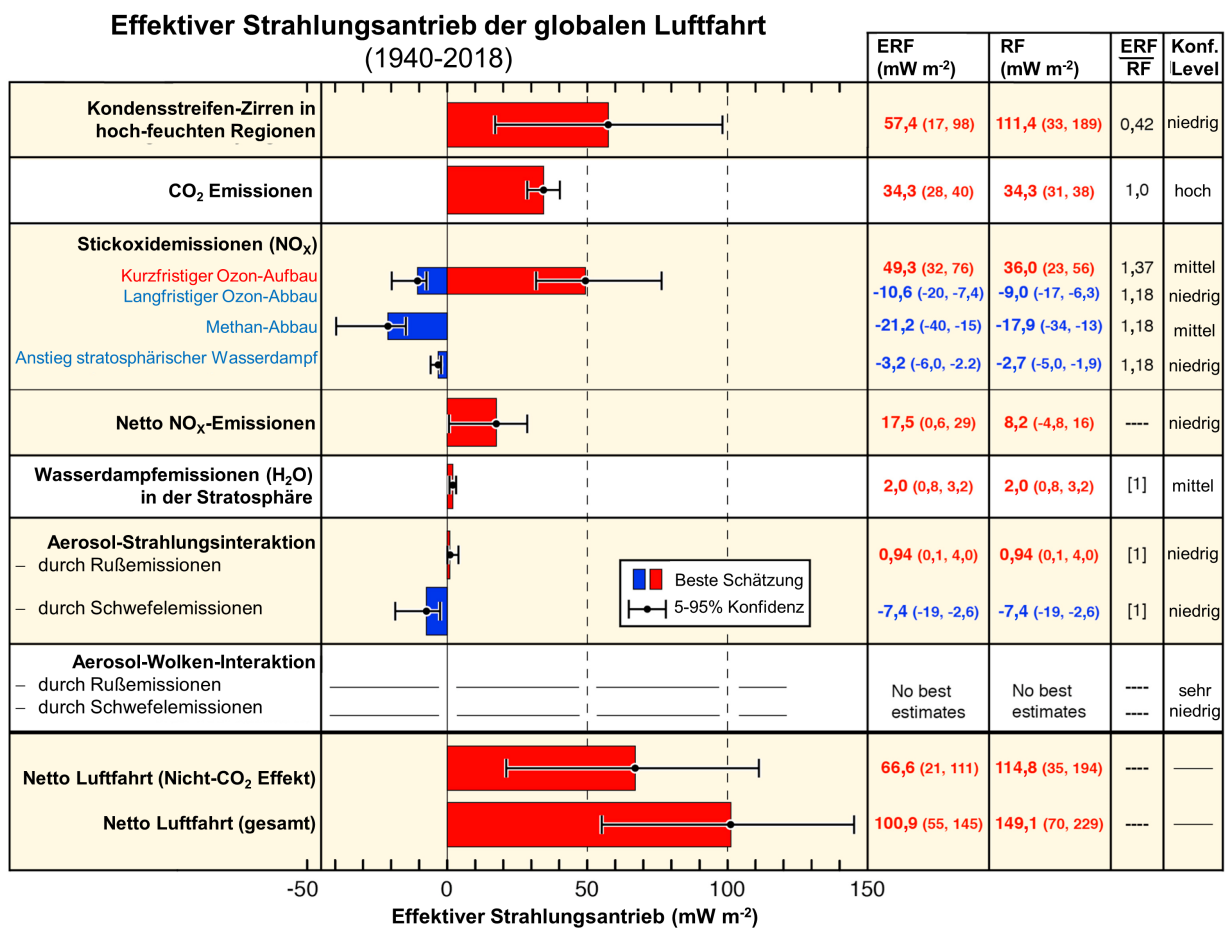


Abbildung 2.4: Effektiver Strahlungsantrieb der verschiedenen Emissionspezies des Luftverkehrs [eigene Darstellung nach 32].

2.3.1 Kohlenstoffdioxid (CO_2)

CO_2 -Emissionen, die durch die Oxidation der im Kerosin enthaltenen Kohlenwasserstoffe mit atmosphärischem Sauerstoff entstehen, wirken als direktes Treibhausgas. Da CO_2 -Moleküle vorwiegend langwellige Strahlung absorbieren, folgt eine Durchlässigkeit für kurzwellige Sonnenstrahlung, nicht aber für langwellige terrestrische Strahlung, was zu einer Erwärmung der Atmosphäre beiträgt. Langwellige Strahlung wird dagegen absorbiert und reemittiert [107, 99]. Aus der Eigenschaft als wenig reaktives Treibhausgas, welches kaum an che-

mischen Umwandlungsprozessen beteiligt ist, resultieren sehr hohe Lebenszeiten von bis zu mehreren hundert Jahren sowie eine nahezu homogene Verteilung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre [109, 110]. Die Klimawirkung von CO_2 -Emissionen ist damit unabhängig vom Entstehungsort und wird im Wesentlichen durch die Hintergrundkonzentration von CO_2 in der Atmosphäre beeinflusst, da Sättigungseffekte die Absorptionscharakteristik der Strahlung bestimmen [99].

Die Klimawirkung kann relativ zum Kraftstoffverbrauch als konstant angenommen werden und folglich durch Verbesserungen der Kraftstoffeffizienz reduziert werden. Dies kann beispielsweise durch technische Verbesserungen oder eine effizientere Routenführung erfolgen, welche die emittierte Menge an CO_2 reduzieren. Im Allgemeinen wird das wissenschaftliche Verständnis der Klimawirkung von CO_2 -Emissionen der Luftfahrt als hoch eingeschätzt [32].

2.3.2 Wasserdampf (H_2O)

Wasserdampfemissionen wirken sowohl direkt als auch indirekt (vgl. Kapitel 2.3.4) auf das Klima. Wasser bzw. Wasserdampf in der Atmosphäre ist das effektivste und wichtigste GHG und trägt mit über 60 % dominant zum natürlichen Treibhauseffekt bei [111, 99].

Der Strahlungsantrieb von Wasserdampf wird stark durch die lokalen atmosphärischen Bedingungen beeinflusst. Folglich haben die vertikale und horizontale Verteilung von Emissionen, die von der geografischen Breite abhängige und mit der Jahreszeit variierende Höhe der Tropopause und die Verweilzeiten in der Atmosphäre einen Einfluss auf die Klimawirkung [32]. Die Lebensdauer von H_2O -Emissionen ist stark von der Emissionshöhe sowie vom Emissionsort abhängig. So können Störungen der Atmosphäre durch freigesetzten Wasserdampf des Luftverkehrs in Flughöhen des Überschallluftverkehrs einige Monate andauern, wohingegen die Lebensdauer für Höhen des Unterschallluftverkehrs auf etwa einen Monat reduziert wird. In niedrigen Höhen, wie sie in Steig- und Sinkphasen von Flugtrajektorien üblich sind, dauern die Störungen weniger als eine Stunde an [112]. In der Troposphäre wird Wasserdampf durch die Wetterdynamik in kurzer Zeit durch Wolken und Niederschläge wieder aus der Atmosphäre entfernt. Gleichzeitig nimmt auch die Hintergrundkonzentration von H_2O mit steigender Höhe ab und ist in der unteren Stratosphäre besonders niedrig, sodass H_2O -Emissionen hier die Strahlungsbilanz besonders stark beeinflussen [113, 32]. Folglich nimmt die Klimawirkung von H_2O mit zunehmender Flughöhe ebenfalls zu [112]. Die abnehmende Tropopausenhöhe mit zunehmendem Breitengrad führt dazu, dass die Klimawirkung von Wasserdampf in Richtung der Pole für übliche Flughöhen ebenfalls ansteigt [114, 115]. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2.5 (a) dargestellt.

Somit kann der direkte Treibhausgaseffekt von H_2O -Emissionen des Luftverkehrs nicht nur durch technische oder betriebliche Erhöhungen der Kraftstoffeffizienz und damit eine Verringerung der Emissionsmenge reduziert werden. Der große Einfluss lokaler atmosphärischer Bedingungen und damit die Abhängigkeit von Flughöhe und Breitengrad auf den Strahlungsantrieb ermöglichen eine Reduktion der wasserdampfinduzierten Klimawirkung durch eine Verringerung der Flughöhe oder durch veränderte laterale Routenführung.

Während die H_2O -Emissionsmenge relativ zum Kraftstoffverbrauch als konstant angenommen und somit zuverlässig bestimmt werden kann, existieren nach wie vor Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Klimawirkung durch H_2O -Emissionen des Luftverkehrs, sodass das wissenschaftliche Verständnis als mittel eingeschätzt wird [33, 32].

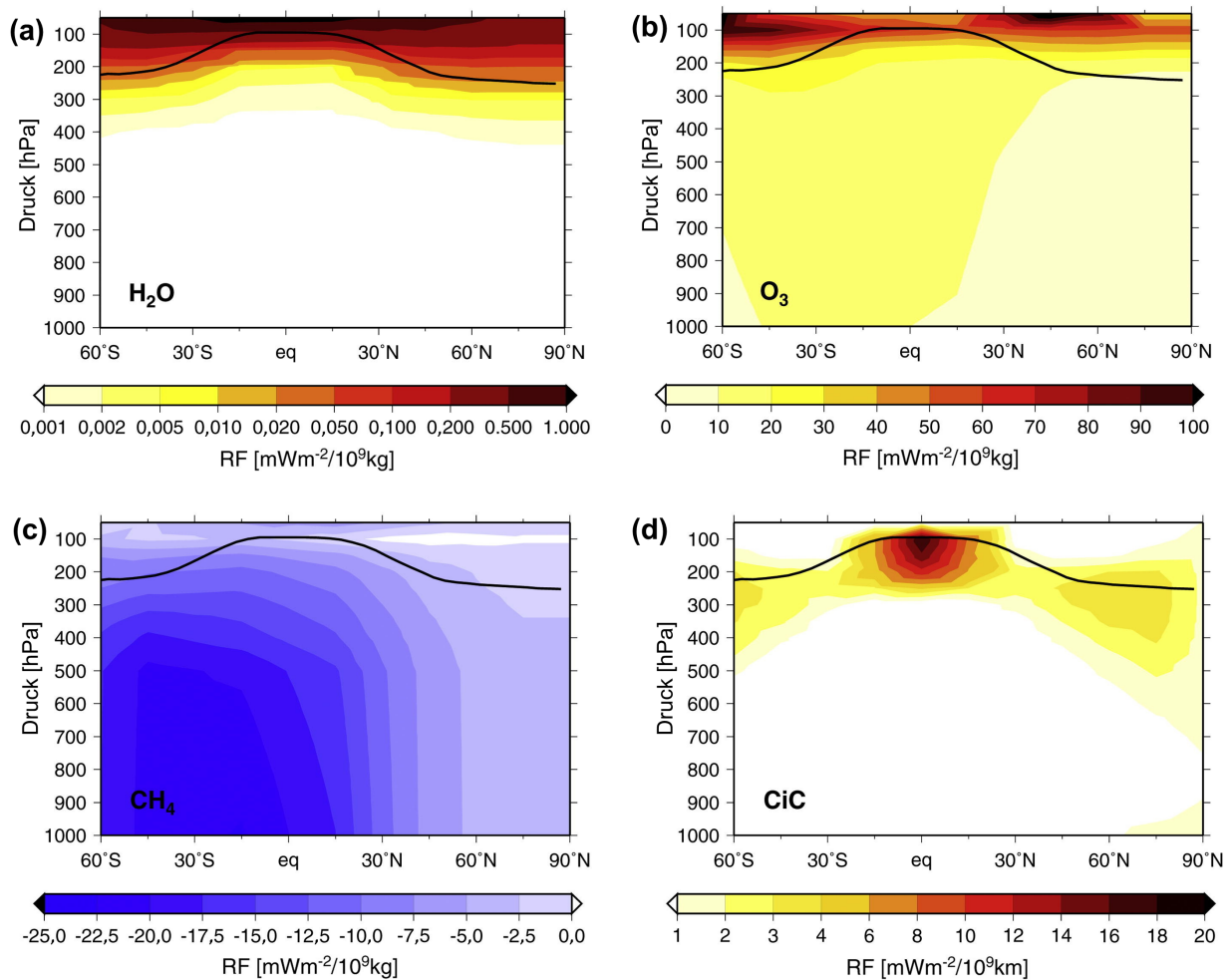


Abbildung 2.5: Globaler und jährlicher mittlerer Strahlungsantrieb verschiedener Nicht-CO₂-Effekte in Abhängigkeit des Emissionsorts. Die schwarze Linie markiert die Tropopausenhöhe in Abhängigkeit des Breitengrads [eigene Darstellung nach 116].

2.3.3 Stickoxide (NO_x)

Die Klimawirkung der unterschiedlichen Oxidationsformen von Stickstoff (NO_x), welche in geringen Mengen durch die Verbrennung von Kerosin in Flugzeugtriebwerken freigesetzt werden [117], lässt sich in verschiedene Mechanismen unterteilen, welche die Strahlungsbilanz beeinflussen [107, 110]: Zum einen führen NO_x-Emissionen in der oberen Troposphäre kurzfristig zur **Produktion von Ozon (O₃)**, welches den Strahlungsantrieb erhöht [118]. Dieser Ozon-Anstieg führt langfristig zu einem **Abbau troposphärischen Methans (CH₄)** mit einer negativen Wirkung auf den Strahlungsantrieb [119, 120]. Daraus resultiert wiederum eine Reduktion der langfristigen Ozon-Produktion (*Primary Mode Ozone, PMO*) sowie eine Reduktion von stratosphärischem Wasserdampf. Beide Effekte haben einen geringen negativen Strahlungsantrieb zur Konsequenz [121, 122]. Des Weiteren führt die lokale Bildung von Sulfat- und Nitrat-Aerosolen durch chemische Reaktionen von NO_x zu einer Reflektion einfallender solarer Strahlung und damit zu einer Auswirkung auf die Strahlungsbilanz, was in Kapitel 2.3.5 noch einmal detailliert erläutert wird [123, 124]. Diese Effekte werden im Verhältnis zur Wirkung der induzierten Veränderung in Ozon und Methan allerdings als gering eingeschätzt [117]. Trotz der gegenläufigen Effekte von Ozon

und Methan geht man aktuell netto von einem wärmenden Effekt von NO_x -Emissionen im Luftverkehr aus [124, 33]. Terrenoire et al. (2022) erwarten aber, dass sich dieser Effekt in Zukunft durch die höheren Methan-Hintergrundkonzentrationen umkehren könnte [124].

Stratosphärisches und troposphärisches O_3 wirken unterschiedlich auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre [108]. Kurzlebiges Ozon in der Troposphäre absorbiert die langwellige terrestrische Strahlung und wirkt somit als Treibhausgas, wohingegen langlebiges stratosphärisches Ozon, auch als Ozonschicht bekannt, ultraviolette Strahlung absorbiert sowie reemittiert und somit eine kühlende Wirkung auf das Klima hat [99]. Der Einfluss der Ozonänderung auf den Strahlungsantrieb nimmt mit steigender Höhe und zunehmendem Breitengrad in Richtung der Pole zu [34, 116] (vgl. Abb. 2.5, b). O_3 beeinflusst darüber hinaus die troposphärischen Oxidationsmengen und induziert damit eine Reduktion von Methan als weiterem Treibhausgas [108]. Im Gegensatz zu Ozon beträgt die Lebenszeit von Methan mehrere Jahre, sodass eine geringere Heterogenität der Verteilung in der Atmosphäre angenommen werden kann. Die Klimawirkung weist eine geringe Höhenabhängigkeit auf [33, 110]. Insgesamt hängen die NO_x -Effekte stark von der Flughöhe und dem Breitengrad ab, aber auch längengradabhängige Effekte sind zu beobachten [125]. Dabei ist die Methanlebenszeit und die resultierende Klimawirkung weniger sensitiv gegenüber dem Emissionsort von NO_x -Emissionen als die Veränderungen der Ozonbilanz (vgl. Abb. 2.5, b und c).

Eine Reduktion der NO_x -induzierten Klimawirkung des Luftverkehrs kann folglich durch solche Maßnahmen reduziert werden, die die Emissionsmengen beispielsweise durch innovative Triebwerkstechnologien reduzieren. Gleichzeitig können aber auch operationelle Veränderungen des Emissionsortes das Verhältnis von Ozon- und Methaneffekten optimieren [126].

Das gegenwärtige wissenschaftliche Verständnis der Klimawirkung von NO_x -Emissionen in der Luftfahrt variiert stark. Während eine mittlere Sicherheit bei der Bewertung von kurzfristigen Ozon- und langfristigen Methan-Effekten vorliegt, gibt es nach wie vor große Unsicherheit beim langfristigen Ozonabbau sowie der Reduktion des stratosphärischen Wasserdampfs [32]. Sehr große Unsicherheiten verbleiben bei der Quantifizierung des Netto-Klimaeffekts, insbesondere durch die indirekt induzierten Effekte der Aerosole [124].

Neben den atmosphärischen Effekten haben Stickoxide auch gesundheitliche Auswirkungen u. a. auf das Atmungssystem durch die Bildung von bodennahem Ozon [127] und sind deshalb auch für die Betrachtung von LAQ-Aspekten relevant.

2.3.4 Kondensstreifen (LC) und kondensstreifeninduzierte Bewölkung (CiC)

Bei ausreichend kalter Umgebungstemperatur und hoher Luftfeuchtigkeit entstehen bei der Emission von heißem Wasserdampf und Partikeln aus dem Abgasstrahl Kondensstreifen durch die Bildung von Eiskristallen an Kondensationskeimen in bekannten thermodynamischen Prozessen (Schmidt-Appleman-Kriterium, SAC) [128, 129, 130]. Solche Kondensstreifen können einige Minuten überdauern, wenn sie ihre lineare Form beibehalten (*Linear contrails, LC*) oder sich in eisübersättigten Gebieten (*Ice-supersaturated regions, ISSRs*) weiter ausbreiten und zu Kondensstreifenzirren (*Contrail-induced cirrus, CiC*) wachsen und verdriften, welche sich von natürlicher Bewölkung nicht mehr unterscheiden lassen [131, 108, 128]. Diese ISSRs, in denen sich CiC bilden, sind vergleichsweise flach (Höhen von ca. 500 m), weisen aber eine große laterale Ausdehnung von bis zu mehreren 100 km auf und treten überwiegend in der oberen Troposphäre auf (vgl. Abb. 2.5, d) [132, 131].

LC und CiC können je nach Strahlungsbilanz sowohl wärmende als auch kühlende Wirkung haben, da sowohl kurzwellige Sonnenstrahlung reflektiert (kühlende Wirkung) als

auch terrestrische Strahlung absorbiert und reemittiert wird (wärmende Wirkung) [132]. Dieser Effekt wird insbesondere durch das Rückstrahlvermögen der Eiswolken bestimmt, welches mit dem Einfallswinkel der Sonneneinstrahlung, sprich mit Jahres- und Tageszeit, sowie mit der Höhe variiert [128]. Nachts geht man aufgrund der fehlenden solaren Strahlung von einem ausschließlich wärmenden Effekt aus [119]. Auch insgesamt wird der Effekt als wärmend eingeschätzt [132]. Darüber hinaus variiert die Klimawirkung mit dem Hintergrundstrahlungsfeld, der Kondensstreifenabdeckung, der Lebensdauer, der Umgebungstemperatur, der optischen Dicke (*Contrail optical depth, COD*) sowie der Form der Partikel und des Eiskristalldurchmessers [107, 131, 132]. Des Weiteren liegt der RF von CiC deutlich über dem von LC, was unter anderem durch eine höhere optische Dicke und einen größeren Eiskristalldurchmesser begründet wird [107, 131].

Die Bildung von Kondensstreifen ist nicht nur von den atmosphärischen und klimatischen Bedingungen (Eisübersättigung und Temperatur) abhängig, sondern nach SAC auch von der Effizienz der Triebwerke. Durch einen höheren Wirkungsgrad verursachen neuere Triebwerke potentiell bereits bei solchen Bedingungen Kondensstreifen, bei denen mit älteren Triebwerken noch keine Kondensstreifen entstehen [128, 50]. Die Entstehung von Kondensstreifen lässt sich somit durch technische Verbesserungen nur beschränkt reduzieren. Allerdings geht man davon aus, dass neue Kraftstoffe die Bildung von Kondensstreifen und die resultierende Klimawirkung durch Veränderungen in den Partikelemissionen wesentlich beeinflussen [50, 45]. Durch die starke Abhängigkeit von atmosphärischen Bedingungen kann durch räumliche oder zeitliche Anpassung von Flugrouten eine Vermeidung von Kondensstreifen oder eine Reduktion ihrer Klimawirkung erfolgen, indem ISSRs vermieden oder tageszeitabhängige Effekte genutzt werden [vgl. 65, 133].

Obwohl robuste Evidenz für das Phänomen der Bildung von LC und CiC und deren Auswirkungen auf das solare und terrestrische Strahlungsbudget der Atmosphäre besteht, unterliegt die Quantifizierung des RF sehr hohen Unsicherheiten, da die Schlüsseffekte bisher nicht vollständig modelliert werden können [32].

2.3.5 Aerosole

Unter dem Begriff der Aerosole werden feste und flüssige Schwebeteilchen, wie Rußpartikel (*Black carbon, BC*) sowie Sulfat- und Nitrat-aerosole, zusammengefasst, die u. a. durch den Luftverkehr emittiert werden [32, 123]. Diese Partikel beeinflussen die Strahlungsbilanz sowohl direkt durch Absorption und Reflexion (Aerosol-Strahlungs-Interaktion) [134] als auch indirekt durch mikrophysikalische Effekte (Aerosol-Wolken-Interaktion) [127, 32]. Neben den Auswirkungen auf das Klima weisen Aerosole am Boden auch gesundheitsschädigende Potentiale auf und sind folglich auch unter dem Aspekt von LAQ zu betrachten [127].

Sulfat- und Nitratpartikel reflektieren primär die einfallende Sonnenstrahlung, absorbieren terrestrische Strahlung nur geringfügig mit insgesamt kühlendem Effekt [135, 32], wohingegen der direkte Aerosoleffekt von Rußpartikeln netto wärmend auf die Strahlungsbilanz wirkt [32]. Bei Wolkeneffekten kann in Kondensstreifenzirren (vgl. Kapitel 2.3.4) und Rußzirren unterschieden werden. So dienen Aerosole als Kondensationskeime für die Bildung von LC und CiC und können auch deren Eigenschaften signifikant beeinflussen [136]. Voigt et al. (2021) analysieren die Bildung von CiC in Abhängigkeit der verbrannten Treibstoffe (u. a. konventionelles Kerosin im Vergleich zu verschiedenen SAF-Kraftstoffgemischen mit niedrigem Aromatgehalt) und identifizieren eine signifikante Reduktion an Ruß und Eiskonzentration sowie einen Anstieg in Eiskristallgröße durch die SAF-Mischungen, was mit einer niedrigeren Energiedeposition und geringerer Erwärmung einhergeht

[45].

Die Bewertung der Klimawirkung von Aerosolen unterliegt sehr hohen Unsicherheiten [107]. Die geringe Genauigkeit bei der Bestimmung der Aerosol-Strahlungs-Interaktion folgt aus der sehr geringen Anzahl bereits existierender Studien und dem unsicheren Emissionsindex. Die sehr geringe Konfidenz bei der Aerosol-Wolken-Interaktion zeigt sich außerdem durch die geringe Anzahl existierender Studien im aktuellen Stand der Forschung sowie die Identifikation gegenläufiger Effekte und die starke Varianz der absoluten Höhe des Strahlungsantriebs aufgrund eines mangelhaften Verständnisses der zugrundeliegenden Prozesse. Die Quantifizierung der Effekte weist so hohe Unsicherheiten auf, dass keine realistischen Schätzungen zur Klimawirkung abgegeben werden können [32].

2.4 Metriken zur Beurteilung der Klimawirkung

Die GHG des Luftverkehrs tragen zum Klimawandel bei und verursachen sozioökonomischen Schaden (vgl. Abb. 2.2). Dabei stellen die Emissionsmengen (vgl. Tabelle 2.1) einfache Kennzahlen mit geringer Unsicherheit dar, weisen aber gleichzeitig nur einen sehr geringen Bezug zum resultierenden Schaden auf. Bei der Quantifizierung der Klimawirkung unterschiedlicher Emissionsspezies beispielsweise durch den Luftverkehr gilt es CO₂ und Nicht-CO₂-Effekte mit unterschiedlichen atmosphärischen Lebenszeiten zu berücksichtigen. Um die Änderungen der resultierenden atmosphärischen Konzentrationen und des Strahlungsantriebs sowie der daraus folgenden Veränderung der globalen Oberflächentemperatur bewerten zu können, wurden verschiedene Klimametrien entwickelt [71]. Diese Kennzahlen erlauben eine quantitative Bewertung der Effekte von Luftverkehrsemissionen in unterschiedlichen Aggregationsgraden und können darüber hinaus verwendet werden, um die Effizienz verschiedener Mitigationsmaßnahmen zu bewerten [71, 114].

Eine Klimametrik setzt sich üblicherweise aus dem gewählten Indikator, dem betrachteten Zeithorizont sowie dem zugrundeliegenden Emissionsszenario zusammen (vgl. Abb. 2.6). Die Auswahl der richtigen Metrik wird durch die wissenschaftliche Fragestellung bestimmt, da nicht jede Klimametrik für jeden Anwendungsfall geeignet ist.

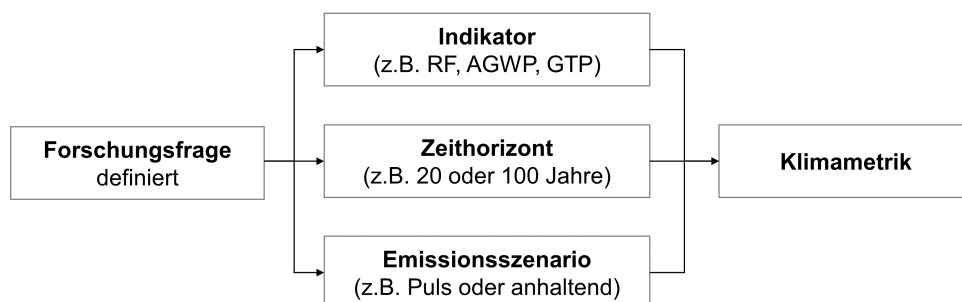


Abbildung 2.6: Definition der passenden Klimametrik [eigene Darstellung nach 71, 137].

Über die Wahl des Zeithorizonts wird eine Gewichtung der Bewertung von kurz- und langlebigen Spezies vorgenommen. Bei der Betrachtung eines kurzen Zeithorizonts (z. B. 5 oder 10 Jahre) dominieren die kurzlebigen Spezies wie NO_x-induzierte Ozonbildung und Kondensstreifen die Klimawirkung. Bei längeren Zeiträumen (z. B. 50 oder 100 Jahre) überwiegt die Wirkung der langlebigen Spezies wie NO_x-induzierter Methanabbau und CO₂ [137]. Bei den Emissionsszenarien unterscheidet man üblicherweise in Puls-Emissionen (*Pulse, p-Metrik*), anhaltende Emissionen (*Sustained, s-Metrik*) sowie zukünftige Emissionssze-

narien (*Future emission scenario based, F-Metrik*). Bei der Betrachtung eines p-Szenarios geht man von einer einmaligen Emission im Startjahr aus, wohingegen im s-Szenario die jährliche Emissionsmenge über den betrachteten Zeitraum konstant bleibt. In Ergänzung dazu berücksichtigt ein F-Emissionsverlauf mögliche zukünftige Veränderungen der jährlichen Emissionsmengen, beispielsweise durch ein Wachstum des Verkehrsaufkommens oder technische Effizienzsteigerungen. Unterschiedliche Emissionsverläufe und die Auswirkungen verschiedener Betrachtungszeiträume sind auf Basis des BAU-Szenarios (*Business as usual*) aus Grewe et al. (2021) in Abbildung 2.7 visualisiert [2]. Während ein F-Emissionsverlauf im dargestellten Beispiel zu stetig steigenden bzw. sinkenden Temperaturen für die einzelnen Emissionsspezies führt, nimmt die Temperaturantwort beim p-Emissionsverlauf für kurzlebige Klimatreiber (z. B. CiC oder Ozon) nach kurzer Zeit wieder ab.

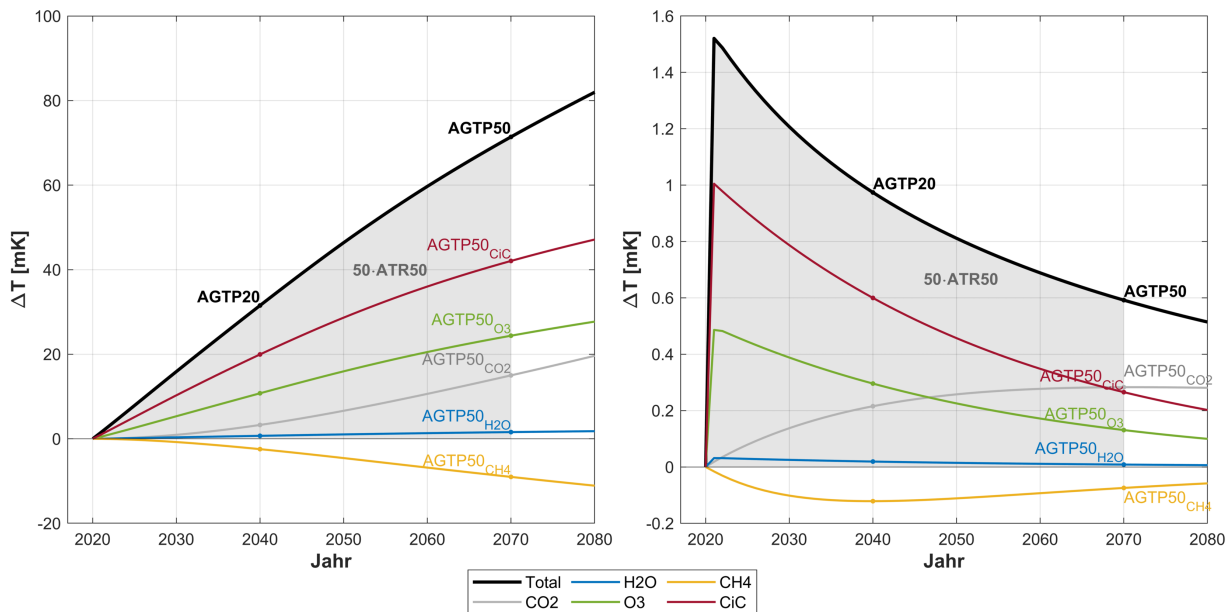


Abbildung 2.7: Auswirkungen unterschiedlicher Emissionsverläufe und Zeithorizonte auf Klimametrien: F-Temperaturverlauf (links) und p-Temperaturverlauf (rechts). Die dargestellten Metriken sind im folgenden Kapitel 2.4.1 im Detail beschrieben [eigene Darstellung auf Basis der Emissionsszenarien aus 2].

In der Literatur ist bereits eine Vielzahl an verschiedenen Indikatoren zur Bewertung der Klimawirkung entwickelt und angewendet worden, die im Folgenden kurz vorgestellt werden (Kapitel 2.4.1). Anschließend wird die Eignung unterschiedlicher Metriken für verschiedene Anwendungsfälle miteinander verglichen (Kapitel 2.4.2).

2.4.1 Indikatoren zur Bewertung der Klimawirkung

Der **Strahlungsantrieb** (*Radiative forcing, RF*) beschreibt das Netto-Ungleichgewicht der Strahlungsbilanz an der Tropopause durch eine Veränderung der atmosphärischen Zusammensetzung. Der *RF* wird üblicherweise in W/m^2 angegeben und kann über den Klimasensitivitätsparameter α für jede Emissionsspezies x ins Verhältnis zur Veränderung der globalen Oberflächentemperatur ΔT gesetzt werden [114, 137]:

$$\Delta T_x = \alpha_x \cdot RF_x \quad (2.3)$$

Vorteil des RF ist der direkte Bezug zur physikalischen Strahlungsbilanz und die Eignung für den direkten Wirkungsvergleich verschiedener Spezies. Allerdings kann aufgrund der Klimasensitivität nur indirekt ein Bezug zur Temperatur hergestellt werden [114, 137]. Insgesamt wird der RF als ungeeignete Metrik für die Beurteilung von globalen Nicht-CO₂-Effekten eingeschätzt, da räumliche und zeitliche Inhomogenitäten nicht adäquat berücksichtigt werden können [107, 108].

Die Wirksamkeit einer Klimawirkungsspezies x kann über die **Wirksamkeit** (*Efficacy*, e) in Relation zur Wirkung einer CO₂-Emission gem. Formel 2.4 bestimmt werden [138, 139]:

$$e_x = \frac{\alpha_x}{\alpha_{CO_2}} \quad (2.4)$$

Werte für den Wirksamkeitsparameter e können, wie in Tabelle 2.2 dargestellt, aus der Literatur abgeleitet werden [140].

	e	Referenz
O₃	1,37	Ponater et al. (2006) [141]
CH₄	1,18	Ponater et al. (2006) [141]
PMO	1,18	Lee et al. (2021) [32]
H₂O	1	Lee et al. (2021) [32]
CiC	0,59	Ponater et al. (2005) [142]
	0,31	Rap et al. (2010) [143]
	0,35	Bickel et al. (2020) [144]
	0,42	Lee et al. (2021) [32]

Tabelle 2.2: Wirksamkeiten e verschiedener Klimawirkungsspezies [140].

Daraus kann wiederum der **effektive Strahlungsantrieb** (*Effective radiative forcing*, ERF) abgeleitet werden, welcher sich durch die Wirksamkeit e aus dem speziesindividuellen RF ergibt:

$$ERF_x = \frac{\alpha_x}{\alpha_{CO_2}} RF = e_x \cdot RF \quad (2.5)$$

Aufbauend auf dem RF gibt das **globale Erderwärmungspotential** (*Global warming potential*, GWP) an, wie viel eine bestimmte Masse eines Treibhausgases x relativ zur gleichen Masse CO₂ zur Änderung des Strahlungsantriebs beiträgt. Dabei berechnet das GWP den zeitlich integrierten Strahlungsantrieb einer instantanen Emission relativ zur gleichen Masse an CO₂ [20, 114, 137]:

$$GWP_x(H) = \frac{AGWP_x(H)}{AGWP_{CO_2}(H)} = \frac{\int_0^H RF_x(t) dt}{\int_0^H RF_{CO_2}(t) dt} \quad (2.6)$$

Das **absolute GWP (AGWP)** beschreibt dabei die zeitintegrierte Änderung des RF aufgrund einer Puls-Emission im Zeitraum H für eine bestimmte Spezies. Üblicherweise wird eine Einheitsemission von 1 kg verwendet. Das GWP wurde bereits 1990 eingeführt und im ersten Bericht des IPCC sowie im Kyoto-Protokoll berücksichtigt [145, 146, 147]. Einerseits können so die unterschiedlichen Lebenszeiten der Emissionen berücksichtigt und die Klimawirkungen unterschiedlicher Spezies auf vergleichbarer Basis bewertet werden. Darüber hinaus ist das (A)GWP weniger abhängig vom betrachteten Zeithorizont als der RF. Andererseits kann kein direkter Bezug zur Temperaturänderung hergestellt werden

und insbesondere für besonders kurzlebige Emissionen des Luftverkehrs ist eine Anwendung dieser Metrik schwierig [114, 137].

Das **absolute Temperaturpotential** (*Absolute global temperature potential, AGTP*) ist im Gegensatz zum AGWP ein Endpunkt-Indikator. Es beschreibt das Temperaturänderungspotential ΔT einer Emissionsspezies zum Zeitpunkt H [148]. Analog zum *GWP* ergibt sich das **globale Temperaturpotential** (*Global Temperature Potential, GTP*) einer Spezies x im Verhältnis zum AGTP des Referenzgases CO_2 :

$$GTP_x(H) = \frac{AGTP_x(H)}{AGTP_{\text{CO}_2}(H)} = \frac{\Delta T_x(H)}{\Delta T_{\text{CO}_2}(H)} \quad (2.7)$$

Vorteil des GTPs ist der direkte Zusammenhang zur Temperaturänderung und damit zu den Auswirkungen auf das Klima sowie die Möglichkeit zur Berücksichtigung der je Spezies variierenden Lebensdauer. Nachteilig ist sowohl die hohe Abhängigkeit vom gewählten Zeithorizont als auch die stark variierenden Ergebnisse je nach Emissionsszenario [114, 137].

Die **durchschnittliche Temperaturantwort** (*Average temperature response, ATR*) beschreibt die für einen Zeitraum H mittlere Änderung der bodennahen Gleichgewichtstemperatur auf Basis der Temperaturantwort ΔT . Der Wert ist somit abhängig von der Temperaturantwort sowie dem betrachteten Zeithorizont und in Gleichung 2.8 dargestellt [70].

$$ATR(H) = \frac{1}{H} \int_{t_0}^{t_0+H} \Delta T(t) dt \quad (2.8)$$

ATR wurde als Metrik bisher im Wesentlichen in den Bereichen Flugzeugentwurf [149, 70] sowie bei der Bewertung verschiedener Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung verwendet [66]. Die Betrachtung der ATR reduziert die Abhängigkeit vom gewählten Zeithorizont, z.B. im Vergleich zum (A)GTP. Gleichzeitig können unterschiedliche Lebenszeiten der verschiedenen Spezies sowie die Trägheit der Atmosphäre berücksichtigt werden. Darüber hinaus stellt ATR einen direkten Bezug zur Veränderung des Klimas, d. h. der globalen Oberflächentemperatur, her.

Zur Bewertung der Klimawirkung im Bereich regulatorischer Maßnahmen kommt darüber hinaus die Kennzahl der **CO₂-Äquivalente** (*CO₂ equivalents, CO₂e*) zum Einsatz [137, 150]. Dabei wird üblicherweise eine ATR-Metrik (z. B. F-ATR100) einer Spezies x ins Verhältnis zur ATR von CO_2 gesetzt:

$$\text{CO}_2e_x = \frac{ATR_x(H)}{ATR_{\text{CO}_2}(H)} \quad (2.9)$$

Eine alternative Definition interpretiert CO_2e im Gegensatz zur einheitslosen Definition gem. Formel 2.9 als die Menge an CO_2 -Emissionen, welche die gleiche Klimawirkung erzeugt wie die betrachtete Spezies. Im Folgenden wird sich allerdings auf die einheitslose Definition fokussiert.

Über die vorgestellten Indikatoren hinaus werden in der Literatur weitere Kennzahlen vorgestellt, die im Folgenden nicht weiter betrachtet werden, wie z. B. das kombinierte GWP (*Combined GWP, CGWP*), das kombinierte GTP (*Combined GTP, CGTP*), GWP^* als angepasste Definition des GWPs sowie das absolute regionale Temperaturänderungspotential (*Absolute regional temperature change potential, ARTP*) [151, 152, 153].

2.4.2 Gegenüberstellung verschiedener Metriken

Die verschiedenen Klimaindikatoren sowie die Metriken, die aus der Kombination mit Emissionsszenario und Zeithorizont resultieren, unterscheiden sich in ihrer Eignung für verschiedene Anwendungen. Tabelle 2.3 fasst die wesentlichen Vor- und Nachteile ausgewählter Indikatoren zusammen.

	RF	GWP	GTP	ATR
Direkter Bezug zur Temperaturänderung ΔT	nein	nein	ja	ja
Komplexität der Implementierung	gering	mittel	gering	mittel
Berücksichtigung verschiedener Lebenszeiten	nein	ja	ja	ja
Abhängigkeit vom Zeithorizont	stark	schwach	stark	schwach
Einfluss des Emissionsszenarios	hoch	mittel	mittel	gering

Tabelle 2.3: Eigenschaften verschiedener Indikatoren zur Bewertung der Klimawirkung [eigene Darstellung nach 149, 114, 139].

Während RF und der ERF im direkten physikalischen Bezug zur Strahlungsbilanz stehen, können diese Metriken die unterschiedlichen Lebenszeiten der einzelnen Emissionsspezies und deren Wirkung nur eingeschränkt abbilden [139]. Über die integrative Betrachtung der Indikatoren (A)GWP, (A)GTP und ATR können diese Unterschiede besser berücksichtigt werden. In diesem Kontext haben sich das (A)GWP und das (A)GTP zu den bevorzugten Metriken im politischen Bereich entwickelt [146, 26]. Die Anwendung des GWPs für kurzlebige Emissionen und die Effekte der Luftfahrt wurde kontrovers diskutiert, insbesondere da der Strahlungsantrieb des Luftverkehrs nicht allein auf Emissionen basiert (vgl. CiC) und die inhomogene Verteilung des RFs in der Atmosphäre durch kurzlebige Spezies nur unzureichend berücksichtigt werden kann, sodass sich das IPCC 1999 gegen eine Anwendung des GWPs in der Luftfahrt aussprach [154]. Im Gegensatz zur Anwendung des GWPs und des GTPs im politischen Bereich und in der Szenarienbewertung [u. a. 26, 147, 2], hat sich für die Bewertung von Flugzeugentwürfen sowie verschiedener betrieblicher Mitigationsmaßnahmen die Nutzung von ATR als Indikator etabliert [z. B. 149, 66, 70], welches im politischen Bereich allerdings kaum verbreitet ist. Megill et al. (2023) empfehlen die Verwendung von ATR zur Bewertung unterschiedlicher Flugzeugentwürfe, betrieblicher Verbesserungsansätze sowie regulatorischer Maßnahmen [149].

Des Weiteren kommen in verschiedenen Studien häufig unterschiedliche Zeithorizonte sowie Emissionsszenarien zur Anwendung [z. B. 67, 66]. Die Auswahl des Zeithorizonts sowie des zugrundeliegenden Emissionsszenarios beeinflusst die Ergebnisse verschiedener Klimametriken allerdings signifikant (vgl. Abb. 2.7). Bei der Betrachtung kurzer Zeiträume sind beispielsweise Effekte durch CiC und O₃ von größerer Bedeutung als bei der Betrachtung längerer Zeiträume, bei welchen langlebige Spezies wie CO₂ und Methan stärker auf das Klima wirken. Da das globale Klimasystem allerdings mindestens 30 Jahre braucht, um sich an eine veränderte Strahlungsbilanz anzupassen, sollten bei der Bewertung von Maßnahmen und Szenarien Zeiträume von mindestens 30 Jahren gewählt werden. Im Kyoto-Protokoll wurde beispielsweise das GWP über einen Zeitraum von 100 Jahren fokussiert [137, 147]. Bei der Berücksichtigung des zugrundeliegenden Emissionsszenarios gilt es ebenfalls, die unterschiedlichen Eignungen zu beachten. Bei der Bewertung der Klimawirkung von Einzelflügen kann die Betrachtung von p-Emissionsverläufen sinnvoll sein, wohingegen F-Emissionsverläufe bei der Bewertung von Technologien, Maßnahmen und Szenarien bevorzugt werden sollten.

Die Umrechnung zwischen verschiedenen Klimaindikatoren (AGWP und ATR), verschiedenen Zeithorizonten (20, 50 und 100 Jahren) sowie Emissionsszenarien (p-, s- oder F-Szenarien) kann vereinfacht mit spezieindividuellen Umrechnungsfaktoren nach Dietmüller et al. (2023) bzw. Niklaß et al. (2020) vorgenommen werden [140, 137].

2.5 Betriebliche Aspekte des Luftverkehrs

Das Luftverkehrssystem, welches sich zum Ziel der Beförderung von Passagieren und Gütern entwickelt hat, bildet eine tragende Säule des modernen Transportsystems und stellt aufgrund der Vielzahl an beteiligten Stakeholdern ein komplexes System dar [155]. In diesem Zusammenhang sind neben den Passagieren im Wesentlichen die folgenden vier Hauptinteressensgruppen (*Stakeholder*) zu nennen (vgl. Abb. 2.8):

- **Hersteller** (*Original equipment manufacturers, OEMs*) stellen in Zusammenarbeit mit den Zulieferern für Triebwerke und Komponenten das Flugzeug als Transportplattform bereit.
- **Luftverkehrsgesellschaften** (*Airlines*) betreiben die Flugzeuge und bieten somit den Transport von Passagieren oder Fracht als Dienstleistung an.
- **Flugsicherungsdienste** (*Air navigation services, ANS*) sind für den sicheren und planmäßigen Luftverkehrsfluss durch effizientes Luftverkehrsmanagement (*Air traffic management, ATM*) verantwortlich und stellen die notwendige Luftrauminfrastruktur bereit.
- **Flughäfen** (*Airports*) sind die Schnittstelle zwischen bodengebundenem und Lufttransport und sorgen für die notwendige Bodeninfrastruktur.

Neben diesen Hauptinteressensgruppen existieren weitere Stakeholder wie Reiseagenturen, bodengebundene Dienstleister, militärische Parteien oder die allgemeine Luftfahrt (*General aviation, GA*). Darüber hinaus wird das Luftverkehrssystem durch die Erwartungen und Entwicklungen der Gesellschaft, politische und wirtschaftliche Randbedingungen sowie andere Transportmodi (z. B. den Schienenverkehr) beeinflusst [155].

Während die technischen Aspekte des Luftverkehrs im Wesentlichen durch die Flugzeughersteller und die Zulieferer im Produktentwicklungs- und Herstellungsprozess bestimmt werden, definieren Airlines und ANS die betrieblichen Aspekte in der Luft sowie Airlines und Flughäfen den bodengebundenen Betrieb. Des Weiteren wird das Luftverkehrssystem auch durch regulatorische Randbedingungen in seinen technischen und betrieblichen Aspekten beeinflusst. Hierzu zählen unter anderem Zertifizierungsrichtlinien, welche Weiterentwicklungen von Flugzeugen und Triebwerken erforderlich machen. Weitere Aspekte sind das Vorhalten von CO₂-Zertifikaten für den Betrieb durch den EU ETS oder das internationale System CORSIA [42]. Auch vorgegebene Beimischungsquoten von nachhaltigen Kraftstoffen beeinflussen den Betrieb von Airlines und Flughäfen (z. B. durch ReFuel EU) [156].

Die Bewertung von betrieblichen Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung wird im Folgenden hinsichtlich Effektivität und Effizienz unterschieden. Effektivität bewertet allgemein den Beitrag zur Zielerreichung, während Effizienz das Verhältnis zwischen Ergebnis und Ressourceneinsatz beschreibt [157]. Eine besonders effektive Maßnahme im Hinblick auf die betriebliche Klimawirkungsminderung weist folglich ein hohes Mitigationpotential

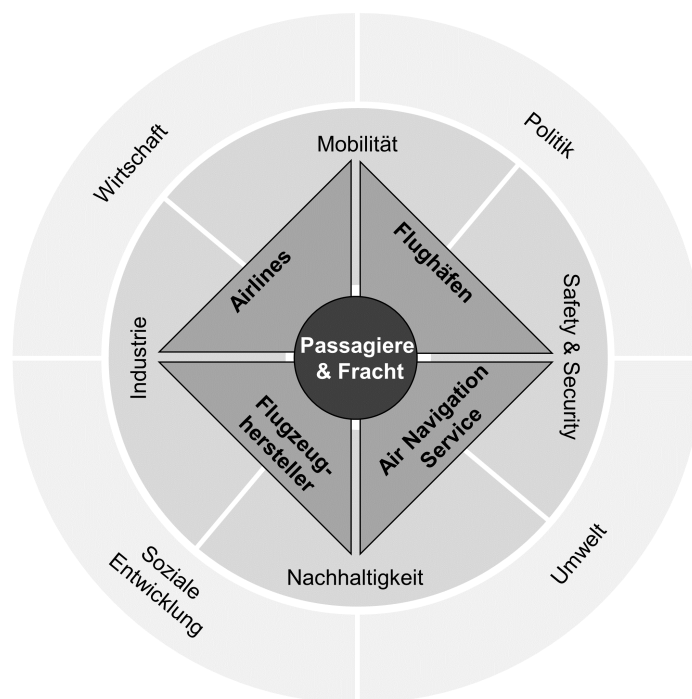


Abbildung 2.8: Stakeholder des Luftverkehrssystems [eigene Darstellung nach 155].

auf, während eine effiziente Maßnahme im Folgenden ein hohes Potential zur Klimawirkungsminderung in Relation zu den Auswirkungen auf die Stakeholder beschreibt. Hier kann gerade bei der Betrachtung von betrieblichen Maßnahmen das Verhältnis zum Anstieg in den direkten Betriebskosten herangezogen werden.

Darüber hinaus können bei der Bewertung der betrieblichen Auswirkungen von Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung innerhalb des Luftverkehrs verschiedene Schlüsselkennzahlen (*Key performance indicators, KPIs*) für die Stakeholdereffekte herangezogen werden [vgl. 158, 159]. So lassen sich die ökonomischen Auswirkungen auf die betreibenden Airlines neben den Veränderungen der Betriebskosten beispielsweise auch durch Veränderungen in den erzielten Gewinnen quantifizieren [160, 161]. Die Größe von Airline-Netzwerken sowie die Verkehrsmenge im Luftverkehr lässt sich beispielsweise durch verfügbare Sitzplatzkilometer (*Available seat kilometers, ASK*) beschreiben, wohingegen die Verkehrsmenge an Flughäfen u. a. durch die Anzahl an An- und Abflugzyklen (*Landing-take off, LTO cycles*) bestimmt werden kann. Auswirkungen auf die ANS und die Verkehrsdichte können beispielsweise durch die Anzahl der Flugbewegungen pro Sektor oder die Routing-Effizienz, d. h. die Abweichung von der kürzesten Route, bewertet werden [158, 159]. Die Akzeptanz durch Passagiere, die Gesellschaft und das politische Umfeld hinsichtlich verschiedener Veränderungen im Luftverkehr kann darüber hinaus beispielsweise in Umfragen analysiert werden [159, 162].

2.6 Zwischenfazit: Ökologische Nachhaltigkeit im Betrieb des Luftverkehrs

Die relevanten Grundlagen dieser Arbeit hinsichtlich der Klimawirkung des Luftverkehrs lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Luftverkehr beeinflusst die ökonomische, ökologische und soziale Dimension der

Nachhaltigkeit. Die langen Produktlebenszyklen in der Luftfahrt und die hohen ökonomischen und ökologischen Auswirkungen im Betrieb begründen die Bedeutung von operationellen Ansätzen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit im Luftverkehr.

- Der Betrieb von konventionellen Flugzeugen setzt am Boden und in der Luft Emissionen frei, die durch verschiedene CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte zum Strahlungsantrieb und somit zum anthropogenen Klimawandel beitragen.
- Die verschiedenen Emissionsspezies des Luftverkehrs unterscheiden sich neben ihrem Einfluss auf die Strahlungsbilanz und die Klimawirkung auch in ihrer Lebenszeit, der geografischen Ausbreitung sowie den Unsicherheiten der Effekte im aktuellen wissenschaftlichen Verständnis.
- Zur Bewertung der Klimawirkung im Luftverkehr existieren verschiedene Metriken, die sich durch den Indikator, den zugrundeliegenden Emissionsverlauf und den gewählten Zeithorizont unterscheiden. Die ATR hat sich als Indikator u. a. zur Bewertung technischer sowie betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs etabliert.
- Das Luftverkehrssystem ist mit seinen diversen Interessengruppen ein komplexes System, in dem die Auswirkungen auf die Stakeholder ebenfalls zu betrachten sind, um geeignete Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren.

3 Stand der Technik: Ansätze zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs

Auf Basis der wissenschaftlichen Grundlagen (Kapitel 2) soll in diesem Abschnitt der aktuelle Stand der Wissenschaft hinsichtlich verschiedener Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung vorgestellt werden. Zunächst werden dafür in Kapitel 3.1 die Systemgrenzen der Betrachtung definiert, bevor anschließend verschiedene Maßnahmen aus dem technischen, betrieblichen und regulatorischen Bereich vorgestellt werden (Kapitel 3.2). Anschließend wird der Fokus auf veröffentlichte Studien zur Bewertung verschiedener operationeller Mitigationsmaßnahmen gesetzt, die dazugehörigen Bewertungsmethoden erläutert und auf existierenden Ansätze zum Vergleich einzelner Maßnahmen eingegangen (Kapitel 3.3). In Kapitel 3.4 werden verschiedene Szenarien und Roadmaps zur Entwicklung der Klimawirkung des Luftverkehrs vorgestellt und in Relation zu den definierten Klimazielen gesetzt. So wird abschließend die Forschungslücke, die diese Arbeit adressiert, herausgearbeitet (Kapitel 3.5).

3.1 Systemgrenzen der Betrachtung

Bevor im Folgenden die verschiedenen Ansätze zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr erläutert und verglichen werden, sind zunächst die Systemgrenzen der Betrachtung basierend auf der Zielsetzung aus Kapitel 1.3 zu definieren. Maßnahmen und Ansätze, die außerhalb des Analysebereichs liegen, werden aus dieser Arbeit bewusst ausgeklammert.

Erstens werden solche Maßnahmen von der Untersuchung ausgeschlossen, welche auf eine Reduktion des Luftverkehrsaufkommens, beispielsweise durch Frequenzreduktion oder ein geringes Angebot an Sitzplatzkilometern, abzielen. Auch wenn diese Ansätze effektiv sind, um Kraftstoffverbrauch, Emissionsmenge und folglich Klimawirkung zu reduzieren [163, 35, 164] und gerade in der öffentlichen Debatte besonders relevant sind, können solche grundlegenden Änderungen des Luftverkehrssystems kaum einem Vergleich mit anderen Mitigationsmaßnahmen unterzogen werden. Dazu zählen zum einen Modalwechsel, die im Kurz- und Mittelstreckenbetrieb insbesondere im europäischen Kontinentalverkehr einen Wechsel auf alternative Verkehrsträger wie den Schienenverkehr beschreiben [165]. Gleiches gilt auch für eine mögliche Reduktion des Verkehrsaufkommens z. B. durch die gestiegene Nutzung von alternativen Kommunikationsmitteln wie Videotelefonie sowie digitale Konferenzen und Messen, die in der weiteren Analyse nicht betrachtet werden [166, 167]. Aktuelle Prognosen zeigen, dass der Luftverkehr trotz des steigenden Bewusstseins für Klimafolgen, insbesondere in der europäischen Bevölkerung, u. a. im Rahmen der *Fridays-For-Future*-Bewegung und der Entwicklung des Begriffs *Flugscham* [168, 169], noch immer wächst [163, 170, 10, 11]. Neben der fehlenden Bereitschaft weniger zu fliegen, liegen die wesentlichen Wachstumstreiber in der global wachsenden Mittelschicht im Allgemeinen und insbesondere der steigenden Nachfrage im asiatischen Raum [10, 11].

Zweitens soll sich im Folgenden auf solche Maßnahmen fokussiert werden, welche die Klimawirkung entlang individueller Flüge reduzieren. Die Reduktion der Klimawirkung soll dabei einem bestimmten Flug eindeutig zugeordnet werden können. Daraus folgt, dass Maßnahmen, die auf eine Reduktion der Klimawirkung am Boden abzielen, im Folgenden nicht weiter betrachtet werden. Dazu zählen beispielsweise Maßnahmen, die sowohl auf der Land- als auch auf der Luftseite von Flughäfen implementiert werden, um die Emissionen und die resultierende Klimawirkung zu reduzieren [171, 172]. Tomatis et al. (2022) und Zengerling et al. (2023) untersuchen in diesem Zusammenhang beispielsweise innovative

Schleppverfahren (z. B. *Single engine taxiing* oder *Electric towing*), die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte von Flughäfen und die Erneuerung der Gebäudeinfrastruktur an Flughäfen (u. a. durch Isolierung der Außenwände, Optimierung der Fenster und die Einführung von LED-Leuchten) [171, 158]. Obwohl diese Maßnahmen teilweise sehr hohe relative Emissions- und Klimawirkungsminderungspotentiale aufzeigen (bis zu 84 % in F-ATR100 für eine Elektrifizierung der Bodenfahrzeuge), sind die absoluten Reduktionspotentiale im Vergleich zu Maßnahmen während des Fluges als vernachlässigbar klein einzuschätzen [158]. Das liegt nicht nur an deutlich geringeren CO₂-Emissionsmengen, die am Flughafen relativ zu den Emissionen während des Fluges freierwerden, sondern auch am großen Einfluss der Nicht-CO₂-Emissionen, die insbesondere in hohen Flughöhen (z. B. H₂O oder CiC, vgl. Abb. 2.5) eine starke Wirkung auf den Strahlungsantrieb haben [158]. Des Weiteren werden solche Ansätze von einer Betrachtung ausgeschlossen, die statt auf eine Reduktion der Klimawirkung auf andere Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit, d. h. insbesondere auf eine Erhöhung der LAQ sowie eine Reduktion von Lärm, abzielen. Außerdem wird die Optimierung von Airline-Netzwerken in der folgenden Analyse nicht betrachtet. Zwar führt die Berücksichtigung der Klimawirkung in Ergänzung zum kommerziellen Nutzen in der Optimierung solcher Netzwerke zu signifikanten Mitigationspotentialen [173, 174], allerdings lässt sich die Verringerung der Klimawirkung bei diesen Ansätzen nicht mehr eindeutig individuellen Flügen zuordnen. Stattdessen wird die Reduktion der Klimaantwort im Wesentlichen durch die Veränderung von Verbindungen sowie einer veränderten Zuteilung der verfügbaren Flugzeuge zu den jeweiligen Routen erreicht, was keinen missionspezifischen Vergleich von Effektivität und Effizienz verschiedener Maßnahmen ermöglicht.

Drittens werden solche Maßnahmen von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, welche eine Kompensation der Klimawirkung außerhalb des Lufttransportsystems vornehmen. Das umfasst im Wesentlichen die Kompensation von Emissionen in anderen Bereichen und Industriesektoren, die aus dem Luftverkehrssystem finanziert werden. Als Beispiel ist hier der Erwerb von Zertifikaten zu nennen, die etwa von Passagieren im Zuge des Ticketkaufs oder durch Fluggesellschaften und Flughäfen zum Erreichen der CO₂-Neutralität erworben werden können und die Wirkung von Luftverkehrsemissionen beispielsweise durch die Förderung erneuerbarer Energien oder durch Aufforstung in Form CO₂-Senken kompensieren [175]. Darüber hinaus werden auch Aspekte zur Erhöhung der Nachhaltigkeit entlang des Lebenszyklus außerhalb der Betriebsphase aufgrund deren geringer Relevanz für die absolute Klimawirkung des Luftverkehrs ausgeklammert [87]. Dazu zählen Aspekte der nachhaltigen Materialgewinnung und Produktion sowie die Wiederverwertung zum EoL.

In der folgenden Analyse dieser Arbeit (Kapitel 3.3, ff.) wird dann der Fokus auf betriebliche Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung gelegt. Das begründet sich in der besonderen Relevanz dieser Maßnahmenkategorie in der nahen Zukunft bevor radikale technische Innovationen realisiert werden können. Technische Neuerungen benötigen aufgrund der langen Entwicklungs- und Lebenszyklen im Luftverkehrssystem üblicherweise sehr lange, bis diese auf ausreichend großer Skala implementiert sind. Darüber hinaus werden auch regulatorische Maßnahmen nicht weiter betrachtet, da diese primär die Umsetzung von Maßnahmen aus dem betrieblichen oder technischen Bereich motivieren sollen.

3.2 Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs

Die Klimawirkung des Luftverkehrs lässt sich durch drei Faktoren beeinflussen. Dazu zählt die Reduktion der Emissionsmenge, sodass geringere Veränderungen der Strahlungsbilanz

hervorgerufen werden und folglich eine geringere Klimawirkung induziert wird. Des Weiteren kann die Klimawirkung durch eine Veränderung der Emissionsarten erreicht werden, da verschiedene Spezies unterschiedlich auf das Klima wirken (vgl. Kapitel 2.3). Letztendlich kann die Klimawirkung auch durch die Ausnutzung räumlich und zeitlich variierender Klimasensitivität, d. h. die Klimaänderung, die pro Emissionseinheit hervorgerufen wird, reduziert werden.

Zur Reduktion der Klimawirkung haben sich darüber hinaus verschiedene Maßnahmenkategorien etabliert, in die sich die verschiedenen Einzelmaßnahmen einteilen lassen. Dazu zählen zum einen technische Maßnahmen, welche sich auf eine Weiterentwicklung des Flugzeugs sowie alternative Kraftstoffe wie SAF oder Wasserstoff fokussieren². Dadurch verändern sich die Emissionsspezies oder die Emissionsmengen (siehe Kapitel 3.2.1). Des Weiteren lässt sich die Kategorie der betrieblichen Maßnahmen definieren, welche auf der existierenden Weltflotte implementiert und kurzfristig im Betrieb umgesetzt werden können. Solche Maßnahmen zielen üblicherweise auf eine Verringerung der Emissionsmenge oder auf eine Veränderung der Klimasensitivität entlang der Flugrouten ab. Eine Übersicht über die verschiedenen Maßnahmen dieser Kategorie gibt Kapitel 3.2.2. Darüber hinaus existieren regulatorische Maßnahmen, die als *Implementation enablers* die Umsetzung technischer sowie betrieblicher Maßnahmen im Luftverkehrsbetrieb ermöglichen sollen. Dabei kann sowohl auf Emissionsart und Emissionsmenge als auch auf eine Verringerung der Klimasensitivität abgezielt werden (siehe Kapitel 3.2.3). Abbildung 3.1 illustriert diese Zusammenhänge.

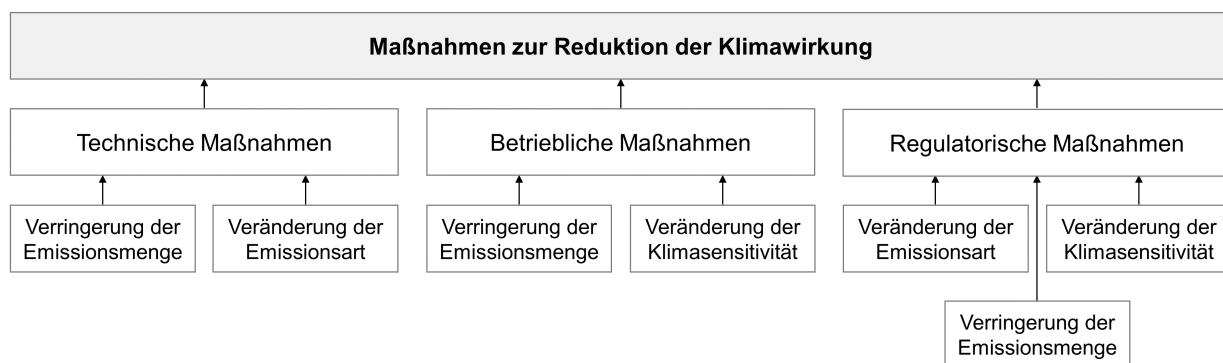


Abbildung 3.1: Übersicht verschiedener Maßnahmenkategorien zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs und die dazugehörigen Einflussfaktoren.

Während ein Großteil der analysierten Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung eindeutig einer der Kategorien technisch, betrieblich oder regulatorisch zugeordnet werden kann, sind auch Kombinationen insbesondere technischer und betrieblicher Aspekte zur Reduktion der Klimawirkung vielversprechend. Verschiedene Studien in der Literatur untersuchen beispielsweise betriebliche Maßnahmen in Kombination mit auf den veränderten Betrieb angepassten Flugzeugentwürfen [176, 68]. Demgegenüber führen regulatorische Maßnahmen üblicherweise nur in Kombination mit ihrer Umsetzung durch technische oder betriebliche Maßnahmen zu einer Reduktion der Klimawirkung. Darüber hinaus kann eine Umsetzung regulatorischer Maßnahmen beispielsweise auch durch eine Reduktion des

²Verschiedene Studien in der Literatur definieren alternative Kraftstoffe als eigenständige Maßnahmenkategorie. Da alternative Antriebe häufig mit technischen Neuerungen einhergehen, werden technische Maßnahmen und alternative Kraftstoffe im Folgenden unter dem technischen Aspekt zusammengefasst.

Luftverkehrs (z. B. durch Wechsel des Transportmodus) oder Kompensation in anderen Industriesektoren erfolgen.

3.2.1 Technische Ansätze und alternative Kraftstoffe

Zur technischen Reduktion der Klimawirkung im Luftverkehr können entweder die Emissionsmengen reduziert oder die Emissionsspezies selbst verändert werden. Die Verringerung der Emissionsmenge kann entweder durch eine Erhöhung der Kraftstoffeffizienz oder durch eine Verringerung der Emissionsmenge pro Einheit verbrannten Kraftstoffs (*Emissionsindex, EI*) erfolgen, während die Veränderung der Emissionsart im Wesentlichen durch alternative Antriebe erfolgen kann.

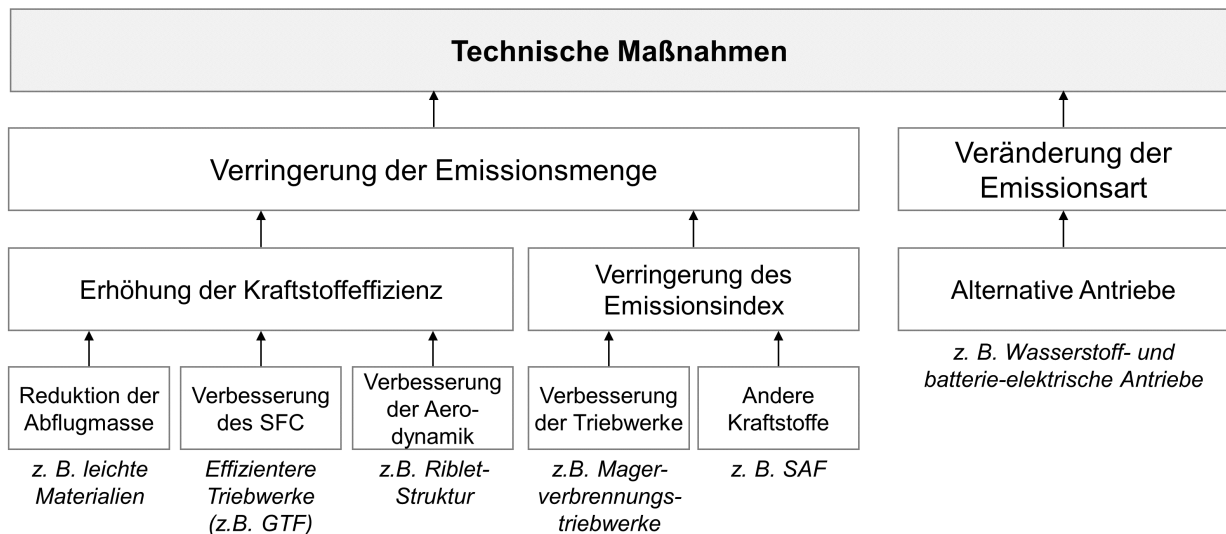


Abbildung 3.2: Technische Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung, dazugehörige Einflussfaktoren und Beispiele.

Eine **Erhöhung der Kraftstoffeffizienz**, d. h. eine Verringerung der Kraftstoffmenge, die für einen bestimmten Flug oder eine Kombination aus Flügen notwendig ist, führt bei gleichem EI zu einer geringeren Menge an Emissionen und kann folglich die Klimawirkung dieser Flüge reduzieren. Der spezifische Reichweitenfaktor (*Specific range factor, SR*) kann aus der Breguet-Reichweiten-Gleichung abgeleitet und als Kennzahl für die Kraftstoffeffizienz herangezogen werden. Diese Kennzahl beschreibt die Reichweite R , die pro Gewichtseinheit Kraftstoff m_{Fuel} zurückgelegt werden kann, und kombiniert die vier elementaren Flugleistungsparameter aerodynamische Effizienz (charakterisiert durch die Gleitzahl, d. h. das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand, *Lift over drag ratio, L/D*), Triebwerksleistung (charakterisiert durch den spezifischen Kraftstoffverbrauch, *Specific fuel consumption, SFC*), die Flugzeugmasse m sowie die Fluggeschwindigkeit v nach Formel 3.1 [177, 68].

$$SR = \frac{R}{m_{fuel}} \approx \frac{v \cdot \frac{L}{D}}{SFC \cdot m} \quad (3.1)$$

Somit kann die Kraftstoffeffizienz unter konstanten betrieblichen Bedingungen durch folgende Ansätze erhöht werden [36, 178, 68]:

- Gewichtsreduktion durch Verringerung der Betriebsleermasse (*Operating empty weight, OEW*) bzw. der Abflugmasse (*Take-off weight, TOW*) u. a. durch die Verwendung

leichterer Materialien, die Verringerung der Strukturmasse sowie leichtere Entwürfe verschiedener Flugzeugsysteme,

- Verringerung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (*Specific fuel consumption, SFC*) z. B. durch die Verwendung von Getriebefan-Triebwerken (*Gearred turbo fan*), Triebwerken mit sehr hohem Bypass-Verhältnis (*Ultra high bypass ratio*) oder verbesserte Brennkammerneffizienz, sowie
- Verbesserung der aerodynamischen Bedingungen, z. B. durch verbesserte aerodynamische Entwürfe, *Wingtips* oder *Riblets*.

Die Kraftstoffeinsparung steht in einem direkten proportionalen Verhältnis zu den Einsparungen an CO₂-Emissionen sowie der CO₂-induzierten Klimawirkung. Dieses Verhältnis kann allerdings nicht auf die Nicht-CO₂-Emissionen und deren Wirkung übertragen werden. So führen beispielsweise neuere Triebwerke mit einer höheren Antriebseffizienz zwar zu einer Verringerung der Klimawirkung von CO₂-Emissionen, verursachen andererseits aber schon bei wärmeren Temperaturen Kondensstreifen als das für Triebwerke mit geringerer Antriebseffizienz der Fall wäre [128, 50].

Zur **Verringerung der Emissionsindizes** der verschiedenen Spezies können entweder verbesserte Triebwerke oder alternative Kraftstoffe beitragen. Der Emissionsindex für Stickoxide lässt sich beispielsweise durch innovative Triebwerke oder Abgasnachbehandlung signifikant reduzieren [179, 180]. Beispielsweise zeigt eine erste Konzeptbewertung des *Water-enhanced Turbofan (WET)* signifikante Mitigationspotentiale von CO₂-, NO_x- und Kondensstreifeneffekten durch zusätzliche Dampfinjektion im Triebwerk [181]. Bei nachhaltigen alternativen Kraftstoffen (*Sustainable aviation fuels, SAF*) handelt es sich um kerosinähnliche Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen. In einer Gesamtbetrachtung führt die Verbrennung solcher Kraftstoffe, die im Herstellungsprozess die Menge an freiwerdendem CO₂ aus der Atmosphäre gebunden haben, nicht nur zu einer signifikanten Verringerung der Netto-CO₂-Emissionen sondern durch eine angepasste Zusammensetzung des Kraftstoffs auch zu veränderten Nicht-CO₂-Emissionen, was sich u. a. auf die Bildung von Kondensstreifen auswirkt [49, 45].

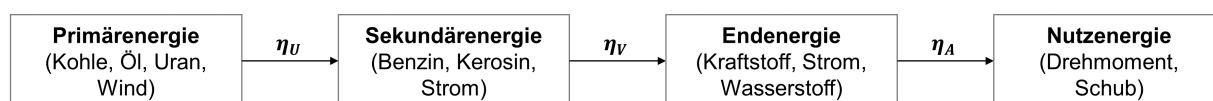


Abbildung 3.3: Energiefluss von der Primär- zur Nutzenergie [eigene Darstellung nach 182].

Durch **innovative Antriebskonzepte** kann die Art der Emissionen, die durch den Luftverkehr freigesetzt werden, verändert werden. Durch Konzepte wie beispielsweise die Verwendung von Wasserstoff (H₂) als Treibstoff in der direkten Verbrennung oder in einer Brennstoffzelle sowie durch batterieelektrische Antriebe wird die Art der Emissionen, die entlang eines Fluges auftreten, nicht nur in ihrer absoluten Menge, sondern auch in der Zusammensetzung der Spezies beeinflusst [183]. So gehen aktuelle Quellen davon aus, dass durch die direkte Wasserstoffverbrennung CO₂-Emissionen im Betrieb vollständig vermieden und NO_x-Emissionen drastisch reduziert werden können, wohingegen die Menge an Wasserdampfemissionen signifikant ansteigt [184]. In diesem Kontext ist zu beachten, dass es sich bei Wasserstoff um ein Gas handelt, welches selbst auf das Klima wirkt und bei der Verwendung leicht in die Atmosphäre entweicht [185]. Im Fall von batterieelektrischen

Antrieben können die Emissionen während des Fluges sogar vollständig vermieden werden. Bei innovativen Antriebskonzepten sowie der Verwendung neuer Kraftstoffe sind allerdings die verschiedenen Umwandlungsschritte von der Primär- zur Nutzenergie gem. Abbildung 3.3 in der Produktion sowie Transport und Lagerungen für die verschiedenen Energieträger und Kraftstoffe entlang des Lebenszyklus zu berücksichtigen [186, 187, 182].

3.2.2 Betriebliche Ansätze

Zur operationellen Reduktion der Klimawirkung kann die Emissionsmenge entweder über eine Erhöhung der Kraftstoffeffizienz oder eine Verringerung des Emissionsindex reduziert werden. Darüber hinaus kann im Betrieb die räumliche und zeitliche Varianz der Klimasensitivität der verschiedenen Nicht-CO₂-Spezies ausgenutzt werden (vgl. Abb. 3.4).

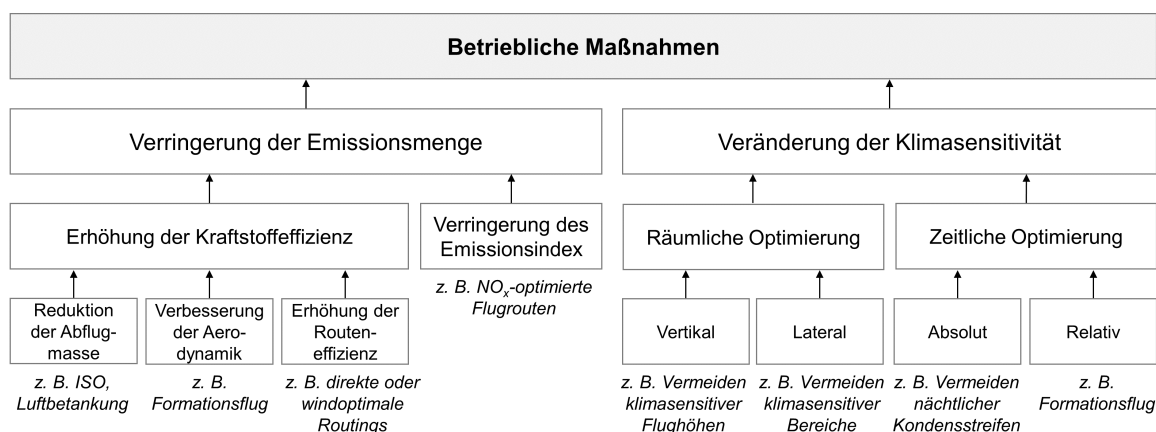


Abbildung 3.4: Betriebliche Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung, dazugehörige Einflussfaktoren und Beispiele.

Zur **Erhöhung der Kraftstoffeffizienz** kann äquivalent zu technischen Ansätzen die Abflugmasse reduziert werden. Dazu können beispielsweise innovative Tankverfahren wie Luftbetankung oder Mehrstufenbetrieb (*Intermediate stop operations, ISO*) beitragen [54, 188, 52]. Aerodynamisch kann die Kraftstoffeffizienz z. B. durch die Nutzung der Auftriebsenergie in den Wirbelschleppen eines vorausfliegenden Flugzeugs (*Leader*) mithilfe des Formationsflugs erhöht werden, sodass ein geringerer Schub entlang der Mission benötigt wird [58]. Darüber hinaus kann durch Optimierung der betrieblichen Prozesse und effizientere Routenführung, wie direkte oder windoptimierte Routen, die Missionsdistanz und somit die benötigte Kraftstoffmenge reduziert werden [55, 57]. Auch die Reduktion der Fluggeschwindigkeit sowie die optimierte Gestaltung von Steig- und Sinkphasen kann zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs beitragen [189, 190, 191]. Bei der Anwendung von Maßnahmen zur Erhöhung der Kraftstoffeffizienz, die den benötigten Kraftstoff und damit die TOW reduzieren, ist zu beachten, dass dadurch auch die optimale Flughöhe hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs durch das geringere Gewicht steigen kann. Aufgrund der Höhenabhängigkeit von Nicht-CO₂-Effekten wird somit nicht notwendigerweise eine Reduktion der absoluten Klimawirkung erreicht [52]. Die **Reduktion der Emissionsmenge** kann außerdem über eine Verringerung des Emissionsindex z. B. durch emissionsoptimierte Routen erreicht werden [192].

Eine **Reduktion der Klimasensitivität** kann durch gezielte Nutzung von räumlich und zeitlich variierenden Effekten in Abhängigkeit von den meteorologischen Randbedin-

gungen erreicht werden. So kann u. a. durch eine Reduktion der Flughöhe die Klimawirkung von Nicht-CO₂-Effekten reduziert werden oder durch kleine vertikale Verschiebungen die Bildung von Kondensstreifen vermieden werden [60, 61, 193, 65]. Auch lateral kann durch die Vermeidung besonders klimasensitiver Bereiche eine Reduktion der Klimawirkung erreicht werden. Darüber hinaus kann der Einfluss der Tageszeit auf die Klimawirkung von Kondensstreifen genutzt werden, um deren Klimawirkung zu reduzieren [133]. Ebenso können relative zeitliche Einflüsse durch die gezielte Nutzung von Sättigungseffekten mit dem Formationsflug zur Reduktion der Klimasensitivität führen [194].

Eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Studien zu verschiedenen betrieblichen Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung im Luftverkehr mit dem Fokus auf die individuellen Methoden und Ergebnisse befindet sich in Kapitel 3.3.

3.2.3 Regulatorische Maßnahmen

Da regulatorische Maßnahmen im Wesentlichen zur Unterstützung der Implementierung technischer und betrieblicher Maßnahmen sowie der Reduktion des Luftverkehrsaufkommens (z. B. durch Modalwechsel) implementiert werden, können diese auf alle Einflussfaktoren entsprechend der Maßnahmen, die sie unterstützen, einwirken. Die Erfüllung der Regularien kann durch die Umsetzung technischer oder betrieblicher Neuerungen erfolgen und somit kann mittelbar Einfluss auf die entsprechenden Faktoren zur Klimawirkungsminderung genommen werden (vgl. Abb. 3.1).

Niklaß (2019) strukturieren in diesem Kontext die zugrundeliegenden regulatorischen Ansätze (vgl. Abb. 3.5) [42]. Der Begriff regulatorischer Ansätze wird hier enger gefasst und beschreibt nur einen Aspekt der möglichen Maßnahmen der Umweltpolitik zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs. So lassen sich unter den umweltpolitischen Maßnahmen auch **freiwillige Ansätze** kategorisieren, die beispielsweise durch vertragliche Vereinbarungen umgesetzt oder durch soziale Standards motiviert werden. Auch freiwillige Selbstverpflichtungen zählen zu den Ansätzen dieser Kategorie [42]. Darunter fallen beispielsweise freiwillige Kompensationsmaßnahmen sowie die Selbstverpflichtung der ICAO-Mitgliedstaaten zur Begrenzung der CO₂-Emissionen in der Luftfahrt durch CORSIA [46]. Hierbei handelt es sich um ein Ausgleichssystem (*Offset system*), bei dem die CO₂-Emissionen durch Zertifikate, welche die Reduktion von CO₂ in Bereichen außerhalb der Luftfahrt abbilden, kompensiert werden [195]. Über Zielwerte sollen so die Netto-CO₂-Emissionen konstant gehalten bzw. reduziert werden.

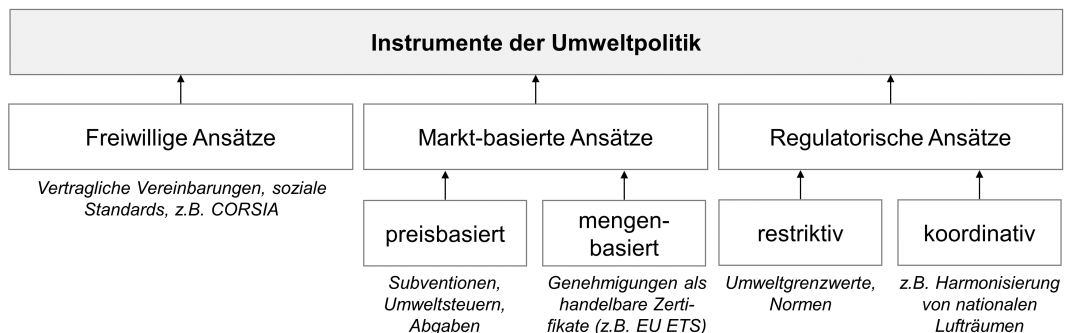


Abbildung 3.5: Regulatorische Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung, Ansätze und Beispiele [eigene Darstellung nach 42].

Markt-basierte Ansätze zielen auf die Internalisierung von ökologischen Aspekten

in die Entscheidungsfindung ab, indem finanzielle Anreize geschaffen werden [42]. Dazu zählen auf der einen Seite preisbasierte Instrumente, wie Subventionen und Steuern. Beispiele sind eine Besteuerung von Kerosin sowie Gebührensysteme, die die Emissionen oder Klimawirkung eines Fluges bepreisen [196, 197]. Nikolaß et al. (2021) stellen dazu das Konzept der Bepreisung von klimasensitiven Gebieten (*climate-charged areas, CCA*) vor, wobei insbesondere Regionen mit hoher Klimawirkung durch Nicht-CO₂-Effekte vergleichbar zu Luftraumgebühren bepreist werden und so die Umsetzung klimaoptimierter Flugrouten als betriebliche Verbesserungen auch ökonomisch motivieren [198]. Auf der anderen Seite beschreiben mengenbasierte Instrumente handelbare Eigentumsrechte (*Cap and trade system*), die beispielsweise das Recht zum Ausstoß einer bestimmten Menge an Emissionen zusichern [195]. Die festgelegte Gesamtemissionsmenge wird durch die Anzahl der verfügbaren Zertifikate vom Gesetzgeber geregelt. Die Zertifikate können frei am Markt gehandelt werden. Ein Beispiel ist das europäische Emissionshandelssystem (*EU emission trading system, EU ETS*), welches sich derzeit auf CO₂-Emissionen beschränkt [199]. Aktuelle Bestrebungen zielen aber darauf ab, auch die Nicht-CO₂-Effekte der Luftfahrt miteinzubeziehen [200, 201]. Im Gegensatz zu CORSIA, welches keine Obergrenze an Emissionen vorsieht, beschränkt das EU ETS die Gesamtmenge an CO₂-Emissionen und teilt diese den verschiedenen Emittenten zu. Für Emissionen oberhalb der individuellen Grenze sind dann Emissionszertifikate aus dem eigenen oder anderen Sektoren kommerziell zu erwerben [195]. Darüber hinaus unterscheiden sich EU ETS und CORSIA durch die geographische Ausdehnung und die dazugehörigen Ziele. Während 71 Nationen freiwillig an CORSIA teilnehmen, fordert das EU ETS eine verpflichtende Teilnahme aller Luftverkehrsgesellschaften für einen Großteil der Flüge nach, von und innerhalb von Europa [202].

Zu den **regulatorischen Ansätzen** im engeren Sinne zählen einerseits restriktive Maßnahmen, wie Umweltgrenzwerte oder Normen, z. B. die zulässigen Stickoxid-Emissionsmengen für Triebwerke [203]. Auch die mögliche wetterabhängige Sperrung von Lufträumen zur Vermeidung der Bildung von Kondensstreifen analog zu militärischen Flugverbotszonen [204] ist in diesem Bereich denkbar. Darüber hinaus existieren koordinative Regularien, die indirekt z. B. durch die Harmonisierung von Lufträumen auf Effizienzsteigerungen und damit eine Verringerung der Klimawirkung des Luftverkehrs einwirken.

3.3 Literaturübersicht: Betriebliche Mitigationsansätze und Potentiale

Der aktuelle Stand der Forschung ist durch eine Vielzahl an Einzelstudien zu betrieblichen Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs gekennzeichnet. So lassen sich die existierenden Studien nicht nur hinsichtlich des berechneten Mitigationspotentials oder der übergeordneten Maßnahmenkategorie (vgl. Abb. 3.4 sowie Kapitel 3.3.1), sondern beispielsweise auch hinsichtlich des betrachteten **Untersuchungsraums** klassifizieren. Unter anderem untersuchen Liu et al. (2021) sowie Dalmau & Prats (2015) ausschließlich Einzelmissionen und zeigen so prinzipiell die Eignung einzelner Maßnahmen wie z. B. optimierter Steigphasen [190, 205]. Gleiches gilt für die missionspezifische Untersuchung optimierter Trajektorien [206, 207] oder innovativer Betriebskonzepte [208, 209]. In anderen Studien werden Stichproben an Einzelflügen untersucht. So betrachten Mattes et al. (2020) und Yamashita et al. (2020) das Potential klimaoptimierter Trajektorien für bis zu hundert Referenzmissionen [64, 210]. Ebenso existieren Studien mit einer höheren Anzahl an betrachteten Einzelflügen, wie beispielsweise in der Analyse von Becker et al. (2022) zur Kondensstreifenvermeidung durch zeitliche Adaption oder bei Grewe et al.

(2017) im Zuge der Untersuchungen zu Trajektorienoptimierungen [133, 76]. Studien, die mehrere tausend Missionen betrachten, werden u. a. von Koch (2013) sowie Jensen et al. (2015) in deren Untersuchungen zu angepassten Flughöhen und Geschwindigkeiten durchgeführt [68, 211]. Darüber hinaus existieren Studien, die sich auf ausgewählte Lufträume oder Flughäfen fokussieren, wie z. B. die *Rhine Upper Information Region (EDUU)* in Gencoglu & Baspinar (2023) oder die Flughäfen in Paris und New York bei Thomson et al. (2013) [192, 191]. Gerade bei Untersuchungen zu innovativen Konzepten für den Langstreckenbetrieb, wie ISO oder Formationsflug, wird der Fokus bei solchen Studien häufig auf ein globales Langstreckennetzwerk gesetzt [212, 52, 58]. Studien mit sehr hohem Untersuchungsumfang analysieren vollständige globale Kataster mit zeitlichen Umfängen von einem Jahr, wie z. B. verschiedene Studien zur Anpassung der Flughöhe [60, 61, 72].

Darüber hinaus existiert der Ansatz, sich auf besonders klimaintensive Flüge im Allgemeinen oder Flüge mit hoher Kondensstreifenwirkung im Speziellen zu fokussieren [65, 133, 213]. Solche Ansätze limitieren trotz signifikanter Mitigationspotentiale die betrieblichen Auswirkungen auf eine geringe Anzahl von Flügen und können somit für die Umsetzung besonders attraktiv sein.

Des Weiteren lassen sich die veröffentlichten Analysen hinsichtlich der betrachteten **Klimametrik** bzw. Analysekenzahl charakterisieren. So fokussieren sich insbesondere ältere Studien [208, 214, 209] auf die Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der assoziierten CO₂-Emissionen. Das Gleiche gilt für eine Vielzahl der Studien, welche im Wesentlichen auf eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Allgemeinen [54, 215] oder eine effizientere Routengestaltung im Speziellen [216, 189, 57] abzielen. Im Zuge der Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekten und deren geographisch und zeitlich variierender Sensitivität werden andere Kennzahlen zur Bewertung herangezogen. Viele Studien nutzen dafür die Vorteile der ATR, wobei unterschiedliche Zeithorizonte und Hintergrundemissionen betrachtet werden [194, 63, 126]. Seltener kommen alternative Kennzahlen, wie das AGWP [133] oder der Strahlungs- bzw. Energieantrieb, zum Einsatz [61, 65, 217]. Bei Studien, welche sich auf die Vermeidung von Kondensstreifen oder eine Reduktion der assoziierten Klimawirkung beziehen, können auch spezifische Kennzahlen wie beispielsweise die Kondensstreifendistanz genutzt werden [62, 207, 206].

Analysen aus der Literatur werden im Folgenden strukturiert. Zunächst werden dabei die unterschiedlichen Studien zu betrieblichen Maßnahmen hinsichtlich des genutzten Einflussfaktors kategorisiert und die Ergebnisse, d. h. die resultierenden Mitigationspotentiale, analysiert (Kapitel 3.3.1). Eine umfassende Zusammenstellung verschiedener Studien zur wissenschaftlichen Analyse verschiedener betrieblicher Mitigationsmaßnahmen, die Studienumfang, Maßnahmenkategorie, verwendete Klimametrik und Mitigationspotential strukturiert, befindet sich in Abbildung 3.13 am Ende dieses Kapitels. Im Anschluss werden in Kapitel 3.3.2 die angewendeten Methoden zur Berechnung der Klimawirkungsminderung analysiert und systematisiert. Abschließend werden existierende Analysen zum Vergleich verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung mit dem Fokus auf den Betrieb zusammengestellt (Kapitel 3.3.3).

3.3.1 Mitigationspotentiale verschiedener betrieblicher Maßnahmen

Zur Reduktion der Klimawirkung durch die Verringerung der Emissionsmenge (vgl. Abb. 3.4) fokussiert sich die Literatur auf eine Erhöhung der Kraftstoffeffizienz, was entweder durch eine Reduktion der Masse, optimierte aerodynamische Bedingungen oder eine verbesserte Routenführung erreicht werden kann.

Zur betrieblichen **Reduktion der Abflugmasse** liegt der Fokus in der Literatur auf innovativen Tankverfahren, wie ISO oder Luftbetankung (*Air to air refueling*). Durch eine oder mehrere Zwischenlandungen zum Tanken im ISO wird insgesamt weniger Kraftstoff zum Transport des Kraftstoffs selbst benötigt (*Fuel-for-fuel*-Effekte), sodass die Abflugmasse und der Gesamtkraftstoffverbrauch reduziert werden können. Das Reduktionspotential für ausgewählte Beispielmissionen im Langstreckenbetrieb wird von Filippone (2008) und Hahn (2007) auf 16 % bis 17 % hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen geschätzt [209, 208]. Umfangreichere Studien wie z. B. von Poll (2011), Linke et al. (2017), und Alvarez (2021), die einen umfassenden Langstreckenflugplan analysieren, quantifizieren die Reduktion von Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen mit 1 % bis 6 % [188, 52, 212]. Eine Betrachtung des integrierten Mitigationspotentials zeigt allerdings, dass die Klimawirkung durch die Veränderung des Emissionsorts kaum reduziert bzw. sogar leicht erhöht wird [212, 52]. Das Konzept der Luftbetankung führt in Studien mit unterschiedlichem Untersuchungsraum von Morscheck (2014) und Nangia (2007, 2015) zu Kraftstoff- und CO₂-Reduktionspotentialen zwischen 10 % für ein globales Szenario an einem Einzeltag und 47 % für eine lange Einzelmission [215, 214, 54].

Darüber hinaus kann durch die Verbesserung der **Routeneffizienz** der Kraftstoffverbrauch und folglich die Emissionsmenge reduziert werden. Für eine Optimierung des Steigflugs zeigen diverse Studien Kraftstoffreduktions- bzw. Klimawirkungsminderungspotentiale bis zu 1 % in Relation zur Gesamtmission [190, 205, 216] sowie bis zu 51 % bei Betrachtung der entsprechenden Segmente an ausgewählten Flughäfen [191]. Für die Nutzung direkter Routenführung, wie sie durch *Free route airspaces (FRA)* ermöglicht wird, quantifizieren Gencoglu & Baspinar (2023) eine Reduktion der Klimawirkung in p-ATR20 zwischen 19 % und 23 % [192]. Für die Optimierung von Flugrouten hinsichtlich der Windsituation können Kraftstoffverbrauch und Klimawirkung zwischen 4 % und 22 % reduziert werden [57, 192]. Edwards et al. (2016) analysieren die Erhöhung der Kraftstoffeffizienz durch Geschwindigkeitsreduktion und identifizieren eine Verringerung der CO₂-Emissionen um 1 % für eine repräsentative Mission [189]. Durch die räumliche und geschwindigkeitsbezogene Optimierung von Routen unter Berücksichtigung der NO_x-Emissionsmenge bei Gencoglu & Bapsinar (2023) wird die Klimawirkung zwischen 22 % und 27 % für einen ausgewählten Luftraum reduziert [192].

Zur betrieblichen Verringerung der Klimawirkung durch die Nutzung zeitlich und räumlich variierender Klimasensitivität der Atmosphäre kann beispielsweise eine **Veränderung der Flughöhe** vorgenommen werden. Hier ist eine generelle Reduktion der Flughöhe zur Nutzung geringerer Klimawirkung in niedrigeren Höhen (vgl. Abb. 2.5) und eine vertikale Vermeidung von besonders klimasensitiven Gebieten, insbesondere ISSRs, in denen sich Kondensstreifen bilden, zu unterscheiden. Fichter et al. (2005), Frömmling et al. (2012) und Matthes et al. (2021) untersuchen eine generelle Verringerung der Emissionshöhen und identifizieren markante Mitigationspotentiale zwischen 10 % und 45 % für umfassende Flugpläne [218, 61, 60]. Schumann (2011) und Teoh et al. (2020) stellen fest, dass bereits geringe Höhenveränderungen von ± 2.000 Fuß zu einer signifikanten Vermeidung von Kondensstreifen und damit einer Reduktion der entsprechenden Klimawirkung zwischen 40 % und 60 % führen [72, 65]. Eine Erweiterung dieses Konzepts kann durch eine Kombination der **Höhenänderung mit Geschwindigkeitsanpassung** erfolgen. Höherer Luftwiderstand, Kraftstoffverbrauch und damit assoziierte CO₂-Emissionen auf tieferen Flugflächen können durch eine Reduktion der Geschwindigkeit teilweise kompensiert werden. Studien von Koch (2013), Jensen et al. (2015) und Dahlmann et al. (2016) identifizieren je nach betrachteter Kennzahl Reduktionspotentiale von bis zu 2 % des Kraftstoffverbrauchs bzw.

bis zu 62 % der ATR [68, 66, 211]. Durch **zeitliche Anpassungen** von Trajektorien können mit der Tageszeit variierende Effekte von Kondensstreifen genutzt werden. Becker et al. (2022) quantifizieren eine Reduktion des AGWPs von 43 % für ausgewählte Flüge mit besonders hoher Kondensstreifenwirkung [133].

Durch die integrierte **Optimierung von Trajektorien** können vertikal, lateral und zeitlich variierende Klimasensitivitäten gleichzeitig berücksichtigt werden. Die Zielfunktion einer solchen Optimierung kann beispielsweise durch eine Minimierung der Klimaaantwort unter der Berücksichtigung der jeweiligen Wettersituation entlang des Fluges erfolgen. Lührs et al. (2016, 2021), Grewe et al. (2017), Matthes et al. (2017, 2020) und Yamashita et al. (2020) führen solche integrierte Optimierungen durch und zeigen signifikante Mitigationspotentiale zwischen 10 % und 76 % für Stichproben mit mehreren hundert Flügen, die teilweise repräsentativ für große Teile des Luftverkehrs sind [219, 76, 220, 210, 64, 63]. Andere Ansätze der Trajektorienoptimierung fokussieren speziesspezifische Effekte, wie z. B. CiC oder NO_x . Hinsichtlich der Vermeidung von Kondensstreifen und deren Klimawirkung identifizieren Klima (2005), Campbell (2009), Hendricks (2015) und Yin et al. (2018) besonders hohe Reduktionspotentiale zwischen 28 % und 100 % [221, 207, 206, 62]. Bei einer Optimierung hinsichtlich der NO_x -Effekte werden Reduktionspotentiale zwischen 0,5 % und 20 % für O_3 bei Rao et al. (2022) und 25 % bis 80 % für O_3 und CH_4 bei Castino et al. (2021) bestimmt [217, 126]. Eine Realisierung solcher optimierter Flugtrajektorien kann beispielsweise durch optimierte Track-Systeme wie das nordatlantische Spursystem (*North atlantic track system, NATS*) erreicht werden. Kandur (2019) identifiziert für eine solche Anpassung des NATS Mitigationspotentiale zwischen 1,6 % und 6 % [222].

Integrierte Ansätze adressieren mehr als einen Einflussfaktor (vgl. Abb. 3.4). So adressiert der Formationsflug neben der höheren Kraftstoffeffizienz durch verbesserte Aerodynamik auch die Nutzung von Sättigungseffekten, insbesondere bei Kondensstreifen. Dahlmann et al. (2020) und Marks et al. (2021) zeigen ein Mitigationspotential von 22 % bis 24 % [194, 58]. Ein weiteres Beispiel ist das klimaoptimierte ISO-Konzept, welches neben der Zwischenlandung zum Auftanken auch die Veränderung der Flughöhe sowie die Auswahl des Zwischenlandeflughafens nach klimaoptimierten Kriterien vornimmt und in Kapitel 5.2.2 als Ergänzung zum kraftstoffoptimierten Konzept entwickelt wird.

Zusammenfassend kann eine breite Streuung der betrachteten Maßnahmen hinsichtlich Kategorie bzw. Einflussfaktor, Mitigationspotential und der analysierten Metrik festgestellt werden (vgl. Abb. 3.13). Es zeigt sich, dass Studien mit geringem Umfang, beispielsweise mit dem Fokus auf Einzelmissionen, zum Teil sehr hohe Mitigationspotentiale aufweisen, während bei größerem Studienumfang geringere Potentiale beobachtet werden. Am Beispiel des ISO lässt sich der Zusammenhang durch die unterschiedlichen Charakteristika der Referenzfälle begründen. Während für die Beispielmision ein Flug mit sehr langer Strecke gewählt wird, um die Wirkung der Maßnahme zu verdeutlichen [209], enthalten größere Stichproben auch Missionen kürzerer Distanz [52], bei welchen die Mitigationspotentiale geringer ausfallen. Das kann analog auf weitere Studien und Maßnahmen übertragen werden. Des Weiteren weist die integrierte Trajektorienoptimierung besonders hohe Mitigationspotentiale auf, da verschiedene Ansätze zur Minderung der Klimawirkung kombiniert werden. In diesem Kontext existieren Maßnahmen, bei denen eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs nicht zu einer Reduktion der Klimawirkung führt, da der Anstieg der Nicht- CO_2 -Effekte, z. B. durch veränderte Emissionsorte, die Reduktion der CO_2 -Effekte überkompensiert. Darüber hinaus zeigt die Analyse der Literatur, dass die Minderung von Kondensstreifeneffekten durch betriebliche Maßnahmen besonders vielversprechend ist. Während CO_2 - und NO_x -Effekte durch betriebliche Maßnahmen reduziert werden können, kann durch die Ver-

meidung von ISSRs auf einzelnen Routen die Bildung von Kondensstreifen und die damit induzierte Klimawirkung vollständig vermieden werden.

3.3.2 Kategorisierung und Vergleich der angewendeten Methoden

Neben einer ergebnisorientierten Strukturierung der Literatur lassen sich die Studien zur betrieblichen Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr auch hinsichtlich der angewendeten Methodik unterteilen. Dazu wird sich im Folgenden an der am DLR-Institut für Luftverkehr (DLR-LV) sowie am Institut für Lufttransportsysteme (ILT) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) etablierten Modellkette zur Bewertung der Klimawirkung des Luftverkehrs orientiert, welche in Abbildung 3.6 dargestellt ist. Im Folgenden werden die Aspekte Trajektoriensimulation, Emissionsrechnung und Klimabewertung sowie die gewählte Ergebnisdarstellung für die veröffentlichten Studien analysiert und strukturiert.



Abbildung 3.6: Modellkette zur Bewertung von Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs.

Methoden der Trajektoriensimulation

Bei der Trajektoriensimulation zur Flugleistungsrechnung lassen sich die verwendeten Modelle in der Literatur hinsichtlich der Komplexität wie folgt unterteilen (siehe Abb. 3.7):

- Vereinfachte analytische Gleichungen z. B. auf Basis der Breguet-Reichweiten-Formel (*Breguet range equation*) [208, 54],
- Verwendung von präproduzierten Datensätzen wie z. B. reduzierter Emissionsprofile (*Reduced emission profiles, RedEmP*), welche durch Interpolation eine Abschätzung von Kraftstoffverbrauch und Emissionsmengen in Studien mit großem Missionsumfang effizient möglich machen [52, 223], sowie
- Trajektorienrechner, die eine detaillierte Missionssimulation mit vorhandenen Flugleistungsdaten durchführen können. Beispiele hierfür sind das *Trajectory Calculation Module (TCM)* des DLR-LV sowie AirTraf der TU Delft und das *Trajectory Generation Tool (TGT)* der Technischen Universität Istanbul [52, 126, 192], die allesamt auf dem Gesamtenergieansatz (vgl. Kapitel 4.2.1) beruhen.

Bezüglich der verwendeten Flugleistungsgrößen, die die flugzeugspezifischen Charakteristika wie Geschwindigkeiten (*Speed schedule*), Widerstand, Schub und Kraftstoffverbrauch definieren, wird in einer Vielzahl der Studien auf die Datenbank *BADA (Base of aircraft data)* in den Versionen 3 oder 4 gesetzt [192, 65, 217]. Alternativ werden auch Daten aus dem Flugzeugentwurf verwendet [224, 68, 66].

Auch hinsichtlich der Modellierungsannahmen unterscheiden sich die verschiedenen Studien (vgl. Abb. 3.7). Während einige Studien von Internationaler Standardatmosphäre (*International standard atmosphere, ISA*) ausgehen [223, 66], berücksichtigen andere Studien die jeweilige Wetterlage entlang des Fluges und können somit auch Windeffekte im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch und die resultierenden Emissionsmengen berücksichtigen

[65, 55, 57]. Eine vereinfachte Berücksichtigung von atmosphärischen Informationen kann alternativ über repräsentative oder mittlere Atmosphärendaten sowie statistische Windfelder erfolgen [225, 226]. Darüber hinaus kann die detaillierte Routenführung in Form von drei- oder vierdimensionalen Punktprofilen berücksichtigt werden [67, 65], wobei gerade Studien mit einem großen Verkehrsumfang häufig vereinfacht Großkreisverbindungen annehmen [223, 52]. Weitere Unterschiede gibt es beispielsweise bei der Berücksichtigung von kraftstoffoptimalen Zwischensteigflügen (*Step climbs*) oder des Kostenindex (*Cost index, CI*), über den die Fluggeschwindigkeit optimiert werden kann.

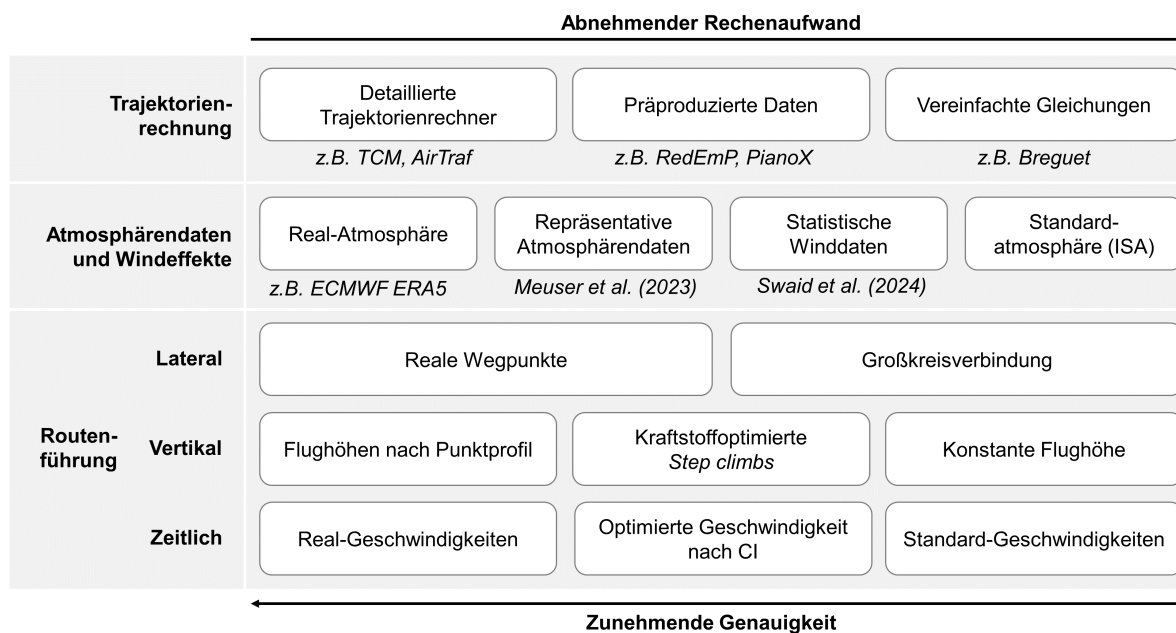


Abbildung 3.7: Methoden und Modelle zur Trajektorienrechnung.

Methoden der Emissionsrechnung

Bei der Emissionsrechnung kann zwischen der Emissionsrechnung entlang einzelner Trajektorien sowie der Bestimmung georeferenzierter Emissionskataster unterschieden werden. Auch die berücksichtigten Spezies unterscheiden sich je nach Studie. Methodisch kommen hier für CO₂ und Wasserdampf üblicherweise konstante Emissionsindizes zum Einsatz, die die Emissionsmenge direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch ins Verhältnis setzten (vgl. Kapitel 2.3). Für Emissionsmengen der übrigen Spezies, wie NO_x, CO und HC, die nicht proportional zum Kraftstoffverbrauch angenommen werden, haben sich sogenannte Kraftstoffflusskorrelationsmethoden (*Fuel flow correlation methods, FFM*s) etabliert, wobei in Boeing- und die DLR-Methode unterschieden werden kann [227, 228, 229].

Methoden der Klimabewertung

Zur Bestimmung der Klimawirkung lassen sich die existierenden Ansätze nach den berücksichtigten Einflussdimensionen kategorisieren (vgl. Abb. 3.8). Zunehmende Genauigkeit durch die Berücksichtigung weiterer Dimensionen geht in diesem Zuge aber auch mit einer Steigerung des Rechenaufwands sowie größerer Modellkomplexität einher.

Einfache Ansätze berechnen die Klimawirkung aus einem direkten proportionalen Zusammenhang mit der Emissionsmenge. Während dieser Zusammenhang für CO₂-Effekte

als hinreichend genau angenommen werden kann (vgl. Kapitel 2.3), bedeutet das für Nicht-CO₂-Emissionen eine starke Vereinfachung, da orts- und zeitabhängige Aspekte nicht berücksichtigt werden. So bewerten einige Studien ausschließlich das Einsparpotential an CO₂-Emissionen [74, 209] oder sowohl CO₂ als auch NO_x-Emissionen [191]. Eine kombinierte Betrachtung unterschiedlicher Emissionsspezies kann beispielsweise durch CO₂-Äquivalente (vgl. Kapitel 2.4.1) erfolgen. Hierzu können konstante CO₂e für Nicht-CO₂-Spezies aus der Literatur entnommen werden (z. B. nach Tabelle 3.1) [150]. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das vereinfachte Klimaantwort-Modell (*Climate response model*) LinClim, bei welchem der Strahlungsantrieb einzelner Emissionsspezies über die Emissionsmenge und das Verhältnis zu einem Referenzstrahlungsantrieb skaliert wird [230].

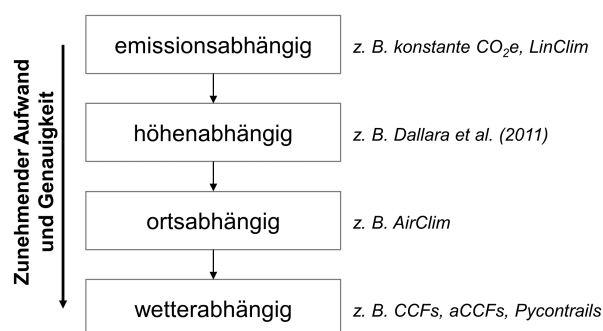


Abbildung 3.8: Methoden und Modelle zur Bewertung der Klimawirkung [eigene Darstellung, angelehnt an 42].

	CO ₂ e
CO ₂	1,0
NO _x	1,2
CiC	1,0
H ₂ O	0,2
Gesamt	3,4

Tabelle 3.1: Konstanten CO₂-Äquivalente in ATR100 für verschiedene Emissionsspezies [150].

Nach Abbildung 2.7 vernachlässigen solche einfachen Faktoren allerdings stark die Höhenabhängigkeit von Nicht-CO₂-Effekten. Zu diesen Zwecke wurden Modelle entwickelt und angewendet, die zur Bewertung den mit der Flughöhe variierenden Strahlungsantrieb berücksichtigen [70, 231, 232]. Solche vereinfachten Ansätze basieren üblicherweise auf umfassenden Simulationen mit komplexen Klimamodellen.

Die ortsabhängigen Bewertungsansätze berücksichtigen neben der Höhenabhängigkeit auch den Ort der Emissionen, wobei insbesondere der Breitengrad starken Einfluss auf die Klimawirkung nimmt (vgl. Abb. 2.7). Bei der Bildung von Kondensstreifen können allerdings auch längengradabhängige Effekte relevant sein. Im Zuge einer solchen klimatologischen Betrachtung, die von einer durchschnittlichen Wettersituation ausgeht, wird die tatsächliche meteorologische Situation entlang der Mission vernachlässigt. Folglich werden z. B. ISSRs, in denen sich Kondensstreifen bilden, durch einen jährlichen Durchschnittswert repräsentiert. Beispielhaft ist hier das nicht-lineare Klimaantwort-Modell AirClim [112, 116]

zu nennen, welches in einer Vielzahl von geographisch und zeitlich umfangreichen Studien verwendet wurde [52, 66].

Bei der wetterabhängigen Betrachtung wird die Klimawirkung der Emissionen nicht nur in Abhängigkeit vom Ort betrachtet, sondern auch der Zeitpunkt der Emission und damit die tatsächlichen meteorologischen Bedingungen berücksichtigt. Als Beispiele sind hier komplexe Klimachemiemodelle, wie z. B. *EMAC (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Hamburg (ECHAM)/Modular Earth Submodel System (MESSy) Atmospheric Chemistry)* zu nennen [233]. In Studien zur Bewertung der Potentiale verschiedener Mitigationsmaßnahmen werden aus Effizienzgründen häufig abgeleitete Antwortflächen in Form von Klimawirkungsfunktionen (*Climate change functions, CCFs*) bzw. algorithmischen Klimawirkungsfunktionen (*Algorithmic climate change functions, aCCFs*) verwendet [234, 235]. Solche vereinfachten Modelle finden aufgrund des geringen Rechenaufwands insbesondere in Studien zur Trajektorienoptimierung Anwendung [192, 63, 76]. Ein weiteres Modell zur wetterabhängigen Berechnung der Klimawirkung ist *pycontrails*, welches auf dem DLR-Modell zur Vorhersage von Kondensstreifen CoCiP (*Contrail Cirrus Prediction Tool*) beruht [236, 237, 65]. Die Klimawirkung von Kondensstreifen wird entlang der Flugtrajektorien unter Berücksichtigung der Wettersituation bestimmt. Folglich kommt das Modell insbesondere in Studien mit dem Fokus auf Kondensstreifen zum Einsatz [65, 133].

Ergebnisdarstellung

Neben Unterschieden in betrachteten Metriken (vgl. Abb. 3.13) unterscheiden sich die Studien im aktuellen Stand der Literatur auch hinsichtlich der Darstellung der Ergebnisse. Während ein Großteil der Studien das maximale Mitigationspotential durch die Implementierung der Maßnahme bestimmt, wird insbesondere im Bereich der Trajektorienoptimierung das Mitigationspotential häufig unter Berücksichtigung von Stakeholdereffekten in Form von Paretofronten dargestellt. Das bedeutet, dass nicht das maximal mögliche Potential durch die Maßnahmenimplementierung ausgewiesen wird, sondern das Potential bestimmt wird, was unter Beschränkung von zusätzlichem Kraftstofffluss oder Betriebskosten möglich ist [63, 238, 239].

3.3.3 Vergleich verschiedener Maßnahmen

Im Gegensatz zur Vielzahl an maßnahmenindividuellen Einzelstudien existieren nur wenige Studien, die die Mitigationspotentiale verschiedener Maßnahmen miteinander vergleichen. Eine Übersicht hinsichtlich Methode, Umfang der Maßnahmen sowie analysierte Kennzahlen gibt Tabelle 3.2.

Ältere Studien wie Green (2005) sowie Langhans et al. (2010, 2013) stellen dabei zwar verschiedene Maßnahmen vor, beschränken sich bei der Betrachtung allerdings auf Reduktionen des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Effekte [240, 74, 53]. Während Green bei seiner Betrachtung von technischen und betrieblichen Maßnahmen keinen direkten Vergleich vornimmt, stellen Langhans et al. verschiedene betriebliche Maßnahmen qualitativ gegenüber [240, 74, 53].

Marais et al. (2013) identifizieren 61 betriebliche Mitigationsmaßnahmen am Boden, in An- und Abflug sowie während des Reiseflugs [241]. Die Bewertung erfolgt durch eine subjektive Einteilung im Zuge von Interviews. Die Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen auf die Umweltaspekte Kraftstoffverbrauch, Klimawirkung, LAQ und Lärm werden hinsichtlich primärem oder sekundärem Beitrag bzw. neutralem und nachteiligem Einfluss eingeteilt. Darüber hinaus wird die Einfachheit der Umsetzung (einfach, mittel

Studie	Jahr	Referenz	Quantitativer Vergleich	Maßnahmenanzahl	Unterschiedlichkeit der Maßnahmen	Bewertung des Kraftstoffverbrauch	Bewertung der Klimawirkung	Bewertung der Stakeholdereffekte
Green	2005	[53]	nein	mittel	hoch	◐	○	◐
Langhans et al.	2010, 2013	[240, 74]	nein	mittel	hoch	◐	○	◐
Marais et al.	2013	[241]	nein	hoch	hoch	◐	◐	◐
Koch, Dahlmann et al.	2013, 2016	[68, 66]	ja	gering	gering	●	●	◐
Grewe et al.	2017	[76, 75]	teils	hoch	hoch	◐	◐	◐
Teoh et al.	2020	[65]	ja	gering	mittel	◐	●	○
Becker et al.	2022	[133]	ja	gering	gering	◐	●	◐
Gencoglu & Baspinar	2023	[192]	ja	gering	gering	●	●	◐
Zengerling et al.	2023	[242]	ja	mittel	mittel	●	●	◐
Zengerling et al.	2023	[158]	teils	hoch	hoch	◐	◐	◐

Tabelle 3.2: Literaturübersicht zu Vergleichen betrieblicher Maßnahmen im Luftverkehr (● Vollumfassende quantitative Berücksichtigung, ◐ eingeschränkte quantitative Berücksichtigung, ◑ semi-quantitative Berücksichtigung, ○ rein qualitative Berücksichtigung, ○ keine Berücksichtigung).

oder schwer) sowie die Auswirkungen auf das Luftverkehrssystem (stark, moderat oder schwach) kategorisiert. Die Ergebnisse werden in Tabellenform semi-quantitativ dargestellt [241].

Quantitative Studien fokussieren sich überwiegend auf den Vergleich von zwei oder drei Maßnahmen mit ähnlichen Adaptionsmechanismen, die für den ausgewählten Studienumfang mit der selben Bewertungsmethode analysiert werden. Als Beispiele sind hier Koch (2013) und Dahlmann et al. (2016) zu nennen, die verschiedene Kombinationen aus angepassten Flugzeugen und Geschwindigkeiten sowie Anpassungen im Flugzeugentwurf im Hinblick auf die Klimawirkung sowie die Betriebskosten quantitativ analysieren [68, 66]. Teoh et al. (2020) sowie Becker et al. (2022) analysieren verschiedene Strategien zur Vermeidung von Kondensstreifen, wobei insbesondere die vertikale Anpassung hohe Effektivität verspricht [65, 133]. Gencoglu & Baspinar (2023) untersuchen im Rahmen des Projekts ClimOP drei verschiedene Routing-Strategien hinsichtlich der Klimawirkung sowie der Auswirkungen auf die Stakeholder im Bereich Betriebskosten sowie Luftraumkomplexität und Sicherheit [192]. Das höchste Potential identifizieren sie für eine Zielfunktion, die neben Kraftstoffverbrauch und Reisezeit auch die NO_x -Emissionsmengen berücksichtigt [192].

Grewe & Linke (2017) sowie Grewe et al. (2017) untersuchen im Rahmen des DLR-Projektes WeCare ebenfalls verschiedene technische und betriebliche Maßnahmen zur Minimierung der Klimawirkung des Luftverkehrs [76, 75]. Dazu zählen u. a. öko-effiziente Flugrouten und der Mehrstufenbetrieb. Ein Vergleich der verschiedenen Maßnahmen erfolgt se-

mi-quantitativ in Form eines Netzdiagramms anhand der Kriterien Klimawirkung, Öko-Effizienz (*Eco-efficiency*), Investitions- und Betriebskosten sowie des möglichen Implementierungsstarts (vgl. Abb. 3.9). In diesem Kontext wird die hohe Öko-Effizienz von Flughöhen- und Geschwindigkeitsanpassungen sowie wetteradaptierter Flugrouten gezeigt. Ein direkter quantitativer Vergleich ist aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen wie Investitionskosten und möglicher Eintrittszeitpunkte nicht direkt möglich. Allerdings kann die multikriterielle Darstellung als Basis für Entscheidungsprozesse verwendet werden [76, 75].

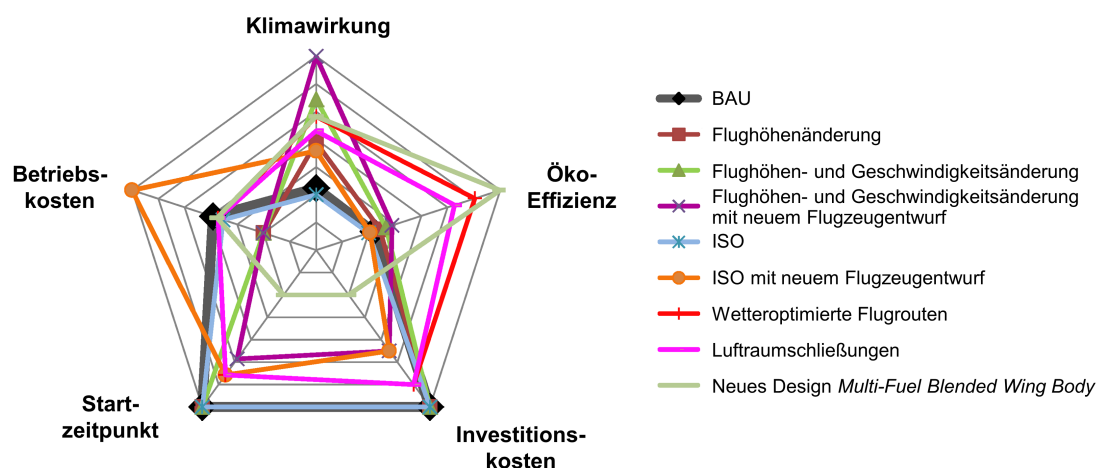


Abbildung 3.9: Multidimensionaler Vergleich verschiedener Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung aus dem Projekt WeCare [eigene Darstellung nach 76, 75].

Im Rahmen des EU-Horizon-Projektes ClimOP (vgl. Anhang A) stellen die Studien von Zengerling et al. (2023) erstmals einen quantitativen Vergleich einer Vielzahl von unterschiedlichen Maßnahmen zur betrieblichen Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs am Boden und in der Luft vor [158]. Statt einzelne Studien für einen gemeinsamen Referenzfall zu vergleichen, werden die Ergebnisse von individuellen Fallstudien im Rahmen des Projektes auf ein vergleichbares Luftverkehrsszenario unter Berücksichtigung von Unterschieden des betrachteten Verkehrsaufkommens sowie regional variierender Nicht-CO₂-Effekte skaliert. So können die verschiedenen Maßnahmen innerhalb ihrer Kategorie hinsichtlich Mitigationspotential und Kostenveränderung beurteilt werden. Das Konsortium identifiziert hier besonders hohe Mitigationspotentiale für die Maßnahmen während des Fluges im Vergleich zu bodengebundenen Ansätzen, denen ein geringerer Reifegrad und höhere Kosten gegenüberstehen. Ein kategorienübergreifender Vergleich der betrachteten betrieblichen Verbesserungen am Boden und in der Luft verbleibt aber semi-quantitativ (vgl. Anhang A). Darüber hinaus vergleichen Zengerling et al. (2023) in diesem Projektkontext ausgewählte Beispielmmissionen für einen repräsentativen Wintertag hinsichtlich Veränderungen in Klimawirkung und Betriebskosten [242]. Hier zeigen sich besonders hohe Mitigationspotentiale für klimaoptimierte Flugrouten, während der Mehrstufenbetrieb für die vier betrachteten Missionen keine Reduktion der Klimawirkung aufzeigt. Durch niedrigere Flughöhen kann in einzelnen Beispielen sowohl eine Reduktion der Betriebskosten als auch der Klimawirkung erzielt werden. Die Erkenntnisse für die vorgestellten Routen sind aufgrund des geringen Stichprobenumfangs und der spezifischen Wettersituation jedoch nicht repräsentativ [242]. Auf diesen Analysen basieren Methodik und Ergebnisse in den folgenden Kapiteln dieser Arbeit (vgl. Kapitel 4 ff.).

3.4 Maßnahmenzenarien und Roadmaps

Über die Bewertung von Einzelmaßnahmen und deren Vergleich hinaus haben sich in der Literatur Ansätze zur Bewertung von Szenarien, die sich aus einer Kombination von mehreren Maßnahmen und der Betrachtung des gesamten Luftverkehrsszenarios ergeben, entwickelt. Ziel solcher Studien ist, die Veränderung der Klimawirkung des Luftverkehrs oder ihrer Emissionsmengen zu analysieren und mit den definierten Klimazielen, wie beispielsweise dem 2°-Ziel des Pariser Abkommens oder dem Netto-Null-Ziel der IATA, zu vergleichen. Neben den Annahmen für die Szenariendefinition und die berücksichtigten Maßnahmen kann auch hinsichtlich der berücksichtigten Klimawirkungsspezies (d. h. CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte) sowie der Richtung der Vorgehensweise unterschieden werden. Hier existiert einerseits der sogenannte *Bottom-up*-Ansatz, der ausgehend von den zu bestimmten Zeitpunkten zu erwartenden verfügbaren Technologien und Konzepten die mögliche Veränderung in der gewählten Kennzahl über die Zeit bestimmt. Andererseits kann mittels eines *Top-down*-Ansatzes bestimmt werden, welche Maßnahmen zu welchem Zeitpunkt mit welchem Effekt realisiert werden müssen, um ein definiertes Klimaziel zu erreichen. Eine Auswahl an solchen Studien zur Szenariobewertung ist in Tabelle 3.3 dargestellt. Die Abbildungen 3.10 - 3.12 stellen detailliert drei ausgewählte Szenarien dar.

Studie	Jahr	Referenz	Szenarien	Nicht-CO ₂ -Effekte	Top-Down-Ansatz	Bottom-up-Ansatz
Bergero et al.	2023	[243]	Kombination der Kohlenstoffintensität sowie der Nachfrage- und Energieintensität	ja	ja	nein
Dray et al.	2023	[244]	Neuartige Kraftstoffe in Kombination mit Effizienzsteigerung und Kondensstreifenvermeidung	ja	nein	ja
Grewe et al.	2021	[2]	Verschiedene Bottom-up- und Top-down-Szenarien	ja	ja	ja
Leipold et al.	2021	[245]	Verschiedene Entwicklungsszenarien des Luftverkehrs	ja	nein	ja
Ploetner et al.	2017	[246]	Verschiedene Maßnahmen zur Kraftstoffeffizienzsteigerung	nein	nein	ja
Schilling et al.	2016	[247]	Verschiedene Maßnahmen zur Kraftstoffeffizienzsteigerung	nein	nein	ja

Tabelle 3.3: Studien zur Kombination verschiedener Maßnahmen in Szenarien.

Zum Beispiel analysieren Bergero et al. (2023) mögliche Pfade zur Erreichung von Netto-Null-CO₂-Emissionen bis 2050 sowie die Erreichung von Netto-Null-Treibhausgasen bis 2100 in einem Top-Down-Ansatz, wobei insbesondere die Reduktion der Luftverkehrsnachfrage, technologische Effizienzsteigerungen und der Einsatz innovativer Kraftstoffe untersucht werden [243]. Die verbleibende Kompensation zum Netto-Null-Ziel muss durch die Beseitigung von Emissionen aus der Atmosphäre erreicht werden. Unterschiedliche Kohlenstoff-Szenarien (kohlenstoffintensiv, reduzierte fossile Brennstoffe und Netto-Null) sowie die

Nachfrage- und Energieintensitätsszenarien (BAU, Industrievorhersage und ambitionierte Reduktionen) werden hinsichtlich CO₂-Emissionen und CO₂-Äquivalenten betrachtet (vgl. Abb. 3.10). Die Studie identifiziert Reduktionspotentiale von bis zu 61 % durch Nachfrageverringering bzw. 27 % in CO₂e durch Verbesserungen der Energieeffizienz. Allerdings verbleibt je nach Szenario auch ein großer Anteil, der durch nachhaltige Kraftstoffe und Kompensationen außerhalb des Luftverkehrssektors zu mitigieren ist [243].

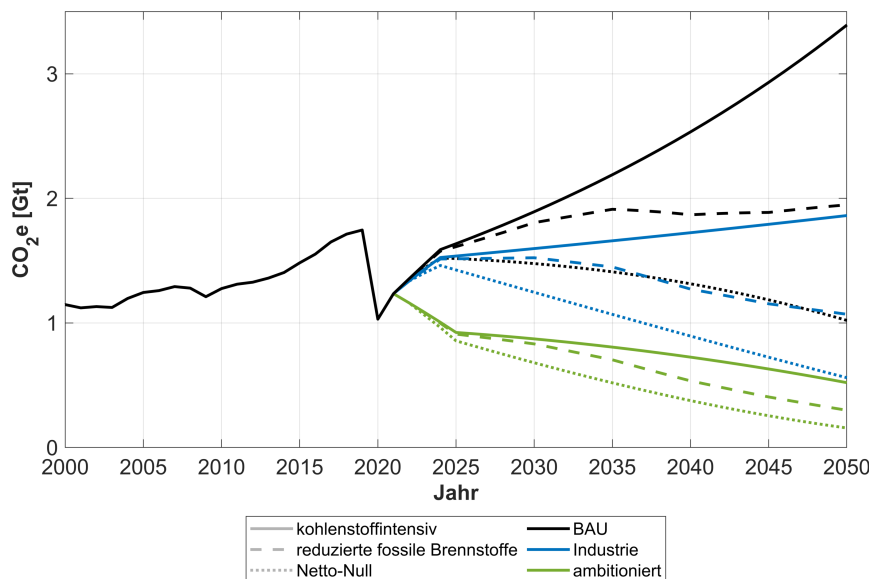


Abbildung 3.10: Szenarien zur Entwicklung der Klimawirkung des Luftverkehrs durch Kombination verschiedener Kohlenstoff-, Nachfrage- und Energieintensitätsszenarien [eigene Darstellung nach 243].

Dray et al. (2022) untersuchen verschiedene Treibstoffpfade (synthetische Kraftstoffe aus Biomasse bzw. Wasserstoff) hinsichtlich der möglichen Erreichung der Ziele aus dem Abkommen von Paris [244]. In Kombination mit Effizienzsteigerungen und Ansätzen zur Kondensstreifenvermeidung ist eine Reduktion der CO₂-Effekte zwischen 89 % und 94 % sowie der Nicht-CO₂-Effekte zwischen 46 % und 69 % realisierbar. Auf dieser Basis wird die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen zur Erreichung der Klimaziele betont [244].

Grewe et al. (2021) untersuchen die Rolle des Luftverkehrs zur Erreichung der Ziele aus dem Abkommen von Paris unter Berücksichtigung der Einflüsse der Coronapandemie (vgl. Abb. 3.11) [2]. Einerseits wird eine Top-down-Analyse auf Basis vorgegebener Maßnahmen und Zielsetzungen durchgeführt. Dabei werden die Szenarien aktueller Technologie (*Current technology, CurTec*), übliche Weiterentwicklung (*Business as usual, BAU*), die Umsetzung von CO₂-neutralem Wachstum ab 2020 (*CORSIA*) sowie die zusätzliche Berücksichtigung von technischen Entwicklungen nach Flightpath 2050 (*FP2050* und *FP2050-cont*) [12] betrachtet. Andererseits wird auch eine Bottom-up-Bewertung der technischen Realisierbarkeit in einem ECATS-Szenario durchgeführt, die auf einer Expertenschätzung basiert. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass der zulässige Beitrag des Luftverkehrssektors zum 2°-Ziel sehr wahrscheinlich bereits vor Ende des Jahrhunderts überschritten wird [2].

Im Rahmen des DLR-Projektes *Development pathways for aviation up to 2050 (DEPA2050)* wurden zwei Technologieszenarien, ein konservatives und ein progressives Szenario, *bottom-up* auf Basis entwickelter Technologieroadmaps sowie Prognosen des Luftverkehrsaufkommens u. a. hinsichtlich der Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung

über die Zeit untersucht (vgl. Abb. 3.12) [245]. Die Autorinnen und Autoren identifizieren Verringerungen der Temperatur von 11 % für das konservative und etwa 30 % für das progressive Szenario im Vergleich zum Szenario ohne Veränderungen (*Do-Nothing*) in 2100 [245].

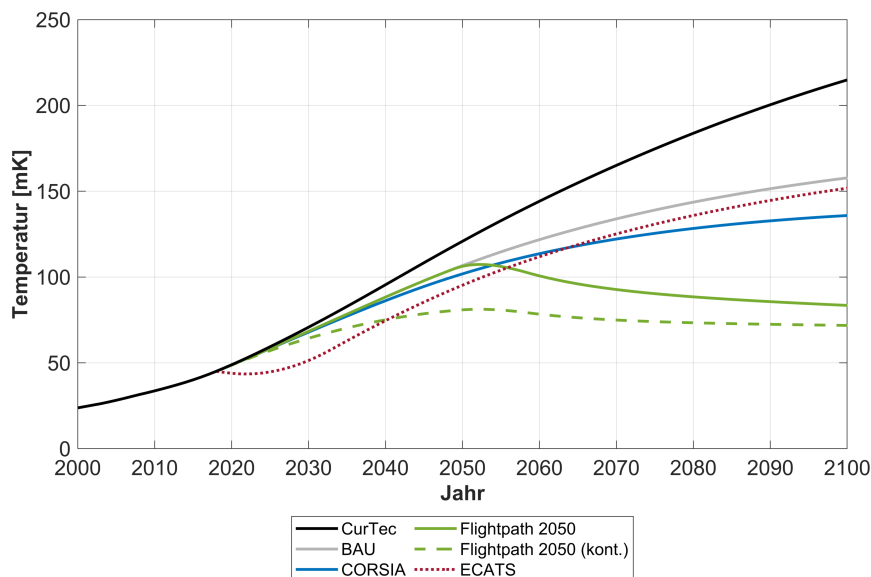


Abbildung 3.11: Szenarien zur Entwicklung der Klimawirkung des Luftverkehrs unter Berücksichtigung der Coronapandemie [eigene Darstellung nach 2].

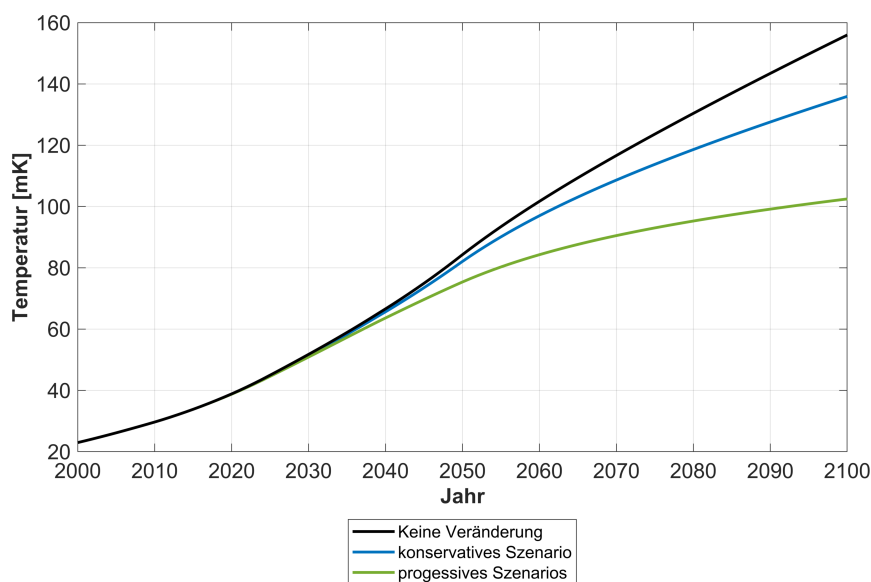


Abbildung 3.12: Szenarien zur Entwicklung der Klimawirkung des Luftverkehrs aus dem DLR-Projekt DEPA2050 [eigene Darstellung nach 245].

Darüber hinaus definieren verschiedene Interessengruppen und Industrievertretungen ebenfalls Szenarien zur Erreichung von Klimazielen. Hier sind beispielsweise die Szenarien der ATAG zu nennen, welche durch die unterschiedliche Kombination der Maßnahmenka-

tegorien Technologie, Betrieb und Infrastrukturen, nachhaltige Kraftstoffe sowie marktba- sierte Ansätze die Erreichung des Netto-Null-CO₂-Ziels im Jahr 2050 sicherstellen sollen [36]. Bereits 2017 untersuchen Ploetner et al. (2017) die Erreichung des damaligen Ziels der Luftfahrtindustrie (ATAG) zur Reduktion der CO₂-Emissionen um 50% bis 2050 relativ zu 2005 durch technologische Weiterentwicklungen, Produktionsveränderungen und betrieb- liche Verbesserungen [246]. Unter Berücksichtigung des Luftverkehrswachstums resultiert daraus, dass keins der betrachteten 15 Szenarien das Ziel der ATAG erreicht. Ebenso unter- suchen Schilling et al. (2016) die Erreichung des 50-Prozent-CO₂-Ziels der ATAG durch die Einführung verschiedener technischer Verbesserungen. Die Autoren sagen eine Reduktion der CO₂-Emissionen von bis zu 25 % voraus [247].

3.5 Zwischenfazit: Stand der Forschung und Ableitung der For- schungslücke

Der aktuelle Stand der Forschung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Zur Reduktion der Klimawirkung werden Maßnahmen aus dem technischen, betrieb- lichen und regulatorischen Bereich untersucht. Während technische Innovationen Ver- besserungen der Flugzeuge oder der Triebwerke sowie die Realisierung des Einsatzes von alternativen Kraftstoffen fokussieren, streben betriebliche Verbesserungen sowohl nach einer Reduktion der Emissionsmenge als auch der Klimasensitivität. Regula- torische Aspekte zielen üblicherweise auf die Implementierung technischer und betrieb- licher Maßnahmen ab.
- Um die definierten Klimaziele zu erreichen, sind Maßnahmen aus allen Kategorien notwendig. Während technische Maßnahmen mit hohen Mitigationspotentialen durch die langen Lebenszeiten in der Luftfahrtindustrie nur langfristig umgesetzt werden können, können viele betriebliche Maßnahmen auf der aktuellen Weltflotte imple- mentiert werden und sofort insbesondere zur Vermeidung von Nicht-CO₂-Effekten beitragen.
- Der aktuellen Stand der Forschung zu betrieblichen Klimawirkungsminderungsmaß- nahmen ist durch eine Vielzahl von Studien gekennzeichnet, die aufgrund von Un- terschieden hinsichtlich Referenzfall, betrachteter Klimametrik, Bewertungsmethode und Ergebnisdarstellung allerdings nicht direkt miteinander zu vergleichen sind.
- Ansätze zum Vergleich von einzelnen Maßnahmen beschränken sich in quantitativen Analysen auf die Gegenüberstellung von wenigen ähnlichen Ansätzen. Studien, die mehr als drei Verbesserungsmaßnahmen miteinander vergleichen, verbleiben bei einer qualitativen Betrachtung.
- Szenarioanalysen, die die Kombination verschiedener Maßnahmen untersuchen, fo- kussieren häufig technische Weiterentwicklungen wie alternative Antriebe, da diese langfristig zu hohen Mitigationspotentialen führen.

Daraus ergibt sich die Forschungslücke eines einheitlichen quantitativen Vergleichs un- terschiedlicher betrieblicher Mitigationsmaßnahmen auf Basis einer einheitlichen Referenz und Bewertungsmethodik. Darüber hinaus fehlt eine aggregierte Betrachtung des Potenti- als, welches durch die Realisierung von betrieblichen Maßnahmen möglich ist. Ziel dieser Arbeit ist folglich die Entwicklung einer Methode zur quantitativen Bewertung verschiede- ner betrieblicher Konzepte zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs.

4 Modellbildung: Entwicklung der Bewertungs- und Vergleichsmethodik

Resultierend aus der Forschungslücke einer vergleichenden Bewertung verschiedener betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs wird im folgenden Kapitel eine Methode mit dieser vergleichenden Fähigkeit entwickelt. Dazu werden in Kapitel 4.1 zunächst die Anforderungen an die Methode definiert und das Konzept vorgestellt. Zur Analyse der verschiedenen betrieblichen Maßnahmen wird anschließend die Methode zur Detailbewertung in Kapitel 4.2 entwickelt. Dafür werden die Fähigkeiten einer bereits etablierten Modellkette signifikant erweitert. Um im nächsten Schritt auch Maßnahmen aus der Literatur, die keiner Detailbewertung mit der entsprechenden Modellkette unterzogen wurden, dem Vergleich zuführen zu können, wird in Kapitel 4.3 die Ableitung eines Vergleichsmodells vorgenommen, mit welchem auf Basis eines Skalierungsansatzes die Erkenntnisse aus unterschiedlichen Bewertungsansätzen auf ein vergleichbares Maß generalisiert werden können. In diesem Zuge können durch die Ableitung von Temperaturverläufen auch unterschiedliche Implementierungszeitpunkte berücksichtigt werden. Die Methoden aus den Kapiteln 4.2 und 4.3 werden in Kapitel 4.4 mit den Anforderungen aus Kapitel 4.1 abgeglichen und eine Verifikation sowie Validierung der einzelnen Modellkomponenten und der Modellkette vorgenommen. Kapitel 4.5 fasst die Entwicklung der Methodik noch einmal zusammen und bewertet die gewonnenen Modellierungsfähigkeiten.

4.1 Konzeptionelle Anforderungen an die Methodik

Mit dem übergeordneten Ziel, verschiedene betriebliche Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung miteinander vergleichen zu können, ergeben sich aus der abgeleiteten Forschungslücke des vorangegangenen Kapitels 3.5 die folgenden konzeptionellen Anforderungen:

- (1) Etablieren einer Methode zur Quantifizierung der Potentiale zur Klimawirkungsmin-
derung durch verschiedene betriebliche Maßnahmen des Luftverkehrs, welche eine
vergleichende Bewertung unter identischen Studienrandbedingungen und Modellie-
rungsannahmen ermöglicht: Um in diesem Kontext sowohl eine möglichst genaue
Abschätzung der Mitigationspotentiale vornehmen als auch möglichst unterschiedli-
che Ansätze bewerten zu können, soll die Detailmodellierung verschiedene Modellie-
rungsgenauigkeiten abdecken können (**Detailbewertung**). Dafür ist eine modulare
Struktur der Methode zu wählen, um in verschiedenen Modellblöcken unterschied-
liche Konfigurationen je nach Studie miteinander kombinieren zu können. Für die
einzelnen Module ergeben sich damit die folgenden Anforderungen:
 - a. Realistische Simulation der realen Flugleistungsgrößen und Emissionsflüsse für
den zivilen Luftverkehr in unterschiedlichen Detaillierungsgraden: Dabei soll die
Berechnung der Flugleistungsgrößen mithilfe unterschiedlicher Flugleistungs-
modelle möglich sein. Je nach vorliegenden Routen- und Wetterinformationen sollen
sowohl in der Routenführung als auch bei der Bestimmung der meteorologischen
Situation entlang der Trajektorien unterschiedliche Granularitäten berücksich-
tigt werden können. Die Trajektorienrechnung soll unterschiedliche betriebliche
Ansätze zur Minderung der Klimawirkung betrachten und deren Auswirkungen
auf die relevanten Flugleistungsparameter zuverlässig abbilden können. Die Be-
rechnung der Emissionsflüsse soll auf den simulierten Flugleistungsparametern

der Trajektorienrechnung basieren und ebenfalls unterschiedliche Ansätze aus der Literatur widerspiegeln.

- b. Anbindung validierter Modelle zur Bewertung der Veränderung in der Klimawirkung: Diese Modelle sollen die durch betriebliche Maßnahmen variierenden Effekte der Klimawirkung im Luftverkehr abbilden, so z. B. die Abhängigkeit der Klimawirkung von Emissionshöhe, -ort und -zeit. Die angebundenen Modelle sollen die unterschiedlichen Ansätze, die bereits in der Literatur zur Klimabewertung verschiedener Maßnahmen angewendet wurden, abdecken. Das umfasst u. a. die Berücksichtigung der realistischen meteorologischen Situation entlang der Flugtrajektorien (meteorologischer Ansatz) sowie die Berücksichtigung durchschnittlicher meteorologischer Bedingungen (klimatologischer Ansatz).
 - c. Integrationsfähigkeit der Modelle in eine umfassende Bewertungsmethode: Die einzelnen Module zur Detailbewertung (Trajektorien-simulation, Emissionsrechnung und Klimabewertung) sollen in einer integrierten Modellkette miteinander verknüpft werden, sodass die Randbedingungen über die verschiedenen Module konsistent definiert werden können.
- (2) Berücksichtigung von Maßnahmen ohne Detailmodellierung in vergleichender Betrachtung: Neben Mitigationsmaßnahmen, die im Zuge der Detailbewertung simuliert und analysiert wurden, sollen auch Maßnahmen aus der Literatur dem Vergleich zugeführt werden können (**Vergleichsmodell**). Das ist beispielsweise für solche Maßnahmen relevant, die über den aktuellen Stand der Forschung hinausgehen und folglich noch nicht in der Trajektorien- und Emissionsrechnung sowie der Klimabewertung berücksichtigt werden können. Dieser Ansatz soll auf Basis weniger bekannter Randbedingungen einer Studie das Potential zur Minderung der Klimawirkung auf ein mit anderen Maßnahmen vergleichbares Maß generalisieren. Diese Abschätzung soll möglichst genau und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Analyseflugpläne und -flotten, unterschiedlicher gewählter Bewertungsmetriken und unterschiedlicher zeitlicher und geografischer Fokusse durchgeführt werden.
- (3) Neben der Betrachtung der Klimawirkungsminderung sollen auch die Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems sowie die unterschiedlichen Implementierungsreife der Maßnahmen betrachtet werden können.

4.2 Modellkette zur detaillierten Bewertung betrieblicher Maßnahmen

Zur Bewertung der Änderung von Klima- und Nicht-Klima-Kennzahlen durch verschiedene Maßnahmen wird auf eine bereits existierende und etablierte Modellkette des DLR zurückgegriffen (vgl. Abb. 4.1). Dabei erfolgt die Bewertung von Mitigationsmaßnahmen verschiedener Kategorien (technisch, betrieblich oder regulatorisch) sowie innovativer Konzepte üblicherweise anhand der folgenden Schritte:

- (1) **Trajektorien-simulation mit dem TCM:** Vorgegebene Flugtrajektorien werden mithilfe des Gesamtenergieansatzes (*Total energy model, TEM*) evaluiert, sodass neben der vierdimensionalen Routenbeschreibung sowie daraus abgeleiteten Größen wie Geschwindigkeiten und Beschleunigungen auch relevante Flugleistungsgrößen wie Widerstand, Schub, Kraftstofffluss und Triebwerkseffizienz bestimmt werden können.

Der Einfluss der Meteorologie, insbesondere durch Windeffekte, kann hier bereits berücksichtigt werden.

- (2) **Emissionsberechnung mit GRIDLAB:** Die Emissionsmengen der verschiedenen Spezies (vgl. Kapitel 2.3), die entlang der Trajektorien freigesetzt werden, können u. a. mit verschiedenen Kraftstoffflusskorrelationsmethoden bestimmt werden und durch geografische Rasterung drei- oder vierdimensional zusammengefasst werden. Dieser Schritt bildet üblicherweise die Basis für die anschließende Klimabewertung in Klimamodellen.
- (3) **Klimabewertung:** Die Veränderung in der Klimawirkung (vgl. Kapitel 2.4) kann mit unterschiedlichen Modellen erfolgen. Um umfangreiche atmosphärenphysikalische und -chemische Simulationen zu vermeiden, werden in der Bewertungskette üblicherweise linearisierte Klimaantwortmodelle (*Climate response models*) oder Klimawirkungsfunktionen genutzt [vgl. 116, 140].
- (4) **Stakeholderbewertung:** Um Veränderungen der Klimawirkung zu den Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems ins Verhältnis zu setzen, können die Ergebnisse der Trajektorien simulation zur Abschätzung von Stakeholder-Kennzahlen verwendet werden (vgl. Kapitel 2.5). So können z. B. Veränderungen in Betriebskosten in Abhängigkeit von Kraftstofffluss und Flugzeit bestimmt werden.

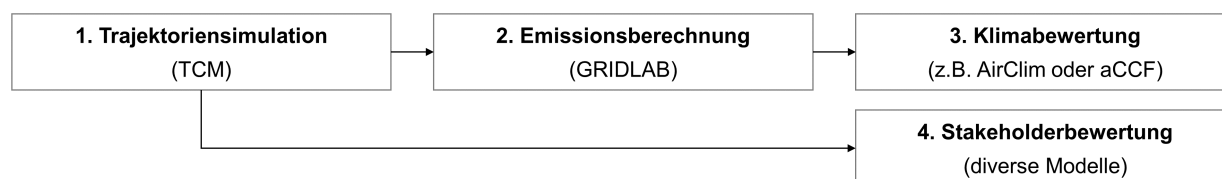


Abbildung 4.1: Modellkette zur Bewertung von Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung am DLR-Institut für Luftverkehr.

Diese etablierte Modellkette wird im Zuge dieser Arbeit, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, erweitert. Das *Trajectory Calculation Module* (TCM) wird zum integrierten TCM (*integrated TCM*, *iTCM*) weiterentwickelt, indem über verschiedene Submodule nun unterschiedliche betriebliche Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung simuliert werden können. So kann eine direkte Vergleichbarkeit der berechneten Trajektorien durch identische Annahmen sichergestellt werden. Darüber hinaus ist eine direkte Schnittstelle zur Emissionsberechnung und -rasterung mit GRIDLAB auch für Einzeltrajektorien implementiert sowie die direkte Anbindung an verschiedene Klimamodelle (z. B. aCCFs oder pycontrails) und Modelle zur Bewertung von Stakeholder-Effekten in Form von Nachverarbeitungsmodulen (*Post processing*) möglich. Eine Anbindung an das Klimaantwort-Modell AirClim kann weiterhin über die existierende Schnittstelle zu GRIDLAB in Form einer verteilten Integrationsumgebung (*Remote component environment*, *RCE*) erfolgen.

Kapitel 4.2.1 beschreibt im Folgenden die Grundlagen des *iTCMs* sowie die durchgeführten Erweiterungen im Zuge dieser Arbeit. Kapitel 4.2.2 beschreibt die Methoden zur Emissionsrechnung und -rasterung bevor in Kapitel 4.2.3 und 4.2.4 die angewendeten Modelle zur Bewertung der Auswirkungen auf das Klima und die Stakeholder beschrieben werden.

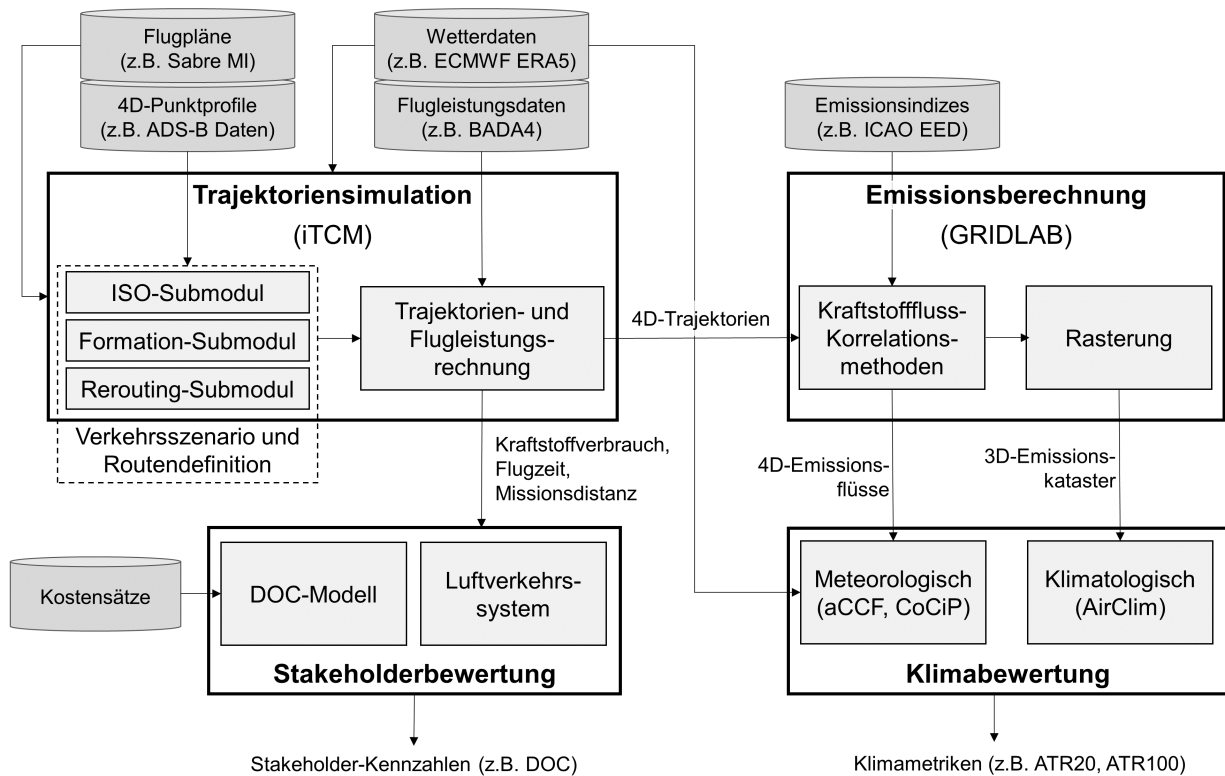


Abbildung 4.2: Schema zur Bewertungsmethode von Einzelmaßnahmen inklusive der verwendeten Datenquellen sowie der Interaktionen zwischen den beteiligten Modulen.

4.2.1 Trajektorien- und Flugleistungsrechnung

Die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und weiterer Flugleistungsgrößen wie Schub oder Triebwerkseffizienz entlang der einzelnen Flugtrajektorien erfolgt mit dem iTTCM, welches im Rahmen dieser Arbeit sowie im Kontext des Projekts ClimOP (vgl. Anhang A) auf Basis des TCMs entwickelt wurde. Damit können verschiedene betriebliche Maßnahmen unter vergleichbaren Randbedingungen simuliert werden. So können neben generischen Flugplandaten in dieser Erweiterung auch detaillierte Flugspurdaten in Form von vierdimensionalen Punktprofilen verwendet und so realistisch wie möglich sowohl vertikal als auch lateral nachgerechnet werden [67]. Die Einführung eines zusätzlichen sogenannten Rückwärts-Ansatzes (*Reverse TCM*) ermöglicht die Nachberechnung von Flugtrajektorien in besonders hoher Auflösung, wie sie beispielsweise durch ADS-B-Daten (*Automatic Dependent Surveillance Broadcast*) bereitgestellt wird [248]. Das Tool ist in MATLAB implementiert und der Algorithmus basiert auf den Arbeiten von Linke (2016) sowie Lührs (2014) [249, 250].

Der grundlegende Aufbau des Programmablaufs ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Den Kern des Modells bildet die Vorwärtsintegration des Flugzeugzustands unter Anwendung des TEM. Im Zuge der Flugleistungsrechnung kann auch die Berücksichtigung von realen meteorologischen Bedingungen erfolgen. Die laterale Navigation erfolgt entweder entlang des Großkreises oder entlang vorgegebener Wegpunkte, wobei zwischen den Wegpunkten ebenfalls eine Großkreisverbindung (Orthodrome) angenommen wird. Der entsprechende Kurs und die verbleibende Distanz werden für jeden Simulationsschritt iterativ bestimmt. Die vertikale Navigation ergibt sich entweder aus den definierten Flugphasen im Vorwärts-

Ansatz oder aus den tatsächlich geflogenen Punktprofilen im Rückwärts-Ansatz. Die zeitliche Auflösung kann im Vorwärts-Ansatz frei gewählt werden³ und ist im Rückwärts-Ansatz durch die Auflösung der verfügbaren Wegpunkte (bei ADS-B-Daten üblicherweise 1 Hz) vorgegeben.

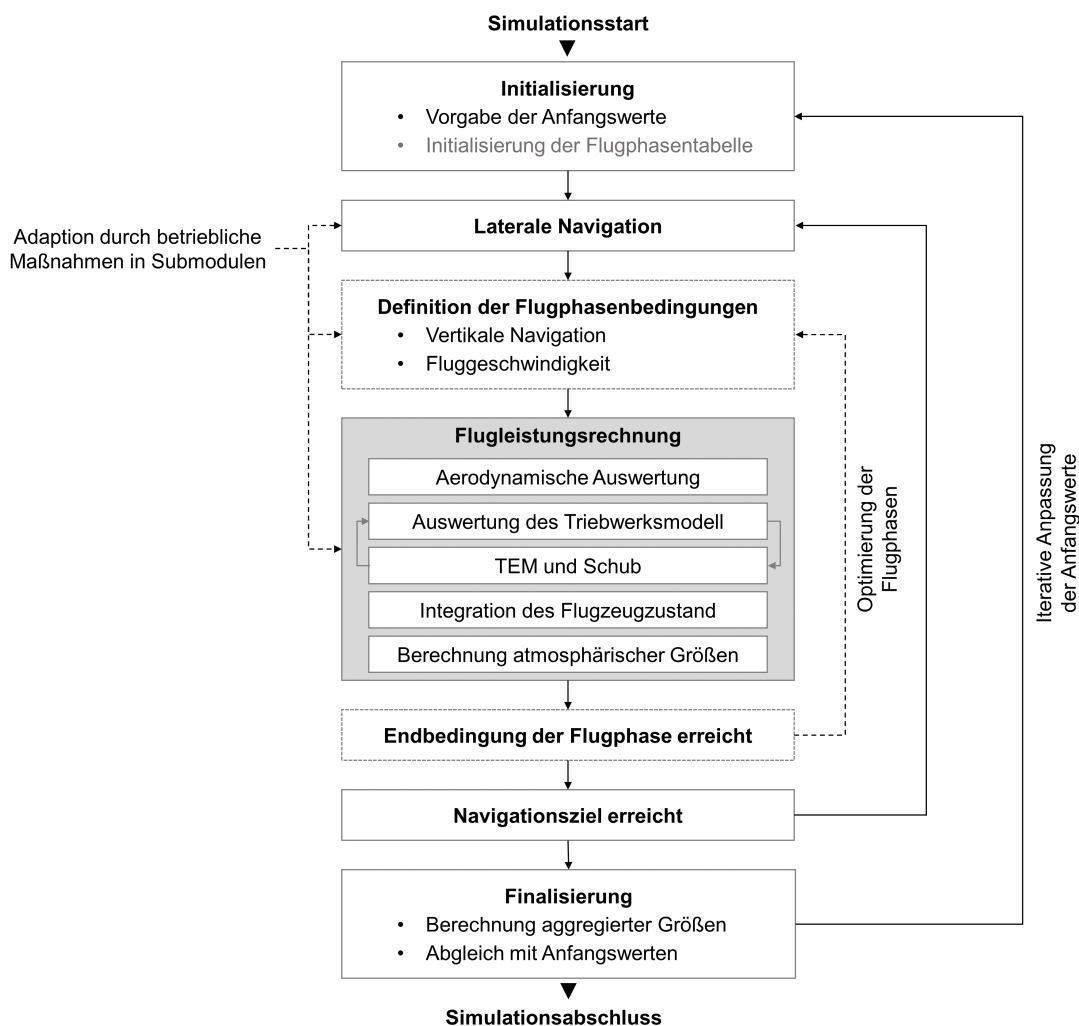


Abbildung 4.3: Vereinfachter Programmablauf des iTCMs [eigene Darstellung, angelehnt an 249, 250].

Der Gesamtenergieansatz

Der TEM stellt das Herzstück der Flugleistungsrechnung im iTCM dar. Es handelt sich um die physikalische Leistungsbilanz, der durch die auf das Flugzeug wirkenden äußeren Kräfte (Schub Th und Widerstand D) geleisteten Energie (vgl. Abb. 4.4). Diese wird mit der Veränderung an potenzieller und kinetischer Energie gleichgesetzt (vgl. Gleichung 4.1). Damit kann die Bewegung des Flugzeugs durch zwei der drei Flugleistungsparameter wahre Fluggeschwindigkeit (*True air speed*) v_{TAS} , Steig- bzw. Sinkrate (*Rate of climb/descent*,

³Üblicherweise wird eine Schrittweite von 10 Sekunden gewählt, da das einen Kompromiss zwischen hoher Genauigkeit und Robustheit der Rechnungen gewährleistet. Zum Phasenwechsel oder zum Erreichen von Wegpunkten wird die Auflösung sukzessive reduziert, um die jeweilige Abbruchbedingung zu erreichen.

ROCD) dh/dt sowie den Schub Th bestimmt werden, sodass die jeweils dritte Größe durch die Leistungsbilanz nach Formel 4.1 abgeleitet werden kann.

$$\underbrace{(Th - D) \cdot v_{TAS}}_{\text{Leistungsüberschuss}} = \underbrace{m \cdot g \cdot \frac{dh}{dt}}_{\text{Veränderung potenzieller Energie}} + \underbrace{m \cdot v_{TAS} \cdot \frac{dv_{TAS}}{dt}}_{\text{Veränderung kinetischer Energie}} \quad (4.1)$$

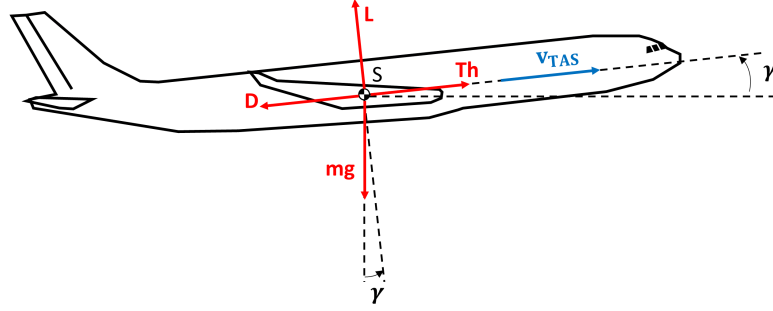


Abbildung 4.4: Kräfte im Gesamtenergieansatz [eigene Darstellung nach 250, 251].

Für Flugphasen, bei denen weder Fluggeschwindigkeit noch ROCD konstant definiert sind, z. B. in Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen in Steig- und Sinkflug, wird der *Energy-sharing factor (ESF)* als Regelgröße eingeführt. Gleiches ist für den Flug mit konstanter *Calibrated air speed (CAS)* relevant, die unterhalb der Übergangshöhe (*Crossover altitude, COA*) dazu führt, dass der Zuwachs an kinetischer Energie nicht von der Höhenänderung entkoppelt ist. Der ESF ergibt sich aus der Umformung von Gleichung 4.1 wie folgt:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(Th - D) \cdot v_{TAS}}{mg} \underbrace{\left[1 + \left(\frac{v_{TAS}}{g} \right) \left(\frac{dv_{TAS}}{dh} \right) \right]}_{ESF}^{-1} \quad (4.2)$$

Der ESF kann im Fall konstanter CAS oder Machzahl als Funktion der Machzahl angegeben werden (Gleichung 4.3).

$$ESF = \left[1 + \left(\frac{v_{TAS}}{g} \right) \left(\frac{dv_{TAS}}{dh} \right) \right]^{-1} = f(Ma) \quad (4.3)$$

Aus den bekannten Größen können die Flugzustandsgrößen numerisch gem. den Gleichungen 4.4 - 4.8 über den Simulationszeitschritt τ mittels Eulerschem Polygonzugverfahren integriert werden. So ergeben sich die tatsächliche Fluggeschwindigkeit v_{TAS} sowie die Flughöhe h aus der vorherigen Geschwindigkeit bzw. Flughöhe und der entsprechenden Beschleunigung bzw. Höhenänderung (Gleichungen 4.4 und 4.5).

$$v_{TAS,i+1} = v_{TAS,i} + \left. \frac{dv_{TAS}}{dt} \right|_i \cdot \tau_i \quad (4.4)$$

$$h_{i+1} = h_i + \left. \frac{dh}{dt} \right|_i \cdot \tau_i \quad (4.5)$$

Die zurückgelegte Strecke über Grund s_{ground} ergibt sich aus der vorherigen Strecke sowie der Geschwindigkeit über Grund v_{GS} , die bei Annahme von Windstille der horizontalen

Komponente der tatsächlichen Fluggeschwindigkeit v_{TAS} entspricht, welche sich wiederum über den Bahnneigungswinkel γ berechnen lässt (Gleichung 4.6).

$$s_{ground,i+1} = s_{ground,i} + v_{GS,i} \cdot \tau \text{ mit } v_{GS,i} = v_{TAS} \cdot \cos\gamma \text{ (ohne Wind)} \quad (4.6)$$

Die Masse des Flugzeugs m ergibt sich aus der vorherigen Masse abzüglich des verbrannten Kraftstoffs, wobei sich der Kraftstofffluss \dot{m}_{Fuel} über das Triebwerkskennfeld des gewählten Flugzeugtriebwerks je nach Flugleistungsmodell vereinfacht als Funktion von Schub Th , Mach-Zahl Ma , Umgebungstemperatur T_{amb} und Umgebungsdruck p_{amb} berechnen lässt (Gleichungen 4.7 und 4.8).

$$\dot{m}_{Fuel} = f_{Engine}(Th, Ma, T_{amb}, p_{amb}) \quad (4.7)$$

$$m_{i+1} = m_i - \dot{m}_{Fuel} \cdot \tau_i \quad (4.8)$$

Ebenso ergibt sich die laterale Position (Längengrad φ_{i+1} , Breitengrad λ_{i+1}) des Flugzeugs für den nächsten Simulationsschritt aus der aktuellen Position (λ_i, φ_i) und der Bewegung mit dem entsprechenden Kurs $\chi_{C,i}$ sowie der zurückgelegten Distanz $\Delta s_{ground,i}$.

Flugleistungsmodelle

Um die flugzeug- und triebwerksspezifischen Flugleistungsparameter entlang der Trajektorie realistisch simulieren zu können, kommen Flugleistungsmodelle zum Einsatz. Hier existieren sowohl lizenzierte Produkte wie BADA der EUROCONTROL [252] oder PianoX [253] als auch öffentlich zugängliche (*Open source*) Modelle, wie OpenAP (*Open Aircraft Performance*) oder das Poll-Schumann-Modell (PS-Modell) [254, 255, 256]. Darüber hinaus besteht im iTCM die Möglichkeit, individuelle Flugzeugentwürfe z.B. im Format des *Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS)* zu berücksichtigen [224].

Bei den BADA-Modellen in Version 3 und 4 (BADA3, BADA4) werden mithilfe von vereinfachten kinetischen Teilmodellen die im Flug wirkenden Kräfte abgeschätzt. Die Parameter entstammen semi-empirischen Modellen für jeden einzelnen Flugzeugtyp, die aus Flugbetriebshandbüchern sowie aufgezeichneten Trajektorien abgeleitet werden. Während BADA3 einen Großteil der gängigen Flugzeugmodelle abbildet, werden unterschiedliche Triebwerkstypen für die einzelnen Flugzeuge nicht berücksichtigt und die Modellgleichungen stark vereinfacht. Im Gegensatz dazu verwendet BADA4 weitere Daten der Flugzeughersteller und kann somit die Modellgleichungen über Polynome höherer Ordnung approximieren, sodass das flugphysikalische Verhalten genauer modelliert werden kann [249]. Andererseits liegen im Vergleich zu BADA3 deutlich weniger Flugzeugtypen als BADA4-Modelle vor.

Auch die übrigen Modelle unterscheiden stark hinsichtlich der verfügbaren Flugzeugmodelle, wobei PianoX die größte Abdeckung aktuell relevanter Verkehrsflugzeuge aufweist. Während für die zugrundeliegenden Modellierungen in PianoX als Blackbox-Modell nur wenige Informationen vorliegen, sind sowohl das PS-Modell als auch OpenAP vollständig öffentlich zugänglich. OpenAP stützt sich auf bekannte physikalische Zusammenhänge und offen verfügbare ADS-B-Daten, auf deren Basis flugzeugspezifische Leistungsparameter sowie die kinematischen Zusammenhänge mithilfe einer statistischen Analyse abgeschätzt werden können [254]. Das PS-Modell beschränkt sich im Gegensatz zu BADA4, welches viele unterschiedliche Größen und Parameter umfasst, auf acht abstrakte Parameter, die zur Modellierung der kinematischen und dynamischen Flugleistungsgrößen genutzt werden. Allerdings bietet das PS-Modell nicht die Möglichkeit, eigene Trajektorien zu erzeugen, und

verzichtet gänzlich auf ein Betriebsprozeduren-Modell, wie es z. B. in BADA implementiert ist [257, 255, 256, 258].

Die alternativen Flugleistungsmodelle PianoX, OpenAP und das PS-Modell sind im Zuge der Anbindung ans iTCM qualitativ sowie quantitativ entlang einzelner Beispielmissionen miteinander verglichen worden [257]. Abbildung 4.5 zeigt für eine Beispielmision mit einem Airbus A380 die Unterschiede in den Flugleistungsparametern Widerstand und Kraftstofffluss auf. Während PianoX und das PS-Modell vergleichbare Ergebnisse liefern, weisen die Ergebnisse aus OpenAP signifikante Abweichungen auf.

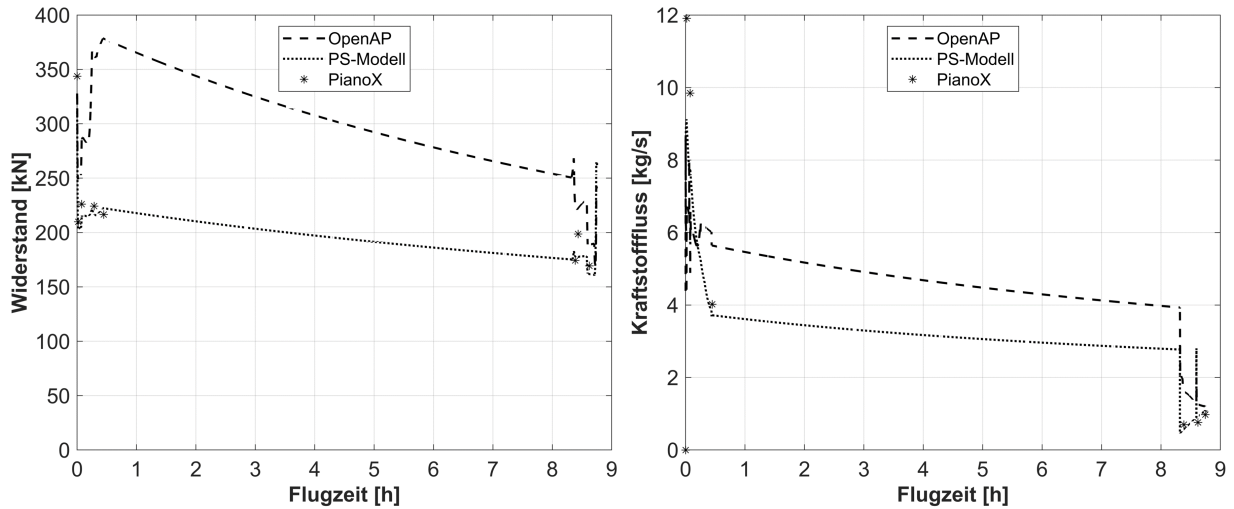


Abbildung 4.5: Vergleich der Trajektorienergebnisse verschiedener Flugleistungsmodelle für eine A380-Beispielmision [eigene Darstellung nach 257].

Berücksichtigung von meteorologischen Randbedingungen

In Abhängigkeit von der Fragestellung der jeweiligen Studie können im iTCM wahlweise realistische meteorologische Randbedingungen entsprechend den Ergänzungen zum TCM von Lührs (2013) und Lührs et al. (2014, 2016) berücksichtigt werden [259, 250, 219]. Dies beinhaltet nicht nur den Windeinfluss auf die Fluggeschwindigkeit, sondern auch den Einfluss von Druck auf die Bestimmung der Flughöhen (z. B. der Flug auf konstanter Druckhöhe im Reiseflug) und Temperatur auf die Bestimmung von Flugleistungsgrößen (z. B. die Machzahl in Abhängigkeit der mit der Temperatur variierenden Schallgeschwindigkeit sowie die Triebwerksleistung). Abbildung 4.6 zeigt den Einfluss der Windgeschwindigkeit v_W mit Winkel χ_W auf die horizontale Geschwindigkeit gegenüber Luft $v_{TAS,h}$ und die resultierende Geschwindigkeit über Grund v_{GS} sowie den erforderlichen Steuerkurs χ_h um den gewünschten Flugkurs χ_C zu erhalten.

Unter Anwendung des Sinussatzes ergibt sich der erforderliche Steuerkurs χ_h aus χ_C , v_W mit χ_W und $v_{TAS,h}$ nach Gleichung 4.9.

$$\chi_h = \chi_C - \arcsin \left[\frac{v_W}{v_{TAS,h}} \cdot \sin(\chi_W - \chi_C) \right] \quad (4.9)$$

Analog ergibt sich unter Anwendung des Kosinussatzes die resultierende Fluggeschwindigkeit über Grund v_{GS} nach Gleichung 4.10 und 4.11.

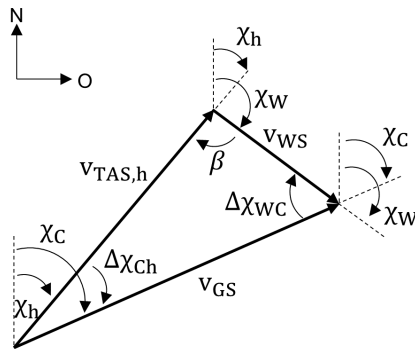


Abbildung 4.6: Winddreieck in der horizontalen Ebene [eigene Darstellung nach 250].

$$v_{GS} = \sqrt{v_W^2 + v_{TAS,h}^2 - 2 \cdot v_W \cdot v_{TAS,h} \cdot \cos(\beta)} \quad (4.10)$$

$$\beta = \pi + \chi_H - \chi_W \quad (4.11)$$

Die meteorologischen Kennfelder können u. a. vom europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF*) als ERA5-Reanalyse-Daten bezogen werden [260]. Die Daten können in Form von NetCDF-Dateien aufbereitet und ins iTCM eingelesen werden. Im Anschluss werden sie entlang der Trajektorie für die jeweilige Position pro Simulationsschritt linear interpoliert. Da der Wind in den ECMWF-ERA5-Daten üblicherweise in seine östliche und nördliche Komponente (v_u und v_v) aufgeteilt ist, ist eine Aufbereitung der Winddaten zur Anwendung in den Gleichungen 4.9 und 4.10 nach Gleichung 4.12 erforderlich.

$$\begin{aligned} v_W &= \sqrt{v_u^2 + v_v^2} \\ \chi_W &= \arctan2(v_u, v_v) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Neben den für die Flugleistungsrechnung relevanten Parametern Druck, Temperatur und Wind können außerdem weitere meteorologische Größen wie relative Feuchte, potentielle Vortizität oder Wolkenabdeckung entlang der Trajektorie interpoliert werden. Diese Parameter sind insbesondere für die folgende Emissions- und Klimabewertung relevant.

Regelung im iTCM

Die Regelung der Beschleunigung und der ROCD, insbesondere unter variierenden meteorologischen Bedingungen, erfolgt im iTCM mit einer Fluggeschwindigkeits- bzw. Flughöhenregelung [249, 259]. Dabei handelt es sich um eine Proportional-Integral-Regelung (PI-Regelung) für die tatsächliche Fluggeschwindigkeit v_{TAS} bzw. die Höhe h . Abweichungen ergeben sich u. a. durch die wechselnden atmosphärischen Randbedingungen. Zum Beispiel wird für eine vorgegebene Fluggeschwindigkeit $v_{CAS,Soll}$ oder Ma_{Soll} die Führungsgröße $v_{TAS,Soll}$ unter den existierenden atmosphärischen Randbedingungen berechnet. Anschließend kann die Abweichung in der Führungsgröße Δv_{TAS} nach Gleichung 4.13 aus der Differenz zwischen Führungsgröße und tatsächlicher Fluggeschwindigkeit v_{TAS} bestimmt werden:

$$\Delta v_{TAS,i} = v_{TAS,Soll,i} - v_{TAS,i} \quad (4.13)$$

Die zur Einhaltung der Soll-Geschwindigkeit erforderliche Beschleunigung $\frac{d\tilde{v}_{TAS}}{dt}$ stellt die Stellgröße dar, die mithilfe eines PI-Reglers gem. Gleichung 4.14 berechnet wird.

$$\left. \frac{d\tilde{v}_{TAS}}{dt} \right|_i = K_{P, speed} \cdot \Delta v_{TAS,i} + K_{I, speed} \cdot \sum \Delta v_{TAS} \cdot \tau \Big|_i \quad (4.14)$$

Das Stellsignal $\frac{d\tilde{v}_{TAS}}{dt}$ wird unter Berücksichtigung der Flugphasenrandbedingungen sowie der Leistungsgrenzen des Triebwerks begrenzt. Die Regelstrecke selbst stellt ein einfaches Integralglied dar, sodass sich die Fluggeschwindigkeit im nächsten Zeitschritt aus der zeitlichen Integration der Beschleunigung ergibt. Die neue Position, die durch die Integration der Flugzustandsgrößen entsteht, bestimmt dann wiederum die atmosphärischen Randbedingungen und wird für die Berechnung der neuen Sollgröße verwendet. Eine äquivalente Regelung kann gem. Abbildung 4.7 auch für eine vorgegebene Flughöhe vorgenommen werden.

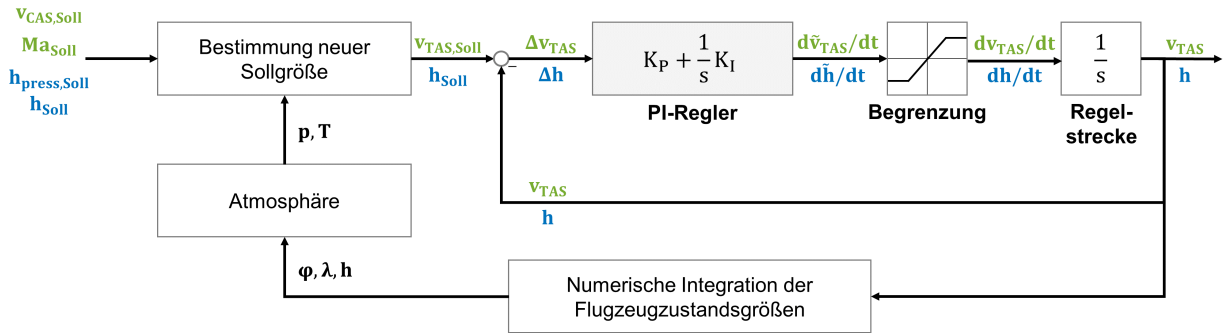


Abbildung 4.7: Regelkreis im iTCM für Flughöhe und Geschwindigkeit [eigene Darstellung nach 250, 249].

Neben der Berücksichtigung der Varianz in den atmosphärischen Größen Wind, Temperatur und Druck, die Einfluss auf die Flugleistungsparameter haben, ermöglicht der Regler außerdem die Ausregelung von kleinen Differenzen in Phasenendbedingungen (gem. Flugphasentabelle). Über die Vorgabe von Toleranzbändern zur Erreichung der Phasenendbedingungen kann so die Recheneffizienz gesteigert werden.

Vorwärts- und Rückwärts-Ansatz

Bei der klassischen Berechnung der Trajektorien im **Vorwärts-Ansatz** wird das vertikale Soll-Flugprofil initial durch bis zu 17 aufeinanderfolgende Flugphasen definiert, die in einer Phasentabelle zusammengestellt werden [250]. Jede individuelle Flugphase wird dabei durch eine Ziel- und eine Abbruchbedingung beschrieben. Die Zielbedingung beschreibt die Größen, die während der entsprechenden Flugphase konstant gehalten werden sollen (z. B. der ESF oder eine konstante Flugmachzahl). Bei Erreichen der Abbruchbedingung erfolgt ein Wechsel der Flugphase (z. B. bei Erreichen einer bestimmten Flughöhe). Eine Standard-Phasentabelle mit den entsprechenden Ziel- und Abbruchbedingungen ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Darüber hinaus definieren die aerodynamische Konfiguration (Klappenstellungen) sowie der zugehörige Schubmodus die Charakteristika der jeweiligen Phase. Während in den *Take-off*- und Steigphasen (Phase 1 bis 7 in Tabelle 4.1) mit maximalem

Steig-Schub geflogen wird, wird in der *Cruise*-Phase (Phase 9 in Tabelle 4.1) der benötigte Schub je nach Widerstand eingestellt (*Required Thrust*) und in den Sinkphasen zum Großteil mit Leerlauf-Schub (*Idle*) geflogen. Ebenso unterscheiden sich die Klappenstellungen vom *Take-off*, Reiseflug und Landeanflug.

Nr.	Flugphase	Zielbedingung	Abbruchbedingung
1	Take-Off	Lift-Off CAS	Airport Elevation + 35 ft
2	Take-Off Climb	Lift-Off CAS	Airport Elevation + 100 ft
3	Accelerate to Climb	Lift-Off CAS	TMA Speedlimit CAS
4	Restricted Climb	TMA ⁴ Speedlimit CAS	TMA Speedlimit Altitude
5	En-route Acceleration	ESF = 0,3	En-route Climb CAS
6	En-Route CAS Climb	En-route Climb CAS	En-route Climb Mach
7	En-Route Mach Climb	En-route Climb Mach	Cruise Pressure Altitude
8	Cruise Acceleration	Cruise Pressure Altitude	Cruise Mach
9	Cruise	Cruise Pressure Altitude Cruise Mach	Cruise Length
10	Cruise Deceleration	Cruise Pressure Altitude	Descent Mach
11	En-Route Mach Descent	Descent Mach	Descent CAS
12	En-Route CAS Descent	Descent CAS	TMA Speedlimit Altitude
13	Descent Deceleration	TMA Speedlimit Altitude	TMA Speedlimit CAS
14	Metering Fix Approach	TMA Speedlimit Altitude TMA Speedlimit CAS	Metering Fix Approach Length
15	Restricted Descent	TMA Speedlimit CAS	Airport Elevation + 1.600 ft
16	Approach Deceleration	Airport Elevation + 1.600 ft	Approach CAS
17	Final Approach	$\gamma = -3^\circ$ Approach CAS	Airport Elevation

Tabelle 4.1: Beispiel für die Definition der Flugphasen sowie der dazugehörigen Ziel- und Abbruchbedingungen der Flugphasentabelle im iTCM [nach 250].

Zusätzlich zum bereits existierenden Vorwärts-Ansatz mit Anwendung der Standardphasentabelle [249, 250], der im Rahmen dieser Arbeit erweitert wurde, wurde ein sog. **Rückwärts-Ansatz** (*Reverse-Ansatz*) implementiert, welcher die detaillierte Nachberechnung von tatsächlich geflogenen Flugtrajektorien auf Basis gegebener hoch aufgelöster Wegpunkte ermöglicht. Solche Punktprofile werden z. B. in Form von ADS-B-Daten durch verschiedene kommerzielle oder gemeinnützige Anbieter bereitgestellt. Auf Basis dieser vierdimensionalen Routeninformationen (Längengrad, Breitengrad, Höhe und Zeit) kann in Kombination mit den meteorologischen Bedingungen entlang des Fluges die *ROCD*, die Geschwindigkeit über Grund v_{GS} sowie die tatsächliche Fluggeschwindigkeit v_{TAS} durch Umstellung der Gleichung 4.10 berechnet werden. Nach Aufbereitung dieser Daten hinsichtlich Ausreißerbereinigung und Glättung⁵ sowie Identifikation der Flugphasen zur Bestimmung der richtigen Klappen- und Schubkonfigurationen kann zunächst der aerodynamische Widerstand berechnet werden. Durch direkte Anwendung des TEM kann anschließend der benötigte Schub für jede Iteration bestimmt werden (Gleichung 4.15 durch Umstellung von 4.1). Durch die Auswertung des Triebwerkskennfelds werden dann der Kraftstoffmassenfluss und die Flugzeugmasse der neuen Iteration berechnet.

$$Th = D + m \cdot \left(\frac{g \cdot \frac{dh}{dt}}{v_{TAS}} + \frac{dv_{TAS}}{dt} \right) \quad (4.15)$$

⁴Nahverkehrsbereich (*Terminal Maneuvering Area, TMA*)

⁵Zur Glättung des Geschwindigkeit über Grund kommt der Savitzky-Golay-Filter zum Einsatz [261].

Durch die Verfügbarkeit der beiden Ansätze hat das iTCM nun die Fähigkeit, sowohl generische Flugzeugtrajektorien ohne verfügbare Detailinformationen über die Routenführung zu bestimmen als auch so realistisch wie möglich tatsächlich geflogene Missionen nachzurechnen. Je nach Datenverfügbarkeit, Umfang und Detailgrad der jeweiligen Studie kann der passende Ansatz ausgewählt werden.

Optimierung der Trajektorie hinsichtlich Kraftstoffverbrauch

Aufgrund des Ziels von Fluggesellschaften, die Betriebskosten zu minimieren, werden Flugtrajektorien in der Realität üblicherweise hinsichtlich Kraftstoffverbrauch bzw. direkten Betriebskosten (*Direct operating cost, DOC*) optimiert, was auch im Zuge der Trajektorienrechnung mit dem iTCM über den Kostenindex CI (*Cost Index*) abgebildet werden kann. Der CI gibt das Verhältnis von zeitspezifischen Kosten zu Kraftstoffkosten an, welches in der Realität durch den Piloten oder die Pilotin im *Flight Management System (FMS)* vorgegeben wird und sich aus dem Minimierungsziel der vereinfachten direkten Betriebskosten (*simplified DOC, sDOC*, vgl. Gleichung 4.16) mithilfe der Umformung nach Gleichung 4.17 ergibt.

$$sDOC = \underbrace{c_{fuel} \cdot m_{fuel} + c_{time} \cdot \Delta t}_{\text{variable Betriebskosten}} + \underbrace{C_{fix}}_{\text{Fixkosten}} \quad (4.16)$$

$$\frac{sDOC - C_{fix}}{c_{fuel}} = m_{fuel} + \underbrace{\frac{c_{time}}{c_{fuel}}}_{CI} \cdot \Delta t \quad (4.17)$$

Die Minimierung der Betriebskosten kann so durch eine Anpassung der Fluggeschwindigkeit getrieben werden. Ein CI von null führt immer zu einer Trajektorie oder einem Flugsegment mit minimalem Kraftstoffverbrauch durch geringere Fluggeschwindigkeiten. Ein hoher CI führt zum schnellstmöglichen Flugprofil und damit zu hohen Geschwindigkeiten, die wiederum höhere Kraftstoffverbräuche zur Folge haben. Unter Annahme eines gegebenen CI kann die Optimierung der Fluggeschwindigkeit während des Reiseflugs im iTCM optimiert werden.

Zusätzlich zur Optimierung der Fluggeschwindigkeit über den CI ist im iTCM eine Optimierung der Flughöhe entlang der Trajektorie in Form von stufenförmigen Steigflügen, sogenannten *Step climbs*, möglich. Mit abnehmender Flugzeugmasse kann auf höheren Flugflächen wirtschaftlicher geflogen werden, sodass im Verlauf des Fluges üblicherweise auf höhere Flughöhen gestiegen wird. Im iTCM wird die optimale Flughöhe für einen minimalen Kraftstoffverbrauch in jedem Simulationsschritt in Abhängigkeit von Flugzeugmasse und Geschwindigkeit bestimmt, bei Eignung der nächsthöheren Flugfläche eine weitere Steigphase initiiert und der Reiseflug auf eine höhere Flugfläche verschoben. Für die neue Flughöhe kann die Machzahl wiederum an die optimale Machzahl gem. CI angepasst werden [249]. Da in der Realität solche *Step climbs* häufig nicht zu dem Zeitpunkt durchgeführt werden können, bei dem sie am wirtschaftlichsten sind, werden die Fähigkeiten des iTCMs wie folgt erweitert. Alternativ zu kraftstoffoptimalen *Step climbs* können nun auch Steig- und Sinksegmente an den Punkten eingefügt werden, an denen sie entlang einer tatsächlichen Mission durchgeführt wurden. Hierzu wird auf Basis einer tatsächlich geflogenen Mission die Cruise-Phase analysiert, ein *Step climb* identifiziert und entsprechend in die Flugphasentabelle eingefügt.

Submodule zur Berücksichtigung betrieblicher Maßnahmen

Zur Berücksichtigung verschiedener betrieblicher Maßnahmen in der Trajektorienmodellierung wurden verschiedene Submodule ins iTCM integriert. Diese Module ermöglichen die Manipulation der Trajektorie zur Modellierung verschiedener operationeller Anpassungen.

So kann über das **Rerouting-Submodul** sowohl die Flughöhe als auch die laterale Ausdehnung sowie die Fluggeschwindigkeit der Trajektorie manipuliert werden, um die Auswirkung solcher Maßnahmen auf Flugleistung, Kraftstoffverbrauch, Emissionen, Kosten und Klimawirkung zu modellieren. Neben der externen Vorgabe von Routenmanipulationen besteht darüber hinaus die Möglichkeit, eine integrierte Pfadoptimierung lateral mithilfe eines Dijkstra-Algorithmus durchzuführen, um beispielsweise Gebiete mit besonders hoher Klimasensitivität zu vermeiden. Für eine detaillierte Trajektorienoptimierung unter Berücksichtigung der Flugleistungsdaten sind allerdings integrierte Trajektorienoptimierer, wie beispielsweise das *Trajectory Optimization Module (TOM)* [219, 63] bzw. *TOM in python (pyTOM)* zu bevorzugen (vgl. Anhang B.2).

Mit dem **ISO-Submodul** kann der Mehrstufenbetrieb modelliert werden. Dabei wird eine Langstreckenmission durch eine Zwischenlandung zur Betankung unterbrochen und folglich die Missionsmodellierung einer Mission in zwei Einzelmissionen unterteilt. Die Auswahl des Zwischenlandeflughafens kann entweder anhand des geringsten Kraftstoffverbrauchs oder der minimalen Klimawirkung erfolgen. In diesem Kontext verwendet das iTCM eine vorprozessierte Datenbasis, welche auf Basis eines Langstreckenflugplans des ClimOP-Projekts die Klimawirkung und den Kraftstoffverbrauch für eine Vielzahl an Kombinationen von möglichen Zwischenlandeflughäfen, Flughöhen und Flugzeugtypen beinhaltet, sodass die optimale Konfiguration je nach Mission und Optimierungsziel ausgewählt werden kann [223].

Darüber hinaus ermöglicht das **Formationsflug-Submodul** die Modellierung von Flugmissionen, die im Formationsflug durchgeführt werden. Dabei wird insbesondere die Aerodynamik des folgenden Flugzeugs (*Follower*) durch die Konfiguration des führenden Flugzeugs (*Leader*) und dessen relative Position dazu bestimmt. Die verringerte Schubanforderung kann für die Follower-Mission berechnet werden, wobei die Reduktion des Widerstandskoeffizienten c_D über ein vorprozessiertes Kennfeld in Abhängigkeit von Flugzeugmassen, Flugzeugtypen-Kombination und Fluggeschwindigkeit berechnet wird [58]. Analog kann dann die Bewertung von Kraftstoffverbrauch und Betriebskosten durchgeführt werden. Für die Klimabewertung sind allerdings Sättigungseffekte zu berücksichtigen, die die Anbindung an spezielle Modelle zur Klimabewertung, wie z. B. der Formationsflug-Version von AirClim, notwendig machen [194].

4.2.2 Emissionsrechnung und -rasterung

Zur Berechnung der Emissionsmengen sowie zu deren Rasterung hat sich in der Bewertungskette zur Klimawirkung des Luftverkehrs (vgl. Abb. 4.1) das *Global Air Traffic Emission Distribution Laboratory (GRIDLAB)* etabliert [249, 52]. Neben der Berechnung von Luftverkehrsemissionen nach verschiedenen Methoden kann eine Rasterung der Emissionen in einem drei- oder vierdimensionalen Kataster durchgeführt werden. Diese Kataster bilden üblicherweise die Basis für die Anwendung in verschiedenen Klimawirkungsmodellen wie z. B. AirClim. Abbildung 4.8 stellt beispielhaft die geografisch gerasterten CO₂-Emissionen des Luftverkehrs von 2019 dar, gemäß des Passagierverkehrsaufkommens aus dem DLR-Projekt Emissionslandkarte (ELK).

GRIDLAB kann aus dem iTCM als eigenständiges Submodul über eine standardisierte

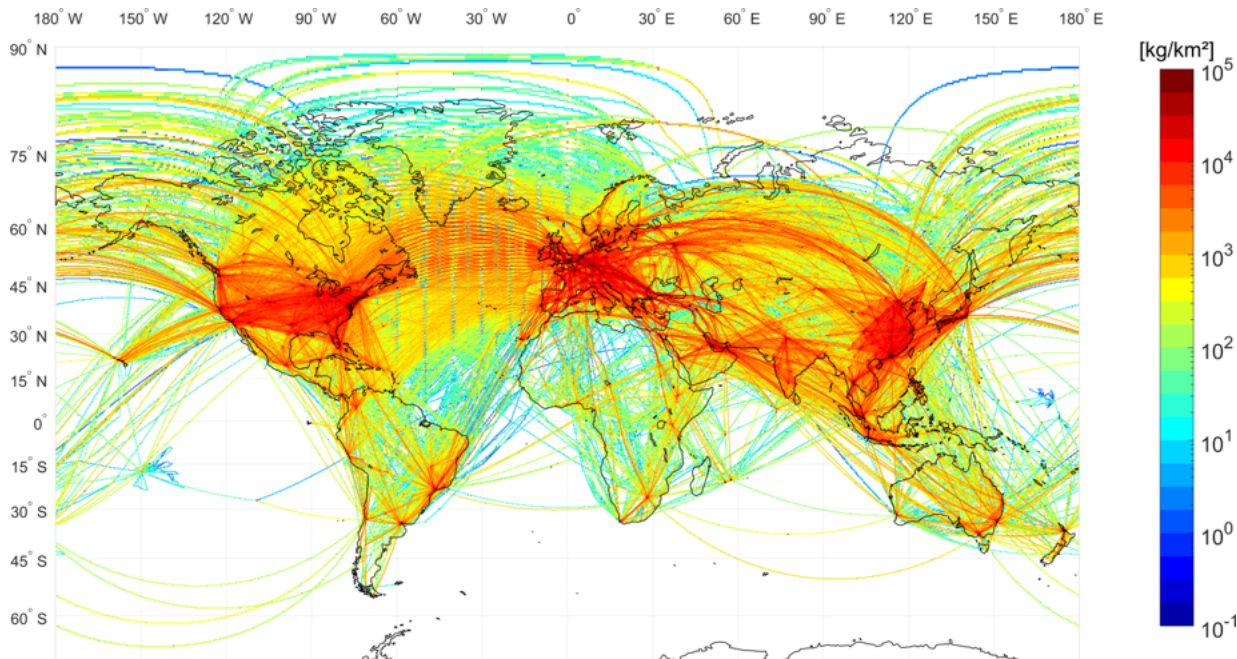


Abbildung 4.8: Globales Emissionskataster der CO₂-Emissionen des Luftverkehrs von 2019 aus dem DLR-Projekt ELK [eigene Darstellung nach 262].

Schnittstelle angesteuert werden, sodass Emissionsmengen und Kataster sowohl für individuelle Missionen als auch für umfangreiche Flugpläne direkt berechnet werden können. Alternativ besteht die Möglichkeit, in der Hauptroutine die Emissionsflüsse und -mengen direkt zu berechnen und auf eine Rasterung zu verzichten, falls eine Klimabewertung direkt entlang der Trajektorie z. B. mit aCCFs erfolgt. Zur Berechnung der Emissionsmengen existieren für die unterschiedlichen Spezies verschiedene Methoden.

Berechnung von Emissionsmengen

Die relevanten Methoden zur Emissionsrechnung, die sich in kraftstoffproportionale und nicht-kraftstoffproportionale Berechnung unterteilen, sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Für die Spezies CO₂, H₂O und SO_x kann die Emissionsmenge direkt proportional aus dem Kraftstoffverbrauch m_{Fuel} abgeleitet werden, wobei der jeweilige Emissionsindex EI aus Tabelle 2.1 entnommen und die Emissionsmenge nach Gleichung 4.18 berechnet werden kann.

$$m_i = EI_i \cdot m_{Fuel} \quad (4.18)$$

Für die nicht-kraftstoffproportionale Emissionsrechnung von NO_x existieren die p_3T_3 -Methode, die Boeing-Kraftstoffflusskorrelationsmethode (*Boeing Fuel Flow Method 2*, BFFM2) und die DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode [263, 228, 227, 229]. Die Bestimmung von HC- und CO-Emissionsmengen kann ebenfalls mit der BFFM2 sowie der Omega-Korrelationsmethode des DLRs erfolgen [227, 264]. Für die Bestimmung von Rußemissionen können die Methoden nach Döpelheuer, Hurley und Champagne verwendet werden [264, 265, 266, 267].

Aufgrund des hohen Einflusses von NO_x-Emissionen auf die Klimawirkung des Luftverkehrs sowie die sehr hohen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Klimawirkung der

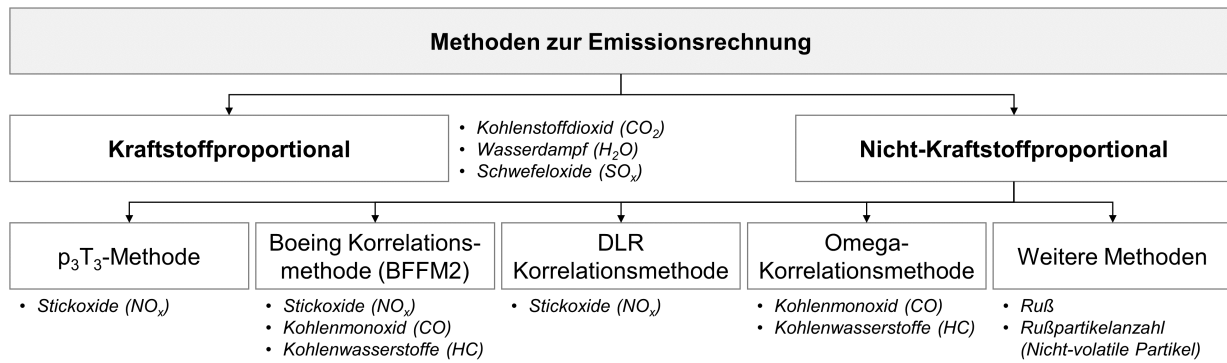


Abbildung 4.9: Emissionsberechnungsmethoden [eigene Darstellung nach 227].

übrigen Spezies (vgl. Abb. 2.4) liegt der Fokus im Folgenden auf den Stickoxiden. Für die p_3T_3 -Methode, welche insbesondere von Triebwerksherstellern verwendet wird, ist Kenntnis verschiedener Triebwerksparameter, wie u. a. des absoluten Drucks p_3 und der absoluten Temperatur T_3 , notwendig. Da diese Daten öffentlich nicht zur Verfügung stehen, wurden die BFFM2 und die DLR-Methode als Alternativen entwickelt [228, 227]. Bei beiden handelt es sich um semi-empirische Methoden, die den Emissionsindex unter Betriebsbedingungen in Abhängigkeit des Kraftstoffflusses, der atmosphärischen Randbedingungen sowie der Fluggeschwindigkeit für jeden Triebwerkstyp bestimmen. Den Methoden liegt der Ansatz zugrunde, dass sich Kraftstofffluss und Emissionsindex während des Fluges (*in-flight*) mithilfe der atmosphärischen Bedingungen in die entsprechenden Größen auf Meereshöhe (*sea level*) konvertieren lassen. Das entsprechende Schema ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Emissionsindizes für gegebene Kraftstoffflüsse stehen aus Prüfstandsmessungen z. B. in der Emissionsdatenbank der ICAO (*ICAO engine emissions data bank, ICAO EED*) zur Verfügung, welche unter ISA-Bedingung auf Meereshöhe für verschiedene Schubkonfigurationen aufgenommen wurden (vgl. Tabelle 4.2) [268].

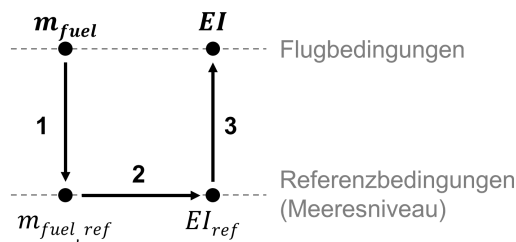


Abbildung 4.10: Schema der Funktionsweise von Kraftstoffflusskorrelationsmethoden [eigene Darstellung nach 227].

	Take-Off	Climb-out	Approach	Idle
Schubstellung	100 %	85 %	30 %	7 %
Korrekturfaktor r in BFFM2	1,010	1,013	1,020	1,100

Tabelle 4.2: Stützstellen für Kraftstoffflusskorrelationsmethoden [227, 228]. Die Schubstellung ist relativ zum Maximalschub des Triebwerks angegeben.

Im ersten Schritt der Kraftstoffflusskorrelationsmethoden (Abb. 4.10) wird der Kraft-

stofffluss \dot{m}_{Fuel} bei den betrachteten Bedingungen des Fluges auf die Referenzbedingungen $\dot{m}_{Fuel,ref}$ als Funktion in Abhängigkeit von Umgebungsdruck p_{amb} , Temperatur T_{amb} und Flug-Machzahl nach Formel 4.19 korrigiert.

$$\dot{m}_{Fuel,ref} = f(p_{amb}, T_{amb}, Ma) \cdot \dot{m}_{Fuel} \quad (4.19)$$

Im zweiten Schritt wird für den korrigierten Kraftstofffluss zu Referenzbedingungen $\dot{m}_{Fuel,ref}$ der Referenzemissionsindex EI_{ref} bestimmt, wobei EI_{ref} als Funktion des $\dot{m}_{Fuel,ref}$ über die Stützstellen der ICAO EED nach Tabelle 4.2 berechnet werden kann. Hier unterscheidet sich nun das Vorgehen der BFFM2 von der DLR-Methode: Während für die Berechnung von EI_{NO_x} nach der DLR-Methode eine parabolische Trendlinie durch die vier Stützstellen gelegt wird, werden die Kraftstoffflusswerte aus Gleichung 4.19 in der BFFM2 zunächst um einen Korrekturfaktor r erhöht (vgl. Tabelle 4.2), bevor eine schrittweise lineare Funktion für NO_x im Log-Log-Diagramm den Zusammenhang zwischen Kraftstofffluss und EI beschreibt [228, 227, 229]. Der unterschiedliche Zusammenhang ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

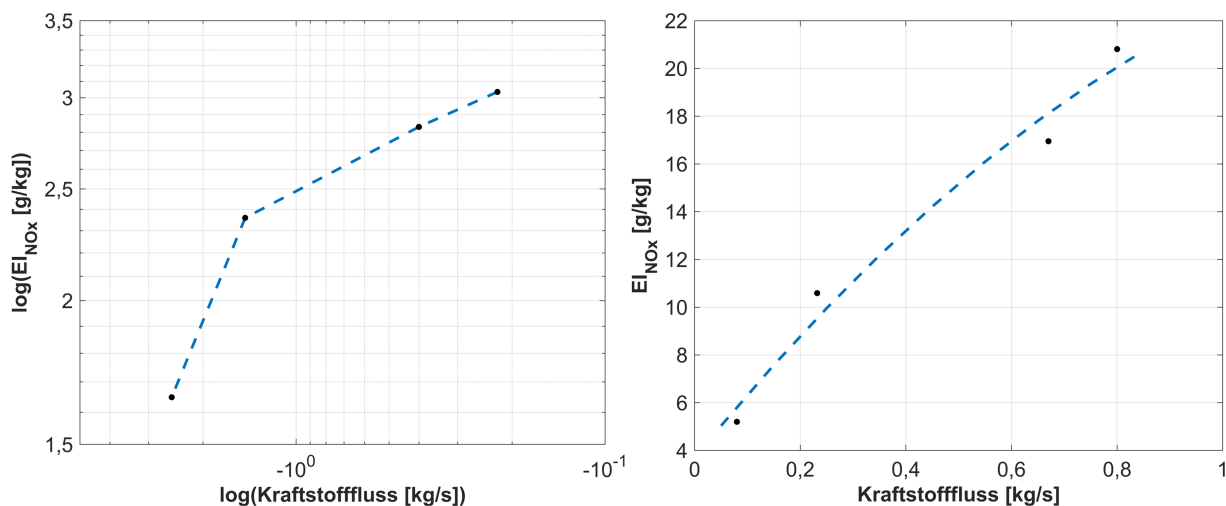


Abbildung 4.11: Visualisierung von Boeing- (links) und DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode (rechts) für ein PW1127G-Triebwerk [eigene Darstellung nach 227, 268].

Im dritten und letzten Schritt wird der Emissionsindex unter Referenzbedingungen EI_{ref} nach Formel 4.20 wiederum auf die Flugbedingungen korrigiert, wobei die relative Feuchte RH sowie p_{amb} und T_{amb} auf Flughöhe berücksichtigt werden.

$$EI = f(p_{amb}, T_{amb}, RH) \cdot EI_{ref} \quad (4.20)$$

Im Emissionsmodul des iTCM sowie GRIDLAB können sowohl die BFFM2 als auch die DLR-Methode zur Berechnung der NO_x -Emissionen verwendet werden. Für die Berechnung der Emissionsspezies HC und CO ist in GRIDLAB die BFFM2 realisiert [249, 267]. Darüber hinaus können auch Rußemissionen nach DLR, Hurley oder Champagne berechnet werden. Die Berechnung der nicht-volatilen Partikel erfolgt auf Basis einer einfachen Interpolation der Werte aus der ICAO EED über die Schubwerte [264, 265, 266, 267]. Da diese Emissionen für die Klimawirkungsbestimmung im Folgenden (Kapitel 4.2.3) jedoch nicht betrachtet werden, wird hier auf eine detaillierte methodische Beschreibung verzichtet.

Reduzierte Emissionsprofile

Um die Trajektorienrechnung für große Flugpläne effizient durchführen zu können, wurden reduzierte Emissionsprofile (*Reduced Emission Profiles, RedEmP*) entwickelt [249]. Diese vorberechneten Datensätze beinhalten die relevanten Flugleistungsdaten entlang standardisierter Flugtrajektorien in reduzierter Auflösung. Dafür wird für die betrachteten Flugzeug-Triebwerks-Kombinationen eine Trajektorienrechnung für verschiedene Ladefaktoren und Flugdistanzen durchgeführt. Anschließend werden die Emissionsflüsse für die verschiedenen Spezies berechnet [267, 268], die Daten auf charakteristische Punkte analog zu den Phasenwechseln ausgelesen und in einer Datenbank gespeichert (vgl. Abb. 4.12 und Tabelle 4.1). Dabei werden in Steig- und Sinkphase, in denen sich die Flugleistungsparameter stärker ändern, mehr Punkte abgespeichert als im Reiseflug, bei welchem geringere Veränderungen in den Flugleistungsparametern auftreten. Zur Anwendung kann dann das am besten passende RedEmP für den jeweiligen Flugzeugtyp hinsichtlich Flughöhe, Sitzladefaktor und Distanz entsprechend der Angaben im Flugplan ausgewählt und durch Stauchung oder Streckung der verhältnismäßig homogenen Reiseflugphase auf die entsprechende Mission angepasst werden.

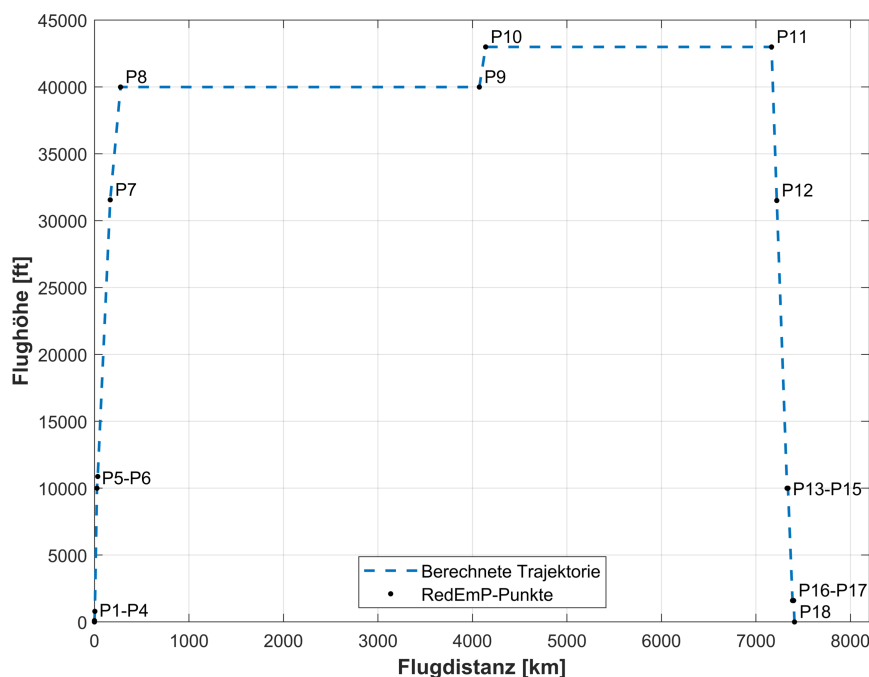


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung der charakteristischen Punkte des RedEmPs für eine Langstreckentrajektorie.

Im Zuge dieser Arbeit und zur Bewertung der Klimawirkung und verschiedener Mitigationsansätze im Rahmen des ClimOP-Projekts werden die RedEmPs weiterentwickelt, in verbesserter Auflösung neu berechnet und für weitere Flugzeug- und Flugleistungsmodelle miteinbezogen [223, 262]. So wird die Auflösung der Sitzladefaktoren erhöht und neben der kraftstoffoptimalen auch weitere konstante Flughöhen im typischen Reiseflughöhebereich berücksichtigt. Darüber hinaus werden neben BADA4 nun weitere Flugleistungsmodelle miteinbezogen und die Datenbank so hinsichtlich verfügbarer Flugzeug-Triebwerkskombinationen erheblich erweitert. Außerdem werden weitere Parameter, die insbesondere zur Simulation von Kondensstreifen relevant sind, ausgegeben. Dazu zählen Schub, Antriebsef-

fizienz sowie die Emissionsmenge und die Partikelmasse und -anzahl der nicht-volatilen Partikel [223, 262].

4.2.3 Klimawirkungssimulation

Auf Basis der örtlichen und zeitlichen Verteilung der Emissionsmengen je Spezies kann die Klimawirkung für jede einzelne Flugmission berechnet werden. Die Bestimmung der Klimawirkung wird dabei sowohl durch die ausgewählte Klimametrik⁶ und die betrachteten Emissionsspezies als auch die Bewertungsmethode beeinflusst. Die Klimawirkung der verschiedenen Emissionsspezies, die durch die Verbrennung von Kerosin in Flugzeugtriebwerken freigesetzt werden, variiert signifikant (vgl. Kapitel 2.3). Ebenso variieren die Unsicherheiten bei der Quantifizierung dieser Effekte je Spezies. So sind die Unsicherheiten für CO₂-Emissionen gering, während die Unsicherheit bei der Klimabewertung von NO_x, H₂O und CiC deutlich höher geschätzt wird (vgl. Abb. 2.4). Das Konfidenzniveau der direkten Klimawirkung von Aerosolen sowie deren Interaktion mit Wolken wird als besonders gering in Relation zur Höhe der Klimawirkung eingeschätzt. Folglich wird sich in der folgenden Klimabewertung auf die Klimawirkung von CO₂, H₂O, NO_x und kondensstreifeninduzierter Bewölkung beschränkt.

In der Bewertungskette für Maßnahmen der Minderung der Klimawirkung am DLR-Institut für Luftverkehr wird üblicherweise auf Modelle und Methoden zurückgegriffen, welche am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre entwickelt werden. In diesem Kontext haben sich zwei unterschiedliche Ansätze entwickelt: Zum einen existiert der Ansatz der meteorologischen Bewertung, wobei die tatsächlichen meteorologischen Bedingungen entlang der Flugmissionen berücksichtigt werden und die Klimawirkung mit dem Betrachtungszeitpunkt stark variiert. Als Beispiele sind hier Klimawirkungsfunktionen (*Climate change functions, CCFs*), algorithmische Klimawirkungsfunktionen (*Algorithmic climate change functions, aCCFs*) sowie das CoCiP-Modell zur Kondensstreifensimulation zu nennen. Zum anderen existieren klimatologische Bewertungsansätze, welche direkte meteorologische Abhängigkeiten vereinfachen und eine durchschnittliche Wettersituation zur Klimabewertung annehmen. Hier ist das globale Klimaantwort-Modell *AirClim* zu nennen, welches auch die Basis für die Ableitung vereinfachter Klimawirkungsregressionen im klimatologischen Kontext darstellt. Die verschiedenen Modelle können entweder direkt in Submodulen des iTCM ausgewertet oder im Fall von AirClim über eine RCE-Schnittstelle angesteuert werden. Im Folgenden werden die zentralen Charakteristika und die Funktionsweise der relevanten Modelle genauer erläutert.

Klimawirkungsfunktionen (CCFs)

Im Zuge des europäischen Projektes *REACT4C (Reducing Emissions from Aviation by Changing Trajectories for the benefit of Climate)* wurde die Klimasensitivität der Atmosphäre hinsichtlich lokaler Emissionen in sogenannten Klimakosten- bzw. Klimawirkungsfunktionen (*Climate cost functions/Climate change functions, CCFs*) für die Anwendung in der klimaoptimierten Flugplanung analysiert [269, 234]. Der Strahlungsantrieb durch

⁶Als Indikator wird auf Basis der Betrachtungen in Kapitel 2.4 die globale durchschnittliche Temperaturantwort (ATR) ausgewählt, da diese im direkten Zusammenhang zur Klimaauswirkung (d. h. Temperaturanstieg) steht, unterschiedliche Wirkungszeiten der Emissionsspezies einbezieht sowie nur geringe Abhängigkeit vom betrachteten Zeithorizont und Emissionsszenario aufweist. Im Gegensatz zum GWP, welches häufig im politischen Kontext verwendet wird, hat sich eine Betrachtung von ATR für die Analyse verschiedener Mitigationsmaßnahmen etabliert [149].

die Emissionsspezies NO_x , H_2O und ClC in Abhängigkeit von Ort, Zeit und Wettersituation wurde mit Mittelwerten des ECHAM5/MESSy-Atmosphärenchemie-Modells EMAC [233, 270] berechnet, wovon vierdimensionale CCFs abgeleitet wurden. Dabei wurden typische Wettersituationen im Nordatlantik für Winter und Sommer berücksichtigt [234]. Die Klimasensitivität wird in p-ATR20 pro Kilogramm verbranntem Kraftstoff (K/kg) in Abhängigkeit von Ort und Zeit der Emission für die acht ausgewählten Wettersituationen angegeben (vgl. Abb. 4.13). Eine Anwendbarkeit ist in diesem Kontext auf den nordatlantischen Raum und die acht betrachteten Wetterlagen beschränkt. Eine Erweiterung dieser CCFs vom Nordatlantik hin zum nordamerikanischen und europäischen Raum sowie eine Erhöhung der Auflösung wurden von Frömming et al. (2023) durchgeführt [271]. Eine Anbindung an das iTCM kann über eine lineare Interpolation entlang der berechneten Trajektorien realisiert werden.

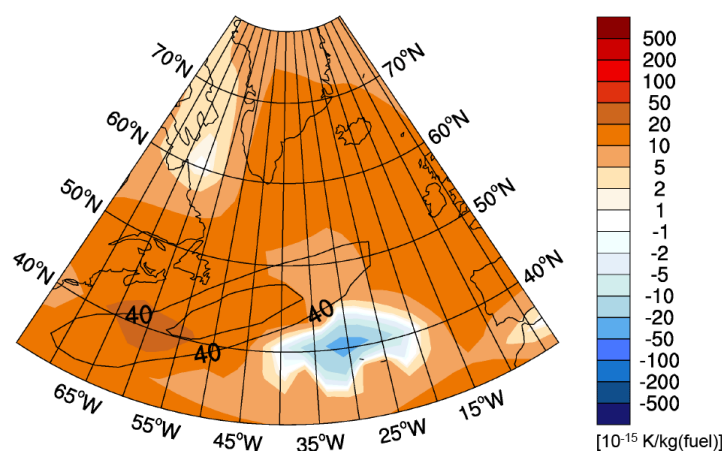


Abbildung 4.13: Beispiel einer zusammengeführten CCF für eine Sommerwettersituation auf einer Druckhöhe von 250hPa um 12:00 Uhr (UTC) [234].

Algorithmische Klimawirkungsfunktionen (aCCFs)

Um die Anwendbarkeit von der betrachteten Wettersituation der CCFs unabhängig zu machen und die Anwendung in der klimaoptimierten Flugplanung und Trajektorienoptimierung weiter zu vereinfachen, wurden auf Basis der CCFs sogenannte algorithmische Klimawirkungsfunktionen (*Algorithmic climate change functions, aCCFs*) abgeleitet. Durch eine statistische Korrelation zwischen Klimasensitivität aus den CCFs und meteorologischen Parametern wurden einfache algorithmische Approximationen als lineare Funktionen abgeleitet, die die Klimasensitivität je Spezies in Abhängigkeit der meteorologischen Parameter beschreiben. Über die geografische und zeitliche Varianz der meteorologischen Parameter kann folglich auch die räumlich und zeitlich variierende Klimasensitivität abgebildet werden [235]. Die Klimasensitivität je Spezies wird dabei für Wasserdampf in Abhängigkeit von potentieller Wirbelstärke PV (*potential vorticity*), für O_3 von Temperatur T und Geopotential Φ sowie für CH_4 in Abhängigkeit von Φ und einfallender Sonnenstrahlung F_{in} angegeben. Van Manen und Grewe (2019) geben ein angepasstes Bestimmtheitsmaß R^2 von 59 % für Wasserdampf, 42 % für NO_x -induzierte Ozonveränderungen und 17 % für NO_x -induzierte Methanveränderungen für den *REACT4C*-Datensatz. Mithilfe der gewählten meteorologischen Parameter kann folglich ein Teil der Streuung der Klimawirkung

erklärt werden, wobei die Güte der Anpassung dieser aCCFs mit längeren Lebenszeiten der Spezies deutlich abnimmt [235].

Die Funktionsvorschriften wurden in Folgeprojekten, u. a. *FlyATM4E*, erweitert und durch eine Funktionsvorschrift für Kondensstreifen (Gleichung 4.25) ergänzt, wobei Unterschiede in der Wirkung in Abhängigkeit des Sonnenstands berücksichtigt sind [272, 140]. In diesem Zuge erfolgt auch die Einbindung von Wirksamkeiten (*Efficacies*), die in einer Version 1.0 der aCCFs veröffentlicht wurden [140]. Darüber hinaus wurden Konversionsfaktoren für verschiedene Metriken eingeführt, um eine direkte Umrechnung von p-ATR20 zu F-ATR mit Zeithorizonten von 20, 50 und 100 Jahren zu ermöglichen. Über durchschnittliche Emissionsindizes je Flugzeugkategorie und Flughöhe aus dem DLR-Projekt Transport und Klima (TraK) [267] können die einzelnen Funktionen pro Emissionsspezies außerdem in einer gemeinsamen Funktion über alle berücksichtigten Spezies (*merged aCCF*, vgl. Abb. 4.14) kombiniert werden [272, 140]. Eine Erweiterung der aCCFs in Version 1.0A präsentieren Matthes et al. (2024), wobei die quantitative Abschätzung der aCCFs in ihrer Höhe mit dem Klimaantwort-Modell AirClim validiert wurde und zusätzliche Skalierungsfaktoren eingeführt werden, die die absolute Höhe der Klimawirkung im Vergleich zu V1.0 reduzieren [273].

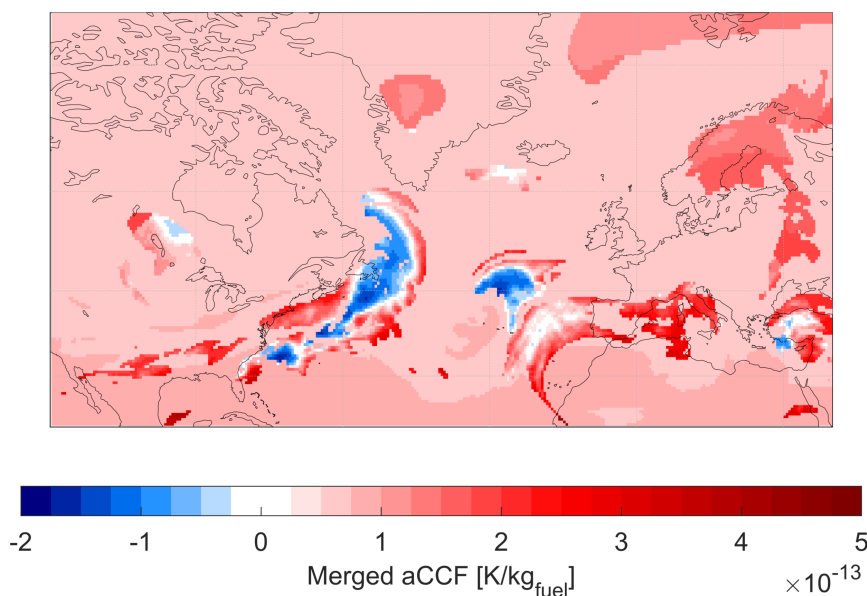


Abbildung 4.14: Beispiel einer zusammengeführten aCCF für p-ATR20 im Nordatlantik auf Druckhöhe 250 hPa am 11.12.2018, 12:00 Uhr (UTC).

Die Gleichungen 4.21 bis 4.25 beschreiben die aCCFs in V1.0 nach Dietmüller et al. (2023) und Yin et al. (2023) [140, 272]. Während die aCCFs für CO_2 und H_2O die Klimasensitivität in Kelvin pro Kilogramm Kraftstoff angeben, werden die NO_x -induzierten Werte für O_3 , CH_4 und PMO in Kelvin pro Kilogramm NO_x und für CiC in Bezug zur Flugdistanz in Kelvin pro Kilometer angegeben. Bei der CiC-aCCF (Gleichung 4.25) ist außerdem zu beachten, dass die Funktion nur dann ausgewertet wird, wenn die potentielle Kondensstreifenabdeckung größer als null ist. Diese kann im Rahmen der aCCFs entweder durch Überprüfung des SAC [129, 130] oder über Schwellwerte für Temperatur und relative Feuchte bestimmt werden. Tabelle 4.3 fasst die Wirksamkeiten, Metrik-Skalierungsfaktoren sowie die AirClim-Skalierungsfaktoren zusammen.

$$aCCF_{CO_2} = 7,48 \cdot 10^{-16} \frac{K}{kg} \quad (4.21)$$

$$aCCF_{H_2O} = 2,11 \cdot 10^{-16} + 7,70 \cdot 10^{-17} \cdot |PV| \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} a\widetilde{CCF}_{O_3} &= -2,64 \cdot 10^{-11} + 1,17 \cdot 10^{-13} \cdot T + 2,46 \cdot 10^{-16} \cdot \Phi \\ &\quad - 1,04 \cdot 10^{-18} \cdot T \cdot \Phi \\ aCCF_{O_3} &= \begin{cases} a\widetilde{CCF}_{O_3}, & a\widetilde{CCF}_{O_3} > 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} a\widetilde{CCF}_{CH_4} &= -4,84 \cdot 10^{-13} + 9,79 \cdot 10^{-19} \cdot \Phi - 3,11 \cdot 10^{-16} \cdot F_{in} \\ &\quad + 3,01 \cdot 10^{-21} \cdot \Phi \cdot F_{in} \\ aCCF_{CH_4} &= \begin{cases} a\widetilde{CCF}_{CH_4}, & a\widetilde{CCF}_{CH_4} < 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\ aCCF_{PMO} &= 0,29 \cdot aCCF_{CH_4} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} RF_{Nacht-CiC} &= \begin{cases} 10^{-10} \cdot (0,0073 \cdot 10^{0,0107 \cdot T} - 1,03), & T > 201K \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\ RF_{Tag-CiC} &= 10^{-10} \cdot (-1,7 - 0,0088 \cdot OLR) \\ aCCF_{CiC} &= 0,0151 \cdot RF_{CiC} \end{aligned} \quad (4.25)$$

	Wirksamkeit	AirClim-Faktor	Metrikskalierung		
			F-ATR20	F-ATR50	F-ATR100
CO₂	1	1	9,4	44,0	125,0
H₂O	1	0,641	14,5	34,1	58,3
O₃	1,37	0,179	14,5	34,1	58,3
CH₄	1,18	0,058	10,8	42,5	98,2
PMO	1,18	0,058	10,8	42,5	98,2
CiC	0,42	0,333	13,6	30,16	48,9

Tabelle 4.3: Wirksamkeit, AirClim-Skalierungsfaktor und Metriken-Skalierung verschiedener Emissionsspezies, die in aCCFs berücksichtigt werden können [140, 273].

Die aCCFs können in einem Submodul des iTCM (*Post processing*) direkt entlang der Trajektorien unter Berücksichtigung der meteorologischen Parameter ausgewertet werden. Alternativ kann eine Auswertung über Klimasensitivitätskataster, die auf den aCCFs basieren, erfolgen. Diese Sensitivitätskataster beinhalten Antwortflächen in Form von präproduzierten aCCFs für die Jahre 2018 bis 2022 in einer dreistündigen Auflösung für den Nordatlantik [225]. Deren Auswertung ist ebenfalls im aCCF-Submodul des iTCMs realisiert.

Modell zur Vorhersage kondensstreifeninduzierter Bewölkung (CoCiP)

Das Modell zur Vorhersage kondensstreifeninduzierter Bewölkung (*Contrail Cirrus Prediction Model, CoCiP*) fokussiert sich auf die Bewertung der Klimawirkung von Kondensstreifen und lässt die Wirkung der übrigen Spezies außen vor. Das Modell ist ebenfalls als Submodul im iTCM integriert und kann im Anschluss an die Trajektorienrechnung verwendet werden, um die Bildung von Kondensstreifen zu untersuchen, deren Lebensdauer zu bestimmen und die resultierende Klimawirkung abzuschätzen. CoCiP wurde von Schumann (2012) vorgestellt und seitdem in verschiedenen Studien weiterentwickelt [236]. Im Vergleich zum statistischen Ansatz der aCCFs werden im Zuge von CoCiP die mikrophysikalischen Eigenschaften von Kondensstreifen (z. B. Eispartikelradius oder optische Dicke) in Abhängigkeit von Luftverkehrsdaten, Partikelemissionen und Meteorologie analysiert, wobei der gesamte Lebenszyklus der Kondensstreifen betrachtet wird [236, 72].

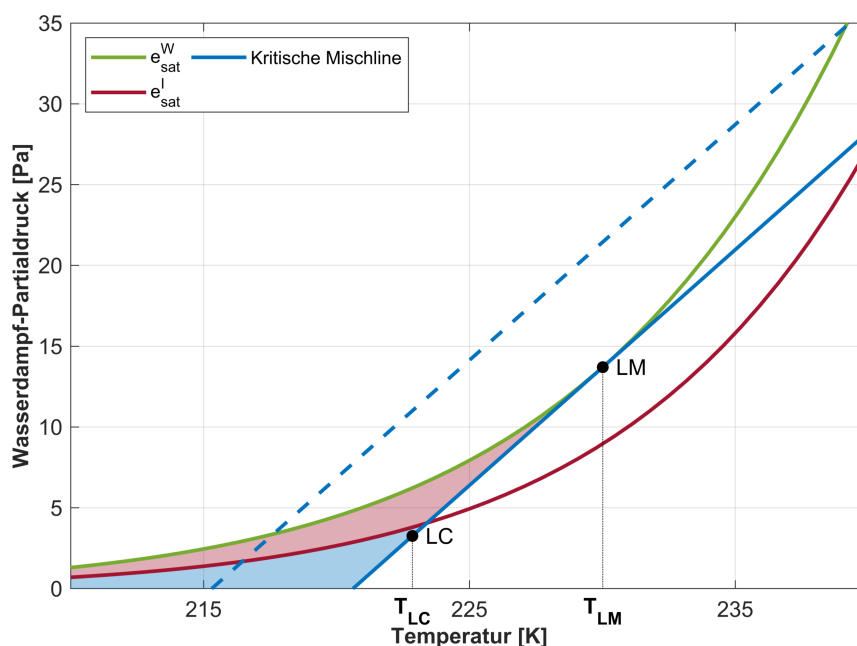


Abbildung 4.15: Visualisierung des Schmidt-Applemann-Kriteriums und Bestimmung der Kondensstreifenpersistenz anhand der kritischen Mischlinie und den Sättigungsdampfdruckkurven [eigene Darstellung nach 128].

Dabei wird die Bildung von Kondensstreifen in ausreichend kalter und feuchter Umgebung für das jeweilige Missionssegment und den Flugzeugtyp auf Basis des Schmidt-Applemann-Kriteriums (*Schmidt-Applemann criterion, SAC*) bestimmt. Die Entstehung von Kondensstreifen wird entsprechend bei Unterschreitung der kritischen Temperatur T_{LC} sowie Überschreitung der Schwellfeuchtigkeit RH_{LC} modelliert. Der Zusammenhang ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Unter Annahme isobarer Mischung von heißen Flugzeugabgasen mit umgebender Luft (durch die Mischlinie mit Steigung G beschrieben) können durch den Berührungspunkt zwischen kritischer Mischlinie und Sättigungsdampfdruckkurve über Wasser e_{sat}^w die Bedingungen bestimmt werden, zu denen sich gerade noch Kondensstreifen bilden (eingefärbter Bereich). Die Steigung der Mischlinie wird dabei gemäß Formel 4.26 in Abhängigkeit des Emissionsindex für Wasserdampf EI_{H_2O} , der spezifischen Wärmekapazität von Luft c_p , des Umgebungsdrucks p_{amb} , des Verhältnisses der molaren Massen von Wasser und Luft ϵ , der spezifischen Verbrennungswärme des Kraftstoffs Q sowie der

Antriebseffizienz η bestimmt. Die kritische Temperatur bei einer relativen Feuchtigkeit von $RH_w = 1$ wird durch den Berührungspunkt zwischen e_{sat}^w und kritischer Mischlinie mit Steigung G bei Temperatur T_{LM} bestimmt. Durch numerische Approximation mittels Taylorreihenentwicklung kann auch für RH_w -Werte unter 1 die Grenztemperatur T_{LC} berechnet werden. Die kritische Schwellfeuchte RH_{LC} kann für die Umgebungstemperatur T_{amb} gem. Formel 4.27 berechnet werden [129, 130, 236].

$$G = \frac{EI_{H_2O} \cdot c_p \cdot p_{amb}}{\epsilon \cdot Q \cdot (1 - \eta)} \quad (4.26)$$

$$RH_{LC} = \frac{G \cdot (T_{amb} - T_{LC}) + e_{sat}^W(T_{LC})}{e_{sat}^W(T)} \quad (4.27)$$

Da sich Kondensstreifen zum Teil bereits nach wenigen Sekunden bis Minuten auflösen, sind die gebildeten Eiswolken im nächsten Schritt auf deren Persistenz zu überprüfen. In eisübersättigten Gebieten (*Ice super-saturated regions, ISSRs*) mit einer relativen Feuchtigkeit bezüglich Eis $RH_i \geq 100\%$ steigt die Lebensdauer der Kondensstreifen, da die Eispartikel durch Resublimieren der Wasserdampfmoleküle in der umgebenden Luft wachsen. In Abbildung 4.15 ist der Bereich kurzlebiger Kondensstreifen in blau und der Bereich persistenter (langlebiger) Kondensstreifen in rot markiert.

Im Anschluss an die Bildung der Kondensstreifen im Abgasstrahl des Flugzeugtriebwerks folgt die Wirbelphase, in welcher die Kondensstreifen weiterhin durch missionspezifische Parameter wie Spannweite und Gewicht des Flugzeugs sowie die Fluggeschwindigkeit beeinflusst werden. Durch die anfängliche Wirbeldynamik können die Eispartikel durch die Deposition von Wasserdampf anwachsen und somit die Eisübersättigung reduzieren. Das Absinken der Kondensstreifen führt außerdem zu einer adiabatischen Erwärmung, wodurch Eispartikel durch Sublimation reduziert werden. In der abschließenden Dispersionsphase wird die kondensstreifeninduzierte Bewölkung nicht mehr hauptsächlich durch die Dynamik des Flugzeugs, sondern die umgebenden atmosphärischen Bedingungen beeinflusst. Mikrophysikalische und optische Eigenschaften sind dann von Umgebungsfeuchtigkeit und -temperatur, Windscherung und Turbulenzen abhängig. Letztlich wachsen die Eispartikel im weiteren Verlauf der Dispersionsphase und fallen in tiefere Atmosphärenschichten, wo sie entweder weiterwachsen oder verdampfen. In CoCiP wird die Wirbelschleppenphase mit einem probabilistischen zweiphasigen Flugzeug-Wirbelmodell beschrieben, wohingegen in der Dispersionsphase ein Langrange-Gaußsches Abgasfahnenmodell zum Einsatz kommt [236, 133].

Die berechneten Kondensstreifencharakteristika (insbesondere Kondensstreifentemperatur, optische Dicke, effektiver Partikelradius, Sonnenzenitwinkel sowie optische Dicke der Bewölkung oberhalb des entstehenden Kondensstreifens) dienen als Eingaben für ein parametrisches Modell zur Berechnung des langwelligen sowie des kurzwelligen Strahlungsantriebs (RF_{LW} und RF_{SW}) für jeden Eispartikeltyp. Daraus können wiederum mit der zugehörigen Gewichtung w der Energieantrieb und das AGWP über den Zeithorizont H mithilfe von Breite b und Länge l des Kondensstreifens berechnet werden (vgl. Formel 4.28 - 4.30) [236, 72, 65].

$$RF_{netto} = \sum_{i=1}^7 w_{Partikel,i} \cdot (RF_{LW}(i) + RF_{SW}(i)) \quad (4.28)$$

$$\text{mit } \sum_{i=1}^7 w_{Partikel,i} = 1$$

$$EF_{CiC} = \int_0^H RF_{netto}(t) \cdot b(t) \cdot l(t) dt \quad (4.29)$$

$$AGWP_{CiC} = \frac{EF_{CiC}}{A_{Erde} \cdot t_{Jahr}} \quad (4.30)$$

AirClim

Im Gegensatz zu CCFs, aCCFs und CoCiP werden beim nicht-linearen Klimaantwort-Modell *AirClim* nicht die tatsächlichen meteorologischen Bedingungen entlang des Fluges in die Klimabewertung miteinbezogen, sondern auf Basis linearisierter atmosphärischer Prozesse von der Emission hin zum Strahlungsantrieb eine klimatologische Bewertung für die mittleren meteorologischen Bedingungen eines Jahres durchgeführt [112, 116]. Das Modell wurde erstmals durch Grewe & Stenke (2008) für eine Anwendung im Überschallluftverkehr vorgestellt [112].

AirClim berechnet die oberflächennahe Temperaturänderung für CO₂, H₂O, O₃, CH₄, PMO und lineare Kondensstreifen. Veränderungen der Emissionsmengen z. B. durch die Anwendung bestimmter Maßnahmen im Luftverkehr, in Kombination mit vorberechneten atmosphärischen Daten in Abhängigkeit des Emissionsortes, ermöglichen die Berechnung der zeitlichen Entwicklung von Konzentrationsveränderungen in der Atmosphäre als Linearkombination, woraus wiederum Strahlungsantrieb und Temperaturänderung berechnet werden können [112]. Die vorberechneten atmosphärischen Daten resultieren aus umfassenden Simulationen für stationäre Zustände aus dem Klimachemiemodell E39/CA bzw. dem ECHAM4-CCMod-Modell für Kondensstreifen [34, 274, 131]. Die Programmlogik von AirClim ist in Abbildung 4.16 dargestellt.

Die Erweiterung *AirClim 2.0* wird von Dahlmann (2012) vorgestellt. In diesem Zuge werden die vertikale und die horizontale Auflösung auf 7 Breitengrad- und 12 Höhenbänder erhöht, sodass z.B. auch typische Flughöhen des Unterschallluftverkehrs realistisch bewertet werden können, und die Effekte von Kondensstreifenzirren und PMO berücksichtigt [34, 114, 116]. Im Rahmen verschiedener Monte-Carlo-Simulationen konnte gezeigt werden, dass technische und betriebliche Ansätze zur Minderung der Klimawirkung verlässlich mit AirClim bewertet werden können [116].

AirClim kann als Modell des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre über eine RCE-Schnittstelle direkt an GRIDLAB oder das iTCM angebunden werden. Aktuelle Erweiterungen ermöglichen auch die Bewertung von Effekten durch die Verwendung neuartiger Kraftstoffe wie SAF oder Wasserstoff.

Klimawirkungsregressionen

Zur stark vereinfachten Bewertung der Klimawirkung von Einzelmissionen in einem klimatologischen Ansatz wurden auf Basis der Bewertung umfangreicher Flugpläne mit AirClim außerdem eindimensionale Klimawirkungsregressionen entwickelt [150, 275]. In den von

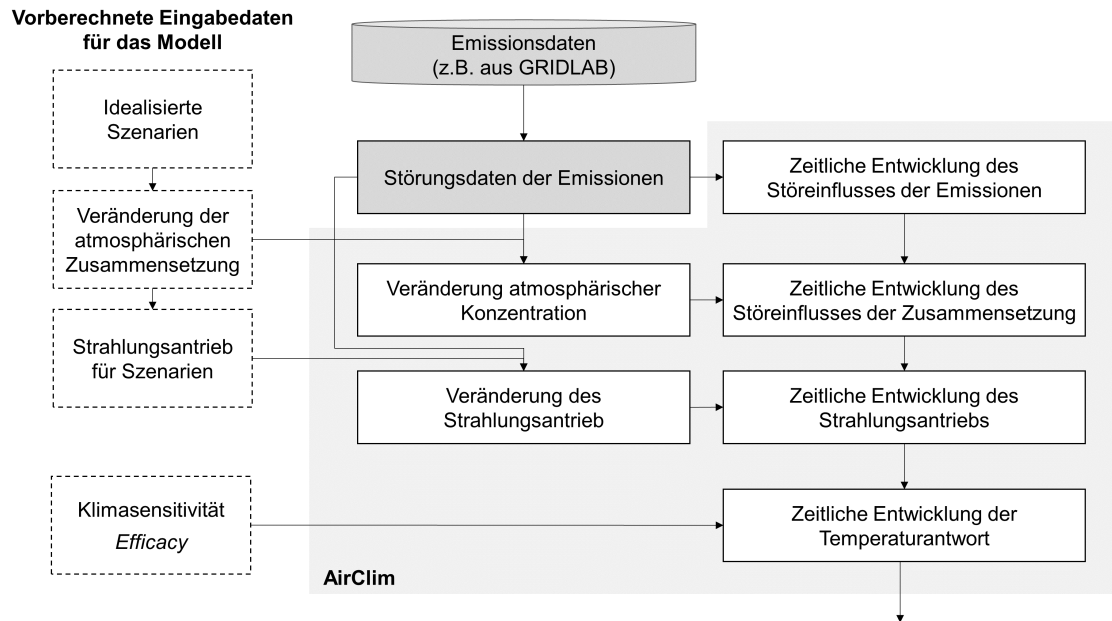


Abbildung 4.16: Schematische Darstellung der Methode in AirClim [eigene Darstellung nach 112, 114, 116].

Dahlmann et al. (2021) entwickelten Formeln werden die CO_2 -Äquivalente (CO_2e) bezogen auf die Metrik F-ATR100 für die Spezies H_2O , NO_x und CiC unter Berücksichtigung von Missionsdistanz s und mittlerem Breitengrad von Start- und Zielflughafen $\bar{\varphi}$ berechnet. Die daraus resultierenden eindimensionalen Funktionen (vgl. Formeln 4.31 bis 4.33) können in erster Näherung verwendet werden, um die Klimawirkung von Flügen im Langstreckenbereich abzuschätzen [150]. Da die Datengrundlage für die Generierung der Regressionen ausschließlich für einen Airbus A330 berechnet wurde, ist eine Anwendung für alternative Flugzeugtypen nur begrenzt möglich. Eine Auswertung der Anpassungsgüte der Regressionen zeigt eine mittlere quadratische Abweichung (*Mean squared error, MSE*) von 0,19 sowie dass 92 % der geschätzten CO_2e der analysierten Stichprobe sich um weniger als ± 20 % von dem mit AirClim berechneten Wert unterscheiden (vgl. Abb. 4.17) [150].

$$\text{CO}_2e_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2 \cdot \arctan(s) \cdot (b_{\text{H}_2\text{O}}\bar{\varphi}^3 + c_{\text{H}_2\text{O}}\bar{\varphi}^2 + d_{\text{H}_2\text{O}}\bar{\varphi} + e_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (4.31)$$

$$\text{CO}_2e_{\text{NO}_x} = (2,3 \cdot \arctan(3,1 \cdot s) - 2,0) \cdot (c_{\text{NO}_x}\bar{\varphi}^2 + d_{\text{NO}_x}\bar{\varphi} + e_{\text{NO}_x}) \quad (4.32)$$

$$\text{CO}_2e_{\text{CiC}} = 1,1 \cdot \arctan(0,5s) \cdot (a_{\text{CiC}}\bar{\varphi}^3 + b_{\text{CiC}}\bar{\varphi}^3 + c_{\text{CiC}}\bar{\varphi}^2 + d_{\text{CiC}}\bar{\varphi} + e_{\text{CiC}}) \quad (4.33)$$

Auf dieser Basis wurden von Thor et al. (2023) erweiterte Regressionsformeln berechnet, welche neben den CO_2 -Äquivalenten auch die Berechnung von ATR100 und AGWP100 ermöglichen [275]. Darüber hinaus ist die Betrachtung verschiedener Flugzeugtypen über die Sitzplatzkategorie möglich. Bei der Betrachtung von Distanz und mittlerem Missionsbreitengrad werden darüber hinaus drei verschiedene Cluster, d. h. ein Kurzstrecken-Segment, ein tropisches Segment und ein Segment mittleren Breitengrads, gebildet, für die jeweils individuelle Regressionsformeln abgeleitet wurden. Damit konnte die Anpassungsgüte im Vergleich zu den ursprünglichen Formeln deutlich erhöht werden [275].

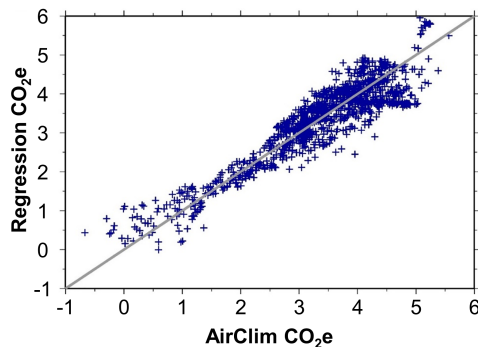


Abbildung 4.17: Korrelation der CO₂e der betrachteten Nicht-CO₂-Effekte nach Berechnung mit Regressionsformeln im Vergleich zu AirClim [150].

4.2.4 Bewertung der betrieblichen Auswirkungen

Um verschiedene betriebliche Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung nicht nur anhand der Effektivität, sondern auch anhand der Effizienz miteinander vergleichen zu können, werden neben der Veränderung in der Klimawirkung auch Kennzahlen der betrieblichen Auswirkungen berechnet. Das umfasst neben der Berechnung trajektorienspezifischer Parameter wie Flugzeit, Flugdistanz und Kraftstoffverbrauch insbesondere die Berechnung der direkten Betriebskosten (*Direct operating cost, DOC*, vgl. Abb. 4.2). Für die Berechnung der Betriebskosten wurde im Projekt ClimOP ein vereinfachter Ansatz basierend auf der TU-Berlin-Methode, wie sie im *Central Reference Aircraft Data System* angewendet wird, entwickelt [276, 277, 161]. Das Modell basiert auf durchschnittlichen Kostensätzen für jedes Flugzeugsegment (Turboprop, Regional-, Kurz- und Langstrecke sowie Kurz- und Langstreckenfrachtverkehr) [67]. Die Systematik ist in den folgenden Formeln 4.34 und 4.35 dargestellt. Die Gesamtbetriebskosten (*Total operating cost, TOC*) setzen sich dabei aus den DOC, die direkt dem Flugbetrieb zugeordnet werden können, und den indirekten Betriebskosten (*Indirect operating cost, IOC*) zusammen, welche beispielsweise durch Administration und Vertrieb erzeugt werden. Die DOC bestehen wiederum aus einem fixen Anteil DOC_{fix} und einem variablen Anteil DOC_{var} , wobei der variable Teil mit Flugzyklen z , Flugzeit t , Kraftstoffverbrauch m_{fuel} und zurückgelegter Distanz s variiert. Dazu zählen Landegebühren und Gebühren für Bodenabfertigung sowie Navigation, Kosten für Wartung, Kraftstoff und die Besatzung des Flugzeugs, für die jeweils individuelle Einheitskosten c_i verwendet werden.

$$DOC = DOC_{fix} + DOC_{variable} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned}
 DOC_{variable} = & DOC_{Landing} + DOC_{Ground-Handling} + DOC_{Maintenance} + \\
 & DOC_{Fuel} + DOC_{Navigation} + DOC_{Crew} \\
 \text{mit } DOC_i = & c_i \cdot z \text{ für } DOC_{Landing}, DOC_{Ground-Handling} \\
 \text{mit } DOC_i = & c_i \cdot t \text{ für } DOC_{Maintenance}, DOC_{Crew}, \\
 \text{mit } DOC_{Fuel} = & c_f \cdot m_{fuel}, \\
 \text{mit } DOC_{Navigation} = & c_N \cdot s
 \end{aligned} \quad (4.35)$$

Die Auswertung ist direkt an die Trajektorienrechnung des iTCMs angebunden. Über die Betriebskosten hinaus können weitere Stakeholder-Kennzahlen wie beispielsweise die Passagierakzeptanz, Auswirkungen auf das Airline-Netzwerk oder die Komplexität der Verkehrssteuerung betrachtet werden. Diese Kennzahlen wurden umfassend im EU Projekt ClimOP identifiziert und in Einzelstudien bewertet, sodass sich diese Arbeit auf eine qualitative Analyse dieser Kennzahlen beschränkt (vgl. Anhang C).

4.3 Ansätze zum Maßnahmenvergleich

Um unterschiedliche Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr miteinander zu vergleichen, existieren verschiedene Ansätze. Diese unterscheiden sich in Genauigkeit und Aussagekraft sowie Aufwand und Anwendbarkeit. Abbildung 4.18 fasst mögliche Vorgehensweisen mit ihren Vor- und Nachteilen zusammen.

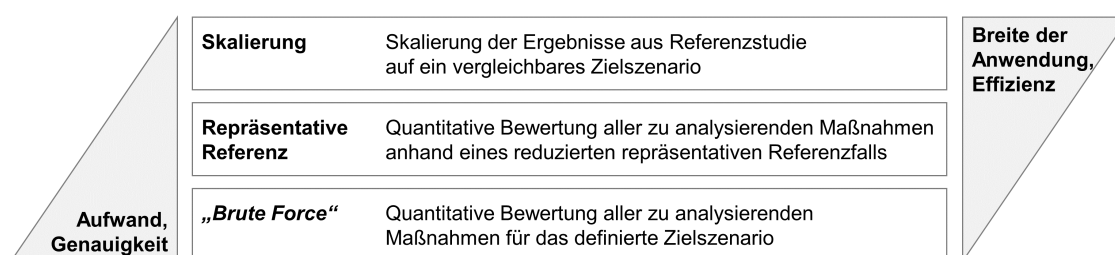


Abbildung 4.18: Ansätze zum Vergleich verschiedener Maßnahmen und Studien.

Zunächst lassen sich die verschiedenen zu vergleichenden Maßnahmen individuell bewerten, indem eine detaillierte Trajektorien- und Emissionsrechnung sowie die entsprechende Klimabewertung durchgeführt werden (*Brute Force*). Dafür wird die Modellierungsfähigkeit für jede zu betrachtende Maßnahme benötigt und die Modellkette aus Kapitel 4.2 ist für jede weitere Maßnahme, die der Betrachtung zugeführt wird, zu erweitern. Fehlen die Modellierungsfähigkeiten oder benötigte Daten, kann diese detaillierte Vergleichsmethode nicht angewendet werden. Für die Bewertung umfangreicher Referenzflugpläne werden außerdem umfassende Simulationskapazitäten benötigt. Andererseits liefert dieser Ansatz die höchste Ergebnisgenauigkeit und maximale Vergleichbarkeit, da die verschiedenen Maßnahmen mit dem höchsten Detailgrad für jede zu betrachtende Mission bewertet werden. Die Ergebnisse bieten darüber hinaus weitere Analysemöglichkeiten z. B. zum Einfluss verschiedener Missionscharakteristika wie Missionslänge, Flotte oder geographischer Ausdehnung sowie zur detaillierten Untersuchung der Auswirkungen auf die betroffenen Stakeholder des Luftverkehrssystems.

Um die Analyse von umfangreichen Referenzflugplänen mit vertretbarem Aufwand durchführen zu können, kann ein repräsentativer Teildatensatz definiert werden, für welchen die Detailbewertung durchgeführt wird. Die Ergebnisse für die repräsentative Stichprobe werden anschließend auf den Gesamtdatensatz übertragen. Diese Methode eignet sich für Anwendungsfälle, bei denen eine große Stichprobe zu analysieren ist und gleichzeitig alle Modellierungsfähigkeiten für die Einzelmaßnahmen vorliegen. Der Aufwand ist geringer als beim *Brute-Force*-Ansatz, allerdings wird die Genauigkeit durch Limitierungen bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse von der reduzierten Stichprobe beschränkt. Gerade wenn die detaillierten Modellierungsfähigkeiten nicht für jede der zu berücksichtigenden Maßnahmen vorliegen, ist eine Detailmodellierung der einzelnen Maßnahmen mit der Modellkette

aus Kapitel 4.2 nicht möglich. Deshalb wird im Folgenden ein Skalierungsansatz entwickelt, mit welchem auch solche Maßnahmen in einem Vergleich berücksichtigt werden können, für die diese Modellierungsfähigkeiten fehlen. So kann jede Literaturstudie mit bekannten Studienrandbedingungen auf ein vergleichbares Bewertungsszenario transformiert werden und ein direkter Vergleich der Ergebnisse erfolgen. Das ist gerade in solchen Fällen notwendig, in denen sich die untersuchten Referenzszenarien stark unterscheiden⁷. Die Anwendungsbreite ist hier maximal und der Rechenaufwand gering. Die Genauigkeit des Vergleichs ist allerdings niedriger als bei den Ergebnissen der Detailbewertung.

Skalierungsmethode zur Berücksichtigung unterschiedlicher Studienrandbedingungen im Vergleich

Ausgangspunkt für die Skalierung sind die Ergebnisse der Bewertung von Einzelmaßnahmen, welche für ein Szenario mit Maßnahmenimplementierung (Mit-Maßnahme-Szenario, MMS) in Relation zum Szenario ohne Maßnahmenimplementierung (*Business-as-usual*, BAU) bestimmt wurden. Neben dem Mitigationpotential (absolut oder relativ) oder der Klimawirkung in beiden Szenarien der Referenzstudie ψ sind die betrachtete Klimametrik⁸ und der Referenzflugplan für die Skalierung elementar. Dieser Referenzflugplan beschreibt die betrachteten Start-Ziel-Paarungen, die dazugehörige Flotte sowie die zeitliche Ausdehnung. Darüber hinaus ist analog das Ziel der Skalierung zu definieren, welches wiederum durch die betrachtete Klimametrik und den Zielflugplan mit einem bestimmten zeitlichen Umfang definiert ist. Der Gesamtflugplan als Ziel der Skalierung kann üblicherweise in einen Anwendungsflugplan, d. h. den Teil des Flugplans, für den die untersuchte Maßnahme angewendet werden kann, sowie den Restflugplan mit von der Maßnahmenimplementierung nicht betroffenen Flügen unterteilt werden.

Da die Klimawirkung des Luftverkehrs nicht nur von der Menge des verbrannten Kraftstoffs und den dazu proportionalen CO₂-Emissionen abhängt, sondern auch durch räumlich und zeitlich variierende Nicht-CO₂-Effekte beeinflusst wird (vgl. Kapitel 2.3), sind beide Effekte im Skalierungsprozess zu berücksichtigen.

Im ersten Schritt erfolgt eine Skalierung der Ergebnisse hinsichtlich der Größe des Referenzszenarios, wobei der Umfang des Flugplans und der damit assoziierte Kraftstoffverbrauch bzw. die Emissionsmengen des Referenzflugplans (Index^{Ref}) auf den Zielflugplan (Index^{Ziel}) hin skaliert werden. Hier kann der Kraftstoffverbrauch m_{Fuel} für Referenz- und Zielflugplan beispielsweise durch standardisierte RedEmPs oder lineare Regressionen [vgl. 275, 278] bestimmt oder die verfügbaren Sitzplatzkilometer (*Available seat kilometers*, ASK) als vereinfachte Skalierungsgröße herangezogen werden. Hieraus ergibt sich der flugplanspezifische Skalierungsfaktor f_a nach Formel 4.36:

$$f_a = \frac{m_{Fuel}^{Ziel}}{m_{Fuel}^{Ref}} \approx \frac{ASK^{Ziel}}{ASK^{Ref}} \quad (4.36)$$

Im zweiten Schritt werden dann die nichtlinearen Klimaeffekte von Nicht-CO₂-Emissionen über einen zweiten Skalierungsfaktor f_c auf Basis der CO₂-Äquivalente in der Skalierung berücksichtigt. Diese können beispielsweise über Klimaregressionsfunktionen von Dahlmann

⁷z.B. beim Vergleich der Ergebnisse einer Studie zum Formationsflug im Nordatlantik mit einer Studie zur Luftbetankung im asiatischen Raum

⁸Im Folgenden wird der Bewertungsprozess beispielhaft für eine Bewertung der Klimawirkung in F-ATR100 gezeigt, da sowohl die CO₂e-Regressionsformeln als auch die Metrikkonversionsfaktoren in der Literatur vollständig vorliegen. Die Methode ist analog aber auch für andere Klimametriken anwendbar.

et al. (2021) bzw. Thor et al. (2023), welche die Klimawirkung von Einzelflügen in Abhängigkeit von Flugzeugtyp, Missionsdistanz und Breitengrad bestimmen (vgl. Kapitel 4.2.3), abgeschätzt werden [150, 275]. Der wirkungsabhängige Skalierungsfaktor f_c wird nach Formel 4.37 bestimmt:

$$f_c = \frac{CO_2e^{Ziel}}{CO_2e^{Ref}} \text{ mit } CO_2e_x = \frac{F-ATR100_x}{F-ATR100_{CO_2}} \quad (4.37)$$

Die Gesamtskalierung der Klimawirkung für einen Zielflugplan setzt sich dann aus den beiden Faktoren f_a und f_c zusammen (Formel 4.38):

$$F-ATR100^{Ziel} = f_a \cdot f_c \cdot F-ATR100^{Ref} \quad (4.38)$$

Bei Verfügbarkeit der Mitigationspotentiale je Spezies x für die zu betrachtende Studie kann der Skalierungsansatz für höhere Genauigkeit auf eine speziesindividuelle Betrachtung erweitert werden. Die Klimawirkung für MMS und BAU kann dann nach Formel 4.39 berechnet werden.

$$\begin{aligned} F-ATR100_{abs}^{Ziel,S} &= \sum_x f_a \cdot f_{c,x} \cdot F-ATR100_{abs,x}^{Ref,S} \\ \text{mit } f_{c,x} &= \frac{CO_2e_x^{Ziel}}{CO_2e_x^{Ref}} \\ \text{für } x &\in \{CO_2, H_2O, NO_x, CiC\} \\ \text{für } S &\in \{BAU, MMS\} \end{aligned} \quad (4.39)$$

Im Falle einer Unterscheidung von Anwendungs- und Gesamtflugplan (vgl. Abbildung 4.19, Indizes Anw und $Total$) ist das Mitigationspotential der Klimawirkung für den Gesamtflugplan auf Basis der Maßnahmenimplementierung für den Anwendungsflugplan zu bestimmen. Durch die Differenz der Klimawirkung zwischen BAU und MMS ergibt sich das absolute Mitigationspotential (Index abs), welches dann auch auf den Gesamtflugplan übertragen, und anschließend das relative Minderungspotential (Index rel) bestimmt werden kann (Formeln 4.40 und 4.41).

$$\Delta F-ATR100_{abs}^{Total} = \Delta F-ATR100_{abs}^{Anw} = F-ATR100_{abs}^{Anw,BAU} - F-ATR100_{abs}^{Anw,MMS} \quad (4.40)$$

$$\Delta F-ATR100_{rel}^{Total} = \frac{\Delta F-ATR100_{abs}^{Total}}{F-ATR100_{abs}^{Total,BAU}} \quad (4.41)$$

Eine Zusammenfassung der Methode zum Maßnahmenvergleich durch Skalierung ist in Abbildung 4.19 dargestellt.

Die Anwendung der Skalierungsmethode kann analog auch für die folgenden Fälle durch die entsprechenden Anpassungen erfolgen [279]:

- Berücksichtigung alternativer Klimametrien: Neben der Verwendung von F-ATR100 als betrachtete Klimametrik kann die Skalierung sowohl für andere Klimametrien in der Referenzstudie als auch für andere Metrien im Zielszenario durchgeführt werden. Hierfür kann entweder die Umwandlung der alternativen Metrik in F-ATR100, z. B. auf Basis der Skalierungsfaktoren nach Dietmüller et al. (2023) bzw. Dahlmann et al. (2025) [140, 280], erfolgen oder die CO₂-Äquivalente werden direkt für die alternative Metrik bestimmt.

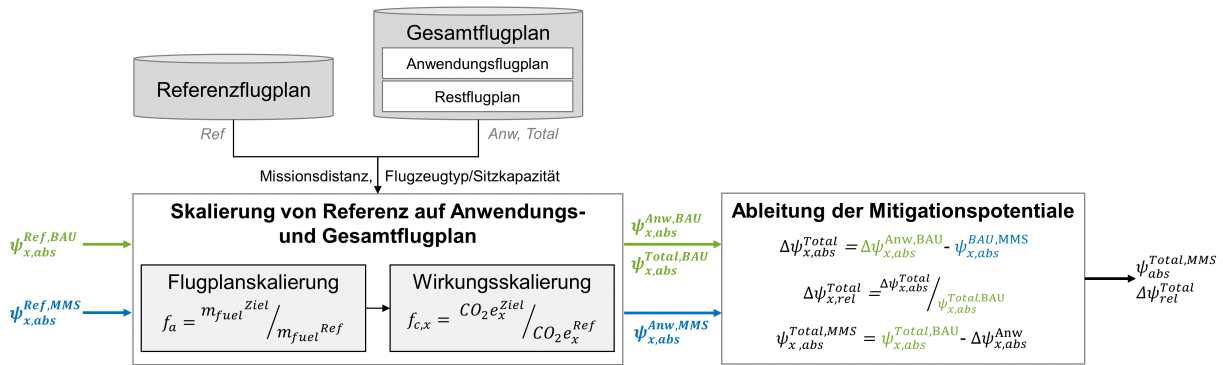


Abbildung 4.19: Schematische Darstellung des Skalierungsansatzes zum Vergleich verschiedener Maßnahmen mit unterschiedlichen Untersuchungsflugplänen.

- Berücksichtigung der Analyse zeitlich beschränkter Referenzstudien: Bei Studien, die für verschiedene repräsentative Wettersituationen oder ausgewählte Analysetage eines Jahres durchgeführt wurden, sind die Referenzergebnisse im Falle der Betrachtung eines Jahres ebenfalls auf diesen Zeitraum zu skalieren. Hier ist die Repräsentativität der betrachteten Analysetage bzw. der betrachteten Wettersituation für den Gesamtzeitraum abzuschätzen [vgl. 234, 281]. Im Zuge einer meteorologischen Betrachtung in Referenz- und Zielstudie kann die Bestimmung der CO₂-Äquivalente für Referenz- und Zielszenario beispielsweise auch mit aCCFs erfolgen [140, 158].
- Verwendung relativer statt absoluter Mitigationspotentiale: Liegen statt der absoluten Klimawirkung für MMS und BAU die relativen Mitigationspotentiale vor, ist die absolute Klimawirkung für den Referenzfall im ersten Schritt auf Basis des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Äquivalente abzuschätzen und die Methode anschließend analog anwendbar.

Eine Verifikation und Validierung der entwickelten Methode sowie ein Vergleich mit den Ansätzen der individuellen Maßnahmenbewertung erfolgen in Kapitel 4.4.

Berücksichtigung unterschiedlicher Implementierungszeitpunkte

Da die Effektivität verschiedener Maßnahmen auch vom Implementierungszeitpunkt abhängt (vgl. Kapitel 3.4), ist die Maßnahmenreife beim Vergleich ebenfalls zu berücksichtigen. Dazu ist die Betrachtung des Temperaturverlaufs über die Zeit sinnvoll. Ausblickend kann so die Kombination verschiedener Maßnahmen zu einem gemeinsamen Szenario erfolgen und dieses anhand des Temperaturverlaufs über die Zeit analysiert werden, was dann auch als Basis für den Abgleich mit definierten Klimazielen genutzt werden kann.

Um die Maßnahmenreife ohne detaillierte Modellierung (vgl. Abb. 4.18) berücksichtigen und den zeitlichen Verlauf der Temperaturveränderung über die Zeit abschätzen zu können, kann eine vereinfachte Methode zur Ableitung der Temperaturentwicklung genutzt werden [279]. Dabei wird das Potential zur Minderung der Klimawirkung auf Basis der Konversionsfaktoren von Dahlmann et al. (2025) zunächst in die Metrik p-ATR100 umgerechnet [280]. Auf Basis von standardisierten Temperaturverläufen für gegebene p-ATR100-Werte im zeitlichen Verlauf aus dem Klimaantwort-Modell AirClim können dann aus den Mitigationspotentialen die Änderungen im Temperaturverlauf für eine Puls-Emission in jedem betrachteten Jahr berechnet werden. Durch die Summe der Puls-Emissionen wird dann

der aggregierte Temperaturverlauf pro Spezies berechnet und die gesamte Temperaturentwicklung bestimmt. Das Vorgehen ist beispielhaft in Abbildung 4.20 für CO₂-Emissionen dargestellt.

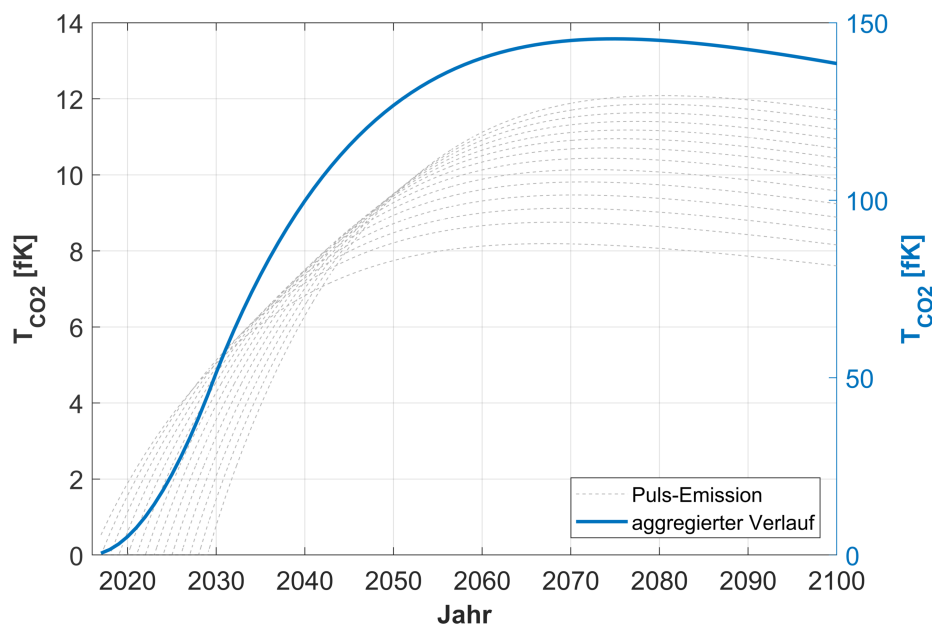


Abbildung 4.20: Aggregation der Temperaturantwort für CO₂-Puls-Emissionen pro Jahr zum Gesamttemperaturverlauf.

4.4 Modellqualifizierung, Verifikation und Validierung

Gemäß Normdefinition (VDI 2206) beschreibt Verifikation die Überprüfung, ob „eine Realisierung (z. B. ein Software-Programm) mit der Spezifikation übereinstimmt“, wohingegen Validierung die Überprüfung beschreibt, ob „das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt“ [282]. Vereinfacht untersucht also die Verifikation, ob ein System richtig entwickelt wurde, während die Validierung prüft, ob das richtige System entwickelt wurde. In Abgrenzung der beiden Begriffe für die Modellbildung bedeutet das, dass die Verifikation zur Überprüfung, ob ein Modell grundsätzlich plausibel und richtig ist, durchgeführt wird. Andererseits liefert die Validierung eine Aussage darüber, ob das erstellte Modell ein reales System hinreichend beschreibt. Eine Abgrenzung der Begriffe ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Hier wird darüber hinaus der Begriff der Modellqualifizierung eingeführt, womit die Richtigkeit der konzeptionellen Analyse des Modells zur Abbildung der Realität gemeint ist [283]. Folglich wird in Kapitel 4.4.1 ein Abgleich mit den ursprünglich aufgestellten Anforderungen an die Fähigkeiten des Modells durchgeführt, was in alternativen Definitionen auch als Aspekt der Verifikation verstanden wird [284, 285]. Im Zuge der Verifikation wird in Kapitel 4.4.2 die Plausibilität der Modellkette überprüft, bevor in Kapitel 4.4.3 sichergestellt wird, dass das entwickelte Modell innerhalb seines Anwendungsbereichs eine zufriedenstellende Genauigkeit besitzt. In diesem Zuge werden auch die simplifizierten Ansätze zur Skalierung der Ergebnisse aus Literaturstudien sowie zur Ableitung von Temperaturverläufen (vgl. Kapitel 4.3) validiert.

Im Luftverkehr ist gerade bei Modellen zur Bewertung der Nachhaltigkeit im Allgemeinen sowie der Klimawirkung im Speziellen eine Validierung mit Realdaten häufig nicht

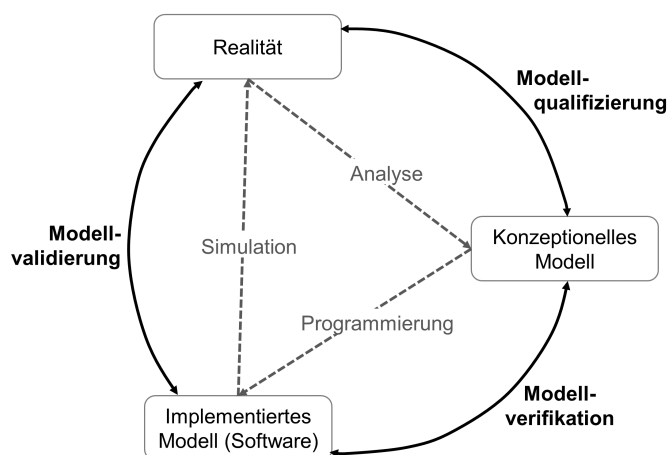


Abbildung 4.21: Abgrenzung der Begriffe Verifikation und Validierung [eigene Darstellung nach 283].

möglich. Für die Emissionsrechnung liegen kaum Messwerte aus dem Betrieb auf realen Flughöhen vor. Selbst messbare Größen wie Schub und Kraftstofffluss stehen von OEMs und Betreibern häufig nicht für Validierungszwecke in der Forschung zur Verfügung. Stattdessen wird die Implementierung des iTCMs zur Flugleistungsrechnung anhand alternativer Modelle, die für vergleichbare Anwendungsfälle entwickelt wurden, validiert.

4.4.1 Modellqualifizierung

Die definierten qualitativen konzeptionellen Anforderungen an die Methode aus Kapitel 4.1 können im Folgenden mit der etablierten Modellkette aus Kapitel 4.2 sowie dem Skalierungsansatz aus Kapitel 4.3 abgeglichen werden:

- (1) **Fähigkeit zur Quantifizierung der Potentiale zur Klimawirkungsminde-
rung durch verschiedene betriebliche Maßnahmen des Luftverkehrs, wel-
che eine vergleichende Bewertung unter identischen Studienrandbedin-
gungen und Modellierungsannahmen ermöglicht.**

Das iTCM ermöglicht die vergleichbare Modellierung unterschiedlicher betrieblicher Maßnahmen des Luftverkehrs durch verschiedene Submodule. Diese können sowohl eine Manipulation der Referenzrouten zur Optimierung von Emissionsort und -zeit als auch innovative Maßnahmen wie den Formationsflug und den Mehrstufenbetrieb modellieren. Über die Submodule hinaus kann für alle Maßnahmen die Trajektorien- und Emissionsrechnung sowie die Klimabewertung unter identischen Randbedingungen durchgeführt werden, sodass eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Das beinhaltet im Wesentlichen die folgenden Aspekte:

- a. **Realistische Simulation der realen Flugleistungsgrößen und Emissi-
onsflüsse für den zivilen Luftverkehr in unterschiedlichen Detailgra-
den.**

Im iTCM als Weiterentwicklung des TCMs ist eine Vielzahl von Modellierungsansätzen integriert. Das umfasst sowohl die Anbindung alternativer Flugleistungsmodelle wie dem PS-Modell und OpenAP als auch die Erweiterung der vertikalen Realrouten-Modellierung. Durch die direkte Anbindung verschiedener

Ansätze zur Emissionsrechnung im GRIDLAB-Submodul können auch Nicht-CO₂-Emissionsspezies mit verschiedenen Kraftstoffflusskorrelationsmethoden berechnet werden. Darüber hinaus stellen die erweiterten RedEmPs einen sinnvollen Kompromiss zwischen Rechengeschwindigkeit und Genauigkeit bei der Berechnung großer Flugpläne dar. Durch die Erweiterung können nun auch höhenabhängige Effekte betrieblicher Maßnahmen bei der Modellierung mit RedEmPs berücksichtigt werden.

b. Anbindung validierter Modelle zur Bewertung der Veränderung der Klimawirkung, welche die durch betriebliche Maßnahmen variierenden Effekte abbilden.

Im Zuge der Entwicklung des iTCMs wurden Methoden zur Klimabewertung wie aCCFs, CoCiP und Klimaregressionsformeln direkt in die Modellkette integriert. Durch Integration der Erstellung von Emissionskatastern über die Anbindung von GRIDLAB kann über RCE direkt die Klimabewertung mit dem Klimaantwort-Modell AirClim erfolgen. Die angebundenen Modelle zur Klimabewertung ermöglichen die Berücksichtigung der Variation in klimawirksamen Faktoren durch die Implementierung betrieblicher Maßnahmen, wie Emissionsort und -zeit sowie Emissionsmenge⁹.

c. Integration der einzelnen Module zur Detailbewertung in einer gemeinsamen Modellkette.

Durch die Integration der Aspekte Trajektorienimulation, Emissionsrechnung und Klimabewertung in einer integrierten Modellkette des iTCMs und die Berücksichtigung der verschiedenen betrieblichen Maßnahmen in Submodulen kann eine konsistente Bewertung und somit eine direkte Vergleichbarkeit der berechneten Potentiale sichergestellt werden. Durch die Zusammenführung der verschiedenen Modellierungsschritte kann darüber hinaus eine Effizienzsteigerung erreicht werden.

(2) Möglichkeit zur Berücksichtigung von Maßnahmen aus der Literatur, welche ohne detaillierte Simulation ebenfalls dem Vergleich zugeführt werden können.

Durch die Entwicklung der Skalierungsmethode in Kapitel 4.3 wird in Ergänzung zur Detailmodellierung auch die Berücksichtigung von weiteren Maßnahmen im Vergleich ermöglicht, ohne die konkreten Modellierungsfähigkeiten zur Maßnahmenbewertung zu implementieren. Mit dem vereinfachten Ansatz zur Generalisierung der Erkenntnisse auf Basis des Verkehrsaufkommens und der Klimawirkung im Referenzfall können die Mitigationspotentiale auf andere Zielflugpläne skaliert und so die Vergleichbarkeit auch ohne Detailmodellierung erhöht werden. Der Ansatz zur Ableitung von Temperaturverläufen ermöglicht darüber hinaus einen Vergleich unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anwendungsfälle sowie Implementierungszeitpunkte. Außerdem ist ein direkter Vergleich anhand der Temperaturveränderung ohne die Betrachtung einer aggregierten Klimametrik im Zeitverlauf möglich.

(3) Bewertungsfähigkeit der Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems durch betriebliche Maßnahmen im Luftverkehr.

⁹Der Formationsflug stellt hier einen Sonderfall dar, da bei der Klimabewertung Sättigungseffekte auftreten, die derzeit im Rahmen des iTCMs nur in einer gesonderten Version von AirClim für den Formationsflug berücksichtigt werden können. Alternative Klimabewertungsmethoden wie aCCFs oder CoCiP ermöglichen aktuell keine detaillierte Bewertung der Sättigungseffekte.

Durch die Anbindung eines Moduls zur Bewertung der direkten Betriebskosten kann die Veränderung der Klimawirkung in Relation zu den ökonomischen Auswirkungen für die Betreiber bewertet werden. Die Berücksichtigung weiterer Auswirkungen, z. B. die Bewertung von Netzwerkeffekten oder der Kapazitätsänderungen in Lufträumen, kann durch die modulare Struktur ebenfalls direkt angebunden werden (vgl. Anhang C).

4.4.2 Verifikation der Modellbildung

Die Untersuchung der Plausibilität zur Verifikation der Modellbildung fokussiert sich zum einen auf die Ergebnisse der Trajektorien- und Emissionsrechnung, welche effizient anhand der RedEmPs überprüft werden können. Zum anderen wird ein Literaturabgleich zur Plausibilitätsprüfung der gesamten Detailmodellierung zur Bewertung betrieblicher Klimawirkungsminderungsmaßnahmen durchgeführt.

Verifikation von Trajektorien- und Emissionsrechnung mit RedEmPs

Die Datenbank der präproduzierten RedEmPs ermöglicht, die Zusammenhänge zwischen Beladung, Missionsdistanz und relevanten Flugleistungsgrößen zu visualisieren und einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen. Abbildung 4.22 zeigt beispielsweise für ausgewählte Flugzeugmodelle steigenden Kraftstoffverbrauch und NO_x -Emissionen mit zunehmender Beladung sowie zunehmender Missionsdistanz. Mit steigender Beladung sinkt auch die maximal zurücklegbare Missionsdistanz. Aus der Literatur ergibt sich für das betrachtete Flugzeugmodell Boeing 747-400 bei voller Beladung je nach Konfiguration eine Reichweite zwischen 5.960 und 6.080 NM, was mit der maximalen Reichweite der RedEmPs von ca. 6.000 NM übereinstimmt [286]. Die maximale Flugdistanz wird mit etwa 9.000 NM angegeben, was von der angegebenen maximalen Missionslänge ohne Beladung des Herstellers leicht abweicht. Der maximale Kraftstoffverbrauch übersteigt geringfügig die maximale Kraftstoffkapazität von 165 Tonnen [286] (vgl. Abb. 4.22, links). Analog ergibt sich für den Airbus A330-300 eine maximale Reichweite zwischen ca. 6.600 und 8.900 NM sowie bei voller Beladung eine zurücklegbare Distanz von etwa 4.200 NM [287], was ebenfalls nur moderat von der maximal zurücklegbaren Distanz der RedEmPs abweicht (Abb. 4.22, rechts).

Verifikation der Modellkette zur Bewertung betrieblicher Maßnahmen im Luftverkehr

Die Verifikation der integrierten Modellkette zur Bewertung von betrieblichen Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung kann durch einen Abgleich mit existierenden Studien in der Literatur erfolgen (vgl. Tabelle 4.4).

So liefert die Studie zur Reduktion von Flughöhen und Geschwindigkeiten von Zengerling et al. (2023) unter Anwendung des iTCMs mit aCCFs vergleichbare Ergebnisse zu früheren Studien zum tiefer und langsamer Fliegen [66, 60, 62]. Studienerkenntnisse hinsichtlich Klimawirkungsminderung und zugehörigem Kostenanstieg sind in ihrer Größenordnung mit Ergebnissen aus der Literatur genauso vergleichbar wie die Erkenntnis von höheren Mitigationspotentialen im Winter im Vergleich zum Sommer. Quantitative Abweichungen in den Ergebnissen lassen sich durch Unterschiede in der Definition des Untersuchungsflugplans, in den Klimabewertungsmodellen sowie des Studienfokus erklären.

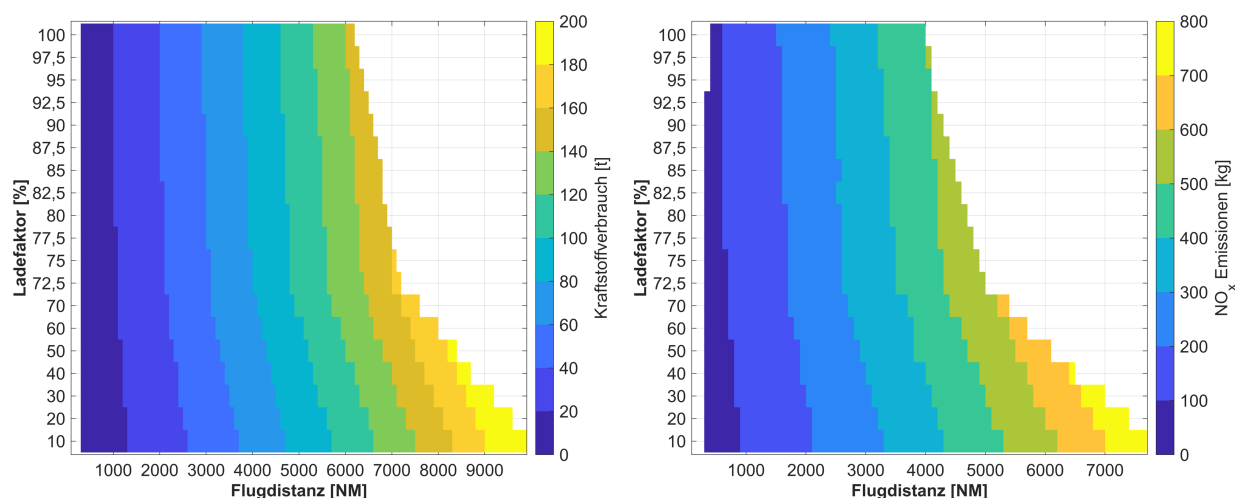


Abbildung 4.22: Verifikation der Trajektorien- und Emissionsrechnung mithilfe von RedEmPs: Kraftstoffverbrauch für Boeing 747-400 aus dem PS-Modell (links) und NO_x -Emissionen für A330-300 mit BADA4-Modell und nach BFFM2 (rechts).

Analog führt die Studie von Zengerling et al. (2022) zum Mehrstufenbetrieb, bei der die erweiterte Version der RedEmPs auf Basis des iTCMs zur Anwendung kam, hinsichtlich des kraftstoffoptimierten Ansatzes zu ähnlichen Ergebnissen wie die Studie von Linke et al. (2017) [223, 52]. Unterschiedliche Annahmen hinsichtlich der Studienrandbedingungen, wie die Bewertung von Langstreckentrajektorien mit unterschiedlichen Mindestdistanzen (3.000 NM bei Linke et al., 2017, ggü. 2.500 NM bei Zengerling et al., 2022), erklären die quantitativen Unterschiede in den Klimawirkungsminderungspotentialen, da bei einer längeren Flugdistanz ein höherer Nutzen des Mehrstufenbetriebs erwartet wird [223, 52]. Somit ist folglich auch von einer ausreichenden Plausibilität der Gesamtmodellkette zur Bewertung der Mitigationspotentiale durch betriebliche Maßnahmen auszugehen.

4.4.3 Validierung der Modellbildung

Während für das iTCM als Modellkette zur Detailmodellierung im Folgenden quantitative Rechnungen zur Validierung durchgeführt werden können, beschränkt sich die Validierung der Emissionsrechnung und Klimabewertung auf die Literatur. Im Zuge dieser Arbeit lag der Fokus hier bei der Integration der Module, sodass auf eine detaillierte Validierungsrechnung im Folgenden verzichtet wird. Die Validierung der Skalierungsmethode zum Vergleich kann anhand von detaillierten Rechnungen mit der Modellkette aus Kapitel 4.2 erfolgen. Im Zuge der Validierung sind auch die Unsicherheiten in der Bewertungskette zu berücksichtigen, welche im Anhang D detailliert beschrieben werden.

Validierung des iTCM

Eine valide Trajektorienrechnung hängt einerseits von validen Flugleistungsdaten und andererseits von einer validen Implementierung der Flugleistungsrechnung ab. Eine Validierung der Trajektorienrechnung unter BADA4-Eingabedaten wurde bereits für eine frühere Version des TCMs bei Linke (2016) durchgeführt. Hier wurden geringe Abweichungen (+ 0,2 % der Flugzeit im windoptimalen Betrieb) zu einem vergleichbaren Trajektorienrechner der NASA festgestellt [249, 250]. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektes ClimOP

	Literaturstudien	iTCM-Anwendung
Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit	<p>Verschiedene Studien zur Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Klimawirkungsminderung durch tiefere Flughöhen und geringere Geschwindigkeiten von 5 % für einen Kostenanstieg von 1 % in klimatologischer Betrachtung [66, 68] • Klimawirkungsminderung von bis zu 20 % in luftfahrtinduzierter Temperaturänderung [60] • Höhere Effizienz der Mitigation im Winter im Vergleich zum Sommer [62] 	<p>Analyse der Klimawirkungsminderung durch geringere Flughöhen und Geschwindigkeiten [67]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Klimawirkungsminderung bis zu 9 % im Sommer und 16 % in p-ATR20 im Winter durch Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit im europäischen Langstreckenverkehr in meteorologischer Betrachtung • Anstieg der Betriebskosten zwischen 2 % und 3 % • Generell höhere Klimawirkungsminderung im Winter im Vergleich zum Sommer
Mehrstufenbetrieb	<p>Analyse des kraftstoffoptimalen Mehrstufenbetriebs für den globalen Langstreckenverkehr [52]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kraftstoffreduktionspotential von ca. 4,8 % im kraftstoffoptimalen Betrieb • Anstieg der Klimawirkung um ca. 2,3 % in F-ATR100 getrieben durch den Anstieg in H₂O- und NO_x-Effekten 	<p>Analyse des kraftstoffoptimalen Mehrstufenbetriebs im Vergleich zum klimaoptimierten Konzept für den europäischen Langstreckenverkehr [223]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kraftstoffreduktionspotential von ca. 2 % im kraftstoffoptimalen Betrieb • Anstieg der Klimawirkung von ca. 0,6 % in F-ATR100 getrieben durch den Anstieg in H₂O- und NO_x-Effekten

Tabelle 4.4: Abgleich der Ergebnisse verschiedener Studien mit Anwendung des iTCMs im Vergleich zu Erkenntnissen aus der Literatur.

(vgl. Anhang A) ein Abgleich zwischen den Trajektorienrechnern der beteiligten Partner (*Trajectory Generation Module*, TGT der Istanbul Technical University sowie *AirTraf* der TU Delft) durchgeführt [288, 289, 210]. Die Ergebnisse der Trajektorienrechnung sowie der Emissionsrechnung wurden quantitativ für zwei Beispielmmissionen miteinander verglichen. Für den Vergleich zwischen TGT und iTCM ergeben sich Abweichungen des Kraftstoffverbrauchs von unter 5 %. Die Trajektorienrechnung mit AirTraf führte zu deutlich geringeren Werten im Kraftstoffverbrauch (Abweichung von bis zu 20 % im Kurzstreckenbereich), was allerdings durch die Beschränkung der Simulation auf die Reiseflugphase in AirTraf erklärt werden konnte. Weitere Ungenauigkeiten im Tool-Abgleich können auf unterschiedliche Geschwindigkeits- und Massenannahmen in den verschiedenen Modellen zurückgeführt werden, sodass im Wesentlichen von einer Vergleichbarkeit der Modelle ausgegangen werden kann.

Des Weiteren ist bei der Validierung des iTCM auch ein Vergleich mit öffentlich verfügbaren Modellen (*Open source*) wie OpenAP und PS-Modell möglich, um die Abweichung zwischen den verschiedenen Trajektorienrechnern und unterschiedlichen Flugleistungsmodellen zu überprüfen. Die Ergebnisse der Flugleistungsrechnung für Schub und Kraftstoffverbrauch sind in Abbildung 4.23 beispielhaft für eine Mission von Lissabon (LPPT) nach Toronto (CYYZ) mit einem üblichen Langstreckenflugzeug dargestellt. Einerseits zeigt sich, dass die Implementierung des PS-Modells im iTCM mit den Ergebnissen der ursprünglichen Modellierung in *pycontrails* übereinstimmt. Die iTCM-Implementierung des OpenAP-Modells weicht nur geringfügig von den Ergebnissen des ursprünglichen Modells in python

ab, wobei sich die Unterschiede auf Vereinfachungen in der ursprünglichen OpenAP-Routine zurückführen lassen. Andererseits bewegen sich die Ergebnisse der Standard-Version des iTCMs mit BADA4-Flugleistungsdaten zwischen den Werten der alternativen Flugleistungsrechner OpenAP und PS-Modell, sodass die Validität der Trajektorienrechnung des iTCMs unter Verwendung von BADA4-Flugleistungsdaten bestätigt werden kann. Insgesamt zeigt sich für den Gesamtkraftstoffverbrauch dieser Route eine Abweichung von etwa +15 % durch die Verwendung von OpenAP und -7 % durch die Nutzung des PS-Modells im iTCM gegenüber der Standardflugleistungsrechnung (vgl. Tabelle 4.5). Die markanten Abweichungen zu OpenAP lassen sich durch die hohen Ungenauigkeiten und Vereinfachungen der datenbasierten Schub- und Kraftstoffflussberechnung begründen.

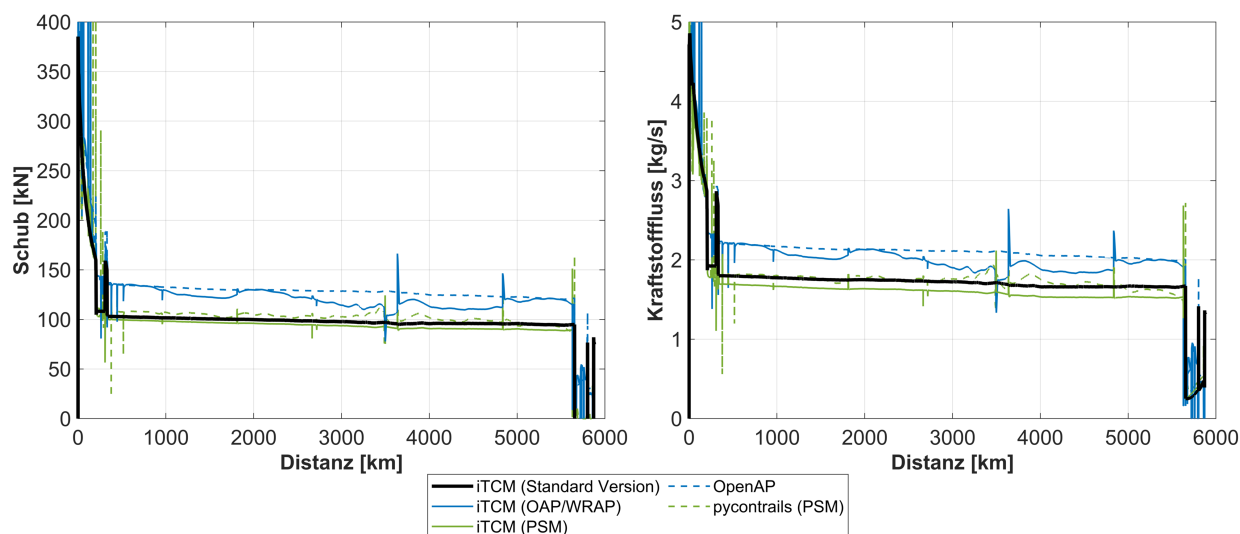


Abbildung 4.23: Vergleich der Trajektorienparameter Schub und Kraftstofffluss für verschiedene Flugleistungsmodelle und Trajektorienrechner. Die Ausreißer entstehen durch Unstetigkeiten bei den Phasenwechseln im Rückwärtsansatz bei der iTCM-Berechnung.

	OpenAP	PS-Modell
LPPT - CYYZ	+15,0 %	-6,9 %
10 Nordatlantik-Routen (Realwetter)	+18,7 %	-0,7 %
50 Nordatlantik-Routen (ISA)	+9,8 %	-3,7 %

Tabelle 4.5: Abgleich verschiedener Flugleistungsmodelle im iTCM anhand der Abweichung des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zum Standardflugleistungsmodell.

Verallgemeinert man den Abgleich auf eine größere Stichprobe von zehn unterschiedlichen Langstreckenmissionen unter Berücksichtigung von Realwetter bzw. fünfzig europäischen Langstreckenmissionen unter Annahme von ISA, bestätigt sich dieser Zusammenhang (vgl. Tabelle 4.5). Die Abweichung des OpenAP-Modells von den beiden anderen Modellen kann auf den vereinfachten Ansatz und die geringe Anzahl an verfügbaren Flugzeugtypen zurückgeführt werden. Die Ergebnisse des iTCMs unter Verwendung von BADA4-Daten liegen für die Stichproben zwischen den Werten der beiden *Open-source*-Modelle. Das gilt sowohl für eine Anwendung der externen Modelle in python als auch für die Implementierung dieser Modelle im iTCM.

Darüber hinaus konnte im Zuge dieser Arbeit eine Validierung der iTCM-Trajektorienresultate mit den tatsächlich gemessenen Kraftstoffmengen von Airlines und Triebwerksherstellern durchgeführt werden. Dabei wurde eine Abweichung von bis zu 5 % bei der Berechnung des Kraftstoffverbrauchs für die verfügbaren Flugzeug-Triebwerkskombinationen festgestellt¹⁰, was im Wesentlichen mit den Angaben aus Nuic et al. (2010) übereinstimmt [252].

Literaturbasierte Validierung der Emissionsrechnung und Klimabewertung

Weder et al. (2025) nehmen in ihren Untersuchungen der globalen Luftverkehrsemissionen eine Validierung der Ergebnisse und somit auch der angewendeten Emissionsberechnungs- und Katastermethoden im Vergleich mit anderen Veröffentlichungen vor [267, 262]. Es zeigt sich, dass die mit GRIDLAB berechneten CO₂-Emissionen für das Jahr 2019 um etwa 5 % von den Werten von Graver et al. (2020) sowie um etwa 10 % von den Werten von Teoh et al. (2024) abweichen [290, 291]. Die NO_x-Emissionen weichen um ca. 25 % von Teoh et al. (2024) und um ca. 9 % vom *Community Emissions Data System (CEDS)* ab [291, 292]. Die Unterschiede begründen die Autorinnen und Autoren u. a. durch die Vereinfachung von Flugtrajektorien entlang des Großkreises, die Annahme von kraftstoffoptimalen Flughöhen sowie Unterschiede in der Berücksichtigung von Windeffekten. Darüber hinaus betrachten Weder et al. (2025) ausschließlich die kommerzielle Passagierluftfahrt und berücksichtigen weitere Sektoren wie Frachtverkehr, *General Aviation (GA)* und militärischer Luftverkehr nicht [267].

Für die Validierung der integrierten Klimabewertungsmethoden kann ebenfalls auf bereits veröffentlichte Studien verwiesen werden. So validieren Frömming et al. (2021) die Höhen-, Positions- und Wetterabhängigkeit der CCFs im Nordatlantik für Sommer- und Winter-Wetterlagen im Vergleich zu früheren Veröffentlichungen [234]. Rao et al. (2022) untersuchen die Validität der NO_x-aCCF für eine Anwendung in der Klimaoptimierung von Flugrouten ebenso wie Yin et al. (2018) [217, 293]. Yin et al. (2023) führen eine Validierung der aCCFs für die verschiedenen Spezies mit dem EMAC-Modell durch [272]. Dahlmann et al. (2016) zeigen in einer Monte-Carlo-Simulation die Zuverlässigkeit der Bestimmung von Mitigationspotentialen der Klimawirkung mit dem Klimaantwort-Modell AirClim unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der Bewertung von Luftverkehrsemissionen [116]. Die Simulationsergebnisse zeigen eine verlässliche Quantifizierung der relativen Mitigationspotentiale unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten selbst bei geringen Unterschieden in den betrachteten Szenarien [116]. Darüber hinaus wurde im Jahr 2021 die Veränderung von realen Flugtrajektorien zur Vermeidung von ISSRs im Luftraum MUAC (*Maastricht Upper Area Control Centre*) getestet und anhand von Satellitenbildern validiert. Dabei konnte mit einem Signifikanzniveau von 97,5 % die Bildung von persistenten Kondensstreifen durch kleinskalige Anpassungen des Flugplans vermieden werden [193]. Außerdem wird die Validierung des CoCiP-Modells sowie von aCCFs zur Klimawirkungsminderung durch Routenadaption aktuell in realen Flugversuchen im Rahmen des D-KULT-Projekts weiter untersucht [294, 295].

¹⁰Aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen in den Projekten DKULT (Demonstrator klima- und umweltfreundlicher Lufttransport) und DoEfs (*Digitally optimised engineering for services*) dürfen die Ergebnisse in diesem Kontext nicht genauer veranschaulicht werden

Validierung der Skalierungsmethode zum Vergleich bei unterschiedlichen Untersuchungsflugplänen

Im ersten Schritt wird die Eignung des Skalierungsansatzes zur Abschätzung der absoluten Klimawirkung durch die Kombination von Größe des Verkehrsszenarios und missionspezifisch variierenden CO_2 -Äquivalenten demonstriert. Diese Validierung erfolgt auf Basis der Klimawirkung von Langstreckenmissionen mit Start oder Ziel im europäischen Raum aus einer Studie zum Mehrstufenbetrieb [223, 158]. Der Vergleich einer frequenzbasierten Skalierung mit dem Ansatz der Kombination aus flugplanspezifischer und wirkungsabhängiger Skalierung ist für verschiedene Stichprobengrößen des Referenzflugplans in Abbildung 4.24 dargestellt. Für jede Stichprobengröße werden einhundert unterschiedliche Referenzflugpläne zufällig aus dem Zielflugplan ausgewählt. Gerade für geringe Stichprobengrößen zeigt sich eine höhere Genauigkeit der Schätzung durch die Kombination von ASK und CO_2 e als Skalierungsparameter im Vergleich zur frequenzbasierten Skalierung. Allerdings werden diese Unterschiede mit zunehmender Stichprobengröße geringer, da damit auch die Repräsentativität der zufälligen Referenzstichprobe für den Zielflugplan steigt. Folglich kann gerade für große Referenzflugpläne mit hoher Repräsentativität die Klimawirkung auch rein frequenzbasiert valide abgeschätzt werden.

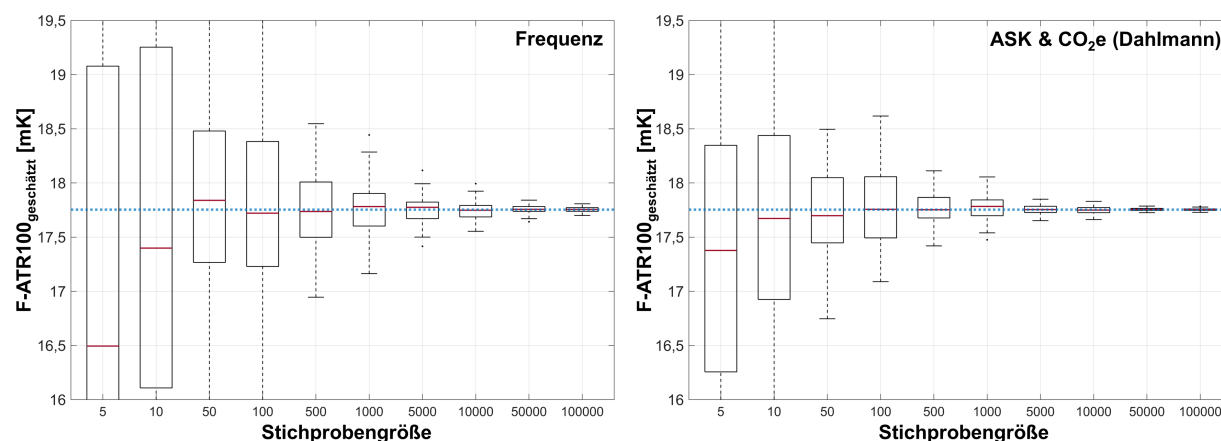


Abbildung 4.24: Variation in der Klimawirkungsabschätzung für den europäischen Langstreckenverkehr über verschiedene Stichprobengrößen des Referenzflugplans frequenzbasiert (links) sowie unter Berücksichtigung von ASK und CO_2 e nach Dahlmann et al. [150] (rechts). Die blaue Linie repräsentiert die berechnete F-ATR100 für den Zielflugplan.

Gerade bei Referenzfällen, die sich charakteristisch vom Zielflugplan unterscheiden, kann die Skalierung die Genauigkeit des Vergleichs erhöhen, da systematische Verzerrungen des Referenzflugplans im Vergleich zum Zielflugplan berücksichtigt werden. Abbildung 4.25 fasst die Ergebnisse der Skalierung in unterschiedlichen Ansätzen für zwei verzerrte Referenzfälle zusammen. Zum einen werden hier der Nordatlantik-Verkehr und zum anderen kurze Langstreckenmissionen mit einer Distanz von weniger als 3.500 NM als Referenz untersucht, wobei hundertmal zufällig 2.000 unterschiedliche Flüge für den Referenzflugplan ausgewählt werden. Zielflugplan der Skalierung ist der europäische Langstreckenverkehr. Im Vergleich zur frequenz- und ASK-basierten Skalierung kann durch die Kombination aus ASK und CO_2 -Äquivalenten eine deutlich bessere Abschätzung der Gesamtklimawirkung erreicht werden. Für beide Beispiele weist die Referenzstichprobe eine geringere Klimawirkung pro Mission auf als der Zielflugplan, sodass ohne die Berücksichtigung der wirkungs-

abhängigen Effekte die Klimawirkung für den Zielflugplan deutlich unterschätzt würde.

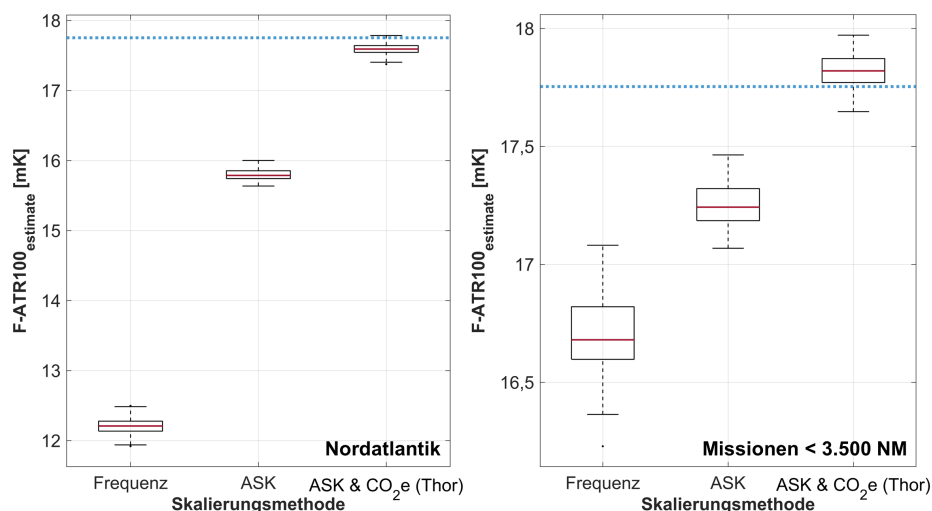


Abbildung 4.25: Variation in der Klimawirkungsabschätzung für den europäischen Langstreckenverkehr mit unterschiedlichen Skalierungsansätzen basierend auf dem nordatlantischen Luftverkehr (links) bzw. kurze Langstreckenmissionen (rechts) als Referenz. Die blaue Linie repräsentiert die berechnete F-ATR100 für den Zielflugplan.

Im zweiten Schritt wird das Mitigationspotential durch den klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb auf Basis unterschiedlicher Referenzflugpläne auf den Zielflugplan des europäischen Langstreckenverkehrs hin skaliert. Hier wurden ebenfalls 100 zufällige Referenzflugpläne je Stichprobengröße ausgewählt. Die Mittelwerte der Potentiale zur Klimawirkungsminderung in Tabelle 4.6 weichen für die Skalierung auf Basis von CO₂e und ASK nur geringfügig von der Referenz ohne Skalierung ab. Dieser geringe Mehrwert des Skalierungsansatzes kann sowohl durch den relativen Vergleich per se als auch durch die Mittelung der Ergebnisse über 100 zufällige Referenzflugpläne hervorgerufen werden. Bei der Betrachtung der Standardabweichung zeigt sich gerade für kleine Referenzstichproben eine geringere Standardabweichung für den entwickelten Skalierungsansatz im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Skalierung. Auch wenn der Skalierungsansatz bei der relativen Betrachtung von Mitigationspotentialen und bei großen Referenzflugplänen nur geringen Mehrwert aufweist, führt die Methode gerade bei der Abschätzung der Gesamtklimawirkung, bei der Unterscheidung zwischen Anwendungs- und Gesamtflugplan sowie bei kleinen Stichproben zu einer höheren Genauigkeit.

		Stichprobengröße N					
		50	100	500	1.000	5.000	10.000
Skalierung	μ	40,0 %	40,2 %	40,2 %	40,3 %	40,3 %	40,3 %
	σ	2,0 %	1,4 %	0,66 %	0,44 %	0,18 %	0,15 %
Referenz (ohne Skalierung)	μ	40,5 %	40,3 %	40,3 %	40,4 %	40,3 %	40,3 %
	σ	2,1 %	1,5 %	0,67 %	0,46 %	0,19 %	0,15 %

Tabelle 4.6: Mittelwert und Standardabweichung bei der Berechnung des Potentials der Klimawirkungsminderung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs mit der Skalierungsmethode im Vergleich zu den Ergebnissen für den Referenzflugplan ohne Skalierung.

Validierung der Methode zur Berücksichtigung unterschiedlicher Implementierungszeitpunkte

Für die Validierung des vereinfachten Ansatzes zur Berücksichtigung unterschiedlicher Implementierungszeitpunkte wird die Veränderung der oberflächennahen Temperatur über die Zeit durch die Implementierung von klimaoptimiertem Mehrstufenbetrieb [223] zu unterschiedlichen Zeitpunkten zwischen 2025 und 2035 untersucht. Die resultierenden Temperaturänderungen werden einerseits direkt mit dem Klimaantwort-Modell AirClim bestimmt sowie andererseits über den in Kapitel 4.3 vorgestellten vereinfachten Ansatz zur nachträglichen Ableitung der Temperaturverläufe abgeschätzt. Abbildung 4.26 (links) zeigt kurz- und mittelfristig eine gute Annäherung des Temperaturverlaufs durch den vereinfachten Berechnungsansatz. Allerdings nimmt gerade mit zunehmendem Betrachtungsjahr die absolute Temperaturdifferenz zwischen AirClim-Temperaturverlauf und vereinfachter Abschätzung zu.

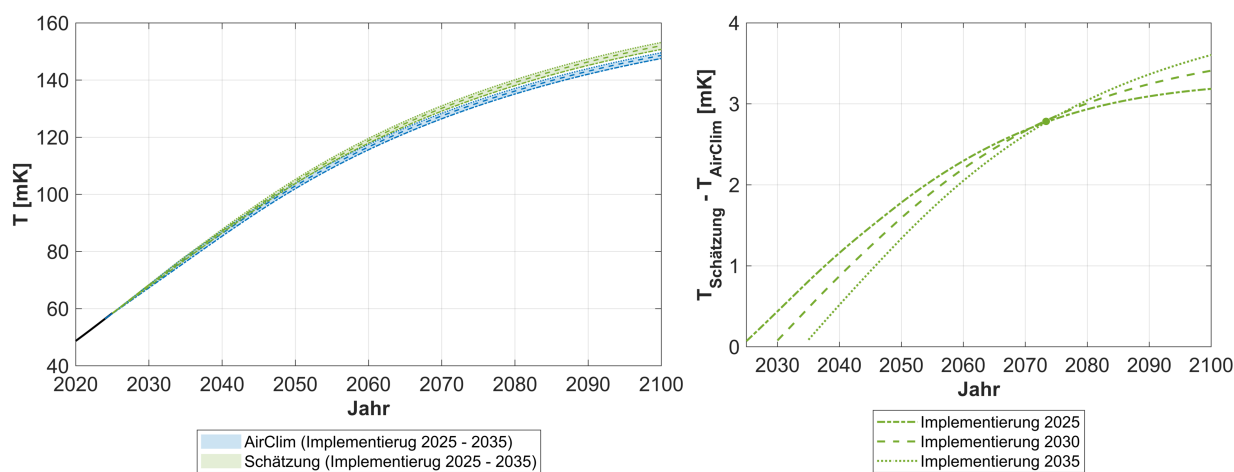


Abbildung 4.26: Validierung des vereinfachten Ansatzes zur Temperaturentwicklung: Vergleich der Temperaturentwicklung für die vereinfachten Abschätzung im Vergleich zur Berechnung mit AirClim (links) und Differenz der Temperaturentwicklung durch die vereinfachte Abschätzung für unterschiedliche Implementierungszeitpunkte (rechts)

Die Temperaturdifferenzen zwischen beiden Ansätzen liegen bis 2100 bei bis zu 3,6 mK, was einer relativen Abweichung von 2,4 % entspricht (vgl. Abb. 4.26, rechts). Für die Unterschiede in der Temperaturentwicklung durch die Variation der Implementierungszeitpunkte sind die Abweichungen zwischen der vereinfachten Berechnung und der detaillierten Berechnung mit AirClim in Abbildung 4.26 (rechts) dargestellt. Die Ungenauigkeit der Schätzung steigt für spätere Implementierungszeitpunkte schneller an als für frühere, sodass sich gerade bei der Betrachtung über längere Zeithorizonte größere Abweichungen für den Vergleich verschiedener Implementierungszeitpunkte ergeben. Diese Abweichungen können durch die Vernachlässigung von langfristigen Sättigungseffekten, die kombinierte Betrachtung von Ozon- und Methanwirkungen als NO_x -induzierte Klimawirkung und die vereinfachte Rückrechnung von F-ATR100 auf p-ATR100 mit konstanten Skalierungsfaktoren [140] erklärt werden. Mit Ungenauigkeiten im niedrigen einstelligen Prozentbereich kann die vereinfachte Methode aber gerade für die relative Analyse von Temperaturänderungen bis ins Jahr 2050 als valide Alternative zur detaillierten Berechnung herangezogen werden.

4.5 Zwischenfazit: Bewertung der neuen Methodik

Zum Vergleich von operationellen Maßnahmen zur Klimawirkungsreduktion sind die folgenden Ansätze zu unterscheiden:

- (1) Quantitative Bewertung verschiedener Maßnahmen anhand der zuvor beschriebenen Modellkette mit vergleichbaren Randbedingungen, Annahmen und Modellen.
- (2) Entwicklung eines repräsentativen Referenzfalls, der eine effiziente Bewertung verschiedener Maßnahmen auf Basis einer reduzierten Stichprobe ermöglicht.
- (3) Entwicklung einer Methodik zum Vergleich bereits existierender Studien, die getroffene Annahmen und Einschränkungen abstrahiert und einen direkten Vergleich durch Skalierung auf eine gemeinsame Referenz ermöglicht.

Folglich wird die Modellbildung in Kapitel 4 in die Methode zur integrierten Bewertung von betrieblichen Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung mit dem iTCM und den Skalierungsansatz zur Erhöhung der Vergleichbarkeit zwischen Studien mit unterschiedlichen Randbedingungen unterteilt. Mit der Entwicklung und Validierung des iTCMs wird eine integrierte Modellkette etabliert, welche die Bewertung unterschiedlicher Mitigationsmaßnahmen über Submodule mit hoher Vergleichbarkeit ermöglicht. Durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Ansätze in der Trajektorien- und Emissionsrechnung sowie die Anbindung verschiedener Modelle zur Klimabewertung kann der Analysefokus je nach Forschungsfragestellung festgelegt werden. Ein Abgleich mit alternativen Modellen zeigt eine hohe Validität der Methode für den kommerziellen Luftverkehr.

Mit dem vereinfachten Ansatz zur Skalierung der Potentiale von Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung unter gegebenen Studienrandbedingungen können darüber hinaus auch Erkenntnisse aus der Literatur dem Vergleich zugeführt werden, indem die Ergebnisse unterschiedlicher Studien auf einen gemeinsamen Zielflugplan generalisiert werden. Durch die Berechnung der Temperaturentwicklung über die Zeit kann der Vergleich darüber hinaus auf unterschiedliche Implementierungszeitpunkte erweitert werden. Die vereinfachten Methoden konnten im Vergleich zu detaillierten Modellierungen validiert werden und sind gerade für Maßnahmenbewertungen mit geringer Stichprobengröße, stark unterschiedlichen Referenzfällen und die Betrachtung mittlerer Zeithorizonte gut geeignet.

5 Ergebnisse: Bewertung und Vergleich betrieblicher Maßnahmen

Die Anwendung der Methoden aus Kapitel 4 wird mit der Bewertung verschiedener betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr im Folgenden anhand verschiedener Fallstudien demonstriert. Dafür wird in Kapitel 5.1 zunächst die Anwendung und Durchführung der Experimente definiert, bevor in Kapitel 5.2 die Eignung der Modellkette zur Bewertung von betrieblichen Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung gezeigt wird. Im Anschluss werden in Kapitel 5.3 ausgewählte Maßnahmen basierend auf den gleichen Studienrandbedingungen miteinander verglichen. Mithilfe der Skalierungsmethode aus Kapitel 4.3 können auch weitere Maßnahmen aus der Literatur mit abweichenden Studienrandbedingungen dem Vergleich zugeführt werden. Darauf aufbauend können die Mitigationspotentiale im globalen Luftverkehr sowie die Auswirkungen auf die Stakeholder und der Einfluss des Implementierungszeitpunkts abgeschätzt werden (Kapitel 5.4). Kapitel 5.5 fasst die Erkenntnisse der Maßnahmenbewertung abschließend zusammen und bewertet die gewonnenen Erkenntnisse. Abbildung 5.1 illustriert den Aufbau des Kapitels.

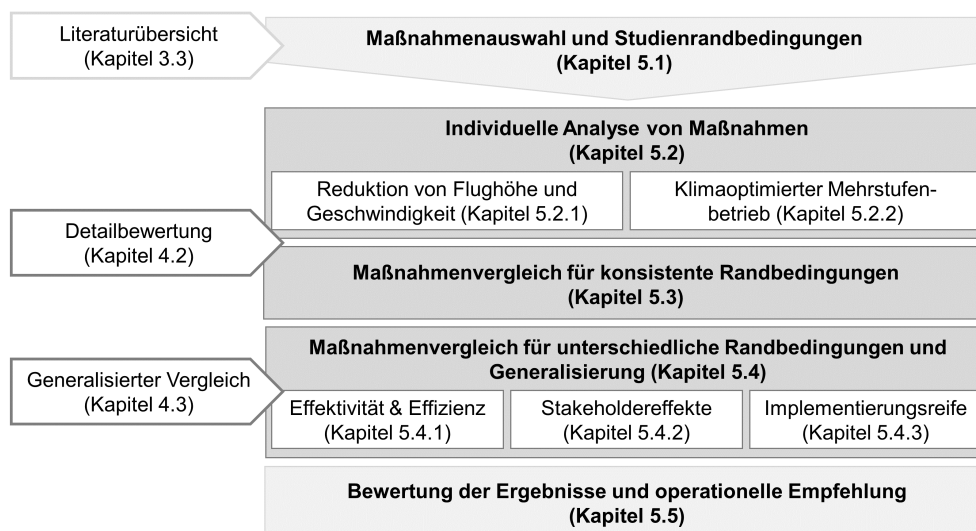


Abbildung 5.1: Struktur der Ergebnisdarstellung in Kapitel 5.

5.1 Definitionen zur Durchführung der Experimente

Zur konsistenten Durchführung der einzelnen Fallstudien werden zunächst einheitliche Studienrandbedingungen definiert. Dazu wird das zu bewertende Luftverkehrsszenario hinsichtlich zeitlicher und räumlicher Ausdehnung sowie betrachteter Flotte definiert (Kapitel 5.1.1), bevor anschließend in Kapitel 5.1.2 die betrieblichen Maßnahmen für die Bewertung ausgewählt werden. Kapitel 5.1.3 stellt die Struktur der Fallstudien in den Kapiteln 5.2 bis 5.4 vor.

5.1.1 Definition des Studienfokus

Der Untersuchungsraum für die Studien zur Bewertung verschiedener betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr wird wie folgt definiert: Zeitlich

wird das Jahr 2018 als Referenz gewählt. Die Auswahl des Jahres wird durch die vollständige Verfügbarkeit der Flugplandaten sowie den Umfang des Luftverkehrsaufkommens in diesem Jahr begründet. Der Ausbruch der Coronapandemie im Winter 2019/2020 und der daraus resultierende starke Rückgang des Luftverkehrsaufkommens in den folgenden Jahren rechtfertigen die Auswahl eines Jahres vor dem Ausbruch der Pandemie. Abbildung 5.2 (links) zeigt, dass bis ins Jahr 2023 das Luftverkehrsaufkommen noch unter dem des Jahres 2016 lag. Darüber hinaus besteht durch die Betrachtung eines gesamten Kalenderjahres die Möglichkeit zur impliziten Berücksichtigung verschiedener Wetterlagen und meteorologischer Gegebenheiten. In Teilstudien werden darüber hinaus realistische meteorologische Bedingungen an Einzeltagen betrachtet, wobei die ausgewählten repräsentativen Analysetage aus dem ClimOP-Projekt verwendet werden [67]. Flugplaninformationen werden von der *Sabre Market Intelligence (MI)* Datenbank bereitgestellt [296]. Diese Flugpläne beinhalten den kommerziellen Passagierluftverkehr des Jahres 2018 mit den relevanten Informationen zu Strecken, eingesetzten Flugzeugen, angebotenen Sitzplatzkilometern sowie Flugplaninformationen (u. a. Flugnummer, Abflug- und Ankunftszeit). Die Betrachtung wird auf den kommerziellen Passagierverkehr eingegrenzt, sodass beispielsweise Frachtflüge und weitere Sektoren wie der Geschäftsflugverkehr (*Business aviation*) oder *General aviation* nicht betrachtet werden.

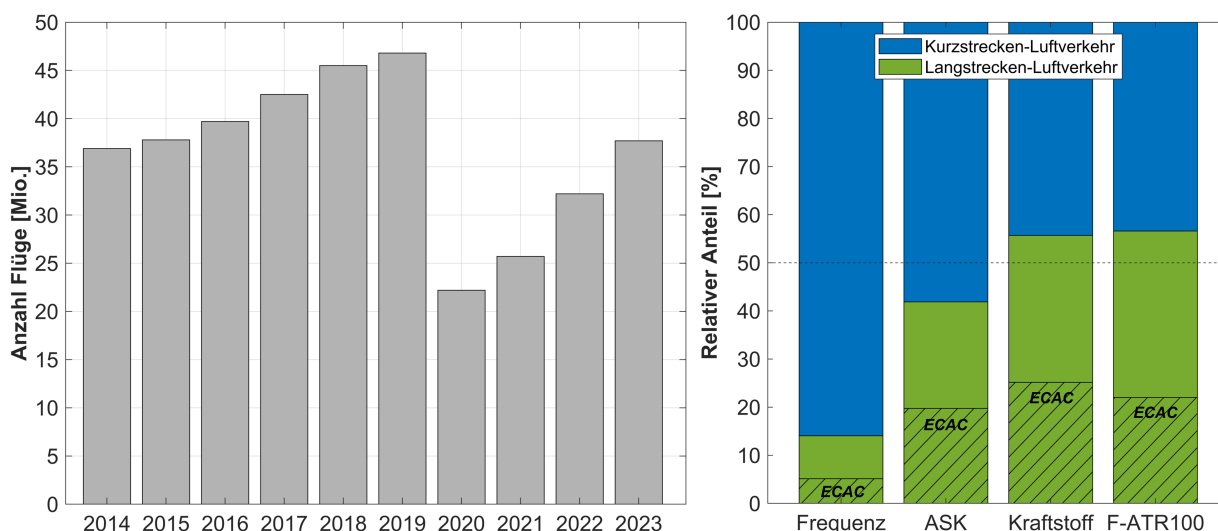


Abbildung 5.2: Übersicht zur Definition der Randbedingungen des Experiments: Entwicklung der Flüge weltweit (links) [eigene Darstellung nach 297] und Unterscheidung der Relevanz von Kurz- gegenüber Langstreckenluftverkehr für ausgewählte Kennzahlen in 2018 (rechts).

Darüber hinaus wird der Fokus der Analyse auf den Langstreckenluftverkehr gelegt, da in diesem Segment auch langfristig sowohl kein Modalwechsel auf alternative Verkehrsträger (wie z. B. die Schiene im Kurzstreckensegment) als auch keine Veränderungen durch radikale technische Innovationen (wie z. B. alternative Antriebe) erwartet werden. Außerdem trägt der Langstreckenluftverkehr relativ zu den durchgeführten Flügen und dem Verkehrsaufkommen in ASK überproportional zur Klimawirkung des Luftverkehrs bei (vgl. Abb. 5.2, rechts). Die Analyse wird darüber hinaus auf den europäischen Langstreckenluftverkehr beschränkt, da dieser zur Untersuchung von Mitigationsmaßnahmen im Kontext der ambitionierten europäischen Nachhaltigkeitsziele besonders interessant ist. Dem euro-

päischen Langstreckenluftverkehr werden im Folgenden Missionen mit einer Distanz von mehr als 3.000 km zugeordnet, die im Bereich der Europäischen Zivilluftfahrt-Konferenz (*European Civil Aviation Conference, ECAC*) starten oder landen. Die zu untersuchende Missionsstichprobe wird je nach Studienfokus gewählt und in der jeweiligen Fallstudie definiert.

Die Flotte wird auf die üblichen im Langstreckenbetrieb eingesetzten Flugzeuge beschränkt. Das umfasst die gängigen Airbus- und Boeing-Modelle, welche etwa 90 % des Luftverkehrs des betrachteten Jahres abdecken. Diese Einschränkung ermöglicht eine Berechnung der Flugleistungsparameter mit den BADA4-Modellen [252].

5.1.2 Auswahl der betrieblichen Maßnahmen

Die Auswahl der zu betrachtenden Mitigationsmaßnahmen stützt sich auf die Literaturanalyse in Kapitel 3, welche die bisher untersuchten Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung zusammenfasst. Auf dieser Basis erfolgt die Identifikation besonders interessanter und relevanter Maßnahmen hinsichtlich der folgenden Muss-, Wertungs- und Ähnlichkeitskriterien in einem semi-quantitativen Auswahlprozess.

Die Muss-Kriterien definieren die Maßnahmen, die dem Bewertungsprozess zugeführt werden, hinsichtlich der Erfüllung der definierten Randbedingungen dieser Arbeit. Die Kriterien orientieren sich folglich an den Zielen dieser Arbeit (vgl. Kapitel 1.3) und beschränken die Auswahl der operationellen Maßnahmen wie folgt:

- Die Wirksamkeit der betrachteten Maßnahme erfolgt im *En-route*-Bereich, womit optimierte An- und Abflugverfahren ebenso wie bodengebundene Maßnahmen (z. B. elektrisches Schleppen) nicht berücksichtigt werden.
- Für eine Implementierung der betrachteten Maßnahme sind keine signifikanten Anpassungen an den Flugzeugen notwendig, sodass technologische Verbesserungen wie z. B. die Entwicklung alternativer Antriebskonzepte nicht betrachtet werden.¹¹
- Die Wirksamkeit der betrachteten Maßnahme ist einem individuellen Flug zuordenbar, sodass Effekte durch Netzwerk- und Flottenoptimierung sowie ein Wechsel auf alternative Transportmodi ausgeklammert werden.

Durch eine Bewertung der Maßnahmen anhand der folgenden Wertungskriterien sollen besonders relevante Maßnahmen ausgewählt werden:

- Mitigationpotential: Das erwartete Mitigationpotential der ausgewählten Maßnahmen soll pro Flug möglichst hoch sein, um effektiv die Klimawirkung des Luftverkehrs zu reduzieren.
- Anwendbarkeit: Die ausgewählten Maßnahmen sollen über einen großen Anwendungsbereich verfügen, sodass möglichst viele Missionen für eine Umsetzung der Maßnahme geeignet sind.
- Realisierbarkeit: Eine Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen soll auch aus Aspekten der Effizienz und der Flugsicherheit möglichst realistisch sein.

¹¹Um die Abhängigkeit zwischen betrieblichen und technischen Maßnahmen zu untersuchen, erfolgt eine ergänzende Betrachtung der Effektivität verschiedener betrieblicher Maßnahmen in Kombination mit technischen Innovationen im Anhang B.5.

Darüber hinaus soll die entwickelte Methodik für möglichst viele operationelle Maßnahmen anwendbar sein. Deshalb werden für die Fallstudien Maßnahmen ausgewählt, die sich möglichst stark unterscheiden. So kann sichergestellt werden, dass die entwickelte Modellkette in ihrer modularen Struktur auch auf neue (bisher unbekannt oder im Detail noch nicht untersuchte) Maßnahmen angewendet werden kann. Das wird im Zuge einer qualitativen Ähnlichkeitsbetrachtung der Wirkweisen der verschiedenen Maßnahmen und der operationellen Randbedingungen sichergestellt. Die Bewertung der Kriterien zur Maßnahmenauswahl ist detailliert in Anhang B.1 dargestellt.

Letztendlich führt das beschriebene Bewertungsverfahren zur Auswahl der in Tabelle 5.1 aufgeführten Maßnahmen. Die betrachteten Maßnahmen adressieren verschiedene Faktoren, welche die Klimawirkung des Luftverkehrs beeinflussen: Die Optimierung des Routings durch die Veränderung von Flughöhe und Geschwindigkeit sowie laterale Routenverschiebung fokussiert die Klimawirkungsreduktion durch die gezielte Nutzung lateral und vertikal variierender Klimasensitivität. Die Luftraumstruktur (z. B. vertikal durch die verfügbaren Flugflächen, lateral durch Wegpunkte und Track-Systeme) beeinflusst hier die effektive Implementierung der Maßnahme. Im Gegensatz dazu adressiert der Mehrstufenbetrieb die Verringerung der Emissionsmenge über eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch niedrigere Abflugmassen. Durch die gezielte Auswahl von geeigneten Flughöhen und Zwischenlandeflughäfen kann auch eine Reduktion der Nicht-CO₂-Effekte erreicht werden. Die Verfügbarkeit von passenden Zwischenlandeflughäfen ist zur vorteilhaften Umsetzung der Maßnahme relevant. Der Formationsflug adressiert neben einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs über einen reduzierten Schubbedarf des hinteren Flugzeugs (*Follower*) auch Sättigungseffekte in der Atmosphäre, die gerade die Klimawirkung von Kondensstreifen signifikant reduzieren. Hier sind die Verfügbarkeit von passenden Formationspartnern und die Wahl der *Rendez-Vous*-Punkte zu beachten.

Maßnahme	Wirkweise zur Reduktion der Klimawirkung	Primäre operationelle Randbedingung
Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Höhenabhängigkeit der Wirkung von Nicht-CO₂-Emissionen 	Vertikale Luftraumstruktur
Laterale Routenverschiebung	<ul style="list-style-type: none"> • Breitengradabhängigkeit der Wirkung von Nicht-CO₂-Emissionen 	Laterale Luftraumstruktur
Klimaaoptimierter Mehrstufenbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Abflugmassen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs • Ortsabhängigkeit von Nicht-CO₂-Effekten 	Zwischenlandeflughäfen
Formationsflug	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Schubbedarf des <i>Followers</i> zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs • Sättigungseffekte bei der Wirkung von Nicht-CO₂-Emissionen 	Formationspartner und Rendez-Vous-Punkte

Tabelle 5.1: Ausgewählte betriebliche Maßnahmen zur weiteren Untersuchung, Wirkweise zur Reduktion der Klimawirkung und operationelle Randbedingungen.

5.1.3 Struktur der Fallstudien

Die Bewertung von verschiedenen betrieblichen Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im ersten Schritt sowie deren anschließender Vergleich und die Generalisierung der Erkenntnisse werden im Folgenden in separaten Fallstudien durchgeführt. Dazu finden sowohl die Modellkette zur Detailbewertung (Kapitel 4.2) als auch die Skalierungsmethode (Kapitel 4.3) Anwendung. Die Studien werden dafür wie folgt strukturiert (vgl. Abb. 5.1):

1. Individuelle Bewertung von betrieblichen Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs

In Kapitel 5.2 wird die Eignung der Modellkette zur individuellen Bewertung von betrieblichen Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs gezeigt. Dazu werden die folgenden beiden Studien durchgeführt:

- Bewertung der Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit im nordatlantischen Luftverkehr anhand einer detaillierten Modellierung mit dem iTCM unter Anwendung der DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode sowie meteorologischer Berücksichtigung der Klimawirkung mit aCCFs (Kapitel 5.2.1) nach Zengerling et al. (2023) [67]
- Entwicklung eines Konzepts zum klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb und Konzeptbewertung für den europäischen Langstreckenverkehr mit einem klimatologischen Ansatz zur Klimabewertung auf Basis reduzierter Emissionsprofile zur Flugleistungs- und Emissionsberechnung (Kapitel 5.2.2) nach Zengerling et al. (2022) [223].

Der Fokus liegt hier im ersten Schritt nicht auf dem Vergleich der Maßnahmen, sondern auf der Demonstration der Modellierungsfähigkeiten zur Bewertung von verschiedenen Einzelmaßnahmen mit unterschiedlichen Randbedingungen. Deshalb werden bewusst unterschiedliche Analyseschwerpunkte für die Anwendung der Modellkette zur Detailmodellierung aus Kapitel 4.2 gesetzt.

2. Maßnahmenvergleich auf Basis konsistenter Studienrandbedingungen durch Detailmodellierung

Basierend auf der detaillierten Einzelbewertung von Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung wird in Kapitel 5.3, aufbauend auf Zengerling et al. (2023) [242], die Effektivität und Effizienz verschiedener Maßnahmen zur Routenadaptation und der Mehrstufenbetrieb miteinander verglichen. Die Mitigationsmaßnahmen werden hier anhand einer repräsentativen Stichprobe des europäischen Langstreckenluftverkehrs mit dem iTCM bewertet. Der Fokus liegt auf einer klimatologischen Betrachtung.

Im Zuge dieses Vergleichs werden bewusst maßnahmenunabhängig konsistente Studienrandbedingungen definiert, um die Vergleichbarkeit zu maximieren. Dazu wird eine Stichprobe an Missionen festgelegt, für welche die Implementierung aller zu betrachteten Maßnahmen individuell simuliert wird, sodass Klimawirkungsminderungspotential und Stakeholderkennzahlen direkt miteinander verglichen werden können. Dazu kommt ebenfalls die Modellkette zur Detailbewertung (Kapitel 4.2) zum Einsatz.

3. Maßnahmenvergleich für unterschiedliche Studienrandbedingungen durch Skalierung und Generalisierung der Erkenntnisse

Mit der Skalierungsmethode aus Kapitel 4.3 soll sichergestellt werden, dass auch Maßnahmen aus der Literatur, welche unter unterschiedlichen Studienrandbedingungen durchgeführt wurden, ohne detaillierte Bewertungsfähigkeiten ebenfalls dem Vergleich zugeführt werden können. Das wird durch eine Skalierung der Studienergebnisse zu verschiedenen Maßnahmen auf einen vergleichbaren Untersuchungsraum erreicht (Kapitel 5.4.1). Zusätzlich zu den bis hierhin betrachteten Maßnahmen wird der Formationsflug anhand der Erkenntnisse aus der Literatur [58, 194] dem Vergleich zugeführt. Darauf aufbauend können die Ergebnisse dann auf die Untersuchung des gesamten europäischen bzw. globalen Luftverkehrs generalisiert werden. Anschließend erfolgt die generalisierte Betrachtung der Auswirkungen auf die Stakeholder (Kapitel 5.4.2) und die Analyse unterschiedlicher Implementierungszeiträume (Kapitel 5.4.3).

Eine Übersicht über die berücksichtigten Maßnahmen in den einzelnen Fallstudien ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Weitere Details zu den Modellierungsrandbedingungen und der Stichprobe an analysierten Missionen finden sich in den jeweiligen Unterkapiteln.

	Individuelle Bewertung	Detailvergleich	Generalisierter Vergleich
Kapitel	5.2	5.3	5.4
Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit	●	●	●
Laterale Routenverschiebung	○	●	●
Klimaoptimierter Mehrstufenbetrieb	●	●	●
Formationsflug	○	○	●

Tabelle 5.2: Betrachtete Maßnahmen in den unterschiedlichen Fallstudien (● Berücksichtigung der Maßnahme im entsprechenden Kapitel, ○ keine Berücksichtigung).

5.2 Individuelle Bewertung betrieblicher Maßnahmen

Um die Eignung der Modellkette zur Detailbewertung von betrieblichen Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr zu demonstrieren, werden im Folgenden die Kombination aus geringerer Flughöhe und reduzierter Geschwindigkeit sowie das Konzept des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs untersucht.

Dabei werden existierende Studien, die u. a. gemeinsam von ILT und DLR-LV durchgeführt wurden, weiterentwickelt. Bei der Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit wird im Folgenden auf den Arbeiten von Koch (2013) [68] aufgesetzt, wobei der Fokus dieser Studie auf einer detaillierteren Modellierung im Hinblick auf die Berücksichtigung realer Flugrouten und Wetterbedingungen liegt. Der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb stellt eine Weiterentwicklung der Studie von Linke (2016) [249] dar, in welcher der Mehrstufenbetrieb zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs untersucht wurde. Die Weiterentwicklung im Rahmen dieser Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines klimaoptimierten Konzepts, mit welchem eine Reduktion der Klimawirkung erzielt werden kann.

Die Randbedingungen der einzelnen Studien sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Da in diesem Kapitel noch kein direkter Vergleich der verschiedenen Maßnahmen beabsichtigt ist, werden bewusst möglichst unterschiedliche Stichproben und Modellierungsrandbedingungen gewählt, um die Breite der Bewertungsfähigkeiten mit der Modellkette aus Kapitel 4.2 zu demonstrieren. Während die Untersuchungen zur Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit den Fokus auf tatsächlich geflogene nordatlantische Missionen an ausgewählten Tagen setzen, um realistische meteorologische Bedingungen entlang der Flüge zu berücksichtigen, wird in der Studie zum klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb der gesamte europäische Langstreckenbetrieb im Jahr 2018 untersucht. Deshalb unterscheidet sich auch die gewählte Bewertungsmethode in beiden Studien. In der Studie zum tiefer und langsamer Fliegen wird eine Detailbewertung jeder Einzelmission mit dem iTCM durchgeführt und die Klimawirkung meteorologisch mit aCCFs bewertet. Aufgrund der detaillierten Analyse der Effekte entlang von Einzelmissionen wird p-ATR20 als Klimametrik ausgewählt. Im Gegensatz dazu kommen bei der Analyse des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs Reduzierte Emissionsprofile (RedEmPs) auf Basis von BADA4 zur Trajektorien- und Emissionsrechnung und AirClim für die Klimabewertung zum Einsatz. Die aggregierte Analyse eines Jahres und die Betrachtung der generellen Eignung der Maßnahme unabhängig von der betrachteten Mission begründen die Auswahl von F-ATR100 als betrachtete Klimametrik.

	Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit	Klimaoptimierter Mehrstufenbetrieb
Geografischer Umfang	Nordatlantischer Verkehr	Europäischer Langstreckenverkehr
Zeitlicher Umfang	16. Juni 2018, 11. Dezember 2018	Jahr 2018
Flotte	Typische Langstreckenflugzeuge	Typische Langstreckenflugzeuge
Flugplan	335 Detailmissionen	ca. 800.000 Flüge (aggregiert zu ca. 5.000 unterschiedlichen Missionen)
Meteorologie	Realatmosphäre nach ECMWF ERA5	Internationale Standardatmosphäre, kein Wind
Referenzmission	Reale Flugtrajektorien gem. EUROCONTROL-Plandaten	Großkreismission mit kraftstoffoptimalen <i>Step climbs</i>
Trajektorienrechnung	iTCM (mit BADA4)	RedEmPs basierend auf dem iTCM (mit BADA4) und unter Verwendung der DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode
Emissionsrechnung	DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode im iTCM	DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode
Klimabewertung	aCCFs (meteorologisch) im iTCM	AirClim (klimatologisch) über RCE
Klimametrik	p-ATR20	F-ATR100

Tabelle 5.3: Randbedingungen der Fallstudien zur Detailbewertung der Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit sowie des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs.

5.2.1 Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit

Das Konzept der Reduktion von Flughöhen und Geschwindigkeiten wurde u. a. bereits in den Studien von Koch (2013) und Dahmann et al. (2016) analysiert [68, 66]. Dem Ansatz liegt das Konzept zugrunde, dass die Klimawirkung von Nicht-CO₂-Emissionen auf tieferen Flugflächen signifikant reduziert werden kann [vgl. 60, 61]. Mit niedrigeren

Flughöhen steigt bei gleichbleibender Geschwindigkeit allerdings der Kraftstoffverbrauch, sodass ein Anstieg der CO₂-Emissionen sowie der assoziierten Klimawirkung zu erwarten ist. Dieser Effekt kann durch eine zusätzliche Reduktion der Fluggeschwindigkeit teilweise kompensiert werden.

Als Erweiterung der Analyse von Koch (2013) [68] kann unter Anwendung der Modellkette aus Kapitel 4.2 eine detaillierte Bewertung der Maßnahme unter Berücksichtigung der tatsächlichen Routenführung sowie realistischer meteorologischer Bedingungen entlang der Einzelmissionen für ausgewählte repräsentative Tage durchgeführt werden (vgl. Tabelle 5.3). Dabei werden verschiedene Kombinationen von Flughöhenänderungen in 2.000-Fuß-Schritten bis zu einer Reduktion von 6.000 Fuß und Reduktionen in der Fluggeschwindigkeit um 5 % und 10 % betrachtet. Da bei einer meteorologischen Betrachtung die tatsächliche Wettersituation besonders relevant ist, erfolgt die Analyse für einen repräsentativen Fallstudientag im Sommer sowie einen im Winter des Jahres 2018.

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigen ein signifikantes Mitigationspotential in p-ATR20 durch die Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit an beiden betrachteten Fallstudientagen. Für den ausgewählten Sommertag kann eine Reduktion der Klimawirkung um 8,7 % erreicht werden, während der Wintertag ein höheres Potential von 16,1 % aufzeigt, wenn je Flug die vorteilhafteste Kombination aus Flughöhen- und Geschwindigkeitsanpassung ausgewählt wird (vgl. Tabelle 5.4 und Abb. 5.3). Andererseits steigen der Kraftstoffverbrauch (um +1,0 % bzw. +0,9 %) durch die Abweichung von der optimalen Reiseflughöhe sowie die längere Reisezeit durch die Reduktion der Geschwindigkeit (um +4,3 % bzw. +3,5 %), was zu einem Anstieg der direkten Betriebskosten von 2,7 % bzw. 2,2 % führt.

	16. Juni 2018	11. Dezember 2018
Distanz	0,0 %	0,0 %
Reisezeit	+4,3 %	+3,5 %
Kraftstoffverbrauch	+1,0 %	+0,9 %
Betriebskosten	+2,7 %	+2,2 %
Klimawirkung	-8,7 %	-16,1 %

Tabelle 5.4: Effekte der Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit [67].

Die Reduktion der Klimawirkung wird im Wesentlichen durch die Reduktion von kondensstreifen-induzierten Effekten erreicht. Auch der Einfluss der Wasserdampfemissionen sinkt durch die Reduktion der Flughöhe. Sowohl die Klimawirkung von CO₂-Emissionen als auch von NO_x-Emissionen steigt leicht an, wird aber durch die Reduktion der übrigen Nicht-CO₂-Effekte deutlich überkompensiert (Abb. 5.3). Eine Ausweitung der Analyse auf weitere Tage zeigt insgesamt ein höheres Mitigationspotential in Herbst und Winter im Vergleich zu Frühling und Sommer [67].

Andererseits entstehen durch die Verlängerung der Flugzeit und die Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs auf niedrigeren Flughöhen Nachteile für die Stakeholder des Luftverkehrsystems. Zum Beispiel ergeben sich durch die Erhöhung der direkten Betriebskosten ökonomische Nachteile für die betreibenden Luftverkehrsgesellschaften. Abbildung 5.4 zeigt aber, dass auch bei einem geringen zulässigen Kostenanstieg je Mission (*DOC-Penalty*) signifikante Mitigationspotentiale erreicht werden können. So kann für den ausgewählten Wintertag bereits bei einem Kostenanstieg von maximal 0,5 % pro Mission die Klimawirkung der Gesamtstichprobe um ca. 8,0 % reduziert werden (ca. 4,5 % für den ausgewählten Sommertag). Durch die detaillierte Berücksichtigung der tatsächlich geflogenen Routen an

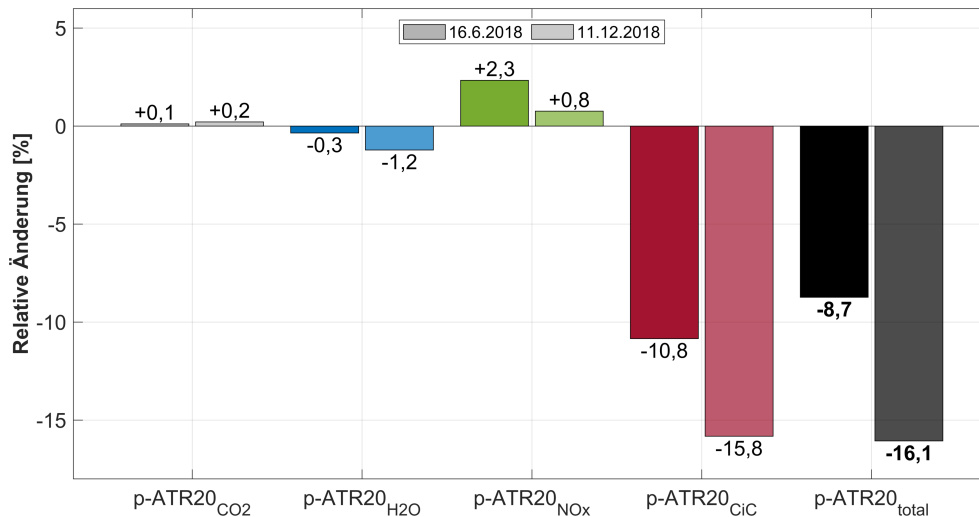


Abbildung 5.3: Veränderung der Klimawirkung je Spezies durch reduzierte Flughöhen und Geschwindigkeiten. Prozentzahlen geben den Beitrag zur Veränderung der Gesamtklimawirkung an [eigene Darstellung nach 67].

den ausgewählten Fallstudientagen zeigt sich außerdem, dass auf einzelnen Missionen Ineffizienzen in der Routenführung dazu führen, dass auch ohne einen Anstieg der Betriebskosten entlang der betrachteten Missionen eine Reduktion der Klimawirkung erreicht werden kann (*Win-Win-Fälle*).

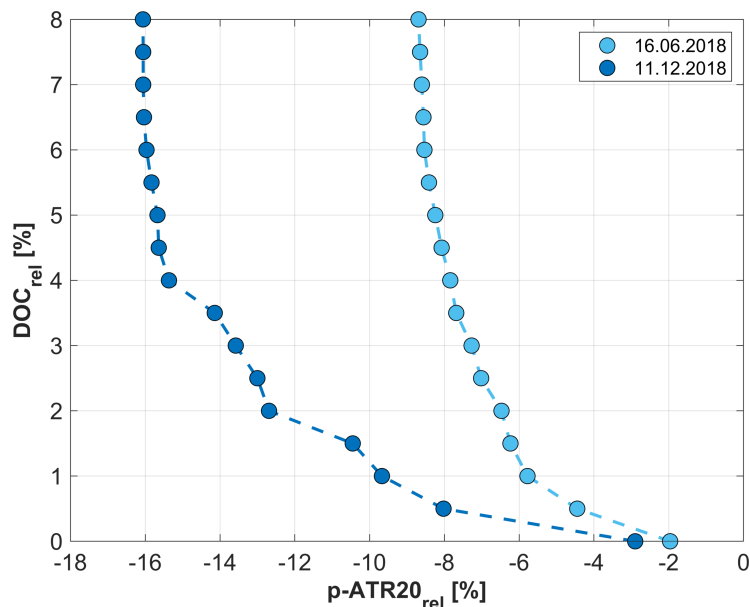


Abbildung 5.4: Veränderung der Klimawirkungsminderung in Abhängigkeit des zulässigen Betriebskostenanstiegs je Mission für die Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit [eigene Darstellung nach 67].

Darüber hinaus sind auch die Passagiere von dieser Maßnahme zur Klimawirkungsminderung durch die Verlängerung der Reisezeit betroffen (vgl. Tabelle 5.4). Airline-Netzwerke werden durch die längeren Flugzeiten ebenfalls beeinflusst, sodass Umläufe von Flugzeugen

und Crews möglicherweise eingeschränkt werden. Aus der Perspektive des Luftverkehrsmanagements ist die Vermeidung bestimmter klimasensitiver Flughöhen ebenfalls kritisch, da dadurch eine höhere Auslastung der Lufträume in weniger klimasensitiven Höhen erfolgt (vgl. Anhang C).

5.2.2 Klimaoptimierter Mehrstufenbetrieb

Das Konzept des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs basiert auf dem kraftstoffoptimierten Ansatz, bei dem eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs entlang einer Mission durch die Reduktion der Abflugmasse erzielt wird, indem eine Zwischenlandung zum Tanken eingelegt wird [52, 51, 298]. Ist die Mission ausreichend lang, kann der zusätzliche Kraftstoffverbrauch für die Zwischenlandung durch den reduzierten Kraftstoffverbrauch entlang beider Teilmissionen kompensiert werden (*Fuel-for-fuel*-Effekte). Bei kraftstoffoptimalen Flughöhen im ökonomisch getriebenen Betrieb zeigt sich aber, dass dieses Konzept trotz einer signifikanten Verringerung des Kraftstoffverbrauchs nicht zu einer Verringerung der Klimawirkung führt. Durch die geringere Masse des Flugzeugs können höhere Flughöhen erreicht werden, womit die Nicht-CO₂-Effekte ansteigen, sodass die Reduktion in CO₂-Effekten überkompensiert wird [51]. Folglich wird in dieser Arbeit das Konzept des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs entwickelt [223]. Charakteristisch ist hier, dass sowohl die Auswahl der Zwischenlandeflughäfen als auch der Flughöhen hinsichtlich der Klimawirkung optimiert wird. So kann z. B. ein Zwischenlandeflughafen mit niedrigerem Breitengrad zur Minderung der Klimawirkung durch geringere Nicht-CO₂-Effekte sinnvoll sein (vgl. Abb. 2.5), obwohl dafür ein größerer Umweg notwendig wird. Gleiches gilt für die Reduktion der Reisehöhe zur Minderung von Nicht-CO₂-Effekten, wodurch ein höherer Kraftstoffverbrauch entstehen kann.

Für die Konzeptbewertung werden eine Auswahl an möglichen Zwischenlandeflughäfen sowie Flughöhen berücksichtigt (weitere Details im Anhang B.4). Es ergibt sich ein Mitigationspotential von 40 % in der betrachteten Klimametrik F-ATR100 (vgl. Tabelle 5.5). Obwohl im Mittel ein zusätzlicher Umweg von 3,6 % zurückgelegt wird und der Kraftstoffverbrauch um ca. 18,0 % steigt, sinkt die Klimawirkung durch Reduktionen in den Nicht-CO₂-Effekten. Die Effekte lassen sich im Wesentlichen auf die markanten Verringerungen in der Klimawirkung von Stickoxiden (-48,0 %) und Kondensstreifenzirren (-53,0 %) zurückführen (Abb. 5.5, links).

Distanz	+3,6 %
Reisezeit	+9,6 %
Kraftstoffverbrauch	+18,0 %
Betriebskosten	+20,5 %
Klimawirkung	-40,3 %

Tabelle 5.5: Effekte des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs [223].

Durch die Zwischenlandung sowie die zusätzlichen Umwege und den erhöhten Kraftstoffverbrauch auf niedrigeren Flughöhen steigen die direkten Betriebskosten bei maximalem Mitigationspotential um 20,5 % an (vgl. Tabelle 5.5). Wird der zulässige Anstieg der direkten Betriebskosten (*DOC-Penalty*) pro Mission relativ zum Referenzfall begrenzt, ergibt sich die Paretofront in Abbildung 5.5 (rechts). Es zeigt sich, dass eine Minderung der Klimawirkung erst ab einem missionspezifischen Anstieg der Betriebskosten von mindestens 5 % über die betrachtete Missionsstichprobe erreicht werden kann. Bei 10 % bis 20 %

zulässigem Kostenanstieg pro Mission steigt das Mitigationspotential über die Gesamtstichprobe nahezu linear an, bevor bei höheren zulässigen Kostenanstiegen die Steigerung des Mitigationspotentials wieder abflacht.

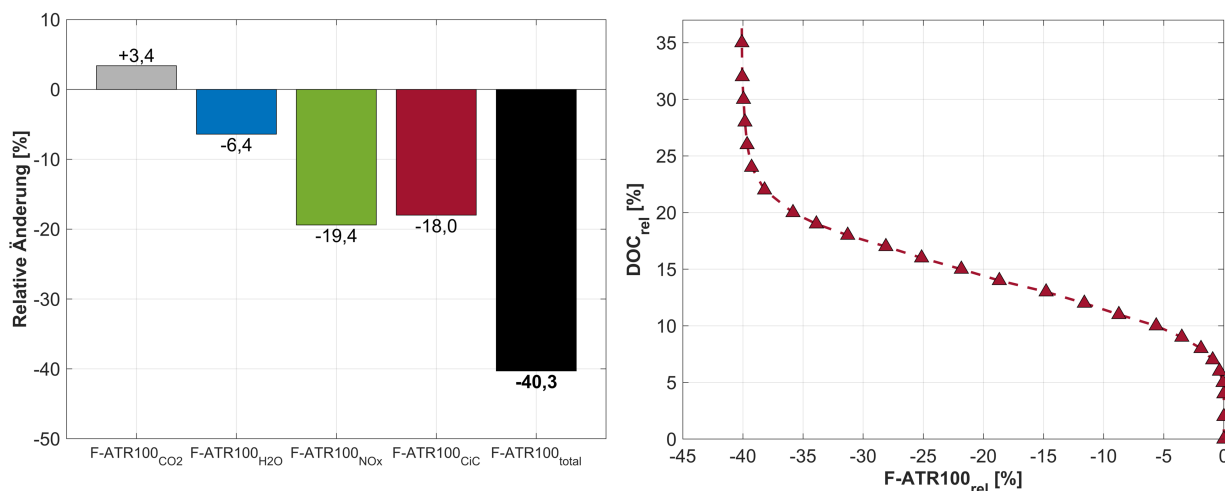


Abbildung 5.5: Potential zur Minderung der Klimawirkung durch klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb aufgeschlüsselt über den Beitrag je Spezies (links) [eigene Darstellung nach 223] und Paretofront über zulässige Kostenanstiege je Mission (rechts).

Der hohen Effektivität des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs zur Minderung der Klimawirkung stehen signifikante Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems gegenüber, was eine effiziente Implementierung der Maßnahme stark einschränkt. Aus Airline-Perspektive haben die längeren Flugzeiten auch Einfluss auf die geplanten Netzwerke, da Flugzeug und Besatzung insgesamt für weitere Umläufe möglicherweise nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen. Darüber hinaus sind auch Passagiere, Flughäfen und Flugsicherungsdienste betroffen. So erhöht sich die Reisezeit der Passagiere, während sich der Komfort durch die Zwischenlandung zum Tanken reduziert. Flughäfen, die nun als Zwischenlandeflughäfen dienen, müssen die entsprechenden Kapazitäten und Infrastrukturen vorsehen. Die Luftverkehrsdichte steigt in bestimmten Lufträumen, was die Belastung der Lotsen erhöhen kann. Aus Hersteller- und Wartungsperspektive ist zu beachten, dass der Betrieb der Flugzeuge durch die Implementierung des Mehrstufenbetriebs signifikant von der Auslegungsdistanz und -flughöhe abweichen kann. Außerdem beeinflusst der Anstieg der Flugzyklen den Wartungsaufwand.

Auch wenn eine direkte Umsetzung des Konzepts unter den aktuellen Bedingungen des Luftverkehrs unwahrscheinlich erscheint, ist eine Implementierung beispielsweise im Rahmen einer Klimaoptimierung des Airline-Netzwerks interessant [173]. Weitere Potentiale ergeben sich z. B. durch die Kombination des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs mit der Entwicklung neuer Flugzeugtypen, die auf die veränderten Betriebsbedingungen angepasst sind [176]. Ergänzende Betrachtungen zum klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb finden sich im Anhang B.4.

Konzeptbewertung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs in Abgrenzung zum kraftstoffoptimierten Konzept und zur Anpassung von Flughöhen

Durch den klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb überlagern sich verschiedene Effekte, die letztendlich zur Klimawirkungsminderung beitragen. Zum einen reduziert der Mehrstufen-

betrieb im Vergleich zur ununterbrochenen Mission den Kraftstoffverbrauch durch ein geringeres Abfluggewicht aufgrund der Zwischenlandung. Durch die zusätzliche Reduktion der Flughöhe und die klimaoptimierte Auswahl des Zwischenlandeflughafens wird außerdem die Ortsabhängigkeit von Nicht-CO₂-Effekten genutzt. Folglich ist in der Konzeptbewertung sicherzustellen, dass der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb durch die Kombination der verschiedenen Effekte eine höhere Klimawirkungsminderung als durch die individuelle Implementierung des kraftstoffoptimierten Mehrstufenbetriebs oder die Reduktion der Flughöhen erreicht werden kann. Die Ergebnisse der detaillierten Analyse des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs werden deshalb im Folgenden zu den Potentialen des kraftstoffoptimierten Konzepts und der Reduktion der Flughöhe ins Verhältnis gesetzt. Dafür werden die beiden folgenden Maßnahmen ergänzend im Detail modelliert:

- Kraftstoffoptimierter Mehrstufenbetrieb zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von Langstreckenmissionen durch die Reduktion der Abflugmasse mithilfe einer Zwischenlandung [nach 52], sowie
- Reduktion der Reise Flughöhe um bis zu 6.000 Fuß in 2.000-Fuß-Schritten zur Verringerung der höhenabhängigen Klimawirkung von Nicht-CO₂-Emissionen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.6 zusammengestellt. Das Konzept des kraftstoffoptimierten Mehrstufenbetriebs führt nicht zu einer Reduktion der Klimawirkung, da die Erhöhung der Nicht-CO₂-Effekte durch die veränderten Emissionsorte die Verringerung der CO₂-Emissionen übersteigt. Im Gegensatz dazu weist das klimaoptimierte Konzept signifikante Mitigationspotentiale von bis zu 40,3 % auf und ist somit auch im Vergleich mit der Reduktion der Flughöhe die effektivere Maßnahme. Durch eine Reduktion der Flughöhe kann die Klimawirkung um bis zu 32,6 % reduziert werden, während der Anstieg in den direkten Betriebskosten im Vergleich zum klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb deutlich geringer ausfällt. Auch der Anteil der Missionen, bei denen eine Maßnahmenimplementierung zur Reduktion der Klimawirkung bzw. des Kraftstoffverbrauchs sinnvoll ist, variiert stark. Während der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb bei nahezu allen betrachteten Missionen zu einer Reduktion der Klimawirkung führt, sind die reduzierten Flughöhen bei 94 % der betrachteten Missionen von Vorteil. Der kraftstoffoptimierte Mehrstufenbetrieb führt bei etwa der Hälfte der betrachteten Missionen zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs.

	Klimaoptimierter Mehrstufenbetrieb	Kraftstoffopt. Mehrstufenbetrieb	Reduktion der Flughöhe
Distanz	+3,6 %	+0,04 %	0,0 %
Reisezeit	+9,6 %	+3,3 %	0,0 %
Kraftstoffverbrauch	+18,0 %	-1,9 %	+12,5 %
Betriebskosten	+20,5 %	+ 5,6%	+4,2 %
Betroffene Missionen	99,9 %	47,3%	94,0 %
Klimawirkung	-40,3 %	+ 0,6%	-32,6 %

Tabelle 5.6: Vergleich des kraftstoff- und klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs mit dem Betrieb auf niedrigeren Flughöhen.

Unterschiede in der Effizienz der Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung zeigen sich im Detail bei der Betrachtung der resultierenden Paretofronten in Abbildung 5.6. Während das maximale Minderungspotential des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs deutlich

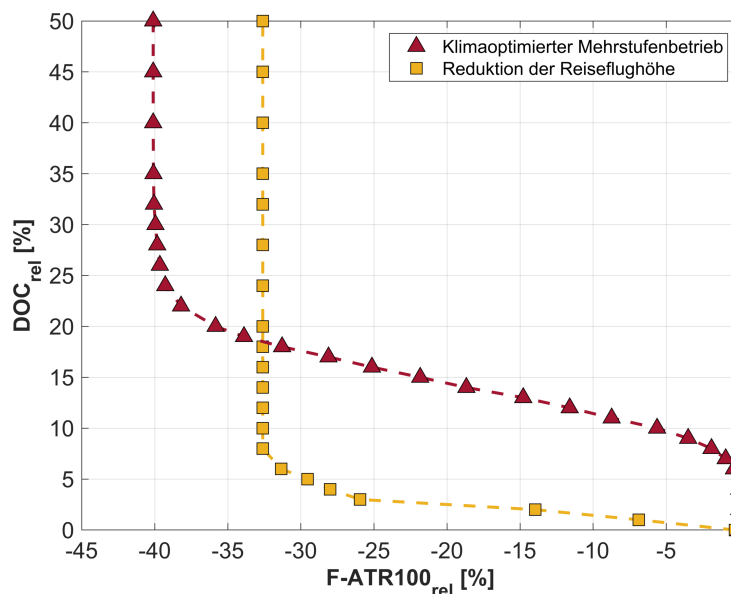


Abbildung 5.6: Paretofront für klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb und Flughöhenreduktion im Vergleich.

über dem Potential der Flughöhenreduktion liegt, weist letztere Maßnahme eine höhere Effizienz auf, da geringere Veränderungen in den Betriebskosten hervorgerufen werden. So kann beispielsweise bei einer Limitierung des zulässigen direkten Betriebskostenanstiegs auf 10 % pro Mission eine Reduktion der Klimawirkung um 32,6 % erreicht werden, während durch den klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb nur eine Reduktion von etwa 5,6 % möglich ist.

5.3 Vergleich von betrieblichen Maßnahmen durch Detailmodellierung

Basierend auf der demonstrierten Fähigkeit zur Detailbewertung von Einzelmaßnahmen kann die vergleichende Bewertung von betrieblichen Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung durch detaillierte Modellierung erfolgen. Der Vergleich wird anhand einer repräsentativen Missionsstichprobe von fünfzig europäischen Langstreckenmissionen durchgeführt, für welche die Umsetzung der verschiedenen Maßnahmen modelliert wird. Durch die Verwendung konsistenter Studienrandbedingungen für die verschiedenen Maßnahmen können diese im Anschluss an die Detailmodellierung direkt miteinander verglichen werden.

Die folgenden Maßnahmen werden dabei berücksichtigt:

- Anpassung der Reise Flughöhe in Kombination mit der Anpassung der Reisefluggeschwindigkeit: Die Reise Flughöhe wird in 2.000-Fuß-Schritten variiert, wobei gem. Halbkreisflugregel konstante Flugflächen zwischen FL290 und FL400 berücksichtigt werden. Darüber hinaus wird die Reiseflugmachzahl zwischen -10 % und +2,5 % in 2,5-Prozent-Schritten im Vergleich zur Referenzmachzahl aus BADA4 variiert. Liegt keine Geschwindigkeitsanpassung vor, wird die Maßnahme als reine Flughöhenadaptation bezeichnet.
- Laterale Routenadaptation: Die laterale Routenführung wird durch die Verlagerung des Breitengrads des Routenschwerpunkts entlang des Großkreises zwischen -40 und

+10° in Fünf-Grad-Schritten variiert.

- Mehrstufenbetrieb: Auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 5.2.2 werden sowohl das kraftstoffoptimierte als auch das entwickelte klimaoptimierte ISO-Konzept untersucht. Folglich wird der Zwischenlandeflughafen entweder auf Basis des minimalen Umwegs oder auf Basis der minimalen Klimawirkung ausgewählt. Für das klimaoptimierte Konzept werden zusätzlich verschiedene Flughöhen analog zur Flughöhenadaptation berücksichtigt. Die Auswahl der Zwischenlandeflughäfen erfolgt auf Basis der Datenbank an optimalen Zwischenlandeflughäfen der Studie aus Kapitel 5.2.2.

Die Auswahl der repräsentativen Stichprobe von fünfzig unterschiedlichen Missionen basiert auf den Flugverbindungen des Jahres 2018, wie sie in der *Sabre MI* Datenbank zur Verfügung stehen [296]. Die Flugpläne werden unabhängig von der betreibenden Luftverkehrsgesellschaft hinsichtlich Start-Ziel-Kombination und Flugzeugtyp aggregiert und auf die Betrachtung des europäischen Langstreckenluftverkehrs beschränkt (vgl. Kapitel 5.1.1). Zur Auswahl von fünfzig repräsentativen Missionen wird ein Clustering hinsichtlich Missionsdistanz, angebotener Sitzplatzkapazitäten je Mission sowie geografischer Ausdehnung durchgeführt. Zur Aufteilung des Datensatzes in die fünfzig Cluster, wird ein *k-medoids* Ansatz verfolgt. Dieser partitionelle Algorithmus teilt einen gegebenen Datensatz in Teilmengen auf, sodass die Differenz zwischen den Punkten und dem Mittelpunkt des Clusters minimal wird¹² [299]. Durch die Aufteilung in unterschiedliche Cluster wird sichergestellt, dass möglichst unterschiedliche Missionen analysiert werden. Die Berücksichtigung von Missionen mit einer Distanz von mindestens 3.000 km führt im betrachteten Beispiel dazu, dass auch lange intra-europäische Missionen, wie z. B. von Malaga (LEMG) nach Helsinki (EFHK) oder von Köln (EDDK) nach Fuerteventura (GCFV), analysiert werden, für die äquivalent zum Interkontinentalverkehr mittelfristig die Nutzung alternativer Verkehrsträger oder innovativer Antriebskonzepte unwahrscheinlich ist. Die resultierenden repräsentativen Missionen sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

Für diese Missionen wird die Implementierung der zu vergleichenden Maßnahmen mit identischen Randbedingungen simuliert (vgl. Tabelle 5.7) und die Effektivität der Maßnahmen anhand der Klimawirkung und die Effizienz in Relation zur Veränderung in den Betriebskosten verglichen. Jede der fünfzig Referenzmissionen wird als Großkreisverbindung zwischen Start- und Zielflughafen mit *Step climbs* zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs definiert. Die Berücksichtigung der meteorologischen Randbedingungen für die Trajektorienrechnung erfolgt vereinfacht anhand von internationaler Standardatmosphäre. Die Trajektorien-simulation wird mit dem iTCM unter Verwendung von BADA4-Flugleistungsdaten durchgeführt. In der Emissionsrechnung kommt die DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode zum Einsatz. Die Klimabewertung wird mit AirClim über eine RCE-Integration durchgeführt. Als Klimametrik wird F-ATR100 ausgewählt (vgl. Kapitel 2.4.2). Das begründet sich u. a. durch den direkten Bezug zur globalen Oberflächentemperatur und die gute Eignung der Metrik zur Beurteilung des Potentials von Klimawirkungsminierungsmaßnahmen (vgl. Anhang B.1).

Der Maßnahmenvergleich für eine individuelle Mission kann beispielhaft für einen Flug von Frankfurt (EDDF) nach Shanghai (ZSPD) mit einer Boeing 747-400 durchgeführt werden. Die Unterschiede hinsichtlich Klimawirkung und Betriebskosten sind in Abbildung 5.8 (links) dargestellt. Für diese Beispielmision zeigt sich, dass der kraftstoffoptimierte

¹²Im Gegensatz zum *k-means* Algorithmus stellen die Mittelpunkte der Cluster tatsächliche Punkte des Clusters dar, sodass diese Mittelpunkte direkt als repräsentative Punkte für das entsprechende Cluster verwendet werden können.

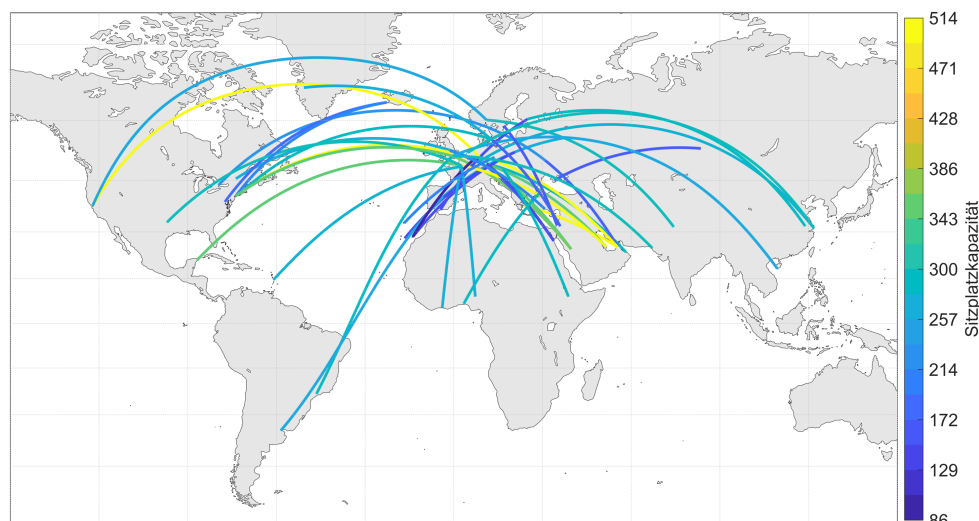


Abbildung 5.7: Auswahl fünfzig repräsentativer Missionen anhand von Distanz, Sitzplatzkapazität und geografischer Ausdehnung.

	Maßnahmenvergleich bei konsistenten Studienrandbedingungen durch Detailmodellierung (klimatologische Analyse)
Geografischer Umfang	Fünfzig repräsentative europäische Langstreckenmissionen
Zeitlicher Umfang	Jahr 2018
Flotte	Typische Langstreckenflugzeuge
Meteorologie	Internationale Standardatmosphäre, kein Wind
Referenzmission	Großkreismission mit kraftstoffoptimalen <i>Step climbs</i>
Trajektorienrechnung	iTCM (mit BADA4)
Emissionsrechnung	DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode im iTCM
Klimabewertung	AirClim (klimatologisch) über RCE
Klimametrik	F-ATR100

Tabelle 5.7: Randbedingungen der Fallstudie zum Maßnahmenvergleich unter konsistenten Studienrandbedingungen durch detaillierte Modellierung in klimatologischer Betrachtung.

Mehrstufenbetrieb sowie eine Erhöhung des Breitengrads nicht zu einer Minderung der Klimawirkung führen. Im Gegensatz dazu zeigen sowohl der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb als auch eine Breitengradverringering Mitigationspotentiale. Im direkten Vergleich erweist sich der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb unter Berücksichtigung einer Reduktion der Reise Flughöhe auf FL290 als besonders effektiv. Durch eine Kombination der klimaoptimierten Auswahl des Zwischenlandeflughafens mit einer Reduktion der Flughöhe kann die Klimawirkung in F-ATR100 um knapp 20 % reduziert werden, was im Wesentlichen durch eine Reduktion der kondensstreifeninduzierten Effekte (-16 %) und der NO_x -Effekte (-29 %) hervorgerufen wird (vgl. Abb. 5.9). Dem gegenüber steht ein Anstieg in den Betriebskosten von ca. 8 %, was durch die Verlängerung der Reisezeit (+8 %), den höheren Kraftstoffverbrauch (+12 %) und die zusätzlichen Gebühren für die Zwischenlandung hervorgerufen wird.

Die Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit zeigt je nach Konfiguration stark

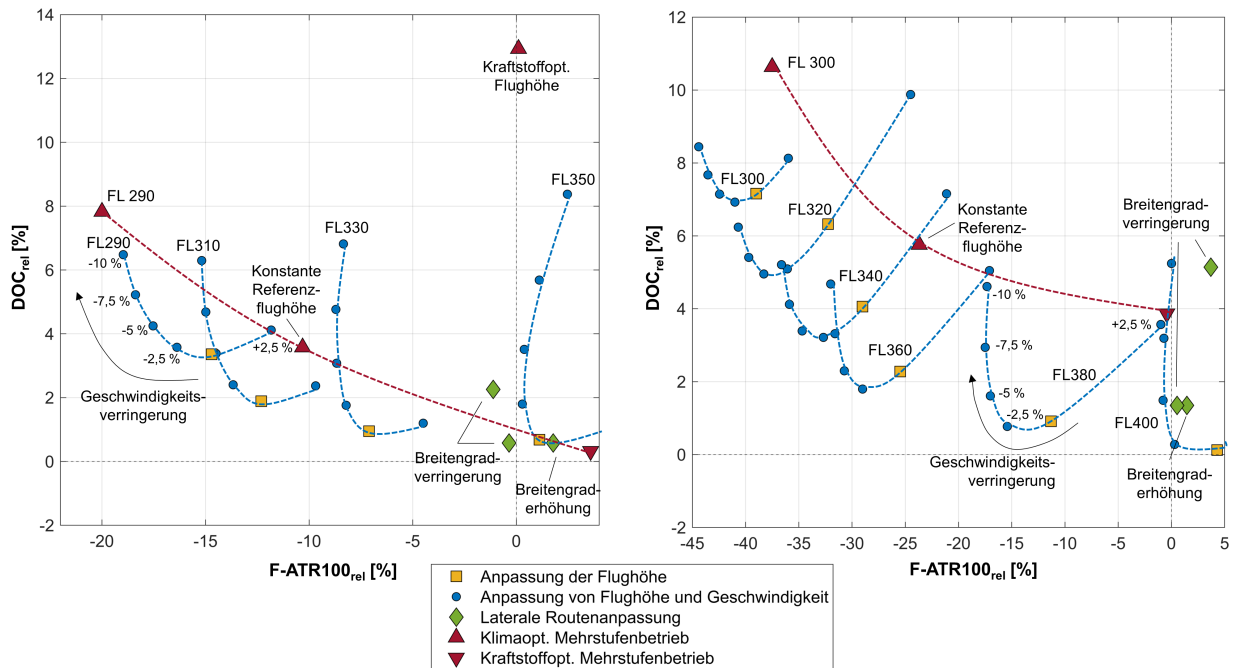


Abbildung 5.8: Ergebnisse des missionsindividuellen Vergleichs für ausgewählte Beispielmissionen von EDDF nach ZSPD (Boeing 747-400, links) sowie von EDDF nach JFK (Airbus A380-800, rechts) in klimatologischer Betrachtung.

variierende Effektivitäten und Effizienzen. Eine Verringerung der Reise Flughöhe führt aufgrund der geringeren Klimasensitivität von Stickoxiden und Wasserdampf auf niedrigeren Flughöhen zu starken Mitigationspotentialen (bis zu 15 % bei FL290). Gleichzeitig steigen mit geringeren Flughöhen auch die Betriebskosten, was auf den zusätzlichen Kraftstoffbedarf durch den höheren Luftwiderstand zurückzuführen ist. Eine zusätzliche Verringerung der Fluggeschwindigkeit bietet darüber hinaus Potentiale die Klimawirkungsminderung noch weiter zu erhöhen (bis zu 19 %, vgl. Abb. 5.9), da durch den geringeren Kraftstoffverbrauch die Emissionsmengen von CO₂ und NO_x reduziert werden. Allerdings steigen in diesem Zuge durch die längeren Reisezeiten auch die Betriebskosten auf bis zu 6,5 %. Eine Erhöhung der Fluggeschwindigkeit führt durch höhere Kraftstoffbedarfe sowohl zu einer Erhöhung der Klimawirkung als auch der direkten Betriebskosten. > Insgesamt zeigt dieses Beispiel in Abbildung 5.8 (links) eine besonders hohe Effektivität des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs, während die Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit in verschiedenen Fällen höhere Effizienz verspricht. Die laterale Verschiebung der Trajektorie sowie das kraftstoffoptimierte ISO-Konzept sind im betrachteten Beispiel nicht geeignet bzw. den übrigen Maßnahmen in Effektivität und Effizienz unterlegen.

Der missionspezifische Maßnahmenvergleich kann analog für weitere Flugverbindungen erfolgen. Die Analyse einer Mission von Frankfurt (EDDF) nach New York (JFK) mit einem Airbus A380-800 zeigt in Abbildung 5.8 (rechts) ein höheres Mitigationspotential durch die Verringerung von Flughöhe und Geschwindigkeit (bis zu 44 % bei ca. 8 % höheren Betriebskosten) gegenüber dem klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb (-37 % in F-ATR100 bei ca. 11 % höheren Betriebskosten). Im Vergleich der beiden Beispielmissionen ergeben sich nicht nur unterschiedliche Ergebnisse des Maßnahmenvergleichs hinsichtlich Effektivität und Effizienz, sondern auch, dass die Höhe der Mitigationspotentiale und der Kostenveränderungen von der betrachteten Referenzmission abhängt.

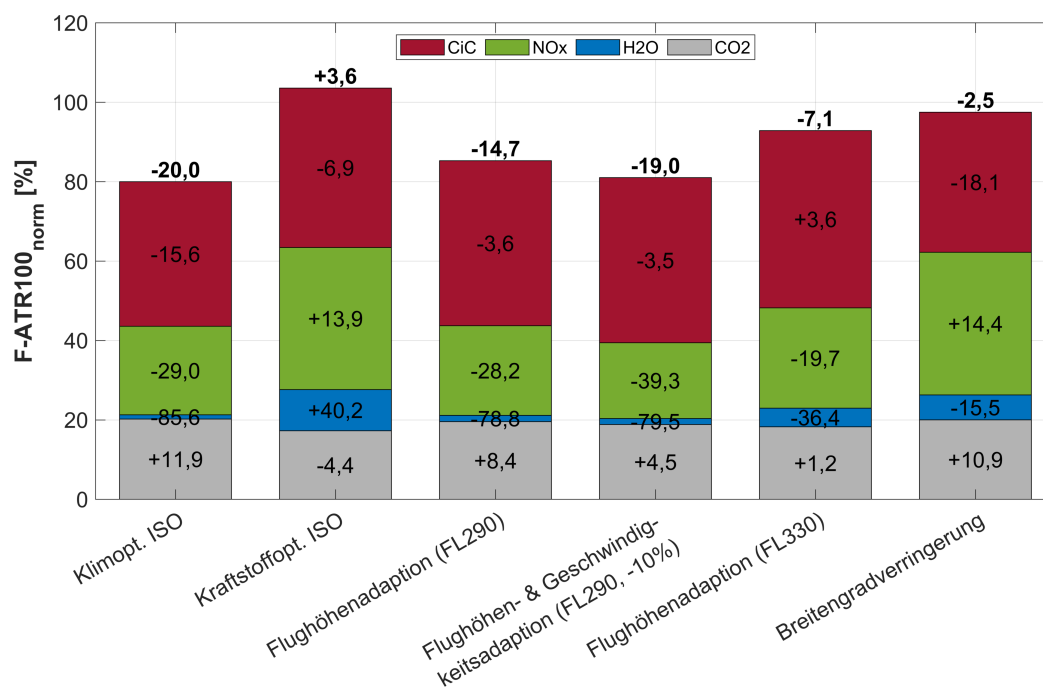


Abbildung 5.9: Normierte Gesamtklimawirkung im Relation zur Referenzmission und Veränderung der Klimawirkung je Spezies für ausgewählte Maßnahmen des missionsindividuellen Vergleichs anhand einer Beispielmision von EDDF nach ZSPD (Boeing 747-400) in klimatologischer Betrachtung.

Abbildung 5.10 zeigt zusammenfassend die Auswertung aller fünfzig Missionen der repräsentativen Stichprobe und bestätigt im Wesentlichen die Erkenntnisse der missionsindividuellen Betrachtung. Eine Reduktion der Flughöhe führt bei nahezu allen betrachteten Missionen (98 %, vgl. Tabelle 5.8) zu einer Reduktion der Klimawirkung. Ein besonders hohes Potential (bis zu 68 % Reduktion in F-ATR100) kann für lange Flüge mit geringem mittleren Breitengrad erreicht werden. Im Mittel liegt das Mitigationspotential für die Missionen, bei denen eine Maßnahmenimplementierung vorteilhaft möglich ist, bei 25,2 % in F-ATR100, was einem mittleren Anstieg in den direkten Betriebskosten von 3,7 % gegenübersteht. Für die Betrachtung der Gesamtstichprobe ergeben sich durch die hohe Anwendbarkeit nur geringe Unterschiede (-25,1 % in F-ATR100, +3,7 % in DOC). Die Minderung der Klimawirkung wird durch eine Reduktion von Kondensstreifen- (-18,6 % gegenüber dem Referenzfall) und Stickoxideffekten (-37,9 %) hervorgerufen, was den Anstieg in CO₂-Emissionen und der resultierenden Klimawirkung überkompensiert (vgl. Abb. 5.11). Der Kostenanstieg entsteht durch den höheren Kraftstoffverbrauch auf niedrigeren Flughöhen durch den höheren Luftwiderstand (+13,6 %), während sich Reisezeit und Missionsdistanz nicht markant verändern (vgl. Tabelle 5.8).

Wird die Reduktion der Reise Flughöhe um eine Verringerung der Fluggeschwindigkeit ergänzt, steigt das Minderungspotential der Klimawirkung. Für die betrachtete Stichprobe liegt das maximale Mitigationspotential bei bis zu 70 % und das durchschnittliche Mitigationspotential bei 29,8 %. Dem steht ein Anstieg in den direkten Betriebskosten von 7,2 % gegenüber. Die Maßnahme führt für alle Missionen der repräsentativen Stichprobe zu einer Reduktion der Klimawirkung. Im Mittel über alle fünfzig Missionen ergibt sich ein um 4,5 % höheres Mitigationspotential durch zusätzliche Geschwindigkeitsanpassung im Vergleich zur ausschließlichen Verringerung der Flughöhe. Auch für diese Maßnahme

kann die Klimawirkungsminderung auf die Veränderung in den CiC - und NO_x -Effekten zurückgeführt werden, während der Anstieg in den CO_2 -Effekten durch die Verringerung der Geschwindigkeit reduziert wird (vgl. Abb. 5.11). Andererseits zeigt sich bei der Betrachtung der Betriebskosten, dass die Einsparungen durch die Verringerung des Kraftstoffverbrauchs von einem Kostenanstieg durch die Verlängerung der Reisezeit überstiegen werden (vgl. Tabelle 5.8).

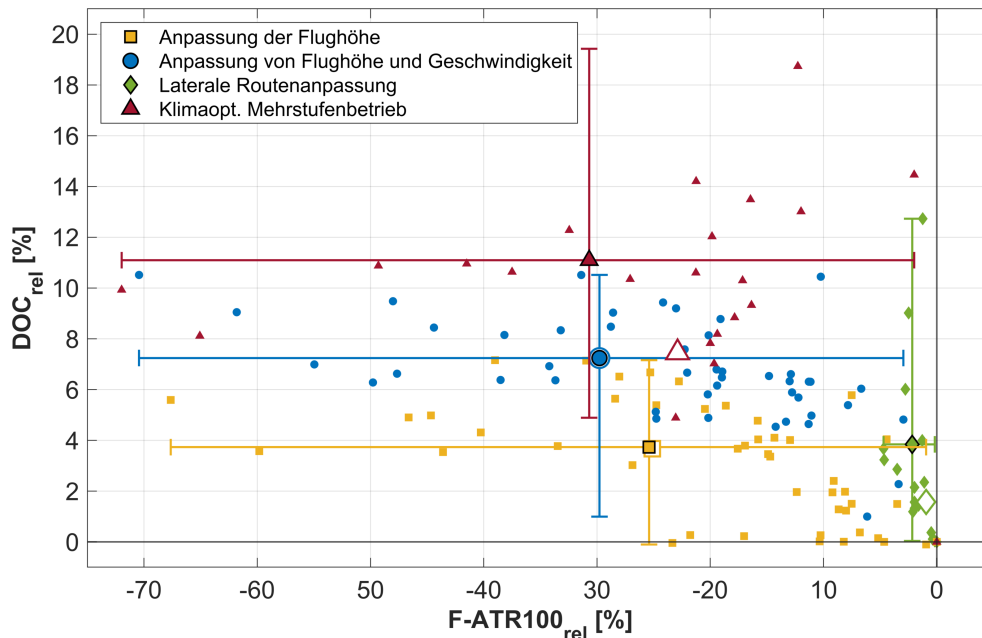


Abbildung 5.10: Klimawirkungsänderung und Kostenanstieg für den Maßnahmenvergleich der Fünfzig-Missionen-Fallstudie. Die *Whisker* zeigen die Ergebnisspanne über die betrachteten Einzelmmissionen. Ausgefüllte Markierungen repräsentieren das mittlere Ergebnis für die Missionen, bei welchen eine Maßnahmenimplementierung möglich und vorteilhaft ist, und unausgefüllte Markierungen repräsentieren die Mittelwerte über die Gesamtstichprobe.

	Flughöhen- adaption	Adaption von Flughöhe und Geschwindigkeit	Laterale Adaption	Klimaopt. Mehrstufen- betrieb
Distanz	0,0 %	0,0 %	+1,7 %	+1,9 %
Reisezeit	-0,8 %	+8,4 %	+1,7 %	+7,0 %
Kraftstoffverbrauch	+13,6 %	+9,1 %	+2,2 %	+14,3 %
Betriebskosten	+3,7 %	+7,4 %	+1,5 %	+7,5 %
Anwendbarkeit	98,0 %	100 %	36,0 %	52,0 %
Klimawirkung	-25,1 %	-29,8 %	-0,9 %	-22,9 %

Tabelle 5.8: Vergleich relevanter Kennzahlen für die ausgewählten Maßnahmen in der Fünfzig-Missionen-Fallstudie.

Im Gegensatz zur vertikalen Trajektorienadaption zeigt die laterale Adaption in der betrachteten Fallstudie ein geringes Potential zur Klimawirkungsreduktion von maximal 5 % bzw. im Mittel 2,2 %, wenn eine Maßnahmenimplementierung sinnvoll ist (0,9 % für die Gesamtstichprobe). Eine wirksame Anwendung ist auf etwa die Hälfte der betrachteten

Missionen beschränkt. Die Verringerung der Klimawirkung erfolgt im Wesentlichen durch eine Reduktion der Kondensstreifeneffekte (vgl. Abb. 5.11). Vorteilhaft ist der moderate Kostenanstieg, was durch die geringe Änderung von Missionsdistanz, Reisezeit und Kraftstoffverbrauch begründet wird (vgl. Tabelle 5.8).

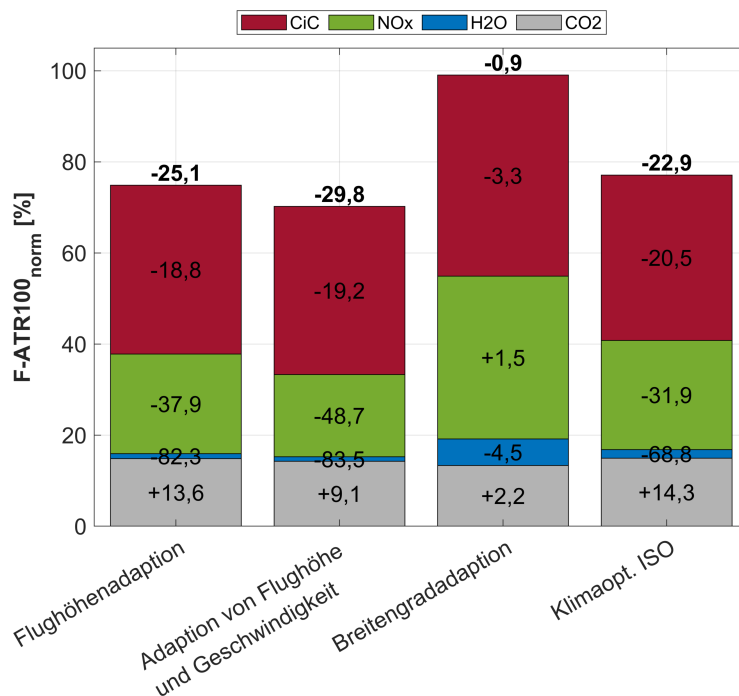


Abbildung 5.11: Normierte Gesamtklimawirkung im Relation zur Referenzmission und Veränderung der Klimawirkung je Spezies für verschiedene Maßnahmen der Fünzig-Missionen-Fallstudie.

Der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb weist die höchsten missionspezifischen Mitigationspotentiale von bis zu 72 % auf, wobei insbesondere Missionen von langer Distanz und geringem Breitengrad hohe Minderungspotentiale versprechen. Im Mittel wird unter den Missionen, bei welchen eine Implementierung des Mehrstufenbetriebs vorteilhaft ist, eine Minderung der Klimawirkung von 30,7 % erreicht, was zu einem Anstieg der Betriebskosten um 11,1 % führt. Im Vergleich zur Flughöhen- und Geschwindigkeitsadaption ist die Anwendbarkeit für gut die Hälfte der betrachteten Missionen (52 %) deutlich geringer, sodass sich für die Gesamtstichprobe eine Klimawirkungsminderung von 22,9 % mit einem Betriebskostenanstieg von 7,5 % ergibt. Damit ist die Maßnahme für die betrachtete Gesamtstichprobe sowohl weniger effektiv als auch weniger effizient im Vergleich zur Flughöhen- und Geschwindigkeitsadaption. Die Verringerung der Klimawirkung erfolgt durch die Reduktion in CiC- und NO_x-Effekten, während die CO₂-Effekte im Vergleich zu den anderen betrachteten Maßnahmen mit 14,3 % am stärksten ansteigen (vgl. Abb. 5.11). Der Betriebskostenanstieg wird sowohl durch die Verlängerung von Reisezeit und Flugdistanz als auch durch den zusätzlichen Kraftstoffverbrauch und Mehrkosten durch die Zwischenlandung hervorgerufen (vgl. Tabelle 5.8).

Eine Analyse der Zusammensetzung der Maßnahmenauswahl zur Minimierung der Klimawirkung über die repräsentative Stichprobe ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Für die Fünzig-Missionen-Stichprobe ergibt sich ein maximales Mitigationspotential von 30,8 %, wobei die direkten Betriebskosten um 8 % ansteigen. Der maximale missionspezifische

Betriebskostenanstieg (*DOC-Penalty*) liegt in dem Fall bei 20 %. Für einen Großteil der Missionen erfolgt eine Flughöhen- und Geschwindigkeitsanpassung (82 %), für die übrigen Missionen (18 %) maximiert die Minderung der Klimawirkung. Berücksichtigt man auch die unterschiedlichen Effizienzen der Maßnahmen, zeigt sich, dass der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb erst ab *DOC-Penalties* von 8 % ausreichend effektiv ist, um den hohen Anstieg in den Betriebskosten zu rechtfertigen. Bei geringeren zulässigen missionspezifischen Betriebskostenanstiegen ist die reine Anpassung der Flughöhe besonders effizient (z. B. reine Flughöhenadaptation in 70 % der Fälle für eine missionspezifische *DOC-Penalty* von 1 %), während bei einem Anstieg der zulässigen *DOC-Penalty* mit der Kombination aus Flughöhen- und Geschwindigkeitsanpassung höhere Mitigationspotentiale erreicht werden. Eine laterale Routenanpassung ist sowohl weniger effektiv als auch weniger effizient als die übrigen betrachteten Maßnahmen und wird deshalb bei der Optimierung des Mitigationspotentials nicht berücksichtigt.

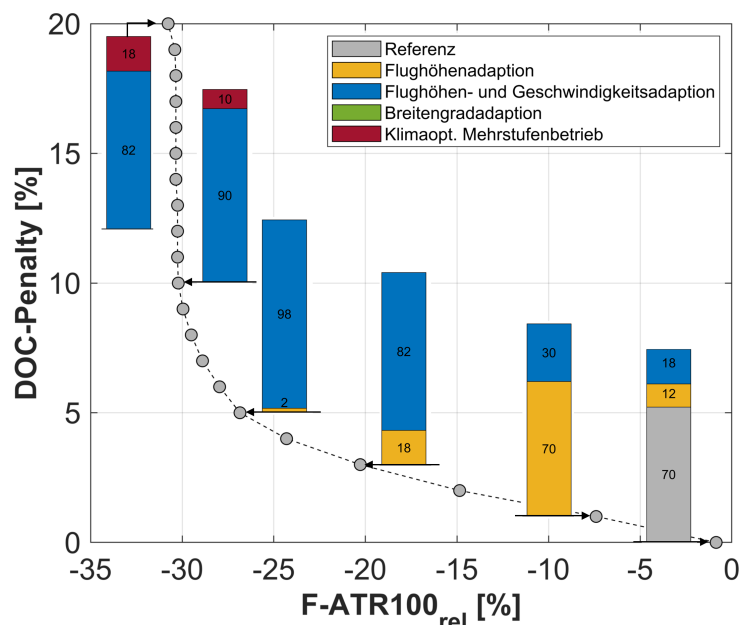


Abbildung 5.12: Kombinierte Paretofront der betrachteten Maßnahmen der Fünfzig-Missionen-Fallstudie (in grau). Die Balken zeigen die prozentualen Anteile der ausgewählten Maßnahmen je Mission für ausgewählte *DOC-Penalties*.

Die Analyse der Fünfzig-Missionen-Stichprobe zeigt große Unterschiede in der Wirksamkeit der einzelnen betrachteten Klimawirkungsminderungsmaßnahmen in Abhängigkeit von den Missionscharakteristika, welche bei der Identifikation der effektivsten Maßnahme zu berücksichtigen sind. Es existiert keine Maßnahme, welche für alle Missionen die beste Lösung darstellt. Stattdessen ist für jede Mission individuell eine besonders effektive oder effiziente Maßnahme auszuwählen. Insgesamt zeigt der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb besonders hohe Potentiale zur Klimawirkungsminderung für lange Flugmissionen, wenn ein sinnvoller Zwischenlandeflughafen zur Verfügung steht. Zusätzliche Reisezeiten, Kraftstoffbedarfe und Kosten für die Zwischenlandung führen allerdings zu einem hohen Anstieg der direkten Betriebskosten. Über die Gesamtstichprobe verspricht die Anpassung von Flughöhe und -geschwindigkeit aufgrund der hohen Anwendbarkeit und des geringeren Betriebskostenanstiegs im Vergleich zum Mehrstufenbetrieb eine hohe Effizienz. Eine sinnvolle Kombination verschiedener Maßnahmen verspricht ein Mitigationspotential von

über 30 % für die betrachtete Stichprobe, was die Effektivität betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung unterstreicht.

Einfluss von Realtrajektorie und Realwettersituation auf den Vergleich

In detaillierten Modellierungen kann der Einfluss der realen Routenführung sowie der tatsächlichen meteorologischen Situation entlang dieser Route betrachtet werden. Die Routenführung weicht aufgrund betrieblicher Einschränkungen häufig signifikant von der direkten lateralen und kraftstoffoptimierten vertikalen Routenführung ab. Auch die tatsächliche Wettersituation variiert bei einer flug- und zeitabhängigen Betrachtung stark. Zur Betrachtung dieser Effekte in Ergänzung zur vorangegangenen Analyse werden im Folgenden ausgewählte Beispielmmissionen im Nordatlantik analysiert.

Die Modellierung der betrachteten Maßnahmen unterscheidet sich aufgrund der Berücksichtigung der tatsächlich geflogenen Routen von der Modellierung in der klimatologischen Betrachtung und wird wie folgt definiert:

- Anpassung der Reise Flughöhe in Kombination mit der Anpassung der Reisefluggeschwindigkeit: Die Reise Flughöhe wird ausgehend von der Hauptflugfläche (*Median flight level, medFL*¹³) zwischen -6.000 und +2.000 Fuß variiert. Darüber hinaus wird die Reiseflugmachzahl in beiden Analysen zwischen -10 % und +2,5 % in 2,5-Prozentschritten im Vergleich zur Referenzmachzahl aus BADA4 variiert. Ohne Geschwindigkeitsanpassung wird die Maßnahme als reine Flughöhenadaptation bezeichnet.
- Laterale Routenadaptation: Die laterale Routenführung wird entlang der tatsächlich geflogenen Route durch eine laterale Verschiebung der tatsächlichen Wegpunkte um $\pm 10^\circ$ modelliert. Diese Anpassung erfolgt erst, sobald die erste konstante Reise Flughöhe erreicht wurde, um An- und Abflugsegmente an den betrachteten Flughäfen nicht zu verändern.
- Mehrstufenbetrieb: Sowohl das kraftstoffoptimierte als auch das klimaoptimierte ISO-Konzept werden auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 5.2.2 definiert, wobei die jeweiligen Flughöhen und Zwischenlandeflughäfen auf Basis der Datenbank für den europäischen Langstreckenverkehr ausgewählt werden.

Zusätzlich wird die direkte, kraftstoffoptimierte Mission modelliert (*Direct routing*), wobei eine Großkreisverbindung zwischen Start- und Zielflughafen und kraftstoffoptimierte *Step climbs* angenommen werden.

Die Referenztrajektorie wird lateral und vertikal durch die tatsächlich geflogene Route auf Basis von Routeninformationen der EUROCONTROL definiert [300]. In diesem Zuge wird die Erweiterung des iTCMs zur Modellierung von realistischen Flugtrajektorien hinsichtlich lateraler sowie vertikaler Routenführung genutzt [242]. Zur Klimabewertung werden aCCFs herangezogen, die den Einfluss der meteorologischen Situation entlang der Trajektorien auf die Klimawirkung berücksichtigen [235, 140, 273]. Für die Analyse wird jeweils ein repräsentativer Winter- und ein repräsentativer Sommertag aus dem Projekt ClimOP ausgewählt (vgl. Tabelle 5.9). Eine Erweiterung der Betrachtung für mehrere Sommer- und Wintertage erfolgt im Anhang B.3 mit dem Fokus auf Routenadaptation.

Der Betrieb entlang einer Großkreismission mit kraftstoffoptimalen Höhen (*Direct Routing*, schwarzes Hexagramm in Abb. 5.13) führt im Vergleich zur tatsächlich geflogenen

¹³Die Hauptflugfläche wird als die Flugfläche definiert, welche in der realen Referenztrajektorie für den größten Anteil der Missionsdistanz gewählt wurde.

	Maßnahmenvergleich bei konsistenten Studienrandbedingungen durch Detailmodellierung (meteorologische Analyse)
Geografischer Umfang	Ausgewählte europäische Langstreckenmissionen
Zeitlicher Umfang	16. Juni 2018 und 11. Dezember 2018 als repräsentative Tage
Flotte	Typische Langstreckenflugzeuge
Meteorologie	Realatmosphäre nach ECMWF ERA5
Referenzmission	Reale Flugtrajektorien gem. EUROCONTROL-Plandaten
Trajektorienrechnung	iTCM (mit BADA4)
Emissionsrechnung	DLR-Kraftstoffflusskorrelationsmethode im iTCM
Klimabewertung	aCCFs (meteorologisch) im iTCM
Klimametrik	F-ATR100

Tabelle 5.9: Randbedingungen der Fallstudie zum Maßnahmenvergleich unter konsistenten Studienrandbedingungen durch detaillierte Modellierung in meteorologischer Betrachtung.

Route in den betrachteten Beispielen zu einer Reduktion der Klimawirkung und einer Erhöhung der Betriebskosten. Unter Berücksichtigung der realen Routenführung und der realistischen Wettersituation zeigt sich für eine Beispielmmission von Amsterdam (EHAM) nach Toronto (CYYZ) mit einer Boeing 777-200, wie sie am 16.6.2018 durchgeführt wurde (Abb. 5.13, links), dass die Reduktion der Flughöhe in Kombination mit einer Verringerung der Geschwindigkeit zu den höchsten Mitigationspotentialen der Betrachtung führt. Eine Reduktion der Flughöhe um 4.000 Fuß sowie eine Reduktion der Geschwindigkeit um 10 % führen zu einer Reduktion der Klimawirkung von etwa 17 % sowie einer Kostenerhöhung von 7 %. Die reine Flughöhenadaptation erweist sich analog zu den Beispielen der klimatologischen Betrachtung mit einer Minderung der Klimawirkung von 13 % bei einer Erhöhung in den direkten Betriebskosten von 2 % als besonders effizient.

Abbildung 5.14 (oben, links) zeigt, wie durch die Verringerung der Flughöhe auf FL300 klimasensitive Bereiche vermieden werden können, eine weitere Reduktion der Flughöhe allerdings wiederum zu einer Erhöhung der Klimasensitivität entlang der Route führt. Im Gegensatz zu den Beispielen der klimatologischen Betrachtung in Abbildung 5.8 ist für diese Mission auch eine laterale Verschiebung der Route zur Verringerung der Klimawirkung geeignet, da so Gebiete von besonders geringer Klimasensitivität durchflogen werden können (vgl. Abb. 5.14 unten, links). Das Mitigationspotential ist hier allerdings gering. Der Mehrstufenbetrieb ist im betrachteten Beispiel sowohl von geringerer Effektivität als auch Effizienz, da in der klimaoptimierten Konfiguration eine Reduktion in F-ATR100 von 0,3 % einer Erhöhung der direkten Betriebskosten von 11,3 % gegenübersteht.

Für eine zweite Beispielroute von Paris (LFPG) nach Boston (KBOS) mit einer Boeing 777-300 vom 12.11.2018 (Abb. 5.13, rechts) ergeben sich im Vergleich zur ersten Beispielmmission insgesamt höhere Potentiale zur Klimawirkungsminderung. Die Reduktion der Flughöhe um 6.000 Fuß in Kombination mit einer Geschwindigkeitsreduktion von 10 % gegenüber der Referenzflughöhe ergibt ein Mitigationspotential von etwa 26 % bei einem Betriebskostenanstieg von 8,7 %. Eine Reduktion der Flughöhe um 2.000 Fuß ohne Geschwindigkeitsanpassung mit einem Mitigationspotential von 13 % reduziert den Anstieg der Betriebskosten auf 1,5 %. Auch hier können geringere Klimasensitivitäten auf niedrigeren Flughöhen gezielt genutzt werden (vgl. Abb. 5.14 oben, rechts). Gleiches gilt für eine Breitengradanpassung, da durch eine Verschiebung der Route in nördlichere Breiten in diesem Beispiel die Klimawirkung ebenfalls reduziert werden kann. Allerdings zeigt sich

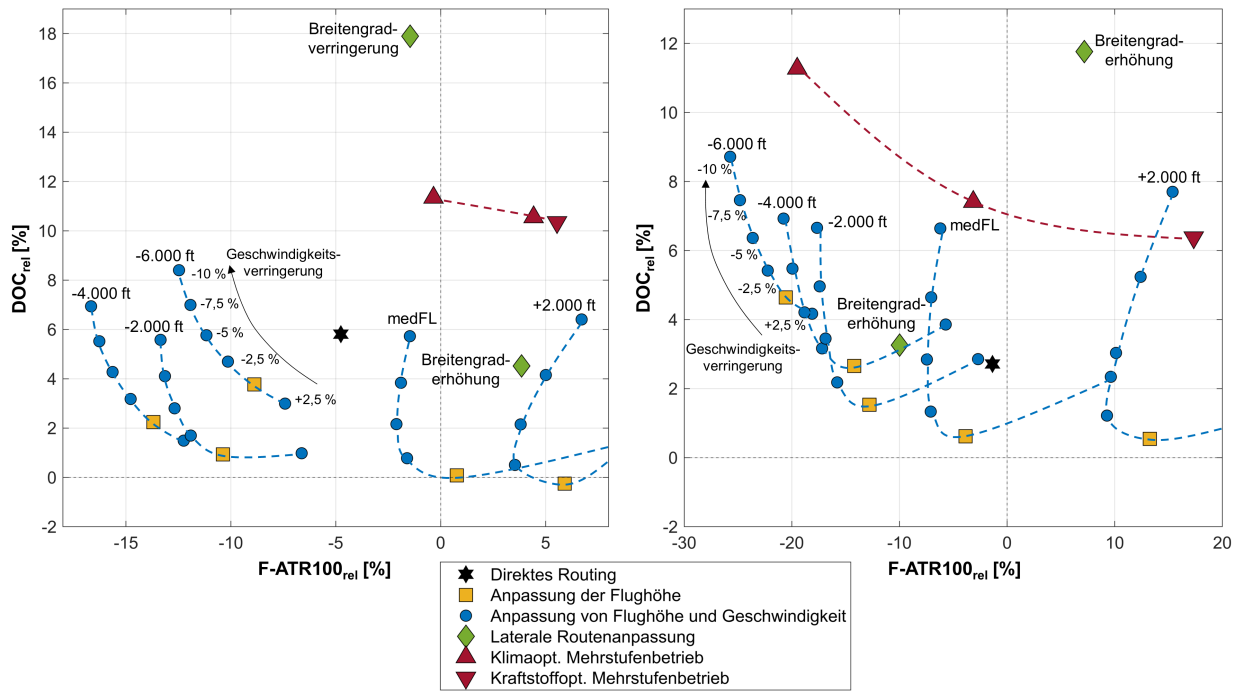


Abbildung 5.13: Ergebnisse des missionsindividuellen Vergleichs für zwei nordatlantische Beispielmissionen unter Berücksichtigung der tatsächlich geflogenen Route und der realen Wettersituation: von EHAM nach CYYZ mit Boeing 777-200 am 16.6.2018 (links) sowie von LFPG nach KBOS mit Boeing 777-300 am 11.12.2018 (rechts).

auch in diesem Beispiel eine geringere Effektivität der lateralen Routenadaptation. Im Gegensatz zur ersten Beispielroute kann für diese Mission auch eine markante Minderung der Klimawirkung durch den klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb erreicht werden. Ein hoher Betriebskostenanstieg (+11 % in DOC) macht diese Maßnahme trotz hoher Mitigationspotentiale (-20 % in F-ATR100) aber im Vergleich zur Flughöhen- und Geschwindigkeitsadaptation weniger effizient.

Die Ergebnisse des Maßnahmenvergleichs sind bei Berücksichtigung der realen Routenföhrung und meteorologischen Situation noch stärker von der Referenzmission abhängig als bei der vorangegangenen klimatologischen Betrachtung. Im Zuge der Betrachtung der realen Wettersituation wurden Ansätze zur vollständigen Trajektorienoptimierung hinsichtlich der Klimawirkung in der Literatur entwickelt [63, 238, 239]. Diese Maßnahmen föhren durch eine Kombination von vertikaler, lateraler und zeitlicher Trajektorienadaptation zu besonders hohen Potentialen in der Klimawirkungsminderung bei vergleichsweise geringem Kraftstoff- und Zeitmehraufwand (vgl. Anhang B.2).

5.4 Generalisierung des Vergleichs von betrieblichen Maßnahmen

Um die Potentiale zur Klimawirkungsminderung der betrachteten Maßnahmen inklusive der Unterschiede in der Anwendungsbreite sowie der Implementierungsreife vergleichen zu können, werden die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.2 und 5.3 mit den Methoden aus Kapitel 4.3 zunächst auf ein europäisches bzw. globales Luftverkehrsszenario generalisiert (Kapitel 5.4.1). Zusätzlich zu den Maßnahmen des Detailvergleichs aus Kapitel 5.3 wird auch der Formationsflug als Maßnahme aus der Literatur dem Vergleich zugeföhrt. Ne-

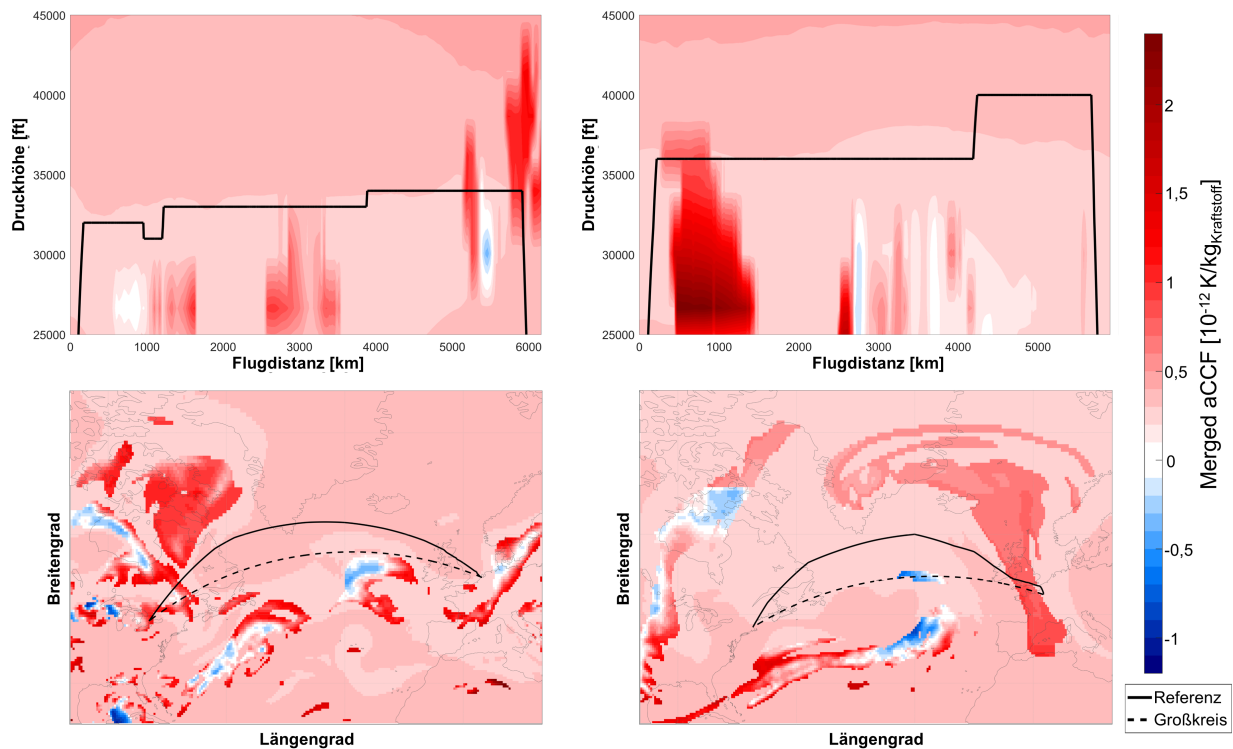


Abbildung 5.14: Klimasensitivität aus aCCFs entlang ausgewählter nordatlantischer Beispielflüge: von EHAM nach CYYZ mit Boeing 777-200 am 16.6.2018 (links) sowie von LFG nach KBOS mit Boeing 777-300 am 11.12.2018 (rechts).

ben den Mitigationspotentialen in Relation zu den Betriebskosten werden im Kapitel 5.4.2 die Wechselwirkungen zwischen den ausgewählten Maßnahmen und den Stakeholdern des Luftverkehrssystems diskutiert. Darauf aufbauend werden abschließend verschiedene Temperaturverläufe in Abhängigkeit des Einführungszeitpunkts der jeweiligen Maßnahme in Kapitel 5.4.3 analysiert, um die unterschiedliche Reife der betrachteten Maßnahmen zu berücksichtigen.

Die Zielgröße der Skalierung ist im Folgenden der Luftverkehr des Jahres 2018 aus der *SABRE MI* Datenbank [296]. Der Fokus wird auf Flüge mit einer Mindestgroßkreisdistanz von 500 km sowie Flüge, die mit den gängigen Airbus- und Boeing-Flugzeugtypen durchgeführt werden, gesetzt. Damit kann eine Reduktion des Flugplans auf 58,1 % der Flüge des Gesamtflugplans erreicht werden, während 90,3 % des Verkehrsvolumens in ASK betrachtet werden. Darüber hinaus werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die maximalen Mitigationspotentialen der verschiedenen Maßnahmen werden betrachtet, ohne den Anstieg in den direkten Betriebskosten zu beschränken. Die Ergebnisse stellen damit Obergrenzen der maximal erreichbaren Mitigationspotentialen für die verschiedenen Maßnahmen dar.
- Für die laterale sowie vertikale Routenadaptation wird von einer vollständigen Anwendbarkeit im gesamten Langstreckenluftverkehr ausgegangen. Als Grundlage für die generalisierte Betrachtung werden der Flugplan und die Ergebnisse aus Kapitel 5.3 verwendet.
- Eine sinnvolle Implementierung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs wird für

Missionen mit einer Mindestgroßkreisdistanz von 2.500 NM angenommen, da ab dieser Distanz ein Vorteil für den Kraftstoffverbrauch durch die geringeren Abflugmassen erzielt wird (vgl. Anhang B.4). Die Grundlage bilden die Ergebnisse aus Kapitel 5.3.

- Eine sinnvolle Implementierung des Formationsflugs wird für 50 % der Missionen mit einer Mindestgroßkreisdistanz von 5.000 km geschätzt [58, 301], wobei die Verteilung der vorteilhaften Formationsdurchführungen gleichmäßig über den Zielflugplan angenommen wird. Die Mitigationspotentiale und Veränderungen in Nicht-Klima-Kennzahlen für die Skalierung basieren auf den Veröffentlichungen von Marks et al. (2021) und Dahlmann et al. (2020)¹⁴ [58, 194].

5.4.1 Vergleich verschiedener Maßnahmen durch Skalierung

Die Ergebnisse der Skalierung sind in Tabelle 5.10 dargestellt. Für eine Implementierung der Maßnahmen im europäischen Luftverkehr zeigt sich analog zu den Ergebnissen der Kapitel 5.2 und 5.3 eine hohe Effektivität des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs, der die Klimawirkung des europäischen Luftverkehrs um 15 % reduziert, während eine Implementierung auf europäischen Routen im globalen Kontext zu einer Reduktion der Klimawirkung um etwa 5 % führt. Allerdings ist auch der Anstieg in den direkten Betriebskosten von ca. 7 % im europäischen Luftverkehr bzw. 2 % in der globalen Betrachtung markant. Im Gegensatz dazu stellt die Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit auch in der skalierten Betrachtung eine effizientere Alternative dar, da einer Reduktion der Klimawirkung von ca. 19 % im europäischen Luftverkehr (ca. 6 % bei globaler Betrachtung) eine Erhöhung in den direkten Betriebskosten von ca. 5 % (ca. 2 % global) gegenübersteht. Eine reine Anpassung der Flughöhe ist besonders effizient, da Mitigationspotentiale von etwa 15 % im europäischen Luftverkehr (5 % global) erreicht werden, während der Anstieg in den Betriebskosten im Vergleich zur kombinierten Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit um etwa die Hälfte reduziert wird. Die laterale Routenanpassung führt nicht zu markanten Mitigationspotentialen. Der Formationsflug zeigt sich in der Skalierung als interessante Alternative, da hier kein Anstieg in den Betriebskosten entsteht. Durch die Reduktion im Kraftstoffverbrauch können die direkten Betriebskosten sogar leicht gesenkt werden und Effekte durch notwendige Umwege zum *Rendez-vous*-Punkt der Formation kompensiert werden. Die geringere Anwendungsbreite des Formationsflugs zeigt, dass trotz vergleichbarer Mitigationspotentiale der Literaturstudie [58] das Mitigationspotential der Maßnahme von 6 % im europäischen Luftverkehr (2,6 % bei globaler Betrachtung) deutlich unter den Potentialen der vertikalen Routenanpassungen und des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs liegt. Vergleichbare Ergebnisse zeigen sich für die Generalisierung der Anwendung der Maßnahmen im globalen Langstreckenverkehr. Die breitere Anwendung im globalen Langstreckenverkehr zeigt einen entsprechenden Anstieg in den Mitigationspotentialen im Vergleich zu einer Beschränkung der Maßnahmenimplementierung auf den europäischen Langstreckenluftverkehr. Auch hier ist der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb effektiv, weist aber mit ca. 10 % ein geringeres Mitigationspotential als die Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit auf (13 %). Die Reduktion der Flughöhe führt zu einer Reduktion der Klimawirkung von etwa 11 %, wobei geringere Veränderungen in den direkten Betriebskosten entstehen.

¹⁴Die Autoren und Autorinnen haben zum Vergleichszweck dieser Arbeit die Detailergebnisse zur Verfügung gestellt, sodass benötigte Kennzahlen wie das Mitigationspotential der Klimawirkung je Emissionsspezies und die Veränderungen in Betriebskosten nachträglich berechnet werden konnten.

Diese aggregierte Betrachtung vernachlässigt allerdings unterschiedliche Effekte in Abhängigkeit von den Missionscharakteristika. Die Analyse der Kapitel 5.2.2 und 5.3 hat beispielsweise ein sehr hohes Mitigationspotential des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs für besonders lange Missionen gezeigt, welche aber nur einen Teil des gesamten Langstreckenluftverkehrs ausmachen. Reduzierte Flughöhen und Geschwindigkeiten führen aufgrund des breiten Anwendungsbereichs somit insgesamt zu höheren Mitigationspotentialen.

Maßnahmenimplementierung im		Europäischen Langstreckenverkehr		Globalen Langstreckenverkehr
	Potential im	Europäischen Luftverkehr	Globalen Luftverkehr	Globalen Luftverkehr
Vertikale Routenanpassung	F-ATR100	-15,4 %	-4,7 %	-10,7 %
	DOC	+2,4 %	+0,8 %	+1,9 %
Adaption von Flughöhe und Geschwindigkeit	F-ATR100	-19,1 %	-5,7 %	-13,0 %
	DOC	+4,9 %	+1,7 %	+3,8 %
Laterale Routenanpassung	F-ATR100	-0,2 %	-0,2 %	-0,4 %
	DOC	+0,5 %	+0,2 %	+0,4 %
Klimaoptimierter Mehrstufenbetrieb	F-ATR100	-15,2 %	-5,1 %	-9,7 %
	DOC	+6,5 %	+2,2 %	+4,2 %
Formationsflug	F-ATR100	-6,3 %	-2,6 %	-4,9%
	DOC	-0,1 %	0,0 %	0,0 %

Tabelle 5.10: Vergleich der relativen Mitigationspotentiale und Veränderung in Betriebskosten durch die Implementierung der betrachteten Maßnahmen im Langstreckenluftverkehr.

Die Mitigationspotentiale der Maßnahmen hängen darüber hinaus stark davon ab, unter welchen Randbedingungen eine Implementierung sinnvoll ist. Gerade der Mehrstufenbetrieb und der Formationsflug erfordern starke Einschnitte in die Prozesse des etablierten Luftverkehrs, sodass die Sensitivitäten der Mitigationspotentiale hinsichtlich des Implementierungsumfangs in Abbildung 5.15 gesondert analysiert werden. Eine Beschränkung des Anstiegs in den direkten Betriebskosten für den klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb je Mission (*DOC-Penalty*) zeigt analog zu Abbildung 5.6 erst eine Reduktion der Klimawirkung ab einem zulässigen Anstieg von 6 % in den DOC. Für eine Beschränkung der missionsindividuellen *DOC-Penalty* auf 10 % ergeben sich global für eine Anwendung im europäischen Langstreckenverkehr Mitigationspotentiale von bis zu 0,5 % (0,9 % für eine Anwendung im globalen Langstreckenverkehr). Im Zuge einer Erhöhung der *DOC-Penalty* beispielsweise auf 20 % steigen die Mitigationspotentiale auf 4,5 % bzw. 8,6 %, liegen damit aber immer noch deutlich unter den Potentialen ohne Kostenbeschränkung (vgl. Abb. 5.15, links) und sind mit einem Gesamtkostenanstieg von 1,8 % bzw. 3,5 % auch weniger effizient als die Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit (vgl. Tabelle 5.10).

Analysiert man die Mitigationspotentiale des Formationsflugs in Abhängigkeit der Missionen, für die sich passende Formationspartner identifizieren lassen, zeigt sich die in Abbildung 5.15 (rechts) dargestellte Abhängigkeit. Die Mitigationspotentiale sowie die direkten Betriebskosten sinken mit dem Anteil der Missionen, für die sich ein passender Formationspartner finden lässt. Unter einer konservativen Annahme von 10 % der Missionen des Gesamtflugplans mit Eignung zur Durchführung einer sinnvollen Formation ergibt sich ein Mitigationspotential von etwa 1 % der globalen Klimawirkung des Luftverkehrs. Der lineare Zusammenhang ergibt sich hier durch die Annahme, dass durch zeitliche Verschiebungen und Netzwerkanpassung immer ein passender Formationspartner identifiziert werden kann.

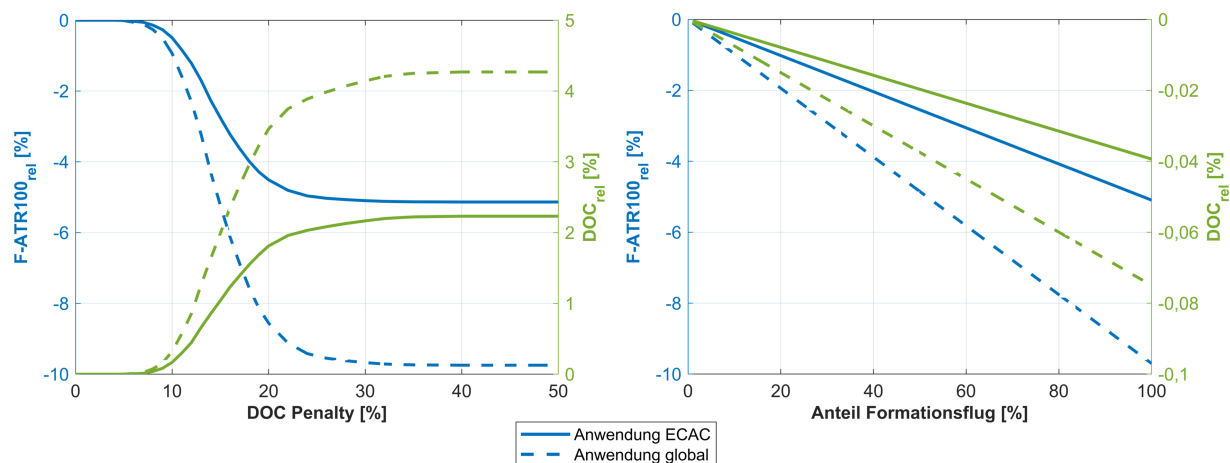


Abbildung 5.15: Sensitivität der globalen Mitigationspotentiale sowie Veränderungen in den direkten Betriebskosten für unterschiedliche missionsindividuelle *DOC-Penalties* des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs (links) sowie unterschiedliche Flugplananteile, für die eine Durchführung des Formationsflugs möglich ist (rechts), bei einer Implementierung im europäischen bzw. globalen Langstreckenverkehr.

5.4.2 Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems

Neben den Unterschieden in den Mitigationspotentialen sowie den Veränderungen der direkten Betriebskosten durch die Anwendung verschiedener Maßnahmen im Langstreckenluftverkehr ergeben sich weitere Unterschiede in den Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems. So stehen nahezu alle Maßnahmen in Wechselwirkung mit den fünf zentralen Stakeholdern des Luftverkehrs: Passagieren, Airlines, Flughäfen, OEMs und ANS (vgl. Abb. 2.8).

Für die Passagiere wird durch den Anstieg der Betriebskosten, der insbesondere für den Mehrstufenbetrieb sowie die Kombination aus Flughöhen- und Geschwindigkeitsanpassung hoch ist, und dem daraus resultierenden Anstieg der Ticketpreise eine geringere Akzeptanz der Maßnahmen erwartet. Höhere Preise können die Reisebereitschaft und somit die Verkehrsnachfrage reduzieren. Darüber hinaus verringern auch längere Reisezeiten die Akzeptanz der Passagiere. Beim Mehrstufenbetrieb reduziert sich darüber hinaus der Reisekomfort der Passagiere durch die Zwischenlandung deutlich. Allerdings zeigt eine Passagierumfrage, die im Kontext des Projekts ClimOP durchgeführt wurde, die Bereitschaft der Passagiere, längere Reisezeiten, höhere Preise und mögliche Zwischenlandungen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in Kauf zu nehmen (vgl. Anhang C).

Für die betreibenden Luftverkehrsgesellschaften stellt der Anstieg der Betriebskosten ein wesentliches Hindernis bei der Maßnahmenimplementierung dar. Gerade der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb ist im Vergleich weniger effizient und auch durch die Adaptation von Flughöhe und Geschwindigkeit steigen die Betriebskosten signifikant an. Darüber hinaus erfordern die längeren Reisezeiten Anpassungen der Umläufe von Flugzeugen und Personal und damit die Berücksichtigung in der Netzwerkplanung [vgl. 302, 173]. Ergänzende Betrachtungen sind in Anhang C zusammengestellt. Im Gegensatz dazu steigen die Betriebskosten beim Formationsflug nicht, da der Kraftstoffverbrauch durch den geringeren Schubbedarf reduziert wird und so eine Implementierung aus ökonomischer Perspektive vorteilhaft wird. Im Kontext der Wirtschaftlichkeit haben verschiedene Analysen in der Litera-

tur Ansätze zur Internalisierung der Klimakosten untersucht [204, 198]. So kann beispielsweise durch die Bepreisung von Nicht-CO₂-Effekten in Ergänzung zu den CO₂-Effekten im EU ETS die Kostendifferenz zwischen klimaoptimierten und kostenoptimierten Missionen reduziert werden. Eine Analyse hinsichtlich der Auswirkung einer Bepreisung von Nicht-CO₂-Effekten auf klimaoptimierte Trajektorien ist im Anhang B.6 dargestellt.

In den Bereichen ANS und ATM ist die Vermeidung klimasensitiver Gebiete durch vertikale oder laterale Routenanpassungen kritisch, da sich die Verkehrsdichte in weniger klimasensitiven Gebieten erhöht und die Lotsenbelastung in den betroffenen Sektoren steigt. Eine Analyse der Veränderung in der Auslastung ist für eine europäische Fallstudie in Anhang C dargestellt. Darüber hinaus ist gerade eine laterale Routenverschiebung in Bereichen mit vorgegebenen *Track*-Systemen, wie dem NATS (*North Atlantic Track System*) oder dem PACOTS (*Pacific Organized Track System*), nur eingeschränkt möglich. Eine klimaoptimierte Definition solcher *Track*-Systeme ermöglicht eine ATM-verträgliche Reduktion der Klimawirkung [vgl. 222]. Durch den Mehrstufenbetrieb steigt außerdem die Auslastung im An- und Abflugmanagement durch die zusätzliche Zwischenlandung an den häufig kleineren Flughäfen. Für den Formationsflug zeigen sich in diesem Bereich besonders große Implementierungshürden, da die robuste Formationsdurchführung koordiniert werden muss.

Flughäfen als bodengebundene Infrastruktur sind durch die Maßnahmen im *En-Route*-Bereich weniger betroffen. Allerdings erhöht der Mehrstufenbetrieb die Auslastung an den Zwischenlandeflughäfen deutlich. Für eine effiziente Durchführung sind darüber hinaus Prozesse zu etablieren, die einen effizienten Tankprozess während der Zwischenlandung sicherstellen.

Die Hersteller von Flugzeugen und Komponenten können ebenfalls von den verschiedenen betrieblichen Maßnahmen betroffen sein, auch wenn die ausgewählten Maßnahmen ohne notwendige technische Weiterentwicklungen implementiert werden können. Der Betrieb von Flugzeugen auf kürzeren Strecken sowie geringeren Flughöhen und –geschwindigkeiten im Vergleich zum Auslegungspunkt bietet weiteres Optimierungspotential im Flugzeugentwurf [vgl. 176, 66]. Für den Formationsflug sind darüber hinaus die entsprechenden Systeme für Kommunikation, Navigation und Überwachung (*Communication, navigation and surveillance, CNS*) zu etablieren, die eine effiziente Durchführung der Formation ermöglichen.

Alles in allem weist die Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems auf. In Kombination mit den hohen Mitigationspotentialen erweist sich diese Maßnahme als besonders effizient. Deutlich größere Implementierungshürden ergeben sich für den Mehrstufenbetrieb und den Formationsflug.

5.4.3 Einfluss des Implementierungszeitpunkts

Um den Einfluss der Maßnahmenreife im Zuge unterschiedlicher Implementierungszeitpunkte berücksichtigen zu können, wird aus den Mitigationspotentialen der verschiedenen Maßnahmen mit dem vereinfachten Ansatz aus Kapitel 4.3 die Temperaturentwicklung über die Zeit in Abhängigkeit von verschiedenen Einführungszeitpunkten abgeschätzt. Grundlage für die Berechnung der verschiedenen Temperaturverläufe sind die Temperaturentwicklung im BAU-Szenario von Grewe et al. (2021) [2] und die globalen Mitigationspotentiale aus Kapitel 5.4.1. Für die Implementierung der Maßnahmen wird in ein realistisches, ein konservatives sowie ein ambitioniertes Szenario hinsichtlich des möglichen Implementierungszeitpunkts der verschiedenen Maßnahmen unterschieden. Für die lateralen Routenanpassungen sowie die Variation von Flughöhe und Geschwindigkeit ist eine zügige Implemen-

tierung möglich, sodass im realistischen Szenario von einer Umsetzung der Maßnahmen in 2030 ausgegangen wird (2025 im ambitionierten und 2040 im konservativen Szenario). Da die Implementierung des Mehrstufenbetriebs durch die Verlängerung der Flugzeiten Anpassungen in den Airline-Netzwerken notwendig macht und die Infrastrukturen für die Zwischenlandung und Betankung an den ISO-Flughäfen entwickelt werden müssen, wird im realistischen Szenario eine Implementierung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs ab 2035 modelliert (2030 im ambitionierten und 2050 im konservativen Szenario). Eine Umsetzung des Formationsflugs im zivilen Luftverkehr erfordert neben den notwendigen Anpassungen von Airline-Netzwerken zur sinnvollen Planung von Formationen weitere Prozessanpassungen u. a. zur Berücksichtigung operationeller Unsicherheiten hinsichtlich der Kraftstoffplanung [59] sowie notwendige Erweiterungen der CNS-Infrastruktur. Folglich wird von einer Implementierung des Formationsflugs im realistischen Szenario im Jahr 2040 ausgegangen (2030 im ambitionierten und 2050 im konservativen Szenario).

Die Temperaturdifferenzen, die durch die Implementierung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehen, sind in Abbildung 5.16 dargestellt, wobei die möglichen Minderungspotentiale zwischen ambitioniertem und konservativem Szenario eingefärbt sind. Auch im Temperaturverlauf bestätigt sich die hohe Effektivität des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs sowie der Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit im Vergleich mit den übrigen Maßnahmen. Die Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit weist im Vergleich zum Mehrstufenbetrieb höhere Temperaturreduktionspotentiale auf, welche neben dem höheren Mitigationspotential auch durch die mögliche frühere Implementierung hervorgerufen werden.

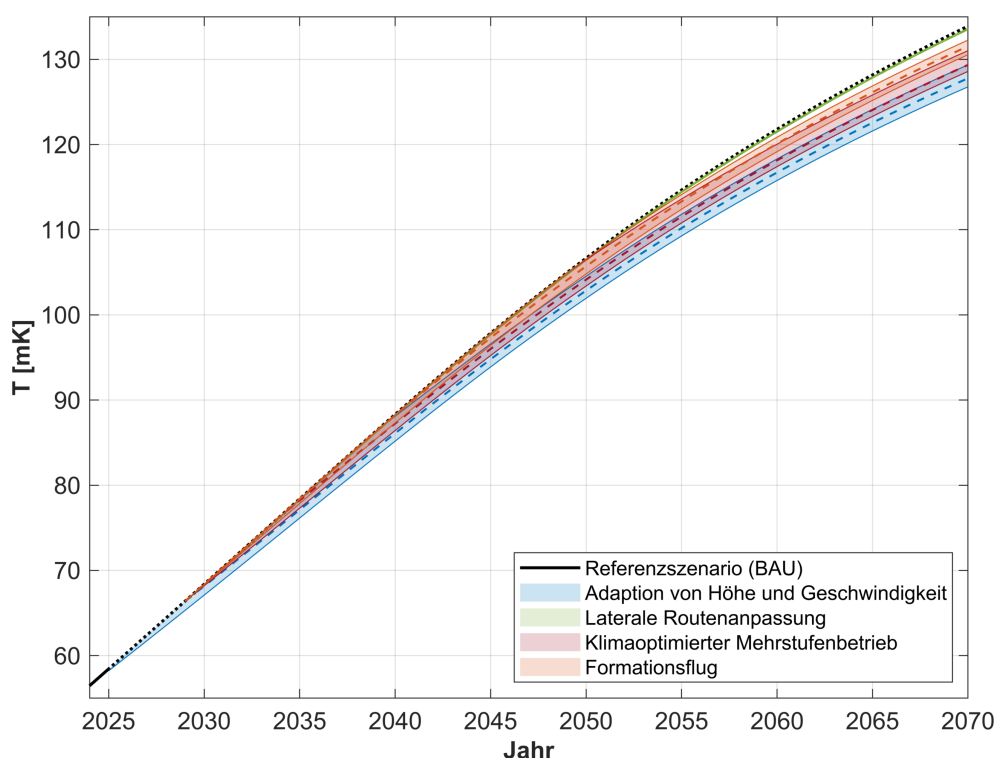


Abbildung 5.16: Einfluss unterschiedlicher Implementierungszeitpunkte für die ausgewählten Maßnahmen auf die Temperaturveränderung durch den Luftverkehr in verschiedenen Szenarien. Die Differenzen zwischen ambitioniertem und konservativem Szenario sind eingefärbt, das realistische Szenario ist durch die gestrichelte Linie markiert.

Die Klimawirkungsminderungen, die realistisch im Jahr 2050 erreicht werden können¹⁵, sind in Abbildung 5.17 dargestellt. Im Vergleich der verschiedenen Implementierungszeiträume und Anwendungsbereiche (europäisch bzw. global) zeigt sich, dass durch eine frühe Implementierung im europäischen Luftverkehr zum Teil höhere Temperaturreduktionen erreicht werden können als bei einer späteren Implementierung für den globalen Luftverkehr. So führt beispielsweise eine Umsetzung von Flughöhen- und -geschwindigkeitsreduktion im europäischen Luftverkehr ab 2025 zu einer höheren Temperaturreduktion im Jahr 2050 (-2,01 mK) als eine globale Implementierung ab 2040 (-1,96 mK). Beim Formationsflug übersteigt eine europäische Implementierung in 2035 (-0,93 mK) bereits die Potentiale einer globalen Implementierung im Jahr 2040 (-0,88 mK).

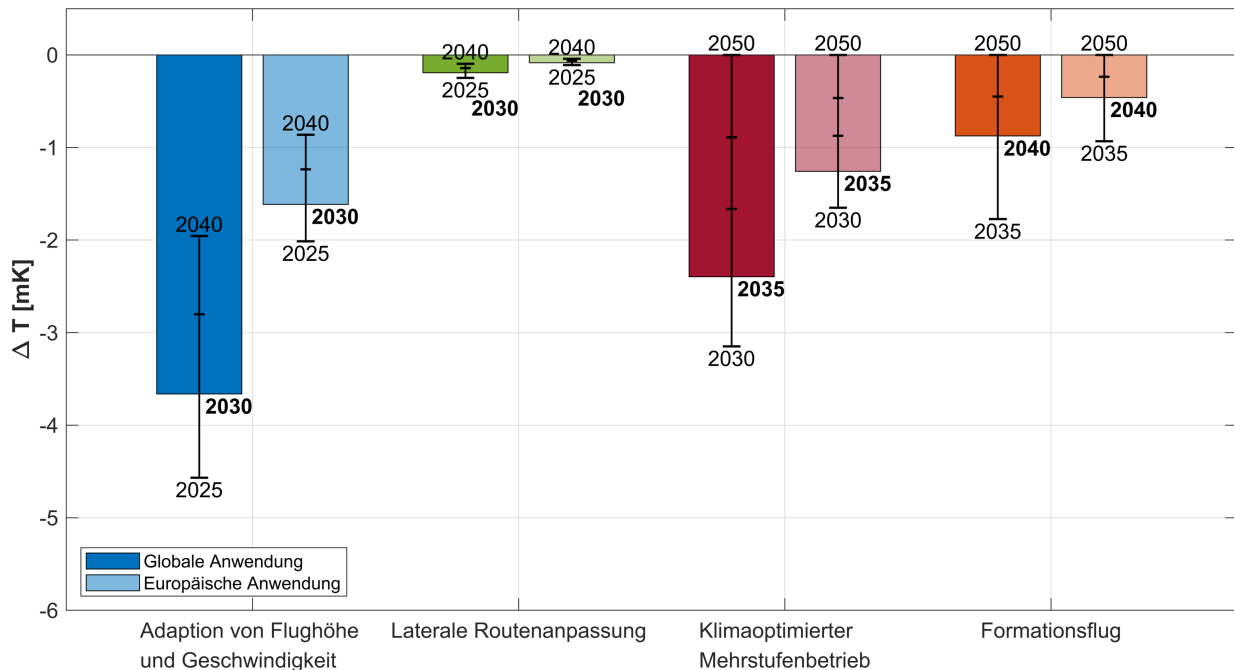


Abbildung 5.17: Einfluss unterschiedlicher Implementierungszeitpunkte für die ausgewählten Maßnahmen zur Reduktion des globalen Temperaturanstiegs durch den Luftverkehr im Jahr 2050.

5.5 Zwischenfazit: Bewertung der Ergebnisse und operationelle Empfehlung

Die Erkenntnisse der Simulationsstudien aus Kapitel 5 können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Analyse der Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit in einer meteorologischen Betrachtung geht über die bisherigen Studien in der Literatur hinaus und zeigt Potentiale zur Klimawirkungsminderung für ausgewählte Sommer- und Wintertage entlang tatsächlich geflogener Trajektorien und unter Berücksichtigung der realen Wetterlage. Bereits für geringe Anstiege in den direkten Betriebskosten je Mission können markante Mitigationspotentiale erreicht werden.

¹⁵Im Jahr 2050 kann realistisch von der Verfügbarkeit signifikanter technologischer Verbesserungen, wie u. a. 70% SAF im europäischen Luftverkehr gem. Re-Fuel-EU [156] ausgegangen werden.

- Die Entwicklung des Konzepts zum klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb ermöglicht die Reduktion der Klimawirkung im Gegensatz zum kraftstoffoptimierten Konzept. Durch die klimaoptimierte Auswahl von Flughöhe und Zwischenlandeflughafen kann eine Steigerung des Mitigationspotentials auch im Vergleich zu einer reinen Flughöhenreduktion erreicht werden.
- Ein missionsindividueller Vergleich verschiedener Maßnahmen zeigt die starke Abhängigkeit der Effektivität und Effizienz von den Charakteristika der Referenzmission, wie der lateralen Ausdehnung, der Missionsdistanz, des gewählten Flugzeugtyps sowie der meteorologischen Situation entlang des Fluges. Keine der untersuchten Maßnahmen ist den übrigen für alle Missionen überlegen. Nichtsdestotrotz zeigen sich hohe Mitigationspotentiale des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs für Missionen langer Distanz (min. 2.500 NM), während die Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit im gesamten Langstreckenverkehr besonders effektiv ist. Eine reine Flughöhenanpassung ist aufgrund der geringeren Kostenanstiege besonders effizient.
- Die Ergebnisse bestätigen sich auch bei einer Ausweitung der Analyse auf eine Anwendung im gesamten europäischen bzw. globalen Langstreckenverkehr mithilfe der entwickelten Skalierungsmethode. Der Formationsflug als zusätzlich betrachtete Maßnahme aus der Literatur weist moderate Mitigationspotentiale auf. Durch Kraftstoffeinsparungen und dem damit ausbleibenden Anstieg in direkten Betriebskosten stellt er aber eine kosteneffiziente Alternative dar. Implementierungszeitraum und Anwendungsumfang der Maßnahmen wirken sich darüber hinaus signifikant auf die Verringerung der Temperaturantwort aus.

Die Umsetzung von reduzierten Flughöhen und Geschwindigkeiten in der kurzen Frist ergibt sich damit als konkrete operationelle Handlungsempfehlung aufgrund der Kombination aus Effektivität und Effizienz sowie der vergleichsweise geringen Nachteile für die Stakeholder. Die mittelfristige Implementierung weiterer unterschiedlicher Maßnahmen in Abhängigkeit von den Missionscharakteristika ist ebenfalls vielversprechend. So kann eine Umsetzung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs auf ausgewählten langen Missionen und unter Berücksichtigung von netzwerkspezifischen Randbedingungen das Mitigationspotential noch erhöhen. Darüber hinaus ist eine frühestmögliche Implementierung der Maßnahmen auch auf kleiner Skala anzustreben, um die Klimawirkung zu minimieren und gleichzeitig Erkenntnisse für die Maßnahmenimplementierung auf größerer Skala zu generieren.

Bei der Interpretation der Ergebnisse sind allerdings die Randbedingungen der Simulationsstudie sowie die auftretenden Unsicherheiten zu berücksichtigen. So sind insbesondere die Unsicherheiten der Modellierung nicht zu vernachlässigen. Während die Trajektorienrechnung unter Verwendung von BADA4-Flugleistungsdaten moderate Ungenauigkeiten für Schub- und Kraftstoffflussberechnungen aufweist, führen die Emissionsberechnungen mit den Kraftstoffflusskorrelationsmethoden bereits zu höheren Unsicherheiten im Vergleich zu detaillierteren Methoden (vgl. Kapitel 4.2). Hohe Unsicherheiten bestehen in der Quantifizierung der Nicht-CO₂-Effekte der Luftfahrt (vgl. Kapitel 2.3), die etwa achtmal höher als die Unsicherheiten bei der Quantifizierung der CO₂-Effekte geschätzt werden [32]. Die betriebliche Minderung der Klimawirkung des Luftverkehrs ist somit stets als Kompromiss zwischen der Betrachtung sicherer CO₂-Effekte und unsicherer Nicht-CO₂-Effekten zu analysieren. Eine detaillierte Beschreibung der Unsicherheiten findet sich im Anhang D.

Weitere Ungenauigkeiten resultieren aus den getroffenen Studienrandbedingungen, wie beispielsweise der Annahme der Großkreisverbindung zwischen Start- und Zielflughafen sowie einer mittleren Wettersituation in der vergleichenden Maßnahmenbewertung in Kapitel 5.3 und 5.4. Die meteorologische Bewertung entlang von Detailtrajektorien zeigt allerdings die starke Abhängigkeit von der tatsächlich geflogenen Referenztrajektorie sowie der meteorologischen Situation entlang der Mission, sodass die effektivste oder effizienteste Lösung für eine bestimmte Mission von den generalisierten Ergebnissen abweichen kann. Darüber hinaus können die gewählten Kennzahlen für die Auswertung mit F-ATR100 als Klimametrik und die Veränderung in DOC als Stakeholder-KPI die Auswirkungen der Maßnahmenimplementierung nur begrenzt beschreiben. Die Analyse alternativer Klimametrien wie p-ATR20 mit einem Fokus auf einen kürzeren Zeithorizont und die Emissionen eines konkreten Fluges ist ebenso interessant wie die Betrachtung weiterer Kennzahlen zur Beschreibung der Stakeholdereffekte (vgl. Anhang B.1 und C). Die Beschränkung auf das Referenzjahr 2018 ist im Kontext der Auswirkungen globaler Krisen auf den Luftverkehr und die Zusammensetzung der Weltflotte ebenfalls bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen (vgl. Anhang B.1).

Nichtsdestotrotz stellen die Ergebnisse in Kapitel 5 einen signifikanten Erkenntnisgewinn gegenüber dem bisherigen Stand der Forschung dar. Durch die relative Betrachtung verschiedener Kennzahlen kann die Unsicherheit in der absoluten Bewertung der Effekte reduziert werden. Die Erhöhung der Vergleichbarkeit, die sowohl für die Detailmodellierung als auch die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Maßnahmen zur Klimawirkungsminde rung erreicht wird, macht die Identifikation besonders effektiver und effizienter Maßnahmen im Vergleich erstmalig möglich.

6 Diskussion und Ausblick

Diese Arbeit stellt eine Methode zum Vergleich verschiedener betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr vor und identifiziert in Abhängigkeit von der jeweiligen Referenzmission besonders effektive und effiziente Maßnahmen. Basierend auf den Ergebnissen in Kapitel 5 und in Relation zu den Forschungszielen aus Kapitel 1.3 werden die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit im Folgenden noch einmal zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Aussagekraft und möglicher Schwachstellen diskutiert (Kapitel 6.1). Anschließend wird in Kapitel 6.2 ein Ausblick auf relevante Forschungsfragen gegeben, die sich an die Erkenntnisse dieser Arbeit sinnvoll anschließen, bevor das Kapitel mit dem Fazit der Arbeit abschließt (Kapitel 6.3).

6.1 Zusammenfassung und Diskussion der Erkenntnisse

Zu Beginn der Arbeit wurden die folgenden Forschungsziele definiert (Kapitel 1.3). Nun wird die Erfüllung dieser Ziele untersucht, um die Zielerreichung der Arbeit sicherzustellen:

- (1) **Strukturierung der existierenden Ansätze in der Literatur hinsichtlich operationeller Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs und Systematisierung der jeweils zugrundeliegenden Annahmen und Bewertungsansätze, sodass besonders interessante Maßnahmen und relevante Randbedingungen für die folgenden Untersuchungen identifiziert werden können.**

Auf Basis einer strukturierten Literaturanalyse in Kapitel 3 wurden einerseits unterschiedliche Ansätze zur Bewertung betrieblicher Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung systematisiert, was als Basis für die Methodik zur Detailbewertung in Kapitel 4 genutzt wurde. Dabei wurden sowohl verschiedene Ansätze für die Trajektorienrechnung (z. B. Unterschiede in den verwendeten Flugleistungsdaten sowie in der Berücksichtigung des Detailgrads der Routenführung, vgl. Abb. 3.7) als auch unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Emissionsflüsse und der Klimawirkung systematisiert. Des Weiteren wurden die Erkenntnisse aus verschiedenen Literaturstudien hinsichtlich Potential zur Klimawirkungsminderung, Untersuchungsstichprobe und Bewertungsannahmen strukturiert (vgl. Abb. 3.9), damit auf dieser Basis besonders interessante Maßnahmen für die folgende quantitative Analyse der Arbeit ausgewählt werden konnten.

Die Maßnahmenauswahl erfolgte unter Berücksichtigung von Mitigationpotential und Implementierungsreife sowie Unterschiedlichkeit der ausgewählten Maßnahmen, sodass (i) die Adaption von Flughöhe und Geschwindigkeit, (ii) eine laterale Routenanpassung, (iii) der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb und (iv) der Formationsflug für die weitere Analyse ausgewählt wurden. So konnte sichergestellt werden, unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Klimawirkung von Flugtrajektorien, wie Emissionsort, Emissionsmenge und Sättigungseffekte der Klimawirkung, im Maßnahmenvergleich zu berücksichtigen (vgl. Tabelle 5.1).

- (2) **Entwicklung einer validierten Methodik zum effizienten Vergleich verschiedener Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs, die sowohl unterschiedliche Definitionen des Referenzfalls als auch**

Unterschiede in den ausgewählten Metriken und Modellierungsannahmen berücksichtigt.

Dafür wurde in Kapitel 4 eine Bewertungsmethode in zwei Schritten aufgesetzt. Erstens wurde eine Modellkette zur detaillierten Modellierung der Mitigationspotentiale sowie der resultierenden Auswirkungen auf die Stakeholder entwickelt. Bereits existierende Modellierungsfähigkeiten wurden insbesondere hinsichtlich der direkten Berücksichtigung von betrieblichen Maßnahmen, der Anbindung weiterer Flugleistungsmodelle, der Modellierung von Detailrouten sowie der Integration von Emissionsrechnung, Klimabewertung und Stakeholder-Effekten ausgebaut. Zweitens wurde eine Skalierungsmethode entwickelt, um Maßnahmen auch ohne detaillierte Modellierung der Mitigationspotentiale vergleichen zu können, wobei Unterschiede im Referenzflugplan sowohl hinsichtlich des Verkehrsumfanges als auch der regional variierenden Klimasensitivität berücksichtigt werden. Eine Anwendung dieser Methode ist insbesondere für die Ergebnisse von Studien sinnvoll, die auf kleineren oder nicht-repräsentativen Stichproben basieren. Die Anwendbarkeit der Maßnahme wurde in Kapitel 5.4 auf Basis von Erkenntnissen aus der Literatur demonstriert. Eine vereinfachte Methode zur Ableitung von Temperaturverläufen kann darüber hinaus die Mitigationspotentiale der verschiedenen Maßnahmen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Implementierungszeitpunkte miteinander vergleichen.

(3) Anwendung der entwickelten Methodik zur Beantwortung der folgenden Forschungsfragen:

- **Welche betrieblichen Verbesserungen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs sind besonders effektiv bzw. effizient?**

Ein Vergleich der im Detail betrachteten Maßnahmen in Kapitel 5.3 zeigt eine hohe Effektivität des innovativen Konzepts des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs für besonders lange Missionen im Langstreckensegment mit Klimawirkungsminderungspotentialen von bis zu 30 %. Effizienter ist im Vergleich die kombinierte Adaption der Flughöhe und Fluggeschwindigkeit, da bei vergleichbarem Mitigationspotential geringere Veränderungen in den direkten Betriebskosten resultieren (7,5 % gegenüber 11,1 %, vgl. Abb. 5.10). Darüber hinaus ist eine Implementierung dieser Maßnahme nahezu im gesamten Langstreckenluftverkehr vorteilhaft zur Klimawirkungsminderung. Eine laterale Routenadaption ist im Vergleich mit den übrigen betrachteten Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr weniger geeignet. Zudem stellt der Formationsflug trotz des insgesamt geringeren Mitigationspotentials im Vergleich ein besonders interessantes Konzept dar, da durch den reduzierten Kraftstoffbedarf keine Erhöhung der direkten Betriebskosten entsteht¹⁶. Der Vergleich zeigt allerdings auch, dass Effektivität und Effizienz der verschiedenen Maßnahmen stark von der Referenzmission abhängen. Es konnte keine Maßnahme identifiziert werden, die für alle untersuchten Missionen besser als die übrigen abschneidet.

- **Welches Mitigationspotential kann durch die Umsetzung von umfassenden betrieblichen Maßnahmen im Luftverkehr realisiert werden?**

Insgesamt zeigen sich Mitigationspotentiale in F-ATR100 von bis zu einem Drit-

¹⁶Der Vorteil entsteht hier durch Kosteneinsparung beim *Follower*, während der Kraftstoffverbrauch für den *Leader* steigt [58]. Folglich wäre die Aufteilung der Ersparnis bei unterschiedlichen Betreibern sinnvoll und im Vorfeld zu regeln.

tel der Gesamtklimawirkung im europäischen Langstreckenverkehr, insbesondere durch die gezielte Kombination von Flughöhen- und Geschwindigkeitsadaption mit dem klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb (vgl. Abb. 5.12). Für die globale Klimawirkung bedeutet eine solche Implementierung ausschließlich im europäischen Raum Minderungspotentiale von bis zu 6 % bzw. bei einer äquivalenten globalen Implementierung von bis zu 13 %. Durch das starke Wachstum des Luftverkehrs im Zeitablauf und die lange Verweildauer von Luftverkehrsemissionen in der Atmosphäre kann durch verschiedene Maßnahmen unter Berücksichtigung realistischer Implementierungszeitpunkte bis 2050 allerdings nur eine Reduktion des Temperaturanstiegs durch die Emissionen des Luftverkehrs im einstelligen Prozentbereich erreicht werden (vgl. Kapitel 5.4).

Die Erfüllung der definierten Forschungsziele und die Interpretation der Ergebnisse sind im Kontext der Einschränkungen der Methode sowie der Studiengestaltung zu bewerten. Für die Diskussion wird hier in erkenntnis- und methodenspezifische Limitierungen unterschieden.

Hinsichtlich der Studienerkenntnisse konnte keine Maßnahme identifiziert werden, die im Vergleich mit den anderen Maßnahmen unabhängig von der jeweiligen Mission überlegen ist. Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit von der jeweiligen Referenzmission hinsichtlich Missionslänge, Flugzeugtyp, geografischer Ausdehnung sowie der meteorologischen Situation, was im durchgeführten Vergleich nur begrenzt analysiert werden konnte. Durch den Anstieg der direkten Betriebskosten sowie weitere Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems ist eine zügige Umsetzung der betrachteten Maßnahmen auf großer Skala in naher Zukunft unrealistisch. Auch der Fokus auf den europäischen Luftverkehr und die Annahme der Übertragbarkeit auf den globalen Luftverkehr führen zu Ungenauigkeiten, da beispielsweise Unterschiede bei der Verfügbarkeit von Zwischenlandeflughäfen für den Mehrstufenbetrieb bestehen. Außerdem wurde in der Analyse das Kurz- und Mittelstreckensegment nicht betrachtet, da hier mittelfristig auch technische Innovationen zu einer signifikanten Reduktion der Klimawirkung im Luftverkehr führen können. Nichtsdestotrotz ist der Anteil dieser Verkehrssegmente an der Gesamtklimawirkung von über 40 % nicht vernachlässigbar und weist charakteristische Unterschiede zum Langstreckenverkehr auf. So sind hier vermutlich Maßnahmen zur vertikalen und lateralen Trajektorienoptimierung besonders vielversprechend, während die Implementierung von Mehrstufenbetrieb und Formationsflug nicht geeignet ist. Darüber hinaus vernachlässigen die Untersuchungen dieser Arbeit das Potential technischer Maßnahmen aufgrund des definierten Untersuchungsraums. Allerdings erscheint auch die Kombination aus technischen und betrieblichen Maßnahmen vielversprechend und ist auf kleiner Skala bereits heute umsetzbar. Auch die weiteren Effekte auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems wurden quantitativ nicht weiter untersucht. Allerdings kann gerade die Integration von betrieblichen Maßnahmen wie dem Mehrstufenbetrieb in die Netzwerkoptimierung von Airlines oder die Berücksichtigung von klimasensitiven Gebieten im Luftverkehrsmanagement helfen, existierende Implementierungshürden abzubauen.

Methodisch ist bei einer Interpretation der Ergebnisse zu beachten, dass in allen Schritten der Bewertungsmethode signifikante Unsicherheiten auftreten (vgl. Anhang D). Im Zuge der Trajektorienrechnung ist u. a. auf die Ungenauigkeiten in den Flugleistungsmodellen und den meteorologischen Kennfeldern sowie auf Vereinfachungen bei der Annahme von Großkreisverbindungen und durchschnittlichen Ladefaktoren hinzuweisen. Auch Vereinfachungen im Rahmen der Kraftstoffflusskorrelationsmethoden sorgen für Ungenauigkeiten, die gerade bei der Abschätzung der NO_x -Emissionen aufgrund der hohen Klimawir-

kung relevant sind. Außerdem unterliegt die Klimabewertung von Nicht-CO₂-Effekten sehr großen Unsicherheiten. Da insbesondere bei betrieblichen Maßnahmen häufig auf eine Reduktion der unsicheren Nicht-CO₂-Effekte abgezielt und im Gegenzug eine Erhöhung der CO₂-Effekte in Kauf genommen wird, spielen die hohen Unsicherheiten bei der Bewertung der Nicht-CO₂-Effekte eine große Rolle. Bei der Anwendung der vereinfachten Methoden zur Skalierung und Szenariobildung steigen darüber hinaus die Unsicherheiten in den Ergebnissen, da u. a. Sättigungseffekte nicht detailliert berücksichtigt werden können. Sofern möglich, sollte eine Detailbewertung der vereinfachten Methode vorgezogen werden, sodass eine Skalierung nur dann zum Einsatz kommt, wenn die Fähigkeiten zur Detailmodellierung nicht vorliegen.

6.2 Ausblick auf weitere Forschungsfragestellungen

Ausgehend von den Erkenntnissen dieser Arbeit ergeben sich weitere Forschungsfragestellungen. Diese können die Hauptpunkte der Diskussion und die Limitationen der durchgeführten Studien zum Teil direkt adressieren.

Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekten im regulatorischen Kontext

Durch eine Erweiterung von Emissionshandels- und Ausgleichssystemen wie dem EU ETS bzw. CORSIA, in welchen bisher ausschließlich CO₂-Emissionen berücksichtigt werden, um Nicht-CO₂-Effekte kann die Implementierung von Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung motiviert werden. In diesem Zuge kann die Abwägung zwischen Mitigationpotential und Kostensteigerung durch die Auswahl einer kostenoptimalen Lösung ersetzt werden.

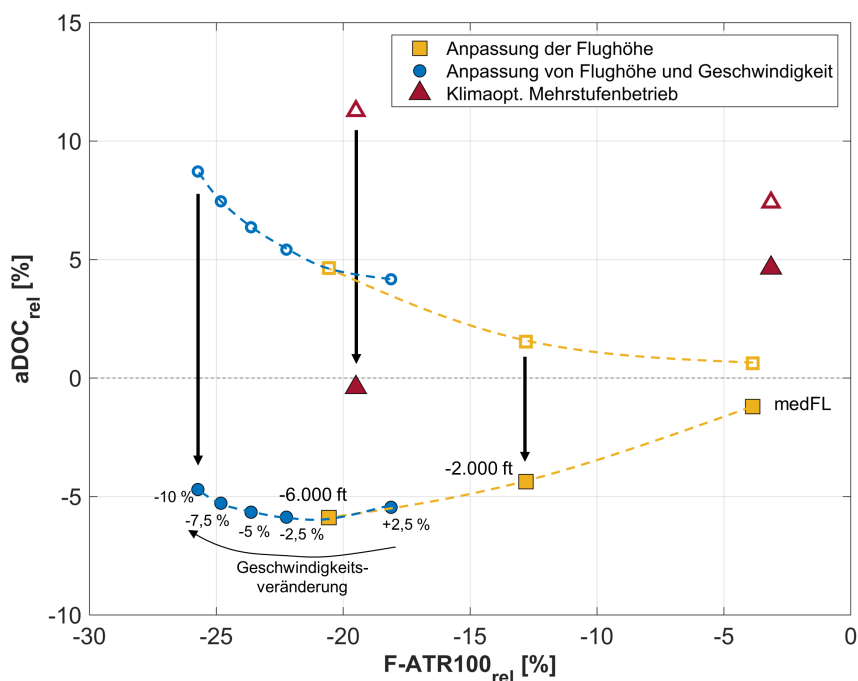


Abbildung 6.1: Veränderung der Effizienz verschiedener betrieblicher Maßnahmen in Relation zum Referenzfall durch die Einführung einer Bepreisung von Nicht-CO₂-Effekten für eine Beispielroute von LFPG nach KBOS am 11.12.2018 (vgl. Abb. 5.13, rechts).

Abbildung 6.1 illustriert beispielhaft die Verschiebung der verschiedenen Maßnahmen im ATR-DOC-Diagramm, wobei die direkten Betriebskosten hier durch die angepassten direkten Betriebskosten (*adjusted DOC*, *aDOC*) ersetzt werden. Dafür wird ein zusätzlicher Kostenterm eingefügt, welcher die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen berücksichtigt, indem zunächst die CO₂-äquivalente Emissionen der Mission bestimmt und anschließend mit einem durchschnittlichen CO₂-Preis von 80 Euro je Tonne bepreist werden [303]. Für ein routenspezifisches Beispiel aus Kapitel 5.3 zeigt sich, dass für einen Großteil der analysierten Maßnahmen eine Reduktion der Klimawirkung mit einer Reduktion in den aDOC einhergeht. Ein Anstieg der aDOC durch die Bepreisung im Referenzfall mit hoher Klimawirkung motiviert eine Reduktion in den Kosten durch die Implementierung betrieblicher Maßnahmen. Eine Abwägung zwischen Effektivität und Kostensteigerung ist nicht mehr notwendig. Die Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit kann für dieses Beispiel als besonders geeignete Maßnahme identifiziert werden [304, 305].

Zusätzliche Untersuchungen zu diesem Konzept sind beispielsweise interessant, um eine generelle Eignung eines solchen Bepreisungsschemas zu bewerten. Die Auswirkungen auf das Luftverkehrssystem durch gesteigerte Preise und höhere Auslastungen in Lufträumen mit geringerer Klimasensitivität erfordern ebenso weitere Analysen, wie die Definition eines sinnvollen Preisschemas und die Entwicklung der für die Umsetzung benötigten Prozesse.

Berücksichtigung von Unsicherheiten bei den Nicht-CO₂-Effekten

Die Quantifizierung der Klimawirkung von Nicht-CO₂-Effekten ist mit deutlich höheren Unsicherheiten behaftet als die Quantifizierung der CO₂-Effekte [32]. Für Maßnahmen, die auf eine Reduktion der Nicht-CO₂-Effekte abzielen und dafür einen Anstieg in CO₂-Effekten in Kauf nehmen, ist dieser Aspekt gesondert zu berücksichtigen. Gerade bei der Vorhersage besonders klimasensitiver Bereiche, die durch Veränderungen der Routenführung vermieden werden sollen (z. B. durch die Anpassung der Flughöhe), ergibt sich bei einer Fehleinschätzung der Nicht-CO₂-Effekte möglicherweise eine nachteilige Maßnahmenimplementierung.

Eine Variation der Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen ist im Detail in Abbildung A.19 (Anhang D) am Beispiel der Fünzig-Missionen-Stichprobe für den Vergleich der verschiedenen Maßnahmen illustriert. Markante Änderungen der Mitigationspotentiale ergeben sich insbesondere bei solchen Maßnahmen, bei denen eine Reduktion der Nicht-CO₂-Effekte ein Anstieg in der CO₂-induzierten Klimawirkung gegenübersteht. Die großen Unsicherheiten in den NO_x- und CiC-Effekten treiben hier die Veränderungen in den Ergebnissen. Analog zu den Erkenntnissen von Dahlmann et al. (2016) zeigt sich aber, dass bei einer relativen Betrachtung der Mitigationspotentiale durch verschiedene Maßnahmen die Unsicherheiten nur moderate Auswirkungen auf den Vergleich haben [116]. Nichtsdestotrotz sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Unsicherheit und die Wahrscheinlichkeit der falsch motivierten Maßnahmenimplementierung zu reduzieren. Interessant ist z. B. eine Untersuchung, ab welcher Gewichtung zwischen CO₂- und Nicht-CO₂-Effekten der Maßnahmenvergleich nicht mehr robust ist. Gerade die Erweiterung meteorologischer Bewertungsmethoden hinsichtlich Unsicherheiten ist nützlich, um Implementierungshürden aufgrund von Unsicherheiten abzubauen.

Bildung von aggregierten Szenarien und Abgleich mit definierten Klimazielen

Aufbauend auf dem Vergleich verschiedener betrieblicher Maßnahmen kann die Bewertung im nächsten Schritt auf weitere Maßnahmen ausgeweitet werden. So ist z. B. die Berücksichtigung nachhaltiger Kraftstoffe interessant, da auch diese in geringen Mengen bereits

heute verfügbar sind und ein rascher Anstieg der Verfügbarkeiten in der EU bis 2050 gefordert wird [156]. Auch die Implementierung innovativer technischer Maßnahmen im Kurzstreckensegment könnte schon vor 2050 Realität werden [306]. Im Zuge einer strategischen *Roadmap* ist dabei insbesondere die Kombination aus verschiedenen Ansätzen zur Klimawirkungsminderung zu berücksichtigen, da sich diese gegenseitig beeinflussen. So kann durch die Nutzung von SAF nicht nur der Netto-CO₂-Effekt reduziert, sondern durch veränderte Charakteristika des Kraftstoffs auch die Klimawirkung von Kondensstreifen verändert werden. Folglich ist bei der Kombination betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung von Kondensstreifen mit einer Nutzung von SAF von abhängigen Effekten auszugehen, sodass die Mitigationspotentiale einzelner Maßnahmen nicht direkt addiert werden können (vgl. ALICIA-Methode des DLR) [307]. Die Kombination unterschiedlicher Maßnahmen aus verschiedenen Segmenten ermöglicht im nächsten Schritt die Berechnung der absoluten Potentiale zur Klimawirkungsminderung im Luftverkehr zu unterschiedlichen Zeitpunkten sowie den Abgleich mit definierten Klima- oder Emissionsminderungszielen. Auf dieser Basis können dann mögliche Lücken identifiziert werden, die durch weitere Maßnahmen zur Zielerreichung zu füllen sind (*Bottom-up-Ansatz*).

Beispielhaft zeigt Abbildung 6.2¹⁷ auf Basis einer semi-quantitativen Analyse der jährlichen CO₂-äquivalenten Emissionen, wie eine mögliche *Roadmap* durch die Kombination verschiedener Maßnahmen aussehen kann. Die frühe mögliche Implementierung von betrieblichen Konzepten unterstreicht deren Relevanz gerade in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts, während für längere Zeithorizonte eine hohe Verfügbarkeit von SAF und technische Innovation zu höheren Einsparpotentialen führen.

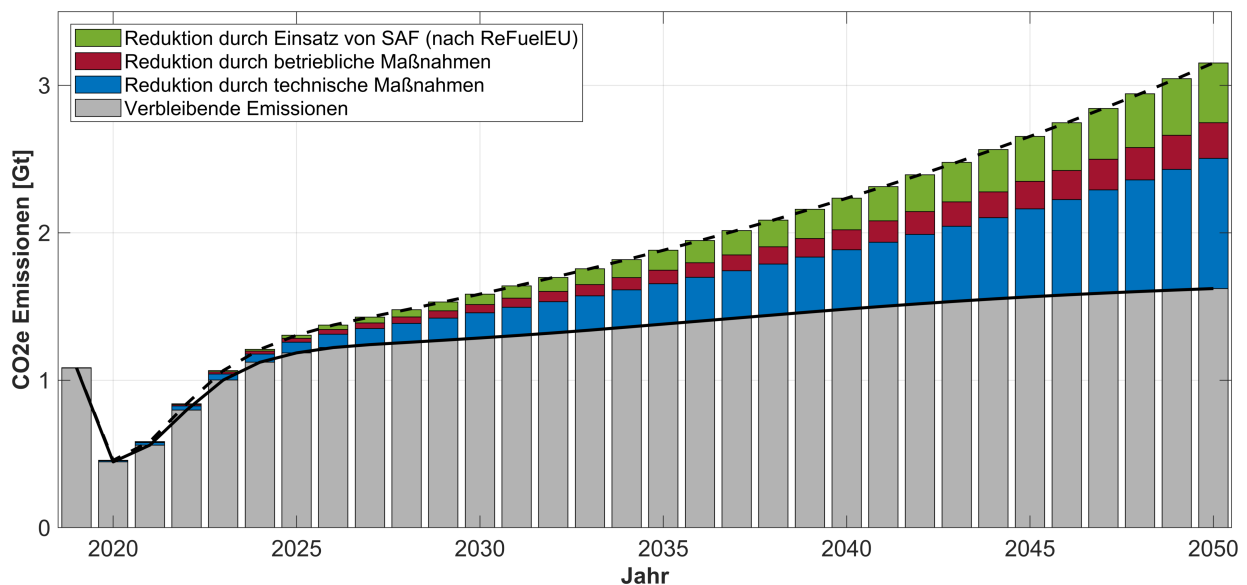


Abbildung 6.2: Kombination verschiedener Maßnahmen zur Minderung der CO₂-äquivalenten Emissionen im zeitlichen Verlauf (vereinfachte Analyse).

Weitere Forschung ist in diesem Kontext u. a. hinsichtlich der Modellierung der Kli-

¹⁷Der Einfluss der folgenden Maßnahmen auf die Netto-CO₂-Entwicklung bis 2050 wurde vereinfacht mit dem *CASCADE*-Modell analysiert [308]: (i) moderate Effizienzsteigerungen im Betrieb, (ii) mittlere Verfügbarkeit von SAF und (iii) moderate Effizienzsteigerungen bei neuen Flugzeugtypen. Das beinhaltet u.a. Flottenüberholungen im konventionellen Bereich sowie die Annahme der Verfügbarkeit von Wasserstoffantrieben ab 2042 und Elektroantrieben im Regional- und Kurzstreckensegment ab 2043.

mawirkung notwendig. Aktuelle Ansätze [vgl. 307, 308] fokussieren CO₂-äquivalente Emissionen im Zeitablauf, wobei unterschiedliche Lebenszeiten von Emissionsspezies in der Atmosphäre und die tatsächliche Veränderung der oberflächennahen Temperatur nicht berücksichtigt werden. Die Analyse der Temperaturantwort ermöglicht darüber hinaus den Abgleich mit industrieübergreifenden Klimazielen, wie beispielsweise dem Abkommen von Paris [2].

6.3 Fazit

Der Luftverkehr trägt durch CO₂- und Nicht-CO₂-Effekte zum menschengemachten Klimawandel bei. Zur Reduktion dieser Klimawirkung sind betriebliche Maßnahmen kurzfristig besonders relevant, da diese ohne technische Weiterentwicklungen der aktuellen Weltflotte direkt implementiert werden können. Obwohl bereits eine Vielzahl von Konzepten zur operationellen Klimawirkungsminderung in der Literatur untersucht wurden, fehlte es bisher an einem quantitativen Vergleich dieser Konzepte, um besonders effektive oder effiziente Maßnahmen für eine Implementierung zu identifizieren.

Die Methode dieser Arbeit sowie die Erkenntnisse aus deren Anwendung zum Vergleich verschiedener betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr erweitern somit den aktuellen Stand der Forschung. Erstmals wird eine Methode entwickelt und angewendet, um einen Vergleich unterschiedlicher Maßnahmen unter identischen Randbedingungen vorzunehmen. Im Zuge der Analyse wird die Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit als besonders geeignete Mitigationsmaßnahme identifiziert. Global kann durch eine umfassende Implementierung im Langstreckenluftverkehr die durchschnittliche Temperaturantwort über 100 Jahre um bis zu 13 % reduzieren werden. Gerade bei besonders langen Missionen erweist sich der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb ebenfalls als sehr effektiv, ist aber aufgrund der deutlich höheren Kostenanstiege weniger effizient als die Flughöhen- und Geschwindigkeitsadaption. Insgesamt zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Potentiale von der jeweiligen Referenzmission, sodass passende Maßnahmen in Abhängigkeit von den Missionscharakteristika auszuwählen sind. Gerade die Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit sollte wegen der hohen Maßnahmenreife zügig implementiert werden, um kurzfristig zur Klimawirkungsminderung beizutragen. Mittelfristig sollte die Implementierung weiterer Maßnahmen im Luftverkehrssystem ermöglicht werden, sodass die Potentiale weiterer effektiver Maßnahmen (z. B. Mehrstufenbetrieb und Formationsflug) realisiert werden können.

Allerdings ist die Reduktion der Klimawirkung für alle betrachteten Maßnahmen mit signifikanten Auswirkungen auf das Luftverkehrssystem verbunden, was unter aktuellen Bedingungen die Umsetzbarkeit beschränkt. Änderungen im Luftverkehrssystem sind folglich notwendig, um die betriebliche Reduktion der Klimawirkung zu ermöglichen. Anpassungen in den regulatorischen Randbedingungen können die Hindernisse zur Umsetzung der betrieblichen Maßnahmen abbauen und die Stakeholder des Luftverkehrs zu einer Umsetzung motivieren. Das gilt insbesondere vor dem Hintergrund aktuell fehlender skalierbarer technischer Innovationen und nachhaltiger Kraftstoffe. Hier ist beispielsweise die Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekten in den Regularien des EU ETS und CORSIA denkbar. Darüber hinaus sind auch infrastrukturelle Verbesserungen auf Seiten des Luftverkehrsmanagements und der Flughäfen vorzusehen, um die Umsetzung prozesseitig zu ermöglichen. Da die Quantifizierung der Klimawirkung und insbesondere der Nicht-CO₂-Effekte noch immer hohen Unsicherheiten unterliegt, ist eine Verbesserung der Modellierungsfähigkeiten notwendig, um falsche Anreize zur Implementierung zu vermeiden.

Anhang

A Das Projekt ClimOP

Die Modellbildung sowie die Durchführung der Studien dieser Arbeit wurden im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts ClimOP (*Climate assessment of innovative mitigation strategies towards operational improvements in aviation*) durchgeführt, welches durch das *Horizon2020*-Programm gefördert wurde. Von Dezember 2020 bis Juni 2023 arbeitete ein internationales Forschungsteam an der Untersuchung und dem Vergleich verschiedener betrieblicher Verbesserungen (*Operational improvements, OIs*) zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr. Das Konsortium setzte sich aus Forschungseinrichtungen, wie dem DLR, welches durch die Institute für Luftverkehr¹⁸ und Physik der Atmosphäre vertreten war, sowie dem NLR (*Netherlands Aersopace Centre*), Universitäten (TU Delft und Technische Universität Istanbul), sowie weiteren Partnern aus dem Luftverkehrssektor (Deep Blue, AMIGO Climate, IATA, SEA) zusammen. Die Arbeit in den drei technischen Arbeitspaketen orientierte sich an der in Abbildung A.1 dargestellten Vorgehensweise.

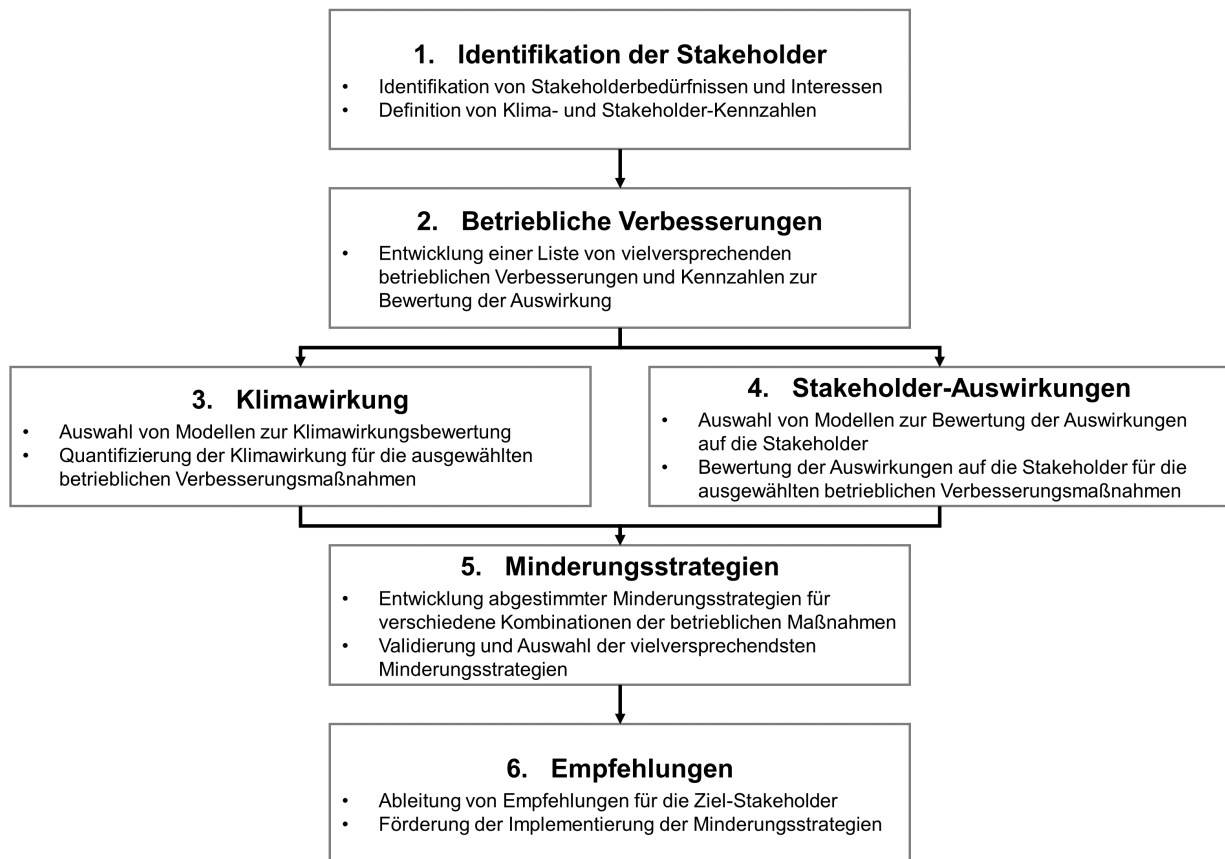


Abbildung A.1: Vorgehensweise im Projekt ClimOP [eigene Darstellung nach 77].

Zunächst wurden die relevanten Interessensgruppen im Luftverkehrssystem definiert, und KPIs zur Beurteilung der Klimawirkung sowie der Auswirkungen auf die Stakeholder

¹⁸Das Institut für Luftverkehr ist aus der Einrichtung für Luftverkehrssysteme hervorgegangen, welches in Kollaboration mit dem Institut für Lufttransportsysteme der TUHH bis zur Neugründung des Instituts ebenfalls an dem Projekt beteiligt war.

durch die Implementierung der OIs systematisiert. Zur Klimabewertung wurde die durchschnittliche Temperaturantwort über 20 und 100 Jahre (ATR20 bzw. ATR100) als relevante KPIs identifiziert. Darüber hinaus wurden die Emissionsmengen der Spezies CO₂, H₂O, NO_x und Partikel für eine weitere Betrachtung ausgewählt. Aus dem Bereich der Nicht-Klima-KPIs wurde der Fokus auf Kraftstoffverbrauch, Flugzyklen pro Zeit, Routeneffizienz, Netzwerkkapazität und -auslastung, Anzahl der Bodenbewegungen, Luftraumkapazitäten, Verkehrsaufkommen am Flughafen, Reisezeit und Passagieraufkommen gesetzt.

Im nächsten Schritt wurde die Literatur hinsichtlich relevanter betrieblicher Verbesserungsmaßnahmen analysiert, sodass besonders interessante und relevante Maßnahmen identifiziert werden konnten. In diesem Zuge wurden die folgenden neun Maßnahmen ausgewählt und in drei Kategorien unterteilt:

- Trajektorienbezogene Maßnahmen:
 - Tiefer und langsamer fliegen (*Flying low and slow, LOSL*)
 - Fliegen im unkonditionierten Luftraum (*Free routing, FREE*)
 - Windoptimierte Routenführung (*Wind-optimized routing, WIND*)
 - Klimaaoptimierte Flugplanung (*Climate-optimized flight planning, CLIM*)
- Netzwerkbezogene Maßnahmen:
 - Strategische Netzwerkplanung durch die Trennung und Zusammenführung von Flügen im optimalen Netzwerkbetrieb mit unterschiedlichen Zielfunktionen (*Strategic network planning, NETW*)
 - Klimaaoptimierter Mehrstufenbetrieb (*Climate-optimized intermediate stop operations, ISOC*)
- Bodenbezogene Maßnahmen:
 - Nachhaltiger Taxi-Betrieb, im Sinne von *Single-Engine-Taxiing* sowie elektrischem oder hybridem Betrieb (*SETX*)
 - Elektrifizierung der bodengebundenen Fahrzeuge (*Electrification of ground vehicles, ELEC*)
 - Aufrüstung der bodengebundenen Infrastruktur auf Basis von Energieeffizienzkriterien (*Upgrade of airport infrastructure, INFR*)

Die Erkenntnisse der Einzelbewertung hinsichtlich Klima- und Stakeholderwirkung sind in Abbildung A.2 zusammengefasst. Der Vergleich der verschiedenen Maßnahmen zeigt die hohe Effizienz der bodengebundenen Maßnahmen, die durch die Einsparung von Energiekosten zu einer Reduktion der Betriebskosten und zu einer Amortisation der notwendigen Investitionen führen. Die hohen relativen Mitigationspotentiale sowie die hohe Implementierungsreife dieser Maßnahmen motivieren eine zügige Umsetzung. Die geringe absolute Klimawirkung des bodengebundenen Betriebs im Vergleich mit dem Flugbetrieb führt allerdings auch zu geringen absoluten Mitigationspotentialen der Klimawirkung. Gerade die Maßnahmen des klimaaoptimierten Mehrstufenbetriebs und der klimaaoptimierten Flugplanung zeigen besonders hohe Potentiale, weisen aber auch eine geringe Reife und negative Auswirkungen auf die Stakeholder auf. Im Gegensatz dazu können Effizienzsteigerungen in der Routenführung, wie sie durch die OIs FREE und WIND modelliert wurden, nicht nur die Klimawirkung, sondern auch die Betriebskosten reduzieren.

Basierend auf der Bewertung der verschiedenen OIs wurden abschließend Minderungsstrategien definiert und auf deren Basis Empfehlungen für das Luftverkehrssystem abgeleitet. Die folgenden drei Strategien wurden dafür im Rahmen des Projekts analysiert [309]:

1. Bepreisung klimasensitiver Gebiete, um die Nicht-CO₂-Effekte entlang von Flugmissionen zu reduzieren
2. Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekten in CORSIA und EU ETS als Erweiterung der aktuellen Betrachtung von CO₂-Effekten
3. Implementierung von Maßnahmen zum nachhaltigen Taxibetrieb

		Klima-Minderungspotential	Stakeholder-Auswirkungen				Reife
			Airlines	Flughäfen	ANS	Passagiere	
Trajektorien	LOSL	●●●○○	--	--	--	--	mittel
	FREE	●●●●○	++	keine Auswirkung	-	+	hoch
	WIND	●●●●○	++	keine Auswirkung	-	+	mittel
	CLIM	●●●●●	-	keine Auswirkung	--	-	niedrig
Netzwerk	NETW	●●●●○	--	keine Auswirkung	keine Auswirkung	-	mittel
	ISOC	●●●●●	---	--	--	--	niedrig
Boden	SETX	●●○○○	-	-	-	keine Auswirkung	hoch
	ELEC	●○○○○	keine Auswirkung	-	keine Auswirkung	keine Auswirkung	hoch
	INFR	●○○○○	keine Auswirkung	-	keine Auswirkung	keine Auswirkung	hoch

Abbildung A.2: Semi-quantitative Zusammenfassung der Maßnahmenbewertung im Projekt ClimOP [eigene Darstellung nach 158].

B Ergänzende Betrachtungen zur Methode und Ergebnissen

B.1 Ergänzungen zur Studiendefinition

Die Ergebnisse der Studien in Kapitel 5 werden wesentlich durch die Randbedingungen des Studiendesigns beeinflusst. Änderungen in diesen Randbedingungen können sich auf die Erkenntnisse auswirken. Im Folgenden werden deshalb die Annahmen zur Studiendefinition hinsichtlich der folgenden Kriterien genauer betrachtet:

- Einfluss der Klimametrik bei der Beurteilung der Mitigationspotentiale
- Annahmen zum Referenzflugplan aus dem Jahr 2018
- Details zur Maßnahmenauswahl

Einfluss der betrachteten Klimametrik

Die Auswahl der Klimametrik beeinflusst das Mitigationspotential durch verschiedene Klimawirkungsminderungsansätze. Beispielhaft ist in Abbildung A.3 der Einfluss der gewählten Metrik auf die regional variiere Klimasensitivität nach aCCFs dargestellt. Durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Zeithorizonte und Emissionsverläufe verschiebt sich das Verhältnis zwischen langlebigen und kurzlebigen Klimaspezies, sodass u. a. der Einfluss von Kondensstreifen im Vergleich zur Klimasensitivität der übrigen Spezies mit zunehmendem Zeithorizont abnimmt.

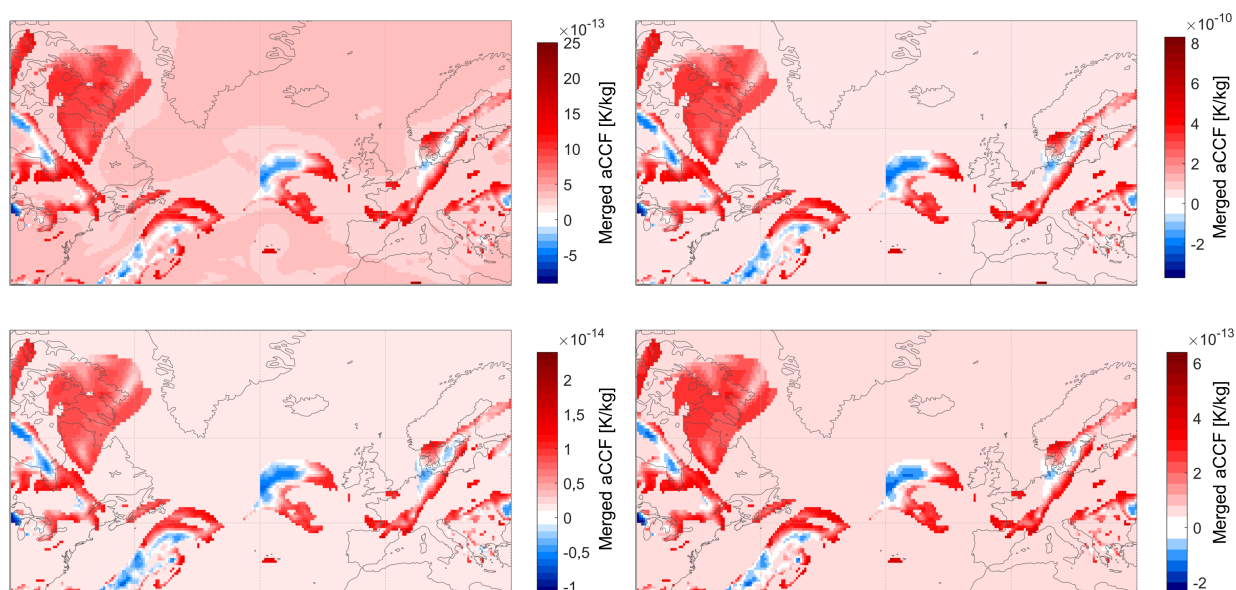


Abbildung A.3: Klimasensitivität aus aCCFs für den Nordatlantik auf einer Druckhöhe von 250 hPa am 16.6.2018, 12:00 Uhr (UTC) mit unterschiedlichen Klimametrik: F-ATR100 (oben, links), F-AGWP100 (oben, rechts), p-ATR100 (unten, links) und p-ATR20 (unten, rechts).

Der Maßnahmenvergleich wird folglich ebenfalls durch die gewählte Klimametrik beeinflusst. Abbildung A.4 stellt die Ergebnisse aus Abbildung 5.13 (links) unter Betrachtung alternativer Klimametrik dar. Die Umrechnung erfolgt dabei speziesbasiert anhand der

Skalierungsfaktoren aus der Literatur [140, 280]. Ein Abgleich zeigt insgesamt höhere Mitigationspotentiale bei der Analyse der Metriken p-ATR20 und F-AGWP100, da diese im Vergleich zu F-ATR100 eine höhere Gewichtung kurzlebiger Nicht-CO₂-Effekte im Vergleich zu langlebigen CO₂-Effekten vornehmen. Da betriebliche Mitigationsmaßnahmen üblicherweise auf eine Reduktion der Nicht-CO₂-Effekte abzielen und eine Erhöhung der CO₂-Effekte in Kauf genommen wird, wirken sich unterschiedliche Gewichtungen der kurz- und langlebigen Effekte folglich auf die Bewertung der einzelnen Maßnahmen aus. Auch wenn die Kombination aus Flughöhen- und Geschwindigkeitsanpassung im dargestellten Beispiel für alle drei betrachteten Metriken das höchste Mitigationspotential aufweist, ergeben sich durch unterschiedliche Klimametriken auch Auswirkungen auf den Maßnahmenvergleich. So führen z. B. die Breitengradverringering und der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb bei Betrachtung von F-AGWP100 zu höheren Mitigationspotentialen als die Reduktion der Flughöhe um 6.000 ft.

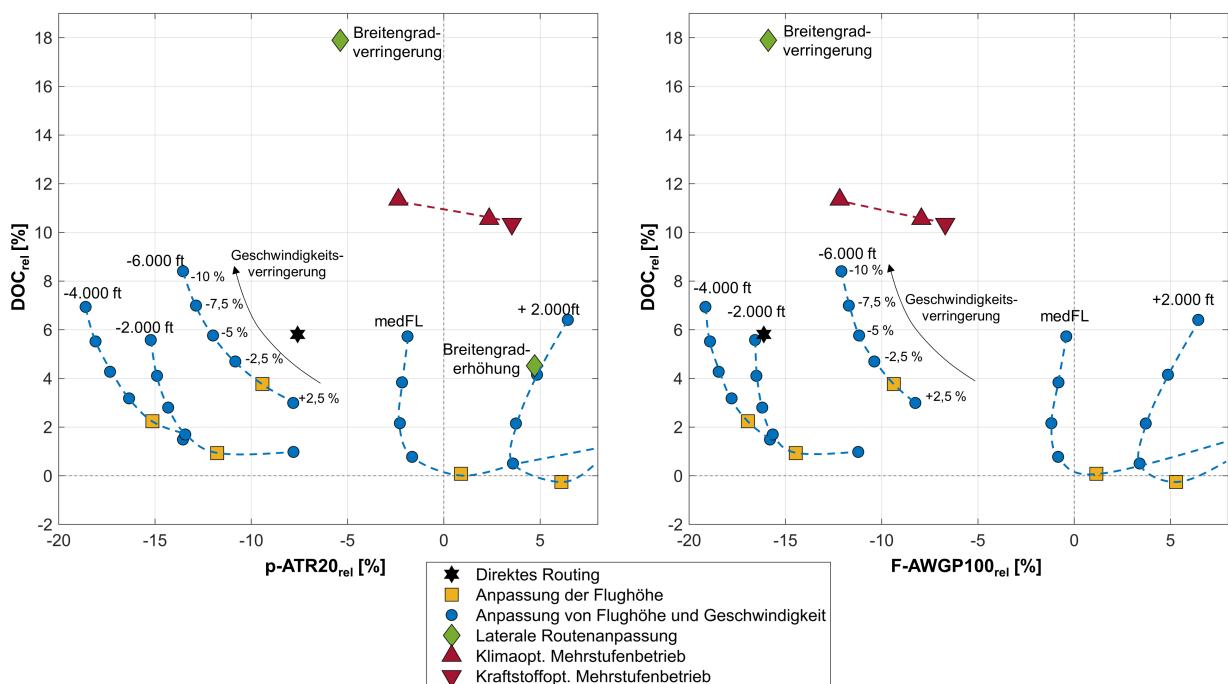


Abbildung A.4: Ergebnisse des missionsindividuellen Vergleichs der Klimawirkung in p-ATR20 (links) und in F-AGWP100 (rechts) für eine ausgewählte Beispielmission von EHAM nach CYYZ (Boeing 777-200) am 16.6.2018.

Änderung des Referenzluftverkehrs durch externe Ereignisse

Auch wenn das langfristige Wachstum des Luftverkehrs langfristig von geopolitischen Ereignissen nur geringfügig beeinflusst wird, können sich solche Ereignisse kurz- und mittelfristig doch stark auf das Luftverkehrsaufkommen auswirken (vgl. Abb. 1.1). Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei aktuelle Ereignisse untersucht, die den Luftverkehr in den letzten Jahren stark beeinflusst haben.

Im Zuge einer studentischen Arbeit von Alakus (2024) wurden die Auswirkungen der **COVID19-Pandemie** auf den Luftverkehr untersucht, welche ab dem Winter 2019/2020 den Luftverkehr u. a. durch Reisebeschränkungen stark beeinflusst hat [310]. Die Analyse

fokussierte dabei sowohl das absolute Luftverkehrsaufkommen als auch Veränderungen in der Weltflotte auf Basis verfügbarer Flugplan- und Flottendaten. Die Studie identifiziert einen markanten Rückgang der Flugbewegungen im Sommer der Jahre 2020 (-56 %) und 2022 (-19 %) im Vergleich zu 2018 (vgl. Tabelle A.1). Darüber hinaus zeigte sich, dass während der Pandemie Langstreckenflugzeuge im Allgemeinen und weniger effiziente Flugzeuge mit vier Triebwerken im Speziellen geparkt wurden. Aufgrund der zunehmenden Nachfrage im Zuge der Aufhebung der Maßnahmen zur Pandemiebekämpfung wurden diese Flugzeuge allerdings entgegen vorheriger Prognosen [311] wieder in Betrieb genommen und nicht endgültig ausgemustert. Eine darauf aufbauende Analyse des Flottenalters zeigte, dass insbesondere ältere Flugzeugtypen im Zuge der Pandemie geparkt wurden, während jüngere Flugzeuge weiter betrieben wurden. Das Durchschnittsalter der Flotte sank im Sommer 2020 auf 9,2 Jahre, im Gegensatz zu einem Durchschnittsalter von 9,9 Jahren im Sommer 2018. Durch den Anstieg des Luftverkehrsaufkommens in den Folgejahren wurden auch ältere Flugzeuge wieder in Betrieb genommen, sodass sich ein Anstieg des Durchschnittsalters auf 10,5 Jahre im Sommer 2022 ergab (vgl. Tabelle A.1). Damit kann darüber hinaus auch die Hypothese einer immer älter werdenden Weltflotte und die Notwendigkeit von betrieblichen Maßnahmen in Ergänzung zu technischen Neuerungen begründet werden [310].

	2020	2022
Flugbewegungen	-55,7 %	-18,6 %
Durchschnittliches Flottenalter	-7,1 %	+6,1 %

Tabelle A.1: Relative Veränderungen des Luftverkehrsaufkommens und des Alters der Weltflotte im Zuge der COVID19-Pandemie für die Sommermonate Juni, Juli und August der Analysejahre 2020 und 2022 im Vergleich zum Referenzjahr 2018 [310].

In einer weiteren studentischen Arbeit von Kumpa (2024) sowie in der Analyse von Zengerling et al. (2025) wurden die Auswirkungen der **russischen Invasion der Ukraine** im Jahr 2022 und die damit einhergehende Sperrung des ukrainischen und russischen Luftraums für eine Stichprobe von 250 Flügen analysiert [312, 248]. Insbesondere durch das Verbot des Durchfliegens des russischen Luftraums im Zuge wirtschaftlicher Sanktionen führt für westliche Airlines zu signifikanten Umwegen auf Flugverbindungen nach Asien, während asiatische Airlines zum Teil sogar von den westlichen Sanktionen profitieren können. Für die betroffenen Betreiber ergeben sich durch die verlängerten Missionsdistanzen ein höherer Kraftstoffverbrauch sowie ein Anstieg in den Emissionsmengen (vgl. Tabelle A.2). Zum Teil ist ein Wechsel des Flugzeugtyps notwendig, da die längeren Missionen mit dem zuvor ausgewählten Flugzeugtyp nicht mehr zurückgelegt werden können. Darüber hinaus ergeben sich auch starke ökonomische Konsequenzen für die betroffenen Airlines. Eine Untersuchung der Klimawirkung mit dem Klimaantwort-Modell AirClim zeigt allerdings, dass durch eine laterale Verlagerung der Flugrouten und damit einhergehende geringere Klimasensitivitäten in niedrigeren Breiten sogar eine Reduktion der Klimawirkung in F-ATR100 erreicht wird (vgl. Tabelle A.2) [312, 248].

Die beiden Analysen mit unterschiedlichem Fokus zeigen trotz des eingeschränkten Untersuchungsraums der Fallstudien, wie sich verschiedene Kriterien des auszuwählenden Referenzluftverkehrs auf die Modellierungsannahmen und folglich auch die Studienergebnisse auswirken können. Die Auswahl des Jahres 2018 als Referenz und die Annahme einer BAU-Entwicklung für die Folgejahre für die Auswertung (Kapitel 5) sind von diesen Faktoren unbeeinflusst und können durch das langfristige Luftverkehrswachstum unabhängig

von geopolitischen Ereignissen (vgl. Abb. 1.1) begründet werden. Nichtsdestotrotz sind Prognosen für die darauf folgenden Jahre sowie die Zukunft stets im Kontext kurz- und mittelfristiger Auswirkungen zu betrachten.

	Westliche Airlines	Asiatische Airlines	Total
Missionsdistanz	+4,0 %	+0,7 %	+2,1 %
Kraftstoffverbrauch	+4,0 %	+0,7 %	+2,1 %
F-ATR100	-2,6 %	-0,4 %	-1,4 %

Tabelle A.2: Veränderungen im Luftverkehr durch die Ukraine-Krise [248].

Maßnahmenauswahl

Für die Auswahl besonders interessanter Maßnahmen für die Bewertung und den Vergleich in Kapitel 5 wird die in Kapitel 5.1.2 definierte Methodik angewendet. Dafür wird im ersten Schritt auf Basis der Literaturanalyse aus Kapitel 3.3 (vgl. Abb. 3.13) eine *Long list* aus in der Literatur untersuchten betrieblichen Maßnahmen des Luftverkehrs erstellt. Dabei können verschiedene Studien zu einer übergeordneten Maßnahme zusammengefasst werden. Über eine Kennung werden die Maßnahmen außerdem direkt den verschiedenen Ansätzen Kraftstoffreduktion (F), bodengebundene Optimierung (G), Emissionsreduktion (E), örtliche (O) sowie zeitliche Klimasensitivitätsverringern (Z) und integrierte Ansätze (X), die mehrere Faktoren adressieren, zugeordnet (vgl. Abb. A.5).

Im Zuge einer ersten Maßnahmenauswahl wird durch **Muss-Kriterien** die Einhaltung der definierten Studienrandbedingungen sichergestellt, sodass auch im Zuge des ClimOP-Projekts untersuchte Maßnahmen (vgl. Kapitel A) wie die Klimaoptimierung von Airline-Netzwerken oder bodengebundene Maßnahmen aussortiert werden. Im nächsten Schritt werden die verbleibenden Maßnahmen hinsichtlich der definierten **Wertungskriterien** semi-quantitativ mit Werten zwischen 1 und 5 bepunktet. Auf Basis einer Gewichtung, die Anwendbarkeit und das Mitigationspotential höher als die Aspekte der kommerziellen und sicheren Realisierbarkeit sowie der Maßnahmenreife gewichtet, werden besonders vielversprechende Maßnahmen identifiziert. In der anschließenden **Ähnlichkeitsanalyse** wird paarweise die Ähnlichkeit zwischen den verbleibenden Maßnahmen nach der Filterung durch die Muss-Kriterien qualitativ in starke, mittlere, geringe sowie keine Ähnlichkeit kategorisiert (vgl. Abb. A.6). Für die abschließende Maßnahmenauswahl wird dann ein Ranking auf Basis der Wertungskriterien erstellt und ausgehend von dem höchsten Ranking dann absteigend auf Basis der Ähnlichkeit der nächsten auszuwählenden Maßnahme mit den bereits ausgewählten Maßnahmen entschieden, ob diese in der Analyse berücksichtigt wird (vgl. A.7).

Kennung	Maßnahmen Beschreibung	Musskriterien (Y/N)			Wertungskriterien: $W_{total} = \frac{1}{35} (2 \cdot W_1 + 2 \cdot W_2 + W_3 + W_4 + W_5)$					Gesamt Score
		Wirksamkeit im en-route Bereich	Keine technischen Anpassungen nötig	Flugspezifische Wirkung der Maßnahme	W1. Anwendbarkeit	W2. Klimaminderungs-potential	W3. Realisierbarkeit (kommerziell)	W4. Realisierbarkeit (sichere Prozesse)	W5. Reife der Maßnahme	
F1	Gewichtsreduktion(z.B. Gepäckbeschränkungen)	1	0	1	5	1	4	5	5	0,00
F2	Mehrstufenbetrieb	1	1	1	3	1	2	2	3	0,51
F3	Luftbetankung	1	1	1	2	1	2	1	1	0,29
F4	Geschwindigkeitsreduktion	1	1	1	5	2	2	3	4	0,63
F5	Schuboptimierung (Verringerung am ToC)	1	1	1	5	1	5	3	4	0,69
F6	Optimierte Climbs/Descents (CDO/CCO)	1	1	1	5	1	5	3	5	0,71
F7	Optimierung des Routings (direkt/wind-optimal)	1	1	1	5	2	5	4	4	0,77
G1	Nachhaltiger Taxi-Betrieb (z.B. elektrisch)	0	0	0	5	2	3	5	4	0,00
E1	Emissionsoptimale Flughöhen bzw. emissionsoptimale Routenführung	1	1	1	5	2	4	4	3	0,71
O1	Reduktion der Flughöhe	1	1	1	5	3	2	4	4	0,74
O2	Veränderung der Flughöhen zur Vermeidung von Kondensstreifen- bzw. klimasensitiven Gebieten	1	1	1	5	4	3	4	2	0,77
O3	Generelle Vermeidung von Kondensstreifen- bzw. klimasensitiven Gebieten	1	1	1	5	4	3	4	2	0,77
O4	Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit	1	1	1	5	4	3	4	4	0,83
O5	Laterale Routenanpassung	1	1	1	5	2	3	3	4	0,69
Z1	Vermeidung nächtlicher Kondensstreifen	1	1	1	3	3	3	4	2	0,60
X1	Klimaoptimierte Trajektorien	1	1	1	5	5	3	4	2	0,83
X2	Airline-Netzwerkoptimierung	1	1	0	5	2	4	5	3	0,00
X3	Formationsflug	1	1	1	3	3	3	2	3	0,57
X4	Klimaoptimierter Mehrstufenbetrieb	1	1	1	3	4	2	2	4	0,63
X5	Netzwerkänderung unter Berücksichtigung von ISO	1	1	0	3	3	3	5	3	0,00

Abbildung A.5: Bewertung betrieblicher Maßnahmen aus der Literatur hinsichtlich ausgewählter Muss- und Wertungskriterien aus Kapitel 5.1.2.

	F2	F3	F4	F5	F6	F8	E1	O1	O2	O3	O4	O5	Z1	X1	X3	X4
F2	Mehrstufenbetrieb	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
F3	Luftbetankung	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
F4	Geschwindigkeitsreduktion	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
F5	Schuboptimierung (Verringerung am ToC)	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
F6	Optimierte Climbs/Descents (CDO/CCO)	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
F8	Optimierung des Routings (direkt/wind-optimal)	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
E1	Emissionsoptimale Flughöhen bzw. emissionsoptimale Routenführung	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
O1	Reduktion der Flughöhe	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
O2	Veränderung der Flughöhen zur Vermeidung von Kondensstreifen- bzw. klimasensitiven Gebieten	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
O3	Generelle Vermeidung von Kondensstreifen- bzw. klimasensitiven Gebieten	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
O4	Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
O5	Laterale Routenanpassung	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
Z1	Vermeidung nächtlicher Kondensstreifen	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
X1	Klimaoptimierte Trajektorien	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
X3	Formationsflug	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
X4	Klimaoptimierter Mehrstufenbetrieb	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange

Starke Ähnlichkeit
Mittlere Ähnlichkeit
Gleiche Wirk-Kategorie
Keine Ähnlichkeit

Abbildung A.6: Bewertung der Ähnlichkeit ausgewählter betrieblicher Maßnahmen.

Kennung	Maßnahmen Beschreibung	Musskriterien (Y/N)			Wertungskriterien					Gesamt Score	Ähnlichkeitsanalyse (mit vorherigen ausgewählten Maßnahmen)	Auswahl
		Wirksamkeit im en-route Bereich	Keine technischen Anpassungen nötig	Flugspezifische Wirkung der Maßnahme	W1. Anwendbarkeit	W2. Klimaminderungspotential	W3. Realisierbarkeit (kommerziell)	W4. Realisierbarkeit (sichere Prozesse)	W5. Reife der Maßnahme			
O4	Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit	1	1	1	5	4	3	4	4	0,83	1. Maßnahme	D, M
X1	Klimaoptimierte Trajektorien	1	1	1	5	5	3	4	2	0,83	hoch	
F7	Optimierung des Routings (direkt/wind-optimal)	1	1	1	5	2	5	4	4	0,77	hoch	
O2	Veränderung der Flughöhen zur Vermeidung von Kondensstreifen- bzw. klimasensitiven Gebieten	1	1	1	5	4	3	4	2	0,77	hoch	
O3	Generelle Vermeidung von Kondensstreifen- bzw. klimasensitiven Gebieten	1	1	1	5	4	3	4	2	0,77	hoch	
O1	Reduktion der Flughöhe	1	1	1	5	3	2	4	4	0,74	hoch	
F6	Optimierte Climbs/Descents (CDO/CCO)	1	1	1	5	1	5	3	5	0,71	mittel	
E1	Emissionsoptimale Flughöhen bzw. emissionsoptimale Routenführung	1	1	1	5	2	4	4	3	0,71	mittel	
F5	Schuboptimierung (Verringerung am ToC)	1	1	1	5	1	5	3	4	0,69	mittel	
O5	Laterale Routenanpassung	1	1	1	5	2	3	3	4	0,69	gering	M
F4	Geschwindigkeitsreduktion	1	1	1	5	2	2	3	4	0,66	hoch	
X4	Klimaoptimierter Mehrstufenbetrieb	1	1	1	3	4	2	2	4	0,63	gering	D, M
Z1	Vermeidung nächtlicher Kondensstreifen	1	1	1	3	3	3	4	2	0,60	hoch	
X3	Formationsflug	1	1	1	3	3	3	2	3	0,57	gering	L
F2	Mehrstufenbetrieb	1	1	1	3	1	2	2	3	0,43	hoch	
F3	Luftbetankung	1	1	1	2	1	2	1	1	0,29	hoch	

Abbildung A.7: Auswahl der Maßnahmen für die weitere Betrachtung nach den Kriterien aus Kapitel 5.1.2.

B.2 Ansätze zur Trajektorienoptimierung

Neben der Anpassung von Flugtrajektorien in vorgegebener vertikaler, lateraler und zeitlicher Dimension besteht auch die Möglichkeit der integrierten Trajektorienoptimierung hinsichtlich unterschiedlicher Zielfunktionen, wie Klimawirkung, Kraftstoffverbrauch oder Kosten. Mit dem *Trajectory Optimization Module (TOM)* bzw. der Weiterentwicklung *TOM in python (pyTOM)* kann eine solche Optimierung unter Berücksichtigung realistischer meteorologischer Bedingungen durchgeführt werden [63, 238, 313]. Gerade im Zuge der Klimaoptimierung kann mithilfe von aCCFs (vgl. Kapitel 4.2.3) das Potential klimaoptimierter Trajektorien für die folgende Zielfunktion bestimmt werden:

$$J = c_{clim} \cdot \frac{\int_{t_0}^t aCCF_{merged}(\varphi, \lambda, H, t) \cdot \dot{m}_{fuel}(t) dt}{ATR_{ref}} + c_{SOC} \cdot \frac{c_t \cdot (t - t_0) + c_f \cdot \int_{t_0}^t \dot{m}_{fuel}(t) dt}{SOC_{ref}} \quad (\text{A.1})$$

mit $c_{clim}, c_{SOC} \in [0, 1]$ und $c_{clim} + c_{SOC} = 1$

Dabei wird die Trajektorienoptimierung stets als Kompromiss zwischen ökologischer und ökonomischer Betrachtung angesehen, was über die entsprechenden Gewichtungsfaktoren c_{clim} für die Klimawirkungsminderung und c_{SOC} für die vereinfachten Betriebskosten abgebildet wird. Die Randbedingungen der Optimierung ergeben sich dynamisch durch die Bewegungsgleichungen auf Basis des Gesamtenergieansatzes im TCM (Kapitel 4.2.1) und die Berechnung des Kraftstoffflusses $\dot{m}_{fuel}(t)$ auf Basis des Flugzustands und des flugzeugspezifischen Flugleistungsmodells. Die Optimierung der Flugtrajektorie wird letztlich in Abhängigkeit der Zustandsvariablen Längengrad λ , Breitengrad φ , Höhe h , Fluggeschwindigkeit v_{TAS} und Flugzeugmasse m beschrieben. Als Steuerungsvariablen werden der Steuerekurs χ_h , die Beschleunigung \dot{v}_{TAS} und der relative Schub Th_{rel} definiert [63].

Die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt in TOM mithilfe eines Optimalsteuerungsansatzes (*Optimal control*), wobei zeitliche Veränderungen in den Zustandsvariablen durch die Steuerungsvariablen hervorgerufen werden können. Unter Berücksichtigung der verschiedenen dynamischen Randbedingungen kann die Zielfunktion in Formel A.1 mithilfe des Solvers GPOPS-II in ein diskretes nichtlineares Optimierungsmodell übersetzt und anschließend gelöst werden [63, 314]. Im Zuge der Erweiterung pyTOM wurde der Optimalsteuerungsansatz durch eine vorgeschaltete graphbasierte Optimierung ergänzt, um Robustheit und Effizienz des Modells zu steigern. Die Lösung entlang eines Graphen mithilfe eines Θ^* -Algorithmus wird als Anfangslösung für den Optimalsteuerungsansatz genutzt [315, 313]. Dadurch können sowohl die Rechengeschwindigkeit als auch die Robustheit der Optimierung erhöht werden.

Alternative Modelle anderer Forschungseinrichtungen zur Berechnung klimaoptimierter Trajektorien sind z. B. ROOST bzw. ROC [239, 316] und AirTraf [210, 317].

Im Projekt ClimOP wurde in Ergänzung zu den im Detail betrachteten Maßnahmen dieser Arbeit auch das Potential zur Minderung der Klimawirkung durch Trajektorienoptimierung untersucht. Das Ergebnis für eine nordatlantische Beispielmision von Shannon (EINN) nach New York (KJFK) ist in Abbildung A.13 visualisiert. Durch die gezielte Nutzung von räumlich und zeitlich variierenden Klimasensitivitäten in der Atmosphäre ergibt sich z. B. ein Mitigationpotential von 9 % in F-ATR20 für eine Kostenerhöhung von 3

% im Vergleich zur kostenoptimalen Routenführung. Im Vergleich zur tatsächlich geflogenen Referenzmission dieses Tages erhöht sich das Mitigationspotential auf 11 % (+1 % in DOC). Die kraftstoffoptimale Routenführung führt in diesem Beispiel zu einer Reduktion der Klimawirkung von 2 % (-1 % in DOC) im Vergleich zur tatsächlich geflogenen Referenzmission [158, 242].

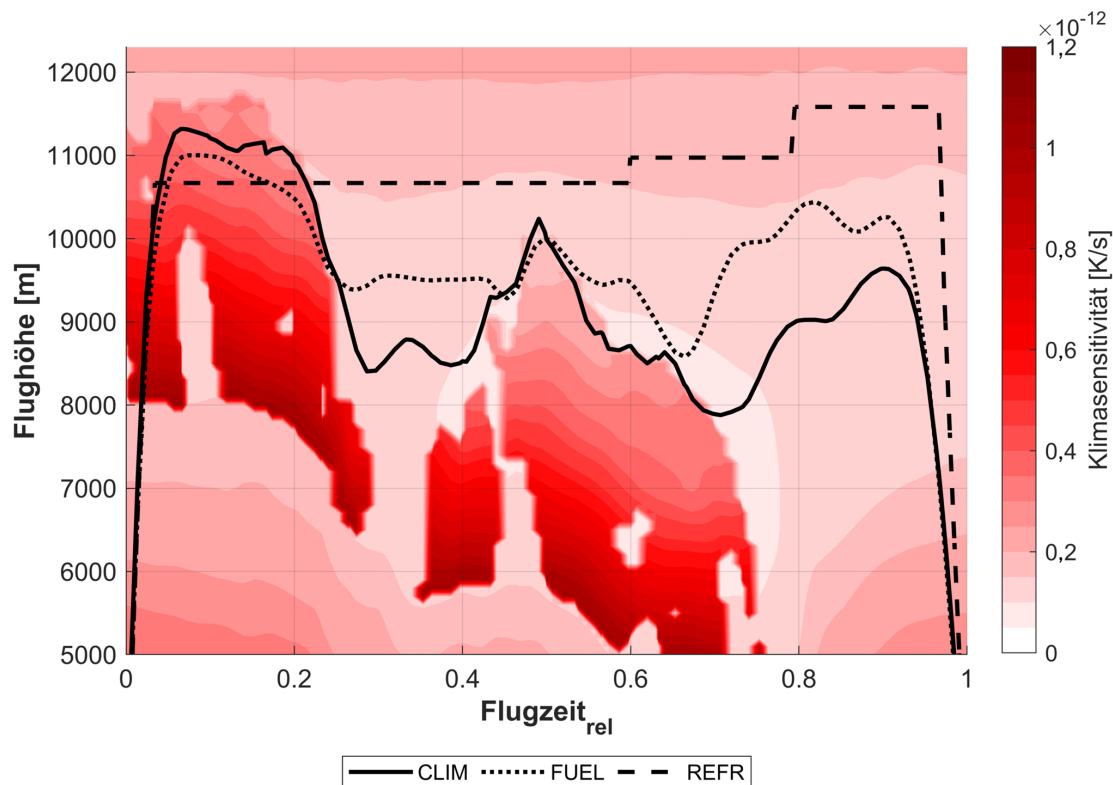


Abbildung A.8: Trajektorienoptimierung hinsichtlich Klimawirkung (CLIM) und Kraftstoffverbrauch (FUEL) für eine Beispielroute von EINN nach KJFK mit einer Boeing 777-300ER im Vergleich zur tatsächlich geflogenen Referenztrajektorie (REFR) vom 11.12.2018 [eigene Darstellung nach 242].

Bei der Trajektorienoptimierung können durch die integrierte Betrachtung verschiedener Aspekte der Klimawirkungsminderung hohe Mitigationspotentiale erreicht werden, wobei die Effektivität auch hier stark von der meteorologischen Situation entlang der Referenztrajektorie abhängt und bei kondensstreifenintensiven Missionen besonders hoch ist [63, 238]. Andererseits ist eine direkte Realisierung dieser klimaoptimierten Missionen durch die stetigen Höhen- und Geschwindigkeitsänderungen sehr unwahrscheinlich, sodass die Ergebnisse eher als eine obere Grenze für die betrieblich erreichbaren Mitigationspotentiale angesehen werden können. Eine Erweiterung der Trajektorienoptimierung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Luftraumstruktur ist darüber hinaus notwendig [239].

B.3 Vergleich verschiedener Routenadaptionen im Kontext variierender Meteorologie

Aufbauend auf den Erkenntnissen in Kapitel 5.3 zum Einfluss unterschiedlicher meteorologischer Bedingungen auf betriebliche Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen meteorologischer Situation und der Effektivität

verschiedener Maßnahmen zur Routenadaptation untersucht. Zengerling et al. (2024) untersuchen kleinskalige vertikale, laterale und zeitliche Trajektorienadaptationen zur Vermeidung besonders klimasensitiver Gebiete in Abhängigkeit von den tatsächlichen meteorologischen Bedingungen entlang der untersuchten Referenztrajektorien im Nordatlantik für ausgewählte Analysetage im Sommer und Winter 2018 [318]. Die Trajektorien- und Emissionsrechnung erfolgt mit dem iTCM (vgl. Kapitel 4.2.1 und 4.2.2) und die Abschätzung mithilfe von Klimasensitivitätskatastern auf Basis von aCCFs (vgl. Kapitel 4.2.3), die sowohl in stündlicher Auflösung für die Jahre 2018 bis 2023 als auch in monatlichen Mittelwerten für den gleichen Zeitraum vorliegen [225]. Als Klimametrik wird F-ATR50 als Kompromiss zwischen kurz- und langlebigen Effekten gewählt [318].

Auch diese Untersuchungen bestätigen die starke Abhängigkeit des Mitigationspotentials von der Wettersituation entlang der Trajektorie. Abbildung A.9 stellt beispielhaft das Mitigationspotential durch vertikale Trajektorienanpassung im Vergleich zur Zusammensetzung der Klimawirkung der einzelnen Spezies für eine Beispielmision von London Gatwick (EGKK) nach New York (KJFK) im Juni und Dezember 2018 dar. Es zeigt sich, dass die Klimawirkung der Spezies CO_2 , H_2O und NO_x bei Annahme einer identischen Routenführung nur geringfügig über die verschiedenen Tage und meteorologischen Situationen variiert. Im Gegensatz dazu schwankt die Klimawirkung durch CiC stark über die verschiedenen Tage und Monate. Gleichzeitig variiert auch das Mitigationspotential durch die vertikale Routenadaptation stark zwischen den verschiedenen Tagen. Für einzelne Tage mit hoher kondensstreifeninduzierter Klimawirkung (13. Juni, 22. und 29. Dezember 2018) ergeben sich auch hohe Mitigationspotentiale, allerdings bestätigt sich dieser Zusammenhang nicht für den gesamten Analysezeitraum [318].

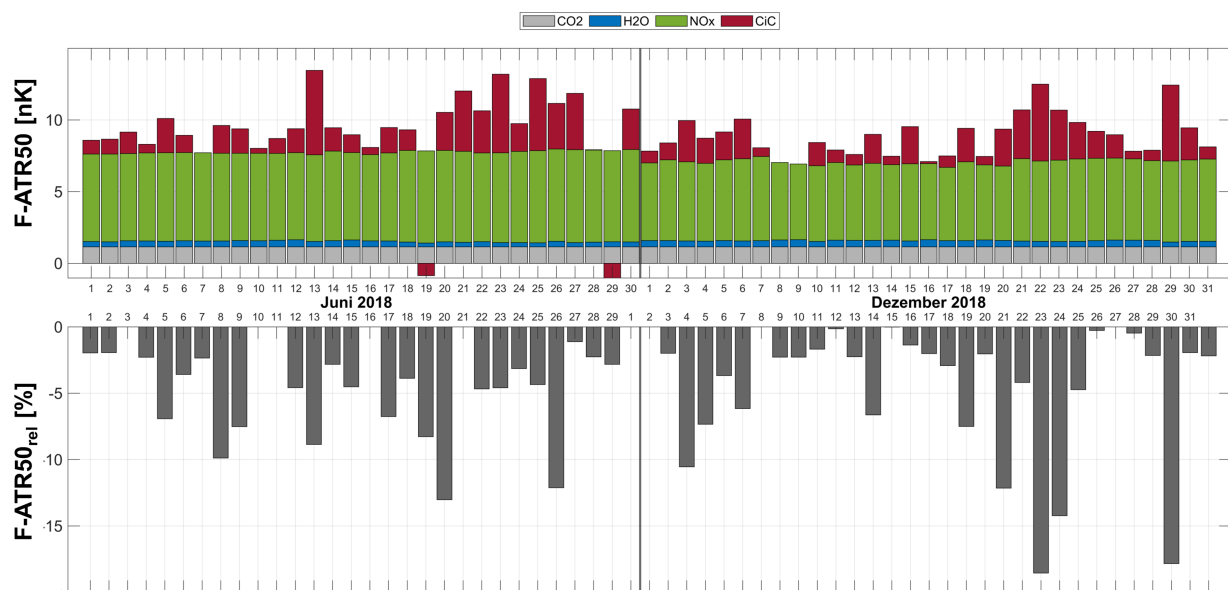


Abbildung A.9: Klimawirkung je Spezies entlang der Referenztrajektorie (oben) sowie Mitigationspotential durch kleinskalige vertikale Trajektorienverschiebung (unten) für eine Beispielmision von EGKK nach KJFK im Juni und Dezember 2018 [eigene Darstellung nach 318].

Eine Erweiterung der Analyse auf eine größere Routenstichprobe bestätigt die starke Streuung des Mitigationspotentials, einen Anstieg des durchschnittlichen Mitigationspotentials mit dem relativen Anteil der Klimawirkung durch CiC der Referenzmission sowie ein

höheres Mitigationspotential im Dezember gegenüber Juni [318].

Insgesamt ergeben sich durch die Trajektorienadaptionen unter Berücksichtigung der tatsächlichen Wettersituation Mitigationspotentiale von durchschnittlich 9,5 % im Juni und 15,1 % im Dezember 2018. Während im Juni laterale Trajektorienanpassungen besonders vielversprechend sind (höchste Klimawirkungsminderung in 24 % der Fälle) erweist sich im Dezember die Anpassung der Flughöhe als besonders geeignet (höchste Klimawirkungsminderung in 25 % der Fälle). Verfolgt man statt der Betrachtung der detaillierten meteorologischen Situation entlang der Flugtrajektorien (taktischer Ansatz) einen strategischen Ansatz durch die Berücksichtigung einer durchschnittlichen Wettersituation, ergeben sich deutlich geringere Mitigationspotentiale und durch die starke Streuung der tatsächlichen Wettersituation auch die Möglichkeit der Fehlincitivierung von Trajektorienadaptionen [318].

B.4 Erläuterungen zum klimaoptimierten Mehrstufenbetrieb

In Kapitel 5.2.2 wird in Ergänzung zum kraftstoffoptimalen Mehrstufenbetrieb das Konzept des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs eingeführt. Hier kann zusätzlich zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs mithilfe einer Zwischenlandung durch eine Anpassung der Flughöhe und die klimaoptimierte Auswahl des Zwischenlandeflughafens auch die Klimawirkung reduziert werden. Im Folgenden finden sich ergänzende Betrachtungen zum in Kapitel 5 vorgestellten Konzept hinsichtlich:

- der Definition der Missionscharakteristika für die Konzeptbewertung,
- einer Sensitivitätsanalyse zur Erweiterung des Konzepts auf mehr als eine Zwischenlandung, sowie
- einer Sensitivitätsanalyse zur Erweiterung des Konzepts mit einer ISO-optimierten Flugzeugflotte.

Definition der Missionscharakteristika für die Konzeptbewertung

Zur Konzeptdefinition und -bewertung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs werden im Folgenden zunächst die Randbedingungen der Analyse erläutert. Dabei beschränkt sich die Bewertung auf Missionen mit einer Mindestgroßkreisdistanz sowie auf eine reduzierte Anzahl an möglichen Zwischenlandeflughäfen, die anhand von Umweg- (*Detour factor*) und Versatzfaktor (*Offset factor*) bestimmt werden [223].

Erstens beschränkt sich die Betrachtung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs auf solche Flugrouten, welche eine Großkreisdistanz $d_{GC,OD}$ zwischen Start- (*Origin airport, O*) und Zielflughafen (*Destination airport, D*) von mindestens 2.500 NM aufweisen [223]. Die Auswahl der Mindestdistanz basiert auf vergleichbaren Werten in anderen Ansätzen in der Literatur zum kraftstoffoptimierten Mehrstufenbetrieb [vgl. 52, 188]. Darüber hinaus kann die Auswahl anhand der RedEmPs (vgl. Kapitel 4.2.2) begründet werden: Abbildung A.10 illustriert die Kraftstoffverbräuche aus den reduzierten Emissionsprofilen für verschiedene ausgewählte Langstreckenflugzeugmodelle in Abhängigkeit von der Missionsdistanz für die ununterbrochene Referenzmission (*Non-stop*) sowie die ISO-Mission, welche sich aus zwei gleich langen Teilmissionen zusammensetzt. Je nach Flugzeug führt der Mehrstufenbetrieb ab einer Missionsdistanz zwischen 2.500 und 3.300 NM zu einer Kraftstoffeinsparung.

Bei der Auswahl der Zwischenlandeflughäfen werden auf Basis einer globalen Flughafendatenbank *ourairports.com* verfügbare Flughäfen ausgewählt, wobei die Betrachtung

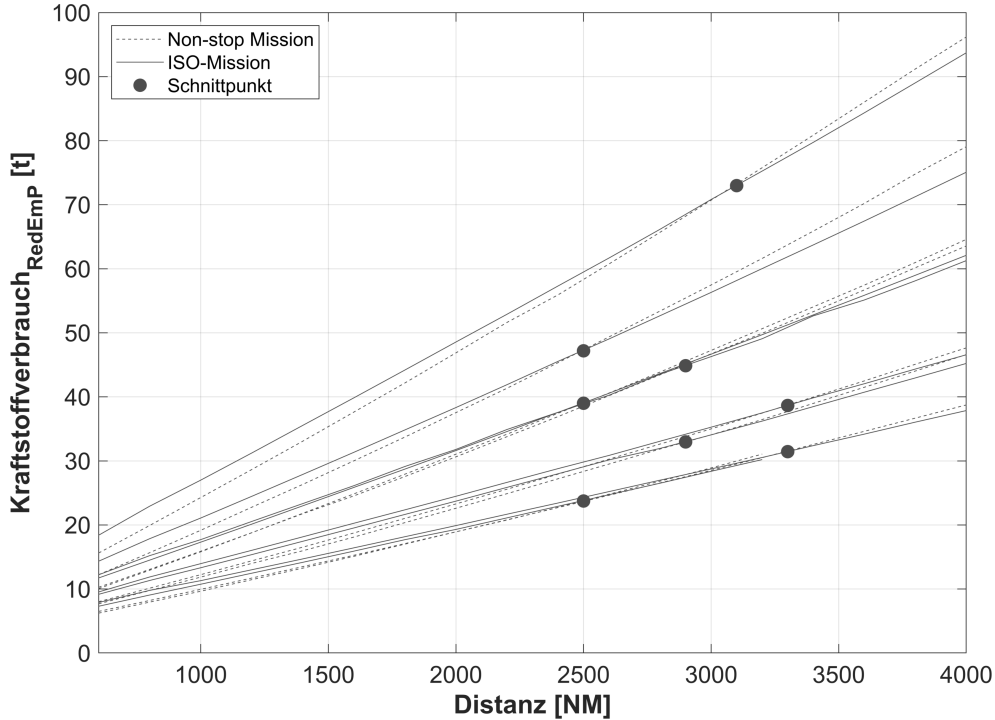


Abbildung A.10: Bestimmung der Mindestdistanz im Mehrstufenbetrieb.

auf solche Flughäfen beschränkt wird, durch die sich die Distanz der ISO-Mission nicht um mehr als 20 % im Vergleich zur Referenzmission verlängert. Der Umwegfaktor f_{detour} ergibt sich dabei aus der Distanz der ISO-Mission mit Zwischenlandflughafen S nach Formel A.2 [223].

$$f_{detour} = \frac{\overline{OS} + \overline{SD}}{\overline{OD}} \leq 1,2 \quad (\text{A.2})$$

Darüber hinaus wird die Exzentrizität, die durch den Zwischenlandflughafen zwischen beiden Teilmissionen entsteht, derart beschränkt, dass die längere der beiden entstehenden Teilstrecken maximal dreimal so lang ist wie die kürzere der beiden Teilstrecken. Der Versatzfaktor f_{offset} wird gem. Formel A.3 beschränkt [223].

$$f_{offset} = \frac{\max(\overline{OS}, \overline{SD})}{\overline{OD}} \leq 0,75 \quad (\text{A.3})$$

Um die Anzahl an möglichen ISO-Flughäfen weiter zu reduzieren, wird lediglich ein repräsentativer Flughafen pro Gitterzelle (charakterisiert durch Längen- und Breitengrad) ausgewählt. Dafür werden 30° mal 30° große Gitterzellen auf globaler Skala definiert. In der nördlichen Hemisphäre zwischen 30° und 60° Nord, in welcher ein Großteil des globalen Langstreckenverkehrs stattfindet, wird darüber hinaus eine höhere Auflösung von 15° mal 15° definiert. Von den verfügbaren Flughäfen innerhalb einer Gitterzelle wird dann der potentielle ISO-Flughafen ausgewählt, der mit dem kleinsten Umwegfaktor assoziiert ist. Durch dieses Vorgehen kann der Umfang der zu berücksichtigenden Zwischenlandflughäfen von 163 auf etwa 10 Flughäfen pro Mission reduziert werden [223].

Abbildung A.11 illustriert das Vorgehen für eine Beispielmision von Abu Dhabi (OMAA) nach London Heathrow (EGLL) mit einem Airbus A380. Die Abbildung zeigt alle theoretisch verfügbaren Zwischenlandflughäfen gemäß Umweg- und Versatzfaktor mit der relati-

ven Änderung der Klimawirkung in F-ATR100, die durch eine Zwischenlandung an diesem Flughafen im Vergleich zum klimaoptimalen Zwischenlandeflughafen entsteht. Durch die Reduktion der Stichprobe wird die Anzahl an betrachteten Zwischenlandeflughäfen von 426 auf 6 verringert und somit die Recheneffizienz deutlich erhöht. Durch diese Vereinfachung ergeben sich Abweichungen zwischen dem klimaoptimalen Zwischenlandeflughafen und dem für die Analyse verfügbaren klimaoptimierten Zwischenlandeflughafen. Allerdings liegt in diesem Beispiel eine verhältnismäßig geringe Abweichung in der Klimawirkung von 1,9 % in F-ATR100 zwischen klimaoptimalem und ausgewähltem klimaoptimierten ISO-Flughafen vor [223].

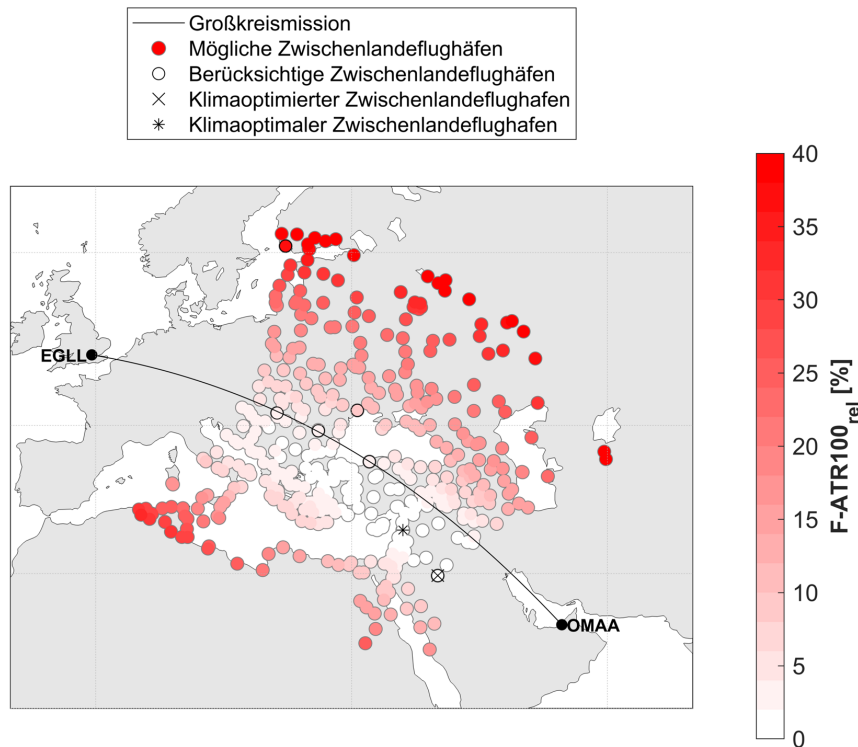


Abbildung A.11: Auswahl der Zwischenlandeflughäfen in der Konzeptbewertung des klimaoptimierten Mehrstufenbetriebs für eine Beispielmision von OMAA nach EGLL mit einem Airbus A380 [eigene Darstellung nach 223].

Eine Erweiterung der Betrachtung auf die 25 relevantesten Routen des betrachteten Flugplans im Hinblick auf das Verkehrsaufkommen in ASK bestätigt diesen Zusammenhang, indem die mittlere Abweichung in Klimawirkung F-ATR100 unter 10 % im Vergleich zur klimaoptimalen Lösung liegt. Die Vereinfachung stellt folglich eine ausreichend gute Näherung zur Abschätzung der Mitigationspotentiale dar. Die Kapazität an den ausgewählten Zwischenlandeflughäfen sowie die Charakteristika der Landebahnen werden nicht weiter betrachtet. In weitergehenden Analysen zur Implementierung sollten diese Faktoren weiter untersucht werden.

Multiple Zwischenlandungen

Neben der Möglichkeit, eine Mission durch eine Zwischenlandung zu unterbrechen, besteht gerade bei Ultra-Langstreckenmissionen die Option, zwei oder mehr Zwischenlandungen

einulegen, um die Maßnahmeneffektivität weiter zu erhöhen. Zengerling et al. (2022) führen dafür eine Sensitivitätsstudie entlang einer Mission von London Heathrow (EGLL) nach Perth (YPPH) mit einer Boeing 787 durch [319]. Der Umwegfaktor wird dabei auf 1,25 festgesetzt, während der Versatzfaktor über alle drei Missionen auf den Bereich zwischen 10 % und 60 % beschränkt wird [319].

Tabelle A.3 zeigt die Veränderungen der relevanten Kennzahlen Missionsdistanz, Kraftstoffverbrauch und Klimawirkung (in F-ATR100) für den kraftstoff- und klimaoptimierten Betrieb entlang der ausgewählten Ultra-Langstreckenmissionen in Relation zur direkten Referenzmission für ein bzw. zwei Zwischenlandungen im Vergleich. Das Beispiel zeigt keine Steigerung der Kraftstoffeffizienz durch eine weitere Zwischenlandung, während das Potential zur Minderung der Klimawirkung durch die zweite Zwischenlandung noch einmal gesteigert werden kann [319].

		Distanz	Kraftstoffverbrauch	F-ATR100
Eine Zwischenlandung	kraftstoffoptimiert	+0,0 %	-7,1 %	-1,8 %
	klimaoptimiert	+0,8 %	+11,4 %	-66,6 %
Zwei Zwischenlandungen	kraftstoffoptimiert	+1,8 %	-6,3 %	+2,1 %
	klimaoptimiert	+8,6 %	+13,1 %	-67,7 %

Tabelle A.3: Veränderung in Kraftstoffverbrauch und Klimawirkung durch ein und zwei Zwischenlandungen für eine Beispielmision von EGLL nach YPPH mit einer Boeing 787 relativ zur direkten Referenzmission [319].

Optimierte Flugzeugentwürfe im ISO-Kontext

Da die Flugzeugtypen im Mehrstufenbetrieb deutlich unterhalb ihrer Auslegungsdistanz operieren, kann durch Flugzeuge geringerer Auslegungsreichweite ein zusätzlicher Mehrwert hinsichtlich Kraftstoffeffizienz bzw. Klimawirkungsminderung entstehen. Zengerling et al. (2022) untersuchen dazu entlang einzelner Beispielrouten den Austausch des Flugzeugtyps im Mehrstufenbetrieb, wobei ein Flugzeug aus dem Mittelstreckensegment des gleichen Herstellers als Alternative herangezogen wird [319]. Um sicherzustellen, dass das gleiche Passagieraufkommen transportiert werden kann, wird eine höhere Anzahl an Flugzeugen aus dem Mittelstreckensegment eingesetzt [319].

Tabelle A.4 zeigt die Ergebnisse für Beispielrouten für eine konstante Flughöhe (FL350) im Vergleich zur direkten Referenzmission mit dem Langstreckenflugzeug. Während sich für die erste Beispielmision von Dubai (OMDB) nach London Heathrow (EGLL) zwar eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Mehrstufenbetrieb ergibt, kann für beide Beispiele keine Reduktion in der Klimawirkung festgestellt werden [319].

Lim et al. (2023) analysieren im Zuge des EU-Projekts *REIVON* (*Reduction of the environmental impact of aviation via optimisation of aircraft size/range and flight network*) den Mehrstufenbetrieb mit neuen, auf den veränderten Betrieb optimierten Flugzeugentwürfen zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen [320]. Darüber hinaus wird auch der Ansatz zur Frequenzreduktion durch den Einsatz neuer Flugzeugentwürfe mit hoher Passagierkapazität untersucht [321]. Im Zuge einer Zusammenführung der Erkenntnisse aus REIVON und ClimOP erweitern Radhakrishnan et al. (2023) die Analyse auf eine Betrachtung von CO₂- und Nicht-CO₂-Effekten [176]. Basierend auf einem repräsentativen Analyseflugplan mit 700 Missionen einer Boeing 787 wird die Imple-

Mission	Flotte	Kraftstoffverbrauch	F-ATR100
OMDB - EGGL	AirbusA380	+9,0 %	-37,0 %
	4 x Airbus A321	-2,0 %	-25,1 %
KJFK - EGGL	Boeing 747	+5,4 %	-24,9 %
	3 x Boeing 737	+17,9 %	+22,4 %

Tabelle A.4: Veränderung in Kraftstoffverbrauch und Klimawirkung durch unterschiedliche Flugzeugzuordnungen für zwei ausgewählte Beispielmisiones in Relation zur direkten Referenzmission [319].

mentierung des klimaausgewogenen Mehrstufenbetriebs unter Berücksichtigung 24 verschiedener Flugzeugentwürfe mit unterschiedlichen Auslegungsreichweiten und Sitzplatzkapazitäten analysiert. Die Zuordnung der Flugzeugentwürfe wird hinsichtlich Klimawirkung (F-ATR100) oder Kraftstoffverbrauch optimiert, wobei eine Sicherstellung der gleichen Frequenz je Mission (Frequenzrandbedingung) und die Abdeckung der Passagiernachfrage (Nachfragerandbedingung) sichergestellt werden. Die klima- bzw. kraftstoffoptimierten Zwischenlandeflughäfen basieren auf den Erkenntnissen dieser Arbeit für den europäischen Langstreckenverkehr (vgl. Kapitel 5.2.2). Die Autoren und Autorinnen identifizieren einen zusätzlichen Anstieg des Mitigationspotentials im Vergleich zum klimaausgewogenen Mehrstufenbetrieb mit dem Referenzflugzeug. Für eine Beispielmision von Frankfurt (EDDF) nach Vancouver (CYVR) ergibt sich durch die optimierten Flugzeugentwürfe (*Re-design*) ein Kraftstoffeinsparpotential von 19 % im Vergleich zur direkten Mission mit dem Referenzflugzeug sowie eine Steigerung des Mitigationspotentials von 9 auf 20 % (vgl. Tabelle A.5). Diese Erkenntnis kann auch für den gesamten Untersuchungsflugplan bestätigt werden. Während der klimaausgewogene Mehrstufenbetrieb mit dem Referenzflugzeug zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs von 1 % und einem Mitigationspotential von 13 % führt, kann in Kombination mit den neuen Flugzeugentwürfen der Kraftstoffverbrauch um 20 % reduziert und das Mitigationspotential auf 23 % erhöht werden (vgl. Tabelle A.5). Durch eine Auflösung der Frequenzrandbedingung kann das Mitigationspotential weiter auf bis zu 32 % gesteigert werden [176].

	Flotte	Kraftstoffverbrauch	F-ATR100
Beispielmision: EDDF - CYVR	Boeing 787	+5,4 %	- 9,1 %
	Re-design	- 19,3 %	- 20,0 %
Langstreckennetzwerk	Boeing 787	+ 1,1 %	- 13,2 %
	Re-design	- 20,1%	- 23,4 %

Tabelle A.5: Veränderung in Kraftstoffverbrauch und Klimawirkung durch den Einsatz verbesserter Flugzeugentwürfe im klimaausgewogenen Mehrstufenbetrieb in Relation zur direkten Mission mit dem Referenzflugzeug [176].

B.5 Vergleich betrieblicher Maßnahmen im Kontext technologischer Weiterentwicklungen

Auch wenn betriebliche Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung bereits ohne technische Weiterentwicklungen der Weltflotte zu markanten Mitigationspotentialen führen (vgl.

Kapitel 5), können sich technische Weiterentwicklungen im Luftverkehrssystem auf die Effektivität der verschiedenen Maßnahmen auswirken. Folglich ist auch die Kombination betrieblicher und technischer Maßnahmen zu untersuchen.

Im Zuge einer studentischen Arbeit in Kooperation von DLR-LV und ILT untersucht Clococeanu (2024) die Effektivität verschiedener betrieblicher Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung im Kontext neuer Flugzeugentwürfe und Kraftstoffe [322]. Dabei wird die in Kapitel 4.2 vorgestellte Modellkette zur Detailmodellierung verwendet, wobei erstmals die Anbindung des iTCMs an das CoCiP-Modell zur Berechnung der Klimawirkung von Kondensstreifen über *pycontrails* genutzt wird. In der Studie wird die Veränderung des Mitigationspotentials sowie von Kraftstoffverbrauch und Flugzeit entlang zehn repräsentativer Langstreckenmissionen durch laterale, vertikale und zeitliche Routenadaption unter Berücksichtigung unterschiedlicher technologischer Randbedingungen analysiert. Als Referenzflugzeug dient der Entwurf eines Airbus A350-Modells aus dem DLR-Projekt KuuL (Klimafreundlicher ultra-effizienter Langstreckenflug), für welchen sowohl der Betrieb mit konventionellem Kerosin als auch SAF modelliert wird. Darauf aufbauend wird der Entwurf eines Flugzeugs mit Wasserstoffantrieb vorgenommen [323]. Um die starke Abhängigkeit der Kondensstreifenbildung von der betrachteten Wetterlage zu berücksichtigen, werden außerdem zwölf unterschiedliche Wettersituationen aus dem Jahr 2018 betrachtet [322].

Die Ergebnisse sind für eine Beispielmission von London Heathrow (EGLL) nach Singapur (WSSS) am 15.9.2018 mit Abflug um 13 Uhr in Tabelle A.6 dargestellt. Es ergeben sich Potentiale zur Verringerung der Kondensstreifendistanz von bis zu 100 %, sprich einer vollständigen Vermeidung von Kondensstreifen, im Vergleich zur unveränderten Referenzmission. Bereits für die Einzelflug-Fallstudie zeigen sich variierende Effizienzen der verschiedenen Trajektorienadaptionen in Abhängigkeit des verwendeten Kraftstoffs. So weist eine vertikale Trajektorienadaption unter Verwendung von Kerosin besonders hohe Mitigationspotentiale auf, während beim Einsatz von SAF und Wasserstoff die laterale Adaption besonders effektiv zur Kondensstreifenvermeidung ist. Dieser Zusammenhang bestätigt sich auch bei der Betrachtung weiterer Missionen und Analyselage in Tabelle A.7. Analog zur Abhängigkeit der Maßnahmeneffektivität und -effizienz von der Referenzmission im Hinblick auf Distanz, geografische Ausdehnung, Flughöhe und -zeit wirkt sich auch der Flugzeugtyp sowie der gewählte Kraftstoff auf den Vergleich aus [322].

	Vertikale Adaption	Laterale Adaption	Zeitliche Adaption
Referenzflugzeug (Kerosin)	-100 %	-97,2 %	-6,1 %
Referenzflugzeug (SAF)	-96,0 %	-97,2 %	-6,1 %
Wasserstoffentwurf	-31,9 %	-93,0 %	0 %

Tabelle A.6: Veränderung des effektiven Strahlungsantrieb von Kondensstreifen durch unterschiedliche Trajektorienadaptionen für eine Beispielmission von EGLL nach WSSS in Abhängigkeit unterschiedlicher Antriebstypen [322]

Clococeanu (2024) untersuchen neben der Effektivität zur Kondensstreifenvermeidung auch das Potential zur Verringerung der Gesamtklimawirkung durch die Anbindung von aCCFs an das iTCM. Durch die unterschiedlichen Bewertungsansätze variieren die Erkenntnisse missionsindividuell jedoch deutlich [322]. Aufbauend auf den Erkenntnissen können zukünftige Forschungsarbeiten einen umfassenden Effizienzvergleich durch die Kombination von technischen und operationellen Maßnahmen adressieren.

		Vertikale Adaption	Laterale Adaption	Zeitliche Adaption
Referenzflugzeug (Kerosin)	Kondensstreifendistanz	-62,5 %	-63,5 %	-22,1%
	EF_{CiC}	-70,8 %	-72,6 %	-3,8 %
	Kraftstoffverbrauch	+3,3 %	+2,2 %	0,0 %
	Flugzeit	-1,2 %	+2,0 %	0,0 %
Referenzflugzeug (SAF)	Kondensstreifendistanz	-62,7%	-66,8 %	-22,2 %
	EF_{CiC}	-69,9 %	-73,1 %	-4,5 %
	Kraftstoffverbrauch	+3,5 %	+2,3 %	0,0 %
	Flugzeit	-1,2 %	+2,0 %	0,0 %
Wasserstoffentwurf	Kondensstreifendistanz	-51,2 %	-71,3 %	-24,1 %
	EF_{CiC}	-57,6 %	-80,1 %	-23,2 %
	Kraftstoffverbrauch	+2,3 %	-2,6 %	0,0 %
	Flugzeit	-0,9 %	+2,4 %	0,0 %

Tabelle A.7: Veränderung verschiedener Missionskennzahlen durch unterschiedliche Trajektorienadaptionen in Abhängigkeit des Flugzeugtyps und in Relation zur kraftstoffoptimalen Referenztrajektorie je Flugzeugtyp über die Gesamtstichprobe (10 Routen und 12 Wetter-situationen) [322].

B.6 Ansätze zur Internalisierung von Klimakosten

Da betriebliche Ansätze zur Minderung der Klimawirkung häufig primär auf eine Reduktion der Nicht-CO₂-Effekte abzielen und einen Anstieg des Kraftstoffverbrauchs in Kauf nehmen, führt die Implementierung solcher Maßnahmen häufig zu einem Anstieg der Betriebskosten (vgl. Kapitel 3 und 5). Gerade aus Perspektive der Flugzeugbetreiber (*Aircraft operators, AO*) entstehen somit ökonomische Implementierungshürden, da die klimaoptimale Lösung im Betrieb normalerweise nicht der kostenoptimalen Lösung entspricht. Das lässt sich insbesondere im Kontext klimaoptimierter Flugplanung verdeutlichen (vgl. Anhang B.2). Die Potentiale einer solchen Trajektorienoptimierung werden üblicherweise entlang einer Paretofront dargestellt, wobei dem Mitigationpotential die Veränderung in den direkten Betriebskosten gegenübergestellt wird (vgl. Abb. A.12, schwarze Linie) und so der Widerspruch zwischen den beiden gegenläufigen Optimierungszielen abgebildet wird.

Im Zuge eines Überwachungs-, Melde- und Verifikationsrahmenwerk (*Monitoring, reporting and verification framework, MRV*) untersucht die EU aktuell die Erweiterung umweltpolitischer Randbedingungen, welche bisher ausschließlich die Klimawirkung von CO₂-Effekten berücksichtigen. Aufbauend auf einer umfassenden Datenbasis, die durch das MRV entstehen soll, soll ab 2027 die Erweiterung des EU ETS um Nicht-CO₂-Effekte der Luftfahrt untersucht werden [324].

Im Kontext des Projekts BeCoM (*Better Contrail Mitigation*) untersuchen Niklaß et al. (2025) die Auswirkungen einer möglichen Bepreisung von Nicht-CO₂-Effekten auf Basis von CO₂-äquivalenten Emissionen [304]. Die Autoren und Autorinnen definieren dazu das Konzept von algorithmischen Kostenfunktionen für Klimawandel (*algorithmic cost functions for climate change, aCCC*), wobei die meteorologisch variierende Klimawirkung auf Basis von aCCFs berechnet, in die CO₂-äquivalente Emissionsmenge m_{CO_2e} umgerechnet und mit einem Preis p_{CO_2e} pro Kilogramm bepreist wird [304]:

$$m_{CO_2e}(x, t) = \int_{t_0}^{t_f} \frac{aCCF_{merged}(x, t) \cdot \dot{m}_{fuel}(t) dt}{aCCF_{CO_2}} \cdot EI_{CO_2} \quad (\text{A.4})$$

$$aCCC(x, t) = m_{CO_2e}(x, t) \cdot p_{CO_2e} \quad (\text{A.5})$$

Abbildung A.12 illustriert die Eignung einer CO_2e -basierten Bepreisung von Nicht- CO_2 -Effekten am Beispiel der Trajektorienoptimierung einer kondensstreifenintensiven Referenzmission von Barcelona (LEBL) nach Frankfurt (EDDF) mit einem Airbus A320 unter Annahme der Wettersituation vom 16.6.2018. Während aus der klassischen Trajektorienoptimierung eine Paretofront resultiert, welche die gegensätzlichen Ziele Klimawirkungsminde- rung und Kostenminimierung illustriert (schwarze Linie), kann durch die Einführung einer CO_2e -Bepreisung eine eindeutige kostenoptimale Lösung erreicht werden (blaue Punkte je nach gewähltem Bepreisungsansatz). Für die betrachtete Route steigen somit die angepassten direkten Betriebskosten um 12,8 %, wobei eine Verringerung der Klimawirkung in CO_2 -äquivalenten Emissionen um 55,2 % erreicht werden kann, wenn eine vollständige Berücksichtigung der Nicht- CO_2 -Effekte und ein Preis von 80 Euro pro Kilogramm CO_2e -Emission angenommen werden. Im Vergleich zur Referenzmission können aber unter Annahme des Bepreisungssystems deutliche Kosteneinsparungen erreicht werden, da diese für die Referenzmission mit Bepreisung um 36,5 % steigen (rote Punkte je nach gewähltem Bepreisungsansatz). Relativ zu diesen veränderten Referenzkosten ergeben sich folglich Einsparpotentiale von 17,4 % (grüne Punkte je nach gewähltem Bepreisungsansatz). Folglich kann durch die Einführung eines solchen Bepreisungsschemas die Abwägung gegenläufiger Effekte (*Win-lose*, schwarz) durch die Minderung der Klimawirkung und eine gleichzeitige Kostenreduktion ersetzt werden (*Win-win*, grün) [304].

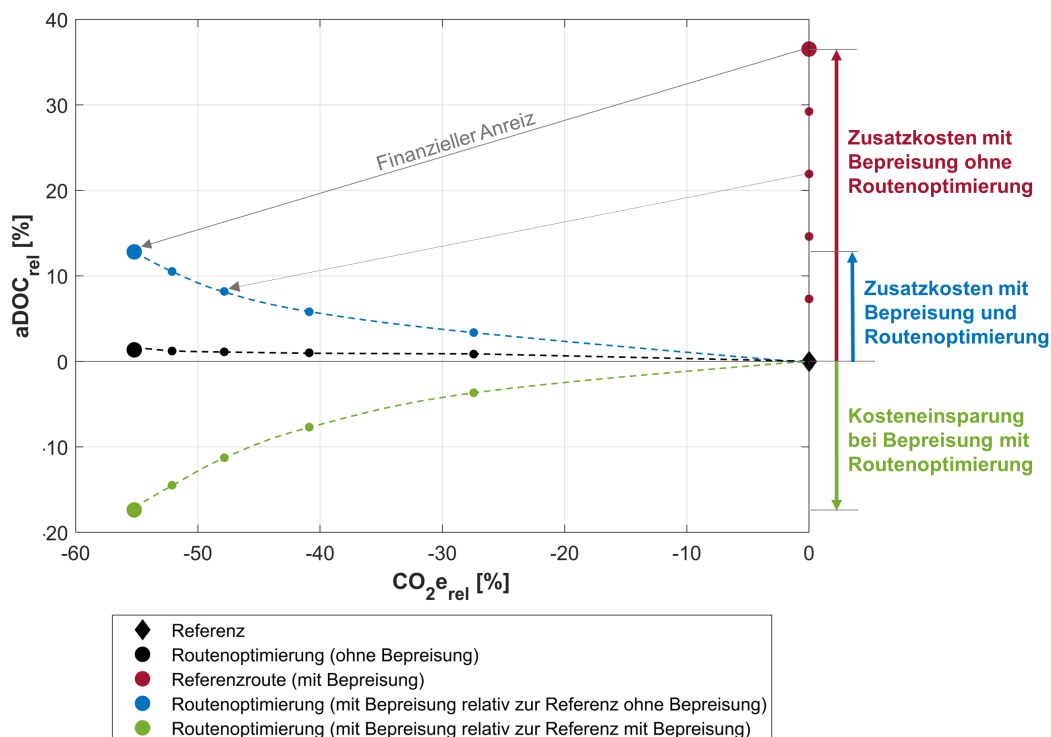


Abbildung A.12: Effekte durch die Einführung einer CO_2e -Bepreisung auf die klimaoptimierte Flugplanung für eine kondensstreifenintensive Beispielmision von LEBL nach EDDF mit einem Airbus A320 am 16.6.2018 [eigene Darstellung nach 304].

Die Studie von Niklaß et al. (2025) analysiert darüber hinaus in verschiedenen Sensitivitätsstudien die Auswirkungen auf Mitigationspotentiale, Kosten und Ticketpreise in Abhängigkeit von den meteorologischen Randbedingungen sowie unterschiedlicher Entwurfsparameter eines möglichen Bepreisungsschemas [304]. Dabei wird angenommen, dass der Anstieg der Betriebskosten direkt in Form von Ticketpreiserhöhungen an die Passagiere weitergegeben werden kann. So lassen sich die Sensitivitäten in Abhängigkeit unterschiedlicher CO₂-Preise und unterschiedlicher Klimametrika bestimmen. Darüber hinaus können unterschiedliche Bilanzierungsansätze untersucht werden, wie beispielsweise die Einführung einer sukzessive ansteigenden Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekten oder einer unsicherheitsbasierten Berücksichtigung, wobei Spezies mit einem geringeren wissenschaftlichen Verständnis mit einem geringeren Anteil berücksichtigt werden als Spezies mit einem hohen wissenschaftlichen Verständnis. Insgesamt ergibt sich eine starke Abhängigkeit des Mitigationspotentials von der meteorologischen Situation entlang der Trajektorie, sodass bei kondensstreifenintensiven Missionen höhere Mitigationspotentiale erreicht werden können. Die Sensitivitätsanalyse zeigt außerdem, dass bei kondensstreifenintensiven Missionen der CO₂e-Preis geringere Auswirkungen auf das Mitigationspotential hat als bei kondensstreifenarmen bzw. NO_x-dominierten Routen, während die Ticketpreiserhöhung unabhängig von der meteorologischen Situation markant durch den CO₂e-Preis getrieben wird. Die Ticketpreiserhöhung, die für die Beispielmission LEBL - EDDF unter verschiedenen Wettersituationen je nach Bilanzierungsschema zwischen 2 und 10 Euro beträgt, macht somit zwischen 0,6 % und 7,8 % des durchschnittlichen Ticketpreises des Jahres 2023 aus, welcher großen Schwankungen im Zeitablauf unterliegt [304].

Analog kann ein solches Bepreisungsschema auch für die betrieblichen Maßnahmen dieser Arbeit analysiert werden [305]. Abbildung A.13 illustriert die resultierenden Veränderungen in den angepassten direkten Betriebskosten in Relation zu den Mitigationspotentialen in F-ATR100 für eine Beispielroute von Paris (LFPG) nach Boston (KBOS) unter Annahme der Routenführung und Wettersituation vom 12.11.2018. Je nach angenommenem Preis pro CO₂e-Emissionsmenge ergeben sich unterschiedliche kostenoptimale Lösungen, welche die Auswahl der effizienten Maßnahme und das resultierende Mitigationspotential bestimmen. Während so beispielsweise der klimaoptimierte Mehrstufenbetrieb bei einem CO₂e-Preis von 80 Euro noch nicht zu einem Kostenvorteil führt, kann bei einem CO₂e-Preis von 120 Euro damit eine Reduktion der aDOC um etwa 4 % erreicht werden (vgl. Abb. A.13, oben). Durch die Kostenoptimierung kann der Widerspruch zwischen Kostenminimierung und Maximierung des Mitigationspotentials aufgelöst werden. Allerdings ergeben sich je nach CO₂-Preis unterschiedliche Maßnahmen, die aus ökonomischer Perspektive zu bevorzugen sind, da sich das Verhältnis von direkten Betriebskosten und Klimakosten verschiebt. Bei einem CO₂e-Preis von 80 Euro ist eine Reduktion der Flughöhe in Kombination mit einer Geschwindigkeitsverringerung von 5 % von den betrachteten Maßnahmen die kostenminimale Option (vgl. Abb. A.13, links oben), während bei einem CO₂e-Preis von 200 Euro eine Geschwindigkeitsverringerung von 7,5 % zu geringeren Kosten führt und damit auch höhere Mitigationspotentiale erreicht werden können (vgl. Abb. A.13, rechts unten). Weitergehende Analysen sollten unter anderem die Auswirkungen auf Airline-Netzwerke bei einer europäischen Implementierung eines solchen Bepreisungsschemas sowie die Reduktion von Unsicherheiten fokussieren.

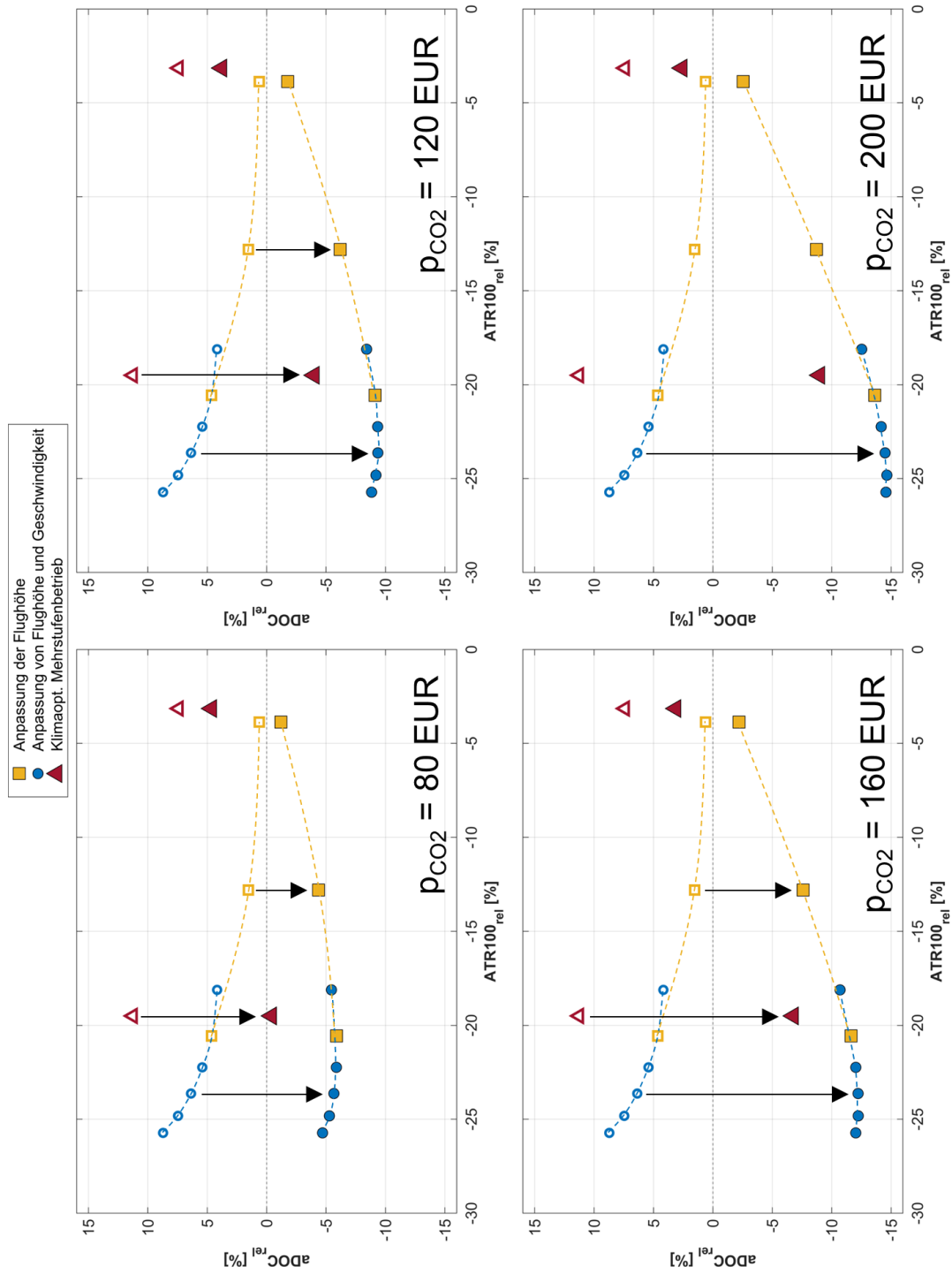


Abbildung A.13: Veränderungen im ATR-DOC-Diagramm durch die Einführung eines Schemas zur Bepreisung von Nicht-CO₂-Effekten (vgl. Abb. 5.11) mit unterschiedlichen CO₂e-Preisen zwischen 80 Euro und 200 Euro entlang einer Beispielmission von LFPG nach KBOS am 12.11.2018.

C Ergänzende Betrachtungen zu den Stakeholderauswirkungen

Über die Veränderung in den direkten Betriebskosten hinaus, wirken sich die betrachteten betrieblichen Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems aus (vgl. Abb. 2.8). Diese sind für die folgenden Stakeholder quantitativ untersucht worden:

- Passagiere
- Airlines und deren Netzwerke
- Flugsicherung und Luftverkehrsmanagement

Da die betrachteten Maßnahmen im Reiseflugbereich wirksam sind, werden Flughäfen als eine der vier zentralen Interessensgruppen im Folgenden nicht weiter detailliert betrachtet. Darüber hinaus werden auch die Kunden von Frachttransportleistungen im Luftverkehr von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da dieser Teil nur etwa 7 bis 9 % des Kraftstoffbedarfs der Luftfahrt ausmacht [267]. Darüber hinaus wird auf eine detaillierte Betrachtung der Auswirkungen auf Flugzeug- und Komponentenhersteller (OEMs) verzichtet, da betriebliche Maßnahmen auch ohne umfassende technische Erweiterungen umgesetzt werden können. Durch veränderte Betriebskonzepte ergeben sich allerdings Optimierungspotentiale im Flugzeugentwurf, die u. a. von Koch (2013) analysiert werden [68].

Passagiere

Im Rahmen des ClimOP-Projekts wurde eine Passagierumfrage zur Akzeptanz verschiedener betrieblicher Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr durchgeführt [325]. Die Erkenntnisse basieren auf einer Stichprobe von 406 europäischen Luftverkehrspassagieren mit einem Durchschnittsalter zwischen 18 und 44 Jahren. Die Teilnehmenden schätzen ihre eigene Wahrnehmung des menschengemachten Klimawandels durchschnittlich als hoch und höher als in ihrem Umfeld ein. Ein Großteil der Teilnehmenden sagt über sich selbst, dass sie bereit sind, Handlungen vorzunehmen, um den Klimawandel zu mindern, weist aber geringe Kenntnisse zu europäischen, nationalen oder luftfahrtspezifischen Initiativen zur Minderung der Klimawirkung auf [162].

Die Rückmeldung der Teilnehmenden der Umfrage hinsichtlich der Akzeptanz betrieblicher Mitigationsmaßnahmen ist in Abbildung A.14 dargestellt. Die Passagiere scheinen bereit, sowohl höhere Kosten für klimaoptimierten Betrieb als auch längere Flugzeiten¹⁹ in Kauf zu nehmen, wenn dies der Umwelt zugutekommt. Die Bereitschaft dazu scheint im Kurzstreckenverkehr noch stärker ausgeprägt zu sein als im Langstreckenverkehr (vgl. Abb. A.14, oben). Des Weiteren zeigen die Passagiere auch eine Akzeptanz von netzwerkspezifischen Änderungen und sind bereit, eine geringere Auswahl an Verbindungen, größere, vollständig ausgebuchte Flugzeuge und Gepäckbeschränkungen in Kauf zu nehmen. Hier zeigt sich die stärkste Akzeptanz bei der Verwendung größerer Flugzeuge und die geringste Akzeptanz bei den Gepäckbeschränkungen (vgl. Abb. A.14, oben) [162].

Die Ergebnisse der Umfrage zeigen ein allgemeines Interesse am Klimawandel und die Akzeptanz der Konsequenzen aus der Maßnahmenumsetzung. Gleichzeitig zeigt sich mangelndes Bewusstsein für spezifische Initiativen zur Bekämpfung des Klimawandels, insbesondere im Bereich der Luftfahrt. Die befragten Passagiere bewerteten die meisten der im

¹⁹Die Umfrage fragt die Akzeptanz der Passagiere hinsichtlich einer Flugzeitverlängerung von 30 Minuten (20 %) auf einem Kurzstreckenflug von 2,5 Stunden sowie 2 Stunden (16 %) auf einem Langstreckenflug von 11,5 Stunden ab.

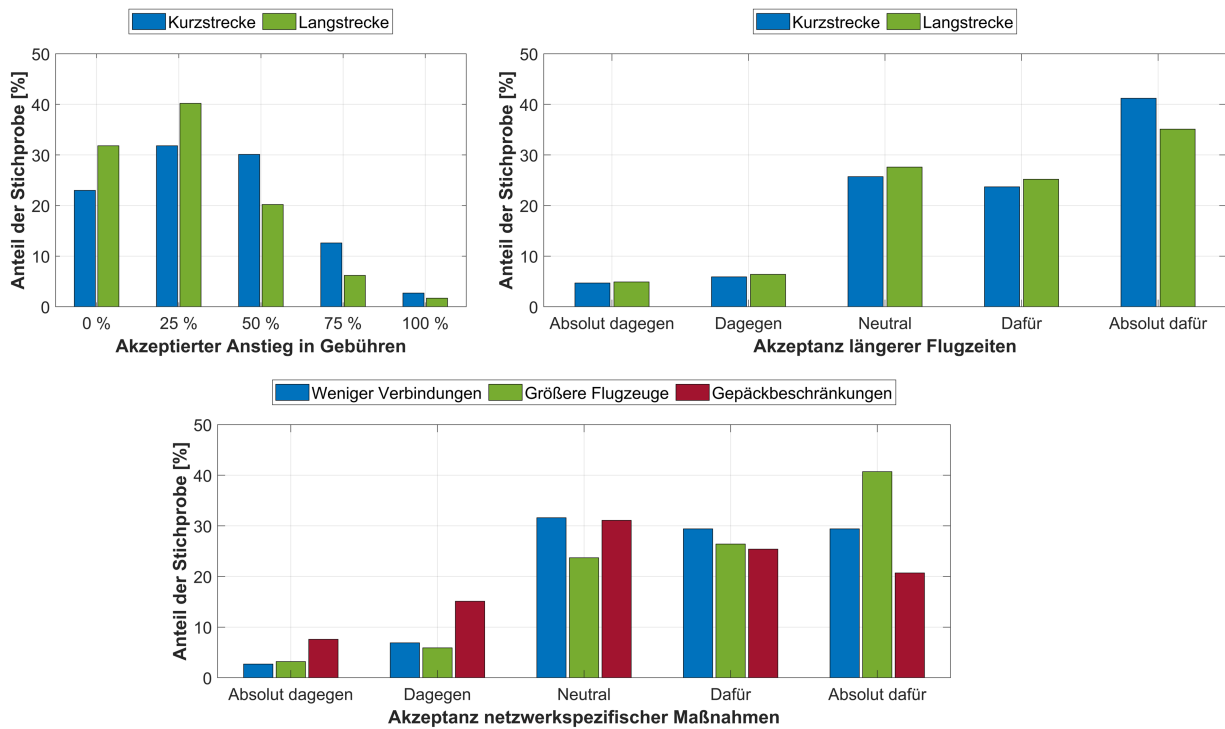


Abbildung A.14: Ergebnisse der Passagierumfrage zur Akzeptanz der Auswirkungen betrieblicher Mitigationsmaßnahmen [eigene Darstellung nach 162].

ClimOP-Projekt untersuchten betrieblichen Verbesserungen positiv, indem sie Akzeptanz für die daraus resultierenden Änderungen aufweisen. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass die Studienergebnisse verzerrt sind, da zum einen vermutlich vermehrt interessierte Passagiere an der Umfrage teilgenommen haben. Zum anderen könnte eine Verzerrung hinsichtlich sozialer Erwünschtheit (*Social desirability bias*) vorliegen, d. h., Teilnehmende könnten ihre Antworten so formuliert haben, dass sie von anderen positiv bewertet werden. Dennoch deuten die Ergebnisse auf eine Bereitschaft hin, zur umweltfreundlicheren Veränderung der Luftfahrt beizutragen [162].

Airlines und deren Netzwerke

Die Auswirkungen betrieblicher Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung auf die Betriebskosten werden in Kapitel 5 umfassend analysiert. Darüber hinaus entstehen weitere Auswirkungen auf die Netzwerke der betreibenden Luftverkehrsgesellschaften, welche in weiterführenden Analysen betrachtet werden sollten.

In diesem Kontext entwickeln Noorafza et al. (2023) eine Methode zur Optimierung von Airline-Netzwerken sowohl im *Hub-and-spoke*- als auch im *Point-to-point*-Betrieb, wobei statt einer Maximierung des Gewinns der betrachteten Airline eine Maximierung des Gewinns in Relation zur resultierenden Klimawirkung in F-ATR20 über einen bestimmten Zeitraum optimiert wird [173]. Die Ergebnisse können dann dem Referenzfall gewinnoptimierter Netzwerke gegenübergestellt werden. Die Studie betrachtet in dem Kontext unterschiedliche Szenarien, in denen entweder ausschließlich ununterbrochene Missionen oder zusätzlich kraftstoffoptimierte ISO-Missionen bzw. klimaoptimierte ISO-Missionen berücksichtigt werden. Die Auswertung unter Berücksichtigung der ISO-Optionen erfolgt anhand der europäischen Airlines KLM und TAP. Die Erkenntnisse der Netzwerkoptimierung sind

in Tabelle A.8 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Mehrstufenbetrieb durch das angepasste Optimierungsziel auf einem Teil der Routen berücksichtigt wird und somit zu einer Erhöhung des erreichbaren Mitigationspotentials beiträgt. Gleichzeitig reduziert sich dadurch der erzielte Profit. Airline-spezifische Besonderheiten führen zu unterschiedlichen Ergebnissen in ökonomischen und ökologischen Kennzahlen [173]. Unter Berücksichtigung netzwerkspezifischer Einschränkungen ergeben sich folglich geringere Mitigationspotentiale als bei einer missionsspezifischen Analyse der betrachteten Maßnahme [223, 173], was voraussichtlich auch auf die übrigen analysierten Maßnahmen dieser Arbeit übertragen werden kann.

		Non-Stop-Betrieb	Kraftstoff-optimierter ISO	Klima-optimierter ISO
KLM	Direktverbindungen	2376	2170	2020
	ISO-Verbindungen	0	204 (8,6 %)	334 (14,1 %)
	F-ATR20	-12 %	-14 %	-28 %
	F-ATR100	-12 %	-14 %	-29 %
	Gewinn	-6 %	-6 %	-10 %
TAP	Direktverbindungen	1286	1092	1182
	ISO-Verbindungen	0	10 (0,1 %)	96 (7,5 %)
	F-ATR20	-28 %	-27 %	-40 %
	F-ATR100	-28 %	-28 %	-40 %
	Gewinn	-17 %	-20 %	-23 %

Tabelle A.8: Veränderung verschiedener Netzwerkkennzahlen durch Gewinnoptimierung im Verhältnis zur Klimawirkung in Relation zum gewinnoptimierten Referenznetzwerk in der Hochsaison. [173].

Des Weiteren analysieren Kölker et al. (2024) die Auswirkungen der zeitlichen Verschiebung von Flugmissionen zur gezielten Nutzung zeitlich abhängiger Kondensstreifeneffekte zur Minderung der Klimawirkung, wobei Aspekte der Netzwerkgestaltung aus ökonomischer, zeitlicher und struktureller Perspektive berücksichtigt werden [302]. Da wenige Missionen für einen Großteil der Kondensstreifenwirkung verantwortlich sind, kann durch eine Anpassung weniger Flüge bereits ein großes Mitigationspotential erreicht werden. Für eine reduzierte nordatlantische Stichprobe zeigen die Autorinnen und Autoren eine Reduktion des AGWPs um etwa 55 % durch die zeitliche Verschiebung von Flugtrajektorien, wobei die Anzahl an betriebenen Reiserouten zwischen 3 % und 4 % reduziert wird, während die geplante Zeitplanverspätung der Passagiere (*Passenger schedule delay*) um 58 % bis 92 % ansteigt. Insgesamt zeigen sich markante negative Auswirkungen der zeitlichen Anpassung der Flugrouten auf die Passagiere, welche durch die Flexibilität in den Netzwerken allerdings teilweise ausgeglichen werden können [302].

Insgesamt weisen unterschiedliche betriebliche Maßnahmen markante Auswirkungen auf die betreibenden Airlines auf. Diese Auswirkungen gehen über den Anstieg der Betriebskosten in einer missionsspezifischen Betrachtung hinaus und wirken sich insbesondere auf die Netzwerkgestaltung aus, da Flugzeug- und Personalumläufe sowie Reiserouten der Passagiere berücksichtigt werden müssen. Das reduziert das theoretisch erreichbare Mitigationspotential aus den missionsspezifischen Analysen bei Berücksichtigung der netzwerkspezifischen Randbedingungen. Ein Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher betrieblicher Maßnahmen zur Klimawirkungsminderung auf Airline-Netzwerke ist in zukünftigen Studien zu untersuchen.

Flugsicherung und Luftverkehrsflussteuerung

Insbesondere in dichten Lufträumen wie dem europäischen Luftverkehrsnetz und organisierten Streckensystemen wie dem nordatlantischen Streckensystem (*North Atlantic Track System, NATS*) ist die Umsetzung betrieblicher Maßnahmen zur Klimawirkungsminde- rung im *En-route*-Bereich häufig durch Randbedingungen der Luftverkehrsflussteuerung beschränkt. Auch die Umsetzbarkeit solcher Maßnahmen durch veränderte Belastung der Flugsicherung ist zu untersuchen.

Dazu analysieren Zengerling & Lau (2024) die Auswirkung von vertikalen und zeitlichen Trajektorienadaptionen auf die Auslastung im europäischen Luftverkehr [326]. Fokus der Studie hinsichtlich Klimawirkungs- und Kapazitätsveränderungen ist ein intra-europäisches Luftverkehrsszenario für einen repräsentativen Wintertag, der sich durch Kondensstreifenbildung im europäischen Luftverkehr und eine geringere Verkehrsdichte als im Sommer auszeichnet. Es ergeben sich hohe Minderungspotentiale in den Kondensstreifeneffekten durch eine vertikale Trajektorienadaption (57,6 % in F-ATR50), während die zeitliche Adaption zu geringen Minderungspotentialen (13,0 %) führt. Die Veränderung in der Luft- raumauslastung im Fall der vertikalen Trajektorienanpassung ist in Abbildung A.15 für zwei verschiedene Flugflächen dargestellt. Eine markante Veränderung der Luftraumaus- lastung ergibt sich insbesondere in dem Bereich, in dem Kondensstreifengebiete (ISSRs) liegen, während sich in anderen Bereichen die Auslastung nur geringfügig ändert (vgl. Abb. 4.14) [326].

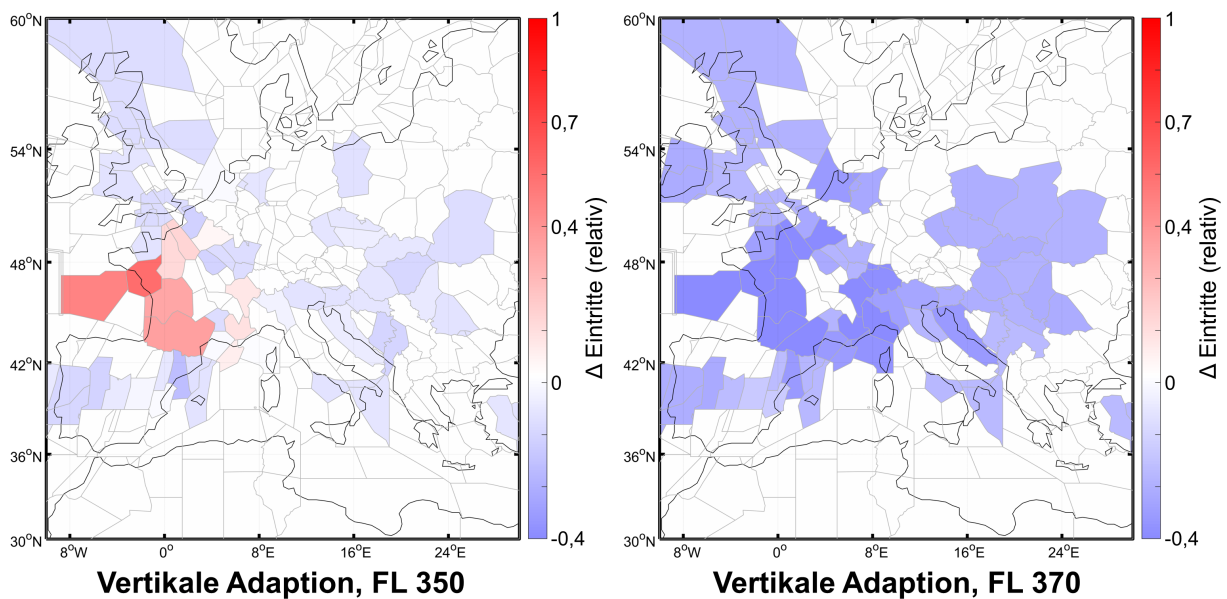


Abbildung A.15: Veränderungen in der Luftraumauslastung in relativen Eintrittszahlen für die vertikale Trajektorienadaption auf FL350 (links) und FL370 (rechts) [eigene Darstellung nach 326].

Das lässt sich durch die Auswahl der adaptierten Trajektorien begründen, da im analysierten Verkehrsszenario nur etwa 10 % der Flüge zu 80 % der kondensstreifeninduzierten Klimawirkung in F-ATR50 beitragen (vgl. Abb. A.16, links). Dabei handelt es sich insbesondere um die Flüge, welche das ISSR über Nordspanien und Westfrankreich durchqueren (vgl. Abb. A.16, rechts). Eine Analyse der Gebiete besonders hoher Luftraumauslastung (*Hotspots*) zeigt sehr geringe Unterschiede im Vergleich der beiden Adaptionsszenarien

(vertikal und zeitlich, vgl. Abb. A.17), obwohl im vertikalen Szenario deutlich mehr Trajektorien angepasst werden und somit eine höhere Klimawirkungsminderung erreicht wird. Bereiche besonders hoher Auslastung von über 100 % unterscheiden sich nicht primär durch das gewählte Adaptionsszenario, sondern werden durch tageszeitabhängige Schwankungen des generellen Luftverkehrsaufkommens beeinflusst. Die Fallstudie zeigt lokal starke Auswirkungen der Trajektorienanpassungen auf die Luftraumkapazitäten, die sich allerdings auf die Gebiete mit hohem Kondensstreifeneinfluss beschränken.

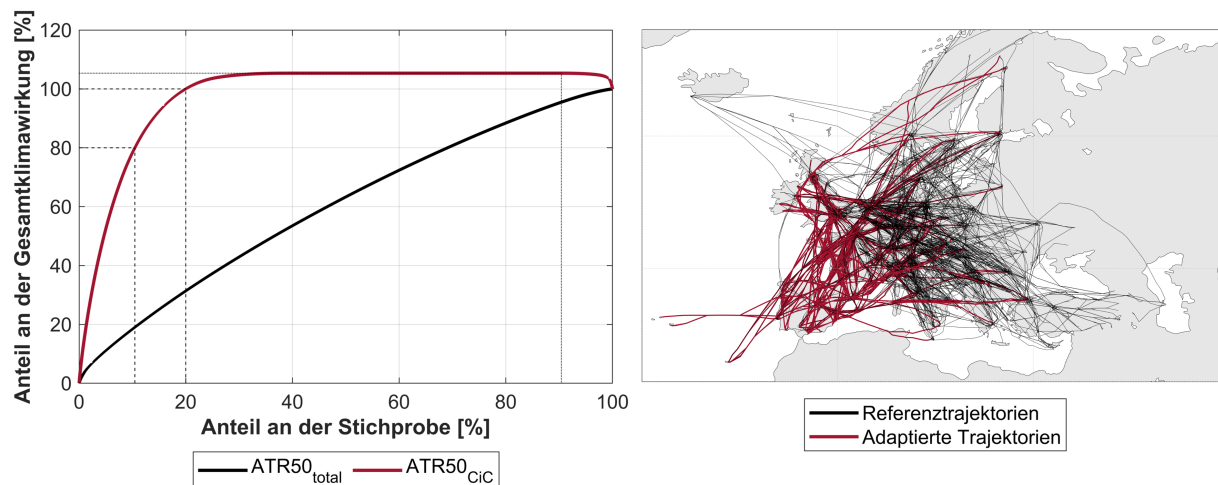


Abbildung A.16: Verteilung der Klimawirkung in F-ATR50 über betrachtete Missionen der Gesamtstichprobe (links) und Trajektorienanpassung im vertikalen Adaptionsszenario am 11.12.2018, 12:00 Uhr (UTC) (rechts) [eigene Darstellung nach 326].

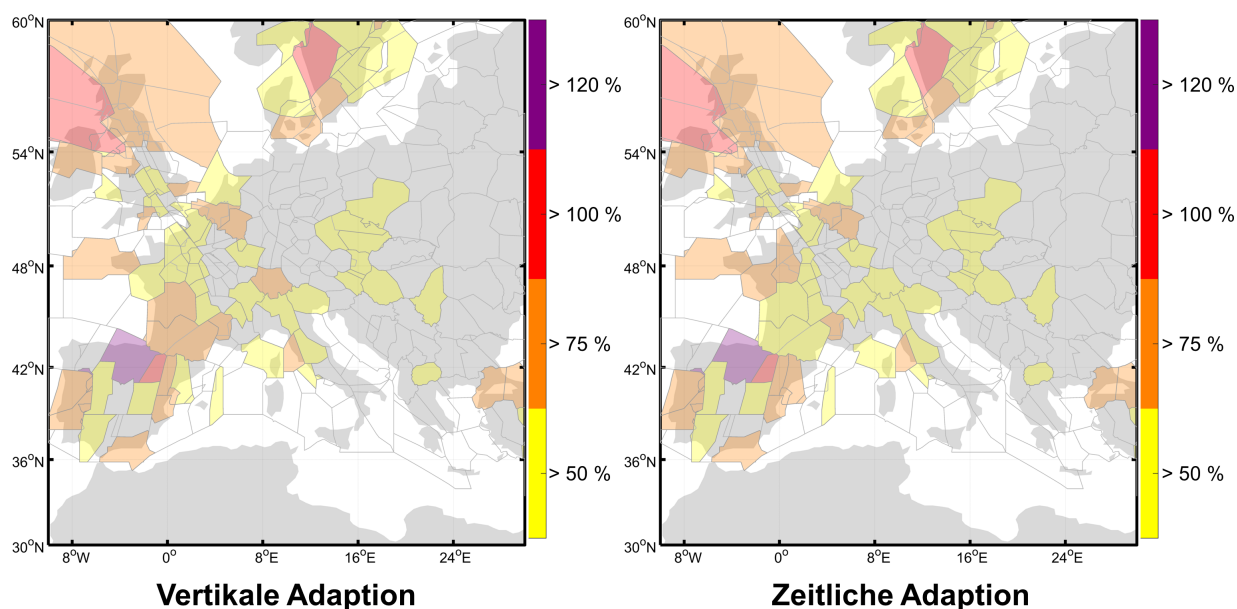


Abbildung A.17: Ergebnisse der Hotspot-Analyse für die vertikale (links) und zeitliche Trajektorienadaptation (rechts) am 11.12.2018, 06:00 Uhr (UTC) [eigene Darstellung nach 326].

In Ergänzung zur Netzwerkperspektive bei der Untersuchung der Luftraumauslastung analysieren Gencoglu & Baspinar (2023) im Zuge des ClimOP-Projekts Veränderungen in potentiellen Konflikten sowie eines Flugsicherungs-Komplexitätsindikators durch unterschiedliche Trajektorienoptimierungsansätze und unter der Annahme eines freien, nicht-konditionierten Luftraums (*Free Routing*) in einem europäischen Luftraum hoher Komplexität für den 16.6.2018 [192]. Die Analyse zeigt sowohl eine Reduktion der Konfliktanzahl als auch eine geringere Komplexität der Flugsicherung durch die Implementierung des *Free-Routing*-Konzepts, welche mit der Zielfunktion der Trajektorienoptimierung variiert. Während bei der Kürzeste-Wege-Optimierung die Anzahl der Konflikte je Flugstunde um 17,4 % reduziert werden kann, reduziert eine Trajektorienoptimierung unter Berücksichtigung von CO₂- und Nicht-CO₂-Emissionen die Konfliktzahl je Flugstunde um 10,7 %. Der definierte Komplexitätsindikator der Flugsicherung sinkt im ersten Fall um 22,9 %, steigt allerdings im letzten Fall um 21,3 % an. Das kann durch die Reduktion horizontaler und vertikaler Interaktion durch die Kürzeste-Wege-Optimierung im ersten Fall begründet werden, während bei der Optimierung unter Berücksichtigung der Emissionsmengen prinzipiell mit geringeren Geschwindigkeiten geflogen wird, um insbesondere die NO_x-Emissionen zu reduzieren, sodass Geschwindigkeitsinteraktionen ansteigen (vgl. Tabelle A.9). Die Autoren schätzen den Komplexitätsanstieg allerdings auch in diesem Fall als handhabbar ein [192].

	p-ATR20	Konflikte pro Flugstunde	Komplexitäts-Indikator
Kürzeste-Wege-Optimierung	-24,4 %	-17,4 %	-22,9 %
Optimierung von Kraftstoffverbrauch und Flugzeit	-24,1 %	-11,9 %	-0,1 %
Optimierung von Kraftstoff, Flugzeit und NO _x -Emissionsmenge	-28,0 %	-10,7 %	+21,3 %

Tabelle A.9: Veränderung luftraumspezifischer durch Einführung eines unkonditionierten Luftraums für unterschiedliche Zielfunktionen der Routenoptimierung in Relation zur konditionierten Referenz [192, 158].

Gerade die Anpassung von Flugtrajektorien zur betrieblichen Klimawirkungsminderung beeinflusst die Luftraumauslastung und die Komplexität der Luftverkehrsflusssteuerung. Da Gebiete besonders hoher Klimasensitivität eine geringe räumliche Ausdehnung aufweisen, fokussieren sich markante Änderungen in der Auslastung häufig auf diese Gebiete. Gerade im Kontext von *Free Routing* erscheint eine Umsetzung solcher klimaoptimierter Trajektorien realistisch, allerdings sind weitere Analysen in Kooperation mit Flugsicherungsdiensten und Netzwerkverantwortlichen notwendig.

D Unsicherheiten

Bei der Validierung der entwickelten Modellkette (Kapitel 4.4) und der Bewertung der Simulationsergebnisse (Kapitel 5) sind die Unsicherheiten in der Klimabewertung des Luftverkehrs gesondert zu betrachten. Wie in Kapitel 2.3 aufgezeigt, ist insbesondere die Bewertung von Nicht-CO₂-Effekten des Luftverkehrs mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet [32]. Darüber hinaus existieren weitere Unsicherheiten im Bewertungsprozess, die eine genaue Quantifizierung der Effekte erschweren. Die Unsicherheiten im Bewertungsprozess lassen sich wie folgt kategorisieren:

- (1) **Unsicherheiten in der Berechnung des Kraftstoffflusses und der Emissionsmengen** werden im Wesentlichen durch die Ungenauigkeiten in den aerodynamischen und triebwerksspezifischen Charakteristika der verwendeten Flugleistungsmodelle sowie die gewählte Kraftstoffflusskorrelationsmethode beeinflusst. Für die Verwendung von BADA4 als Flugleistungsmodell wird der mittlere Fehler bei der Modellierung des Kraftstoffflusses mit bis zu 5 % angegeben [252]. Alternative Flugleistungsmodelle liegen mit Ausnahme von OpenAP [327] in einer ähnlichen Größenordnung [328]. Unsicherheiten in der Berechnung der Emissionsmengen sind für die kraftstoffproportionalen Emissionen sehr gering. Für die nicht-kraftstoffproportionalen Emissionen wird der resultierende Fehler der Kraftstoffflusskorrelationsmethoden von Boeing und DLR höher als bei der p_3T_3 -Methode eingeschätzt, welche triebwerksspezifische Parameter mitberücksichtigt [227, 229, 228]. Schäfer & Bartosch (2013) gehen von einer Ungenauigkeit von bis zu 10 % bei der Abschätzung der NO_x-Emissionen aus [227]. Bei der Verwendung von RedEmPs zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionsmengen entstehen weitere Ungenauigkeiten im Vergleich zu einer detaillierten Trajektorienrechnung entlang tatsächlich geflogener Missionen, welche in Tabelle A.10 aufgeführt sind.
- (2) **Unsicherheiten der meteorologischen Parameter** sind insbesondere bei der Bewertung der Klimawirkung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Wetterbedingungen relevant. Gerade die Analyse der Bildung von Kondensstreifen im CoCiP-Modell sowie die Bewertung von Nicht-CO₂-Effekten mit aCCFs hängen stark von meteorologischen Parametern wie Temperatur, relativer Feuchte und Geopotential ab, sodass Ungenauigkeiten in der meteorologischen Modellierung die Klimawirkung stark beeinflussen. Darüber hinaus wirken sich Ungenauigkeiten in Wind- und Temperaturinformationen auch auf die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs aus.
- (3) **Unsicherheiten der Bewertung der Klimawirkung** sind gerade für Nicht-CO₂-Effekte als sehr hoch einzuschätzen und dominieren die zuvor genannten Unsicherheiten. Während der Strahlungsantrieb von CO₂ relativ sicher (ERF zwischen 31 und 38 W/m² im 5-bis-95%-Konfidenzintervall für die Emissionen des Luftverkehrs im Zeitraum von 1940 bis 2018) bestimmt werden kann, ist die Bestimmung von Wasserdampf- (0,8 bis 3,2 W/m²), Stickoxid- (-4,8 bis 16 W/m²) und Kondensstreifeneffekten (33 bis 189 W/m²) deutlich unsicherer (vgl. Abb. 2.4) [32]. Da gerade bei der betrieblichen Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr häufig höhere, aber sicherere CO₂-Effekte in Kauf genommen werden, um unsichere Nicht-CO₂-Effekte zu reduzieren, ist dieser Aspekt im Kontext dieser Arbeit besonders relevant. Das Verhältnis von CO₂- zu Nicht-CO₂-Effekten bestimmt signifikant die Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen, sodass die Unsicherheiten bei einer Interpretation der Ergebnisse besonders zu berücksichtigen sind.

Annahme	Abschätzung der Auswirkung
Gemittelter Sitzladefaktor von 84 % für das Jahr 2018	<ul style="list-style-type: none"> • Regionale und lokale Nachfrageeffekte sowie zeitliche Varianz der Sitzladefaktoren bleibt unberücksichtigt • Varianz in den Sitzladefaktoren von ± 5 % (± 10 %) führt zu Veränderungen in den CO₂-Emissionen von $\pm 1,2$ % ($\pm 2,3$ %) und $\pm 1,7$ % ($\pm 3,3$ %) in den NO_x-Emissionen
Vernachlässigung von Windeffekten bei ISA	<ul style="list-style-type: none"> • Unterschätzung der Distanzen über Grund um etwa 1 % [249] • Unterschätzung von Kraftstoffverbrauch und Emissionsmengen
Vereinfachungen in den Referenzrouten	<ul style="list-style-type: none"> • Annahme von Großkreisverbindungen zwischen Start- und Zielflughäfen, sodass laterale Ineffizienzen und regionale Routensysteme (z.B. NATS) nicht berücksichtigt werden, die zu einer Verlängerung der Missionsdistanz führen • Verlängerung der Distanz über Grund um 5 % auf globaler Skala führt zu einer Erhöhung von Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen von 4,3 % und einer Erhöhung der NO_x-Emissionen um 3,9 %. • Fliegen auf kraftstoffoptimalen Höhen mithilfe von <i>Step climbs</i> in Realisierung durch ANS teilweise eingeschränkt, was zu einer Unterschätzung des Kraftstoffverbrauchs führt.
Vereinfachte Analyse von Flugleistungsdaten in RedEmP	<ul style="list-style-type: none"> • Linearisierung der Effekte zwischen den charakteristischen Punkten der RedEmPs führt zu Ungenauigkeiten im Kraftstoffverbrauch von 1,6 %

Tabelle A.10: Auswirkungen von Ungenauigkeiten in der Trajektorien- und Emissionsrechnung mit RedEmPs [267].

Da es sich bei der Bewertung von Potentialen zur Klimawirkungsminderung und den Auswirkungen auf die Stakeholder des Luftverkehrssystems vorwiegend um relative Vergleiche handelt, können gerade die Unsicherheiten in der Trajektorien- und Emissionsmodellierung in der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden. Ebenso werden die meteorologischen Informationen in den folgenden Studien (Kapitel 5) als deterministisch angenommen. Die damit assoziierte Unsicherheit kann beispielsweise durch die Berücksichtigung unterschiedlicher *Ensembles* oder unterschiedlicher Wettermodelle, wie es im Kontext des DKULT-Projekts erfolgt [294], analysiert werden. Da gerade die Klimawirkung von Kondensstreifen stark von der meteorologischen Situation abhängt, unterliegt die Entstehung von ISSRs großen Unsicherheiten je nach meteorologischem Datensatz, was die Unsicherheit der Gesamtklimawirkung stark beeinflusst (vgl. Abb. A.18).

Diese Unsicherheiten in der Quantifizierung der Klimawirkung der unterschiedlichen Spezies können markante Auswirkungen auf die Effektivität von betrieblichen Maßnahmen haben. Folglich untersuchen Zengerling et al. (2023) in ihrer Studie zur Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit beispielhaft gesondert den Einfluss der Kondensstreifenwirkung auf das Mitigationpotential [67]. Die Autorinnen und Autoren variieren hierbei die durch Kondensstreifen induzierte Klimawirkung mit Faktoren zwischen 0 (Annahme keiner Klimawirkung von Kondensstreifen) und 3 (Annahme der dreifachen Klimawirkung, wie sie durch die aCCFs in V1.0 berechnet wird) und untersuchen die daraus resultierenden Paretofronten für eine Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit. Die Ergebnisse verdeutlichen die Robustheit der Minderung der Klimawirkung in Abhängigkeit von den Kondensstreifeneffekten. Für beide Analysetage kann trotz der Variation des Kondensstrei-

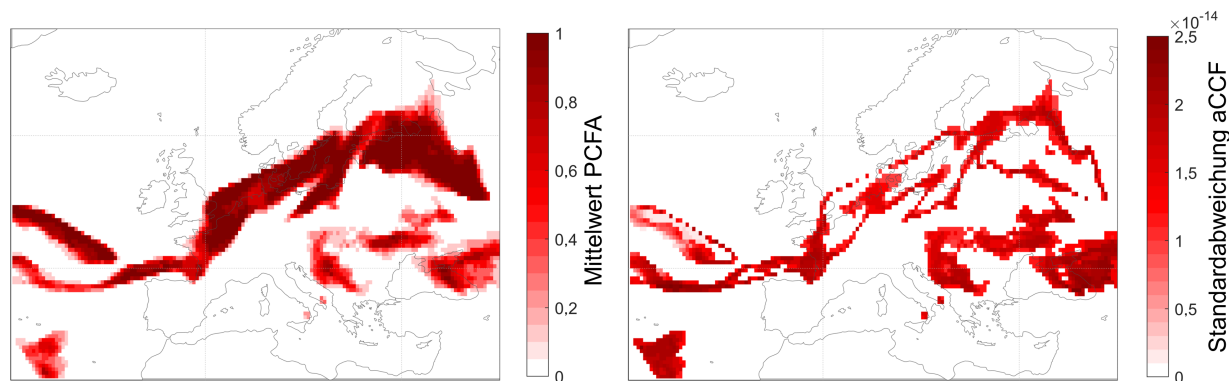


Abbildung A.18: Unsicherheiten in den meteorologischen Bedingungen (Mittelwert der ISSR-Variable, links) und der daraus resultierenden Klimawirkung (Standardabweichung der $aCCF_{merged}$, rechts) anhand unterschiedliche Modellläufe des ERA5-Modells für 225 hPa am 16.6.2018 um 12:00 Uhr (UTC).

feneinflusses eine deutliche Minderung der Klimawirkung durch die Maßnahme gezeigt werden, welche allerdings in ihrer Höhe mit dem Einfluss der Kondensstreifeneffekte variiert. Bei einem höheren Kondensstreifeneinfluss können bei der gleichen *DOC-Penalty* deutlich höhere Mitigationspotentiale erreicht werden [67].

Im Zuge des ClimOP-Projekts wird außerdem untersucht, wie sich die Veränderung des Klimas auf die Effektivität von betrieblichen Maßnahmen zur Minderung der Klimawirkung im Luftverkehr auswirkt. Durch langfristige Klimaveränderungen verändern sich die meteorologischen Randbedingungen, was u. a. Auswirkungen auf die Bildung von persistenten Kondensstreifen hat. Dazu werden repräsentative Wassertage für die Zeiträume von 2021 bis 2050 sowie von 2051 bis 2080 auf Basis von Daten des *Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6)* analysiert und im Kontext der Anpassung von Flughöhe und Geschwindigkeit untersucht. Insgesamt ergibt sich ein Anstieg in Feuchte und Temperatur für die Zukunft. Außerdem zeigt sich auch für die zukünftigen Wettersituationen eine Effektivität der betrachteten Mitigationsmaßnahme, allerdings sind die Mitigationspotentiale aufgrund einer geringeren Kondensstreifendistanz im Referenzfall geringer [325]. Weitere Analysen sind in diesem Kontext notwendig, um den Zusammenhang auch für einen größeren Analysezeitraum zu untersuchen und die Gültigkeit der angewendeten Modelle für zukünftige atmosphärische Bedingungen zu zeigen.

Um die unterschiedlichen Unsicherheiten von CO_2 - und Nicht- CO_2 -Effekten bei der Bewertung zu berücksichtigen und das Risiko einer nachteiligen Implementierung von betrieblichen Maßnahmen zu reduzieren, können die Unsicherheitsverteilungen aus Lee et al. (2021) vereinfacht genutzt werden, um untere Grenzen für die Effekte der Nicht- CO_2 -Spezies zu definieren [32]. Analog zu Niklaß et al. (2025) können Verteilungen für die speziesindividuellen Unsicherheiten auf Basis der angegebenen bestmöglichen Schätzungen sowie der 5- und 95-Prozent-Konfidenzintervalle abgeleitet und die betrieblichen Maßnahmen für unterschiedliche Konfidenzintervalle verglichen werden [304]. Dabei wird sich auf die 10- bis 40-Prozent-Quantile konzentriert, d. h., die speziesindividuelle Klimawirkung wird im Fall des 10-Prozent-Quantil (40 %) in 90 % (60 %) der Fälle höher als der berechnete Wert geschätzt. Die Ergebnisse in den Mitigationspotentialen aus den im Detail betrachteten Maßnahmen aus Kapitel 5.3 sind in Abbildung A.19 dargestellt (vgl. Abb. 5.11). Im betrachteten Beispiel der Fünfzig-Missionen-Stichprobe bleibt der Maßnahmenvergleich

trotz der Variation der Klimawirkung robust. So ist auch bei der Betrachtung des 10-Prozent-Quantils die Reduktion von Flughöhe und Geschwindigkeit noch immer die effektivste Maßnahme, während die Breitengradadaptation das geringste Minderungspotential aufweist.

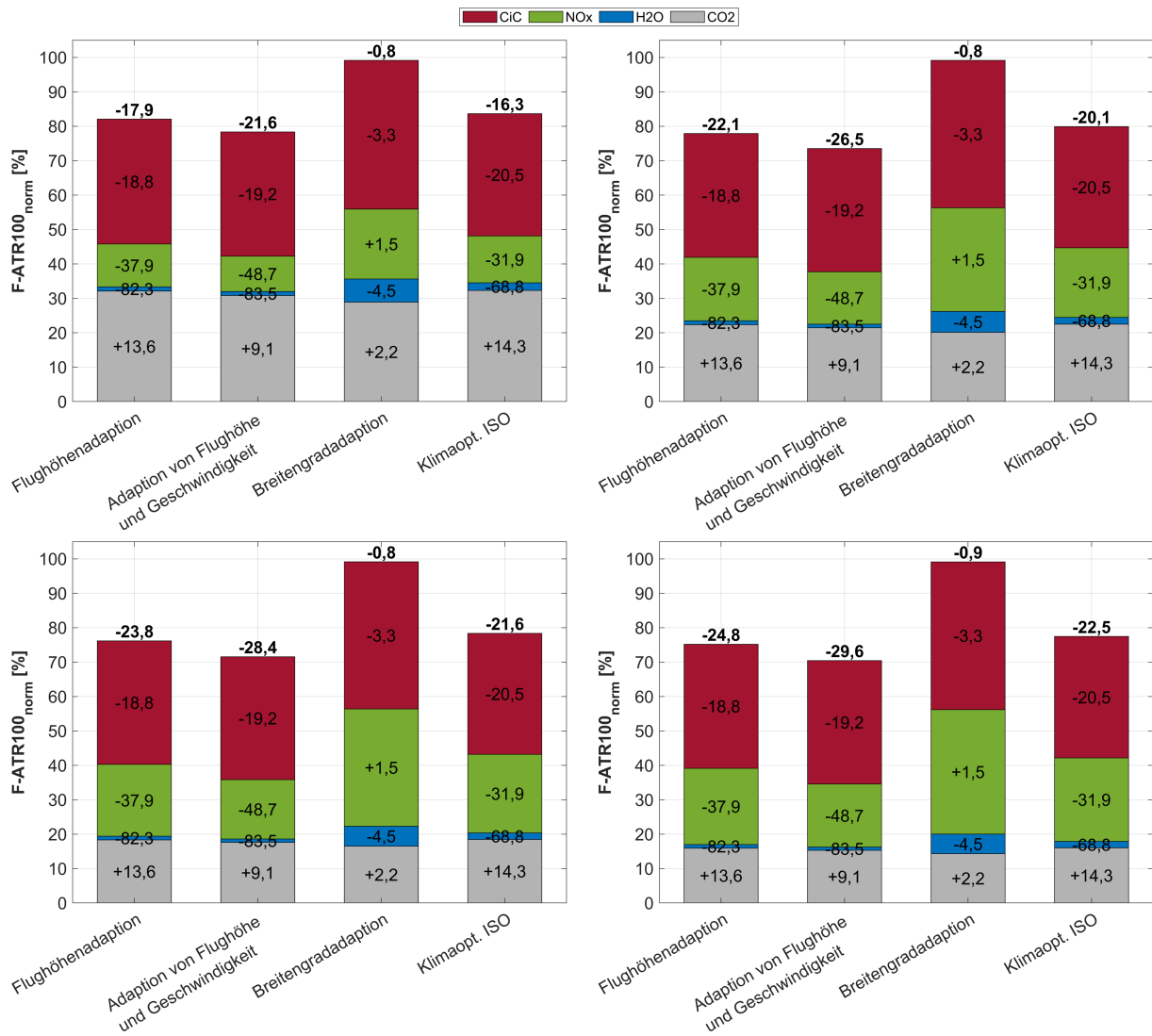


Abbildung A.19: Unterschiede in den Mitigationspotentialen verschiedener Maßnahmen bei unterschiedlicher Gewichtung der Nicht-CO₂-Effekte zur Berücksichtigung von Unsicherheiten (vgl. Abb. 5.11): 10-Prozent-Quantil (oben, links), 20-Prozent-Quantil (oben, rechts), 30-Prozent-Quantil (unten, links) und 40-Prozent-Quantil (unten, rechts).

Obwohl die Unsicherheiten der Quantifizierung sowohl für die Nicht-CO₂-Effekte im Allgemeinen als auch für die Kondensstreifeneffekte im Speziellen hoch sind, zeigen bisherige Analysen in diesem Kontext, dass sowohl eine Minderung der Klimawirkung durch betriebliche Maßnahmen als auch ein Vergleich dieser Maßnahmen robust möglich ist. Nichtsdestotrotz gilt es weiterhin, die Unsicherheiten in der Quantifizierung der Klimateffekte zu reduzieren, um effektive Maßnahmen identifizieren und implementieren zu können.

Literatur

- [1] CUMPSTY, N.; MAVRIS, D.; KIRBY, M.: *ICAO 2019 Environmental Report: Aviation and Environment, Destination Green – The Next Chapter*. 2019. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/envrep2019.aspx> Zugriff: 28.3.2025
- [2] GREWE, V.; GANGOLI RAO, A.; GRÖNSTEDT, T.; XISTO, C.; LINKE, F.; MELKERT, J.; ET AL.: Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. In: *Nature Communications* 12 (2021), 06, S. 3841:10. – DOI 10.1038/s41467-021-24091-y
- [3] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION AUTHORITY (ICAO): *Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis*. 2020. https://www.icao.int/sustainability/Documents/Covid-19/ICAO_coronavirus_Econ_Impact.pdf Zugriff: 28.3.2025
- [4] LIU, Z.; CIAIS, P.; DENG, Z.; LEI, R.; DAVIS, S.; FENG, S.; ET AL.: Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. In: *Nature Communications* 11 (2020). – DOI 10.1038/s41467-020-18922-7
- [5] LE QUÉRÉ, C.; JACKSON, R. B.; JONES, M. W.; SMITH, . A. J. P. and A. A. J. P. and Abernethy; ANDREW, R. M.; ET AL.: Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. In: *Nature Climate Change* 10 (2020), S. 647–653. – DOI 10.1038/s41558-020-0797-x
- [6] GOLLNICK, V.; WEDER, C.: Die Covid-19-Pandemie – Anlass oder Ursache der Konsolidierungsphase in der Luftfahrt. In: *Internationales Verkehrswesen* 73 (2021), Nr. 2, S. S. 24–29
- [7] EUROCONTROL: *Forecast Update 2021-2027 European Flight Movements and Service Units – Three Scenarios for Recovery from Covid-19*. 2021. <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-update-2021-2027> Zugriff: 28.3.2025
- [8] EUROCONTROL: *Forecast Update 2022-2024 Forecast Update – Recovery from COVID-19 and Russian invasion of Ukraine*. 2022. <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-update-2022-2024> Zugriff: 28.3.2025
- [9] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA): *Global Outlook for Air Transport - Protectionism on the rise*. 2025. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport-june-2025/> Zugriff: 1.7.2025
- [10] AIRBUS: *Global Market Forecast 2021-2040*. 2020. <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/global-market-forecast> Zugriff: 19.4.2022
- [11] THE BOEING COMPANY: *Commercial Market Outlook 2021 – 2040*. 2021. <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/> Zugriff: 19.4.2022

- [12] EUROPEAN COMMISSION: DIRECTORATE-GENERAL FOR MOBILITY AND TRANSPORT AND DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH AND INNOVATION: *Flightpath 2050 – Europe’s vision for aviation – Maintaining global leadership and serving society’s needs*. Publications Office of the European Union, 2011 <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/296a9bd7-fef9-4ae8-82c4-a21ff48be673>. – Zugriff: 7.7.2022
- [13] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA): *Economic Performance of the airline industry*. 2020. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/airline-industry-economic-performance---november-2020---report/> Zugriff: 07.07.2022
- [14] AVIATION BENEFITS BEYOND BORDERS (ATAG): *Aviation Benefit Report*. 2024. <https://aviationbenefits.org/downloads/aviation-benefits-beyond-borders-2024/> Zugriff: 7.7.2022
- [15] AVOGADRO, N.; CATTANEO, M.; PALEARI, S.; REDONDI, R.: Replacing short-medium haul intra-European flights with high-speed rail: Impact on CO₂ emissions and regional accessibility. In: *Transport Policy* 114 (2021), S. S. 25–39. – DOI /10.1016/j.tranpol.2021.08.014. – ISSN 0967–070X
- [16] ÅKERMAN, J.; KAMB, A.; LARSSON, J.; NÄSSÉN, J.: Low-carbon scenarios for long-distance travel 2060. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 99 (2021), S. 103010. – DOI 10.1016/j.trd.2021.103010
- [17] DOBRUSZKES, F.: High-speed rail and air transport competition in Western Europe: A supply-oriented perspective. In: *Transport Policy* 18 (2011), Nr. 6, S. 870–879. – DOI 10.1016/j.tranpol.2011.06.002
- [18] *Kapitel Low Carbon Public Transport and the Competition with Aviation*. In: LOGAN, K. G.; HASTINGS, A.; NELSON, J. D.: *Transportation in a Net Zero World: Transitioning Towards Low Carbon Public Transport*. Cham, Schweiz : Springer International Publishing, 2022. – ISBN 978–3–030–96674–4, S. 81–90
- [19] *Kapitel Summary for Policymakers*. In: EDENHOFER, O.; PICHs-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K.; ARVIZU, D.; BRUCKNER, T.; ET AL.: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom und New York, USA : Cambridge University Press, 2011
- [20] FUGLESTVEDT, J. S.; BERNTSEN, T. K.; GODAL, O.; SAUSEN, R.; SHINE, K. P.; SKODVIN, T.: Metrics of climate change: Assessing radiative forcing and emission indices. In: *Climatic Change* 58 (2003), S. 267–331. – DOI 10.1023/A:1023905326842
- [21] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC); CORE WRITING TEAM, H. L. (Hrsg.); ROMERO, J. (Hrsg.): *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genf, Schweiz : IPCC, 2023. – 35–115 S. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [22] *Kapitel Executive Summary*. In: WUEBBLES, D.J.; FAHEY, D.W.; HIBBARD, K.A.; DEANGELO, B.; DOHERTY, S.; HAYHOE, K.; ET AL.: *Climate Science Special Report:*

- Fourth National Climate Assessment, Volume I.* Washington DC, USA : U.S. Global Change Research Program, 2017
- [23] NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION: *Climate at a Glance: Global Time Series.* <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>. 2025
- [24] UNITED NATIONS: *Paris Agreement - Status of Ratification.* <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification> Zugriff: 20.03.2025
- [25] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK): *Abkommen von Paris.* 2022. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html> Zugriff: 8.4.2022
- [26] UNITED NATIONS: *Paris Agreement.* <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> Zugriff: 8.7.2022
- [27] UNITED NATIONS: *Shipping Aviation and Paris.* <https://unfccc.int/news/shipping-aviation-and-paris> Zugriff: 16.3.2023
- [28] *Kapitel Transport.* In: SIMS, R.; SCHAEFFER, R.; CREUTZIG, F.; CRUZ-NÚÑEZ, X.; D'AGOSTO, M.; ET AL.: *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, United Kingdom und New York, USA : Cambridge University Press, 2014
- [29] BERNTSEN, T.; FUGLESTVEDT, J.: Global temperature responses to current emissions from the transport sectors. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (2008), Nr. 49, S. 19154–19159. – DOI 10.1073/pnas.0804844105
- [30] FUGLESTVEDT, J.; BERNTSEN, T.; MYHRE, G.; RYPDAL, K.; SKEIE, R. B.: Climate forcing from the transport sectors. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (2008), Nr. 2, S. 454–458. – DOI 10.1073/pnas.0702958104
- [31] BORKEN-KLEEFELD, J.; BERNTSEN, T.; FUGLESTVEDT, J.: Specific Climate Impact of Passenger and Freight Transport. In: *Environmental Science & Technology* 44 (2010), Nr. 15, S. 5700–5706. – DOI 10.1021/es9039693
- [32] LEE, D. S.; FAHEY, D. W.; SKOWRON, A.; ALLEN, M. R.; BURKHARDT, U.; CHEN, Q.; ET AL.: The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. In: *Atmospheric Environment* 244 (2021), S. 117834:29. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2020.117834
- [33] LEE, D. S.; PITARI, G.; GREWE, V.; GIERENS, K.; PENNER, J. E.; PETZOLD, A.; ET AL.: Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. Transport Impacts on Atmosphere and Climate: The ATTICA Assessment Report. In: *Atmospheric Environment* 44 (2010), Nr. 37, S. 4678–4734. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2009.06.005
- [34] FICHTER, C.: *Climate impact of air traffic emissions in dependency of the emission location and altitude.* Manchester, Großbritannien, Manchester Metropolitan University, Diss., April 2009

- [35] KLÖWER, M.; ALLEN, M. R.; LEE, D. S.; PROUD, S. R.; GALLAGHER, L.; SKOWRON, A.: Quantifying aviation's contribution to global warming. In: *Environmental Research Letters* 16 (2021), Nr. 10, S. 104027. – DOI 10.1088/1748-9326/ac286e
- [36] AVIATION BENEFITS BEYOND BORDERS (ATAG): *Waypoint 2050*. September 2021. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/> Zugriff: 5.10.2022
- [37] EUROPEAN COMMISSION: *Reducing emissions from aviation*. 2021. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-aviation_en Zugriff: 7.7.2022
- [38] PEETERS, P.; HIGHAM, J.; KUTZNER, D.; COHEN, S.; GÖSSLING, S.: Are technology myths stalling aviation climate policy? In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 44 (2016), S. 30–42. – DOI 10.1016/j.trd.2016.02.004
- [39] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION AUTHORITY (ICAO): *Climate Change*. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/climate-change.aspx> Zugriff: 7.7.2022
- [40] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA): *Press release: Net-Zero Carbon Emissions by 2050*. 2021. <https://www.iata.org/en/pressroom/pressroom-archive/2021-releases/2021-10-04-03/> Zugriff: 7.7.2022
- [41] EUROPEAN COMMISSION: *Fly the Green Deal - Europe's Vision for Sustainable Aviation, Report of the Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE)*. Publications Office of the European Union, 2022 https://www.acare4europe.org/wp-content/uploads/2022/06/20220815_Fly-the-green-deal_LR-1.pdf. – Zugriff: 28.3.2025
- [42] NIKLASS, M.: *Ein systemanalytischer Ansatz zur Internalisierung der Klimawirkung der Luftfahrt*. Hamburg, Deutschland, Technische Universität Hamburg, Diss., Januar 2019
- [43] DALEY, B.: *Air Transport and the Environment*. Routledge, 2010. <http://doi.org/10.4324/9781315566320>. – ISBN 9781315566320
- [44] CABRERA, E.; MELO DE SOUSA, J.: Use of Sustainable Fuels in Aviation—A Review. In: *Energies* 15 (2022), S. 2440. – DOI 10.3390/en15072440
- [45] VOIGT, C.; KLEINE, J.; SAUER, D.; MOORE, R.; BRÄUER, T.; LE CLERCQ, P.; ET AL.: Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness. In: *Communications Earth & Environment* 2 (2021), S. 114. – DOI 10.1038/s43247-021-00174-y
- [46] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION AUTHORITY (ICAO): *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx> Zugriff: 7.7.2022
- [47] GÖSSLING, S.; LYLE, C.: Transition policies for climatically sustainable aviation. In: *Transport Reviews* 41 (2021), Nr. 5, S. 643–658. – DOI 10.1080/01441647.2021.1938284

- [48] COOPER, T.; REAGAN, I.; PORTER, C.; FRANZONI, C.: *Global Fleet and MRO Market Forecast 2021 -2031*. 2021. <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2021/jan/global-fleet-and-mro-market-forecast-2021-2031.html>
Zugriff: 7.7.2022
- [49] BURKHARDT, U.; BOCK, L.; BIER, A.: Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions. In: *npj Climate and Atmospheric Science* 1 (2018). – DOI 10.1038/s41612-018-0046-4
- [50] SCHUMANN, U.: Influence of propulsion efficiency on contrail formation. In: *Aerospace Science and Technology* 4 (2000), Nr. 6, S. 391–401. – DOI 10.1016/S1270-9638(00)01062-2
- [51] LINKE, F.: The global fuel saving potential of intermediate stop operations considering meteorological and operational influences. In: *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. Belo Horizonte, Brasilien, September 2018
- [52] LINKE, F.; GREWE, V.; GOLLNICK, V.: The Implications of Intermediate Stop Operations on Aviation Emissions and Climate. In: *Meteorologische Zeitschrift* 26 (2017), 03. – DOI 10.1127/metz/2017/0763
- [53] GREEN, J.E.: Air Travel – Greener by Design Mitigating the environmental impact of aviation: Opportunities and priorities. In: *The Aeronautical Journal* 109 (2005), Nr. 1099, S. 361–416. – DOI 10.1017/S0001924000000841
- [54] NANGIA, R. K.: Introducing Air to Air Refuelling (AAR) into Civil Aviation – Why & How. In: *Challenges in European Airspace, 5th CEAS Air and Space Conference*, 2015
- [55] DONLEY, J.: Fuel Savings of Optimally Routed Flights. In: *Journal of Air Traffic Control* 54 (2012), S. S. 38–42
- [56] PALOPO, K.; WINDHORST, R. D.; SUHARWARDY, S.; LEE, H.: Wind-Optimal Routing in the National Airspace System. In: *Journal of Aircraft* 47 (2010), Nr. 5, S. 1584–1592. – DOI 10.2514/1.C000208
- [57] ZILLIES, J.; KUENZ, A.; SCHMITT, A.; SCHWOCH, G.; MOLLWITZ, V.; EDINGER, C.: Wind Optimized Routing: An Opportunity To Improve European Flight Efficiency? In: *2014 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Conference Proceedings*. Herndon, USA, April 2014
- [58] MARKS, T.; DAHLMANN, K.; GREWE, V.; GOLLNICK, V.; LINKE, F.; MATTHES, S.; ET AL.: Climate Impact Mitigation Potential of Formation Flight. In: *Aerospace* 8 (2021), Nr. 1. – DOI 10.3390/aerospace8010014
- [59] SWAID, M.; MARKS, T.; LINKE, F.; GOLLNICK, V.: Fuel Planning Strategies Considering Operational Uncertainties of Aerodynamic Formation Flight. In: *Aerospace* 8 (2021), Nr. 3. – DOI 10.3390/aerospace8030067
- [60] MATTHES, S.; LIM, L.; BURKHARDT, U.; DAHLMANN, K.; DIETMÜLLER, S.; GREWE, V.; ET AL.: Mitigation of Non-CO₂ Aviation’s Climate Impact by Changing Cruise Altitudes. In: *Aerospace* 8 (2021), Nr. 2. – DOI 10.3390/aerospace8020036

- [61] FRÖMMING, C.; PONATER, M.; DAHLMANN, K.; GREWE, V.; LEE, D. S.; SAUSEN, R.: Aviation-induced radiative forcing and surface temperature change in dependency of the emission altitude. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117 (2012), Nr. D19. – DOI 10.1029/2012JD018204
- [62] YIN, F.; GREWE, V.; FRÖMMING, C.; YAMASHITA, H.: Impact on flight trajectory characteristics when avoiding the formation of persistent contrails for transatlantic flights. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 65 (2018), S. 466–484. – DOI 10.1016/j.trd.2018.09.017
- [63] LÜHRS, B.; LINKE, F.; MATTHES, S.; GREWE, V.; YIN, F.: Climate Impact Mitigation Potential of European Air Traffic in a Weather Situation with Strong Contrail Formation. In: *Aerospace* 8 (2021), Nr. 2. – DOI 10.3390/aerospace8020050
- [64] MATTHES, S.; LÜHRS, B.; DAHLMANN, K.; GREWE, V.; LINKE, F.; YIN, F.; ET AL.: Climate-Optimized Trajectories and Robust Mitigation Potential: Flying ATM4E. In: *Aerospace* 7 (2020), Nr. 11. – DOI 10.3390/aerospace7110156
- [65] TEOH, R.; SCHUMANN, U.; MAJUMDAR, A.; STETTLER, M. E. J.: Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption. In: *Environmental Science & Technology* 54 (2020), Nr. 5, S. 2941–2950. – DOI 10.1021/acs.est.9b05608
- [66] DAHLMANN, K.; KOCH, A.; LINKE, F.; LÜHRS, B.; GREWE, V.; OTTEN, T.; ET AL.: Climate-Compatible Air Transport System—Climate Impact Mitigation Potential for Actual and Future Aircraft. In: *Aerospace* 3 (2016), Nr. 4. – DOI 10.3390/aerospace3040038
- [67] ZENGERLING, Z. L.; LINKE, F.; WEDER, C. M.; DIETMÜLLER, S.; MATTHES, S.; PETER, P.: Flying low and slow: Application of algorithmic climate change functions to assess the climate mitigation potential of reduced cruise altitudes and speeds on different days. In: *Meteorologische Zeitschrift* 33 (2023), Nr. 1, S. 67–81. – DOI 10.1127/metz/2023/1194
- [68] KOCH, A.: *Climate Impact Mitigation Potential given by Flight Profile and Aircraft Optimization*. Hamburg, Deutschland, Diss., November 2013
- [69] FUGLESTVEDT, J. S.; SHINE, K. P.; BERNTSEN, T.; COOK, J.; LEE, D. S.; STENKE, A.; ET AL.: Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics. Transport Impacts on Atmosphere and Climate: The ATTICA Assessment Report. In: *Atmospheric Environment* 44 (2010), Nr. 37, S. 4648–4677. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2009.04.044
- [70] DALLARA, E. S.; KROO, I. M.; WAITZ, I. A.: Metric for Comparing Lifetime average Climate Impact of Aircraft. In: *AIAA Journal* 49 (2011), Nr. 8, S. 1600–1613. – DOI 10.2514/1.J050763
- [71] GREWE, V.; DAHLMANN, K.: How ambiguous are climate metrics? And are we prepared to assess and compare the climate impact of new air traffic technologies? In: *Atmospheric Environment* 106 (2015), S. 373–374. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2015.02.039

- [72] SCHUMANN, U.; GRAF, K.; MANNSTEIN, H.: Potential to reduce the climate impact of aviation by flight level changes. In: *3rd AIAA Atmospheric Space Environments Conference*. Honolulu, USA, Juni 2011
- [73] LEVINE, M. J.; BERNARDO, J. E.; PFAENDER, H.; KIRBY, M.; MAVRIS, D. N.: Demonstration of a Framework for Comparing Aviation Environmental Impact Mitigation Strategies. In: *Journal of Aircraft* 56 (2019), Nr. 3, S. 1116–1125. – DOI 10.2514/1.C035170
- [74] LANGHANS, S.; LINKE, F.; GOLLNICK, V.: System Analysis for an Intermediate Stop Operations Concept on Long Range Routes. In: *Journal of Aircraft* 50 (2013), Nr. 1, S. 29–37. – DOI 10.2514/1.C031446
- [75] GREWE, V.; DAHLMANN, K.; FLINK, J.; FRÖMMING, C.; GHOSH, R.; GIERENS, K.; ET AL.: Mitigating the Climate Impact from Aviation: Achievements and Results of the DLR WeCare Project. In: *Aerospace* 4 (2017), Nr. 3. – DOI 10.3390/aerospace4030034
- [76] GREWE, V.; LINKE, F.: Eco-efficiency in aviation. In: *Meteorologische Zeitschrift* 26 (2017). – DOI 10.1127/metz/2017/0762
- [77] CLIMOP: *ClimOP: Reducing the climate impact of aviation*. <https://www.climop-h2020.eu/> Zugriff: 21.10.2022
- [78] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION AUTHORITY (ICAO): *Operational Measures*. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/operational-measures.aspx> Zugriff: 21.10.2022
- [79] BRUNDTLAND, G. H.: Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. <http://www.un-documents.net/ocf-ov.htm>. 1987. – Vereinte Nationen, Dokument A/42/427. – Zugriff: 30.2.2023
- [80] HAUFF, V. (Hrsg.): *Unsere gemeinsame Zukunft – der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*. Greven, Deutschland : De Gruyter Oldenbourg, 1987. – ISBN 9783110722536
- [81] VON HAUFF, M.: *Nachhaltige Entwicklung - Grundlagen und Umsetzung*. Berlin, Deutschland und Boston, USA : De Gruyter Oldenbourg, 2021. – ISBN 9783110722536
- [82] KATES, R.W.; PARRIS, T.M.; LEISEROWITH, A.A.: What is sustainable development? Goals, indicators, values, and practice. In: *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 47 (2005), April, S. 8–21
- [83] BLOCK, T.; PAREDIS, E.: Four misunderstandings about sustainability and transitions. In: VAN POECK, K. (Hrsg.); ÖSTMAN, L. (Hrsg.); ÖHMAN, J. (Hrsg.): *Sustainable Development Teaching: Ethical and Political Challenges*. Routledge, Mai 2019, S. 15–27. – DOI 10.4324/9781351124348-2
- [84] PURVIS, B.; MAO, Y.; ROBINSON, D.: Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. In: *Sustainability Science* 14 (2019), S. 681–695. – DOI 10.1007/s11625-018-0627-5

- [85] LOZANO, R.: Envisioning sustainability three-dimensionally. In: *Journal of Cleaner Production* 16 (2008), Nr. 17, S. 1838–1846. – DOI 10.1016/j.jclepro.2008.02.008
- [86] UNITED NATIONS: *The Sustainable Development Goals Report*. 2022
- [87] SCHÄFER, K.: *Nachhaltigkeitsorientierter Flugzeugentwurf*. Aachen, Deutschland, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Diss., Juli 2017
- [88] DUBE, K.; NHAMO, G.: Major Global Aircraft Manufacturers and Emerging Responses to the SDGs Agenda. In: NHAMO, G. (Hrsg.); ODULARU, G. O. A. (Hrsg.); MJIMBA, V. (Hrsg.): *Scaling up SDGs Implementation: Emerging Cases from State, Development and Private Sectors*. Springer International Publishing, 2020, S. 99–113
- [89] AVIATION BENEFITS BEYOND BORDERS (ATAG): *Flying in Formation - Air transport and sustainable development goals*. https://aviationbenefits.org/media/166149/inside_abb2017_atag_web_fv.pdf. Oktober 2017. – Zugriff: 7.7.2023
- [90] UNITED NATIONS: *International Civil Aviation Organization (ICAO)*. <https://sdgs.un.org/un-system-sdg-implementation/international-civil-aviation-organization-icao-34579>. – Zugriff: 7.7.2023
- [91] PINHEIRO MELO, S.; BARKE, A.; CERDAS, F.; THIES, C.; MENNENGA, M.; SPENGLER, T. S.; HERRMANN, C.: Sustainability Assessment and Engineering of Emerging Aircraft Technologies—Challenges, Methods and Tools. In: *Sustainability* 12 (2020), Nr. 14. – DOI 10.3390/su12145663
- [92] BACHMANN, J.; HIDALGO, C.; BRICOUT, S.: Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review. In: *Science China Technological Sciences* 60 (2017), S. 1301–1317. – DOI 10.1007/s11431-016-9094-y
- [93] LÉONARD, P. L. Y.; NYLANDER, J. W.: Sustainability assessment of composites in aero-engine components. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 1* (2020), S. 1989–1998. – DOI 10.1017/dsd.2020.29
- [94] THIES, C.; KIECKHÄFER, K.; SPENGLER, T. S.; SODHI, M. S.: Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries. In: *Procedia CIRP* 80 (2019), S. 292–297. – DOI 10.1016/j.procir.2018.12.009
- [95] WANG, Z.; OSSEWEIJER, P.; DUQUE, J. P.: Assessing social sustainability for biofuel supply chains: The case of aviation biofuel in Brazil. In: *2017 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*. Phoenix, USA, April 2017
- [96] GLÖSER-CHAHOU, S.; PFAFF, M.; SCHULTMANN, F.: The link between product service lifetime and GHG emissions: A comparative study for different consumer products. In: *Journal of Industrial Ecology* 25 (2021), Nr. 2, S. 465–478. – DOI 10.1111/jiec.13123
- [97] VAN NES, N.; CRAMER, J.: Product lifetime optimization: a challenging strategy towards more sustainable consumption patterns. In: *Journal of Cleaner Production* 14 (2006), Nr. 15, S. 1307–1318. – DOI 10.1016/j.jclepro.2005.04.006

- [98] GNADT, A. R.; SPETH, R. L.; SABNIS, J. S.; BARRETT, S. R.: Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft. In: *Progress in Aerospace Sciences* 105 (2019), S. 1–30. – DOI 10.1016/j.paerosci.2018.11.002
- [99] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC); HOUGHTON, J.T. (Hrsg.); DING, Y. (Hrsg.); GRIGGS, D.J. (Hrsg.); NOGUER, M. (Hrsg.); VAN DER LINDEN, P.J. (Hrsg.); DAI, X. (Hrsg.); MASKELL, K. (Hrsg.); JOHNSON, C.A. (Hrsg.): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom und New York, USA : Cambridge University Press, 2001
- [100] *Kapitel Summary for Policymakers*. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom und New York, USA : Cambridge University Press, 2023
- [101] RACHNER, M.: Die Stoffeigenschaften von Kerosin Jet A-1. In: *DLR-Mitteilungen 98-01* (1998), Nr. 1
- [102] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION AUTHORITY (ICAO): *ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology version 13.1*. 2024. <https://applications.icao.int/icec/Home/Methodology> Zugriff: 28.3.2025
- [103] BARRETT, S.; PRATHER, M.; PENNER, J.; SELKIRK H. BALASUBRAMANIAN, S.; DOPELHEUER, A.; FLEMING, G.; ET AL.: Guidance on the Use of AEDT Gridded Aircraft Emissions in Atmospheric Models. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.719.2090&rep=rep1&type=pdf>. 2010. – Massachusetts Institute for Technology, Laboratory for Aviation and the Environment, LAE-2010-008-N. – Zugriff: 1.11.2023
- [104] FLEMING, G.; ZIEGLER, U.: *ICAO Environmental Report: Environmental Trends in Aviation to 2050*. <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019>. 2019. – Zugriff: 01.11.2023
- [105] MILLER, M.; BROOK, P.; EYERS, C.: Reduction of Sulphur Limits in Aviation Fuel Standards (SULPHUR). <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/2009-SULPHUR-Reduction%20of%20sulphur%20limits%20in%20aviation%20fuel%20standards-Final%20Report.pdf>. 2010. – EASA Forschungsbericht. – Zugriff: 01.11.2023
- [106] KIM, B. Y.; FLEMING, G. G.; LEE, J. J.; WAITZ, I. A.; CLARKE, J.; BALASUBRAMANIAN, S.; ET AL.: System for assessing Aviation’s Global Emissions (SAGE), Part 1: Model description and inventory results. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12 (2007), Nr. 5, S. 325–346. – DOI 10.1016/j.trd.2007.03.007. – ISSN 1361–9209
- [107] BRASSEUR, G. P.; GUPTA, M.; ANDERSON, B. E.; BALASUBRAMANIAN, S.; BARRETT, S.; DUDA, D.; ET AL.: Impact of Aviation on Climate: FAA’s Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 97 (2016), Nr. 4, S. 561–583. – DOI 10.1175/BAMS-D-13-00089.1

- [108] WUEBBLES, D.; GUPTA, M.; KO, M.: Evaluating the impacts of aviation on climate change. In: *EOS, Transactions, American Geophysical Union* 88 (2007), Nr. 14, S. 157–160. – DOI 10.1029/2007EO140001
- [109] HASSELMANN, K.; HASSELMANN, S.; GIERING, R.; OCANA, V.; STORCH, H. V.: Sensitivity Study of Optimal CO₂ Emission Paths Using a Simplified Structural Integrated Assessment Model (SIAM). In: *Climate Change* 37 (1997), S. 345–386. – DOI 10.1023/A:1005339625015
- [110] *Kapitel Changing State of the Climate System*. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC): *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom und New York, USA : Cambridge University Press, 2023, S. 287–422
- [111] KIEHL, J. T.; TRENBERTH, K. E.: Earth’s Annual Global Mean Energy Budget. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (1997), Nr. 2, S. 197–208. – DOI 10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2
- [112] GREWE, V.; STENKE, A.: AirClim: an efficient tool for climate evaluation of aircraft technology. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 8 (2008), Nr. 16, S. 4621–4639. – DOI 10.5194/acp-8-4621-2008
- [113] FORSTER, C.; STOHL, A.; JAMES, P.; THOURET, V.: The residence times of aircraft emissions in the stratosphere using a mean emission inventory and emissions along actual flight tracks. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (2003), Nr. D12. – DOI 10.1029/2002JD002515
- [114] DAHLMANN, K.: *Eine Methode zur effizienten Bewertung von Maßnahmen zur Klimaoptimierung des Luftverkehrs*. München, Deutschland, Ludwig-Maximilians-Universität München, Diss., März 2012
- [115] WILCOX, L.J.; SHINE, K.P.; HOSKINS, B.J.: Radiative forcing due to aviation water vapour emissions. In: *Atmospheric Environment* 63 (2012), S. 1–13. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2012.08.072. – ISSN 1352–2310
- [116] DAHLMANN, K.; GREWE, V.; FRÖMMING, C.; BURKHARDT, U.: Can we reliably assess climate mitigation options for air traffic scenarios despite large uncertainties in atmospheric processes? In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 46 (2016), S. 40–55. – DOI 10.1016/j.trd.2016.03.006
- [117] SCHAEFER, M.: *Development of a Forecast Model for Global Air Traffic Emissions*. Bochum, Deutschland, Ruhr-Universität Bochum, Diss., August 2012
- [118] SAUSEN, R.; SCHUMANN, U.: Estimates of the Climate Response to Aircraft CO₂ and NO_x-Emission Scenarios. In: *Climatic Change* 44 (2000), S. 27–58. – DOI 10.1023/A:1005579306109
- [119] LEE, D. S.; FAHEY, D. W.; FORSTER, P. M.; NEWTON, P. J.; WIT, R. C.; LIM, L. L.; ET AL.: Aviation and global climate change in the 21st century. In: *Atmospheric Environment* 43 (2009), Nr. 22, S. 3520–3537. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024

- [120] SAUSEN, R.; ISAKSEN, I.; GREWE, V.; HAUGLUSTAINE, D.; LEE, D. S.; MYHRE, G.; ET AL.: Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999). In: *Meteorologische Zeitschrift* 14 (2005), Nr. 4, S. 555–561. – DOI 10.1127/0941–2948/2005/0049
- [121] HOLMES, C. D.; TANG, Q.; PRATHER, M. J.: Uncertainties in climate assessment for the case of aviation NO. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (2011), Nr. 27, S. 10997–11002. – DOI 10.1073/pnas.1101458108
- [122] MYHRE, G.; NILSEN, J. S.; GULSTAD, L.; SHINE, K. P.; ROGNERUD, B.; ISAKSEN, I. S. A.: Radiative forcing due to stratospheric water vapour from CH₄ oxidation. In: *Geophysical Research Letters* 34 (2007), Nr. 1. – DOI 10.1029/2006GL027472
- [123] PRASHANTH, P.; EASTHAM, S. D.; SPETH, R. L.; BARRETT, S. R. H.: Aerosol formation pathways from aviation emissions. In: *Environmental Research Communications* 4 (2022), Nr. 2, S. 021002. – DOI 10.1088/2515–7620/ac5229
- [124] TERRENOIRE, E.; HAUGLUSTAINE, D. A.; COHEN, Y.; COZIC, A.; VALORSO, R.; LEFÈVRE, F.; MATTHES, S.: Impact of present and future aircraft NO_x and aerosol emissions on atmospheric composition and associated direct radiative forcing of climate. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 22 (2022), Nr. 18, S. 11987–12023. – DOI 10.5194/acp–22–11987–2022
- [125] KÖHLER, M. O.; RÄDEL, G.; SHINE, K. P.; ROGERS, H. L.; PYLE, J. A.: Latitudinal variation of the effect of aviation NO_x emissions on atmospheric ozone and methane and related climate metrics. In: *Atmospheric Environment* 64 (2013), S. 1–9. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2012.09.013
- [126] CASTINO, F.; YIN, F.; GREWE, V.; SOLER, M.; SIMORGH, A.; YAMASHITA, H.; ET AL.: Seasonal Variability of Aircraft Trajectories reducing NO_x-climate Impacts under a Multitude of Weather Patterns. In: *11th SESAR Innovation Days*. Online, Dezember 2021
- [127] KUGELE, A.; JELINEK, F.; GAFFAL, R.: Aircraft Particulate Matter Emission Estimation through all Phases of Flight / EUROCONTROL Experimental Centre. 2005. – Dokument EEC/SEE/2005/0014
- [128] SCHUMANN, U.: On Conditions for Contrail Formation from Aircraft Exhausts. In: *Meteorologische Zeitschrift* 5 (1996), Nr. 1, S. 4–23. – DOI 10.1127/metz/5/1996/4
- [129] SCHMIDT, E.: *Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren: Vortrag am 15. März 1940, Sitzungsperiode 1940/41*. Oldenbourg, 1941 (Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung)
- [130] APPLEMAN, H.: The Formation of Exhaust Condensation Trails by Jet Aircraft. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 34 (1953), Nr. 1, S. 14–20. – DOI 10.1175/1520–0477–34.1.14
- [131] BURKHARDT, U.; KÄRCHER, B.: Global radiative forcing from contrail cirrus. In: *Nature Climate Change* 1 (2011), S. 54–58. – DOI 10.1038/nclimate1068
- [132] MEERKÖTTER, R.; SCHUMANN, U.; DOELLING, D. R.; MINNIS, P.; NAKAJIMA, T.; TSUSHIMA, Y.: Radiative forcing by contrails. In: *Annales Geophysicae* 17 (1999), Nr. 8, S. 1080–1094. – DOI 10.1007/s00585–999–1080–7

- [133] BECKER, M.; LINKE, F.; GOLLNICK, V.: Untersuchungen zum Ansatz der Vermeidung nächtlicher Kondensstreifen zur Reduktion der Klimawirkung des Luftverkehrs. In: *71. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK)*. Dresden, Deutschland, September 2022
- [134] GETTELMAN, A.; CHEN, C.: The climate impact of aviation aerosols. In: *Geophysical Research Letters* 40 (2013), Nr. 11, S. 2785–2789. – DOI 10.1002/grl.50520
- [135] UNGER, N.: Global climate impact of civil aviation for standard and desulfurized jet fuel. In: *Geophysical Research Letters* 38 (2011), Nr. 20. – DOI 10.1029/2011GL049289
- [136] HENDRICKS, J.; KÄRCHER, B.; LOHMANN, U.: Effects of ice nuclei on cirrus clouds in a global climate model. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116 (2011), Nr. D18. – DOI 10.1029/2010JD015302
- [137] NIKLASS, M.; DAHLMANN, K.; GREWE, V.; MAERTENS, S.; PLOHR, M.; SCHEELHAASE, J.; ET AL.: Integration of Non-CO₂ Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA / Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-28_climatechange_20-2020_integrationofnonco2effects_finalreport_.pdf. 2019. – Projektbericht
- [138] HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R.; NAZARENKO, L.; LACIS, A.; SCHMIDT, G. A.; ET AL.: Efficacy of climate forcings. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110 (2005), Nr. D18. – DOI 10.1029/2005JD005776
- [139] WUEBBLES, D.; FORSTER, P.; ROGERS, H.; HERMAN, R.: Issues and Uncertainties Affecting Metrics For Aviation Impacts on Climate. In: *Bulletin of The American Meteorological Society* 91 (2010), S. 491–496. – DOI 10.1175/2009BAMS2840.1
- [140] DIETMÜLLER, S.; MATTHES, S.; DAHLMANN, K.; YAMASHITA, H.; SIMORGH, A.; SOLER, M.; ET AL.: A Python library for computing individual and merged non-CO₂ algorithmic climate change functions: CLIMaCCF V1.0. In: *Geoscientific Model Development* 16 (2023), Nr. 15, S. 4405–4425. – DOI 10.5194/gmd-16-4405-2023
- [141] PONATER, M.; PECHTL, S.; SAUSEN, R.; SCHUMANN, U.; HÜTTIG, G.: Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment. In: *Atmospheric Environment* 40 (2006), Nr. 36, S. 6928–6944. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2006.06.036
- [142] PONATER, M.; MARQUART, S.; SAUSEN, R.; SCHUMANN, U.: On contrail climate sensitivity. In: *Geophysical Research Letters* 32 (2005), Nr. 10. – DOI 10.1029/2005GL022580
- [143] RAP, A.; FORSTER, P. M.; HAYWOOD, J. M.; JONES, A.; B., Olivier: Estimating the climate impact of linear contrails using the UK Met Office climate model. In: *Geophysical Research Letters* 37 (2010), Nr. 20. – DOI 10.1029/2010GL045161
- [144] BICKEL, M.; PONATER, M.; BOCK, L.; BURKHARDT, U.; REINEKE, S.: Estimating the Effective Radiative Forcing of Contrail Cirrus. In: *Journal of Climate* 33 (2020), Nr. 5, S. 1991 – 2005. – DOI 10.1175/JCLI-D-19-0467.1

- [145] RODHE, H.: A Comparison of the Contribution of Various Gases to the Greenhouse Effect. In: *Science* 248 (1990), Nr. 4960, S. 1217–1219. – DOI 10.1126/science.248.4960.1217
- [146] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC): *Climate Change: The 1990 and 1992 IPCC Assessments. IPCC First Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change 1992, 1992
- [147] UNITED NATIONS: *Kyoto Protocol of the united Nations Framework convention on climate change. Conference of the Parties, Third Session*. <https://unfccc.int/documents/2409>. 1997. – Zugriff: 8.7.2022
- [148] SHINE, K.; FUGLESTVEDT, J.; HAILEMARIAM, K.; STUBER, N.: Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases. In: *Climatic Change* 68 (2005), S. 281–302. – DOI 10.1007/s10584-005-1146-9
- [149] MEGILL, L.; DECK, K.; GREWE, V.: Alternative Climate Metrics to the Global Warming Potential Are More Suitable for Assessing Aviation Non-CO₂ Effects. In: *Communications Earth & Environment* 5 (2024), Nr. 1, S. 249. – DOI 10.1038/s43247-024-01423-6
- [150] DAHLMANN, K.; GREWE, V.; MATTHES, S.; YAMASHITA, H.: Climate assessment of single flights: Deduction of route specific equivalent CO₂ emissions. In: *International Journal of Sustainable Transportation* 17 (2021), Nr. 1, S. 29–40. – DOI 10.1080/15568318.2021.1979136
- [151] COLLINS, W. J.; FRAME, D. J.; FUGLESTVEDT, J. S.; SHINE, K. P.: Stable climate metrics for emissions of short and long-lived species—combining steps and pulses. In: *Environmental Research Letters* 15 (2020), Nr. 2, S. 024018. – DOI 10.1088/1748-9326/ab6039
- [152] ALLEN, M.; SHINE, K.; FUGLESTVEDT, J.; MILLAR, R.; CAIN, M.; FRAME, D.; MACEY, A.: A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. In: *npj Climate and Atmospheric Science* 1 (2018), Nr. 16. – DOI 10.1038/s41612-018-0026-8
- [153] SHINDELL, D. T.: Evaluation of the absolute regional temperature potential. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 12 (2012), Nr. 17, S. 7955–7960. – DOI 10.5194/acp-12-7955-2012
- [154] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC); PENNER, J.E. (Hrsg.); LISTER, D.H. (Hrsg.); GRIGGS, D.J. (Hrsg.); DOKKEN, D.J. (Hrsg.); MCFARLAND, M. (Hrsg.): *Aviation and The Global Atmosphere*. Cambridge University Press, 1999 <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/index.php?idp=0>
- [155] *Kapitel The Air Transport System*. In: SCHMITT, D.; GOLLNICK, V.: *The Air Transport System*. Wien, Österreich : Springer Verlag, 2016. – ISBN 978-3-7091-1879-5, S. 1–17

- [156] EUROPÄISCHE UNION: Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation). <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2405/oj>. 2023. – Dokument 32023R2405. – Zugriff: 14.12.2024
- [157] *Kapitel Unternehmensziele*. In: THOMMEN, J.; ACHLEITNER, A.; GILBERT, D. U.; HACHMEISTER, D.; JARCHOW, S.; KAISER, G.: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*. Wiesbaden, Deutschland : Springer Fachmedien, 2023. – ISBN 978-3-658-39395-3, S. 51–58
- [158] ZENGERLING, Z. L.; DAL GESSO, S.; LINKE, F.; CLOCOCEANU, M.; GOLLNICK, V.; PETER, P.; ET AL.: Operational Improvements to Reduce the Climate Impact of Aviation - A Comparative Study from EU Project ClimOP. In: *Applied Sciences* 13 (2023), Nr. 16. – DOI 10.3390/app13169083
- [159] CLIMOP CONSORTIUM: Report on the assessment of operational improvements against identified KPIs. <https://www.climop-h2020.eu/portfolio-items/d1-3-report-on-the-assessment-of-operational-improvements-against-identified-kpis/>. 2020. – Projektbericht D1.3. – Zugriff: 5.4.2023
- [160] BODEGRAVEN, G.: Commercial aircraft DOC methods. In: *Aircraft Design, Systems and Operations Conference*. Dayton, USA, September 1990
- [161] POHYA, A.; WICKE, K.; HARTMANN, J.: Comparison of Direct Operating Cost and Life Cycle Cost-Benefit Methods in Aircraft Technology Assessment. In: *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Kissimmee, USA, Januar 2018
- [162] CLIMOP CONSORTIUM: *A dashboard with the air passengers' opinion*. 2023. <https://www.climop-h2020.eu/portfolio-items/air-passengers-opinion/> Zugriff: 5.4.2023
- [163] GÖSSLING, S.; DOLNICAR, S.: A review of air travel behavior and climate change. In: *WIREs Climate Change* 14 (2023), Nr. 1, S. e802. – DOI 10.1002/wcc.802
- [164] COHEN, S. A.; KANTENBACHER, J.: Flying less: personal health and environmental co-benefits. In: *Journal of Sustainable Tourism* 28 (2020), Nr. 2, S. 361–376. – DOI 10.1080/09669582.2019.1585442
- [165] RAJENDRAN, S.; POPFINGER, M.: Evaluating the substitutability of short-haul air transport by high-speed rail using a simulation-based approach. In: *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 15 (2022), S. 100632. – DOI 10.1016/j.trip.2022.100632
- [166] ROBY, H.: Understanding the development of business travel policies: Reducing business travel, motivations and barriers. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 69 (2014), S. 20–35. – DOI 10.1016/j.tra.2014.08.022
- [167] ARNFALK, P.; PILEROT, U.; SCHILLANDER, P.; GRÖNVALL, P.: Green IT in practice: virtual meetings in Swedish public agencies. In: *Journal of Cleaner Production* 123 (2016), Nr. 1, S. 101–112. – DOI 10.1016/j.jclepro.2015.08.063. – ISSN 0959-6526

- [168] BECKEN, S.; FRIEDL, H.; STANTIC, B.; CONNOLLY, R.; CHEN, J.: Climate crisis and flying: social media analysis traces the rise of “flightshame”. In: *Journal of Sustainable Tourism* 29 (2020), November, S. 1–20. – DOI 10.1080/09669582.2020.1851699
- [169] GÖSSLING, S.; HUMPE, A.; BAUSCH, T.: Does ‘flight shame’ affect social norms? Changing perspectives on the desirability of air travel in Germany. In: *Journal of Cleaner Production* 266 (2020), S. 122015. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.122015
- [170] ALCOCK, I.; WHITE, M. P.; TAYLOR, T.; COLDWELL, D. F.; GRIBBLE, M. O.; EVANS, K. L.; ET AL.: ‘Green’ on the ground but not in the air: Pro-environmental attitudes are related to household behaviours but not discretionary air travel. In: *Global Environmental Change* 42 (2017), S. 136–147. – DOI 10.1016/j.gloenvcha.2016.11.005. – ISSN 0959–3780
- [171] TOMATIS, L.; ABATE, C.; TEDESCHI, A.; GESSO, S. D.; ROLING, P.; ET AL., G. E.: How much do ground operations contribute to global warming? In: *Proceedings of the TSAS2022 Summit*. Toulouse, Frankreich, Oktober 2022
- [172] TŁOCZYŃSKI, D.; WACH-KŁOSKOWSKA, M.; MARTIN-ROJAS, R.: An assessment of airport sustainability measures: A case study of polish airports. In: *Transport Problems* 15 (2020), Nr. 4, Part 2, S. 287–300. – DOI 10.21307/tp-2020-067
- [173] NOORAFZA, M.; SANTOS, B. F.; SHARPANSKYKH, A.; ZENGERLING, Z. L.; WEDER, C. M.; LINKE, F.; GREWE, V.: Airline Network Planning Considering Climate Impact: Assessing New Operational Improvements. In: *Applied Sciences* 13 (2023), Nr. 11. – DOI 10.3390/app13116722
- [174] PRESTO, F.; GOLLNICK, V.; LÜTJENS, K.: Fleet Upgauging and Reducing Flight Frequency. In: *Journal of Air Transportation* 30 (2022), Nr. 1, S. 23–36. – DOI 10.2514/1.D0244
- [175] GÖSSLING, S.; BRODERICK, J.; UPHAM, P.; CERON, J.; DUBOIS, G.; PEETERS, P.; STRASDAS, W.: Voluntary Carbon Offsetting Schemes for Aviation: Efficiency, Credibility and Sustainable Tourism. In: *Journal of Sustainable Tourism* 15 (2007), Nr. 3, S. 223–248. – DOI 10.2167/jost758.0
- [176] RADHAKRISHNAN, K.; ZENGERLING, Z. L.; LINKE, F.; GOLLNICK, V.: Mitigating Climate Impact through Intermediate Stop Operations and Fleet Optimization. In: *4th ECATS International Conference*. Delft, Niederlande, Oktober 2023
- [177] TORENBEEK, E.: *Synthesis of Subsonic Airplane Design*. Delft, Niederlande : Delft University Press, 1982. – ISBN 9024727243
- [178] MATHYS, F.; WILD, P.; WANG, J.: CO₂ Reduction Measures in the Aviation Industry: Current Measures and Outlook. In: *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace* 8 (2021), Nr. 2. – DOI 10.15394/ijaaa.2021.1581
- [179] DAGGETT, D. L.; HENDRICKS, R. C.; FUCKE, L.; EAMES, D. J. H.: Water Injection on Commercial Aircraft to Reduce Airport Nitrogen Oxides. In: *40th Joint Propulsion Conference and Exhibit*. Fort Lauderdale, USA, Juli 2004

- [180] FOUST, M.; THOMSEN, D.; STICKLES, R.; COOPER, C.; DODDS, W.: Development of the GE Aviation Low Emissions TAPS Combustor for Next Generation Aircraft Engines. In: *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Nashville, USA, January 2012
- [181] POUZOLZ, R.; SCHMITZ, O.; KLINGELS, H.: Evaluation of the Climate Impact Reduction Potential of the Water-Enhanced Turbofan (WET) Concept. In: *Aerospace* 8 (2021), Nr. 3. – DOI 10.3390/aerospace8030059
- [182] GOLLNICK, V.: *Untersuchungen zur Bewertung der Transporteffizienz verschiedener Verkehrsmittel*. München, Deutschland, Technische Universität München, Diss., März 2004
- [183] THIESSEN, S.; BODMER, D.; GOLLNICK, V.: A Structured Review of Alternative Fuel Capabilities. In: *4th ECATS International Conference*. Delft, Niederlande, Oktober 2023
- [184] ADLER, E. J.; MARTINS, Jo. R. R. A.: Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts. In: *Progress in Aerospace Sciences* 141 (2023), S. 100922. – DOI 10.1016/j.paerosci.2023.100922. – ISSN 0376–0421
- [185] OCKO, I. B.; HAMBURG, S. P.: Climate consequences of hydrogen emissions. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 22 (2022), Nr. 14, S. 9349–9368. – DOI 10.5194/acp-22-9349-2022
- [186] KOSSAREV, K.; SCHOLZ, A. E.; HORNING, M.: Comparative environmental life cycle assessment and operating cost analysis of long-range hydrogen and biofuel fueled transport aircraft. In: *CEAS Aeronautical Journal* 14 (2023), S. 3–28. – DOI 10.1007/s13272-022-00627-w
- [187] BICER, Y.; DINCER, I.: Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017), Nr. 16, S. 10722–10738. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2016.12.119
- [188] POLL, D. I. A.: On the effect of stage length on the efficiency of air transport. In: *The Aeronautical Journal* 115 (2011), Nr. 1167, S. 273–283. – DOI 10.1017/S0001924000005741
- [189] EDWARDS, H. A.; DIXON-HARDY, D.; WADUD, Z.: Aircraft cost index and the future of carbon emissions from air travel. In: *Applied Energy* 164 (2016), S. 553–562. – DOI 10.1016/j.apenergy.2015.11.058
- [190] LIU, F.; HU, M.; LV, W.; ZHANG, H.: Research on Optimization of Aircraft Climb Trajectory considering Environmental Impact. In: *Journal of Advanced Transportation* (2021), Nr. 1, S. 6677329. – DOI 10.1155/2021/6677329
- [191] THOMPSON, T.; MILLER, B.; MURPHY, C.; AUGUSTINE, S.; WHITE, T.; SOUHI, S.: Environmental impacts of continuous-descent operations in Paris and New York regions. In: *Tenth USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2013)*. Chicago, USA, Juni 2013

- [192] GENCOGLU, Y.; BASPINAR, B.: Free Routing in High-Complexity Airspace: Impact Assessment for Environment and Aviation Stakeholders. In: *Journal of Aerospace Information Systems* 20 (2023), Nr. 10, S. 627–635. – DOI 10.2514/1.I011203
- [193] SAUSEN, R.; HOFER, S.; GIERENS, K.; BUGLIARO, L.; EHRMANNTRAUT, R.; SITOVA, I.; ET AL.: Can we successfully avoid persistent contrails by small altitude adjustments of flights in the real world? In: *Meteorologische Zeitschrift* 33 (2023), Nr. 1, S. 83–98. – DOI 10.1127/metz/2023/1157
- [194] DAHLMANN, K.; MATTHES, S.; YAMASHITA, H.; UNTERSTRASSER, S.; GREWE, V.; MARKS, T.: Assessing the Climate Impact of Formation Flights. In: *Aerospace* 7 (2020), Nr. 12. – DOI 10.3390/aerospace7120172
- [195] SCHEELHAASE, J.; MAERTENS, S.; GRIMME, W.; JUNG, M.: EU ETS versus CORSIA – A critical assessment of two approaches to limit air transport’s CO2 emissions by market-based measures. In: *Journal of Air Transport Management* 67 (2018), S. 55–62. – DOI 10.1016/j.jairtraman.2017.11.007
- [196] PACHE, E.: Implementation of Kerosene Fuel Taxation in Europe Part I: Legal Foundations and Issues. In: *Conference on carbon pricing and aviation taxes*. Den Haag, Niederlande, Juni 2019
- [197] FABER, J.; GREENWOOD, D.; LEE, D.; MANN, M.; DE LEON, P. M.; NELISSEN, D.; ET AL.: Lower NOx at higher altitudes policies to reduce the climate impact of aviation NOx emission. https://transport.ec.europa.eu/document/download/54917bea-08fa-49db-8749-c6ae4684b47f_en?filename=oct_2008_nox_final_report.pdf&prefLang=ga. 2008. – CE Delft Nr. 08.7536.32. – Zugriff: 23.11.2023
- [198] NIKLASS, M.; GREWE, V.; GOLLNICK, V.; DAHLMANN, K.: Concept of climate-charged airspaces: a potential policy instrument for internalizing aviation’s climate impact of non-CO2 effects. In: *Climate Policy* 21 (2021), Nr. 8, S. 1066–1085. – DOI 10.1080/14693062.2021.1950602
- [199] EUROPEAN COMMISSION: *EU ETS - EU Emissions Trading System*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en Zugriff: 28.3.2025
- [200] NIKLASS, M.; DAHLMANN, K.; PLOHR, M.; GREWE, V.; GUTT, E.; KATZER, B.; ET AL.: Testing of a Monitoring, Reporting & Verification (MRV) Scheme for the integration of non-CO2 aviation effects into EU ETS. In: *The 5th International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC-5)*. Bad Aibling, Deutschland, Juni 2022
- [201] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: *Press release: ETS aviation - Council and Parliament strike provisional deal to reduce flight emissions*. 2022. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/12/07/ets-aviation-council-and-parliament-strike-provisional-deal-to-reduce-flight-emissions/> Zugriff: 21.11.2023
- [202] EUROPÄISCHE UNION: Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0029>

- [//eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/29/oj/eng](http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/29/oj/eng). 2009. – Document 32009L0029. – Zugriff: 28.3.2025
- [203] EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY (EASA): *European Aviation Environmental Report 2022*. <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/downloads>. 2022. – Zugriff: 23.11.2023
- [204] NIKLASS, M.; GOLLNICK, V.; LÜHRS, B.; DAHLMANN, K.; FROEMMING, C.; GREWE, V.; VAN MANEN, J.: Cost-Benefit Assessment of Climate-Restricted Airspaces as an Interim Climate Mitigation Option. In: *Journal of Air Transportation* 25 (2017), Nr. 2, S. 27–38. – DOI 10.2514/1.D0045
- [205] DALMAU, R.; PRATS, X.: Fuel and time savings by flying continuous cruise climbs: Estimating the benefit pools for maximum range operations. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 35 (2015), S. 62–71. – DOI 10.1016/j.trd.2014.11.019
- [206] HENDRICKS, T.: *Contrail Mitigation by means of 4D aircraft trajectory optimization*. Delft, Niederlande, Delft University of Technology, Masterthesis, April 2015
- [207] CAMPBELL, S.; NEOGI, N.; BRAGG, M.: An Operational Strategy for Persistent Contrail Mitigation. In: *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO)*. Hilton Head, USA, 2009
- [208] HAHN, A.: Staging Airliner Service. In: *7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO)*. Belfast, Nordirland, September 2007
- [209] FILIPPONE, A.: Analysis of Carbon-Dioxide Emissions from Transport Aircraft. In: *Journal of Aircraft* 45 (2008), S. 185–197. – DOI 10.2514/1.31422
- [210] YAMASHITA, H.; YIN, F.; GREWE, V.; JÖCKEL, P.; MATTHES, S.; KERN, B.: Newly developed aircraft routing options for air traffic simulation in the chemistry–climate model EMAC 2.53: AirTraf 2.0. In: *Geoscientific Model Development* 13 (2020), Nr. 10, S. 4869–4890. – DOI 10.5194/gmd-13-4869-2020
- [211] JENSEN, L.L.; TRAN, H.; HANSMAN, R.: Cruise fuel reduction potential from altitude and speed optimization in global airline operations. In: *Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015)*. Lissabon, Portugal, Januar 2015
- [212] ÁLVAREZ, M. S.: *Assessment of Climate Impact Mitigation Potential of Intermediate Stop Operations*. Delft, Niederlande, Delft University of Technology, Masterthesis, August 2021
- [213] TEOH, R.; SCHUMANN, U.; VOIGT, C.; SCHRIPP, T.; SHAPIRO, M.; ENGBERG, Z.; ET AL.: Targeted Use of Sustainable Aviation Fuel to Maximize Climate Benefits. In: *Environmental Science & Technology* 56 (2022), Nr. 23, S. 17246–17255. – DOI 10.1021/acs.est.2c05781
- [214] NANGIA, R. K.: ‘Greener’ civil aviation using air-to-air refuelling – relating aircraft design efficiency and tanker offload efficiency. In: *The Aeronautical Journal* 111 (2007), Nr. 1123, S. 589–592

- [215] MORSCHECK, F.: Analyses on a civil air to air refueling network in a traffic simulation. In: *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. St. Petersburg, Russia, September 2014
- [216] MORI, R.: Fuel Saving by Gradual Climb Procedure. In: *7th SESAR Innovation Days*. Belgrad, Serbien, November 2017
- [217] RAO, P.; YIN, F.; GREWE, V.; YAMASHITA, H.; JÖCKEL, P.; MATTHES, S.; ET AL.: Case Study for Testing the Validity of NO_x-Ozone Algorithmic Climate Change Functions for Optimising Flight Trajectories. In: *Aerospace* 9 (2022), Nr. 5. – DOI 10.3390/aerospace9050231
- [218] FICHTER, C.; MARQUART, S.; SAUSEN, R.; LEE, D. S.: The impact of cruise altitude on contrails and related radiative forcing. In: *Meteorologische Zeitschrift* 14 (2005), Nr. 4, S. 563–572. – DOI 10.1127/0941?2948/2005/0048
- [219] LÜHRS, B.; NIKLASS, M.; FRÖMMING, C.; GREWE, V.; GOLLNICK, V.: Cost-Benefit Assessment of 2D and 3D Climate and Weather Optimized Trajectories. In: *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO)*. Washington, USA, Juni 2016
- [220] MATTHES, S.; GREWE, V.; DAHLMANN, K.; FRÖMMING, C.; IRVINE, E. A.; LIM, L.; ET AL.: A Concept for Multi-Criteria Environmental Assessment of Aircraft Trajectories. In: *Aerospace* 4 (2017), Nr. 3, S. 1–25. – DOI 10.3390/aerospace4030042
- [221] KLIMA, K.: *Assessment of a global contrail modeling method and operational strategies for contrail mitigation*. Cambridge, USA, Massachusetts Institute of Technology, Masterthesis, Mai 2005
- [222] KANDUR, Y.: *Design of a climate optimized "North Atlantic Organized Track System"*. Hamburg, Deutschland, Technische Universität Hamburg, Masterthesis, August 2020
- [223] ZENGERLING, Z. L.; LINKE, F.; WEDER, C. M.; DAHLMANN, K.: Climate-Optimised Intermediate Stop Operations: Mitigation Potential and Differences from Fuel-Optimised Configuration. In: *Applied Sciences* 12 (2022), Nr. 23. – DOI 10.3390/app122312499
- [224] ALDER, M.; MOERLAND, E.; JEPSEN, J.; NAGEL, B.: Recent Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS. In: *Aerospace Europe Conference 2020*. Bordeaux, Frankreich, Februar 2020
- [225] MENDIGUCHÍA MEUSER, M.; LAU, A.; GOLLNICK, V.: Investigation on the effects of weather patterns on strategic climate impact mitigation measures: a data-based approach. In: *4th ECATS International Conference*. Delft, Niederlande, October 2023
- [226] SWAID, M.; LINKE, F.; GOLLNICK, V.: A Methodology for Efficient Statistical Analysis of Air Distance in Aviation. In: *AIAA Aviation Forum and ASCEND, 2024*. Las Vegas, USA, Juli 2024

- [227] SCHÄFER, M.; BARTOSCH, S.: Overview on fuel flow correlation methods for the calculation of NO_x, CO and HC emissions and their implementation into aircraft performance software / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. 2013 (IB-325-11-13). – Forschungsbericht
- [228] DUBOIS, D.; PAYNTER, G. C.: Fuel Flow Method2 for Estimating Aircraft Emissions. In: *SAE Transactions* 115 (2006), S. 1–14. – ISSN 0096736X, 25771531
- [229] DEIDEWIG, F.; DOEPHELHEUER, A.; LECHT, M.: Methods to Assess Aircraft Engine Emissions in Flight. In: *20th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. Sorrent, Italien, September 1996, S. 131–141
- [230] LIM, L.; LEE, D.S.; SAUSEN, R.; PONATER, M.: Quantifying the effects of aviation on radiative forcing and temperature with a climate response model. In: *Proceedings of an International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC)*. Oxford, Großbritannien, Juni 2007, S. 202–208
- [231] KÖHLER, M. O.; RÄDEL, G.; DESSENS, O.; SHINE, K. P.; ROGERS, H. L.; WILD, O.; PYLE, J. A.: Impact of perturbations to nitrogen oxide emissions from global aviation. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113 (2008), Nr. D11. – DOI 10.1029/2007JD009140
- [232] RÄDEL, G.; SHINE, K. P.: Radiative forcing by persistent contrails and its dependence on cruise altitudes. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113 (2008), Nr. D7. – DOI 10.1029/2007JD009117
- [233] JÖCKEL, P.; TOST, H.; POZZER, A.; KUNZE, M.; KIRNER, O.; BRENNINKMEIJER, C. A. M.; ET AL.: Earth System Chemistry integrated Modelling (ESCiMo) with the Modular Earth Submodel System (MESSy) version 2.51. In: *Geoscientific Model Development* 9 (2016), Nr. 3, S. 1153–1200. – DOI 10.5194/gmd-9-1153-2016
- [234] FRÖMMING, C.; GREWE, V.; BRINKOP, S.; JÖCKEL, P.; HASLERUD, A. S.; ROSANKA, S.; ET AL.: Influence of weather situation on non-CO₂ aviation climate effects: the REACT4C climate change functions. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 21 (2021), Nr. 11, S. 9151–9172. – DOI 10.5194/acp-21-9151-2021
- [235] VAN MANEN, J.; GREWE, V.: Algorithmic climate change functions for the use in eco-efficient flight planning. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 67 (2019), S. 388–405. – DOI 10.1016/j.trd.2018.12.016
- [236] SCHUMANN, U.: A contrail cirrus prediction model. In: *Geoscientific Model Development* 5 (2012), Nr. 3, S. 543–580. – DOI 10.5194/gmd-5-543-2012
- [237] SCHUMANN, U.; MAYER, B.; GRAF, K.; MANNSTEIN, H.: A Parametric Radiative Forcing Model for Contrail Cirrus. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51 (2012), Nr. 7, S. 1391 – 1406. – DOI 10.1175/JAMC-D-11-0242.1
- [238] MENDIGUCHÍA MEUSER, M.; LÜHRS, B.; LINKE, F.; GOLLNICK, V.; MATTHES, S.; DIETMÜLLER, S.; ET AL.: Mitigation of Aviations climate impact through robust climate optimized Trajectories in intra-European Airspace. In: *33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. Stockholm, Schweden, November 2022

- [239] SIMORGH, A.; SOLER, M.; GONZÁLEZ-ARRIBAS, D.; LINKE, F.; LÜHRS, B.; MENDIGUCHÍA MEUSER, M.; ET AL.: Robust 4D climate-optimal flight planning in structured airspace using parallelized simulation on GPUs: ROOST V1.0. In: *Geoscientific Model Development* 16 (2023), Nr. 13, S. 3723–3748. – DOI 10.5194/gmd-16-3723-2023
- [240] LANGHANS, S.; LINKE, F.; NOLTE, P.; SCHNIEDER, H.: System Analysis for Future Long-Range Operation Concepts. In: *27th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. Nizza, Frankreich, September 2010
- [241] MARAIS, K. B.; REYNOLDS, T. G.; UDAY, P.; MULLER, D.; LOVEGREN, J.; DUMONT, J.; HANSMAN, R. J.: Evaluation of potential near-term operational changes to mitigate environmental impacts of aviation. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 227 (2013), Nr. 8, S. 1277–1299. – DOI 10.1177/0954410012454095
- [242] ZENGERLING, Z. L.; LINKE, F.; LÜHRS, B.; WEDER, C. M.: Trajectory-related measures to mitigate the climate impact of aviation: A comparative study. In: *AIAA AVIATION 2023 Forum*. San Diego, USA, Juni 2023
- [243] BERGERO, C.; GOSNELL, G.; GIELEN, D.; KANG, S.; BAZILIAN, M.; DAVIS, S. J.: Pathways to net-zero emissions from aviation. In: *Nature Sustainability* 6 (2023), April, Nr. 4, S. 404–414. – DOI 10.1038/s41893-022-01046-9
- [244] DRAY, L.; SCHÄFER, A. W.; GROBLER, C.; FALTER, C.; ALLROGGEN, F.; STETTLER, M. E. J.; BARRETT, S. R. H.: Cost and emissions pathways towards net-zero climate impacts in aviation. In: *Nature Climate Change* 12 (2022), S. 956–962. – DOI 10.1038/s41558-022-01485-4
- [245] LEIPOLD, A.; APTSIAURI, G.; AYAZKHANI, A.; BAUDER, U.; BECKER, R.; BERGHOF, R.; ET AL.: DEPA 2050 – Development Pathways for Aviation up to 2050 (Final Report) / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. <https://elib.dlr.de/142185/>. 2021. – Projektbericht
- [246] PLOETNER, K. O.; ROTHFELD, R.; URBAN, M.; HORNUNG, M.; TAY, G.; OGUNTONA, O.: Technological and Operational Scenarios on Aircraft Fleet-Level towards ATAG and IATA 2050 Emission Targets. In: *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. Denver, USA, Juni 2017
- [247] SCHILLING, T.; RÖTGER, T.; WICKE, K.: Assessment of the Impact of Radically Climate-Friendly Aviation Technologies. In: *Greener Aviation*. Brüssel, Belgien, September 2016
- [248] ZENGERLING, Z. L.; KUMPA, S.; CLOCOCEANU, M.; MENDIGUCHÍA MEUSER, M.; SOLZER, J.; DAHLMANN, K.: Assessing climate effects resulting from airspace closures following the Ukrainian crisis. In: *Journal of Open Aviation Science* 2 (2025), Nr. 2. – DOI 10.59490/joas.2024.8152
- [249] LINKE, F.: *Ökologische Analyse operationeller Lufttransportkonzepte*. Hamburg, Deutschland, Technische Universität Hamburg-Harburg, Diss., Februar 2016

- [250] LÜHRS, B.; LINKE, F.; GOLLNICK, V.: Erweiterung eines Trajektorienrechners zur Nutzung meteorologischer Daten für die Optimierung von Flugzeugtrajektorien. In: *63. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK)*. Augsburg, Deutschland, September 2014
- [251] ALLIGIER, R.; GIANAZZA, D.; DURAND, N.: Energy rate prediction using an equivalent thrust setting profile. In: *5th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2012)*. Berkeley, USA, Mai 2012
- [252] NUIC, A.; POLES, D.; MOUILLET, V.: BADA: An advanced aircraft performance model for present and future ATM systems. In: *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 24 (2010), Nr. 10, S. 850–866. – DOI 10.1002/acs.1176
- [253] LISSYS LTD.: *Piano-X*. <https://www.lissys.uk/PianoX.html>
- [254] SUN, J.; HOEKSTRA, J. M.; ELLERBROEK, J.: OpenAP: An open-source aircraft performance model for air transportation studies and simulations. In: *Aerospace* 7 (2020), Nr. 8, S. 104. – DOI 10.3390/aerospace7080104
- [255] POLL, D. I. A.; SCHUMANN, U.: An estimation method for the fuel burn and other performance characteristics of civil transport aircraft in the cruise. Part 1: fundamental quantities and governing relations for a general atmosphere. In: *The Aeronautical Journal* 125 (2022), Nr. 1284, S. 257–295. – DOI 10.1017/aer.2020.62
- [256] POLL, D. I. A.; SCHUMANN, U.: An estimation method for the fuel burn and other performance characteristics of civil transport aircraft during cruise: Part 2, determining the aircraft’s characteristic parameters. In: *The Aeronautical Journal* 125 (2021), Nr. 1284, S. 296–340. – DOI 10.1017/aer.2020.124
- [257] SCHYMURA, L.: *Analyse und Vergleich aktueller Flugleistungsmodelle für die wissenschaftliche Simulation von vierdimensionalen Flugtrajektorien*. Bremen, Deutschland, Hochschule Bremen, City University of Applied Sciences, Bachelorthesis, April 2024
- [258] SHAPIRO, M.; ENGBERG, Z.; TEOH, R.; STETTLER, M.; DEAN, T.; ABBOTT, T.: *pycontrails: Python library for modeling aviation climate impacts (v0.52.1)*. 2024. <https://zenodo.org/records/15426480> Zugriff: 20.6.2025
- [259] LÜHRS, B.: *Erweiterung eines Trajektorienrechners zur Nutzung meteorologischer Daten für die Optimierung von Flugzeugtrajektorien*. Hamburg, Deutschland, Technische Universität Hamburg, Diplomarbeit, August 2013
- [260] HERBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; ET AL.: The ERA5 global reanalysis. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146 (2020), Nr. 730, S. 1999–2049. – DOI 10.1002/qj.3803
- [261] SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E.: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. In: *Analytical Chemistry* 36 (1964), Nr. 8, S. 1627–1639. – DOI 10.1021/ac60214a047
- [262] RIGHI, M.; EHRENBERGER, S.; BRINKOP, S.; HENDRICKS, J.; HELLEKES, J.; BANYŚ, P.; ET AL.: The ELK global emission inventory for the transport sectors. In: *Earth System Science Data* 18 (2026), Nr. 2, S. 1619–1664. – DOI 10.5194/essd-18-1619-2026

- [263] NORMAN, P. D.; LISTER, D. H.; LECHT, M.; MADDEN, P.; PARK, K.; PENANHOAT, O.; PLAISANCE, C.; RENGER, K.: Development of the technical basis for a New Emissions Parameter covering the whole AIRcraft operation: NEPAIR. 2003. – Projektbericht
- [264] DÖPELHEUER, A.: *Anwendungsorientierte Verfahren zur Bestimmung von CO, HC und Ruß aus Luftfahrttriebwerken*. Bochum, Deutschland, Ruhr-Universität Bochum, Diss., Januar 2002
- [265] HURLEY, C.: Smoke measurements inside a gas turbine combustor. In: *29th Joint Propulsion Conference and Exhibit*. Monterey, USA, Juni 1993
- [266] CHAMPAGNE, D. L.: Standard Measurement of Aircraft Gas Turbine Engine Exhaust Smoke. In: *ASME 1971 International Gas Turbine Conference and Products Show (Turbo Expo)*. Houston, USA, März 1971
- [267] WEDER, C. M.; LINKE, F.; GELHAUSEN, M.: *DLR 3D emission inventory for worldwide passenger air traffic and a forecast scenario of traffic volume and emissions until 2050*. 2025. – In Vorbereitung
- [268] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION AUTHORITY (ICAO): ICAO aircraft engine emissions databank. <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>. 2021. – Dokument 9646-AN/943, Issue 18. – Zugriff: 7.7.2022
- [269] GREWE, V.; FRÖMMING, C.; MATTHES, S.; BRINKOP, S.; PONATER, M.; DIETMÜLLER, S.; ET AL.: Aircraft routing with minimal climate impact: The REACT4C climate cost function modelling approach (V1.0). In: *Geoscientific Model Development* 7 (2014), S. 175–201. – DOI 10.5194/gmd-7-175-2014
- [270] JÖCKEL, P.; KERKWEIG, A.; POZZER, A.; SANDER, R.; TOST, H.; RIEDE, H.; ET AL.: Development cycle 2 of the Modular Earth Submodel System (MESSy2). In: *Geoscientific Model Development* 3 (2010), Nr. 2, S. 717–752. – DOI 10.5194/gmd-3-717-2010
- [271] FRÖMMING, C.; MATTHES, S.; GREWE, V.; DIETMÜLLER, S.; JÖCKEL, P.; DAHLMANN, K.; ET AL.: Climate Change Functions Update: Geographical extension, refinement and comparison with aCCFs. In: *4th ECATS International Conference*. Delft, Niederlande, Oktober 2023
- [272] YIN, F.; GREWE, V.; CASTINO, F.; RAO, P.; MATTHES, S.; DAHLMANN, K.; ET AL.: Predicting the climate impact of aviation for en-route emissions: the algorithmic climate change function submodel ACCF 1.0 of EMAC 2.53. In: *Geoscientific Model Development* 16 (2023), Nr. 11, S. 3313–3334. – DOI 10.5194/gmd-16-3313-2023
- [273] MATTHES, S.; DIETMÜLLER, S.; DAHLMANN, K.; FRÖMMING, C.; PETER, P.; YAMASHITA, H.; ET AL.: Updated algorithmic climate change functions (aCCF) V1.0A: Evaluation with the climate-response model AirClim V2.0. In: *Geoscientific Model Development Discussions* (2023), S. 1–28. – DOI 10.5194/gmd-2023-92
- [274] BURKHARDT, U.; KÄRCHER, B.: Process-based simulation of contrail cirrus in a global climate model. In: *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 114 (2009), Nr. D16. – DOI 10.1029/2008JD011491

- [275] THOR, R. N.; NIKLASS, M.; DAHLMANN, K.; LINKE, F.; GREWE, V.; MATTHES, S.: The CO₂ and non-CO₂ climate effects of individual flights: simplified estimation of CO₂ equivalent emission factors. In: *Geoscientific Model Development Discussions* (2023), S. 1–24. – DOI 10.5194/gmd-2023-126
- [276] THORBECK, J.; SCHOLZ, D.: DOC-Assessment Method — TU Berlin — DOC Method. In: *3rd Symposium on Collaboration in Aircraft Design*. Linköping, Schweden, September 2013
- [277] RISSE, K.; SCHÄFER, K.; SCHÜLTKE, F.; STUMPF, E.: Central Reference Aircraft data System (CeRAS) for research community. In: *CEAS Aeronautical Journal* 7 (2016), S. 121–133. – DOI 10.1007/s13272-015-0177-9
- [278] BRUDER, H.: *Weiterentwicklung eines Tools zur vereinfachten Abschätzung der Klimawirkung von Einzelflügen*. Hamburg, Deutschland, Technische Universität Hamburg, Masterthesis, Februar 2025
- [279] ZENGERLING, Z. L.; LINKE, F.; KÜHLEN, M.; LÜHRS, B.; NIKLASS, M.; DAHLMANN, K.; ET AL.: Comparing and combining different climate mitigation measures in aviation. In: *4th ECATS International Conference*. Delft, Niederlande, October 2023
- [280] DAHLMANN, K.: *Skalierungsfaktoren für verschiedene Klimametrien*. 2025. – Veröffentlichung in Vorbereitung
- [281] IRVINE, E.; HOSKINS, B.; SHINE, K.; LUNNON, R.; FROEMMING, C.: Characterizing North Atlantic weather patterns for climate-optimal aircraft routing. In: *Meteorological Applications* 20 (2013), S. 80–93. – DOI 10.1002/met.1291
- [282] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklung mechatronischer und cyberphysischer Systeme. 2021. – Norm VDI/VDE 2006
- [283] SCHLESINGER, S.; CROSBIE, R.; GANGÉ, R.; INNIS, G.; LALWANI, C.S.; LOCH, J.; ET AL.: Terminology for model credibility. In: *SIMULATION* 32 (1979), Nr. 3, S. 103–104. – DOI 10.1177/003754977903200304
- [284] ALBERS, A.; BEHRENDT, M.; KLINGLER, S.; MATROS, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: LINDEMANN, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. Carl Hanser Verlag, April 2016. – DOI 10.3139/9783446445819.019. – ISBN 978-3-446-44518-5, S. S. 541–569
- [285] SARGENT, Robert G.: Verification and validation of simulation models. In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*. Baltimore, USA, Dezember 2010
- [286] THE BOEING COMPANY: *747-400 Performance Summary*. 2010. https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/company/about_bca/startup/pdf/historical/747-400-passenger.pdf Zugriff: 6.12.2024
- [287] AIRBUS: *A330 - Aircraft Characteristics - Airport and Maintenance Planning*. 2023. https://aircraft.airbus.com/sites/g/files/jlcbta126/files/2023-08/ac_a330_jul2023_0.pdf Zugriff: 9.6.2024

- [288] BASPINAR, B.; UZUN, M.; GUVEN, A. F.; BASTURK, T.; TASDELEN, I.; KOYUNCU, E.; INALHAN, G.: A 4D trajectory generation infrastructure tool for controller working position. In: *2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. St. Petersburg, USA, September 2017
- [289] YAMASHITA, H.; GREWE, V.; JÖCKEL, P.; LINKE, F.; SCHAEFER, M.; SASAKI, D.: Air traffic simulation in chemistry-climate model EMAC 2.41: AirTraf 1.0. In: *Geoscientific Model Development* 9 (2016), Nr. 9, S. 3363–3392. – DOI 10.5194/gmd-9-3363-2016
- [290] GRAVER, B.; RUTHERFORD, D.; ZHENG, S.: *CO₂ Emissions from Commercial Aviation - 2013, 2018, and 2019*. October 2020. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/CO2-commercial-aviation-oct2020.pdf> Zugriff: 28.3.2025
- [291] TEOH, R.; ENGBERG, Z.; SCHUMANN, U.; VOIGT, C.; SHAPIRO, M.; ROHS, S.; STETTLER, M. E. J.: Global aviation contrail climate effects from 2019 to 2021. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 24 (2024), Nr. 10, S. 6071–6093. – DOI 10.5194/acp-24-6071-2024
- [292] HOESLY, R. M.; SMITH, S. J.; FENG, L.; KLIMONT, Z.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; PITKANEN, T.; ET AL.: Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). In: *Geoscientific Model Development* 11 (2018), Nr. 1, S. 369–408. – DOI 10.5194/gmd-11-369-2018
- [293] YIN, F.; GREWE, V.; VAN MANEN, J.; MATTHES, S.; YAMASHITA, H.; LINKE, F.; LÜHRS, B.: Verification of the ozone algorithmic climate change functions for predicting the short-term NO_x effects from aviation en-route. In: *8th International Conference on Research in Air Transportation 2018 (ICRAT2018)*. Barcelona, Spanien, Juni 2018
- [294] KLIMASCHUTZ PORTAL: *Forschungsprojekt untersucht Vermeidung von Kondensstreifen*. 2024. <https://www.klimaschutz-portal.aero/meldung/forschungsprojekt-dkult-01/> Zugriff: 28.2.2025
- [295] KIRSCHLER, S.; PIONTEK, D.; JUCHEM, M.; LAU, A.; NALIANDA, D.; SCHYMURA, L.; ET AL.: Operational feasibility of contrail avoidance by flight trajectory adaptation: first insights from the German 100-flights-trial. In: *EGU General Assembly 2025*. Wien, Österreich, Mai 2025
- [296] SABRE: *Sabre Market Intelligence Data Base*. <https://www.sabre.com/products/market-intelligence/>
- [297] STATISTA: *Anzahl der Flüge in der weltweiten Luftfahrt von 2014 bis 2023*. 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/411620/umfrage/anzahl-der-weltweiten-fluege/> Zugriff: 11.12.2024
- [298] HARTJES, S.; BOS, F.: Evaluation of Intermediate Stop Operations in Long-haul Flights. In: *Transportation Research Procedia* 10 (2015), S. 951–959. – DOI 10.1016/j.trpro.2015.09.049

- [299] *Kapitel Partitioning Around Medoids (Program PAM)*. In: *Finding Groups in Data*. Hoboken, USA : John Wiley Sons, Ltd, 1990. – ISBN 9780470316801, S. 68–125
- [300] URJAIS, D.: *DDR2 Reference Manual for Airline Users (ed. 2.9.11)*. 2022
- [301] DREWS, K.; MARKS, T.; LINKE, F.; KONIECZNY, G.; GOLLNICK, V.: Identification and modelling of civil formation flight routes based on global flight schedule data. In: *66. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK)*. München, Deutschland, September 2017
- [302] KÖLKER, K.; ZENGERLING, Z. L.; KÜHLEN, M.; LÜTJENS, K.; LINKE, F.: Assessing the Impact of Contrail Avoidance through Rescheduling on Airline Network Flows: A Case Study of North Atlantic Flights. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 187 (2024), S. 104155. – DOI 10.1016/j.tra.2024.104155
- [303] STATISTA: *Daily European Union Emission Trading System (EU-ETS) carbon pricing from 2022 to 2024*. 2024. <https://www.statista.com/statistics/1322214/carbon-prices-european-union-emission-trading-scheme/> Zugriff: 10.12.2024
- [304] NIKLASS, M.; ZENGERLING, Z. L.; EICHINGER, R.; MEUSER, M. M.; EHLERS, T.; LAU, A.; ET AL.: Impact of Non-CO₂ Pricing on Routing and Ticket Fares in Aviation: Strategies to Address Uncertainties in Climate Policies. (2025). – DOI 10.5281/zenodo.15438171. – In Begutachtung
- [305] ZENGERLING, Z. L.; NIKLASS, M.; GOLLNICK, V.: Integrating aviation's non-CO₂ effects into EU ETS: Impact of CO₂e accounting on operational and technological climate mitigation measures. In: *Euro Working Group on Transportation Annual Meeting 2025 (EWGT2025)*. Edinburgh, Großbritannien, September 2025
- [306] AIRBUS: *Airbus reveals new zero-emission concept aircraft*. September 2022. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft> Zugriff: 26.3.2025
- [307] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR): *Digitale Bewertungsplattform für das Gesamtsystem Luftfahrt*. <https://event.dlr.de/ila2024/alicia/> Zugriff: 10.12.2024
- [308] THE BOEING COMPANY: *The Boeing Cascade Climate Impact Model*. <https://app.cascade.boeing.com/> Zugriff: 10.12.2024
- [309] CLIMOP CONSORTIUM: Recommendations. <https://www.climop-h2020.eu/portfolio-items/d3-3-recommendations/>. 2023. – Projektbericht D3.3. – Zugriff: 12.12.2024
- [310] ALAKUS, O.: *Analyse der weltweiten Flottenentwicklung und Auswirkungen der Covid19-Pandemie im Hinblick auf die Nachhaltigkeit des Luftverkehrs*. Hamburg, Deutschland, Technische Universität Hamburg, Projektarbeit, März 2024
- [311] POZZI, J.: COVID-19 Crisis Accelerates Retirement Of The A380. In: *Aviation week* (2020), Juli. <https://aviationweek.com/mro/covid-19-crisis-accelerates-retirement-a380>. – Zugriff: 24.1.2025

- [312] KUMPA, S.: *Analysis of climate effects resulting from airspace closures following the Ukrainian crisis*. Aachen, Deutschland, FH Aachen, University of Applied Sciences, Masterthesis, Juli 2024
- [313] LAU, A.; EHLERS, T.; DERRA, M.; LÜHRS, B.: Considerations for multi-criteria Route Design on Different Atmospheric Scales. In: *33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. Stockholm, Schweden, September 2022
- [314] PATTERSON, M. A.; RAO, A. V.: GPOPS-II: A MATLAB Software for Solving Multiple-Phase Optimal Control Problems Using hp-Adaptive Gaussian Quadrature Collocation Methods and Sparse Nonlinear Programming. In: *ACM Transactions on Mathematical Software* 41 (2014), Nr. 1. – DOI 10.1145/2558904
- [315] DANIEL, K.; NASH, A.; KOENIG, S.; FELNER, A.: Theta*: Any-Angle Path Planning on Grids. In: *Journal of Artificial Intelligence Research* 39 (2010), S. 533–579. – DOI 10.1613/jair.2994
- [316] SIMORGH, A.; SOLER, M.; DIETMÜLLER, S.; MATTHES, S.; YAMASHITA, H.; CASTINO, F.; YIN, F.: Robust 4D climate-optimal aircraft trajectory planning under weather-induced uncertainties: Free-routing airspace. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 131 (2024), S. 104196. – DOI 10.1016/j.trd.2024.104196
- [317] CASTINO, F.; YIN, F.; GREWE, V.; YAMASHITA, H.; MATTHES, S.; DIETMÜLLER, S.; ET AL.: Decision-making strategies implemented in SolFinder 1.0 to identify eco-efficient aircraft trajectories: application study in AirTraf 3.0. In: *Geoscientific Model Development* 17 (2024), Nr. 9, S. 4031–4052. – DOI 10.5194/gmd-17-4031-2024
- [318] ZENGERLING, Z. L.; MENDIGUCHÍA MEUSER, M.; LAU, A.; GOLLNICK, V.: Mitigating the climate impact of aviation by operational means - A comparative study for different weather situations. In: *34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. Florenz, Italien, September 2024
- [319] ZENGERLING, Z. L.; LINKE, F.; WEDER, C. M.; DAHLMANN, K.: A comparison of climate-optimised and fuel-optimised intermediate stop operations for selected case studies. In: *33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. Stockholm, Schweden, September 2022
- [320] LIM, L.; RADHAKRISHNAN, K.; RÖTGER, T.; CASAS, G.; CELIKEL, A.; DORRIES, H.; ET AL.: Theoretical potential of CO₂ emissions reduction through fleet and flight network optimization. In: *The 5th International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC-5)*. Bad Aibling, Deutschland, Juni 2022
- [321] RÖTGER, T.; CASAS, G.; CELIKEL, A.; DÖRRIES, H.; LIM, L.; OWEN, B.; ET AL.: Reduction of the environmental impact of aviation via optimisation of aircraft size/range and flight network. In: *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* 1226 (2022), S. 012045. – DOI 10.1088/1757-899X/1226/1/012045
- [322] CLOCOCEANU, M.: *Bewertung der Wirksamkeit betrieblicher Maßnahmen zur Reduktion der Klimawirkung im Luftverkehr*. Hamburg, Deutschland, Technische Universität Hamburg, Masterthesis, Januar 2024

- [323] WÖHLER, S.; BUCHTAL, K. A.; IWANIZKI, M.; HÄSSY, J.; DAHLMANN, K.; LOIS, C.; HEPPERLE, M.: Climate Impact and Economic Assessment of Liquid Hydrogen and Synthetic Kerosene Long-Range Aircraft Concepts. In: *34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. Florenz, Italien, September 2024
- [324] EUROPÄISCHE UNION: EU Directive 2023/958 of the European Parliament and of the council (10 May 2023) 'amending Directive 2003/87/EC as regards aviation's contribution to the Union's economy-wide emission reduction target and the appropriate implementation of a global market-based measure. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2023:130:TOC>. 2023. – Dokument L:2023:130:TOC. – Zugriff: 2023-08-06
- [325] CLIMOP CONSORTIUM: Report on the climate impact of the second set of operational improvement options. <https://www.climop-h2020.eu/portfolio-items/d2-4-report-on-the-climate-impact-of-the-second-set-of-operational-improvement-options/>. 2022. – Projektbericht D2.4. – Zugriff: 12.12.2024
- [326] ZENGERLING, Z. L.; LAU, A.: Reducing the climate impact of flight trajectories considering network effects. In: *SESAR Innovation Days 2024*. Rom, Italien, November 2024
- [327] SUN, J.; ELLERBROEK, J.; HOEKSTRA, J. M.: WRAP: An open-source kinematic aircraft performance model. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 98 (2019), S. 118–138. – DOI 10.1016/j.trc.2018.11.009
- [328] JARRY, G.; DELAHAYE, D.; HURTER, C.: Towards aircraft generic Quick Access Recorder fuel flow regression models for ADS-B data. In: *11th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT2024)*. Singapur, Juni 2024