

Flugzeuggetragene Messungen der Eigenschaften von Kondensstreifen aus Biotreibstoffgemischen

Tiziana Bräuer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Luft- und Raumfahrt-
technik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des aka-
demischen Grades einer

Doktor-Ingenieurin

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Felix Huber, Universität der Bundeswehr München
2. Prof. Dr. rer. nat. Christiane Voigt, Johannes Gutenberg Universität Mainz

Die Dissertation wurde am 04.11.2021 bei der Universität der Bundeswehr
München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am
16.02.2022 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 09.03.2022 statt.

Erstellt am Institut für Physik in der Atmosphäre
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik
Oberpfaffenhofen

Zusammenfassung

Kondensstreifen haben durch Absorption und Reemittierung von langwelliger terrestrischer Strahlung den größten Beitrag am luftverkehrsbedingten Strahlungsantrieb. Ihre Lebensdauer beträgt nur wenige Stunden und daher wirken sich Änderungen der Kondensstreifeneigenschaften schnell und unmittelbar auf den Klimaeffekt des Luftverkehrs aus. Emittiertes Kohlendioxid kann dagegen Jahrtausende in der Atmosphäre verbleiben und dort als Treibhausgas wirken. Die vorliegende Arbeit untersucht, ob und in welchem Umfang die Eigenschaften von Kondensstreifen durch den Einsatz von aromatenarmen Treibstoffen verändert werden kann. Zu diesem Zweck fand im Januar 2018 die Flugzeugmission Emissions and Climate Impact of Alternative Fuels II (ECLIF II) statt. Dabei führte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die National Aeronautics and Space Administration (NASA) mit einer zum Forschungsflugzeug umgerüsteten DC-8 Emissionsmessungen im Abgasstrahl eines Testflugzeuges durch. Als Testflugzeug diente ein A320 mit zwei V2527-A5 Triebwerken, in denen drei Treibstoffe mit verschiedenen Biotreibstoffanteilen verbrannt wurden. Die Treibstoffe unterschieden sich sowohl im Aromatengehalt, als auch in der Aromatenzusammensetzung.

Die Messung der Eiskristallgrößen und -anzahl in Kondensstreifen erfolgte mit der Fast Forward Scattering Spectrometer Probe (FFSSP). Im Rahmen dieser Dissertation wurde die FFSSP kalibriert, die Messungen während des Experiments durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet und diskutiert. Kondensstreifen während ECLIF II hatten ein Alter von 0.5 bis 3 Minuten und wurden in einer Flughöhe zwischen 7.8 und 11.6 km gemessen. Die Messungen zeigen, dass die Extinktion, also die Abschwächung der Strahlung bei Wechselwirkung mit Kondensstreifen, auf Flughöhen zwischen 9 und 10 km am größten war. In Höhen oberhalb von 11 km nahm die Extinktion wegen des geringeren Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre ab. Kondensstreifen wurden auch in niedrigen Höhen unterhalb von 8 km gemessen, obwohl die Umgebungstemperatur dort teilweise oberhalb der Grenztemperatur zur Kondensstreifenbildung lag. Anhand der vorliegenden Daten wird für alle Flughöhen der Anteil der Rußpartikel, die zu Eiskristallen aktiviert werden, in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur bestimmt und die Aktivierung wird mit aktuellen Modellsimulationen verglichen.

Hinsichtlich des Einflusses der Treibstoffzusammensetzung kann erstmals gezeigt werden, dass eine Reduzierung des Aromatengehalts im Treibstoff zu einer Reduzierung der Eisanzahlkonzentrationen pro Kilogramm Treibstoff (Eisemissionsindizes) führt. Während ECLIF II lag die Reduzierung der Eisemissionsindizes zwischen 23 bis 74%. Bicyclische Aromaten (Naphthalene) trugen besonders stark zur Partikelbildung bei. Eine maximale Reduktion der Eisemissionsindizes von 74% wurde für den Treibstoff mit dem niedrigsten Aromaten- und dem niedrigsten Naphthalengehalt gemessen. Durch den Einsatz von Biotreibstoffgemischen lies sich die klimawirksame optische Dicke der jungen Kondensstreifen um 40 bis 52% reduzieren. Die vorliegende Arbeit kann damit zeigen, dass die Klimawirkung des Luftverkehrs durch den vermehrten Einsatz von Biotreibstoffen deutlich verringert werden kann.

Abstract

Contrails contribute the largest share to the radiative forcing from aviation, because ice crystals in the contrails absorb and re-emit long-wave terrestrial radiation. The lifetime of contrails is only a few hours and therefore, changes in contrail properties have an immediate impact on the climate effect of aviation. Emitted carbon dioxide, on the other hand, can remain in the atmosphere for millennia, acting as a greenhouse gas. This dissertation investigates whether and to what extent the use of low-aromatic biofuel blends changes the formation and properties of contrails. To this end, the aircraft mission Emissions and Climate Impact of Alternative Fuels II (ECLIF II) took place in January 2018. During this mission, the German Aerospace Center (DLR) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA) used a DC-8, which was converted into a research aircraft to conduct emission measurements in the exhaust of a test aircraft. The test aircraft was an A320 with two V2527-A5 engines, in which three fuels with varying biofuel contents were burned. The fuels differed in both aromatic content and aromatic composition.

Ice crystal sizes and numbers in contrails were measured using the Fast Forward Scattering Spectrometer Probe (FFSSP). In the course of this work, the FFSSP was calibrated, the measurements were made during the experiment and the results were analysed and discussed in light of current research. Contrails during ECLIF II had an age of 0.5 to 3 minutes and were measured at an altitude between 7.8 and 11.6 km. The results show that the extinction, which means the attenuation of radiation when interacting with contrails, was greatest at flight altitudes between 9 and 10 km. At altitudes above 11 km, the extinction decreased because of the lower water vapour content in the atmosphere. Contrails were also measured at low altitudes below 8 km, although the ambient temperature there was partly above the threshold temperature for contrail formation. Using the available data, the fraction of soot particles activated to form ice crystals is determined as a function of ambient temperature for all altitudes, and the activation is compared with current model simulations.

Regarding the influence of fuel composition, it is shown for the first time that a reduction of aromatic content in the fuels leads to a reduction of the ice number concentrations per kilogram of fuel (ice emission indices). During ECLIF II, the reduction in ice emission indices ranged from 23 to 74%. One type of bicyclic aromatics, the so-called naphthalene, is a particularly strong contributor to particle formation. A maximum reduction in ice emission indices of 74% was measured for the fuel with the lowest aromatics content and the lowest naphthalene content. The use of biofuel blends reduced the climate-relevant optical depth of young contrails by 40 to 52%. Therefore this dissertation is able to show, that the climate impact of aviation can be significantly reduced by the use of biofuel blends.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Wissenschaftlicher Hintergrund	7
2.1	Kondensstreifen	7
2.1.1	Bildung von Kondensstreifen	8
2.1.2	Nukleationskeime der Eispartikel	12
2.1.3	Klimawirkung von Kondensstreifen	14
2.1.4	Bisherige Ergebnisse aus Kondensstreifenmessungen	18
2.2	Biotreibstoffe in der Luftfahrt	21
2.2.1	Luftverkehrswachstum und Klimaschutz	21
2.2.2	Verfahren zur Biotreibstoffgewinnung	22
2.2.3	Wasserstoffbehandelter Biotreibstoff aus Pflanzenöl	23
2.2.4	Zusammensetzung und Eigenschaften von Treibstoffen	24
2.2.5	Bisherige Forschung zum Einsatz alternativer Treibstoffe	25
2.3	Kondensstreifen durch Raketenstarts (Exkurs)	30
3	Messung von Eispartikeln mit Laserspektrometrie	33
3.1	Interaktion von Strahlung und Eispartikeln	33
3.2	Das schnelle, vorwärtsstreuende Laserspektrometer FFSSP	38
3.3	Charakterisierung und Kalibration des Laserspektrometers	42
3.3.1	Tiefenschärfe-Kriterium	42
3.3.2	Kalibration der sensitiven Messfläche	43
3.3.3	Partikelgrößenkalibration	46
3.3.4	Korrektur der Anzahlkonzentration für kleine Eispartikel	50
4	Erweiterte Instrumentierung und Auswertemethoden	53
4.1	Erweiterte Instrumentierung zur Messung von Kondensstreifen	53
4.2	Datenauswertung	57
4.2.1	Mikrophysikalische Parameter	57
4.2.2	Optische Parameter	58
4.2.3	Emissionsindizes	60
5	Einfluss der Umgebungsbedingungen auf Kondensstreifen	63
5.1	Das Flugexperiment ECLIF II/NDMAX	63
5.1.1	Verwendete Treibstoffe	64

5.1.2	Übersicht Messflüge	66
5.2	Abhängigkeit der Kondensstreifeneigenschaften von Temperatur und relativer Feuchte	73
5.2.1	Beschreibung der Umgebungsbedingungen	73
5.2.2	Abhängigkeit der Extinktion der Kondensstreifen	75
5.2.3	Abhängigkeit der Rußaktivierung	79
6	Einfluss der Biotreibstoffe auf Kondensstreifen	85
6.1	Emissionsindizes bei der Verbrennung alternativer Treibstoffe in mittleren Flughöhen	85
6.2	Emissionsindizes und Kondensstreifeneigenschaften bei der Verbrennung von Biotreibstoffen in großen Flughöhen	91
6.2.1	Einfluss von Biotreibstoffen auf Eisemissionsindizes	91
6.2.2	Einfluss von Biotreibstoffen auf optische Eigenschaften	95
7	Fazit	101
8	Ausblick	105
	Abkürzungen	109
	Symbolverzeichnis	111
	Abbildungsverzeichnis	113
	Tabellenverzeichnis	115
	Literaturverzeichnis	117
	Danksagung	131

Kapitel 1

Motivation

Laut dem aktuellen Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC, 2021) führen anthropogene Emissionen aus Industrie, Transport und Haushalten zu einer Änderung der Energiebilanz im System Erde-Atmosphäre. Der anthropogene Einfluss auf die Energiebilanz resultierte bisher in einer Erhöhung der Erdoberflächentemperatur von 1.09 (0.95–1.2)°C. Aufgrund der zu erwartenden schwerwiegenden Folgen der Temperaturerhöhung für Mensch und Umwelt verpflichteten sich im Pariser Klimaabkommen von 2015 fast 200 Staaten die Erhöhungen der globalen Oberflächentemperatur unterhalb von 2°C zu halten. Eine Änderung in der Energiebilanz der Atmosphäre kann durch einen Strahlungsantrieb beschrieben werden. Dieser Strahlungsantrieb wird als effektiv bezeichnet, wenn bei der Berechnung die Dauer des Energieeintrages im Vergleich zu CO₂-Änderungen und Anpassungen der Atmosphäre als Rückkopplungen berücksichtigt werden. Der Luftverkehr trug im Jahr 2018 mit 4% zum effektiven anthropogenen Strahlungsantrieb bei (Lee et al., 2021). Den mit 57% größten individuellen Beitrag der Luftverkehrskomponenten zum effektiven Strahlungsantrieb liefern hierbei Kondensstreifen.

Wie viele andere Industrien auch, muss sich die Luftfahrt wandeln, um den Klimazielen der Politik, als auch dem Wunsch der Passagiere nach klimaneutralem Reisen gerecht zu werden. Lange Entwicklungszeiträume in der Luftfahrt von mehreren Jahrzehnten erschweren jedoch die Umsetzung von schnellen Lösungen für eine Reduzierung des luftverkehrsinduzierten Strahlungsantriebs. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob der Einsatz von Biotreibstoffen eine Möglichkeit ist, ohne einen Austausch von Flugzeugflotte und Triebwerken, die Kondensstreifenkomponente des luftverkehrsinduzierten Strahlungsantriebs zu reduzieren. Es soll gezeigt werden, welchen Einfluss aromatenarme Biotreibstoffgemische kurz- bis mittelfristig auf die Rußpartikelemissionen des Luftverkehrs und damit auf die Bildung und Klimawirkung von Kondensstreifen hat.

Kondensstreifen sind Eiswolken, die sich nach Austritt der Emissionen aus dem Triebwerk in einer eisübersättigten, sehr kalten Atmosphäre bilden. Ihre Bedeutung für die Energiebilanz der Atmosphäre ist erst in den letzten Jahren durch

umfangreiche wissenschaftliche Tätigkeiten deutlich geworden. Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass der Hauptanteil des Strahlungsantriebs des Luftverkehrs nicht von seinen Kohlendioxidemissionen stammt, sondern durch die Absorption und Reemittierung von langwelliger, terrestrischer Strahlung an Kondensstreifen ausgelöst wird (Burkhardt und Kärcher, 2011; Basseur et al., 2016; Kärcher, 2016, 2018; Lee et al., 2021). Da die Lebensdauer von Kondensstreifen mit wenigen Stunden signifikant kürzer ist als die jahrhundertelange Lebensdauer von Kohlendioxidmolekülen in der Atmosphäre, besteht bei den Kondensstreifen ein großes kurzfristiges Mitigationpotential des Strahlungsantriebs. Das thermodynamische Kriterium zur Bildung eines Kondensstreifens wurde durch Schumann (1996) als Schmidt-Appleman Kriterium formuliert. Dabei nukleiert der im Abgasstrahl und in der umgebenden Luft beinhaltenen Wasserdampf auf emittierten Aerosolpartikeln, wenn eine bestimmte Grenztemperatur unterschritten wird. Die Grenztemperatur wird als Schmidt-Appleman Temperatur bezeichnet.

Messungen von Kondensstreifen direkt im Flug sind aufwendig, liefern aber eine wichtige Momentaufnahme über die mikrophysikalischen Eigenschaften von Kondensstreifen. Es liegen mittlerweile umfangreiche Datensätze aus Messungen im Reiseflug vor, sowohl von Kondensstreifen im Nachlauf spezieller Testflugzeuge, als auch konventioneller Passagiermaschinen (Baumgardner und Gandrud, 1998; Heymsfield et al., 1998; Schröder et al., 2000; Voigt et al., 2010, 2017). Zusätzlich erfolgt die Beobachtung von überregionaler Abdeckung durch Kondensstreifen mit Hilfe von Satelliten (Iwabuchi et al., 2012; Vázquez-Navarro et al., 2015). Satellitenbeobachtungen haben den Vorteil, dass sie die gesamte Lebensdauer und regionale Ausdehnung eines Kondensstreifens abdecken können. In Schumann et al. (2017) werden alle bis dahin vorhandenen 230 Datensätze sowohl aus direkten Flugzeugmessungen, als auch aus Satellitenbeobachtungen miteinander verglichen. Einen ebenfalls großen Stellenwert in der Kondensstreifenforschung hat die Modellsimulation. Dazu gehören physikalische Prozessmodelle und Large Eddy Simulationen zur Bildung und Entwicklung von Kondensstreifen (Schumann et al., 2012; Unterstrasser, 2016; Kärcher, 2018) und globale Vorhersagemodelle der Klimawirkung (Burkhardt et al., 2018). Laut der Modellstudie von Burkhardt et al. (2018) kann eine weltweite Reduktion der initialen Eisanzahlkonzentrationen in Kondensstreifen um 80% den Strahlungsantrieb von Kondensstreifen um 50% verringern.

Das Institut für Physik in der Atmosphäre am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR) hat in den letzten Jahren die Kondensstreifenforschung stark in den Fokus gesetzt. In der Abteilung Wolkenphysik werden seit 2008 Kondensstreifen und natürliche Zirren mit Forschungsflugzeugen direkt gemessen und charakterisiert (Voigt et al., 2010; Jeßberger et al., 2013; Kaufmann et al., 2014; Voigt et al., 2017; Kleine et al., 2018). Im Rahmen dieser Dissertation wurden durch das DLR in Zusammenarbeit mit dem Langley Forschungszentrum der National Aeronautics and Space Administration (NASA) weltweit erstmals flugzeuggetragene Eispartikelmessungen in jungen Kondensstreifen aus Biotreibstoffgemischen durchgeführt. Die Daten wurden während des Flugexperimentes

Emissions and Climate Impact of Alternative Fuels II (ECLIF II) im Januar 2018 gesammelt. Die Eismessungen wurden mit dem schnellen, vorwärtsstreuenden Laserspektrometer FFSSP durchgeführt. Als Testflugzeug diente ein A320 mit zwei V2527-A5 Triebwerken. Die Biotreibstoffgemische bestanden aus einer Mischung des pflanzlichen Biotreibstoffes HEFA und herkömmlichem Kerosin. Bei dem Experiment stand vor allem der Einfluss der Treibstoffzusammensetzungen auf die Partikelemissionen und die Kondensstreifenbildung im Fokus. In den verwendeten Biotreibstoffgemischen wurde nicht nur der Aromatengehalt verringert, sondern auch die Art der aromatischen Verbindungen variiert. Bisherige Messungen haben gezeigt, dass durch eine Beimengung von aromatenarmen Treibstoff die Rußanzahlkonzentrationen im Abgasstrahl reduziert werden können (Moore et al., 2017). Mit den Messdaten der vorliegenden Dissertation wird in einem nächsten Schritt der Einfluss von aromatenarmen Treibstoff auf die Bildung und die Eigenschaften von Kondensstreifen untersucht und damit eine Forschungslücke geschlossen. Umgebungseffekte auf die Kondensstreifenbildung dürfen die Treibstoffvergleiche nicht beeinflussen. Daraus ergeben sich die Forschungsfragen (FF) dieser Dissertation:

- FF1** Welchen Einfluss haben atmosphärische Bedingungen wie der Wassergehalt und die Temperatur auf die mikrophysikalischen und die optischen, klimarelevanten Eigenschaften von jungen Kondensstreifen?
- FF2** Wie verändert der Einsatz von aromatenarmen Biotreibstoffgemischen die mikrophysikalischen und die optischen, klimarelevanten Eigenschaften von jungen Kondensstreifen?

Die Eispartikelkonzentrationen sind zur Beurteilung der Klimawirkung entscheidend und wirken sich auf optische Eigenschaften wie die Extinktion von Strahlung beim Durchgang durch die Kondensstreifen und ihre optische Dicke aus. In diesem Zusammenhang sollen folgende Fragen konkret beantwortet werden:

- Welchen Einfluss haben Feuchte, Temperatur und Druck auf die Eispartikelkonzentration, die Partikelgrößenverteilung und den Extinktionskoeffizienten der ein bis drei Minuten alten Kondensstreifen?
- Welcher Anteil an Aerosolpartikeln wird nahe der Kondensstreifenbildungstemperatur für Eiskristalle aktiviert?
- Kann ein Zusammenhang zwischen dem Aromatengehalt von Treibstoffen, den Rußpartikeln im Abgasstrahl und den Eispartikelkonzentrationen in Kondensstreifen nachgewiesen werden?
- Welche Rolle spielt die Zusammensetzung der Aromaten für die Eispartikelkonzentrationen in Kondensstreifen?
- Wie stark werden die optischen, klimarelevanten Eigenschaften von jungen Kondensstreifen durch den Einsatz von aromatenarmen Biotreibstoffgemischen reduziert?

Aufbau

Die Dissertation beginnt mit einer Einführung in die Theorie von Kondensstreifen und skizziert den Wissensstand zu alternativen Treibstoffen. Es folgt ein Kapitel, das sich im Rahmen der Methodik ausführlich mit den Grundlagen der Strahlungsübertragung und dem Messprinzip, sowie der Charakterisierung und der Kalibration der FFSSP befasst. Danach wird die weitere Instrumentierung am Messflugzeug und die Auswertemethodik der Kondensstreifenanalyse beschrieben. Im Anschluss folgt die Vorstellung und Bewertung der wissenschaftlichen Ergebnisse. Zunächst wird der Effekt der Umgebungsbedingungen in den Fokus gestellt und im Anschluss werden die Treibstoffeffekte auf Kondensstreifen beschrieben. Im Ausblick wird die Bedeutung der Ergebnisse für einen zukünftigen Einsatz von Biotreibstoffen dargestellt. Dies geschieht auch im Hinblick darauf, dass im Rahmen des europäischen Green Deals im Juli 2021 beschlossen wurde, dass Kraftstoffanbieter verpflichtet werden an EU-Flughäfen steigende Mengen an nachhaltigen Flugkraftstoffen zu Verfügung zu stellen (Europäische Kommission, 2021).

Publikationen

Einige Ergebnisse dieser Dissertation wurden in folgenden Journalen veröffentlicht:

Bräuer, T., Voigt, C., Sauer, D., Kaufmann, S., Hahn, V., Scheibe, M., Schlager, H., Diskin, G. S., Nowak, J. B., DiGangi, J. P., Huber, F., Moore, R. H., und Anderson, B. E.: Airborne Measurements of Contrail Ice Properties - Dependence on Temperature and Humidity, *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2020GL092166, 2021a

Voigt, C., Kleine, J., Sauer, D., Moore, R. H., Bräuer, T., Clercq, P. L., Kaufmann, S., Scheibe, M., Jurkat-Witschas, T., Aigner, M., Bauder, U., Borrmann, S., Boose, Y., Crosbie, E., Diskin, G. S., DiGangi, J., Hahn, V., Huber, F., Nowak, J. B., Rauch, B., Rapp, M., Robinson, C., Schripp, T., Shook, M., Winstead, E., Ziemba, L., Schlager, H., und Anderson, B. E.: Cleaner burning jet fuels reduce contrail cloudiness, *Nature Commun. Earth Environ.*, doi: 10.1038/s43247-021-00174-y, 2021a

Bräuer, T., Voigt, C., Sauer, D., Kaufmann, S., Hahn, V., Scheibe, M., Schlager, H., Huber, F., Clercq, P. L., Moore, R. H., und Anderson, B. E.: Reduced ice number concentrations in contrails from low aromatic biofuel blends, *Atmos. Chem. Phys.*, akzeptiert, 2021b

Die Beteiligung an einer weiteren Flugmission führte zu einer Koautorschaft in folgender Publikation, deren wissenschaftlichen Ergebnisse jedoch nicht Teil der vorliegenden Dissertation sind:

Voigt, C., Lelieveld, J., Schlager, H., Schneider, J., Curtius, J., Meerkötte, R., Bugliaro, L., Bohn, B., Erbetseder, T., Groß, S., Li, Q., Mertens, M., Pozzer, A., Sauer, D., Schumann, U., Tomsche, L., Borrmann, S., Bräuer, T., Crowley, J. N., Dörich, R., Dörnbrack, A., Edtbauer, A., Ernle, L., Fischer, H., Giez, A., Granzin, M., Grewe, V., Hahn, V., Harder, H., Heinritzi, M., Henke, R., Holanda, B., Jöckel, P., Kaiser, K., Krüger, O., Lucke, J., Marsing, A., Martin, A., Matthes, S., Pöhlker, C., Pöhlker, M., Pöschl, U., Reifenberg, S., Ringsdorf, A., Scheibe, M., Tadic, I., Williams, J., Zahn, A., Zauner-Wieczorek, M., und Rapp, M.: BLUESKY aircraft mission documents atmospheric composition changes during the Corona lockdown in spring 2020, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, eingereicht, 2021b

Konferenzbeiträge

Im Rahmen dieser Dissertation wurden die Ergebnisse auf folgenden wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt:

Bräuer, T., Voigt, C., Kaufmann, S., Sauer, D. N., Schlager, H., Kleine, J., Hahn, V., Scheibe, M., Heckl, C., Jurkat-Witschas, T., Boose, Y., Schimpf, M., Moser, M., Huber, F., Shook, M., Moore, R. H., Diskin, G., DiGangi, J., LeClercq, P., und Anderson, B. E.: Airborne Measurements of Ice Particle Concentrations in Contrails from Alternative Fuels, *in: AGU American Geophysical Union Conference*, San Francisco, Postervortrag, 2019

Bräuer, T. und Hahn, V.: Reducing Ice Particle Concentrations in Contrails with Biofuels during the NDMAX flight campaign, *in: ONERA DLR Aviation Symposium*, Braunschweig, Mündlicher Vortrag, Gewinner des Preises *The best paper prepared and presented by young scientists*, 2020

Bräuer, T., Voigt, C., Sauer, D., Kaufmann, S., Hahn, V., Scheibe, M., Schlager, H., Nowak, J. B., Diskin, G. S., Huber, F., Moore, R., und Anderson, B.: Airborne Contrail Ice Measurements from Biofuel Blends, *in: EAC European Aerosol Conference*, mündlicher Vortrag, 2021c

Kapitel 2

Wissenschaftlicher Hintergrund

Dieses Kapitel beschreibt im ersten Teil den Stand des Wissens zur Bildung und Klimawirkung von Kondensstreifen. Im Fokus steht die Entstehung von Eiskristallen in Kondensstreifen und ihre Bedeutung für den Strahlungshaushalt. Im zweiten Teil des Kapitels werden Grundlagen zur Herstellung und Zusammensetzung von alternativen Treibstoffen diskutiert. Außerdem werden bisherige Forschungsergebnisse zum Einsatz von alternativen Treibstoffen im Luftverkehr und dem Reduktionspotential für Kondensstreifen und der resultierenden Klimaeffekte vorgestellt. Der Augenmerk liegt besonders auf dem Biotreibstoff Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), da dessen Emissionen in der hier vorgestellten Dissertation in Reiseflughöhe charakterisiert wurden.

2.1 Kondensstreifen

Kondensstreifen sind Wolken, die erstmals durch Ettenreich (1919) wissenschaftlich vorgestellt wurden und ab einer Flughöhe von 7 bis 8 Kilometern abhängig von den Umgebungsbedingungen hinter Propeller- und Strahlflugzeugen entstehen können. Die thermodynamische Grundlagenforschung zur Bildung dieser Wolken führte zur Beschreibung eines Theorems, dem sogenannten Schmidt-Appleman Kriterium. Das Schmidt-Appleman Kriterium wurde von Schumann (1996) final formuliert (siehe Seite 10). Mit dem Aufkommen leistungsstarker Rechner und moderner Satellitentechnik wurden flugzeuggetragene Messungen von Kondensstreifen durch Simulationen und Fernerkundung ergänzt und es konnten so in den letzten Jahren weitere Erkenntnisse über Kondensstreifen gesammelt werden.

Kondensstreifen sind direkt von Menschen verursachte Eiswolken. Die Kondensstreifenbedeckung ist mit bis zu 10% in viel beflogenen Regionen über Europa und den USA am größten (Burkhardt und Kärcher, 2011; Burkhardt et al., 2018). Es wird unterschieden zwischen kurzlebigen und langlebigen Kondensstreifen und Kondensstreifenzirren (Kärcher, 2018). Kurzlebige Kondensstreifen treten in eisuntersättigten Umgebungsbedingungen auf und lösen sich nach weniger als 10 Minuten wieder auf. Ihre Klimawirkung ist vernachlässigbar. Als Sättigung wird der Gleichgewichtszustand zwischen Wasserdampf und Wasser oder Eis in

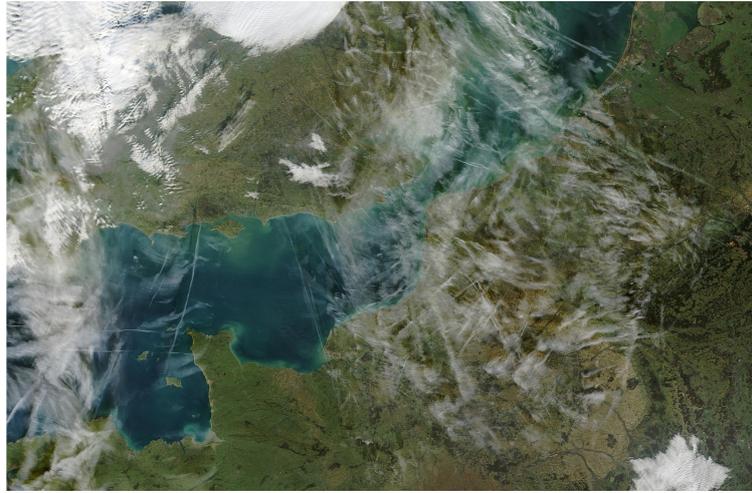


Abbildung 2.1: Satellitenaufnahmen von Kondensstreifen über dem Ärmelkanal am 9. Dezember 2003. CC-BY: NASA Marshall Space Center.

der Atmosphäre bezeichnet (Roedel und Wagner, 2011). In eisübersättigten Umgebungsbedingungen können sich langlebige, persistente Kondensstreifen bilden, die sich auch zu ausgedehnten Kondensstreifenzirkeln mit einer hohen Klimawirkung ausbreiten können. In dieser Form sind sie von natürlichen hohen Zirkeln nur schwer zu unterscheiden.

2.1.1 Bildung von Kondensstreifen

Ein Strahltriebwerk generiert Vortrieb durch die Verbrennung eines Treibstoff-Luft Gemisches (Warnatz et al., 2006). Der Treibstoff beinhaltet im Hauptanteil Kohlenwasserstoffe und in geringerem Anteil andere Komponenten einschließlich Schwefel. Aus der Luft tragen Sauerstoff und Stickstoff zur chemischen Reaktion der Treibstoffverbrennung bei. Die Verbrennung läuft unter hohen Temperaturen und Drücken im Triebwerk ab. Ein Teil der Verbrennungsenergie wird in Vortriebskraft umgesetzt. Der Rest wird in Form von Wärme durch den Abgasstrahl aufgenommen (Rossow et al., 2014).

Der Abgasstrahl eines Triebwerks beinhaltet laut Warnatz et al. (2006) direkt nach dem Austritt sowohl Gase, als auch feste Partikel. Gasförmige Emissionen sind zunächst Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Stickstoff. Zudem reagieren emittierte Schwefelverbindungen (hauptsächlich Schwefeldioxid) und Stickstoffoxide bei Anwesenheit von Wasserdampf zu Schwefelsäure bzw. Salpetersäure. Aus Schwefel- und Salpetersäure bilden sich durch Kondensation direkt nach dem Austritt aus dem Triebwerk sogenannte Feinstpartikel oder UAPs (im Englischen *ultra-fine aqueous particles*). Auch unverbrannte Kohlenwasserstoffe werden zu den UAPs gezählt. Diese flüchtigen Partikel haben eine Partikelgröße von bis 10 nm (Kärcher et al., 1998). Die Anzahlkonzentrationen liegen bei 10^{17} Partikeln pro Kilogramm verbranntem Treibstoff (Schumann et al., 2002).

Des Weiteren sind im Abgasstrahl nicht-flüchtige schwarze Feinstaubpartikel enthalten, sogenannte Rußpartikel (Warnatz et al., 2006). Bei der Verbrennung der Treibstoffmoleküle entstehen durch Gasphasenchemie erst Rußvorläufer. Dabei handelt es sich um einfache Kohlenwasserstoffe mit aromatischen Ringen, zum Beispiel Benzol. Diese wachsen durch van der Waals-Kräfte weiter an und bilden planare Gebilde von einigen Nanometer Größe. Es kommt durch Zusammenballung von mehreren Teilchen zur Bildung von Primärpartikeln und durch eine Agglomeration von Primärpartikeln zur Bildung von größeren Rußpartikeln. Parallel dazu findet in der Brennkammer eine Rußoxidation statt, die eine nichtlineare Funktion der Temperatur, des Brennstoff-Luft-Verhältnisses und des Drucks ist, und somit die Anzahl der Rußpartikel wieder reduzieren kann. Die Größe der Rußpartikel variiert letztendlich von 6 bis 100 nm (Warnatz et al., 2006; Moore et al., 2015). Abhängig vom Triebwerksmodell und von der Treibstoffzusammensetzung bilden sich 10^{14} bis 10^{16} Rußpartikel aus einem Kilogramm verbrannten Treibstoff (Moore et al., 2017; Kleine et al., 2018; Schripp et al., 2018). Aktuelle Forschungsergebnisse zu Rußemissionen folgen in Kapitel 2.2.5.

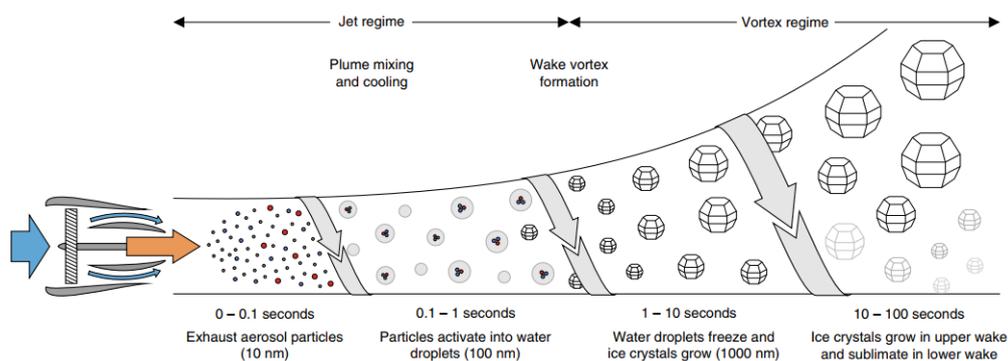


Abbildung 2.2: Übersicht über die verschiedenen Prozesse der Kondensstreifenbildung übernommen aus Kärcher (2018).

Ein Kondensstreifen durchläuft in seinem Lebenszyklus vier Phasen: Jet-phase, Wirbelphase, Dispersions- bzw. Dissipationsphase und Diffusionsphase (Gerz et al., 1998). Die Bildung eines Kondensstreifens aus einem Strahltriebwerk innerhalb der ersten beiden Phasen ist in Abbildung 2.2 dargestellt und wird ausführlich in Kärcher (2018) beschrieben. Die Dynamik im Abgasstrahl unterliegt von Anfang an einem turbulenten Mischungsprozess. Es kommt zu einer Vermischung des heißen Abgasstrahls mit der kühlen Umgebungsluft. Durch den Abkühlungsprozess steigt die Wassersättigung im Abgasstrahl. Sobald es zu einer Wasserübersättigung kommt, wirken die Aerosole im Abgasstrahl als Nukleationskeime und die vorhandenen Wassermoleküle beginnen auf den Aerosolen zu kondensieren. Dies passiert in einem Zeitrahmen von 0.1 bis 1 Sekunde nach dem Triebwerksaustritt. Die Umgebungstemperatur muss unterhalb der Kondensstreifenbildungstemperatur liegen, damit sich eine Wasserübersättigung im Abgasstrahl einstellen kann. Diese Temperatur ist durch das Schmidt-Appleman Kriterium beschrieben und liegt zwischen -40 und -45°C (Schumann (1996), sie-

he unten). In mittleren Breiten entsprechen diese Temperaturen einer Flughöhe zwischen 7 und 8 km. Aufgrund der kalten Temperaturen gefrieren die Wassertropfchen direkt nach ihrer Bildung und die Eiskristalle wachsen durch Kondensation von Wasser. Es bildet sich ein sichtbarer Kondensstreifen und die Jetphase geht in die Wirbelphase des Kondensstreifens über.

Aufgrund von Druckunterschieden an den Tragflächen bildet sich hinter den Tragflächenspitzen je ein aerodynamischer Wirbel. Die Wirbel schließen den Abgasstrahl aller Triebwerke an der jeweiligen Tragfläche mit ein. Der Kondensstreifen besteht zu Beginn der Wirbelphase also aus zwei parallelen, nach innen rotierenden Wirbeln. Die beiden Wirbel weiten sich auf und senken sich in den nächsten Minuten unterhalb der Flughöhe ab. Die nach unten gerichtete Bewegung führt zu einer adiabaten Erwärmung und zu einem Verlust von einem Teil der Partikel durch Sublimation im unteren Bereich des Kondensstreifens. Diese Sublimationseffekte wurden zum Beispiel mit einer Large-Eddy-Simulation durch Unterstrasser (2014) modelliert. Die Eispartikel im oberen Teil des Kondensstreifens wachsen durch die Aufnahme von Wasser weiter an. Es kommt zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Partikel. Der untere Teil des Kondensstreifens bildet den abgesenkten Primärwirbel und die größeren Eispartikel im oberen Teil des Kondensstreifens werden als sekundärer Nachlauf bezeichnet.

Nach 3 bis 5 Minuten bricht die geordnete Wirbelstruktur auf und der Kondensstreifen geht in die Dissipationsphase über (Gerz et al., 1998). In der letzten Phase, der Diffusionsphase, kann sich der Kondensstreifen dann zu einem langlebigen Kondensstreifenzirrus ausbreiten. Der Zirrus kann eine Breite von 10 Kilometern und eine Länge von über 100 Kilometern erreichen (Vázquez-Navarro et al., 2015).

Das Schmidt-Appleman Kriterium

Mit Hilfe des Schmidt-Appleman Kriteriums kann bestimmt werden, ob sich ein Kondensstreifen bei vorliegenden atmosphärischen Bedingungen bildet oder nicht. Der Hintergrund wurde durch Schumann (1996) beschrieben.

Für die Herleitung des Kriteriums werden isobare und adiabate Bedingungen im Abgasstrahl angenommen. Durch das Verbrennen des Treibstoffes wird im Abgasstrahl eine konstante und bekannte Menge Wasserdampf emittiert (1.237 kg pro Kilogramm Treibstoff). Die Verbrennung von einer Masseneinheit Treibstoff mit $N - 1$ Masseneinheiten Luft ergibt N Masseneinheiten an Abgasen. Für die Differenz des spezifischen Wassergehalts Δm zwischen dem Abgasstrahl und der Umgebungsluft gilt:

$$\Delta m = \frac{EI_{H_2O} - m_L}{N}. \quad (2.1)$$

Dabei ist EI_{H_2O} der Emissionsindex von Wasserdampf und N der Verdünnungsfaktor. Der spezifische Wassergehalt der Luft m_L ist verschwindend klein gegenüber EI_{H_2O} und kann daher vernachlässigt werden. Die Verbrennung setzt

im Triebwerk die Verbrennungswärme Q frei. Der Vortriebswirkungsgrad η beschreibt den Anteil der Verbrennungswärme, der in Vortrieb (Schub) umgesetzt wird. Der Rest $Q(1 - \eta)$ wird von den Abgasen in Form von Wärme aufgenommen. Für die Differenz der spezifischen Enthalpie Δh zwischen Abgasstrahl und Umgebungsluft gilt:

$$\Delta h = Q(1 - \eta)/N = c_p \Delta T. \quad (2.2)$$

Für ideale Gase ist die spezifische Enthalpie außerdem eine Funktion der Temperatur, wobei die spezifische Wärmekapazität c_p bei konstantem Druck sowohl von der Temperatur als auch von der Zusammensetzung des Abgases abhängig ist.

$$m = \frac{M_{H_2O}}{M_L} \frac{p_i}{p} = 0.622 \frac{p_i}{p} \quad (2.3)$$

Der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Wassergehalt m und dem Partialdruck p_i lässt sich für den Wasserdampf im Abgasstrahl und der Umgebung nach Formel (2.3) beschreiben. Dabei bezeichnet M die Molanteile von Wasser und trockener Luft und p den Umgebungsdruck. Der Partialdruck des Wasserdampfes, auch als Dampfdruck bezeichnet, ist der Druck bei dem der Dampf sich im thermodynamischen Gleichgewicht mit der flüssigen Phase befindet.

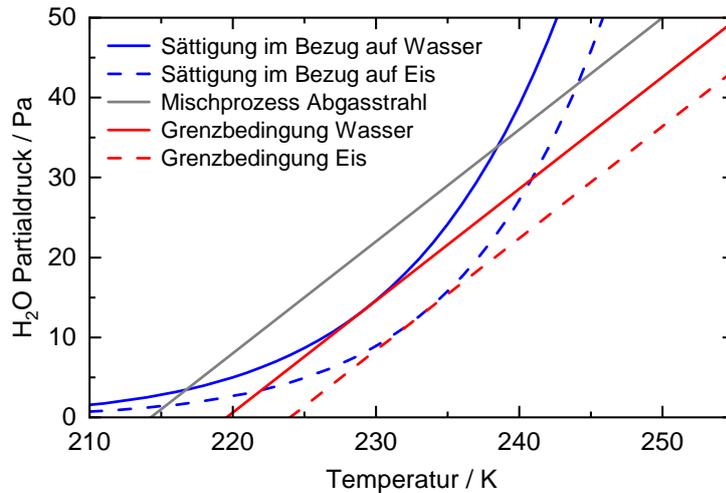


Abbildung 2.3: Im Phasendiagramm für Wasser sind die Sättigungslinien (Sättigungsdampfdrucklinien) im Bezug auf Wasser und Eis in blau eingetragen. Hier befinden sich der gasförmige und der flüssige oder feste Aggregatzustand im Gleichgewicht (Roedel und Wagner, 2011).

Abbildung 2.3 zeigt im Phasendiagramm für Wasser die Abhängigkeit des Dampfdrucks p_i von der Umgebungstemperatur. Die blauen Kurven stellen die Sättigungsgrenzen über Wasser (durchgezogen) und Eis (gestrichelt) dar. Eis sublimiert bei leicht höheren Temperaturen in die Gasphase als Wasser verdampft. Der Mischungsprozess für den Abgasstrahl kann aus den Zusammen-

hängen (2.1) bis (2.3) hergeleitet und im Phasendiagramm dargestellt werden:

$$\frac{\Delta p_i}{\Delta T} = G = \frac{EI_{H_2O} c_p p}{0.622 Q (1 - \eta)}. \quad (2.4)$$

Die isobare Vermischung der Triebwerksabgase mit Luft folgt im Phasendiagramm von Wasser einer Linie mit der Steigung G (in Abbildung 2.3 in grau eingetragen). Während der Vermischung kommt es zu einer Abkühlung des Luftpaketes und der Partialdruck sinkt. Es bildet sich ein Kondensstreifen, wenn die Mischungslinie die Flüssigkeitssättigung durchquert und sich so Flüssigkeitströpfchen auf Partikelkeimen bilden können. Bedingung dafür ist, dass ausreichend hohe Wasserdampf-Mischungsverhältnisse vorliegen. Aufgrund der geringen Temperaturen kommt es unmittelbar zum Gefrieren der Tröpfchen. Ein Kondensstreifen wird nur persistent sein, wenn das Luftpaket die Sättigungslinie über Eis nicht wieder überschreitet und es zu einer Sublimation der Eispartikel kommt.

Als Voraussetzung zur Bildung eines Kondensstreifens lässt sich aus den erklärten Zusammenhängen eine Kondensstreifenbildungstemperatur T_{SA} herleiten. Dazu sind in rot im Phasendiagramm die Grenzbedingungen mit derselben Steigung wie die Mischungslinie eingetragen. Ist die Umgebungstemperatur gleich der Kondensstreifenbildungstemperatur, so berührt die Mischungslinie gerade die Sättigungskurve für Wasser (rote, durchgezogene Linie). Die Kondensstreifenbildungstemperatur T_{SA} wird durch eine Newton-Iteration aus der Umgebungstemperatur auf der Mischungslinie T_M , den Partialdrücken p_i , der relativen Feuchte RH und der Steigung der Mischungslinie G bestimmt. Im weiteren ist T_{SA} die Schmidt-Appleman Temperatur:

$$T_{SA} = T_M - (p_i(T_M) - RH \cdot p_i(T_{SA}))/G. \quad (2.5)$$

Ein kritischer Punkt in der Berechnung des gesamten Mischungsprozesses ist der Vortriebswirkungsgrad des Triebwerks η (siehe Gleichung (2.4)). Der Wirkungsgrad gibt das Verhältnis aus Nutz- und Verlustleistung an und variiert mit Flugzeugtyp und Leistung. Er ist ohne ein genaues Wissen über Druck- und Temperaturverhältnisse im Triebwerk und dem aktuellen Schubzustand nur schwer abschätzbar. Üblicherweise wird ein Standardwert von 0.29 bis 0.33 für den Vortriebswirkungsgrad des A320 verwendet.

2.1.2 Nukleationskeime der Eispartikel

Unmittelbar nach dem Triebwerksaustritt enthält der Abgasstrahl eine große Mengen von ultrafeinen, flüchtigen Partikeln, zum Beispiel wässriger Schwefelsäure. Aufgrund der hohen Anzahlkonzentration dieser Feinstpartikel im Abgasstrahl wurde lange vermutet, dass diese einen großen Anteil der Nukleationskeime für die Eispartikelbildung in Kondensstreifen ausmachen (Schumann et al., 2002). Allerdings haben mikrophysikalische Simulationen gezeigt, dass die größten löslichen Aerosole bei der Nukleation bevorzugt werden (Kärcher, 2018).

Zwar liegen die Rußpartikel im Vergleich zu den Feinstpartikeln in einer um 1 bis 3 Größenordnungen geringeren Anzahl vor, dafür sind sie aber etwa zehnmal so groß. Bei den hohen Rußemissionslevels der aktuellen Flugzeugflotte kondensiert der Wasserdampf daher in erster Linie auf den Rußpartikeln. Dafür spricht auch, dass eine Änderung des Schwefelgehalts im Treibstoff in den Modellen nur eine geringe Wirkung auf die Eisnukleation hat (Wong und Miake-Lye, 2010). Außerdem haben Modelle gezeigt, dass sich die Schwefelaerosole auf den Rußpartikeln absetzen und dort eine Ummantelung bilden. Dieser Mantel erhöht die Hydrophilie des Rußes und seine Aktivierung in Wassertröpfchen wird ankurbelt (Kärcher, 1998; Wong und Miake-Lye, 2010). Bei reduzierten Rußanzahlkonzentrationen, deutlich unterhalb der heute üblichen Werte, könnte es bei entsprechend kalten Temperaturen wieder vermehrt zu einer Nukleation an den flüssigen Schwefelaerosolen kommen (Kärcher, 2018). Allerdings kommen diese Prozesse erst bei einer starken Reduzierung der Rußemissionen durch alternative Treibstoff- oder Triebwerkskonzepte zum Tragen.

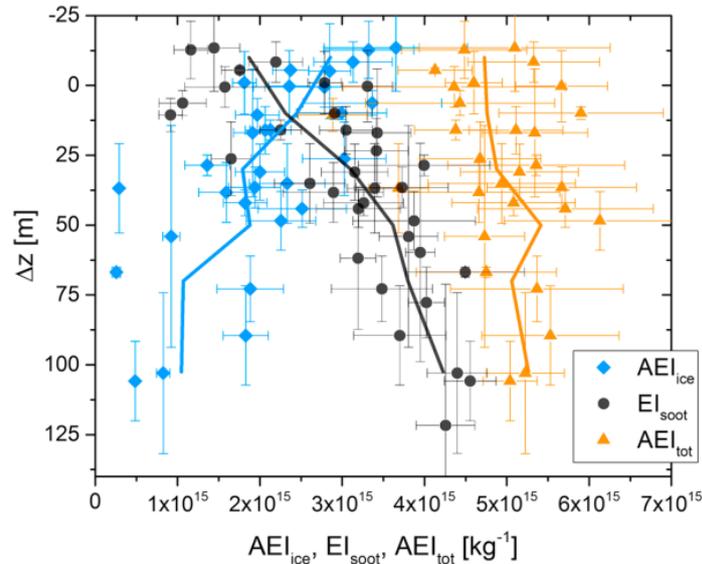


Abbildung 2.4: Vertikale Profile des Eisemissionsindex AEI_{ice} , des Rußemissionsindex EI_{soot} und der Summe beider Indizes AEI_{tot} übernommen aus Kleine et al. (2018). Die Emissionsindizes sind über die Absinktiefe Δz unterhalb der Flughöhe aufgetragen.

Einen ersten experimentellen Hinweis, dass tatsächlich die Rußpartikel in erster Linie als Nukleationskeime in einem Kondensstreifen wirken, lieferte Kleine et al. (2018). Die Abbildung 2.4 zeigt das Vertikalprofil eines ein bis zwei Minuten alten Kondensstreifens, der während des Flugexperimentes ECLIF I gemessen wurde. Die Anzahlkonzentrationen von Eis und Ruß werden unabhängig von Verdünnungen und Inhomogenitäten im Kondensstreifen als Emissionsindizes dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei einer großen Absinktiefe im unteren Teil des Wirbels ein Teil der Eispartikel sublimiert und der scheinbare Eisemissionsindex abnimmt. Im gleichen Maß wie der Eisemissionsindex mit der

Höhe abnimmt, nimmt der Rußemissionsindex zu. Durch Addition ergibt sich der totale scheinbare Emissionsindex AEI_{tot} . Das ist ein Hinweis darauf, dass die eingeschlossenen Rußnukleationskeime beim Absinken und Sublimieren der Eiskristalle wieder freigesetzt wurden. Um einen endgültigen empirischer Beleg für die Wirkung der Rußpartikel als hauptsächliche Nukleationskeime zu erhalten, ist es nötig, die genaue Anzahl der Rußpartikel in einem Kondensstreifen (auch der Residuen in einem Eiskristallkern) mit der Anzahl der Eiskristalle an sich zu vergleichen. In dieser Arbeit wird ein solcher Vergleich gezeigt.

2.1.3 Klimawirkung von Kondensstreifen

Im System zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre herrscht laut Wallace und Hobbs (2006) ein Gleichgewicht zwischen kurzweiliger solarer Strahlung, die von der Sonne von außen auf die Atmosphäre wirkt, und langweiliger terrestrischer Strahlung, die sich von der Erdoberfläche ausbreitet. Ein- und Abstrahlung gleichen sich im globalen und jährlichen Mittel am oberen Rand der Atmosphäre aus. Eine Störung dieses Gleichgewichtes wird als Strahlungsantrieb bezeichnet. Ein Strahlungsantrieb kann nicht direkt gemessen werden, sondern wird aus Modellen abgeleitet oder aus Fernerkundungsdaten extrapoliert. Das Maß für die Störung der Strahlungsbilanz ist das *Radiative Forcing* (RF). Es wird immer im Verhältnis zur vorindustriellen Zeit in der Einheit W m^{-2} angegeben. Die englischsprachige Abkürzung hat sich eingebürgert und wird auch in dieser Arbeit verwendet.

RF ist die berechnete Änderung des nach unten gerichteten Strahlungsflusses in einer bestimmten Höhe in der Atmosphäre. Je nachdem, wie viele Rückkopplungsmechanismen dabei zugelassen werden und nach welchen Zeitskalen gefragt wird, gibt es verschiedene Definition des RF. Zur Beurteilung der Strahlungsantriebe des Luftverkehrs hat sich das *Effective Radiative Forcing* (ERF) durchgesetzt, welches alle Temperaturänderungen bis auf eine Änderung der Ozeanoberflächentemperatur im Klimasystem zulässt (Lee et al., 2021). Durch die Berücksichtigung schneller Temperaturänderungen können vor allem kurzlebige Strahlungsantriebe besser berücksichtigt werden. Der Nachteil liegt in einem erhöhten Rechenaufwand und einer erhöhten Komplexität der Berechnungen.

Eine Auflistung aller luftverkehrinduzierten Strahlungsantriebe findet sich in Abbildung 2.5. Positive, also wärmende Effekte sind in rot dargestellt und negative, also kühlende Effekte in blau. Die drei größten positiven ERF des Luftverkehrs werden verursacht durch Kondensstreifenzirren und den Kohlendioxid- und Stickoxid-Emissionen des Luftverkehrs. Die Fehlerbalken geben das Konfidenzintervall von 5 und 95% für die jeweiligen ERF an. Daraus geht hervor, dass die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Strahlungsantriebs von Kohlendioxidemissionen am niedrigsten sind. Hohe Unsicherheiten sind dagegen noch bei den Kondensstreifen und den Stickoxidemissionen vorhanden. Das liegt unter anderem daran, dass Effekte wie die Überdeckung von Kondensstreifen mit natürlicher Bewölkung nur schwer simulierbar sind (Sanz-Morère et al., 2020).

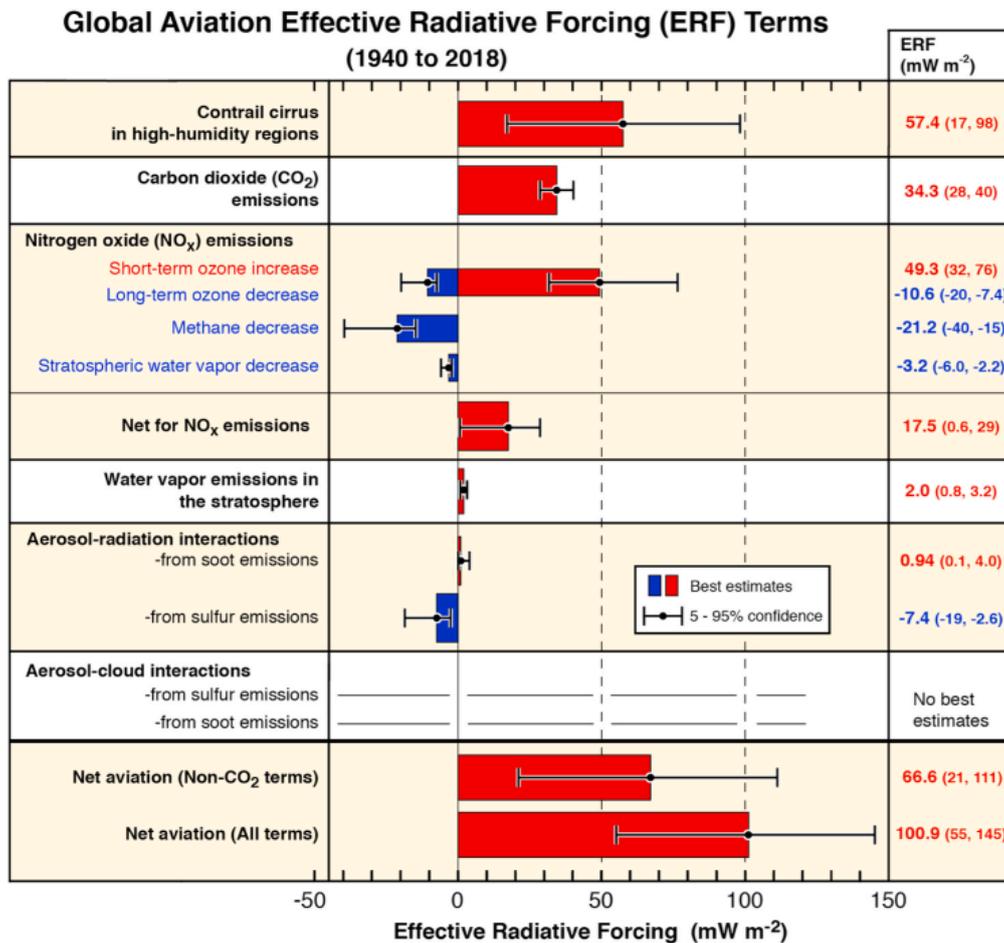


Abbildung 2.5: Schätzungen des effektiven Strahlungsantriebs (ERF) aller Emissionen, die auf den globalen Luftverkehr in einem Zeitraum zwischen 1940 und 2018 zurückzuführen sind, aus Lee et al. (2021).

Kondensstreifen in Regionen mit hoher relativer Feuchtigkeit haben im Luftverkehr mit einem ERF von 57.4 mW m^{-2} den größten positiven Strahlungsantrieb (Brosseur et al., 2016; Lee et al., 2021). Gettelman et al. (2021) schätzen ein ERF von 62 mW m^{-2} . Die Effekte von Kondensstreifen auf das Klimasystem sind ähnlich wie die von natürlichen, hohen Eiswolken. Kurzwellige solare Strahlung wird von den Eispartikeln im Kondensstreifen reflektiert. Damit reduziert sich der Eintrag der solaren Strahlung am Erdboden. Dieser Effekt ist kühlend und kommt nur tagsüber zum Tragen. Langwellige, terrestrische Strahlung wird dagegen von den Eispartikeln absorbiert und über Abkühlung wieder emittiert. Dieser Effekt ist wärmend und überwiegt global den kühlenden, kurzwelligen Effekt der Kondensstreifen. Der individuelle Strahlungsantrieb eines Kondensstreifen kann stark variieren und hängt stark von den Eigenschaften der Kondensstreifen, der Höhe und der Oberflächenalbedo ab (Voigt et al., 2017). Die Albedo ist ein Maß für das Rückstrahlvermögen einer nicht selbst leuchtenden Oberfläche. Es handelt sich um das Verhältnis von rückgestrahltem zu einfallendem Licht. Regional

und lokal können die Wolken sowohl einen positiven, wie auch einen negativen Strahlungsantrieb haben (Schumann et al., 2012). Während der Covid-19 Pandemie kam es über Europa im Jahr 2020 im Vergleich zum Vorjahr zu einem Rückgang der Flugbewegungen von 72% (Schumann et al., 2021b). Berechnungen mit dem Kondensstreifenvorhersagemodell CoCip zeigen, dass das RF aus Kondensstreifenzirren so regional um bis zu 70 mW m^{-2} reduziert wurde. Aufnahmen des Sensors SEVIRI auf dem Meteosat-11 Satelliten bestätigen diese Simulationen (Schumann et al., 2021a).

Die in Abbildung 2.5 angegebenen Werte für ERF von Kondensstreifen und Kondensstreifenzirren basieren auf 5 globalen Klimamodellen (Burkhardt und Kärcher, 2011; Chen und Gettelman, 2013; Schumann et al., 2015; Bock und Burkhardt, 2016; Bickel et al., 2020). Um den Strahlungsantrieb bestimmen zu können müssen komplexe mikrophysikalische Prozesse, Kondensstreifenausbreitung, Überschneidung mit natürlichen Wolken, Strahlungsaustausch und die Hintergrundbewölkung simuliert werden. Die Unsicherheiten wurden aus Sensitivitäten der Prozesse und den Unsicherheiten der zugrundeliegenden Parameter abgeleitet (Yang et al., 2010).

	ERF (mW m^{-2})	RF (mW m^{-2})	ERF RF	Conf. levels
Contrail cirrus in high-humidity regions	57.4 (17, 98)	111.4 (33, 189)	0.42	Low
Carbon dioxide (CO ₂) emissions	34.3 (28, 40)	34.3 (31, 38)	1.0	High

Abbildung 2.6: Ausschnitt der Strahlungsantriebe für Kondensstreifenzirren und Kohlendioxidemissionen aus Lee et al. (2021). Im Vergleich zu Abbildung 2.5 ist zum Effective Radiative Forcing (ERF) das Radiative Forcing (RF) und das Konfidenzniveau ergänzt.

Kohlendioxid ist eines der wichtigsten anthropogenen Treibhausgase in der Atmosphäre. Die Kohlendioxidemissionen aus dem Luftverkehr haben mit einem ERF von 34.3 mW m^{-2} einen geringeren wärmenden Effekt als die Kondensstreifenzirren (vergleiche 57.4 mW m^{-2}). In Abbildung 2.6 ist zu erkennen, dass für die langlebigen Kohlendioxidemissionen die zusätzliche Modellierung der Rückkopplungsmechanismen im ERF keinen Unterschied zum RF ausmacht. Bei einem Vergleich der Strahlungsantriebe von Kondensstreifen und Kohlendioxid mit dem klassischen RF ist der Unterschied daher noch ausgeprägter. Der ERF Wert für die Kondensstreifenzirren ist eine Hochrechnung aus dem RF Wert über das Verhältnis aus ERF zu RF von 0.42 (Bickel et al., 2020). Die Simulation des ERF ist im Gegensatz zum herkömmlichen RF mit größeren Unsicherheiten belastet, die einen Integrationszeitraum von mindestens 25 Jahren nötig machen. Der Wert 0.42 wurde schließlich aus einer Skalierung des Luftverkehrs um das 45-fache ermittelt, um die notwendige Sensitivität zu erreichen und anschließend linear zurückgerechnet. Diese Methode kann durchaus kritisch gesehen werden und führt zu einer großen Unsicherheit des ERF Wertes für Kondensstreifen.

Um das Reduktionspotential der Strahlungsantriebe von Kondensstreifenzirren und luftverkehrinduzierten Kohlendioxidemissionen vergleichen zu können, ist auch eine Betrachtung der Lebensdauern beider Komponenten ausschlaggebend. Während Kondensstreifenzirren nur einige Stunden existieren und dann vollständig sublimieren, können Kohlendioxidmoleküle Jahrtausende in der Atmosphäre verbleiben (Archer et al., 2009; Lee et al., 2009). Eine kurzfristige Reduktion des RF aus Kohlendioxidemissionen ist daher kaum möglich. Im Gegensatz dazu bieten Kondensstreifen eine instantane Möglichkeit zur Reduktion des luftverkehrinduzierten Strahlungsantriebs.

Neben den Kondensstreifenzirren und den Kohlendioxidemissionen gibt es mit den Stickoxidemissionen noch einen weiteren signifikanten Strahlungsantrieb im Luftverkehr. Das positive ERF der Stickoxide ist auf den Anstieg von kurzlebigen Ozon in der oberen Troposphäre zurückzuführen. Ozon ist wichtig in der Stratosphäre, um dort kurzweilige solare Strahlung zu absorbieren. Das höchste Ozonmischungsverhältnis findet sich in einer Höhe von 20 bis 40 km und wird als Ozonschicht bezeichnet. In der Troposphäre jedoch hat Ozon als Treibhausgas einen wärmenden Effekt. Hier absorbiert Ozon langwellige terrestrische Strahlung und hält die Strahlung so in der Atmosphäre. In der Troposphäre bildet sich Ozon in einer photochemischen Reaktion aus den durch die Flugzeuge emittierten Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen. Des Weiteren führen die Stickoxidemissionen zu einem Abbau von Methan. Da Methan ebenfalls als Treibhausgas wirkt ist dieses ERF negativ. Insgesamt beträgt das ERF der Stickoxidemissionen 17.5 mW m^{-2} . Damit ergibt sich als Reihung der individuellen, positiven Strahlungseffekte des Luftverkehrs; Kondensstreifenzirren, Kohlenstoffdioxid und Stickstoffdioxid.

Einen geringen positiven Strahlungsantrieb hat auch Wasserdampf, der in der normalerweise trockenen Stratosphäre emittiert wird. Dort wirkt Wasserdampf als Treibhausgas und trägt zum Abbau von Ozon bei (Gauss et al., 2003). Es wird außerdem angenommen, dass direkte Aerosol-Strahlungs-Interaktionen einen negativen Strahlungsantrieb haben. Zum Beispiel absorbiert Ruß kurzweilige Strahlung (positiver Strahlungsantrieb) und Sulfataerosole streuen kurzweilige Strahlung (negativer Strahlungsantrieb), wobei der Sulfateffekt überwiegt (Righi et al., 2013). Die Interaktion zwischen gealterten Aerosolen aus dem Luftverkehr und Wolken und der resultierende indirekte Strahlungsantrieb der Aerosole ist bisher nicht quantifiziert. Eine neue Studie von Kärcher et al. (2021) schätzt, dass der Einfluss von wieder freigesetztem Ruß auf die Bildung von Zirren vernachlässigbar ist, der Effekt flüssiger Flugzeugaerosole wird dabei nicht erfasst.

In Summe ergibt sich für den Luftverkehr ein ERF von 100.9 mW m^{-2} im Jahr 2018. Das entspricht ungefähr 4% des gesamten, von Menschen verursachten Strahlungsantriebs (Lee et al., 2021). Im Jahr 2005 lag das ERF noch bei 66.9 mW m^{-2} . Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur 11% der Weltbevölkerung mit dem Flugzeug reist und etwa 1% der Weltbevölkerung für die Hälfte der zivilen Luftverkehrsemissionen verantwortlich ist (Gössling und Humpe, 2020).

2.1.4 Bisherige Forschungsergebnisse aus Kondensstreifenmessungen

Die Kondensstreifenforschung basiert zu einem großen Teil auf Messungen. Diese erfolgen meist durch flugzeuggetragenen Experimente bei denen ein Messflugzeug direkt Daten in einem von einem Testflugzeug generierten Kondensstreifen sammelt (Knollenberg, 1972; Petzold et al., 1997; Baumgardner und Gandrud, 1998; Heymsfield et al., 1998; Schröder et al., 2000; Voigt et al., 2010, 2011, 2017; Kleine et al., 2018). Auch boden- und satellitengebundene Beobachtungen sind möglich. Laut Schumann et al. (2017) lagen im Jahr 2017 mindestens 230 Datensätze zu Kondensstreifen vor, die aus flugzeuggetragenen Messungen oder anderen Beobachtungen stammten.

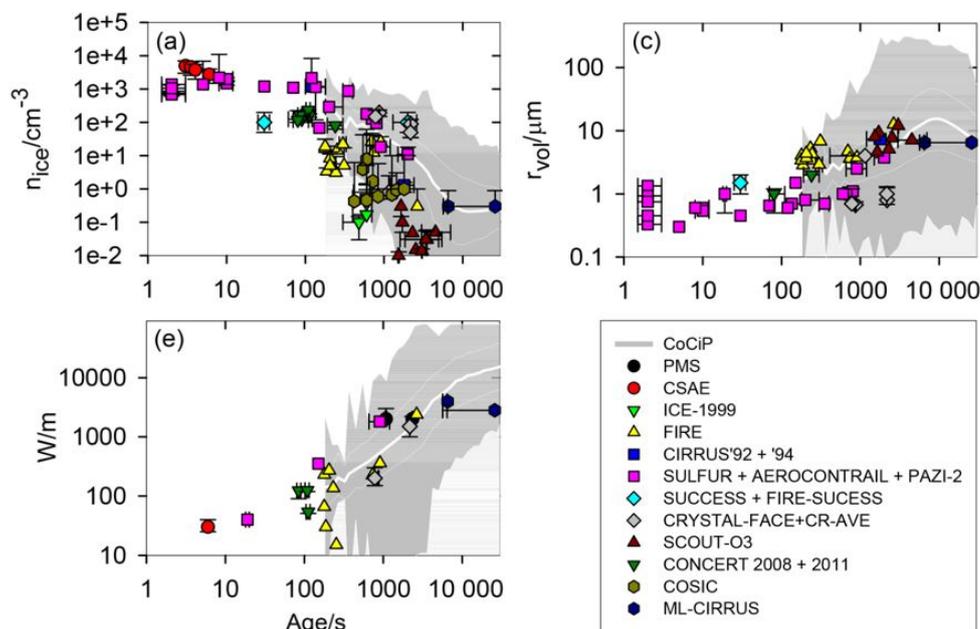


Abbildung 2.7: Kondensstreifenparameter aus in situ Messungen übernommen aus Schumann et al. (2017). (a) Eisanzahlkonzentrationen in cm^{-3} . (c) Mittlerer Volumenradius in μm . (e) Kondensstreifenweite in m. In grau dargestellt sind die Abschätzungen durch das Kondensstreifenvorhersagemodel CoCiP.

In Abbildung 2.7 ist eine Auswahl von Kondensstreifenparametern aus Schumann et al. (2017) im Verhältnis zum Kondensstreifenalter dargestellt. Die Abbildung beschränkt sich auf Ergebnisse aus flugzeuggetragenen Messungen (in situ). Obwohl bereits über die gesamte Kondensstreifenlebensdauer Messungen vorliegen, zeigt die große Bandbreite der Ergebnisse von mehreren Größenordnungen wie variabel die Kondensstreifenparameter abhängig von Flugzeug und atmosphärischen Bedingungen sind. Interessanterweise wurden laut Schumann et al. (2017) in vier Fällen Kondensstreifen oberhalb der Kondensstreifenbildungstemperatur gemessen. Als Erklärungen könnten laut den Autorinnen und Autoren aerodynamische, also druckbedingte, Kondensstreifen vorliegen oder bereits voraktivierte Aerosole den Nukleationsprozess fördern.

Auch Messungen des Contrail and Cirrus Experiment (CONCERT) aus dem Jahr 2008 sind in Abbildung 2.7 dargestellt. Während CONCERT wurden neun verschiedene kommerzielle Flugzeugtypen mit Hilfe des DLR Forschungsflugzeuges Falcon 20-E5 beprobt (Voigt et al., 2010, 2011). Die Kondensstreifen hatten mit durchschnittlich 100 Sekunden ein ähnliches Alter wie die in dieser Dissertation gemessenen Kondensstreifen.

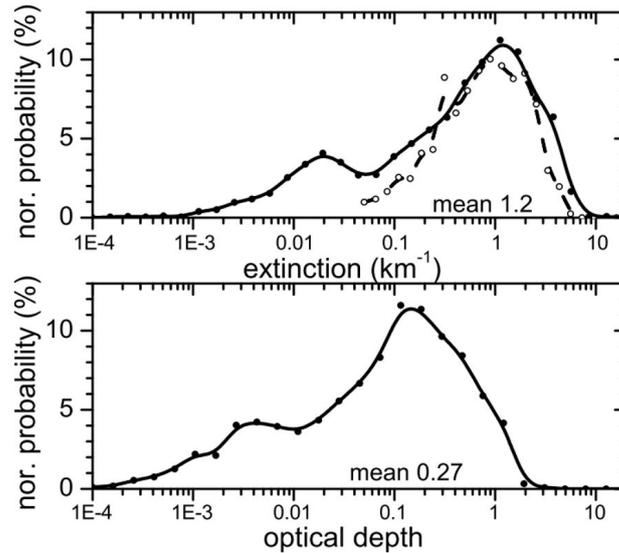


Abbildung 2.8: Normalisierte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Extinktion und der optischen Kondensstreifendicke von 14 Kondensstreifen aus neun verschiedenen Flugzeugen, gemessen während des CONCERT Experiments und übernommen aus Voigt et al. (2011).

In Abbildung 2.8 sind Wahrscheinlichkeitsverteilungen ausgewählter optischer Parameter von Kondensstreifen während CONCERT zu sehen. Die Extinktion, also die Strahlungsabschwächung pro Kilometer im Kondensstreifen, wurden mit einer FSSP (Punkte) und einem Polar Nephelometer (Kreise) gemessen. Durch die Multiplikation mit der vertikalen Ausdehnung der Kondensstreifen, die von Holzäpfel (2006) durch dynamische Wirbelsimulationen berechnet wurde, konnten dann optische Dicken ermittelt werden. Die optische Dicke eines Kondensstreifens ist ebenfalls ein Maß für die Abschwächung von Strahlung. Ein Kondensstreifen mit der optischen Dicke 1 bewirkt eine Abschwächung um den Faktor $1/e$ (Roedel und Wagner, 2011). Die mittlere optische Dicke während CONCERT lag bei 0.27.

Das Experiment ML-CIRRUS wird ebenfalls durch Schumann et al. (2017) zitiert. ML-CIRRUS konzentrierte sich auf den Vergleich von natürlichen Zirrenwolken und Kondensstreifen in mittleren Breiten (Voigt et al., 2017). Im Jahr 2014 wurden dazu Messungen mit Hilfe des DLR Forschungsflugzeugs HALO durchgeführt. Das Alter der untersuchten Kondensstreifen lag bei bis zu 5 Stunden. Die Messungen trugen zur Verbesserung der Detektion von Kondensstreifen

durch Fernerkundung und zur Verbesserung von Vorhersagemodellen bei. In Abbildung 2.9 sind Kondensstreifenvorhersagen mit dem CoCiP Modell für 2.4 und 0.4 Tage zu sehen, die in Vorbereitung auf ML-CIRRUS durchgeführt wurden.

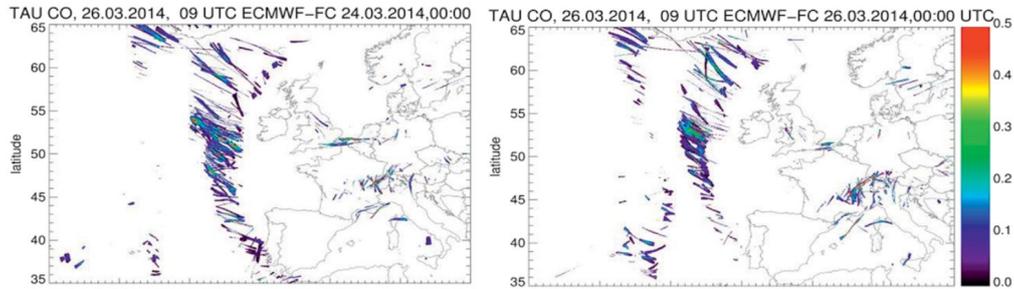


Abbildung 2.9: Karten der 2.4 und 0.4 Tage Vorhersage von Kondensstreifen mit dem CoCiP Vorhersagemodell übernommen aus Voigt et al. (2017). Abkürzungen: optische Dicke (TAU), Kondensstreifen (CO), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Forecast (FC).

Zu den in Schumann et al. (2017) zusammengefassten Satellitenbeobachtungen gehören Auswertungen von Vázquez-Navarro et al. (2015). Durch Meteosat-Beobachtungen wurden Kondensstreifen dabei unter Anwendung des automatischen Kondensstreifenverfolgungsalgorithmus ACTA erkannt. Auch Messungen vom Boden werden von Schumann et al. (2017) zitiert. Freudenthaler et al. (1995) ermittelten zum Beispiel Höhe und Breite von Kondensstreifen mit einem bodengebundenen Abtast-Lidar und Schumann et al. (2017) berechneten daraus die entsprechenden optischen Kondensstreifendicken für ein Kondensstreifenalter zwischen 1 und 60 Minuten.

2.2 Biotreibstoffe in der Luftfahrt

Typischerweise wird in modernen Gasturbinenriebwerken von Düsen- und Turbopropflugzeugen Kerosin als Treibstoff eingesetzt. Getrieben von den globalen klimatologischen Veränderungen, die in den letzten Jahren durch den Verbrauch fossiler Energieträger ausgelöst wurden (IPCC, 2021), sollen die klassische Antriebskonzepte durch möglichst CO₂-neutrale Systeme ersetzt werden. Kurzfristig ist der Luftverkehr dabei auf alternative Treibstoffe angewiesen, die keine Modifikationen am Triebwerk erfordern und damit großangelegte Umrüstungen der bestehenden Flugzeugflotte vermeiden.



Abbildung 2.10: Betankung des A320 mit Biotreibstoff auf der Ramstein Air Base am 17. Januar 2018. CC-BY: DLR.

Die Begriffsdifferenzierung bei neuen Treibstoffkonzepten ist in der Literatur nicht immer eindeutig. Die Begriffe regenerativer, alternativer, nachhaltiger oder synthetischer Treibstoff werden oft gleichwertig verwendet. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Treibstoffen aus biologischer Erzeugung (Biotreibstoffen) und elektrochemischer Erzeugung (zum Beispiel Gas-to-Liquid). Im Folgenden werden Gemische mit Biotreibstoffen abgekürzt mit SAF (von *sustainable aviation fuels*) und Gemische mit Treibstoffen elektrochemischer Erzeugung mit SSF (von *semi-synthetic fuels*).

2.2.1 Luftverkehrswachstum und Klimaschutz

Die Klimaziele der internationalen zivilen Luftfahrt motivieren den Einsatz von alternativen Treibstoffen. Im Jahr 2015 wurden mittels Flugverkehr 3.4 Milliarden Passagiere transportiert und dabei 270 Millionen Tonnen Treibstoff verbrannt. Führende Flugzeughersteller rechnen, nach einer Erholung des Luftverkehrs von der Covid-19 Pandemie, mit einer durchschnittlichen jährlichen Zunahme der Flugverkehrsbewegungen zwischen 3.5 und 4.5% in den nächsten 20 Jahren (Airbus, 2019; Boeing, 2020).

Die genannten Passagier- und Verbrauchszahlen bewirken einen großen Einfluss des Luftverkehrs auf unser Klima. Der Beirat für Luftfahrtforschung in Europa (ACARE) hat daher für den Flugverkehr Klimaziele festgelegt, die sich am Pariser Klimaabkommen vom 12. Dezember 2015 orientieren. Es wurde eine Reduktion der Kohlendioxidemissionen um 75% und eine Reduktion der Stickoxidemissionen um 90% als Ziele im Flightpath 2050 im Vergleich zum Jahr 2000 festgelegt (Darecki et al., 2011). Außerdem soll Europa laut Flightpath 2050 zu einem Exzellenzzentrum für alternative Treibstoffe werden und an die Spitze der internationalen Atmosphärenforschung treten. Auch die Europäische Kommission treibt im Rahmen des Konzeptes European Green Deal die Dekarbonisierung im Luftverkehr an (Europäische Kommission, 2021). Am 14. Juli 2021 wurde beschlossen, dass Treibstoffanbieter verpflichtet werden an EU-Flughäfen steigende Mengen an alternativen Treibstoffen zu Verfügung zu stellen. Bis 2050 sollen 63% des in Luftfahrzeugen verwendeten Kraftstoffmixes aus nachhaltigen Treibstoffen bestehen.

Einiges wurde bisher geleistet, um die beschriebenen Klimaziele zu erreichen. Technische Entwicklungen haben in den letzten Jahren zu einer Abnahme des Treibstoffverbrauchs pro Passagierkilometer geführt. Lufthansa (2017) berichtet von einem Rückgang des spezifischen Treibstoffverbrauchs über 10% in den Jahren 2007 bis 2016. Zu den technische Entwicklungen gehören effizientere Tragflügel designs und Triebwerkstechnologien, Gewichtsreduzierungen und der Einsatz neuer Materialien. Als nächsten Schritt rücken alternative Energieträger immer mehr in den Fokus (Grewe et al., 2021). Neben Biotreibstoffen bieten auch Wasserstoff-, Flüssiggas- und elektrische Antriebe Potential zu einer Mitigation der Klimawirkung im Luftverkehr. Zusätzlich zu den ökologischen Vorteilen bieten alternative Energieträger eine Möglichkeit sich vom stark schwankenden Ölpreis unabhängig zu machen (Kaltschmitt und Neuling, 2018).

2.2.2 Verfahren zur Biotreibstoffgewinnung

In den letzten Jahren wurden diverse Möglichkeiten zur Herstellung eines kerosinähnlichen Biotreibstoffes entwickelt. Laut Kaltschmitt und Neuling (2018) sind dies die wichtigsten Verfahren der Biotreibstoffgewinnung:

- AtJ: Alcohol-to-Jet ist ein Herstellungsverfahren durch eine katalytische Umwandlung von Methanol, Ethanol oder Butanol.
- BGtL oder BtL: Biogas-to Liquid oder Biomass-to-Liquid sind Fischer-Tropsch Treibstoffe die aus Synthesegas entstehen, welches aus Biogas oder Biomasse gewonnen wird.
- DSHC: Direct Sugar to Hydrocarbon Conversion ist eine Methode, bei der Kohlenwasserstoffe durch einen direkten biologischen oder thermochemischen Prozess aus Zucker gewonnen werden.
- HDCJ: Hydrotreated Depolymerized Cellulosic Jet Fuel ist ein Biokerosin, das aus solider zellulärer Biomasse durch ein Verfahren aus Pyrolyse,

Wasserstoffbehandlung und Depolymerisierung hergestellt wird.

- HEFA: Hydroprozessierte Ester und Fettsäuren werden aus pflanzlichen Ölen oder Abfällen durch ein Wasserstoffbehandlungsverfahren hergestellt.

2.2.3 Wasserstoffbehandelter Biotreibstoff aus Pflanzenöl

Biotreibstoff aus hydroprozessierten Estern und Fettsäuren (HEFA) ist im Jahr 2021 der am häufigsten verwendete Biotreibstoff und wurde im Rahmen dieser Dissertation mit flugzeuggetragenen Messungen beprobt. Das Verfahren zur Herstellung von HEFA basiert auf einer Wasserstoffbehandlung und ist in Abbildung 2.11 dargestellt (Kaltschmitt und Neuling, 2018). Der Treibstoff ist ein Produkt aus Triglyceriden, die meist aus Pflanzen- oder Algenöl stammen und aus freien Fettsäuren, die als Rückstand bei der Herstellung von Pflanzenölen und aus Ölabfällen und tierischen Fetten gewonnen werden. Die Produkte werden zuerst unter hohen Temperaturen und hohem Druck hydriert, sie werden also mit Wasserstoff gesättigt. Im Anschluss muss eine Isomerisierung stattfinden. Geradkettige Alkane werden dabei in verzweigte umgelagert, um den Gefrierpunkt zu senken. Dabei bleiben die Summenformeln unverändert. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Treibstoffgemischen dient als Pflanzenöl für die Herstellung von HEFA das Öl der Leindotterpflanze (*Camelina sativa*, siehe Abbildung 2.12). Leindotter ist ein Kreuzblütler, der in Nordeuropa und Nordasien angebaut wird. Aufgrund ihres reichen Anteils an Omega-3-Fettsäuren wird die Pflanze zunehmend von Industrie und Wissenschaft eingesetzt.

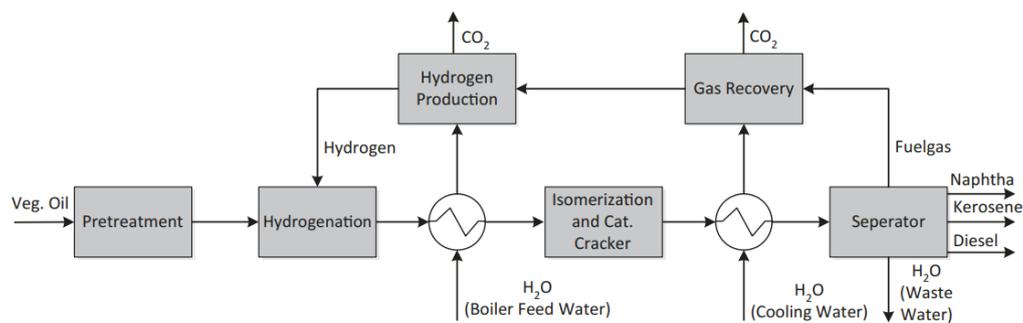


Abbildung 2.11: Schematisches Ablaufdiagramm eines typischen HEFA Produktionsprozesses (Kaltschmitt und Neuling, 2018).

Die Spezifikation D7566 der American Society for Testing and Materials (ASTM) legt seit 2011 Kriterien für den Einsatz von HEFA im Luftverkehr fest. Der Biotreibstoff hat aufgrund seiner Aromatenzusammensetzung eine geringere Viskosität als herkömmliches Kerosin. Theoretisch kann HEFA trotz dieser leicht abweichenden Treibstoffeigenschaften direkt im Triebwerk verbrannt werden (drop-in), aus Sicherheitsgründen ist aber nur der Einsatz als Mischung mit herkömmlichen Kerosin bisher spezifiziert (near-drop-in). Ein Treibstoffgemisch darf demzufolge maximal 50% HEFA beinhalten.



Abbildung 2.12: HEFA wird oft aus dem Öl der *Camelina sativa* hergestellt, zu Deutsch Leindotter (Kaltschmitt und Neuling, 2018).

2.2.4 Zusammensetzung und Eigenschaften von Biotreibstoffen

Chemisch gesehen besteht Kerosin aus einer Mischung von verschiedenen Kohlenwasserstoffen. Dazu gehören langkettige, gesättigte Kohlenwasserstoffe mit einer molekularen Verbindung aus 10 bis 18 Kohlenstoffatomen und ringförmige Aromaten (Kaltschmitt und Neuling, 2018). Im Triebwerk bildet sich aus der Verbrennung dieser Kohlenwasserstoffe unter Energiezufuhr Ruß. Bei Ruß handelt es sich um nicht-flüchtige schwarze Feinstaubpartikel, die hauptsächlich aus Kohlenstoff in einer ungeordneten Struktur bestehen (Warnatz et al., 2006). Aromaten kennzeichnen sich durch eine nach der Hückel-Regel bestimmbare Anzahl an delokalisierten π -Elektronen (Wollrab, 2014). Diese können in Paaren zusammengefasst in einer vereinfachten Grenzstruktur als konjugierte, also abwechselnd mit einer Einfachbindung ausgeführte Doppelbindungen dargestellt werden. Der Doppelbindungsanteil erhöht die Bindungsenergie der Aromaten gegenüber den langkettigen Kohlenwasserstoffen und verstärkt bei einer Verbrennung die Rußbildungseigenschaften (Cain et al., 2013; Brem et al., 2015).

Man unterscheidet mono-, bi- und polycyclische Aromaten. Die einfachste aromatische Verbindung ist das monocyclische Benzol (C_6H_6). Eine aromatische Verbindung in Treibstoffen, die als besonders rußfördernd eingeschätzt wird, ist das bicyclische Naphthalen oder Naphthalin ($C_{10}H_8$). Die erhöhte Rußbildung bei der Verbrennung von Naphthalen gegenüber Benzol ist auf die veränderte Molekülstruktur und auf das geringere Wasserstoff zu Kohlenstoff Verhältnis zurückzuführen (Chin und Lefebvre, 1990; Brem et al., 2015).

In Tabelle 2.1 sind typische Eigenschaften von an deutschen Flughäfen erhältlichem Kerosin dargestellt, die im Jahr 2012 in einer Studie von Lufthansa aufgearbeitet wurden (Zschoke et al., 2012). Bei allen Treibstoffen handelt es sich um Kerosin nach der im internationalen zivilen Luftverkehr verwendeten Spezifikation Jet A-1. Die Bestimmung der Eigenschaften erfolgte hauptsächlich nach ASTM Standards. Leichte Unterschiede in den physikalisch-chemischen Eigenschaften sind für Treibstoffe aus verschiedenen Raffinerien typisch (Zschoke et al., 2012). Die Treibstoffdichte liegt meist zwischen 790 und 810 kg m^{-3} . Der Heiz-

wert, also die bei der Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, ist für alle Treibstoffe ähnlich. Der Schwefelgehalt liegt an deutschen Flughäfen zwischen 100 und 1000 ppm und damit unterhalb der internationalen Werte. Ein typischer Aromatenanteil in herkömmlichen Kerosin liegt zwischen 12 und 22% des Treibstoffvolumens. Der Biotreibstoff HEFA enthält dagegen gar keine Aromaten (Kaltschmitt und Neuling, 2018). Da der Aromatengehalt Einfluss auf Treibstoffeigenschaften wie der Dichte und der Viskosität hat, schreibt die Spezifikation ASTM-D7566 den Aromatenanteil eines Biotreibstoffgemisches mit mindestens 8 Vol.-% vor. Der Anteil des Aromatentyps Naphthalen in herkömmlichen Kerosin schwankt stark (Zschoke et al., 2012).

Tabelle 2.1: Physikalisch-chemische Eigenschaften von an deutschen Flughäfen erhältlichen Jet A-1 Treibstoffen. Die Auswahl an vier Kerosinproben wurde übernommen aus einem Bericht der Lufthansa über Treibstoffzusammensetzungen in der Luftfahrt (Zschoke et al., 2012).

		Kerosinprobe			
		# 1	# 2	# 3	# 4
Aromaten ^a	Vol.-%	21.6	18.1	13.7	16.2
Dichte ^b	kg m ⁻³	797.4	795.6	795.0	811.7
Heizwert ^c	MJ kg ⁻¹	43.17	43.28	43.39	43.17
Naphthalene ^d	M.-%	0.69	0.13	1.17	0.41
Schwefel ^e	M.-%	<0.001	0.0145	0.10	<0.001
Viskosität ^f	mm ² s ⁻¹	3.11	3.34	3.78	4.06

ASTM: ^aD1319, ^bD4052(15°C), ^cD3338, ^dD1840, ^fD445(-20°C)
^eDIN EN ISO 14596

2.2.5 Bisherige Forschung zu Rußemissionen und Eisbildung beim Einsatz von alternativen Treibstoffen

Im Folgenden soll der Stand der Forschung zum Einfluss von alternativen Treibstoffen auf Rußemissionen und die Bildung von Kondensstreifen vorgestellt werden. Die Ergebnisse wurden sowohl aus Boden- und Flugzeugmessungen, wie auch aus Modellen entwickelt. Letztendlich ist die Verbindung zwischen alternativen Treibstoffen, der emittierten Rußanzahl, den nukleierten Eisanzahlen und der Klimawirkung von Kondensstreifen noch nicht vollständig hergestellt. Es existiert insbesondere ein Defizit bei der Messung von Biotreibstoffeffekten auf Eiskristalle in Kondensstreifen.

Rußemissionen können sowohl an Triebwerks-Testständen am Boden, als auch direkt am Flugzeug im Reiseflug gemessen werden. Lobo et al. (2011) führten Bodenmessungen von Rußemissionen durch, die durch die Verbrennung eines 50%igen Fischer-Tropsch Treibstoffgemisches in einer CFM56-7B Testzelle entstanden. Es wurde eine Reduktion der Rußanzahl von bis zu $34 \pm 7\%$ und der Rußmasse von bis zu $39 \pm 7\%$ festgestellt. Schripp et al. (2018) untersuchte

im Rahmen des Projektes ECLIF I durch Bodenmessungen ebenfalls ein Gemisch mit Fischer-Tropsch Treibstoff. Bei der Verbrennung des Treibstoffgemisches durch einen A320 mit V2527-A5 Triebwerken kam es zu einer Reduktion der Rußanzahl um 50% und der Rußmasse um 70%. Die Übertragung von Rußmessungen am Boden auf Reiseflugbedingungen ist eine Herausforderung, da Temperatur und Druck am Triebwerkseinlass Einfluss auf das Brennverhalten haben. Daher werden im Standard ICAO Annex 16 (2017) zur Ermittlung der tatsächlichen Rußemissionen auch Masse- und Anzahlemissionsindizes für Ruß im Flug verlangt.

Tabelle 2.2 zeigt eine Übersicht über die Experimente zu alternativen Treibstoffen der letzten Jahren, während denen auch flugzeuggetragene Messungen durchgeführt wurden und an denen das Institut für Physik in der Atmosphäre des DLR beteiligt war.

Tabelle 2.2: Übersicht über bisherige Treibstoffexperimente mit flugzeuggetragenen Messungen an denen das DLR beteiligt war.

Experiment	Jahr	Treibstoffe	Publikationen
ACCESS II	2014	Schwefelreduziertes Kerosin und Biotreibstoffgemische	Moore et al. (2017)
ECLIF I	2015	Halb- und vollsynthetische Treibstoffe	Kleine et al. (2018)
ECLIF II/ NDMAX	2018	Biotreibstoffgemische	Bräuer et al. (2021a) Voigt et al. (2021a)
ECLIF III	2021	reine Biotreibstoffe	–

ACCESS II war das Vorgängerexperiment für die DLR-Projektserie Emission and Climate Impact of Alternative Fuels (ECLIF) und wurde 2014 am NASA Armstrong Flight Research Center in Kalifornien durchgeführt. Während ACCESS II wurde erstmals experimentell die Reduzierung von Ruß im Reiseflug durch den Einsatz von Biotreibstoffen untersucht (Moore et al., 2017). Durch den Einsatz eines 50:50 Treibstoffgemisches aus HEFA und Kerosin mit reduziertem Schwefelgehalt konnte eine direkte Reduzierung der Partikelanzahl und -masse zwischen 50 und 70% nachgewiesen werden. In Abbildung 2.13 sind die anzahlbezogenen Rußemissionsindizes in Abhängigkeit vom Treibstoffverbrauch aufgezeigt.

Das Experiment ECLIF I befasste sich ein Jahr später ausschließlich mit synthetischen Treibstoffgemischen und fand in Manching, Deutschland statt. Während den ACCESS II und ECLIF I Messungen herrschten relativ trockene atmosphärische Bedingungen. Daher gab es keine oder nur kurzlebige Kondensstreifen, so dass eine quantitative Messung der resultierenden Eisanzahlen in Kondensstreifen aussteht und Messungen diesbezüglich fehlen. Allerdings wurden in beiden Experimenten viele Erkenntnisse über Rußemissionen und das Sublimationsverhalten von Eispartikel in Kondensstreifen gewonnen. Das Expe-

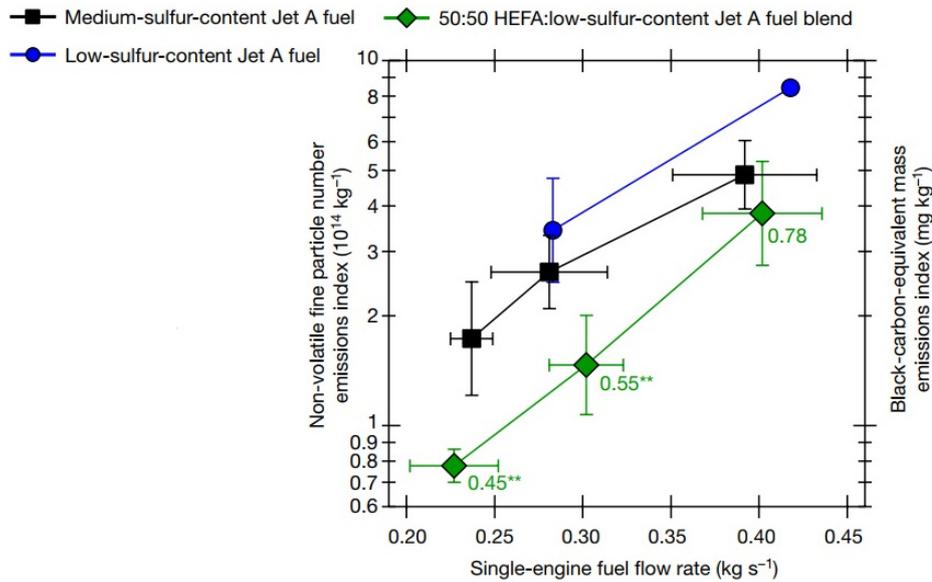


Abbildung 2.13: Rußemissionsindex über dem Treibstofffluss für drei verschiedene Treibstoffe gemessen in Flughöhen zwischen 9 und 11 km während der ACCESS Flugkampagne (Moore et al., 2017).

riment ECLIF II/NDMAX ist Thema dieser Dissertation. Es beschäftigt sich mit der Verbrennung von Biotreibstoffgemischen und wird in Kapitel 5.1 beschrieben. Das Nachfolgeexperiment ECLIF III ist für das Jahr 2021 geplant.

Modellberechnungen werden verwendet, um die oben beschriebenen Kondensstreifenmessungen zur ergänzen. Kärcher (2016) zeigte in theoretischen Berechnungen mit einem mikrophysikalischen Modell, dass die Anzahl der initial gebildeten Eispartikel mit den Rußanzahlen linear korreliert. Allerdings gilt dies, wie in Abbildung 2.14 im linken Diagramm zu sehen, nur für Rußanzahlen größer als 10^{13} kg^{-1} . Die Rußanzahlen aus modernen Triebwerken liegen, auch mit Einsatz von Biotreibstoffen, in diesem linearen Bereich. UAPs tragen laut dieser Studie nicht zur Bildung der Eispartikel in modernen Triebwerken bei. Sollte in Zukunft der Wert der Rußemissionen durch verbesserte Triebwerke oder den Einsatz von Biotreibstoffen jedoch unterhalb von 10^{13} kg^{-1} sinken, spielen laut mikrophysikalischen Modellen UAPs besonders für Kondensstreifen, die in Umgebungen weit unterhalb der Schmidt-Appleman Temperatur gebildet wurden, wieder eine Rolle (Kärcher, 2018).

Unterstrasser und Gierens (2010) belegten mit Hilfe von LES Simulationen, dass die totale Extinktion, also die Abschwächung von Strahlung durch einen Kondensstreifenzirrus über seine ganze horizontale Ausbreitung, in erster Linie von der initialen Eisanzahl abhängt. Die Größe der Eispartikel haben zwar ebenfalls einen Effekt auf die optischen Eigenschaften der Kondensstreifen, die initiale Eisanzahl ist jedoch für die totale Extinktion ausschlaggebend. Eine Reduktion der initialen Eisanzahl kann zum Beispiel durch Biotreibstoffe erfolgen.

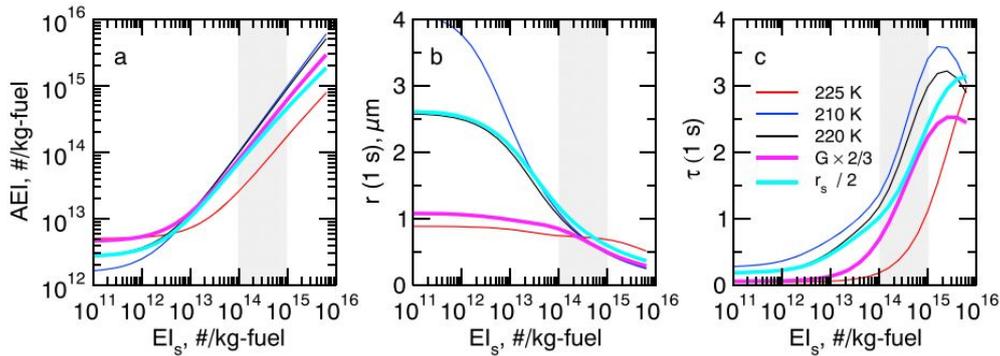


Abbildung 2.14: Änderungen der Eiskondensstreifen-Eigenschaften junger Kondensstreifen abhängig vom Rußemissionsindex EI_s und der Abgasstrahlübersättigung übernommen aus Kärcher (2016). AEI: scheinbarer Eisemissionsindex, r : durchschnittlicher Eiskondensstreifenradius, τ : optische Kondensstreifenenddicke.

Einen wichtigen Beitrag zur Abschätzung der Klimawirkung von Kondensstreifen leisteten Burkhardt et al. (2018). In einem globalen Modell wurde die Verringerung der Klimawirkung von Kondensstreifen durch eine Verringerung der initialen Eisanzahlen untersucht. Die Weltkarte in Abbildung 2.15 stellt die globalen Veränderungen im Strahlungsantrieb bei einer Reduktion der initialen Eisanzahlen in Kondensstreifen um 80% dar. Die globale Klimawirkung von Kondensstreifen hängt nicht-linear von den initialen Eisanzahlen ab (siehe Diagramm in Abbildung 2.15). Eine Reduktion der initialen Eisanzahlen zum Zeitpunkt der Kondensstreifenbildung um 80%, wie sie eventuell durch den Einsatz von Biotreibstoffen möglich werden könnte, führte im globalen Modell zu einer Reduktion der Klimawirkung von Kondensstreifen von 50%. Eine Reduktion der initialen Eisanzahlen um 50% führte nur zu einer Reduktion der Klimawirkung von Kondensstreifen von 20%.

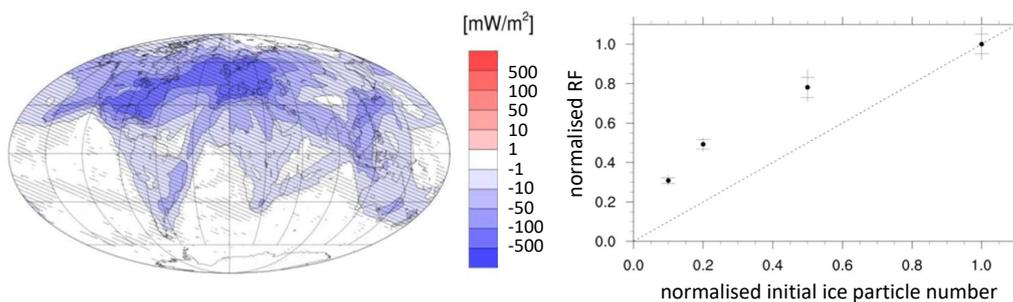


Abbildung 2.15: (links) Globale Verteilung des Radiative Forcing (RF) von Kondensstreifen bei einer Reduktion der initialen Eisanzahlen um 80%. (rechts) Globales netto Radiative Forcing in Abhängigkeit von der initialen Eispartikelanzahl (Burkhardt et al., 2018).

Vor Beginn dieser Doktorarbeit waren keine direkten Messungen von Eisemissionen bei einem Einsatz von Biotreibstoffen veröffentlicht. Alles Wissen

über Biotreibstoffeffekte auf Kondensstreifen beruht daher auf Modellierungen. Mit dieser Arbeit wird ein wichtiger Beitrag geleistet, um den Einfluss von Biotreibstoffen auf Kondensstreifen experimentell zu untersuchen und die Modelle zu validieren.

2.3 Kondensstreifen durch Raketenstarts (Exkurs)

Auch beim Start einer Rakete können sich Kondensstreifen bilden. So zum Beispiel beim Start der Forschungsrakete TEXUS-53 der Mobilien Raketenbasis (Moraba) des DLR Raumflugbetriebs in Kiruna im Jahr 2016. Der Kondensstreifen ist in Abbildung 2.16 zu sehen.



Abbildung 2.16: Kondensstreifen der Forschungsrakete TEXUS-53, gestartet im Januar 2016. Im senkrechten Kondensstreifen zeigen sich die Änderungen der Windrichtung in der Atmosphäre. CC-BY: DLR.

Bei der Bildung von Raketenkondensstreifen kann genau wie bei Flugzeugkondensstreifen das Schmidt-Appleman Kriterium angewandt werden. Voigt et al. (2016) beschrieben als Beispiel einer Kondensstreifenbildung den Start einer Ariane 5 ECA Rakete in Kourou am 26. November 2010. Der Kondensstreifen bildete sich in 10 bis 20 km Höhe. Die Beobachtung erfolgte durch den Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager (SEVIRI) auf dem METEOSAT-9 Satelliten. In der Hauptstufe der Ariane 5 ECA wurde flüssiger Wasserstoff und Sauerstoff verbrannt und damit eine große Menge an Wasserdampf emittiert. Die Nukleationspartikel für die Kondensstreifen der Rakete stammten hauptsächlich aus den Feststoffboostern. In den Boostern wurde ein Feststoffgemisch aus Hydroxylterminiertem Polybutadien (HTPB), Ammoniumperchlorat und Aluminium verbrannt und damit Aluminiumoxid (Al_2O_3) emittiert. Die Eispartikel im Raketenkondensstreifen bildeten sich also durch Nukleation auf emittiertem Aluminiumoxid und der Aufnahme von Wasserdampf aus der kryogenen Hauptstufe und der übersättigten Atmosphäre.

Voigt et al. (2016) schätzen die instantane Klimawirkung von Raketenstarts insgesamt mit nur wenigen mW m^{-2} . Das liegt daran, dass Raketenstarts nur relativ selten stattfinden. Nach inoffiziellen Zahlen wurden im Jahr 2020 weltweit 114 Startversuche durchgeführt. Damit ist die globale Klimawirkung von Kondensstreifen aus Raketenstarts noch gering. Mit dem Beginn der zivilen Raumfahrt ist in den nächsten Jahrzehnten jedoch mit vermehrten Raketenstarts zu rechnen.

Ergebnisse aus flugzeuggetragene Messungen im Abgasstrahl von Raketen liegen nur in geringer Anzahl vor. Zwischen 1996 und 2000 wurden Raketenstarts auf Cape Canaveral und der Vandenberg Airforce Base, USA durch das hochfliegende NASA Forschungsflugzeug WB57 beprobt (Voigt et al., 2013). Die Messungen fanden in einer Höhe von 16 bis 19 km statt. Es handelte sich um folgende Raketen: Titan IV, Delta II, Athena II, Atlas IIAS und die Space Shuttles Columbia, Discovery and Atlantis. Die flugzeuggetragenen Messungen, die von Voigt et al. (2013) aufgearbeitet wurden, zeigen vor allem wie Ozon in der Stratosphäre durch Reaktion mit emittiertem Chlor abgebaut wird. Der totale Ozonverlust durch Raketenstarts wird mit höchstens 1% angegeben. Emissionen aus Raketenstarts in der Troposphäre werden innerhalb weniger Wochen ausgewaschen, können abhängig von der Höhe aber mehrere Jahre in der Stratosphäre bestehen. Mehrere Studien berichten außerdem von Wolkenbildung in der Mesosphäre nach einem Raketenstart in über 100 km Höhe (Stevens et al., 2003, 2005; Kelley et al., 2010). Mesosphärenwolken scheinen in der Morgen- oder Abenddämmerung durch die Anstrahlung der Sonne in großen Höhen zu leuchten.

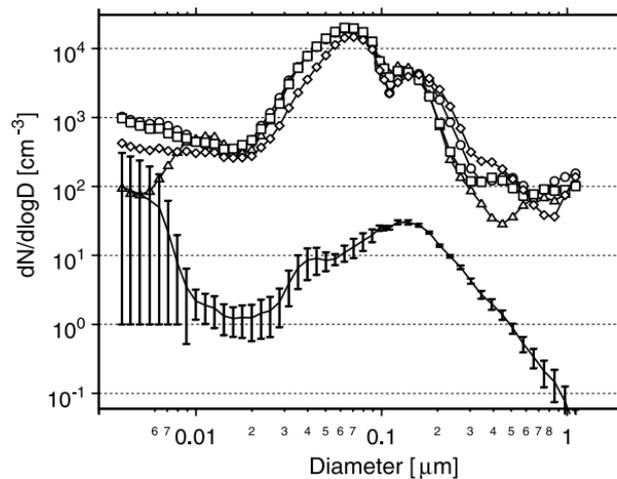


Abbildung 2.17: Symbole zeigen Größenverteilungen der Aerosolpartikel für vier verschiedene Kondensstreifen der Athena II Rakete übernommen aus Schmid et al. (2003). Die Linie zeigt die Größenverteilung des Hintergrundaerosols.

Die Größenverteilungen der Aerosolpartikel, auf denen Eiskristalle in einem Raketenkondensstreifen nukleieren, wurde von Schmid et al. (2003) für vier verschiedene Kondensstreifen einer Athena II Rakete gemessen. Es handelt sich dabei um Messungen vom 24. September 1999 mit der WB57 in einer Höhe von 18,7 km. Als Messinstrumente wurden eine Focused Cavity Aerosol Spectrometer (FCAS) und 5 Condensation Nucleus Counters (CNCs) eingesetzt. Beide Instrumente verwenden Verdampfer und die Messung von Eiskristallen ist somit ausgeschlossen. Die Messungen fanden 3,6 bis 26,3 Minuten nach dem Start der Athena II Rakete statt und dauerten 6 bis 20 Sekunden. In Abbildung 2.17 sind die Größenverteilungen dargestellt. Die Aerosolpartikel in den Kondensstreifen

bestanden hauptsächlich aus Aluminiumoxid und das Hintergrundaerosol bestand hauptsächlich aus Schwefelsäure. Das Maximum der Größenverteilung lag bei etwa einem Partikeldurchmesser von $0.07 \mu\text{m}$. Damit sind die Partikel etwas größer als die emittierten Rußpartikel, die in der Luftfahrt als Nukleationskerne für Eispartikel in Kondensstreifen dienen (Moore et al., 2017). Der Emissionsindex für Aluminiumoxid liegt laut Schmid et al. (2003) bei $8.7 \cdot 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ und liegt damit ebenfalls etwas über dem typischen Rußemissionsindex in der Luftfahrt.

Trotz der geringen Klimawirkung von Kondensstreifen aus Raketenstarts wird in der Raumfahrt nach neuen grünen Treibstoffen gesucht. Die Motivation liegt dabei eher in umweltfreundlichen Produktions-, Transport- und Lagerungsmöglichkeiten am Boden. Das oft verwendete Hydrazin wird außerdem als in hohem Maße gesundheitsschädlich eingestuft und soll daher in Zukunft ersetzt werden. Neue Treibstoffsysteme werden zum Beispiel im DLR Projekt Future Fuels untersucht. Im Fokus stehen dabei Methan, Lachgas und vergelte Treibstoffe (Ciezki et al., 2019; Pregger et al., 2019).

Kapitel 3

Messung von Eispartikeln mit Laserspektrometrie

Dieses Kapitel informiert zunächst über die Interaktion von Strahlung und Eispartikeln als Grundlage der optischen Spektrometrie, die zur Messung von Eispartikelanzahl und -größe in dieser Arbeit verwendet wird. Im Anschluss werden das Messinstrument FFSSP und die Kalibrationsarbeiten am Messinstrument beschrieben.

3.1 Interaktion von Strahlung und Eispartikeln

Die Interaktion von elektromagnetischer Strahlung mit Bestandteilen der Atmosphäre und mit der Erdoberfläche trägt entscheidend zum Wetter- und Klimasystem der Erde bei. Der Strahlungstransfer findet dabei für Wellenlängen vom ultravioletten über den sichtbaren (solaren) bis zum infraroten (terrestrischen) Bereich statt. Beispiele für Transferprozesse sind die Absorption von Strahlung an Gasmolekülen oder die Streuung und Absorption von Strahlung an Aerosolen. Durch die Transferprozesse kommt es zu einer Extinktion (Abschwächung) der Strahlung. Die in diesem Kapitel beschriebene Theorie des atmosphärischen Strahlungstransports basiert auf Wendisch und Yang (2012).

Extinktion

Die Extinktion eines Lichtstrahls mit einer Intensität I entlang eines Weges durch eine dünne Schicht der Atmosphäre kann laut Wendisch und Yang (2012) über die Intensitätsänderung beschrieben werden:

$$dI(\lambda) = -I(\lambda) K_E(\lambda) N \sigma ds. \quad (3.1)$$

Dabei ist λ die Wellenlänge der Strahlung, K_E ist die Extinktionseffizienz der vorliegenden Partikel, N die Anzahl an Partikeln pro Luftvolumen, σ ist der Wirkungsquerschnitt der Partikel und ds ist differentielle Weglänge entlang der Strahlungsrichtung. Die Extinktionseffizienz ist die Summe der Streu- und Absorptionseffizienz:

$$K_E = K_S + K_A. \quad (3.2)$$

Die Effizienz der Transferprozesse ist abhängig vom dimensionslosen Größenparameter

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (3.3)$$

und vom komplexen, ebenfalls Wellenlängen-abhängigen Brechungsindex

$$n = n_r + n_i i. \quad (3.4)$$

Der reale Anteil n_r des Brechungsindex gibt das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit in einem Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit bei Durchgang durch einen Partikel an. Der imaginäre Anteil n_i beschreibt die Absorptionsrate der elektromagnetischen Welle in einem Partikel. Wird keine elektromagnetische Strahlung absorbiert, so ist der imaginäre Anteil 0 (Wendisch und Yang, 2012).

Streuung

Bei der Messmethode der optischen Spektrometrie, die in dieser Dissertation verwendet wird, werden Eispartikelanzahl und -größe in Kondensstreifen über die Änderung des vorwärts gerichteten Streuprofiles der Partikel in einem Laserstrahl bestimmt. Im Folgenden wird daher die Streuung an Eispartikeln auf Grundlage von Wendisch und Yang (2012) diskutiert.

Das Streuprofil wird maßgeblich von der Größe des Partikels bestimmt, an dem das Licht gestreut wird. Ist der Größenparameter x kleiner als 1, so wird Strahlung gleichmäßig in den vorderen und hinteren Halbraum des Partikels gestreut. Liegt der Größenparameter x in der Ordnung von 1 oder ist größer als 1, wird die Strahlung hauptsächlich in den vorderen Halbraum abgestrahlt. Abhängig vom Größenparameter x können verschiedene Streuregime definiert werden. Wenn Partikel einen Größenparameter wesentlich kleiner als 1 haben, so spricht man vom Rayleigh Regime. Im sichtbaren Bereich des Lichtspektrums gehört zum Rayleigh Regime beispielsweise die Streuung an Luftmolekülen. Die Streueffizienz für Partikel dieses Größenparameters folgt dem Ausdruck

$$K(\lambda) \propto \lambda^{-4}. \quad (3.5)$$

Alle Partikel mit Größenparametern zwischen 0.1 und 50 fallen in den Bereich des Mie Regimes, benannt nach Gustav Mie (1868–1957). In diesen Bereich fallen Eispartikel mit in jungen Kondensstreifen typischen Größen von 0.5 bis 10 μm . In Abbildung 3.1 sind Streuphasenfunktionen der Strahlung an unterschiedlich großen Eispartikel mit dem Brechungsindex $n_{Eis} = 1.31$ dargestellt. Die Miestreuung unterliegt einem gedämpften Schwingungsverhalten. Die kohärente Anregung in senkrechter und paralleler Richtung überlagert sich und aus den Interferenzen entstehen phasenabhängige Intensitätsminima und -maxima. Das größte Maximum besteht bei 0° in Richtung des vorderen Halbraums. Das Maximum wird umso ausgeprägter, je größer der Partikeldurchmesser ist.

Ein relatives Maß, wie effektiv Strahlung an einem Partikel gestreut wird, ist der Streuquerschnitt. Er ergibt sich aus dem Verhältnis des Gesamt-Strah-

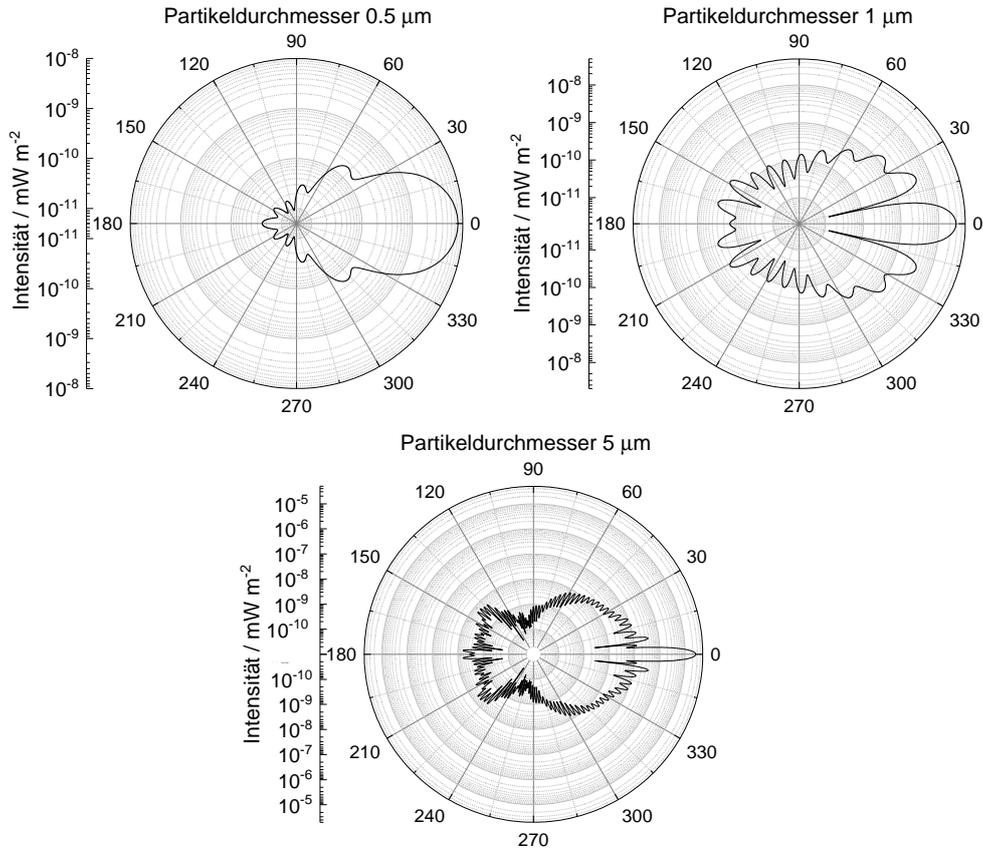


Abbildung 3.1: Streuphasenfunktion der Strahlung um Eispartikel der Größen 0.5, 1 und 5 μm bei einem Brechungsindex von $n = 1.31$. Der vordere Halbraum spannt sich Richtung 0° auf und der hintere Halbraum Richtung 180° . Die Lichtquelle hat eine Wellenlänge von $\lambda = 550 \text{ nm}$. Software: Laven (2021).

lungsfusses Φ_S (Strahlungsenergie pro Zeiteinheit) zur Strahlungsflussdichte \bar{I}_S (Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit durch eine Einheitsfläche hindurch tritt):

$$\sigma_S = \frac{\Phi_S}{\bar{I}_S}. \quad (3.6)$$

In Abbildung 3.2 ist der Streuquerschnitt für Eispartikel in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser mit unterschiedlichem Seitenverhältnis r dargestellt. Das gedämpfte Schwingungsverhalten der Miestreuung bildet sich auch hier ab. Im Partikelgrößenbereich zwischen 1 und 5 μm können einem Streuquerschnitt aufgrund der Mie-Oszillationen bis zu drei verschiedene Partikelgrößen zugeordnet werden. Mit Abweichung des Seitenverhältnisses vom Wert 1, also von einem runden Partikel, flachen die Mie-Oszillationen ab.

Die Berechnung der Streuquerschnitte für Partikel mit einem Seitenverhältnis ungleich 1 erfolgte in dieser Arbeit mit Hilfe der T-Matrix Methode durch Dr. Beiping Luo am Institut für Atmosphäre und Klima in der Eidgenössischen

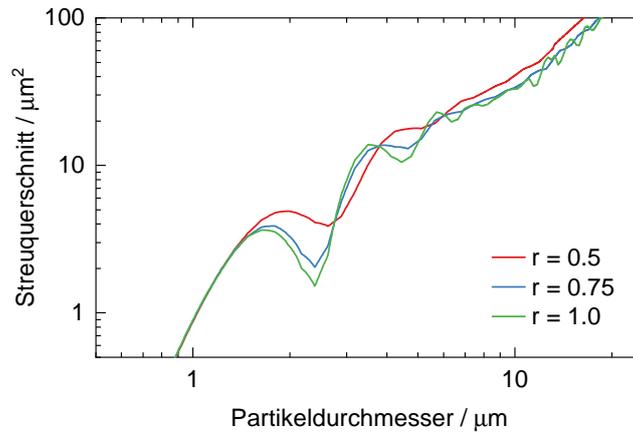


Abbildung 3.2: Streuquerschnitt von Eispartikeln in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser. Die Wellenlänge $\lambda = 632.8$ nm entspricht dem Laserlicht des verwendeten Messinstruments, das in einem Winkel von 3 bis 15° detektiert wird. Für Eispartikel wird ein Brechungsindex $n = 1.31$ angenommen und das Seitenverhältnis r variiert. Die Berechnungen stammen von Dr. Beiping Luo, ETH Zürich, Institut für Atmosphäre und Klima.

Technischen Hochschule Zürich. Bei der T-Matrix Methode handelt es sich um eine Rechenweise die, wie auch die Mie-Theorie, Lösungen für die Randbedingungen der Maxwell-Gleichungen liefert. Die Maxwell-Gleichungen dienen zur Beschreibung elektrischer Felder. Aus der Mie-Theorie ergeben sich geschlossene Lösungen für kugelförmige Teilchen in einem ebenen Wellenfeld, während die T-Matrix Methode numerische Lösungen für asphärische, aber meist rotations-symmetrische Teilchen ausgibt. Die T-Matrix Methode wurde durch Waterman

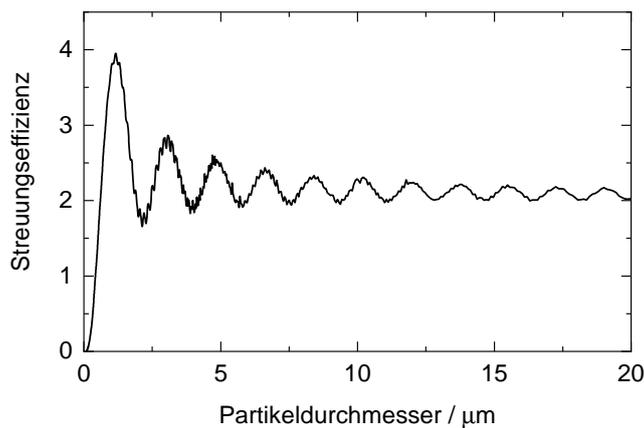


Abbildung 3.3: Streueffizienz von runden Eispartikeln in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser bei Sonnenlicht der Wellenlänge $\lambda = 550$ nm. Für Eispartikel wird ein Brechungsindex $n = 1.31$ angenommen. Software: Rosenberg (2013).

(1965) vorgestellt und durch Mishchenko und Travis (1994) weiterentwickelt. Bei der Berechnung wird eine zufällige Ausrichtung der Ellipsoide angenommen.

Normalisiert mit der geometrischen Querschnittfläche ergibt sich aus dem Streuquerschnitt die dimensionslose Streueffizienz K_S der Eispartikel. In Abbildung 3.3 ist die Streueffizienz für Eispartikel dargestellt. Es handelt sich um eine gedämpfte Oszillation, die für große Partikel gegen den Wert 2 geht. Die Oszillationen der Phasenfunktion werden schwächer wenn der Größenparameter sich in einen Bereich oberhalb von 50 bewegt. Dieser Bereich liegt dann im Regime der geometrischen Optik.

3.2 Das schnelle, vorwärtsstreuende Laserspektrometer FFSSP

Die Vermessung der Eispartikel in Kondensstreifen erfolgte in dieser Arbeit mit Hilfe der Fast Forward Scattering Spectrometer Probe (FFSSP). Das Instrument wurde als flugzeuggetragenes Laserspektrometer konzipiert und misst Aerosolgrößen und -anzahl in den Flugbereichsgrenzen herkömmlicher ziviler Forschungsflugzeuge. Partikelgrößen werden über die Messung der Lichtintensität bestimmt und digital gespeichert. Ein Partikel interagiert dabei mit dem fokussierten Laserstrahl eines Helium-Neon-Lasers und streut das Licht in die Sammeloptik. Es werden Partikelgrößen zwischen 0.5 und 25 μm gemessen. Die genauen Messgrenzen hängen von der Einteilung der Größenbereiche, also der Auflösung der Größenverteilung, ab. Dabei werden die Größen in bis zu 31 Bereiche aufgeteilt. Zulässige Partikelgeschwindigkeiten beim Durchgang durch das Messvolumen liegen zwischen 20 und 125 ms^{-1} .



Abbildung 3.4: Fast Forward Scattering Spectrometer Probe (FFSSP). Die beiden schwarzen Messarme zeigen in Flugrichtung und sind mit zwei goldenen Korolev-Spitzen ausgestattet. CC-BY: DLR.

Das in dieser Arbeit verwendete Modell basiert auf dem Laserspektrometer FSSP-300 des amerikanischen Herstellers Particle Measuring Systems (PMS). Eine erste Beschreibung der FSSP-300 findet sich in Knollenberg (1981). Sie wurde in ihren Anfangsjahren aufwendig charakterisiert (Dye und Baumgardner, 1984; Baumgardner et al., 1985; Baumgardner und Spowart, 1990). Von den Autoren wurde die FSSP-300 im Anschluss in Experimenten zur Messungen von Kondensstreifen und Zirren eingesetzt und weiter verbessert (Baumgardner et al., 1992; Baumgardner und Gandrud, 1998; Brenguier et al., 1998).

mehreren kleinen Intensitätsmaxima kommen (Baumgardner und Spowart, 1990; Nagel et al., 2007). Sowohl die Laserleistung, als auch das Profil des FFSSP Lasers wurden nach Erhebung der Messdaten überprüft. Die Laserleistung wurde mit einem Powermeter gemessen und betrug 4.75 mW (siehe Abbildung 3.6 rechtes Bild).



Abbildung 3.6: Im linken Bild ist die FFSSP ohne Abdeckung zu sehen. Hinter dem unteren Messarm ist das schwarze Laserrohr zu erkennen. Auf dem rechten Bild ist der Aufbau zur Messung der Laserleistung mit einem Powermeter zu sehen. Der Messarm vor dem Laser wurde dazu abgebaut.

Die gestreuten Lichtimpulse werden durch ein rundes Sichtfenster und über ein rechtwinkliges Prisma in die Optik geleitet. Das Fenster lässt, für im Fokus des Lasers gestreutes Licht, nur einen Streuwinkel von maximal 15° zu. Um das vorwärts gerichtete Streumaxima bei 0° in der Winkelverteilung der Strahlungsintensität eines Eispartikels auszuschließen, ist der Streuwinkel bis 3° durch eine runde Blende maskiert. Dadurch verschärft sich die Zuordnung des Streuimpulses zu Partikelgröße. Bei der Sammeloptik handelt es sich um ein vergrößerndes Abbildungssystem. Das gesammelte Licht wird von der Objektebene auf die Bildebene um den Wert 3.5x vergrößert. Je größer diese Verstärkung eingestellt wird, desto kleiner ist die Messfläche. Über einen Strahlteiler wird die gestreute Intensität auf zwei Silizium Avalanche Photodioden als Detektoren aufgeteilt. Einer der beiden Detektoren bestimmt die Größe des Partikels. Nur für Partikel, die innerhalb des Messvolumens das Laserlicht streuen, kann die Größe exakt bestimmt werden. Das Streusignal von Partikeln, die außerhalb des Messvolumens den Laserstrahl kreuzen, unterliegt einem geometrischen Abbildungsfehler und die Partikelgröße wird abhängig von der Position unter- oder überschätzt. Der zweite Detektor ist durch eine Blende maskiert. Sein Streuimpuls ist im Vergleich zum Impuls des unmaskierten, größenbestimmenden Detektors verzerrt. Außerdem wird das Signal des maskierten Detektors gegenüber dem Signal des unmaskierten Detektors elektronisch verstärkt. Aus dem Verhältnis der beiden Detektorsignale kann über das Prinzip der Tiefenschärfe die Position der Partikel ermittelt werden. Im Englischen wird Tiefenschärfe mit *Depth of Field* übersetzt. Daher hat sich die Abkürzung DOF eingebürgert:

$$\text{DOF} = \frac{\text{Signalamplitude des qualifizierenden Detektors}}{\text{Signalamplitude des größenbestimmenden Detektors}} \quad (3.7)$$

Über die Definition eines kritischen DOF kann die Größe der akzeptierten Messfläche im Fokus des Lasers festgelegt werden. Liegt das berechnete DOF für einen Partikel unterhalb des kritischen DOF, so liegt die Position des Partikels innerhalb des Messvolumens im Zentrum zwischen den Messarmen. Dieser Partikel ist qualifiziert und wird von der FFSSP aufgezeichnet. Alle Partikel, deren DOF oberhalb des kritischen DOF liegt, werden disqualifiziert und bei der Ermittlung der Partikelkonzentration im Messvolumen verworfen.

Bei einer Messung von Partikelgrößen zwischen 0.5 und 25 μm muss ein großes Spektrum von Signalamplituden in der elektronischen Verarbeitung abgedeckt werden. Teilweise müssen die Signale aus diesem Grund stark verstärkt werden, was nicht unbegrenzt möglich ist, da starke Verstärkungen zu einer Erhöhung des elektrischen Rauschens führen. Daher verarbeiten die elektrischen Verstärker im Instrument die von den Avalanche Photodioden ausgegebenen Spannungen in zwei Stufen. Kleinere Partikel bis ungefähr 4 μm (abhängig von der Einteilung der Größenkanäle) werden in einer höheren Verstärkerstufe eingeordnet als größere Partikel. Am Ende werden also zwei Signalpaare ausgegeben und entsprechend ihres Verstärkerschwellwertes weiterverarbeitet. Die in Spannungswerten umgesetzten Lichtimpulse werden mit einem Pulshöhen-Analysator gekoppelt. Dieser vergleicht die maximale Amplitude mit einer Referenzspannung, die durch eine unabhängige Messung des Laserlichtsignals ermittelt wird.

Die neue Elektronik der FFSSP aus dem Jahr 2017 konvertiert die analogen Signale der Partikel bei einer Abtastrate von 16 MHz (8 Bit Auflösung) in eine digitale Messgröße. Für jede Partikeldetektion wird ein Zeitstempel, die Amplitude des Lichtimpulses, seine Dauer, die Zeit zwischen zwei Detektionen und das DOF aufgezeichnet. Das entspricht einer Datenrate bis zu 500 kBytes s^{-1} . Neben umfangreichen Binärdateien werden auch Textdateien der Rohdaten abgespeichert. Die Partikelkonzentration ermittelt sich aus der Anzahl der qualifizierten Partikel pro Messvolumen. Das Messvolumen ergibt sich aus der Messfläche und der Geschwindigkeit des Partikels oder im Fall von flugzeuggetragenen Messungen, der Fluggeschwindigkeit.

3.3 Charakterisierung und Kalibration des Laserspektrometers

Obwohl das Vorgängermodell bereits gut charakterisiert war, muss die FFSSP mit dem elektronischen Upgrade aus dem Jahr 2017 neu kalibriert werden. Im folgenden Kapitel sollen die Arbeiten vorgestellt werden, die zur Charakterisierung und Kalibration der FFSSP unmittelbar vor und nach dem Messexperiment durchgeführt wurden. Drei Messparameter wurden genauer betrachtet: die kritische Tiefenschärfe (DOF) und die sich daraus ergebende Größe der Messfläche, sowie die Einteilung der Kanäle für die Partikelgrößenbestimmung.

3.3.1 Tiefenschärfe-Kriterium

Das Prinzip der Tiefenschärfe, beziehungsweise DOF, wurde bereits im vorangegangenen Kapitel 3.2 beschrieben. Für jeden Partikel kann ein DOF berechnet und so die Position des Partikels festgestellt werden. Nur innerhalb der Messfläche im Fokus der abbildenden Optik entlang des Lasers kann nach einer Kalibration der korrekte Durchmesser der Partikel bestimmt werden. Über die Bestimmung eines kritischen DOF wird festgelegt, wie groß die Messfläche ist, innerhalb der die zu messenden Partikel qualifiziert werden. Die Messfläche muss groß genug sein, um eine ausreichende Statistik für die Ermittlung der Partikelkonzentration zu ergeben. Gleichzeitig darf die Messfläche nicht zu groß angesetzt werden, um eine Verzerrung der Partikelgrößen und das Risiko koinzidenter Partikel zu vermeiden. Zur Lokalisierung der Messfläche wurde der Laserstrahl mithilfe eines rotierenden, 30 μm dicken Drahtes abgetastet.

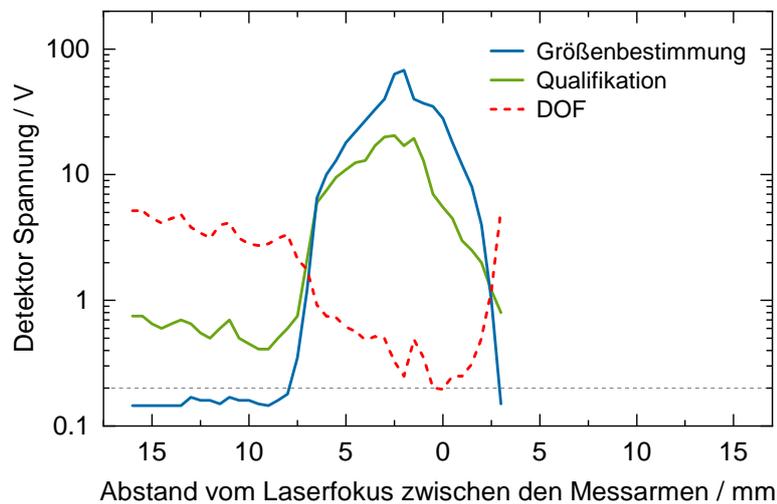


Abbildung 3.7: Abtastung der Detektor Signale zwischen den FFSSP Messarmen mit Hilfe eines rotierenden Drahtes. In rot ist das berechnete DOF aus dem Verhältnis der beiden Detektor Signale für die jeweilige Position im Laserstrahl eingetragen.

Dieses Verfahren dient der Überprüfung des Signalverlaufs und der Signalmaxima aus beiden Detektoren. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Die Laborarbeiten wurden im Jahr 2017 vor Erhebung der Messdaten bei SPECinc durchgeführt. Die Signalmaxima sind zum Laserarm hin verschoben. Es ist zu erkennen, dass das qualifizierende Signal nicht symmetrisch und im Verhältnis zum größtenbestimmenden Signal verschoben ist. In rot ist das berechnete DOF aus dem Verhältnis der Detektorsignale für die jeweilige Position entlang des Laserstrahls aufgetragen. Bei der FFSSP liegt das qualifizierende Signal unterhalb des größtenbestimmenden Signals. Das führt dazu, dass das DOF im Fokus nicht erhöht ist, wie es durch die fensterförmige Blende für Partikel im Bereich der Messfläche zu erwarten wäre, sondern reduziert ist. Ein Grund dafür kann eine Verschiebung oder eine falsche Einstellung der Blende vor dem qualifizierenden Detektor sein. Trotz der Verschiebung der beiden Signal liegt das Minimum des DOF im Laserfokus. Die Bestimmung eines Messvolumens ist damit trotz der Fehleinstellung möglich. Basierend auf der Abtastung der Messsignale und dem Vergleich der Messflächen und Größenverteilungen bei verschiedenen Tiefenschärfeeinstellungen wird das kritische DOF für die weitere Auswertung auf 0.2 festgelegt. Die Vermessung der zugehörigen Messfläche wird in Kapitel 3.3.2 beschrieben. Nur Partikel mit einem DOF unterhalb von 0.2 werden im Folgenden akzeptiert:

$$\text{DOF}_{\text{akzeptiert}} < \frac{\text{Signalamplitude des qualifizierenden Detektors}}{\text{Signalamplitudes des größtenbestimmenden Detektors}} = 0.2 \quad (3.8)$$

Die ungefilterten Rohdaten der Kondensstreifenmessungen, die dieser Dissertation zu Grunde liegen, zeigen, dass zwischen 45 und 70% der gemessenen Partikel für das gewählte DOF im Verhältnis zu den insgesamt registrierten Partikeln akzeptiert werden. Laut Nagel et al. (2007) sind die Werte bei einer Abtastung der Detektorsignale entlang des Laserstrahls stark abhängig vom Material des verwendeten Messmittels. Niedrigere Unsicherheiten als bei einer Messung mit einem rotierenden Draht sind zum Beispiel mit einem Sprühnebel aus Wassertropfen oder einer rotierenden Glasfaser zu erreichen. In der Anwendung auf Eispartikel kann es also zu einer Abweichung von der hier vorgestellten Charakterisierung kommen. Im Folgenden wird die sensitive Messfläche nochmal genauer mit einem Wassertropfenstrahl bestimmt.

3.3.2 Kalibration der sensitiven Messfläche

Als Messfläche eines Laserspektrometers wird die sensitive Fläche entlang der Laserstrahlachse bezeichnet. Die Messfläche der FFSSP wurde von SPECinc im September 2017 vermessen. Der Kalibrationsaufbau ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Fläche wurde durch einen gleichmäßigen Strahl von Wassertropfen abgetastet. Die Wassertropfen entstanden mit Hilfe eines Piezo-Tröpfchengenerators. Da diese Bauteile besonders für kleine Kapillardurchmesser und über längere Messzeiträume empfindlich gegenüber Verunreinigungen sind, sollte die Tropfen-

größe auf minimal 20 μm begrenzt werden, um die Tropfenstabilität zu gewährleisten. Hier wurde eine Tropfengröße von 40 μm im äußersten Detektionsbereich der FFSSP zur Abtastung der Messfläche gewählt. Laut Faber et al. (2018) kann die Messfläche leicht mit den Größen der Tröpfchen variieren (maximal um 5%). Im Fall der FFSSP wird die Messfläche daher für kleine Eispartikel geringfügig überschätzt.

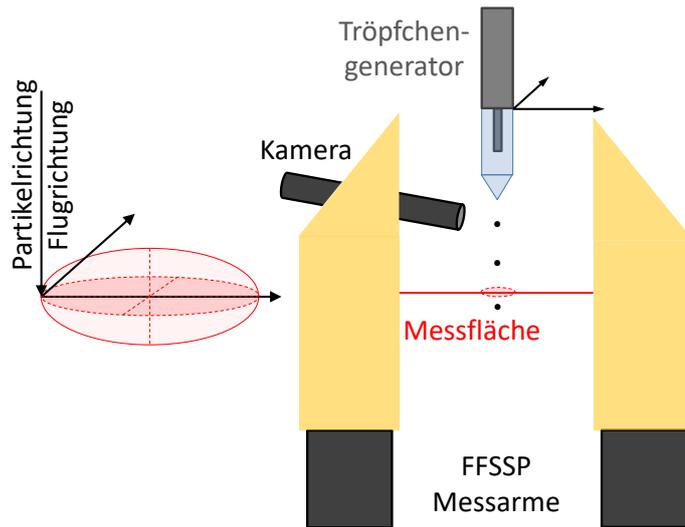


Abbildung 3.8: Schema des Versuchsaufbaus zur Ausmessung der FFSSP Messfläche. Der Tröpfchengenerator ist in der angezeigten Ebene justierbar. Die rote Fläche zeigt die Messfläche senkrecht zum Partikelstrom, beziehungsweise zur Flugrichtung.

Die Messfläche wurde in einem festen, gitterförmigen Muster durch den Piezo-Tröpfchengenerator abgefahren. Die Zellen des Messgitters hatten eine Größe von $20 \times 500 \mu\text{m}$. Die Anzahl der Wassertröpfchen pro Zelle konnte über die Ansteuerung des Tröpfchengenerators fest eingestellt werden. Die Anzahl und die Größe der Tröpfchen wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera überprüft. Um festzustellen, wo die sensitive Messfläche für ein kritisches DOF von 0.2 liegt, wurde pro Zelle im Messgitter die Anzahl der vom Instrument qualifizierten Partikel mit der gesamten Anzahl der Wassertropfen verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.9 veranschaulicht und über die Zähleffizienz des Instruments farblich dargestellt. Auf der x-Achse ist der Abstand vom Laserfokus jeweils in Richtung der beiden Messarme der FFSSP aufgetragen. Diese Achse verläuft entlang des Laserstrahls. Die Größe der Messfläche für ein kritisches DOF von 0.2 wird berechnet aus den Gitterzellen mit einer Zähleffizienz über 50% und beträgt 0.19 mm^2 . Die Unsicherheit der Abtastmethode durch Wassertropfen wird in der Literatur mit 10 bis 20% angegeben (Brenquier et al., 1998; Faber et al., 2018).

Die Messfläche der FFSSP weicht von der theoretischen Ellipsenform ab und ist ungleichmäßig. Wie schon aus der Abtastung des Lasers in Kapitel 3.3.1 absehbar, bildet sich in einem Abstand von 2 mm von der Hauptmessfläche in

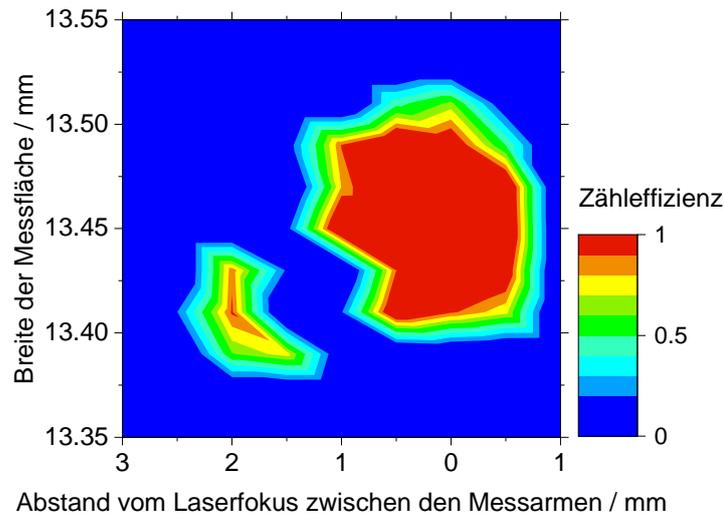


Abbildung 3.9: Messfläche der FFSSP dargestellt durch die Zähleffizienz bei einem gleichmäßigen Tröpfchenstrom auf einem Gitter aus $20 \times 500 \mu\text{m}$ Zellen.

Richtung des Laserarms eine sogenannte Satellitenmessfläche aus. Das ist ein kleinerer, von der Hauptmessfläche abgetrennter Messbereich. Eine geteilte Messfläche kann Einfluss auf die Anzahlbestimmung der Partikel haben. In Faber et al. (2018) wird angegeben, dass generell im Randbereich einer Messfläche eine Unterschätzung der Partikelanzahl auftritt. Bei einer geteilten Messfläche vergrößern sich die Randbereiche und der Gesamtfehler kann sich erhöhen. Außerdem ist es möglich, dass die Größe der in der Satellitenmessfläche qualifizierten Partikeln unterschätzt wird.

Aufweitung des Partikelgrößenspektrums

Die FFSSP zeigt ein relativ breites Partikelgrößenspektrum, was auf Unter- oder Überschätzung der Partikelgröße hinweist. Typischerweise liegt die Unsicherheit bei der Größenabschätzung von Partikeln durch Laserspektrometer zwischen 10 und 20% (Baumgardner et al., 2017; Faber et al., 2018). Die Genauigkeit der Größenbestimmung variiert dabei mit der Partikelgröße. Eine Aufweitung des Spektrums wird bei vielen Instrumenten beobachtet (Wendisch et al., 1996; Molleker, 2013; Faber et al., 2018) und liegt entweder an einer leichten Fehleinstellung der Messoptik oder Unregelmäßigkeiten in der Laserintensität. In beiden Fällen variiert die bestimmte Größe eines Partikels dann abhängig von der Position in der Messfläche. Das Abtasten der Detektorsignale und der Messfläche der FFSSP hat ergeben, dass zwischen der Position der Messfläche und des Signalmaximums 1 bis 3 mm liegen (siehe Abbildung 3.7). Dies führt im Fall der FFSSP dazu, dass die Partikel zu groß bestimmt werden. Im Vergleich mit Größenverteilungen anderer Laserspektrometer (Molleker, 2013) wurde abgeschätzt, dass die Vergrößerung maximal 30% beträgt und sich auf Partikel größer als $3 \mu\text{m}$ beschränkt.

Koinzidenz

Koinzidenz bezeichnet das gleichzeitige Kreuzen von zwei Partikeln durch das Messvolumen eines Laserspektrometers. Das kann dazu führen, dass das Instrument künstlich nur einen Partikel statt zwei registriert und die reale Partikelanzahl unterschätzt wird. Ein zweiter Effekt kann das Überschätzen der Partikelgröße sein, abhängig davon wo die Partikel das Messvolumen durchkreuzen. Die verschiedenen Auswirkungen wurden durch Lance (2012) beschrieben. Koinzidenz tritt bei hohen Partikelkonzentrationen und großen Messflächen vermehrt auf. Die Totzeit nach der Detektion eines Pulses, die bei der alten FSSP-300 noch bei bis zu 6 μs lag, kann ebenfalls eine Rolle spielen. Durch eine hohe Abtastfrequenz von 16 MHz wurde dieses Problem bei der FFSSP behoben. Aufgrund ihrer optischen Auslegung hat die FFSSP für ein kritisches DOF von 0.2 mit 0.19 mm^2 eine im Vergleich zu anderen Instrumenten sehr kleine Messfläche. Damit ist zu erklären, dass bei den im Rahmen dieser Dissertation gemessenen Eispartikelkonzentrationen keine Koinzidenzeffekte beobachtet wurden.

3.3.3 Partikelgrößenkalibration

Die Kalibration der Partikelgrößenzuweisung durch die FFSSP orientiert sich an den Arbeiten von Wendisch et al. (1996); Nagel et al. (2007) und Faber et al. (2018). Die Durchführung erfolgte im Labor der Abteilung Wolkenphysik, DLR, Oberpfaffenhofen. Es wurden Testpartikel bekannter Größe und Form in das Messvolumen der FFSSP eingebracht und die zugehörigen Messimpulse aufgezeichnet. Insgesamt wurden sieben Partikelgrößen von 1.6 bis 18.2 μm vermessen. Alle verwendeten Partikel wurden nach den Partikelgrößenstandards des National Institute of Standards and Technology (NIST) zertifiziert. Bei den Testpartikeln handelte sich um Sphäroide, die je nach Größe aus Polystyren-Latex (PSL) oder aus Borosilikatglas gefertigt waren. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 3.1.

Die beiden PSL-Sphäroidgrößen 1.6 und 1.8 μm decken typische effektive Durchmesser in Kondensstreifen ab. PSL-Sphäroide können mit einer höheren mittleren Durchmesserengenauigkeit hergestellt werden, als die Sphäroide aus Borosilikatglas. Zur Durchführung der Kalibration mit Borosilikatglas wurde synthetische Luft durch ein Gefäß mit dem Borosilikatglaspulver geleitet, so dass ein mit Partikeln beladener Luftstrom in das Messvolumen der FFSSP eingebracht werden konnte. Die kleineren PSL-Partikel lagen nicht als trockenes Pulver, sondern verdünnt in einer wässrigen Suspension vor. Ein spezieller Zerstäuber wurde verwendet, um die PSL-Suspensionen mit synthetischer Luft zu trocknen und die Partikel in das Messvolumen zu sprühen.

Aus den Einzelpartikelmessungen ergaben sich Verteilungen der Signalspannungen, die aus dem unmaskierten Photodetektor des FFSSP nach elektronischer Verstärkung abgeleitet wurden (Einheit Volt). Nur Partikelmessungen, die das Kriterium eines DOF kleiner als 0.2 erfüllten, wurden akzeptiert. Die Verteilungen waren meist bimodal mit einem ersten Maximum bei den kleinsten nachweisbaren Signalspannungen. Dabei handelte es sich um Störeffekte, die durch Ver-

Tabelle 3.1: Übersicht über die verwendeten Testpartikel und die häufigsten Signalspannungen die aus den Gauß-Verteilungen in Abbildung 3.10 ermittelt wurden.

Partikelmaterial	NIST Partikelgrößenstandard			Gauß-Verteilung	
	Durchmesser μm	Standardabweichung μm	Variationskoeffizient %	Erwartungswert V	Standardabweichung %
Polystyren	1.6	0.018	1.3	0.566	16
Polystyren	1.8	0.022	1.1	1.117	12
Borosilikat	5.4	0.3	13	4.51	19
Borosilikat	7.6	0.4	12	4.79	20
Borosilikat	10.0	1.0	11	5.095	34
Borosilikat	14.4	0.8	13	9.906	45
Borosilikat	18.2	1.0	10	16.558	26

unreinigungen im Luftstrom, elektrisches Rauschen und den bereits diskutierten Randeffekten der Messfläche des Instruments ausgelöst wurden. Die tatsächliche Signalspannung die einer bestimmten Partikelgröße zugeordnet ist, wurde aus dem Maximum einer Gaußschen Anpassungsfunktion über die Signalspannungen ohne Störeffekte abgeleitet. Eine Überblick über diese Gauß-Verteilungen ist in Abbildung 3.10 zu sehen.

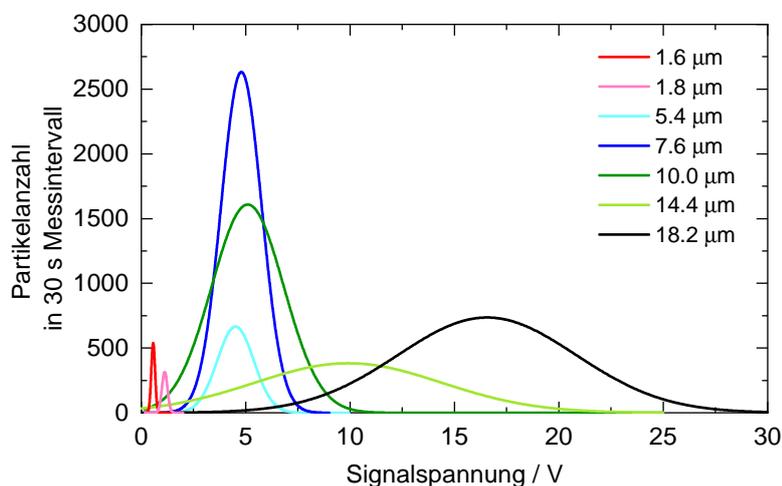


Abbildung 3.10: Gauß-Verteilungen der bei der Laborkalibration durch die FFSSP gemessenen Signalspannungen für verschiedene Partikeldurchmesser. Partikel mit den Durchmessern 1.6 und 1.8 μm bestehen aus Polystyren-Latex, die darüber hinaus verwendeten Partikel aus Borosilikatglas.

Wie in Tabelle 3.1 aufgeführt ist, hat die Gauß-Verteilung der 14.4 μm Sphäroide die höchste Standardabweichung von 45%. Da die Partikelgrößen in

Kondensstreifen tendenziell kleiner als $10\ \mu\text{m}$ sind, sind die Messungen von 14.4 und $18.2\ \mu\text{m}$ weniger signifikant und die hohen Standardabweichungen ihrer Verteilungen sind akzeptabel. Eine Liste der zertifizierten mittleren Sphäroiddurchmesser, die Durchmesserfehler und relativen Standardabweichungen und die von der FFSSP am häufigsten gemessenen Signalspannungen mit relativen Standardabweichungen der Gauß-Verteilungen sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

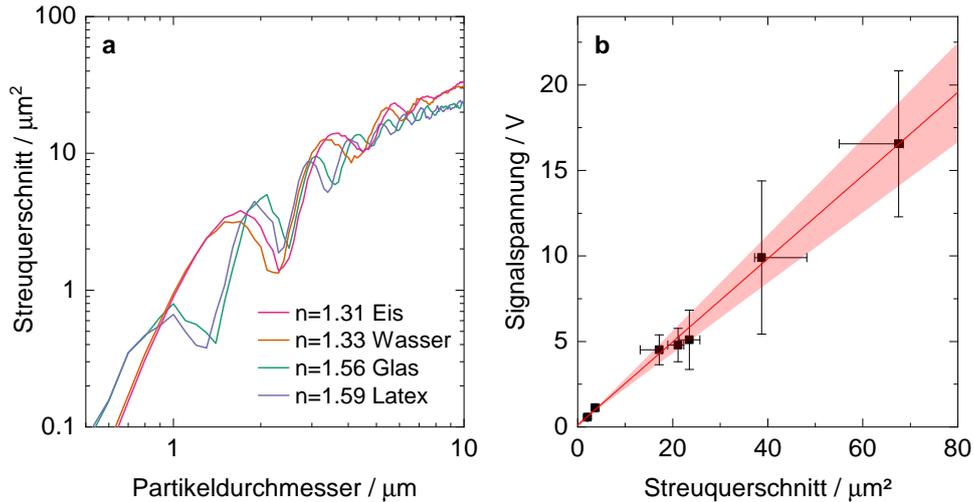


Abbildung 3.11: (a) Streuquerschnitt in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser bei Licht der Wellenlänge $632.8\ \text{nm}$ in einem Öffnungswinkel von 3 bis 15° . Der Brechungsindex für runde Partikel wird variiert. (b) Gemessene Signalspannungen bezüglich der berechneten Streuquerschnitte für die Testpartikel. Fehlerbalken zeigen die Unsicherheiten der Signalspannungen und Partikeldurchmesser. In rot ist eine lineare Regressionslinie mit oberer und unterer Konfidenzgrenze von 95% eingetragen.

Unter Verwendung der Mie-Theorie wurden die Streuquerschnitte für die Brechungsindizes von Borosilikatglas und PSL und für die von der FFSSP berücksichtigten Streuwinkel von 3 bis 15° berechnet (siehe Abbildung 3.11a). In Abbildung 3.11b sind die Streuquerschnitte in ein Verhältnis mit den gemessenen Signalspannung gesetzt (schwarze Symbole). Die verwendete Wellenlänge zur Berechnung der Streuquerschnitte entspricht der Wellenlänge des FFSSP-Lasers. Die erweiterten Unsicherheiten der Testpartikel wurden auf den Streuquerschnitt übertragen und sind mit Fehlerbalken auf der x-Achse eingezeichnet. Aufgrund der Mie-Mehrdeutigkeiten sind die Fehler des Streuquerschnitts in positiver und negativer Dimension unterschiedlich. Das Detektionsverhalten der Photodiode in der FFSSP kann durch folgende lineare Regression beschrieben werden:

$$\text{Signalspannung} = (0.114 \pm 0.056) + (0.243 \pm 0.015) \cdot \text{Streuquerschnitt} \quad (3.9)$$

Die lineare Regression wurde mit einer instrumentellen Gewichtung der gemessenen Signalspannungen durchgeführt. Der Korrelationskoeffizient betrug

0.98. Kleine Abweichungen der Streuwinkel der FFSSP verursachen signifikante Änderungen in der Form der Streukurve, da sich damit der betrachtete Integrationsbereich über den Raumwinkel der Streuphasenfunktion verändert. Daher ist es wichtig, diese Winkel zu überprüfen und es wurden weitere Regressionen für leicht abweichende Winkelpaare durchgeführt. Die Tatsache, dass die lineare Anpassung den höchsten Korrelationskoeffizient für Streuquerschnitte basierend auf Streuwinkeln von 3 bis 15° aufweist, beweist, dass diese Winkel für die Sonde zutreffen.

Die Korrelation (3.9) wurde im letzten Schritt verwendet, um die Streuquerschnittsfunktion aus T-Matrix-Berechnungen für Eis an die gemessenen Signalspannungen anzupassen. Die Streuquerschnittsfunktion wird dabei nicht für runde Partikel mit dem Seitenverhältnis $r = 1$ berechnet, sondern für asphärische Partikel mit dem Seitenverhältnis $r = 0.5$. Der Grund dafür ist, dass sich die Messungen in dieser Arbeit auf Kondensstreifen mit einem Alter bis zu 4 Minuten konzentrieren. Je älter die Kondensstreifen sind, desto mehr wachsen die zu Beginn runden Partikel an und werden asphärisch (Voigt et al., 2010, 2011; Gayet et al., 2012; Jeßberger et al., 2013). Die Berechnung der Phasenfunktion für asphärischen Ellipsoide erfolgt durch die T-Matrix Methode (siehe Kapitel 3.1), deren Anwendung auf die FSSP-300 durch Borrmann et al. (2000) beschrieben wurde und hier übertragen werden kann. Die durch die Korrelation (3.9) angepasste Miestreueung für Eispartikel in Kondensstreifen, die sogenannte Reaktionskurve, wird in Abbildung 3.12 in blau dargestellt.

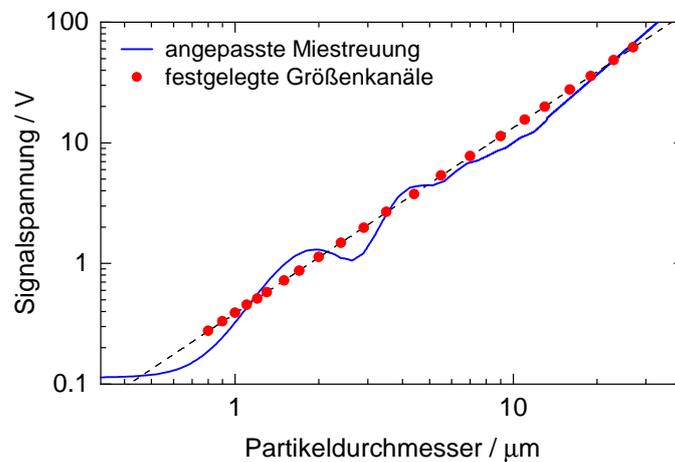


Abbildung 3.12: Die blaue Reaktionskurve stellt die Signalspannungen unter Anwendung von Korrelation (3.9) in Abhängigkeit der Durchmesser von Eispartikeln mit einem Seitenverhältnis $r = 0.5$ dar. Als gestrichelte Linie ist die lineare Approximation abgebildet, auf der die Schwellenwerte der FFSSP-Größenkanäle liegen (rote Symbole).

Die Einteilung der FFSSP Kanäle orientiert sich an der Reaktionskurve. Eispartikelgröße und die Schwellenwerte der Signalspannungen werden nicht di-

rekt an der Signalspannungsfunktion, sondern mit einer sogenannten strikten Methode an die linearer Approximation der Kurve angepasst. Mit dieser verbreiteten Methode wird erreicht, dass sich Mie-Mehrdeutigkeiten nicht direkt in der Partikelgrößenverteilung der FFSSP abbilden und damit eine unphysikalische Verteilung dargestellt wird. Mie-Mehrdeutigkeiten sind ausgeprägt im Bereich von 1.6 bis 3 μm und 4 bis 5.5 μm . Dort kann eine Signalspannung zwei bis drei Durchmessern zugeordnet werden. Mit der strikten Methode wird außerdem berücksichtigt, dass die Mie-Streufunktionen für ein Partikel in der sensitiven Messfläche des optischen Systems berechnet wurden. Am Rand der sensitiven Messfläche variieren die Kurven teilweise über die Mie-Mehrdeutigkeiten hinaus.

Tabelle 3.2: Für Kondensstreifenmessungen kalibrierte Schwellenwerte der Größenkanäle für die FFSSP. D_{\min} bezeichnet den kleinsten Durchmesser des Größenbereichs und U_{\min} bezeichnet die untere Signalspannung.

Größenbereich			Größenbereich		
	D_{\min}	U_{\min}		D_{\min}	U_{\min}
1	0.8	0.277	11	2.9	1.979
2	0.9	0.331	12	3.5	2.672
3	1.0	0.390	13	4.4	3.759
4	1.1	0.447	14	5.5	5.362
5	1.2	0.512	15	7.0	7.752
6	1.3	0.579	16	9.0	11.362
7	1.5	0.720	17	11.0	15.553
8	1.7	0.872	18	13.0	19.887
9	2.0	1.131	19	16.0	27.599
10	2.4	1.485	20	19.0	35.773
			21	23.0	48.308
			-	27.0	61.767

Die Größenkanäle der FFSSP sollten möglichst gleichmäßig verteilt sein. Um die kleinen Partikelgrößen in den Kondensstreifen aufzulösen, werden die Größenkanäle insbesondere für die Größen unter 1.5 μm möglichst eng gewählt. Ziel der Größenzuordnung ist die Abbildung des Maximums der Partikelgrößenverteilung für Kondensstreifenmessungen, das voraussichtlich zwischen 1 und 2 μm liegen wird. Die Schwellenwerte der Partikelgrößen und Signalspannungen sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Dies ist die Größenverteilung, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit bei der Auswertung der Eismessungen verwendet wird.

3.3.4 Korrektur der Anzahlkonzentration für kleine Eispartikel

Vorangegangene Messungen junger Kondensstreifen haben gezeigt, dass auch ein geringer Anteil von Eispartikeln mit Durchmessern kleiner als 0.8 μm zu erwarten ist (Voigt et al., 2010, 2011; Kleine et al., 2018). Daher wird eine Korrektur der Anzahlkonzentration für kleine Eispartikel bei den FFSSP Daten vorgenommen.

Dazu wurde ein weiteres Laserspektrometer verwendet, das an der steuerbordseitigen Tragfläche des Messflugzeugs montiert war. Das Wolken und Aerosol Spektrometer (CAS) basiert wie die FFSSP ebenfalls auf der FSSP-300 und wurde vom amerikanischen Hersteller Droplet Measurement Technologies (DMT) entwickelt. Das Instrument kann Partikelgrößen in einem großen Bereich zwischen 0.5 und 50 μm messen. Dabei wird Laserlicht der Wellenlänge 658 nm an den Eispartikeln gestreut und sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärtsstreuung detektiert.



Abbildung 3.13: Steuerbordseitige Tragflügelstation an der DC-8. Die CAS ist das Instrument mit dem silbernem Einlassrohr. CC-BY: DLR.

Dasselbe Instrument wurde für Kondensstreifenmessungen während des ECLIF I Experiments im Jahr 2015 eingesetzt und entsprechend kalibriert (Kleine et al., 2018). Der Abstand zwischen der CAS unter dem Tragflügel und dem CO_2 -Einlass am Rumpf der DC-8 entsprach ungefähr 15 m. Eine Ableitung des Emissionsindex war aus den CAS-Messungen demzufolge nicht möglich.

Die Korrektur wird im Folgenden auf die Eisanzahlkonzentration der FFSSP für einen Größenbereich größer als 1 μm angewendet. Es kann nicht gewährleistet werden, dass die Größenbereiche 1 und 2 nicht von elektrischem Rauschen betroffen sind. In dem Größenbereich zwischen 0.5 und 1 μm wird die CAS im Folgenden genutzt, um eine Korrektur der Eisanzahlkonzentrationen für die FFSSP abzuleiten.

Als Grundlage wurde der Messflug vom 24. Januar 2018 verwendet. Für die Eisanzahlkonzentrationen aus der CAS wurde das Verhältnis aus der Gesamtanzahlkonzentration (ab 0.5 μm) zur Anzahlkonzentrationen für Partikel des FFSSP-Größenbereichs (ab 1 μm) bestimmt. Damit ergibt sich eine Information über die Anzahl von kleinen Eispartikeln im Verhältnis zur Gesamtanzahl im Kondensstreifen. Das Verhältnis wurde pro Sekunde bestimmt. Es ist in blauen Symbolen in Abbildung 3.14 über dem effektiven Durchmesser der Eispartikel im Kondensstreifen aufgetragen. Der effektive Durchmesser ist der mittlere Partikeldurchmesser der Streuung durch die Partikel und ist für beide Sonden vergleichbar. Der effektive Durchmesser ist ein Maß für die Abschwächung der atmosphärischen Strahlung und lässt sich aus dem Eiswassergehalt des Kondensstreifen berechnen (siehe Kapitel 4.2.2).

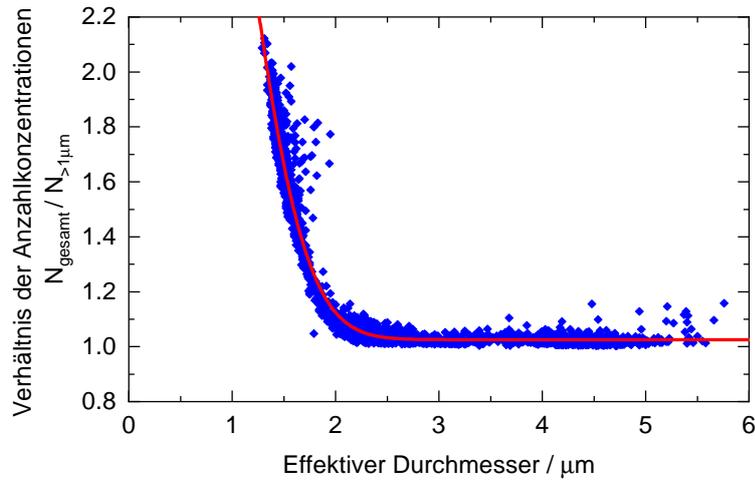


Abbildung 3.14: Blaue Symbole zeigen die Verhältnisse aus der CAS-Gesamtanzahlkonzentration (ab $0.5 \mu\text{m}$) zur CAS-Anzahlkonzentration für Partikel des FFSSP-Größenbereichs (ab $1 \mu\text{m}$). Basierend auf sekunden aufgelösten Daten des Messflugs vom 24. Januar 2018. Die rote Linie stellt die Gaußsche Anpassungsfunktion der Daten dar.

Die Gaußsche Anpassungsfunktion des Verhältnisses der Anzahlkonzentrationen in Abhängigkeit vom effektiven Durchmesser ist:

$$\frac{N_{>0.5\mu\text{m}}}{N_{>1\mu\text{m}}} = 1.023 + \frac{3.023 - 1.023}{1 + \exp\left(\frac{d_e - 1.328}{0.230}\right)} \quad (3.10)$$

Die Anpassungsfunktion ist in Abbildung 3.14 in rot eingezeichnet. Der Korrelationskoeffizient der Anpassungsfunktion beträgt 97.5%. Für gleiche effektive Durchmesser werden die Eisanzahlkonzentrationen der FFSSP mit dem Korrekturfaktor $N_{>0.5\mu\text{m}}/N_{>1\mu\text{m}}$ aus der CAS multipliziert und so Partikel mit einem Durchmesser zwischen 0.5 und $1 \mu\text{m}$ berücksichtigt. Auf diese Weise wurden Konzentrationen um bis zu 18% erhöht. Die größten Korrekturen erfolgten für Kondensstreifen in großen Flughöhen, wo besonders kleine effektive Durchmesser in den Kondensstreifen vorlagen. Bei dieser Korrekturmethode ist zu beachten, dass der effektive Durchmesser vom Eiswassergehalt und damit selbst von der Eisanzahlkonzentration im Kondensstreifen abhängt. Der effektive Durchmesser muss nach der Korrektur neu berechnet werden. Durch die Neuberechnung wurde der effektive Durchmesser um bis zu 1.4% reduziert. Partikel, die kleiner als $0.5 \mu\text{m}$ sind, werden nach wie vor nicht berücksichtigt. Diese Eispartikelgrößen sind mit den derzeitigen flugzeugbasierten Instrumenten nicht messbar. Je kleiner die Partikel im Kondensstreifen sind, desto größer ist der Anteil an Partikeln die weder von der FFSSP noch von der CAS gemessen werden. Der Fehler der Korrekturmethode hängt folglich auch vom effektiven Durchmesser des Kondensstreifens ab. Der Fehler nimmt mit abnehmendem effektiven Durchmesser in einem Kondensstreifen zu.

Kapitel 4

Erweiterte Instrumentierung und Auswertemethoden

In diesem Kapitel werden die Methoden beschrieben mit denen Emissionen gemessen wurden, die zusätzlich zu den Eispartikelkonzentrationen für die Kondensstreifenanalyse genutzt wurden. Das Instrument zur Eismessung, die FFSSP, wurde bereits in Kapitel 3.2 beschrieben. Es wird auch die Instrumentierung des Messflugzeugs beschrieben. Im zweiten Teil des Kapitels werden die Auswertemethoden der Kondensstreifenanalyse veranschaulicht.

4.1 Erweiterte Instrumentierung zur Messung von Kondensstreifen

Rußmessung

Ruß besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff in einer ungeordneten Struktur. Zu geringen Teilen können auch Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Metalle beinhaltet sein. Ruß wurde im Abgasstrahl des A320 als Anzahlkonzentration von nicht-flüchtigen Feinstaubpartikeln gemessen, im Englischen *non-volatile particulate matter* (nvPM). Dazu wurde ein Kondensationspartikelzähler verwendet, der auf dem Modell 3010 des amerikanischen Herstellers Thermo-Systems Engineering Co. (TSI) basiert und für den Einsatz in auf dem Flugzeug modifiziert wurde*. Die Partikel wurden durch einen nach vorne gerichteten Aerosoleinlass gesammelt. Der Einlass war nicht isokinetisch, sondern so konstruiert, dass die Eispartikel in der vom Einlass erzeugten Schockfront vollständig verdampfen. In einem vorgeschalteten Thermodenuder (Verdampfer) werden die Aerosolpartikel im Anschluss auf 250°C erhitzt, um flüchtige Bestandteile zu reduzieren, so dass nur die nicht-flüchtigen Aerosolbestandteile übrig bleiben. Es wird angenommen, dass diese überwiegend aus Rußpartikeln bestehen. Die Daten wurden für reduzierte Detektionseffizienzen in Niederdruckumgebungen (Noone und Hansson, 1990) und für Partikelverluste im Thermodenuder korrigiert.

*Die Rußmessungen und die Kalibration wurden von Dr. Daniel Sauer durchgeführt, DLR Oberpfaffenhofen, Institut für Physik in der Atmosphäre.

Im Rahmen des Experiments wurden auf der Ramstein Air Base zwischen den Messflügen auch Bodenmessungen der Feinstaubemission durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen von Masse und Anzahl von nicht-volatilen Feinstaubpartikeln sind in Schripp et al. (2021) veröffentlicht. Dazu wurde eine Messsonde 43 m hinter dem Steuerbord-Triebwerkauslass im Schutz eines Windzauns platziert. Für die alternativen Treibstoffgemische konnten Reduktionen von bis zu 60% der Partikelmasse und bis zu 70% der Partikelanzahl in Abhängigkeit von den Schubeinstellungen festgestellt werden. Mit steigendem Triebwerksschub verringerte sich die Reduktion. Auch der geometrische mittlere Durchmesser war für die alternativen Treibstoffgemische leicht reduziert und erhöhte sich allgemein mit dem Triebwerksschub. Die Messergebnisse sind damit vergleichbar mit den Messungen von Moore et al. (2017).

Kohlendioxidmessung

Die Kohlendioxidemissionen wurden mit einem Instrument gemessen, das auf dem Prinzip der Cavity-Ring-Down Spektroskopie (CRDS) beruht[†]. Es handelt sich um das Modell G2401-m des amerikanischen Herstellers Picarro Inc. Die Probenluft wird dem Instrument über einen Einlass am Rumpf des Flugzeugs zugeführt. Im Instrument befindet sich ein Hohlraum mit einem Drei-Spiegel-Resonator, in den ein Nah-Infrarot-Laser Impulse sendet. Die effektive Weglänge im Resonator beträgt etwa 20 km. Die Zeit, die benötigt wird, um die Laserimpulse im Hohlraum abzuschwächen, ist proportional zum Molenbruch von CO₂ in der Probenluft. Der Einfluss von Wasserdampf auf die CO₂-Messung wird in der Nachbearbeitung korrigiert (Rella et al., 2013). Die Zeitauflösung der Kohlendioxidaten beträgt nominell 1 Hz. Allerdings können die Anstiegszeit (10% bis 90%) und die Abfallzeit (90% bis 10%) des CO₂ Signals bis 1.5 Sekunden betragen. Daher können die Mittelungszeiten die Zeitauflösung überschreiten und das Messintervall der CO₂-Messungen beträgt bis zu 2 Sekunden. Bei einer mittleren Breite der Kondensstreifensequenz von 26 Sekunden werden eventuelle Verzögerungen und Schwankungen bei der Berechnung von Kondensstreifenparametern allerdings herausgemittelt. Die Präzision des Instruments liegt bei 0.05 ppmv für 2 Sekunden Datenaufzeichnungen und die Genauigkeit bei 0.3 ppmv. Die Einheit ppm ist eine Hilfseinheit und entspricht der SI Einheit Mikromol pro Mol, im Englischen *parts per million*. Das nachgestellte v steht für Volumen.

Wasserdampfmessung

Zwei Parameter aus den Wasserdampfmessungen sind für die Kondensstreifenbildung interessant. Zum Einen die relative Feuchte als Maß für die Sättigung der Luft über Wasser oder über Eis, die stark von der Temperatur abhängig ist. Zum Anderen gibt das Wasserdampf-Mischungsverhältnis an, wie viel Wasserdampf generell in der Luft vorhanden ist. Das Wasserdampf-Mischungsverhältnis im A320-Abgasstrahl und in der Umgebung wurde mit dem NASA Diodenlaser-

[†]Die CO₂-Messungen und die Kalibration wurden von Dr. Hans Schlager und Monika Scheibe durchgeführt, DLR Oberpfaffenhofen, Institut für Physik in der Atmosphäre.

Hygrometer (DLH) gemessen[‡]. Es handelt sich um ein Infrarot-Absorptionsinstrument mit offenem Pfad. Das DLH hat eine lange Messgeschichte auf dem NASA Messflugzeug DC-8 und anderen luftgestützten Plattformen (Diskin et al., 2002; Podolske et al., 2003). Das Instrument arbeitet auf einer von drei Absorptionslinien im nahen Infrarot bei einer Wellenlänge von 1.395 μm und schaltet schnell und automatisch zwischen den Linien um, wenn sich die Bedingungen ändern. Die Abtastrate liegt bei 20 Hz. Die Genauigkeit und Präzision (1σ , 1 s) beträgt 5% bzw. 0,1%. Unabhängige Messungen der Umgebungstemperatur und des Drucks werden verwendet, um das Wasserdampf-Mischungsverhältnis in relative Feuchte umzurechnen.

Eine genaue Messung des Wasserdampf-Mischungsverhältnisses und der Umgebungstemperatur ist relevant für die Ermittlung der Schmidt-Appleman Temperatur (siehe Kapitel 2.1.1). Die relative Feuchte geht über die Gleichung (2.5) direkt in die Berechnung der kritischen Kondensstreifenbildungstemperatur ein.

Instrumentierung des Messflugzeugs während ECLIF II/NDMAX

Eine Übersicht über alle gemessenen Parameter, die zur Kondensstreifenanalyse in dieser Arbeit genutzt werden, findet sich in Tabelle 4.1. Die Funktionsweise der Messinstrumente wurde vorhergehend beschrieben und die angegebenen Unsicherheiten abgeschätzt.

Tabelle 4.1: Übersicht über die Instrumentierung zur Kondensstreifenanalyse während des ECLIF II/NDMAX Experiments.

Messparameter	Instrument	Unsicherheit	Auflösung
Eisanzahlkonzentration	FFSSP	10 - 35%	1 Hz
Rußanzahlkonzentration	CPCs	15%	1 Hz
CO ₂ -Konzentration	Picarro	0.3 ppmv	1 Hz (0.5 Hz)
Relative Feuchte	DLH	10 - 20%	20 Hz
Temperatur	Basis*	1 K	1 Hz
Druck	Basis*	0.3 mbar	1 Hz

*DLR A320 Basismesssystem

Die Position der Eis-, Ruß- und Kohlendioxidmessungen am Flugzeug ist für die Kondensstreifenanalyse von großer Bedeutung. Die FFSSP und die Einlässe für die Ruß- und Kohlendioxidmessungen sollten nicht zu weit voneinander entfernt sein, da die Verteilung der Emissionen innerhalb des Kondensstreifens stark variiert (Unterstrasser, 2016). Die Position der FFSSP am Messflugzeug ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Das Laserspektrometer wurde in einem Abstand von 11.2 m zum Flugzeugbug in einer radialen Position von 62° am Flugzeugrumpf befestigt. Der Einlass für die Rußmessungen befand sich in einem Abstand von 7.7 m zum Flugzeugbug ebenfalls am Rumpf, also 3.5 m vor der FFSSP.

[‡]Die Wasserdampfmessungen mit dem DLH wurden von Dr. Glenn Diskin, Dr. John Nowak und Dr. Josh DiGangi durchgeführt, NASA Langley Research Center.

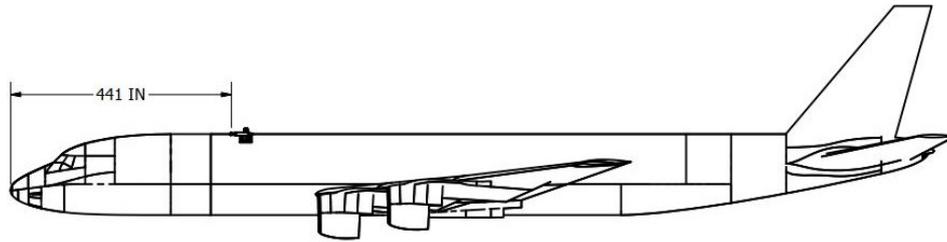


Abbildung 4.1: Position von FFSSP und CO₂-Einlass am Rumpf des Messflugzeuges.

Der Vorteil einer Rumpf- gegenüber einer Tragflächenposition für die Eismessungen ist, dass die FFSSP direkt neben dem CO₂-Einlass platziert werden kann. Das Anbringen eines Laserspektrometers an den Flugzeugrumpf wird normalerweise vermieden, da der Installationswiderstand der Sonde (Form-, Reibungs- und Interferenzwiderstand) dort den Gesamtwiderstand des Rumpfes erhöht. Dies kann Einfluss auf Flug- und Leistungsverhalten des Flugzeugs haben. Die FFSSP wurde auf Grund ihrer guten aerodynamischen Form für diese Position ausgewählt und gegenüber anderen Laserspektrometern bevorzugt.

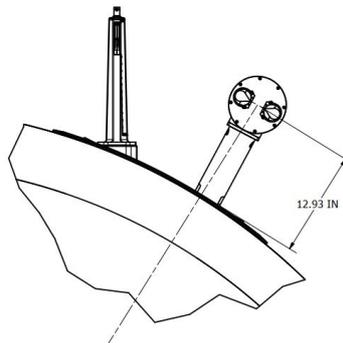


Abbildung 4.2: Radiale Positionen FFSSP (rechts) und CO₂-Einlass (links).

Die radialen Positionen von FFSSP und CO₂-Einlass sind in Abbildung 4.2 zu erkennen. Das Messvolumen der FFSSP befindet sich in einem Abstand von 0.33 m zum Flugzeugrumpf. Eine Partikelanreicherung oder -abschattung durch die fluiddynamische Grenzschicht am Flugzeugrumpf konnte in den Partikelgrößenverteilungen der FFSSP nicht nachgewiesen werden.

4.2 Datenauswertung

Die FFSSP gibt mit $n_{Eis,i}$ die Anzahl der gemessenen Eispartikel innerhalb eines Größenbereichs i aus. Um die Eisanzahlkonzentration $N_{Eis,i}$ in der Einheit cm^{-3} zu ermitteln, muss die Eispartikelanzahl auf das Messvolumen bezogen werden.

$$N_{Eis,i} = n_{Eis,i} \cdot A_{sensitiv} \cdot v \quad (4.1)$$

Dabei ist $A_{sensitiv}$ die sensitive Messfläche des Laserspektrometers, das sich mit der wahren Fluggeschwindigkeit v in das Messvolumen aufspannt. Nach Berechnung der Eisanzahlkonzentration für jeden Größenbereich lässt sich eine Partikelgrößenverteilung darstellen, im Englischen *particle size distribution* und deshalb hier mit PSD abgekürzt. Empirisch hat sich eine Lognormalverteilung als beste Approximation für Aerosolverteilungen herausgestellt. Der Durchmesser D_i entspricht bei asphärischen Partikeln einem volumenspezifischen Durchmesser. Die Darstellung dN/dD_i hat sich in PSDs nicht durchgesetzt, da damit nur ähnliche Auflösungen verglichen werden können. Gerade wenn PSDs unterschiedlicher Instrumenten mit verschiedenen Auflösungen verglichen werden sollen, kommt die normalisierte Darstellung $dN/d\log D_i$ zum Einsatz:

$$dN/d\log D_i = \frac{dN}{d\log D_i} = \frac{dN}{\log D_{i,min} - \log D_{i,max}}. \quad (4.2)$$

Dabei entspricht dN der Eisanzahlkonzentration in einem Größenbereich $N_{Eis,i}$ und $D_{i,min}$ und $D_{i,max}$ sind die jeweils untere und obere Größengrenze des Bereichs i .

Im Folgenden wird die Berechnung von Partikeleigenschaften in der Atmosphäre basiert auf Hinds (1999) und im Besonderen für Eispartikel in Kondensstreifen basierend auf Schumann et al. (2012) dargestellt.

4.2.1 Berechnung von mikrophysikalischen Parametern

Gesamte Eisanzahlkonzentration

Die gesamte Eisanzahlkonzentration N_{Eis} ist ein wichtiger Parameter für die Kondensstreifenanalyse, da die Partikelanzahl ein treibender Parameter für die Entwicklung und Klimawirkung des Kondensstreifens ist. Die gesamte Eisanzahlkonzentration ist die Summe aus den Eisanzahlkonzentration aller Größenbereiche i :

$$N_{Eis} = \sum_i N_{Eis,i}. \quad (4.3)$$

Eiswassergehalt

Der Eiswassergehalt, im Englischen *ice water content* und deshalb abgekürzt IWC, ist ein Maß für die Masse der Eispartikel in einem Kondensstreifen bezüglich

einer bestimmten Menge trockener Luft und wird in der Einheit mg m^{-3} angegeben:

$$IWC = \frac{4\pi}{3} \rho_{Eis} \sum_i N_{Eis,i} \left(\frac{D_{i,min} + D_{i,max}}{2} \right)^3. \quad (4.4)$$

Dabei ist ρ_{Eis} die Dichte der Eispartikel.

4.2.2 Berechnung von optischen Parametern

Projizierte Fläche

Ausschlaggebend für die optischen Eigenschaften von Eispartikeln ist oft die projizierte oder planare Querschnittsfläche A_i der Partikel:

$$A_i = \pi \left(\frac{D_i}{2} \right)^2. \quad (4.5)$$

Es ist zu beachten, dass sich die projizierte Fläche zweier Kugeln mit dem selben Volumen einer einzigen größeren Kugel um 41% vergrößert. Dieser Wert lässt sich über die Berechnung der Querschnittsfläche zweier, beziehungsweise einer Kugel mit gleichem Volumen herleiten. Daher vergrößern sich klimarelevante optische Parameter, wenn in einer Wolke die Partikelanzahl steigt, obwohl die Partikelgröße sich bei konstantem Wassergehalt verringert.

Effektiver Durchmesser

Der effektive Durchmesser d_e ist ein Maß für die Abschwächung der atmosphärischen Strahlung durch Wolkenpartikel und lässt sich für runde Partikel aus den Extinktionseigenschaften einer Wolke ableiten:

$$\sigma_E = K_E \pi \frac{d_e^2}{2}. \quad (4.6)$$

Dabei ist σ_E der Wirkungsquerschnitt und K_E die Effizienz der Extinktion (siehe Kapitel 3.1). Gleichung (4.6) trifft auf die runden Tropfen in einer Wasserwolke zu. In einer Eiswolke (zum Beispiel einem Kondensstreifen) sind die Partikel jedoch asphärisch und dort ist der effektive Durchmesser keine physikalische, messbare Größe mehr. Er kann beschrieben werden als proportional zum Verhältnis aus Partikelvolumen und projizierter Fläche oder als mittlerer Partikeldurchmesser der Streuung. Die Möglichkeiten zur Berechnung des effektiven Durchmessers für asphärische Eispartikel sind vielfältig. Eine Übersicht findet sich in McFarquhar und Heymsfield (1998). In dieser Arbeit wird die Definition nach Francis et al. (1994) verwendet:

$$d_e = 2 \frac{3 IWC}{4 \rho_{Eis} A_k}. \quad (4.7)$$

Dabei ist A_k die kumulierte Querschnittsfläche (projizierte Fläche) aller Eispartikel:

$$A_k = \sum_i n_{Eis,i} A_i. \quad (4.8)$$

Extinktionskoeffizient

Die Extinktion, also die Abschwächung von Strahlung in der Atmosphäre, kann als Maß für die Energiedeposition in der Atmosphäre bezeichnet werden (Voigt et al., 2021a). Der Koeffizient β_E wird aus der Partikelgrößenverteilung eines Kondensstreifens berechnet und gibt die Abschwächung pro physikalischer Dicke z in der Einheit km^{-3} an. Er ist die Summe der projizierten Fläche der Eispartikel A_i , der Eisanzahlkonzentration $N_{Eis,i}$ und der Extinktionseffizienzen K_E für den entsprechenden Partikelgrößenbereich i (Schumann et al., 2011):

$$\beta_E = \sum_i K_E A_i N_{Eis,i}. \quad (4.9)$$

Für diese Arbeit wurden die Extinktionseffizienzen K_E für eine Wellenlänge von sichtbarem Licht von 550 nm berechnet (siehe Kapitel 3.1). Die totale Extinktion berechnet sich aus dem Integral des Extinktionskoeffizienten über die gesamte horizontale Ausdehnung des Kondensstreifens (Unterstrasser und Gierens, 2010).

Optische Dicke

Die optische Dicke ist ebenfalls eine wichtige Größe für den individuellen Einfluss eines Kondensstreifens auf den Strahlungstransport durch die Atmosphäre. Die optische Dicke ergibt sich aus der Integration des Extinktionskoeffizienten β_E über die vertikale Ausdehnung einer Wolke z :

$$\tau = \int \beta_{ext}(z) dz. \quad (4.10)$$

Mitwirkende Parameter sind letztendlich die vertikale Ausdehnung des Kondensstreifens, seine Eismassenkonzentration und die Extinktionseigenschaften der Eiskristalle. Die optische Dicke geht nach dem Gesetz von Lambert-Beer folgendermaßen in die Transmissivität T , dem Maß für die Durchlässigkeit der Atmosphäre gegenüber Strahlung, ein:

$$T = e^{-\tau m}. \quad (4.11)$$

Dabei ist m die atmosphärische Masse, also die Wegstrecke durch die Atmosphäre abweichend von der Zeniteinstrahlung.

4.2.3 Berechnung von Emissionsindizes

Emissionsindizes (EI) werden berechnet, um Emissionen unabhängig von einer Verdünnung durch atmosphärische Einmischung und räumlichen Inhomogenitäten im Abgasstrahl zu bewerten. Dies kann sowohl für flugzeuggenerierte Rußpartikel, als auch für nukleiertes Eis geschehen, indem die Anzahlkonzentrationen mit einem Indikator in Beziehung gesetzt werden. Als Indikator dient in dieser Arbeit das bei der Verbrennung gebildete Kohlendioxid (CO_2). Die Emissionsindizes werden nach Beispiel von Moore et al. (2017) als Verhältnis der Erhöhung der Partikelanzahlkonzentration (ΔX) zur Kohlendioxid-erhöhung (ΔCO_2) berechnet und mit dem Emissionsindex für Kohlendioxid EI_{CO_2} skaliert. Dieser variiert leicht mit dem Kohlenstoffgehalt der Treibstoffe. Es wird eine 100% effiziente Verbrennung des Treibstoffs angenommen.

$$EI_X = \frac{\Delta X \cdot V_m / M_{\text{CO}_2}}{\Delta \text{CO}_2} EI_{\text{CO}_2} \quad (4.12)$$

In Gleichung (4.12) ist V_m das molare Volumen des idealen Gases bei Standardbedingungen und M_{CO_2} ist die molare Masse von CO_2 . Im Gegensatz zu flugzeuggenerierten Rußpartikeln werden Eispartikel nicht direkt von den Triebwerken emittiert und es wird der Begriff *apparent*, also scheinbar, dem Eispartikelemissionsindex vorangestellt (AEI).

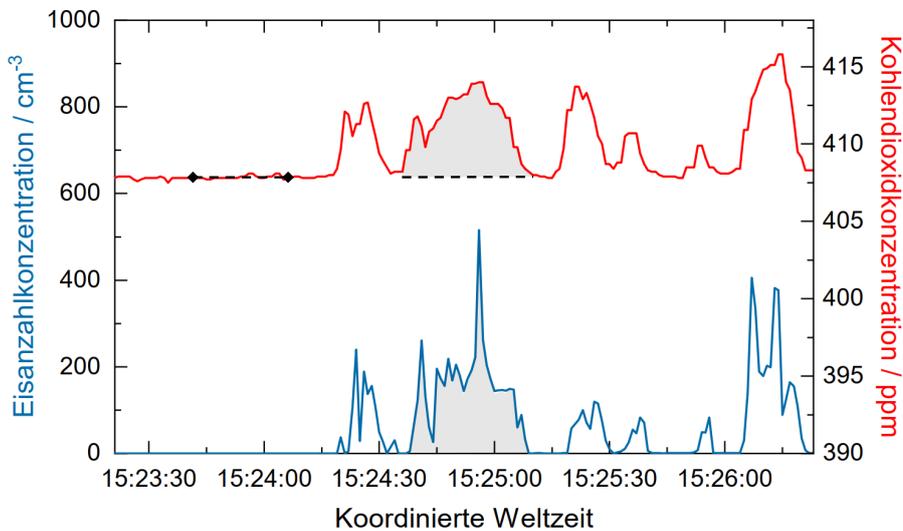


Abbildung 4.3: Beispiel von Eisanzahlkonzentration und Kohlendioxidemission während eines Messflugs am 24. Januar 2018. Der gemittelte CO_2 -Hintergrund ist durch schwarz gestrichelte Linien dargestellt. Die grauen Flächen stellen eine Kondensstreifenmesssequenz dar.

In Abbildung 4.3 ist zur Anschauung eine Beispielzeitreihe aus einem Flug während ECLIF II/NDMAX zu sehen. Eine Kondensstreifensequenz ist in der Eisanzahl- und der Kohlendioxidkonzentration grau markiert. Die Integration der grauen Flächen ergibt ΔN_{Eis} und ΔCO_2 . Zur Ermittlung der Kohlendioxid-

derhöhung muss der CO₂-Hintergrund möglichst genau bestimmt werden. Dies geschieht, indem in einer klar kondensstreifenfreien Messung, möglichst zeitnah zur Kondensstreifensequenz, die Kohlendioxidmessung über einen Bereich von mindestens 15 Sekunden gemittelt wird. Die Varianz des CO₂-Hintergrunds betrug für die Kondensstreifensequenzen während ECLIF II/ NDMAX im Mittel 0.013 ppm. Die Methode zur Kohlendioxidmessung wird in Kapitel 4.1 beschrieben.

Die Dauer einer Kondensstreifensequenz hängt auch vom Flugmanöver und damit verbundenen Sicherheitsaspekten ab. Das Messflugzeug wird im Abgasstrahl abgelenkt und wieder aus dem Kondensstreifen herausgedrückt. Der Mittelwert der Dauer einer Kondensstreifensequenz beträgt für die vorliegenden Daten 26 Sekunden (Median 18 Sekunden). Die kürzeste ausgewertete Kondensstreifensequenz dauerte 5 Sekunden. Die längste gleichmäßige Sequenz hatte eine Länge von 200 Sekunden.

Kapitel 5

Einfluss der Umgebungsbedingungen auf Kondensstreifeneigenschaften

In diesem Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Flugexperiment detailliert beschrieben und die Besonderheiten des umfangreichen Datensatzes dargelegt. Es werden im Anschluss Ergebnisse des Einflusses der atmosphärischen Bedingungen auf die Kondensstreifenbildung gezeigt und damit die erste Forschungsfrage beantwortet: Welchen Einfluss haben atmosphärische Bedingungen wie der Wassergehalt und die Temperatur auf die mikrophysikalischen und die optischen, klimarelevanten Eigenschaften von jungen Kondensstreifen?

5.1 Das Flugexperiment ECLIF II/NDMAX

In den letzten Jahren sind im Bereich der Kondensstreifenforschung Untersuchungen zum Mitigationspotential von Kondensstreifen in den Mittelpunkt gerückt. Es stellt sich die Frage, ob der Einsatz von Biotreibstoffen die Bildung von Kondensstreifeneispartikeln reduzieren und damit direkten Einfluss auf ihre Klimawirkung nehmen könnte.

In dieser Fragestellung lag auch die Motivation für das im Frühjahr 2018 durchgeführte Flugexperiment ECLIF II/NDMAX. Das Experiment wurde in einer Kollaboration der DLR Institute für Physik in der Atmosphäre und für Verbrennungstechnik und des NASA Langley Research Centers organisiert und durchgeführt. Weitere Partner waren: NRC Canada, Aerodyne, Boeing, das Max-Planck-Institut für Chemie, die Universität Innsbruck, die Universität Oslo und die Missouri University of Science and Technology. Insgesamt waren 120 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beteiligt. Das Experiment war Teil der DLR-Projektserie Emission and Climate Impact of Alternative Fuels (ECLIF) zum Thema alternativer Treibstoffe in der Luftfahrt. Unter dem Zusatz NASA DLR Multidisciplinary Airborne Experiment (NDMAX) wurde das Experiment bei der NASA geführt. Während ECLIF II/NDMAX wurden Emissionen und

Kondensstreifen gemessen, die bei der Verbrennung der Biotreibstoffgemische entstanden. In Abbildung 5.1 sind die beide Flugzeuge zu sehen, die während des Experiments zum Einsatz kamen. Die Messungen wurden an Bord des NASA Airborne Science Laboratory durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Douglas DC-8, die 1985 von der NASA erworben und zum fliegenden Messlabor umgebaut wurde.



Abbildung 5.1: DC-8 und A320 am 24. Januar 2018. CC-BY: Florian Friz.

Als Testflugzeug diente das Advanced Technology Research Aircraft (ATRA), das im Jahr 2008 als ehemaliges Passagierflugzeug vom DLR gekauft und zum Forschungsflugzeug umgerüstet wurde. Dabei handelt es sich um eine A320 mit zwei V2527-A5 Triebwerken, die 1993 vom Konsortium International Aero Engines (IAE) entwickelt wurden. Sie entsprechen gedrosselten V2500-A5 Triebwerken mit einem Startschub von 110 kN. Zu Beginn der Flugkampagne hatte das Steuerbord-Triebwerk ein Alter von 28 150 Flugstunden bei 13 060 Flugzyklen.

5.1.1 Verwendete Treibstoffe

Die drei von der A320 im Reiseflug verbrannten und hier untersuchten Treibstoffe waren ein Referenztreibstoff, der zu 100% aus herkömmlichen Jet A-1 Kerosin bestand und zwei Biotreibstoffgemische. Die beiden Gemische bestanden aus dem Biotreibstoff HEFA und je einem Kerosintreibstoff aus unterschiedlichen Raffinerien. Der Biotreibstoff wurde in der Paramount Oil Refinery in Kalifornien hergestellt und durch Air BP in Hamburg bezogen. Durch die Mischung mit HEFA entstanden zwei *Sustainable Aviation Fuels*; SAF 1 und SAF 2. Diese beiden Treibstoffgemische unterschieden sich in ihrem Biotreibstoffanteil und ihrem Naphthalengehalt. Die Bezeichnungen Ref 3 und Ref 4 für die Referenztreibstoffe wurden gewählt, um sie von den Referenztreibstoffen aus der Vorgängerkampagne ECLIF I zu unterscheiden (Ref 1 und Ref 2).

Die Zusammensetzung der Treibstoffe und ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften werden in Tabelle 5.1 vorgestellt. Alle Parameter wurden entsprechend der aufgelisteten ASTM Spezifikationen vom Institut für Verbrennungstechnik am DLR in Stuttgart ermittelt. Ein besonderer Fokus liegt auf dem Aromaten- und dem Naphthalengehalt. Aromaten sind ringförmige Kohlenwasserstoffverbindungen mit mesomeren Grenzstrukturen, in denen Elektronen in delokalisierten Doppelbindungen vorliegen. Bei Naphthalen handelt es sich um

einen bicyclischen Aromatentyp. Der theoretische Hintergrund ist in Kapitel 2.2.4 beschrieben. Unterschiede im Aromaten- und Naphthalengehalt sind für Treibstoffe aus verschiedenen Raffinerien typisch (Zschoke et al., 2012). Durch eine Variation der Mischung von HEFA mit den beiden Referenztreibstoffen wurde ein stark reduzierter Aromatengehalt in den beiden Biotreibstoffgemischen erreicht (unter 10 Vol.-%). Für SAF 1 und SAF 2 ist der Aromatengehalt ähnlich. Allerdings unterscheidet sich der Naphthalengehalt stark. In SAF 2 ist weniger als ein Zehntel des Naphthalengehalts von SAF 1 enthalten.

Tabelle 5.1: Übersicht der Treibstoffzusammensetzungen, ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften und der Messpunktstatistik während des ECLIF II/NDMAX Experiments adaptiert von Voigt et al. (2021a).

		SAF 1	SAF 2	Ref 3	Ref 4
Zusammen-		51% Ref 3	70% Ref 4	Jet A1	Jet A1
setzung		49% HEFA	30% HEFA		
Aromaten ^a	Vol.-%	8.5	9.5	18.6	16.5
Dichte ^b	kg m ⁻³	784.4	777.3	814.4	790.5
Heizwert ^c	MJ kg ⁻¹	43.63	43.63	43.14	43.34
Naphthalene ^d	M.-%	0.61	0.05	1.17	0.13
Schwefel ^e	M.-%	0.007	<0.001	0.012	<0.001
Viskosität ^f	mm ² s ⁻¹	4.33	3.24	4.59	3.25
Wasserstoff ^g	M.-%	14.40	14.51	13.65	14.08
H:C		2.005	2.023	1.884	1.953
Kondensstreifen-					
sequenzen					
7.8 – 8.2 km		56	30	11	–
9.1 – 9.8 km		103	63	1	–
11.4 – 11.6 km		38	54	12	–

ASTM: ^aD6379, ^bD4052(15°C), ^cD3338, ^dD1840, ^eD2622, ^fD445(-20°C), ^gD7171

Schripp et al. (2018) zeigten im Rahmen der ECLIF I Messungen, dass die emittierte Rußmasse nur bedingt mit dem Aromatengehalt im Treibstoff korreliert. Als weit besseres Maß für die rußbildenden Eigenschaften eines Treibstoffes stellte sich das Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff (H:C) im Bezug auf die Masse heraus. Da Kerosin hauptsächlich aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Schwefel besteht, kann das H:C Verhältnis berechnet werden, indem die Annahme getroffen wird, dass der Schwefelgehalt im Treibstoff vernachlässigbar klein ist. Das trifft auf die Treibstoffe in Tabelle 5.1 zu. Für den Wasserstoffmassenanteil w_H und die molaren Massen von Wasserstoff M_H und Kohlenstoff M_C ergibt sich das H:C Verhältnis aus:

$$\frac{x_H}{x_C} = \frac{\frac{w_H}{M_H}}{\frac{100 M.\% - w_H}{M_C}}. \quad (5.1)$$

Die Messpunktstatistik in Tabelle 5.1 gibt an, wie viele Kondensstreifensequenzen während ECLIF II/NDMAX in der jeweiligen Flughöhe und für den jeweiligen Treibstoff gemessen wurden. Der Referenztreibstoff Ref 4 wurde nicht im Reiseflug gemessen und für den Referenztreibstoff Ref 3 wurden am wenigsten Messequenzen ermittelt, da an den jeweiligen Flugtagen relativ eisuntersättigte Bedingungen vorlagen.

5.1.2 Übersicht Messflüge

Die Messinstrumente wurden im Zeitraum zwischen Oktober 2017 und Januar 2018 am NASA Armstrong Flight Research Center in Kalifornien in die DC-8 eingebaut. Ein erster Testflug erfolgte am 10. Januar 2018 und der Transferflug nach Deutschland fand am 15. Januar 2018 statt. In Deutschland wurden beide Flugzeuge auf der Ramstein Air Base bei Kaiserslautern in Rheinland-Pfalz stationiert. Von dort aus wurden schließlich acht wissenschaftliche Messflüge durchgeführt, wobei die DC-8 Abgaszusammensetzung und Kondensstreifenpartikel hinter dem A320 beprobte. Die Flugzeuge flogen dabei in Formation in einem langgestreckten Flugmuster in zwei zeitweise reservierten Lufträumen im Nordwesten und Nordosten von Deutschland.

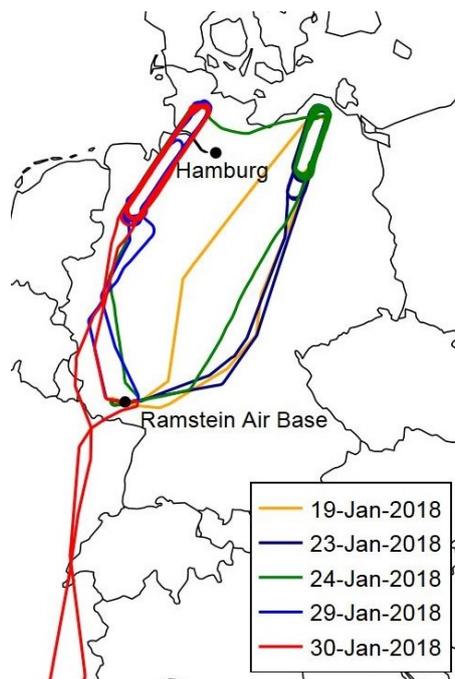


Abbildung 5.2: Flugmuster der DC-8 während ECLIF II/NDMAX.

Eine Übersicht über die Messflüge findet sich in Tabelle 5.2. Zwei der Flüge fanden in so trockenen, also eisuntersättigten, atmosphärischen Verhältnissen statt, dass sie für die Kondensstreifenanalyse ausgeschlossen wurden (17. Januar und 1. Februar 2018). Einer der Flüge konzentrierte sich nicht auf die Beprobung des DLR A320, sondern auf Kondensstreifen kommerzieller Passagiermaschinen

im Linienbetrieb (31. Januar 2018). Dazu wurde im deutschen Luftraum zum Beispiel ein A321neo mit einem CFM Leap-1A Triebwerk beprobt. Fünf wissenschaftliche Messflüge werden im Folgenden für die Kondensstreifenanalyse in dieser Arbeit ausgewertet. Während dieser fünf Messflüge wurden Kondensstreifendaten in einem Umfang von 2.5 Stunden gesammelt. Im Vergleich mit vorangegangenen Messexperimenten handelt sich um einen außergewöhnlich umfangreichen Datensatz.

Tabelle 5.2: Übersicht über die wissenschaftlichen Messflüge während des ECLIF II/NDMAX Experiments.

Datum	Treibstoff	Kondensstreifen	Flugfläche
17.01.18	Ref 3	DLR A320	260, 320
19.01.18	SAF 2	DLR A320	260, 320
23.01.18	SAF 2	DLR A320	320, 380
24.01.18	SAF 1	DLR A320	260, 320, 380
29.01.18	Ref 3	DLR A320	260, 320, 380
30.01.18	SAF 1	DLR A320	260, 320, 380
31.01.18		Kommerz. Flugz.	
01.02.18	SAF 3	DLR A320	260, 320, 380

Da die Bedingungen für die Kondensstreifenbildung in den unterschiedlichen Flughöhen stark variiert, beinhaltete die Messstrategie verschiedene Flugflächen. Die Flugfläche gibt eine Fläche gleichen Luftdrucks bei Standardbedingungen in der Einheit 100 Fuß an. Im Fokus standen die Flugfläche 260, 320 und 380. Das entspricht den Flughöhen: 7.8–8.2 km, 9.1–9.8 km und 11.4–11.6 km und den Luftdrücken: 362–343 hPa, 280–271 hPa and 212–203 hPa. Außerdem wurde die Fluggeschwindigkeit zwischen Mach 0.72, 0.76 und 0.8 variiert. Damit konnten verschiedene Leistungsniveaus und Treibstoffverbräuche verglichen werden, die laut Moore et al. (2017) einen großen Einfluss auf die Rußemissionen haben. Das gemessene Alter der Kondensstreifen lag zwischen 20 und 160 Sekunden. Aus Sicherheitsgründen nahm der Abstand zwischen den Flugzeugen in größeren Höhen zu, so dass ältere Kondensstreifen in größerer Höhe und jüngere Kondensstreifen in geringerer Höhe gemessen wurden. Die Abstände zwischen den Flugzeugen lagen demnach zwischen 4 und 45 km und bewegen sich im Bereich der Fernfeldmessungen.

Die Zeitreihen aller fünf untersuchten Messflüge sind im Folgenden dargestellt. Für eine vereinfachte Darstellung wird in den Abbildungen von der Verwendung von SI Einheiten abgewichen. Die in den Abbildungen 5.3 bis 5.7 in dunkelblau dargestellten Eisanzahlkonzentrationen stammen von der FFSSP. Bildet sich ein Kondensstreifen, so sind die Eisanzahlkonzentrationen erhöht. Auch ohne Kondensstreifenbildung konnte die Position des A320 Abgasstrahls während des Fluges mit Hilfe einer Software auf Basis von Winddaten berechnet werden und im Abgasstrahl ohne sichtbaren Kondensstreifen Rußanzahlkonzentrationen

gemessen werden. Die Rußanzahlkonzentrationen sind in den Abbildungen in schwarz dargestellt. Durch die Konzeption des Rußeinlasses wird sicher gestellt, dass die Eiskristalle komplett verdampfen und damit die genaue Anzahl der emittierten Rußpartikel gemessen werden kann (siehe Kapitel 4.1).

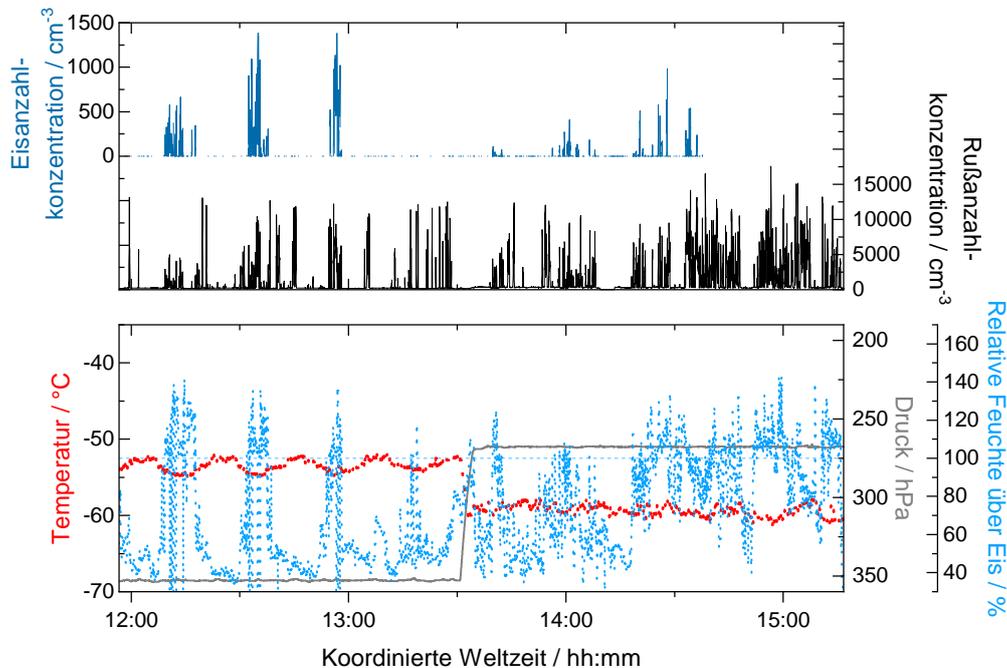


Abbildung 5.3: Zeitreihe von Eisanzahlkonzentration, Rußanzahlkonzentration, Temperatur, Druck und relativer Feuchte über Eis eines Ausschnitts des Messfluges am 19. Januar 2018. Verwendeter Treibstoff: SAF 2.

Abbildung 5.3 zeigt die Zeitreihe des Messfluges vom 19. Januar 2018. Bei dem verwendeten Treibstoff handelt es sich um das Biotreibstoffgemisch SAF 2. Im ersten Teil des Fluges bis 13:30 wurden Messungen auf der Flugfläche 260 durchgeführt, anschließend stiegen die Flugzeuge auf die Flugfläche 320 auf. Insgesamt herrschten an diesem Tag sehr kalte Temperaturen, allerdings lagen relativ oft eisuntersättigte Umgebungsbedingungen vor. Dies zeigt sich darin, dass die relative Feuchte über Eis in großen Teilen des Messfluges unterhalb von 100% lag. Die 100% Marke ist in Abbildung 5.3 mit einer hellblauen, gestrichelten Linie dargestellt. Nur wenn im Abgasstrahl die Sättigungslinie nicht unterschritten wird, kann sich laut dem Schmidt-Appleman Kriterium ein langlebiger Kondensstreifen bilden (siehe Kapitel 2.1.1).

Auf der unteren Flugfläche 260 wurden drei Runden im 160 km langen, abgesperrten Luftraum über dem Nordosten von Deutschland gedreht. Immer am Nordende des Luftraums lag eine eisübersättigte Schicht vor, in der Eiskristalle registriert wurden. Auf der oberen Flugfläche ist auf der Flugfläche 320 am 14:30 eine Erhöhung der Rußemission zu erkennen. Dies ist darauf zurück zu führen,

dass hier die Fluggeschwindigkeit und damit auch der Treibstoffverbrauch erhöht wurde.

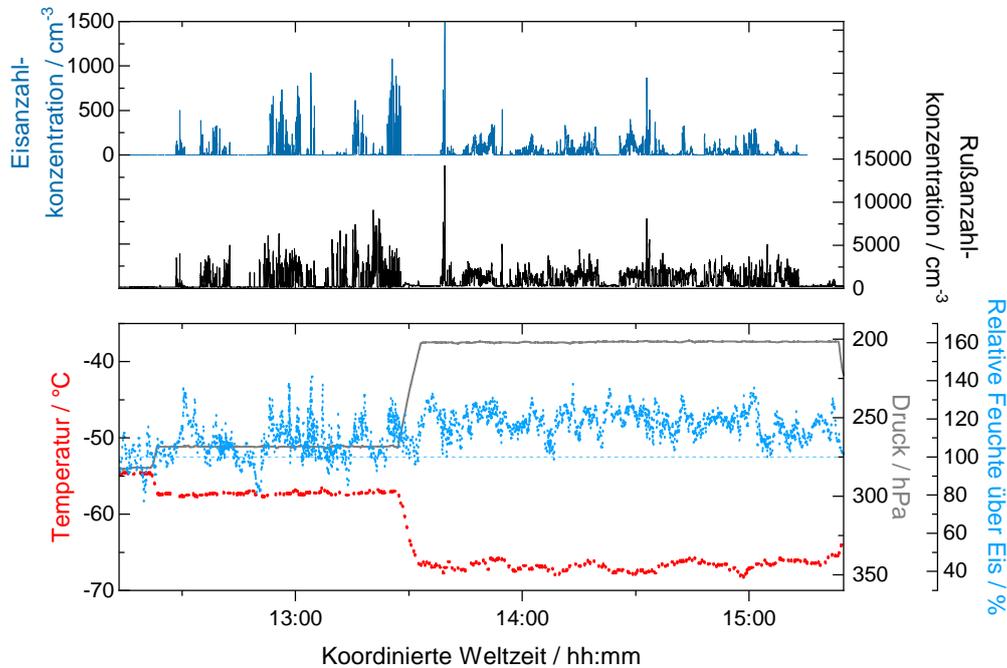


Abbildung 5.4: Zeitreihe von Eisanzahlkonzentration, Rußanzahlkonzentration, Temperatur, Druck und relativer Feuchte über Eis eines Ausschnitts des Messfluges am 23. Januar 2018. Verwendeter Treibstoff: SAF 2.

Abbildung 5.4 zeigt die Zeitreihe des Messfluges vom 23. Januar 2018. An diesem Tag wurde wiederum das Biotreibstoffgemisch SAF 2 geflogen. Bis 13:30 befanden sich die Flugzeuge auf der Flugfläche 320, im zweiten Teil des Fluges wurde die Flugfläche 380 angefliegen. Die Kondensstreifenbildungsbedingungen waren während dieses Messfluges sehr gut und es wurden viele Eiskristalle gemessen. Auf der oberen Flugfläche sind die Rußemissionen aufgrund des geringeren Luftdrucks und des damit verbundenen geringeren Treibstoffverbrauchs sichtbar reduziert.

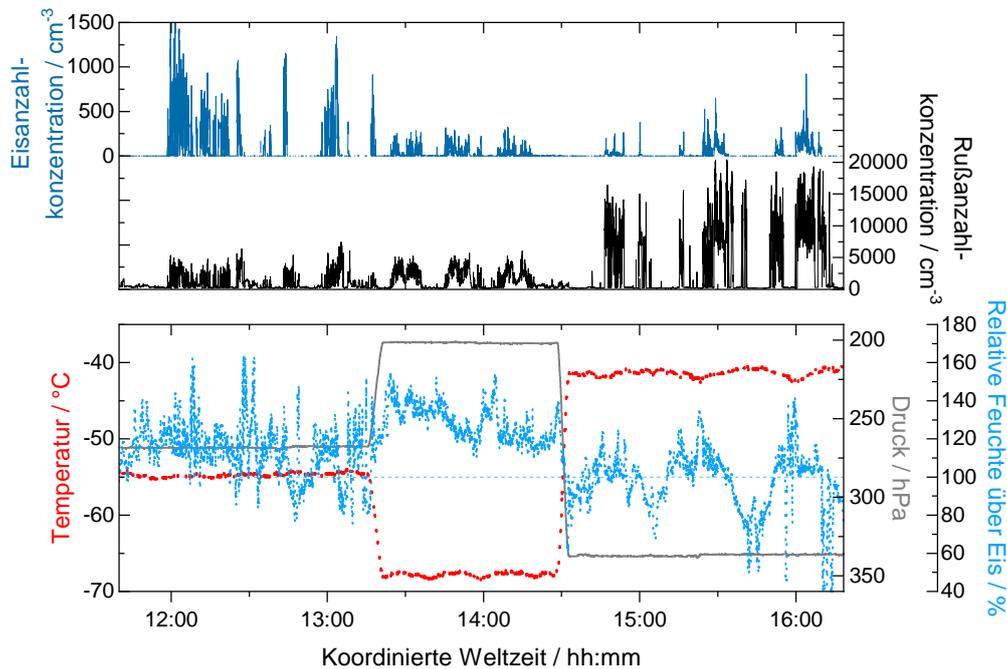


Abbildung 5.5: Zeitreihe von Eisanzahlkonzentration, Rußanzahlkonzentration, Temperatur, Druck und relativer Feuchte über Eis eines Ausschnitts des Messfluges am 24. Januar 2018. Verwendeter Treibstoff: SAF 1.

Abbildung 5.4 zeigt die Zeitreihe des Messfluges vom 24. Januar 2018. An diesem Tag wurde das Biotreibstoffgemisch SAF 1 beprobt. Die Zeitreihe ist geprägt von der Variation der Flugfläche, die sich im Umgebungsdruck und der Temperatur widerspiegelt. Sie teilt die Messungen in drei Bereiche auf. Zwischen 12:00 und 13:20 befinden sich die Flugzeuge auf der mittleren Flugfläche 320. Hier wurden die höchsten Eisanzahlkonzentrationen gemessen und es kam zu einer ausgeprägten Kondensstreifenbildung. Zwischen 13:20 und 14:30 wurden Messungen auf der höchsten Flugfläche 380 durchgeführt, bei kalten Temperaturen von beinahe -70°C und einer eisübersättigten Umgebung. Die relative Feuchte über Eis lag hier durchgehend oberhalb von 120%. Zwischen 14:30 und 16:00 konnten auf der niedrigsten Flugfläche 260 im Vergleich zu den hohen Rußemissionen kaum Kondensstreifen detektiert werden. Die Temperaturen im letzten Teil des Fluges liegen nur knapp unterhalb von -40°C und sind für Kondensstreifen außergewöhnlich hoch.

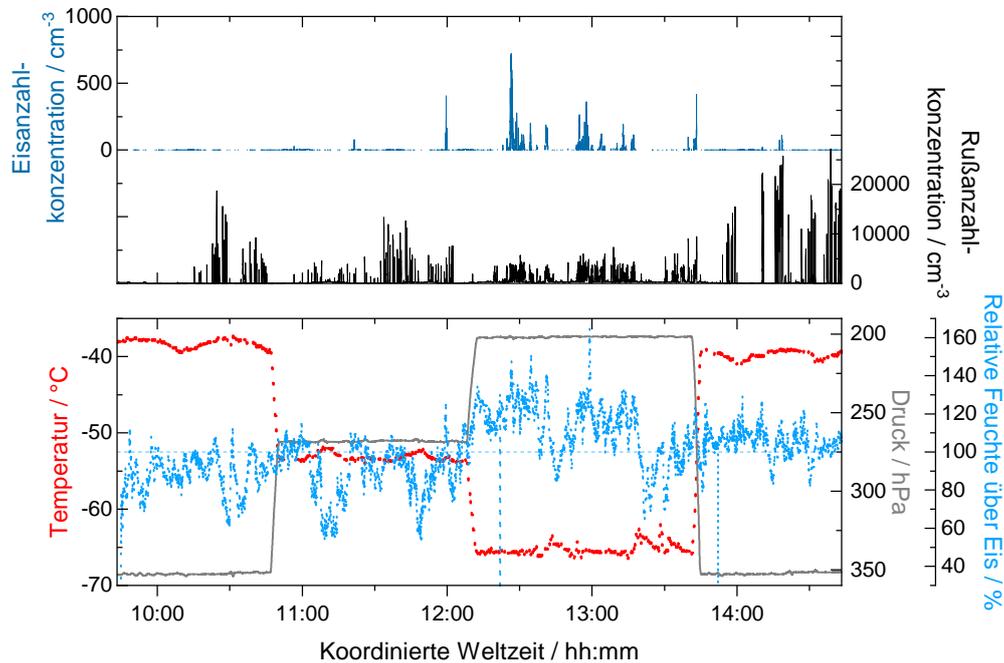


Abbildung 5.6: Zeitreihe von Eisanzahlkonzentration, Rußanzahlkonzentration, Temperatur, Druck und relativer Feuchte über Eis eines Ausschnitts des Messfluges am 29. Januar 2018. Verwendeter Treibstoff: Ref 3.

Abbildung 5.4 zeigt die Zeitreihe des Messfluges vom 29. Januar 2018. An diesem Tag wurde der Referenztreibstoff Ref 3 beprobt, bei dem es sich um herkömmliches Kerosin ohne Biotreibstoffzumischung handelte. Während dieses Fluges wurden alle drei Flugflächen angesteuert, wobei die unterste Flugfläche zweimal, sowohl ganz zu Beginn, als auch am Ende des Fluges abgeflogen wurde. Die relative Feuchte über Eis lag während dieses Fluges hauptsächlich unterhalb der Sättigungslinie. Nur auf der höchsten Flugfläche 380 wurde die Sättigungslinie regelmäßig überschritten und es konnten Eiskristalle in Kondensstreifen registriert werden. Auf den untersten Flugflächen 260 lagen die Temperaturen oberhalb von -40°C und liegen damit erfahrungsgemäß oberhalb der Schmidt-Appleman Temperatur.

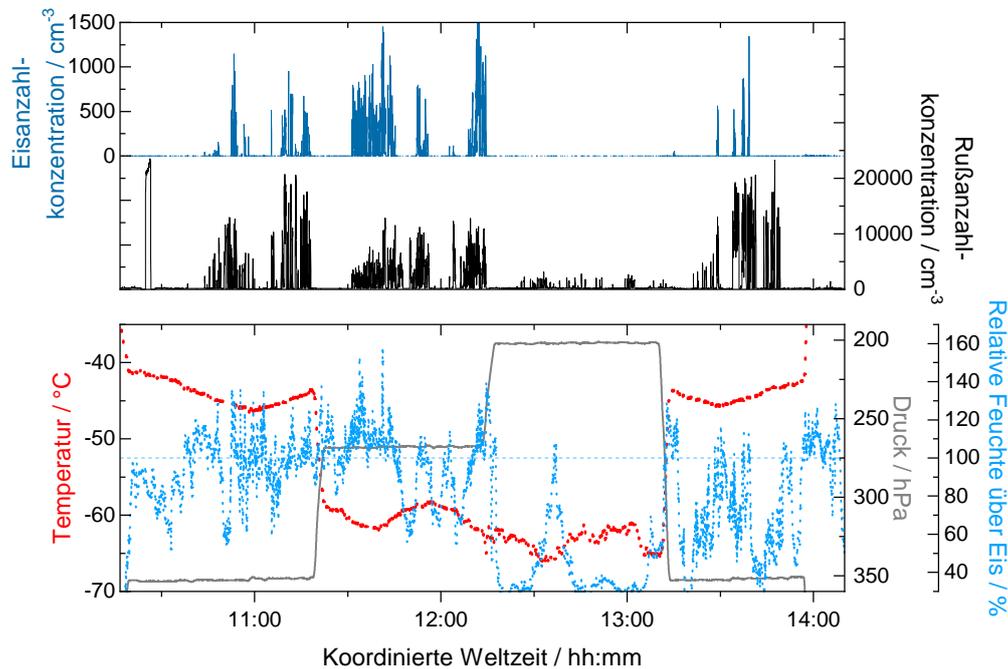


Abbildung 5.7: Zeitreihe von Eisanzahlkonzentration, Rußanzahlkonzentration, Temperatur, Druck und relativer Feuchte über Eis eines Ausschnitts des Messfluges am 30. Januar 2018. Verwendeter Treibstoff: SAF 1.

Abbildung 5.4 zeigt die Zeitreihe des Messfluges vom 30. Januar 2018. An diesem Tag wurde das Biotreibstoffgemisch SAF 1 beprobt. Auch während dieses Fluges wurden alle drei Flugflächen angesteuert. Der Flugtag zeichnet sich durch besonders variable Umgebungsbedingungen innerhalb der verschiedenen Flugflächen aus. Die Temperatur schwankt innerhalb von einer Stunde beispielsweise um bis zu 5°C. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Messflügen wurden auf der höchsten Flugfläche 380 zwischen 12:20 und 13:15 keine Eiskristalle registriert, da hier besonders trockene und eisuntersättigte Bedingungen vorlagen.

5.2 Abhängigkeit der Kondensstreifeneigenschaften von Temperatur und relativer Feuchte

Dieses Kapitel basiert auf der Publikation „Airborne Measurements of Contrail Ice Properties – Dependence on Temperature and Humidity“ von Bräuer et al., veröffentlicht 2021 bei Geophysical Research Letters.

DOI: 10.1029/2020GL092166

Die Bildung eines Kondensstreifens wird in erster Linie durch die Aerosolemissionen, die Umgebungstemperatur und die relative Feuchte beeinflusst (Schumann, 1996). Auch die weitere Entwicklung des Kondensstreifens hängt von atmosphärischen Parametern, wie der Temperatur, der relativen Feuchte über Eis und dem Wasserdampf-Mischungsverhältnis ab (Schumann und Heymsfield, 2017). Außerdem beeinflussen die vertikale Windscherung, die atmosphärische Stabilität und das Strahlungsszenario (Sonnenposition, Oberflächenalbedo und Bewölkung) den Lebenszyklus des Kondensstreifens. Auch die Dicke der übersättigten Luftschicht, in der sich der Kondensstreifen bildet, spielt eine Rolle (Unterstrasser et al., 2017).

Da sich die atmosphärischen Bedingungen abhängig von der Flughöhe charakteristisch ändern, wurde die Abhängigkeit der Kondensstreifenbildung von der Flughöhe immer wieder in Modellen untersucht. Dabei werden Luftverkehrsverzeichnisse und Reanalysedaten genutzt, um die Kondensstreifenbedeckung und den Treibstoffverbrauch abzuschätzen (Frömming et al., 2005; Rädcl und Shine, 2008; Irvine et al., 2012). So konnte zum Beispiel auch gezeigt werden, dass durch intelligente Streckenführung und Änderung der Flughöhe Kondensstreifenausbrüche verhindert werden können (Teoh et al., 2020). Ein flugzeuggetragener Datensatz, der umfangreich genug ist, um eine Diskussion der Umgebungseffekte auf Kondensstreifen zu ermöglichen, lag bisher nicht vor. Der Datensatz aus dem ECLIF II/NDMAX Experiment ist mit über 2.5 Stunden Datenmaterial die umfangreichste Kondensstreifenmessung hinter demselben Flugzeug, die bisher dokumentiert wurde und damit sind auch Vergleiche verschiedener atmosphärischer Bedingungen und Flughöhen möglich.

5.2.1 Beschreibung der Umgebungsbedingungen während ECLIF II/NDMAX

Für die fünf relevanten Messflüge während ECLIF II/NDMAX sind die Profile der Temperatur, der relativen Feuchte über Eis und des Wasserdampf-Mischungsverhältnisses in Abbildung 5.8 gezeigt. Die dargestellten Profile der Umgebungsparameter spiegeln den vertikalen Aufbau der unteren Erdatmosphäre wieder (Roedel und Wagner, 2011). Der Luftdruck bedingt über die allgemeine Gasgleichung die Temperatur (nach Emile Clapeyron, 1834), die in Abbildung 5.8 in rot dargestellt ist. Zusätzlich wird das Temperaturprofil durch ein Zusammenspiel aus radiativer Erwärmung und Abkühlung bestimmt. Das Temperaturminimum ist in der Tropopause zu erwarten, also in der Grenze zwischen der konvektions-

und austauschreichen Troposphäre und der stabileren Stratosphäre. Diese Tropopause liegt in mittleren Breiten zwischen 9 und 13 km Höhe.

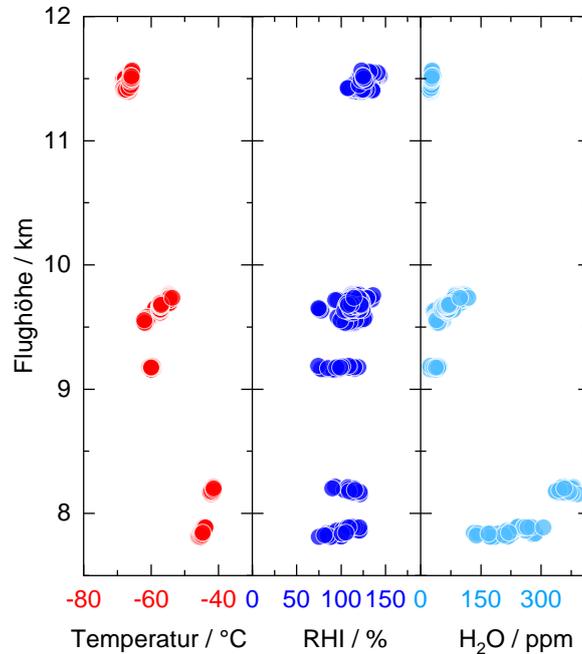


Abbildung 5.8: Mittelwerte der Umgebungstemperatur, der relativen Feuchte über Eis (RHI) und des Wasserdampf-Mischungsverhältnisses (H_2O) pro Kondensstreifensequenz. Es sind Messungen von Flügen an verschiedenen Tagen mit unterschiedlichen Wetterbedingungen enthalten. Die Temperatur wurde vom A320-Basismesssystem abgeleitet. RHI und H_2O stammen vom NASA Diodenlaser-Hygrometer an Bord der DC-8. Um die DC-8 Messungen auf den Zeitpunkt der Bildung des A320 Kondensstreifens zu übertragen, wurden die Daten um das Kondensstreifenalter korrigiert.

Laut (Roedel und Wagner, 2011) wird das Verhältnis zwischen in der Luft enthaltenem Wasserdampf zu maximal möglichem Wasserdampfgehalt als relative Feuchte bezeichnet, im Englischen *relative humidity* und daher abgekürzt RH. Die maximale Feuchte liegt vor, wenn der Wasserdampfpartialdruck dem Sättigungsdampfdruck über flüssigem Wasser oder Eis entspricht. Der Sättigungsdampfdruck gibt an, wann sich der flüssige oder feste Aggregatzustand von Wasser mit Wasserdampf in Gleichgewicht befindet. In Abbildung 5.8 ist die relative Feuchte über Eis (RHI) in dunkelblau dargestellt. Das Temperaturprofil hat Einfluss auf die Aufnahme von Wasser in der Atmosphäre. Mit dem Temperaturrückgang in der Höhe kommt es zu einer schnellen, exponentiellen Abnahme des Wasserdampf-Mischungsverhältnisses. Die Obergrenze der Wasserdampfschicht ist auch die Obergrenze der Troposphäre. In Abbildung 5.8 ist zu sehen, dass das Wasserdampf-Mischungsverhältnis (H_2O) auf einer niedrigen Höhe um 8.2 km am höchsten war.

5.2.2 Abhängigkeit der Extinktion der Kondensstreifen von Temperatur und relativer Feuchte

In Abbildung 5.8 ist die Einteilung der Flugmessungen in drei Höhenbereiche zu erkennen (7.8 – 8.2 km, 9.1 – 9.8 km und 11.4 – 11.6 km). Im Folgenden sollen, unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Umgebungsbedingungen, der Kondensstreifenbildungsprozess und die frühe Entwicklung des Kondensstreifens in verschiedenen Höhen untersucht werden. Als Maß für das Verhältnis zwischen Partikel und Strahlung wird der Extinktionskoeffizient für jede Kondensstreifensequenz ermittelt. Die Berechnung des Extinktionskoeffizienten ist in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Gayet et al. (2012) haben gezeigt, dass von der FFSSP in Zirruswolken gemessene Anzahlkonzentrationen für Eispartikel mit einem Durchmesser kleiner als 16 μm für die Berechnung des Extinktionskoeffizienten geeignet sind.

Abbildung 5.9a zeigt die mittlere Häufigkeitsverteilung des Extinktionskoeffizienten aus allen Eispartikelmessungen der betrachteten Messflüge für ECLIF II/NDMAX. Der Median des Extinktionskoeffizienten betrug 0.8 km^{-1} und ist als farbige Markierung auf der logarithmischen x-Achse dargestellt. Die Messungen werden mit Ergebnissen des CONCERT Experiments aus dem Jahr 2008 verglichen (Voigt et al., 2010, 2011; Jeßberger et al., 2013). Während CONCERT wurden Kondensstreifen verschiedener Flugzeugtypen beprobt; zum Beispiel A319, A340 und A380. Der Median des Extinktionskoeffizienten für CONCERT betrug 0.9 km^{-1} . Somit liegen die Mediane für beide Experimente in der gleichen Größenordnung. Abbildung 5.9b zeigt, wie die mittleren Häufigkeitsverteilungen des Extinktionskoeffizienten für ECLIF II/NDMAX mit der Höhe variieren. Der Median des Extinktionskoeffizienten betrug 0.4 km^{-1} für große Höhen über 11.4 km, 1.6 km^{-1} für mittlere Höhen von 9.1 bis 9.8 km und 0.7 km^{-1} für niedrige Höhen unter 8.2 km.

Um zu untersuchen, was die Extinktionskoeffizienten von Kondensstreifen in den verschiedenen Flughöhen beeinflusst, werden für den 24. Januar 2018 die höhenabhängigen Partikelgrößenverteilungen in Abbildung 5.9c dargestellt. Die PSDs sind auf einen Messflug und damit auf einen Treibstoff begrenzt, um Verzerrungen aufgrund von Variationen der Tropopausenhöhe oder des Aromatengehalts im Treibstoff zu vermeiden. Die PSDs sind in Emissionsindizes dargestellt, um die Auswirkungen von Verdünnung, Kondensstreifenalter und räumlichen Inhomogenitäten auf die Eisanzahlkonzentration zu berücksichtigen.

Die scheinbaren Eisemissionsindizes für Partikeldurchmesser zwischen 0.5 und 1 μm wurden aus durch einen Korrekturfaktor berechnet und sind mit leeren Symbolen dargestellt. Die Ableitung des Korrekturfaktors aus den Eisanzahlkonzentrationen ist in Kapitel 3.3.4 beschrieben. Die relative Unsicherheit für die Abschätzungen dieser kleinen Partikel hängt vom effektiven Durchmesser im Kondensstreifen ab. Die Unsicherheit ist für niedrige und mittlere Höhen 30% und nimmt für große Höhen weiter zu. Tabelle 5.3 listet die Messbedin-

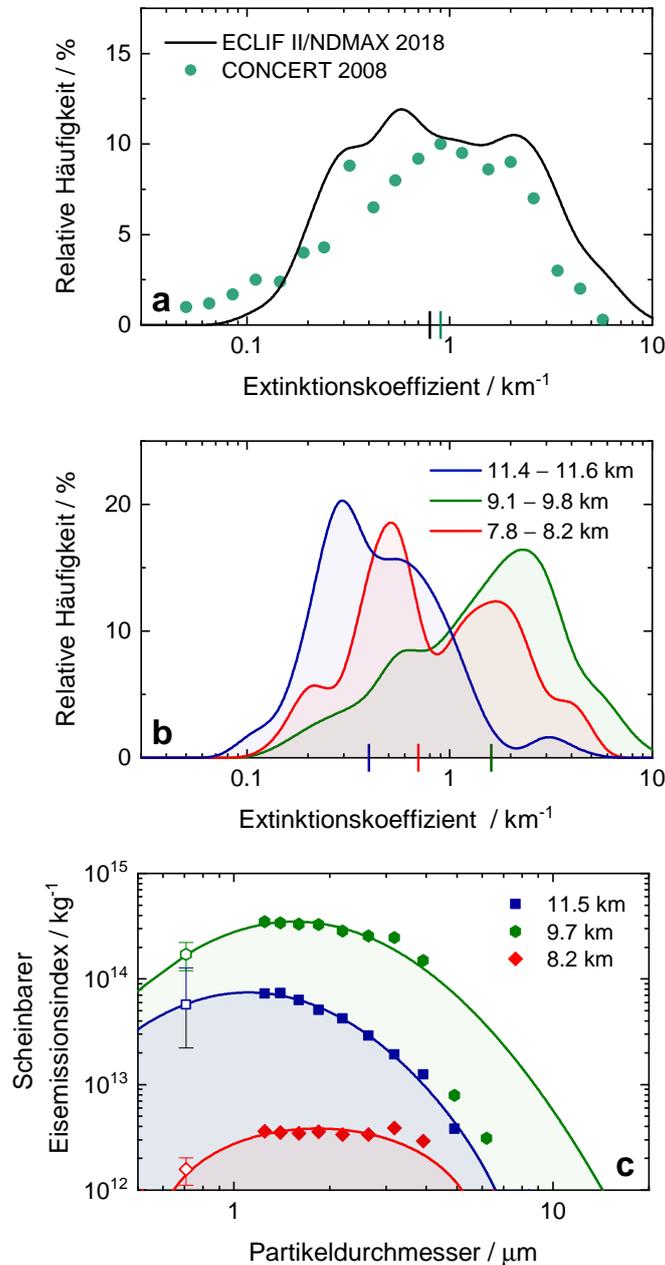


Abbildung 5.9: **(a und b)** Häufigkeitsverteilung der Extinktionskoeffizienten. Die Linien sind an die Daten angepasste Basis-Polynome. Die farbigen Markierungen an der x-Achse zeigen Mediane. **(a)** Gesamte Extinktionskoeffizienten während ECLIF II/NDMAX und CONCERT (Voigt et al., 2011). **(b)** Höhenabhängige Extinktionskoeffizienten während ECLIF II/NDMAX. **(c)** Mittlere Partikelgrößenverteilungen am 24. Januar 2018. Die Linien zeigen die log-normale Anpassung. Die hohlen Symbole zeigen Konzentrationen für Durchmesser zwischen 0.5 und 1 μm , abgeschätzt durch einen Korrekturfaktor (siehe Kapitel 3.3.4).

gungen und -ergebnisse für den Flug am 24. Januar 2018 auf und ergänzt die Abbildung 5.9c. Im Folgenden werden die Unterschiede in der Extinktion und den Partikelgrößenverteilungen der drei Flughöhen anhand der Mechanismen der Kondensstreifenbildung und des Wachstums erklärt.

Tabelle 5.3: Atmosphärische Bedingungen und Ergebnisse der Messungen am 24. Januar 2018.

Flughöhe	km	8.2	9.7	11.5
Luftdruck	hPa	344 [343;347]	275 [272;280]	209 [205;212]
Temperatur	°C	-41.8 [-42.5;-41.4]	-54.8 [-55.1;-54.5]	-67.7 [-68.3;-67.5]
RHI	%	111 [90;121]	119 [93;136]	132 [120;143]
Wasserdampf	ppm	359 [337;390]	99 [83;118]	25 [21;30]
KS-Alter	s	42 [28;81]	115 [46;145]	138 [97;152]
Messdauer	s	988	1348	1419
Max. N_{Eis}	cm^{-3}	188	1306	219
Eff. Durchmesser	μm	3.0	2.7	2.3
Extinktionskoeff.	km^{-1}	0.5 [0.2;1.7]	2.4 [0.6;7.6]	0.4 [0.2;0.9]

Am 24. Januar 2018 waren die Eisanzahlkonzentrationen in mittleren Flughöhen zwischen 9.1 und 9.8 km am höchsten mit maximalen Anzahldichten von 1250 cm^{-3} . Die Umgebungsbedingungen begünstigten die Kondensstreifenbildung mit Temperaturen zwischen -50 und -60°C und relativen Feuchten bis zu 140%. Es kann davon ausgegangen werden, dass weitgehend alle emittierten Rußpartikel im Abgasstrahl aktiviert werden und zu Eispartikelkeimen werden. Die hohen Eisanzahlkonzentrationen in dieser Flughöhe haben eine erhöhte Extinktion der Kondensstreifen zur Folge. Für die ECLIF II/NDMAX Beobachtungen ist der Einfluss junger Kondensstreifen auf die atmosphärische Strahlung in diesen Höhen am größten. Allerdings gelten die Beobachtungen nur für die vorliegenden atmosphärischen Bedingungen. Das mittlere Alter für Kondensstreifen, die in dieser Flughöhe am 24. Januar 2018 beprobt wurden, betrug 115 s mit einem mittleren effektiven Durchmesser von $2.7 \mu\text{m}$. In der weiteren Entwicklung wachsen die effektiven Durchmesser bei stabilen Kondensstreifenbedingungen mit dem Alter sehr langsam an (Voigt et al., 2017). Gleichzeitig nehmen die Eisanzahlkonzentrationen aufgrund von Mischungsprozessen, Sedimentation und nachfolgender Sublimation ab (Kärcher et al., 2018; Kleine et al., 2018).

Im Gegensatz zur mittleren Flughöhe wiesen die Kondensstreifen oberhalb von 11.4 km den niedrigsten mittleren Extinktionskoeffizienten auf. Das mittlere Kondensstreifenalter betrug 140 s und sowohl der mittlere effektive Partikeldurchmesser, als auch die maximale Eisanzahlkonzentration, waren mit $2.3 \mu\text{m}$ bzw. 220 cm^{-3} klein. Gerade die niedrigen Anzahlkonzentrationen sind interessant, da der niedrige Temperaturbereich (-60 bis -70°C) und die Übersättigung gegenüber Eis einen hohen Rußaktivierungsanteil bewirken sollten. Eine leichte Reduzierung der Anzahlkonzentrationen gegenüber den niedrigeren Höhen kann mit den niedrigen Druckverhältnissen in der größeren Flughöhe erklärt werden. Durch den geringeren Luftwiderstand sind niedrigere Treibstoffströme nötig und

damit sind auch die emittierten Rußkerne natürlich reduziert. Allerdings führt dies nur zu einer Reduktion der Eisanzahlkonzentrationen um höchstens 20%.

Eine weitere Erklärung für die niedrigen Eisanzahlkonzentrationen in Flughöhen oberhalb von 11.4 km findet sich im Wasserdampfgehalt der Umgebungsluft. Trotz der starken Übersättigung über Wasser und Eis war die absolute Luftfeuchtigkeit mit weniger als 40 ppm Wasserdampfgehalt niedrig. Im Vergleich dazu wurden in mittleren Höhen bei der Kondensstreifenbildung 50 bis 100 ppm Wasserdampfgehalt gemessen. Daraus lässt sich schließen, dass das geringere verfügbare Wasser bei niedrigen Umgebungsdrücken zwischen 272 und 280 hPa zu einem reduzierten Wachstum und einer geringeren Größe der Eispartikel führte. Daher ist es möglich, dass ein größerer Anteil der Eispartikel in Flughöhen oberhalb von 11.4 km kleiner als die FFSSP-Nachweisgrenze von 0.5 μm waren und somit nicht gemessen wurde. Der Korrekturfaktor stellt eine untere Grenze für die Eisanzahlkonzentrationen dar, da das Maximum der Partikelgrößenverteilung in Richtung der unteren Nachweisgrenze des FFSSP verschoben ist. Der Einfluss solch kleiner Eispartikel auf die Extinktion ist jedoch gering.

Auch in Flughöhen unter 8.2 km waren die Eisanzahlkonzentrationen reduziert (maximal 185 cm^{-3}). Dies lässt sich durch die Temperaturen nah an der Kondensstreifenbildungsgrenze von -40°C und der großen Spannbreite von RHI (90–120%) erklären. Diese Umgebungsbedingungen bewirkten eine reduzierte Aktivierung der Rußpartikel. Das mittlere Kondensstreifenalter betrug nur 42 s, da es die Sicherheitsvorschriften in dieser Flughöhe erlaubten relativ dicht hinter dem A320 zu fliegen. Das reichliche Vorkommen von Wasserdampf mit Mischungsverhältnissen bis zu 400 ppm erklärt den hohen effektiven mittleren Durchmesser von 3.0 μm in dieser Flughöhe, da mehr Wasser für das Wachstum einer geringeren Anzahl von Partikeln zur Verfügung stand. Die Kombination aus großen, aber weniger Eispartikeln führt zu einem niedrigen mittleren Extinktionskoeffizienten von 0.5 km^{-1} . Dieser Wert ist vergleichbar mit dem Extinktionsniveau in den höchsten Flughöhen.

Zusammenfassend zeigt diese detaillierte Analyse, dass die optische Extinktion von Kondensstreifen stark von den atmosphärischen Bedingungen in den unterschiedlichen Höhen abhängt. Für die atmosphärischen Bedingungen während ECLIF II/NDMAX im Winter und in mittleren Breiten, war die Extinktion junger Kondensstreifen in den mittleren Flughöhen zwischen 9.1 und 9.8 km am höchsten. Typischerweise finden in diesen Höhen die meisten Kurz- und Mittelstreckenflüge über Europa statt. Die Extinktion war in niedrigeren und damit wärmeren Flughöhen unter 8.2 km reduziert und in den höchsten und damit trockeneren Höhen über 11.4 km am geringsten. Diese großen Flughöhen werden typischerweise im transatlantischen Flugverkehr in Regionen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für Kondensstreifenausbrüche erreicht (zum Beispiel über dem Ärmelkanal und Großbritannien).

5.2.3 Abhängigkeit der Rußaktivierung von der Temperatur

Durch die Diskussion der Umgebungseffekte im vorangegangenen Kapitel wird deutlich, dass die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf den Kondensstreifenbildungsprozess hat. Wenn die emittierten Rußpartikel als heterogene Nukleationskeime für Wassertröpfchen wirken und einen Eiskristall bilden, spricht man auch von der Aktivierung der Rußpartikel (Kärcher, 2018). Der Aktivierungsanteil gibt die Anzahl der Eiskristalle als Funktion der Rußpartikel an. Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass der im Abgasstrahl enthaltene Wasserdampf alleine weder Wassertropfen, noch Eiskristalle formt (Wong et al., 2013). Die Rußpartikel sind im Abgasstrahl mit löslichem Material bedeckt, was ihre Fähigkeit Feuchtigkeit zu binden, verbessert (Kärcher, 1998; Wong und Miake-Lye, 2010). Kärcher (2018) zeigte mit Hilfe einer Simulation, dass die Bildung

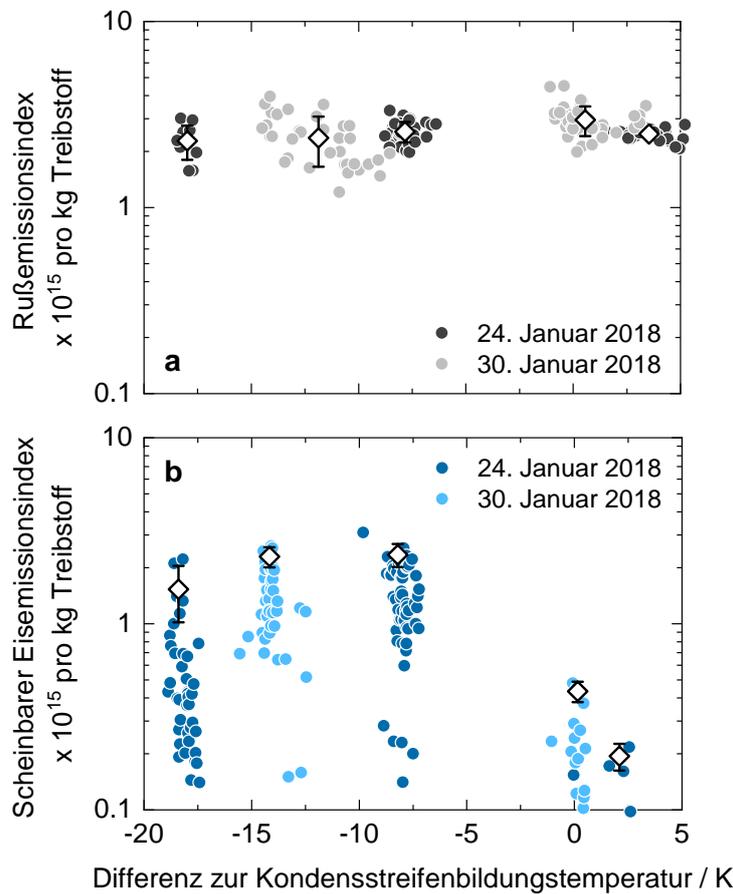


Abbildung 5.10: Dargestellt sind Emissionsindizes in Abhängigkeit von der Differenz zwischen Umgebungs- und Schmidt-Appleman Temperatur. (a) Rußemissionsindizes. Die Rauten zeigen die Mittelwerte und die Unsicherheiten die Standardabweichungen der Rußemissionsindizes. (b) Scheinbare Eisemissionsindizes. Die Rauten zeigen die Mittelwerte der oberen 15% der Eisemissionsindizes und die Unsicherheiten zeigen die zugehörige Standardabweichung.

der Eiskristalle mit der Differenz dT_{SA} zwischen der Umgebungstemperatur und der Schmidt-Appleman Temperatur abnimmt. Die Schmidt-Appleman Temperatur ist die kritische Kondensstreifenbildungstemperatur. Eine Erläuterung des Schmidt-Appleman Kriteriums, das die Voraussetzungen zur Bildung eines Kondensstreifens beschreibt, findet sich in Kapitel 2.1.1. In Abbildung 5.10 sind die Emissionsindizes von Ruß und Eis über der Differenz dT_{SA} dargestellt. Die Daten sind auf das Treibstoffgemisch SAF 1 beschränkt, um Verzerrungen aufgrund von Variationen im Aromatengehalt des Treibstoffs zu vermeiden. Daher werden nur Messungen der Flüge vom 24. und 30. Januar 2018 analysiert.

Die Rußemissionsindizes in Abbildung 5.10a beinhaltet auch Rußresiduen, also durch Sublimation in einem Thermodenuder wieder freigesetzte Nukleationskeime im Eis. Dieses Messverfahren ist innovativ, da erstmals Eis- und Rußanzahlen gleichzeitig gemessen werden können und die Rußanzahlen nicht mehr aus dem kondensstreifenfreien Abgasstrahl ermittelt werden müssen. Die mittleren Rußemissionsindizes steigen in niedrigen Flughöhen aufgrund des erhöhten Treibstoffflusses bei höherem atmosphärischen Druck leicht an und liegen pro Kilogramm Treibstoffverbrauch zwischen 1.2 und $4.5 \cdot 10^{15} \text{ kg}^{-1}$. Ansonsten sind die Rußemissionsindizes von der Temperatur unabhängig.

Um Sublimationseffekte zu berücksichtigen, werden nach Vorgabe von Kleine et al. (2018) für Eis nur die Mittelwerte der oberen 15% der Emissionsindizes bestimmt. Damit werden nur die Messpunkte berücksichtigt bei denen die Eisanzahlkonzentrationen nicht durch äußere Effekte reduziert wurden. Außerdem werden in Abbildung 5.10 alle Kondensstreifen, die in eisuntersättigten Bedingungen entstanden und beobachtet wurden, ausgeschlossen ($<100\%$ RHI).

Für die Berechnung der Schmidt-Appleman Temperatur muss der Vortriebswirkungsgrad bestimmt werden (siehe Kapitel 2.1.1). In dieser Arbeit wurde für den A320 bei einem beispielhaften Treibstoffverbrauch von 0.67 kg s^{-1} ein Vortriebswirkungsgrad von $0.29 (\pm 0.02)$ nach der Methode Poll und Schumann (2020a) und Poll und Schumann (2020b) bestimmt. Die Abschätzung erfolgte durch Prof. Dr. Ulrich Schumann am DLR Institut für Physik in der Atmosphäre. Da die Berechnung der Schmidt-Appleman Temperatur bei warmen Temperaturen am kritischsten ist, wurden ein relativ hoher Umgebungsdruck von 269.5 hPa und eine relativ warme Umgebungstemperatur von -41.5°C für die Ermittlung des Wirkungsgrades angenommen. In einer möglichst progressiven Annahme wurde der Wert 0.31 als Vortriebswirkungsgrad gewählt und damit die Schmidt-Appleman Temperatur berechnet. Je größer der Vortriebswirkungsgrad, desto höher liegt die Schmidt-Appleman Temperatur.

Der Aktivierungsanteil von Ruß in einem Kondensstreifen kann durch einen Vergleich der Emissionsindizes von Ruß und Eis berechnet werden und ist in Abbildung 5.11 für die Mittelwerte aus vier Temperaturbereichen dargestellt. Für dT_{SA} zwischen -16 und -6.9 K , auf Flughöhen zwischen 9.5 und 9.8 km , ist die Aktivierung mit 92 bis 97% nahezu vollständig. Die vorliegenden Daten

lassen erstmals eine Auswertung der Bedingungen nahe der Kondensstreifenbildungsgrenze zu. Hier werden nur die emittierten Partikel aktiviert, die am besten löslich und am größten sind (Kärcher und Yu, 2009; Kärcher et al., 2015; Kärcher, 2018). In diesem Bereich, bei relativ hohen Temperaturen um -40°C , sind die Eisemissionsindizes stark reduziert. Für dT_{SA} zwischen -1.1 und 1.1 K kann am 30. Januar 2018 eine Aktivierung von 14.7% ermittelt werden. Am 24. Januar 2018 beträgt die Aktivierung 7.8% für dT_{SA} zwischen 0 und 3.0 K.

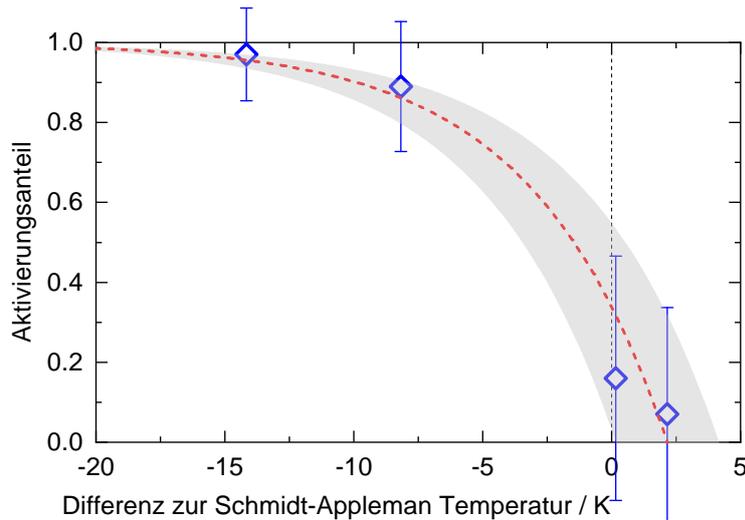


Abbildung 5.11: Aus dem Verhältnis der gemittelten Emissionsindizes (EI) berechnete Aktivierung von Ruß- in Eispartikel in Abhängigkeit zur Differenz zwischen der Umgebungs- und der Schmidt-Appelman Temperatur. Die Unsicherheiten ergeben sich aus den Standardabweichungen der gemittelten EI. Die rote Linie zeigt die lognormale Näherung der Aktivierungsanteile. Die graue Fläche zeigt die instrumentenbasierte Unsicherheit der Temperaturdifferenzen von 1.9 K.

In Abbildung 5.10 ist zu sehen, dass die Eisemissionsindizes zwischen -18.9 und -17.4 K, bei den kältesten Bedingungen oberhalb von Flughöhen von 11.5 km, reduziert sind. Insbesondere in den großen Höhen erhöht die Unterzählung kleiner Eiskristalle die Unsicherheit der berechneten Aktivierungsrate. Wie schon erläutert, ist aufgrund der günstigen Bedingungen in diesen Höhen eine vollständige Rußaktivierung zu erwarten. Daraus lässt sich schließen, dass etwa 30% der Eispartikel in den größeren Höhen aufgrund ihrer Größe nicht erkannt oder nicht berücksichtigt wurden. Um den Fehler für eine lognormale Näherung der Aktivierung zu verringern, wird der Aktivierungsanteil für den Temperaturbereich zwischen -18.9 und -17.4 K nicht in Abbildung 5.11 übertragen.

Die Linie der lognormalen Näherung der Rußaktivierungsanteile, die in Abbildung 5.11 in rot dargestellt wird, ist ein wichtiger Anhaltspunkt für die Simulation von Eispartikelnukleation in mikrophysikalischen Modellen. Das Kondensstreifenvorhersagungsmodell CoCip beispielsweise nimmt einen festen Aktivierungsanteil unabhängig von dT_{SA} an (Schumann et al., 2012). Dabei kann es

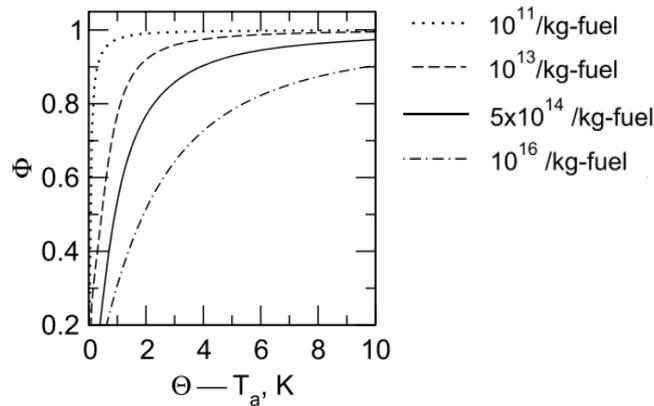


Abbildung 5.12: Simulierter Anteil Φ der Wasser-aktivierten/gefrorenen Rußpartikel in Abhängigkeit zum Versatz zwischen atmosphärischer Temperatur und Schmidt-Appleman Temperatur Θ aus Kärcher et al. (2015).

zu einer Überschätzung der Eisanzahlkonzentrationen kommen. In anderen Modellen wird die Aktivierung meist in Abhängigkeit von den Rußemissionen und dT_{SA} parametrisiert. In Abbildung 5.12 sind die simulierten Eisanteile in einem mikrophysikalischen Modell nach Kärcher et al. (2015) aufgeführt.

Mit steigenden Rußemissionen werden die Kurven flacher. Abhängig von der Höhe der Rußemissionen kommt es dabei erst 2 bis 3 K unterhalb der Schmidt-Appleman Temperatur zu einer Reduktion des Aktivierungsanteils. Aktuellere temperaturabhängige Aktivierungskurven in Modellen zur globalen Luftverkehremissionsvorhersage sind insgesamt zunehmend flacher ausgelegt und

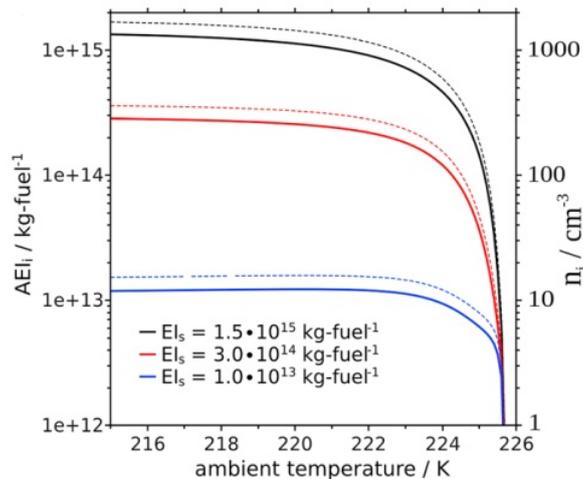


Abbildung 5.13: Simulierter scheinbarer Eisemissionsindex AEI_i für verschiedene Rußemissionsindizes in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur übernommen aus Bier und Burkhardt (2019).

nähern sich damit der in dieser Arbeit gemessenen Abhängigkeit. Ein Beispiel sind die Ergebnisse von Bier und Burkhardt (2019), die in Abbildung 5.13 zu sehen sind.

Interessanterweise wurden für die beiden in Abbildung 5.10 betrachteten Flüge Kondensstreifen bei positiven dT_{SA} -Werten beobachtet. Am 30. Januar 2018 betrug dT_{SA} maximal 1.1 K bei Flughöhen unterhalb von 7.9 km, und am 24. Januar 2018 betrug dT_{SA} maximal 3.0 K bei Flughöhen unterhalb von 8.2 km. An beiden Tagen scheinen sich Kondensstreifen bei Bedingungen gebildet zu haben, die wärmer als die Schmidt-Appleman Temperatur waren. Ähnliche Situationen wurden bereits in Gayet et al. (1996) und Jensen et al. (1998) beobachtet, allerdings gibt es diesbezüglich nur wenige Daten. Mögliche Erklärungen für die Kondensstreifenbildung außerhalb des Schmidt-Appleman Kriteriums werden in Schumann et al. (2017) diskutiert.

Eine Ursache für positive dT_{SA} können Instrumenten- und Messunsicherheiten sein. Instrumentenunsicherheiten für die Berechnung von Temperaturdifferenzen in geringen Höhen betragen nur maximal ± 1.9 K. Die Möglichkeit, dass es sich bei den Beobachtungen nicht um abgasbedingte, sondern um aerodynamische Kondensstreifen handelt, kann ausgeschlossen werden. Aerodynamische Kondensstreifen resultieren aus dem Kühleffekt der beschleunigten Strömung über den Tragflächen (Gierens et al., 2009) und die hier gemessenen Partikelgrößen überschreiten typische Größenverteilungen aerodynamischer Kondensstreifen (Gierens et al., 2011). Die Erklärung für Kondensstreifen, die sich scheinbar bei Temperaturen gebildet haben, die oberhalb der Schmidt-Appleman Temperatur liegen, ist daher eher in der atmosphärische Variabilität und der starken dynamischen Vermischung im Abgasstrahl zu finden. Durch die ungleichmäßigen Verteilungen kann es theoretisch zu Ungleichgewichtsprozessen kommen, die durch das Schmidt-Appleman Kriterium nicht wiedergegeben werden. Dieser Effekt ist zwar bekannt, ist jedoch kaum erforscht und wird in den Modellen zur Kondensstreifenbildung nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend wird in diesem Kapitel gezeigt, dass dT_{SA} als Indikator für den Rußaktivierungsanteil betrachtet werden kann. Der Aktivierungsanteil von Ruß in Eiskristalle ist reduziert, wenn sich die Umgebungstemperatur der Schmidt-Appleman Temperatur nähert. Diese Abhängigkeit ist in den Messungen weit stärker ausgeprägt, als durch Modelle bisher parametrisiert. Außerdem wurden Kondensstreifen auch oberhalb der Schmidt-Appleman Temperatur gemessen. Dieses Phänomen wird auf Ungleichgewichtsprozesse im Abgasstrahl zurückgeführt. Für hohe Unterschiede zwischen der Umgebungs- und der Schmidt-Appleman Temperatur wurden ebenfalls reduzierte Eisemissionsindizes gemessen. Diese Reduktion kann mit dem Mangel an verfügbarem Hintergrundwasserdampf und der Nachweisgrenze des Instruments begründet werden.

Kapitel 6

Einfluss der Biotreibstoffe auf Kondensstreifen

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften von Kondensstreifen aus der DLR Projektserie ECLIF in Abhängigkeit von den eingesetzten Treibstoffen vorgestellt. Der Fokus liegt auf den Biotreibstoffgemischen SAF 1 und SAF 2. Diese haben gegenüber Referenztreibstoffen aus herkömmlichem Kerosin einen reduzierten Aromatengehalt. Bei SAF 2 ist zusätzlich der Anteil an Naphthalen reduziert, wobei es sich um einen besonders rußfördernden Aromatentyp handelt. Es werden im Folgenden sowohl die Emissionsindizes, als auch optische Eigenschaften wie die Extinktion und die optische Dicke verglichen. Im ersten Teil erfolgt eine Betrachtung für Flughöhen zwischen 9.7 und 10.7 km, im zweiten Teil werden Kondensstreifen auf Flughöhen oberhalb von 11.4 km ergänzt. In diesem Kapitel wird die zweite Forschungsfrage beantwortet: Wie verändert der Einsatz von aromatenarmen Biotreibstoffgemischen die mikrophysikalischen und die optischen, klimarelevanten Eigenschaften von jungen Kondensstreifen?

6.1 Emissionsindizes bei der Verbrennung alternativer Treibstoffe in mittleren Flughöhen

Dieses Unterkapitel basiert auf der Publikation „Cleaner burning jet fuels reduce contrail cloudiness“ von Voigt et al., die 2021 bei Nature Communications Earth and Environment veröffentlicht wurde. T. Bräuer ist Koautor der Publikation und verantwortlich für die Eisauswertungen des ECLIF II/NDMAX Experiments. DOI: 10.1038/s43247-021-00174-y

Im Folgenden werden Teilausschnitte der Messdaten von ECLIF II/NDMAX und dem Vorgängerexperiment ECLIF I miteinander verglichen. Die beiden Experimente gehören zur DLR Projektserie ECLIF, bei der die Effekte von verschiedenen alternativen Luftfahrttreibstoffen auf die Atmosphäre in mehreren Flugexperimenten untersucht wurden. Für die einzelnen Messsequenzen wird ein Emissionsindex für den emittierten Ruß und die nukleierten Eispartikel im Kondensstreifen berechnet. Die Methode Emissionsindex wird in Kapitel 4.2.2 be-

schrieben. In Abbildung 6.1 sind Emissionsindizes für Eis und Ruß aus insgesamt fünf Treibstoffen dargestellt. Die Treibstoffe Ref 2 und SSF 1 wurden während ECLIF I eingesetzt und Ref 3, SAF 1 und SAF 2 während ECLIF II/NDMAX.

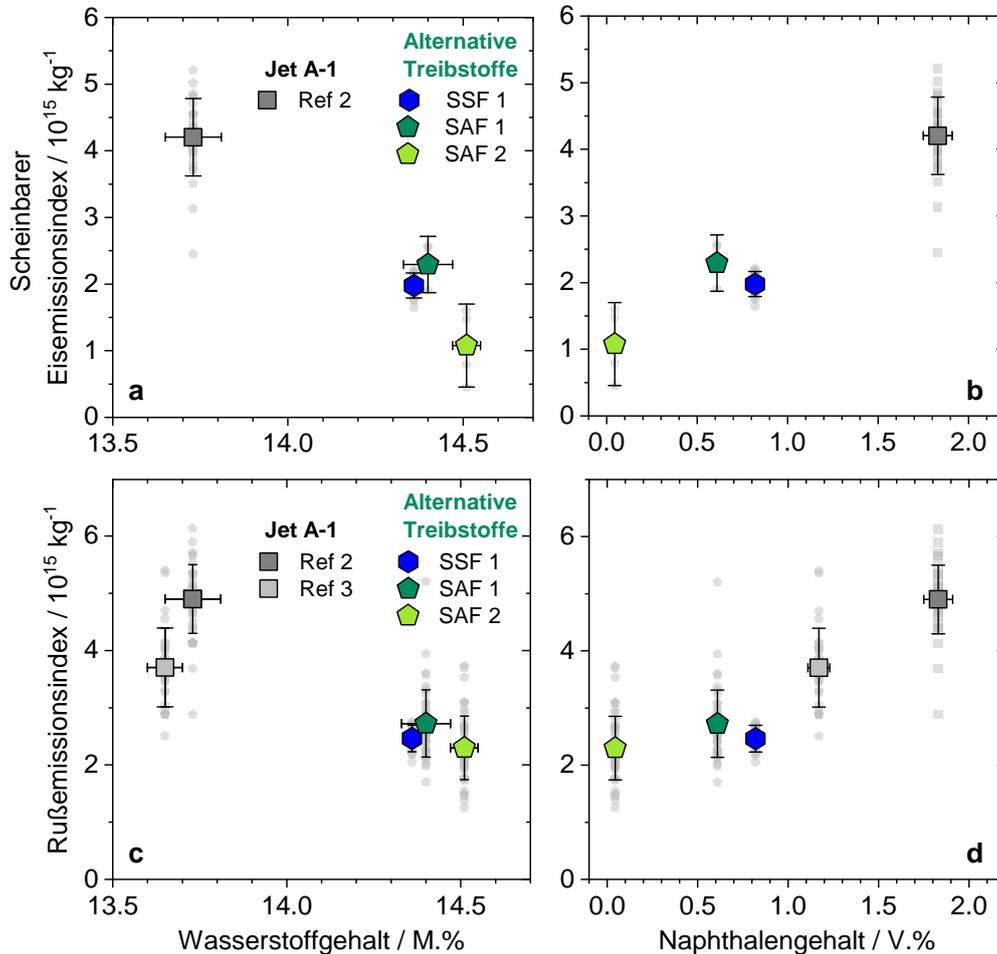


Abbildung 6.1: Emissionsindizes für Treibstoffe der Experimente ECLIF I (Ref 2 und SSF 1) und ECLIF II/NDMAX (Ref 3, SAF 1 und SAF 2) aus Voigt et al. (2021a). Die Mittelwerte sind als farbige Symbole dargestellt und die einzelnen Messsequenzen sind in hellgrau hinterlegt. Unsicherheiten in y-Richtung sind Standardabweichungen der einzelnen Datensätze. Unsicherheiten in x-Richtung basieren auf ASTM Zertifizierungsstandards der Treibstoffkomponenten. Die Auswertung der Eismessungen aus ECLIF I wurde von Dr. Jonas Kleine durchgeführt und die Auswertung der Rußmessungen stammt von Dr. Daniel Sauer. (a) Scheinbare Eisemissionsindizes über dem Wasserstoffgehalt. (b) Scheinbare Eisemissionsindizes über dem Naphthalengehalt. (c) Rußemissionsindizes über dem Wasserstoffgehalt. (d) Rußemissionsindizes über dem Naphthalengehalt.

ECLIF I fand im Jahr 2015 in Manching statt. Die DLR Falcon folgte als Messflugzeug dem DLR A320, der wie auch bei ECLIF II/NDMAX im Jahr 2018 als Testflugzeug diente. Während ECLIF I wurde Eis mit dem Wolken- und

Aerosolspektrometer CAS gemessen, das einen Größenbereich zwischen 0.5 und 50 μm abdeckt (Baumgardner et al., 2001). Die Aufbereitung und Auswertung dieser Messdaten stammt von Dr. Jonas Kleine, beschäftigt am DLR Institut für Physik in der Atmosphäre. Die Messung der Rußpartikelkonzentration erfolgte während beider Experimente mit einem Kondensationspartikelzähler und die Auswertung der Rußmessungen aus ECLIF I und II wurde von Dr. Daniel Sauer ebenfalls am DLR Institut für Physik in der Atmosphäre durchgeführt.

Tabelle 6.1: Atmosphärische und flugspezifische Parameter für einen Vergleich von Messungen aus ECLIF I und ECLIF II/NDMAX (Voigt et al., 2021a).

		ECLIF I		ECLIF II	
		Ref 2	SSF 1	SAF 1	SAF 2
Diff. zu Schmidt-					
Appleman Temp.	K	-9.0	-4.9	-5.9	-8.0
Fluggeschwindigkeit	mach	0.65	0.58	0.76	0.76
Flughöhe	km	10.7	10.4	9.7	9.7
KS-Alter	s	[39;132]	[48;134]	[53;140]	[41;116]
Messdauer	s	482	280	284	119
RHI	%	[115;125]	[108;115]	120	110
Schubstellung	%	81	71	77	77
Treibstoffverbrauch	kg h^{-1}	1180	820	1132	1091

Ein Vergleich der verschiedenen Treibstoffe ist möglich, da für beide Experimente in den Messungen Sequenzen mit ähnlichen Bedingungen ermittelt werden konnten. Eine Auflistung der atmosphärischen und flugspezifischen Parameter ist in Tabelle 6.1 zu finden. Die betrachtete Teilmenge der ECLIF II/NDMAX Daten in 9.7 km Höhe ist beschränkt durch den Lastzustand der Emissionstriebwerke, der ähnlich gewählt wurde wie bei den ECLIF I Daten. Um vergleichbare atmosphärische Bedingungen zu erreichen, wurde die relative Feuchte über Eis (RHI) für alle Sequenzen auf größer als 108% festgelegt. Die angegebenen Messdauern geben die Summe der Messsequenzen für einen Treibstoff an. Für SAF 2 ist die Messdauer am kürzesten und die angegebenen Unsicherheiten für die mittleren Eisemissionsindizes in Abbildung 6.1a und b sind für SAF 2 daher am größten.

Bei dem Referenztreibstoff Ref 2 aus ECLIF I handelt es sich um herkömmliches Kerosin mit 17.2 Vol.-% Aromatengehalt. Durch die Mischung von Kerosin mit einem synthetischen Fischer-Tropsch Treibstoff entstand das synthetische Treibstoffgemisch SSF 1 mit 11.1 Vol.-% Aromatengehalt. Der Aromatengehalt des Referenztreibstoffes Ref 3 aus ECLIF II/NDMAX betrug 18.5 Vol.-%. Für die Biotreibstoffgemische SAF 1 und SAF 2 lag der Aromatengehalt bei 8.5 und 9.5 V.%. Für den Referenztreibstoff Ref 3 aus ECLIF II/NDMAX lagen auf der betrachteten Flughöhe um 9.7 km keine Eismessungen vor. Am entsprechenden Flugtag, dem 29.01.2018, konnten aufgrund von eisuntersättigten Bedingungen nur Rußmessungen durchgeführt werden (siehe Kapitel 5.1.2). Daher werden in

Abbildung 6.1a und b die Eisemissionsindizes der alternativen Treibstoffe mit Ref 2 aus ECLIF I verglichen. Die Emissionsindizes sind in Abhängigkeit vom Wasserstoffgehalt und Naphthalengehalt dargestellt. Der Wasserstoffgehalt eines Treibstoffes wird hauptsächlich von der Art der beinhalteten Kohlenwasserstoffverbindungen beeinflusst (Zschoke et al., 2012). Da im bicyclischen Naphthalen weniger Wasserstoffatome gebunden werden als in monocyclischen Aromaten, steigt der Wasserstoffgehalt der Treibstoffe mit sinkendem Naphthalengehalt an. Unter den betrachteten Bedingungen und im Vergleich mit Ref 2 als Referenztreibstoff liegt die Reduktion der scheinbaren Eisemissionsindizes durch SAF 1 bei 45%, durch das synthetische Treibstoffgemisch SSF 1 bei 52% und durch das Biotreibstoffgemisch SAF 2 bei 74%. Damit zeigt das Treibstoffgemisch mit dem größten Wasserstoffgehalt und dem niedrigsten Naphthalengehalt die größte Reduktion.

In Abbildung 6.1c und d sind die entsprechenden Rußemissionsindizes über dem Wasserstoffgehalt und dem Naphthalengehalt zu sehen. Der Vergleich zeigt, dass die mittleren Rußemissionsindizes für die alternativen Treibstoffe 45 bis 53% niedriger sind als der mittlere Rußemissionsindex von Ref 2. Diese Reduktionen stimmen mit vorangegangenen Messungen überein (Moore et al., 2017). Ein Vergleich der Rußemissionen der beiden Referenztreibstoffe Ref 2 und Ref 3 aus den unterschiedlichen Experimenten zeigt, wie groß der Emissionsunterschied auch bei den herkömmlichen Kerosinen ist. Der mittlere Rußemissionsin-

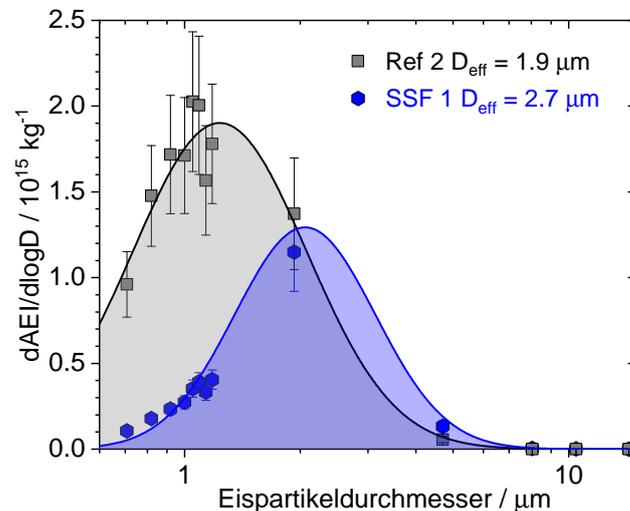


Abbildung 6.2: Verteilung der scheinbaren Eisemissionsindizes über der Eispartikelgröße für Ref 2 und SSF 1 aus Voigt et al. (2021a). Die Mittelwerte der scheinbaren Eisemissionsindizes werden in farbigen Symbolen dargestellt. Die Unsicherheitsbalken sind eine Kombination aus der Unsicherheit im CO₂ Hintergrund und der Standardabweichung der Mittelwerte. Die eingefärbte Fläche zeigt die lognormale Näherung an die Mittelwerte der Emissionsindizes. Diese Auswertungen wurden von Dr. Jonas Kleine durchgeführt.

dex von Ref 2 ist gegenüber Ref 3 um 22% reduziert. Ein Vergleich der Partikelgrößenverteilungen für Ref 2 und SSF 1 ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Der effektive Durchmesser für die Eiskristalle in den Kondensstreifen aus dem Referenztreibstoff war $1.9 \mu\text{m}$. Dagegen war der effektive Durchmesser in Kondensstreifen aus dem semi-synthetischen Treibstoff SSF 1 um 40% erhöht. Der Grund für die unterschiedlichen Partikelgrößen ist, dass die gleiche Menge an Wasserdampf für Kondensstreifen aus dem alternativen Treibstoffgemisch auf weniger Eiskristalle verteilt wird und sie somit weiter anwachsen. Größere Eispartikel sedimentieren und sublimieren schneller und damit ist für die Kondensstreifen aus dem alternativen Treibstoffgemisch auch eine kürzere Lebensdauer zu erwarten (Burkhardt et al., 2018).

In Abbildung 6.3 ist der mittlere scheinbare Eisemissionsindex über dem entsprechenden mittleren Rußemissionsindex für die Treibstoffe Ref 2, SSF 1, SAF 1 und SAF 2 dargestellt. Kleine et al. (2018) lieferte bereits durch die Messung eines Sublimationseffekts aus dem Zusammenhang von Ruß- und Eisemissionsindizes während ECLIF I einen ersten Hinweis für eine bevorzugte Nukleation der Eiskristalle auf Ruß in Kondensstreifen. In Kapitel 5.2.3 wurde gezeigt, dass auch während des ECLIF II/NDMAX Experiments die Nukleation überwiegend auf den emittierten Rußpartikeln stattfindet.

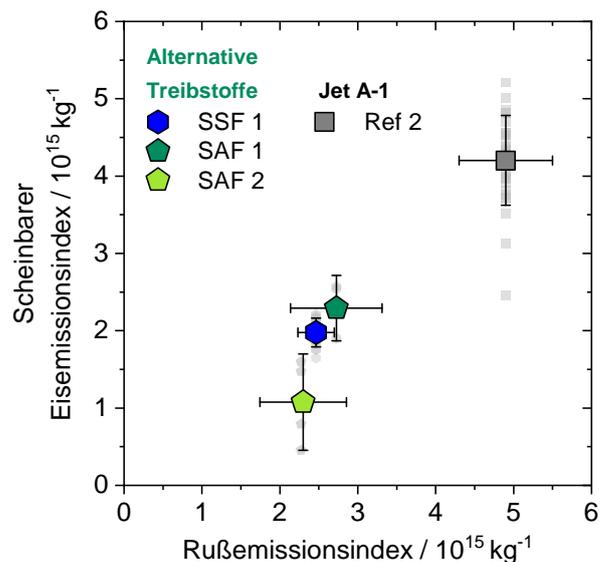


Abbildung 6.3: Scheinbare Eisemissionsindizes über Rußemissionsindizes für Treibstoffe der Experimente ECLIF I und ECLIF II/NDMAX aus Voigt et al. (2021a). Die Mittelwerte sind als farbige Symbole dargestellt und die einzelnen Messsequenzen sind in hellgrau hinterlegt. Die Unsicherheiten sind Standardabweichungen der einzelnen Datensätze. Die Auswertung der Eismessungen aus ECLIF I wurde von Dr. Jonas Kleine durchgeführt und die Auswertung der Rußmessungen stammt von Dr. Daniel Sauer.

Für den Abgasstrahl aus dem Jet A-1 Treibstoff Ref 2 liegt der mittlere

Rußemissionsindex bei $4.9 \cdot 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ und der mittlere Eisemissionsindex bei $4.2 \cdot 10^{15} \text{ kg}^{-1}$. Fast alle emittierten Rußpartikel werden also zu Eispartikeln aktiviert und es liegt eine vollständige Aktivierung vor. Die niedrigste Rußaktivierung liegt für die gewählten atmosphärischen und flugzeugspezifischen Bedingungen mit unter 50% bei dem Biotreibstoffgemisch SAF 2 vor. Auch unter Berücksichtigung der niedrigen Aktivierung ist das Reduktionspotential für SAF 2 mit dem niedrigsten Naphthalengehalt im Vergleich zu den anderen alternativen Treibstoffgemischen am größten.

6.2 Emissionsindizes und Kondensstreifeneigenschaften bei der Verbrennung von Biotreibstoffen in großen Flughöhen

Dieses Unterkapitel basiert auf der Publikation „Reduced ice number concentrations in contrails from low aromatic biofuel blends“ von Bräuer et al., die 2021 bei Atmospheric Chemistry and Physics veröffentlicht wurde.

DOI: 10.5194/acp-2021-582

Nachdem ein Teilausschnitt der ECLIF II/NDMAX Eismessungen im ersten Teil von Kapitel 6 betrachtet wurde, wird im Folgenden der Datensatz des Experiments vollständig vorgestellt und die Flughöhen oberhalb von 11.4 km ergänzt. Auf den Flughöhen unterhalb von 9 km lagen die Temperaturen während des gesamten Flugexperimentes nahe an der kritischen Kondensstreifenbildungstemperatur, was zu einer unvollständigen Aktivierung der vom Triebwerk emittierten Rußpartikel führte. In diesen niedrigen Höhen verändern schon kleine Temperaturschwankungen unter 1 K den Rußaktivierungsanteil und damit die Eisanzahlkonzentrationen in den Kondensstreifen. Um diesen Unsicherheitsfaktor aus der Diskussion des Treibstoffeinflusses auszuschließen, werden im Weiteren nur Messergebnisse in Höhen oberhalb von 9 km verglichen. Es werden sowohl Mittelwerte wie auch vertikale Profile der scheinbaren Eisemissionsindizes in Kondensstreifen vorgestellt. Außerdem werden die optischen Eigenschaften von Kondensstreifen abhängig vom eingesetzten Treibstoff ermittelt. Damit kann die Klimawirkung der jungen Kondensstreifen während ECLIF II/NDMAX eingeordnet werden.

6.2.1 Einfluss von Biotreibstoffen auf Eisemissionsindizes

In Abbildung 6.4 sind die scheinbaren Eisemissionsindizes über dem Wasserstoff zu Kohlenstoff (H:C) Verhältnis der Treibstoffe dargestellt. Das H:C Verhältnis wurde als Treibstoffindikator gewählt, da bereits durch vorangegangene Messungen ein konsistenter Trend in der Reduktion des Rußmassenemissionsindex unabhängig von den Schubeinstellungen belegt wurde (Schripp et al., 2018). Die Berechnung des H:C Verhältnisses in Bezug auf die Masse erfolgte nach Gleichung (5.1) auf Seite 65. Mit sinkendem Aromaten- und Naphthalenanteil im Treibstoff nimmt das H:C Verhältnis zu. Das liegt daran, dass in Aromaten durch ihrer cyclischen Struktur weniger Wasserstoffatome gebunden sind als in langkettigen Kohlenwasserstoffen. Im bicyclischen Naphthalen wird dieser Effekt noch verstärkt und aufgrund seines niedrigen Wasserstoffgehalts gilt der Aromatentyp als besonders rußfördernd (Chin und Lefebvre, 1990; Brem et al., 2015). Am höchsten ist das H:C Verhältnis mit 2.022 für SAF 2.

Kondensstreifen aus der Verbrennung des Referenztreibstoff Ref 3 konnten auf Flughöhen zwischen 9.1 und 9.8 km nicht beprobt werden, da an diesem Messtag die Bedingungen für die Kondensstreifenbildung zu trocken waren. Ref 3 ist daher für diese Höhe nicht in Abbildung 6.4 aufgeführt. Um Sublimationseffekte zu berücksichtigen, wird für den Vergleich der Mittelwert aus den oberen

15% der Eisemissionsindizes berechnet. Diese Vorgehensweise beruht auf Kleine et al. (2018) und beschränkt den Messbereich auf das obere Zentrum des Kondensstreifens. Zusätzlich wurde RHI für Flughöhen zwischen 9.1 und 9.8 km auf größer 100% beschränkt und für Flughöhen zwischen 11.4 und 11.6 km auf größer 120%. Damit wird eine vollständige Rußaktivierung in den Kondensstreifen sichergestellt.

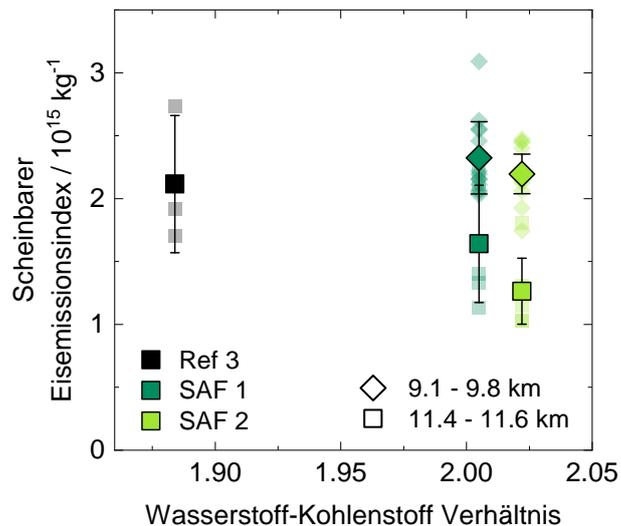


Abbildung 6.4: Mittlerer scheinbarer Eisemissionsindex für zwei verschiedene Flughöhen (Symbole) und drei Treibstoffe (Farben) in Abhängigkeit vom Wasserstoff zu Kohlenstoff (H:C) Verhältnis. Die einzelnen, oberen 15% der Eispartikelmessungen sind in kleineren Symbolen hinterlegt. Die Unsicherheiten sind die Standardabweichungen der Eisemissionsindizes.

Oberhalb von 11.4 km wird der scheinbare Eisemissionsindex bei einer Verbrennung von SAF 1 im Vergleich zu einer Verbrennung von Ref 3 um 23% reduziert. Bei der Verbrennung des Biotreibstoffgemisches SAF 2 mit zusätzlich verringertem Naphthalengehalt kommt es zu einer weiteren Reduktion der Eispartikel im Kondensstreifen. Für große Höhen beträgt die gesamte Reduktion der scheinbaren Eisemissionsindizes durch ein Biotreibstoffgemisch 40% im Vergleich zum Referenztreibstoff Ref 3. In Kapitel 6.1 wurde bereits festgestellt, dass der herkömmliche Jet A-1 Treibstoff Ref 3 bei einem ähnlichen Aromaten- und Wasserstoffgehalt wie Ref 2 eine geringere Anzahl an Rußpartikeln emittierte. Damit ist auch zu erklären, dass die Reduktionen des Eisemissionsindizes im Vergleich mit Ref 3 etwas geringer ausfallen, als im Vergleich mit Ref 2.

Bei der Verbrennung von SAF 2 kommt es im Vergleich zu SAF 1 je nach Höhe zu einer Reduktion zwischen 6 bis 23%. Es kann also festgestellt werden, dass die Anzahl der anfänglichen Eiskristalle nicht nur durch die Verringerung des Aromatengehalts im Treibstoff reduziert wird. Eine Erhöhung des H:C Verhältnisses, wie es hier durch die Reduzierung eines bestimmten Aromatentypen (Naphthalen) geschehen ist, kann die Anzahl der Kondensstreifenpartikel

zusätzlich um bis zu 23% reduzieren. Dieser Zusammenhang wurde zum ersten Mal durch ECLIF II/NDMAX in einer direkten Messung nachgewiesen.

Abbildung 6.5 zeigt die vertikalen Profile der scheinbaren Eisemissionsindizes auf den entsprechenden Flughöhen zwischen 9.1 und 9.8 km und oberhalb von 11.4 km. Damit werden mittlere Querschnitte für Kondensstreifen im Bezug auf die bewerteten Treibstoffe dargestellt. Die genaue, über GPS bestimmte Flughöhe des A320 ist die Bezugsebene in den Abbildungen und entspricht einer vertikalen Verschiebung von 0 m auf den y-Achsen. Der Einfachheit halber werden die Mittelwerte mehrerer Kondensstreifensequenzen über Abschnitte von 30 m berechnet und als Symbole aufgetragen. Für diese Mittelwerte sind Standardabweichungen als Unsicherheiten in x-Richtung ergänzt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist nur eine Auswahl aufgetragen. Wegen der geringeren Anzahl von Messungen in Kondensstreifen für den Referenztreibstoff Ref 3 werden für diesen Treibstoff Mittelwerte über Abschnitte von 60 m berechnet. Aufgrund ungünstiger Wetterbedingungen können keine Kondensstreifen aus Ref 3 in Flughöhen zwischen 9.1 und 9.8 km dargestellt werden.

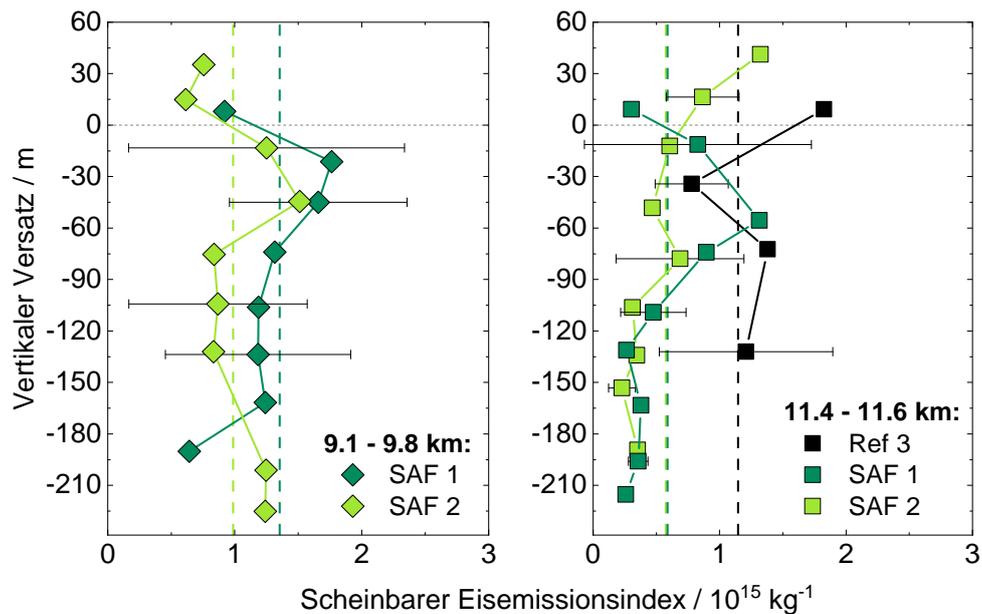


Abbildung 6.5: Scheinbare Eisemissionsindizes in einem vertikalen Profil hinter und unterhalb des Quellflugzeugs. Ein vertikaler Versatz von 0 m entspricht der Höhe des Triebwerkauslasses zum Zeitpunkt der Rußemission. Mittelwerte aller Messpunkte sind in gestrichelten Linien dargestellt. Die Unsicherheiten sind ausgewählte Standardabweichungen der Eisemissionsindizes innerhalb der 30 m (60 m) Abschnitte.

Die vertikalen Profile der Eisemissionsindizes in Abbildung 6.5 zeigen eine typische Verteilung für den Flugzeugtyp A320 und Kondensstreifen in einem Alter von wenigen Minuten (Schumann et al., 2013; Unterstrasser und Görsch,

2014; Kleine et al., 2018). Die Messungen sind über einen vertikalen Bereich von insgesamt 300 m verteilt. Die Ausdehnung reicht von 60 m oberhalb und bis zu 240 m unterhalb der Bezugsebene des Flugzeugs. Unterstrasser und Görsch (2014) zeigen, dass die vertikale Ausdehnung eines Kondensstreifens, der vom gleichen Flugzeug und in der gleichen Flughöhe unter ähnlichen Bedingungen, aber bei der Verbrennung von unterschiedlichen Treibstoffen gebildet wurde, immer gleich bleibt. Theoretisch können allerdings unterschiedliche Partikelgrößen zu Variationen bei Sedimentations- und Sublimationsprozessen führen.

In Abbildung 6.6 ist zu sehen, wie sich ein typischer Sublimationsprozess auf einen Kondensstreifen auswirkt. Beide Fotos wurden von der DC-8 Vorwärtskamera während ECLIF II/NDMAX aufgenommen. Der Kondensstreifen in Abbildung 6.6a ist von Sublimation unbeeinflusst, wohingegen der Kondensstreifen in Abbildung 6.6b sublimationsbedingt einen sekundären Nachlauf ausgebildet hat. Dieser Effekt entsteht, wenn sich der Primärwirbel des Kondensstreifens nach unten absenkt (Kärcher et al., 2018). Die Eiskristalle im unteren Teil des Kondensstreifens beginnen aufgrund adiabatischer Erwärmung zu sublimieren. Durch das Zusammenspiel der beiden Wirbelschleppen, die sich an den Flügelspitzen des A320 bilden, sind die Wirbel symmetrisch geteilt. Der sekundäre Nachlauf befindet sich oberhalb der rot gestrichelten Linie auf der Höhe, in der die Rußpartikel ursprünglich emittiert wurden.

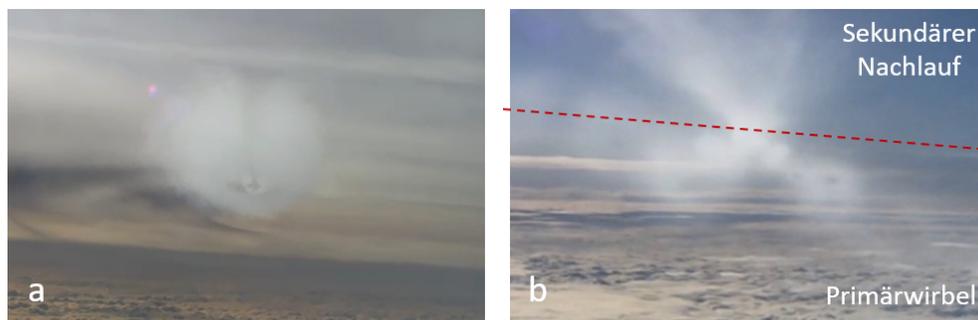


Abbildung 6.6: Von der Vorwärtskamera der DC-8 aufgenommene Kondensstreifen bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen während ECLIF II/NDMAX. CC-BY: NSRC.

Die beschriebenen Sublimationsprozesse führen zu einer Abnahme der Eiskristallanzahl in vertikaler Richtung unterhalb des A320. Die Ausprägung der Abnahme ist abhängig von der relativen Feuchte über Eis, der Temperatur und der atmosphärischen Stabilität. In Abbildung 6.5a und b sind Sublimationseffekte unterschiedlicher Ausprägung zu erkennen. In beiden Diagrammen sind die Anzahlkonzentrationen auf der Ebene des sekundären Nachlaufs in der Nähe des anfänglichen Emissionsniveaus bei 0 m erhöht. Damit sind die Ergebnisse mit Kleine et al. (2018) vergleichbar. In Abbildung 6.5a in Flughöhen zwischen 9.1 und 9.8 km sind im abgesenkten Primärwirbel ebenfalls die Eisanzahlkonzentrationen erhöht.

In Abbildung 6.5 auf Seite 93 sind die Mittelwerte der scheinbaren Eisemissionsindizes aller betrachteten Messsequenzen eines Treibstoffes in gestrichelten Linien dargestellt. Im Gegensatz zu den Mittelwerten aus den oberen 15% der Eisemissionsindizes in Abbildung 6.4 auf Seite 92, beinhalten die Mittelwerte in Abbildung 6.5 auch die Sublimationseffekte und sind nicht für eine klimarelevante Auswertung geeignet.

6.2.2 Einfluss von Biotreibstoffen auf optische Eigenschaften

Burkhardt et al. (2018) zeigen in einem Klimamodell, dass die globale Klimawirkung von Kondensstreifen nicht-linear von der Reduktion der initialen Eiskristallanzahlen abhängt. Das bedeutet, dass durch den Einsatz von Biotreibstoffgemischen die Klimawirkung von Kondensstreifen nicht im gleichen Maß verringert wird, wie die Eisemissionsindizes in den Kondensstreifen reduziert werden. Daher werden im Folgenden auch die optischen Eigenschaften der Kondensstreifen in Abhängigkeit von den Treibstoffen betrachtet.

Extinktion von Kondensstreifen

Der Zusammenhang zwischen den gemessenen Eiskristallen und der Strahlungswirkung von Kondensstreifen ist die Extinktion, also die Abschwächung der Strahlung bei Interaktion mit den Eispartikeln im Kondensstreifen. Der Koeffizient gibt die Abschwächung pro vertikaler Ausdehnung des Kondensstreifens an. Die Berechnung des Extinktionskoeffizienten wird in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Unterstrasser und Gierens (2010) zeigen mit einer LES Simulation verschiedener Lebenszyklen von Kondensstreifen, dass die Extinktion eine geeignete Größe für den Vergleich ähnlich alter Kondensstreifen ist. Der weitere Lebenszyklus ist abhängig von meteorologischen Parametern wie Temperatur und Feuchte, vertikaler Windscherung, atmosphärischer Stabilität, der Dicke der übersättigten Schicht in der sich die Kondensstreifen bilden, der Position der Sonne, der Oberflächenalbedo und der Bewölkung in der Umgebung des Kondensstreifens (Schumann und Heymsfield, 2017; Unterstrasser et al., 2017). Die Extinktion ist also geeignet, um die Klimawirkung von Kondensstreifen verschiedener Treibstoffe zu vergleichen. Für eine Analyse der tatsächlichen Klimawirkung müsste aber der gesamte Lebenszyklus der Kondensstreifen betrachtet werden. Die vorliegenden Messungen stellen eine Momentaufnahme der Kondensstreifen in einem Alter von 0.5 bis 3 Minuten dar.

In Abbildung 6.7 sind die vertikalen Profile der Extinktionskoeffizienten treibstoffabhängig dargestellt. Die genaue, über GPS bestimmte Flughöhe des A320 entspricht hier wiederum einer vertikalen Verschiebung von 0 m auf den y-Achsen. Die Mittelwerte mehrerer Kondensstreifensequenzen werden über Abschnitte von 30 m, beziehungsweise 60 m berechnet und als Symbole aufgetragen. Für diese Mittelwerte sind Standardabweichungen als Unsicherheiten in x-Richtung ergänzt. Auf den Flughöhen zwischen 9.1 und 9.8 km betragen die mittleren Extinktionskoeffizienten 2.5 km^{-1} für SAF 1 und 1.5 km^{-1} für SAF 2. Die mittleren Extinktionskoeffizienten auf den Höhen zwischen 11.4 und 11.6 km

betragen 0.4 km^{-1} für SAF 1 und 0.6 km^{-1} für SAF 2. Der mittlere Ref 3 Extinktionskoeffizient auf den Höhen zwischen 11.4 und 11.6 km beträgt 1.5 km^{-1} und ist damit um den Faktor 2.5 höher als die mittleren Extinktionskoeffizienten von Kondensstreifen aus den beiden Biotreibstoffgemischen in gleicher Höhe.

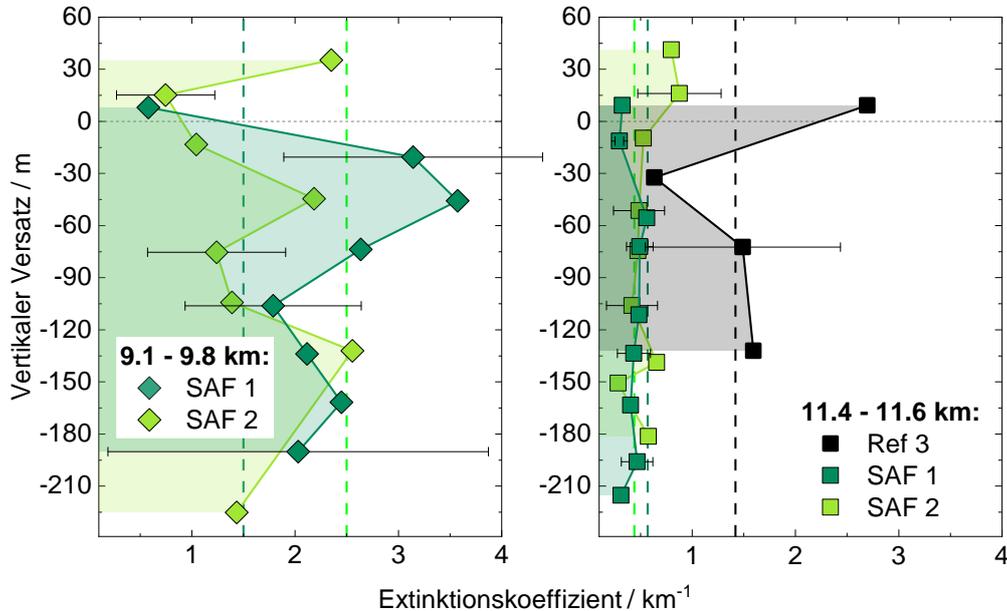


Abbildung 6.7: Extinktionskoeffizienten in einem vertikalen Profil hinter und unterhalb des Quellflugzeugs. Ein vertikaler Versatz von 0 m entspricht der Höhe des Triebwerkauslasses zum Zeitpunkt der Rußemission. Mittelwerte aller Messpunkte sind in gestrichelten Linien dargestellt. Die Unsicherheiten sind ausgewählte Standardabweichungen der Extinktionskoeffizienten innerhalb der 30 m (60 m) Abschnitte.

Optischen Dicke von Kondensstreifen

Aus der Integration der Extinktionskoeffizienten über die vertikale Ausdehnung eines Kondensstreifens folgt die optische Kondensstreifendicke. Die optische Dicke ist ein direktes, dimensionsloses Maß für die Abschwächung, die ein gerade nach unten gerichteter Strahl beim Durchgang durch einen Kondensstreifen erfährt (Wallace und Hobbs, 2006). Die optische Dicke wird oft zur Einordnung der Strahlungswirkung von Kondensstreifen verwendet. Entsprechende Veröffentlichungen von Kondensstreifenbeobachtungen werden in Kapitel 2.1.4 beschrieben.

In Abbildung 6.7 sind die zu integrierenden Flächen für die Berechnung der optischen Dicken farblich markiert. Die Berechnung erfolgt aus einem gemittelten Profil für jede Höhe und jeden Treibstoff. Die berechneten optischen Dicken sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Die eingezeichneten Intervalle in der Abbildung ge-

ben eine Spanne für die optischen Dicken an, die auf den Unsicherheiten in der Bestimmung der tatsächlichen Kondensstreifendicke beruht. Diese Unsicherheit wurde aus der Verteilung der Messsequenzen über der vertikalen Ausdehnung des Kondensstreifens abgeschätzt. Die wenigsten Messsequenzen lagen für den Treibstoff Ref 3 vor. Das führt zu einer erhöhten Unsicherheitspanne in der mittleren optischen Dicke für diesen Treibstoff. Für große Höhen kann eine Reduktion der optischen Dicken durch den Einsatz der beiden Biotreibstoffgemische im Vergleich zu herkömmlichen Kerosin von 40 bis 52% berechnet werden.

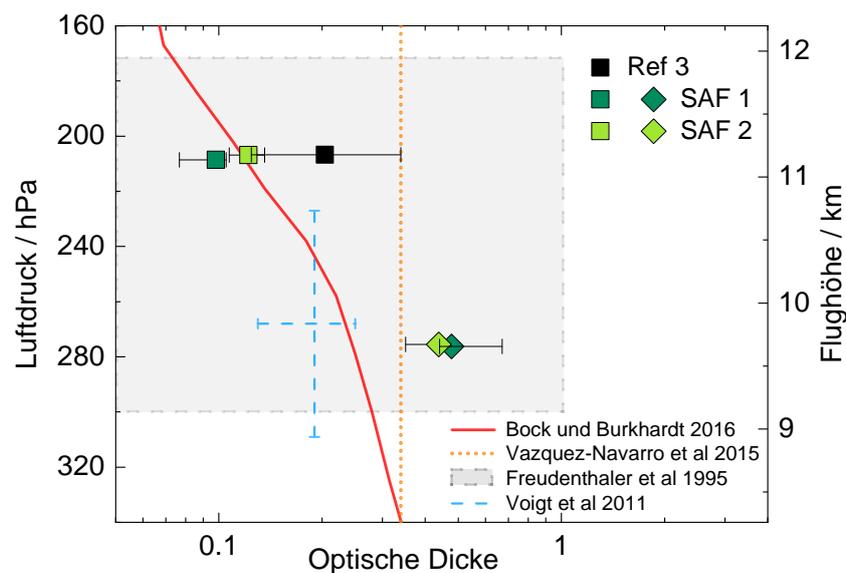


Abbildung 6.8: Zusammenstellung von optischen Kondensstreifendicken in verschiedenen Höhen, die durch Beobachtungen oder Modelle ermittelt wurden. Die berechneten optischen Dicken aus ECLIF II/NDMAX sind mit Symbolen dargestellt. Symboltyp variiert mit Höhe, Symbolfarbe mit Treibstoff. Die eingezeichneten Intervalle beruhen auf den Unsicherheiten in der Bestimmung der tatsächlichen Kondensstreifendicke.

Dabei bewegen sich die optischen Kondensstreifendicken aus den beiden regenerativen Treibstoffgemischen SAF 1 und SAF 2 in ähnlichen Größenordnungen und es ist es nicht möglich, die Tendenzen für die beiden Treibstoffgemische zu differenzieren. SAF 2 hat einen reduzierten Naphthalengehalt gegenüber SAF 1 und es konnte bereits in den Kapiteln 6.1 und 6.2.1 gezeigt werden, dass die Eisemissionsindizes für SAF 2 deutlich reduziert sind. Bei der Berechnung des klimarelevanten Parameters der optischen Dicke werden die Unterschiede zwischen den beiden Treibstoffgemischen geringer und die Unsicherheiten nehmen zu. Der Grund dafür ist, dass eine reduzierte Eiskristallanzahl unter ähnlichen Kondensstreifenbildungsbedingungen zu größeren Eiskristallen führt, da die gleiche Menge Wasserdampf auf weniger Partikeln kondensiert. Dieser Mechanismus kann die optische Dicke in jungen Kondensstreifen kurzfristig beeinflussen. Folglich liegt die Eiskristallanzahl durch die Emission des Flugzeugs fest, aber die

Größen der Eispartikel werden in der weiteren Kondensstreifenentwicklung von den atmosphärischen Bedingungen beeinflusst. Die optische Dicke variiert also während des Lebenszyklus eines Kondensstreifens und nimmt mit der Zeit ab (Unterstrasser und Gierens, 2010; Vázquez-Navarro et al., 2015). Die berechneten optischen Dicken aus flugzeuggetragenen Messungen in Abbildung 6.8 sind eine Momentaufnahme. Letztendlich haben Unterstrasser und Gierens (2010) und Unterstrasser und Görsch (2014) herausgefunden, dass die totale Kondensstreifenextinktion über die gesamte Lebensdauer des Kondensstreifens maßgeblich von der anfänglichen Eiskristallanzahl und nur zweitrangig von der Eiskristallgröße beeinflusst wird. Das selbe gilt für den Strahlungsantrieb der Kondensstreifenzirren (Burkhardt et al., 2018).

In Abbildung 6.8 werden die mittleren optischen Kondensstreifendicken während ECLIF II/NDMAX mit Literaturwerten verglichen (Freudenthaler et al., 1995; Voigt et al., 2011; Vázquez-Navarro et al., 2015; Bock und Burkhardt, 2016). Flugzeuggetragene Beobachtungen sind gestrichelt dargestellt, Satellitenbeobachtungen gepunktet und die Simulationsergebnisse werden mit kompakten Linien eingezeichnet. Die Ergebnisse von Freudenthaler et al. (1995); Voigt et al. (2011) und Vázquez-Navarro et al. (2015) werden in Kapitel 2.1.4 vorgestellt. Bei den Simulationen handelt es sich um Berechnungen mit dem ECHAM5 Modell. Bock und Burkhardt (2016) verwendeten eine Kondensstreifenzirren-Parametrisierung, um die mittlere optische Dicke von Kondensstreifen mit einer optischen Dicke größer als 0.05 in einem vertikalen Profil zu beschreiben. Für die simulierten Kondensstreifen wurde ein Alter von 7.5 Minuten und eine Bildung zwischen 30 und 70°N angenommen.

Die Unterschiede der Werte in Abbildung 6.8 zeigen die Variabilität der individuellen Strahlungswirkung aus Kondensstreifen. Es ist zu erwarten, dass die Werte aus Beobachtungen höher sind als die aus Simulationen (Bock und Burkhardt, 2016), da optisch dicke Kondensstreifen bei flugzeuggetragenen Messungen besser zu erkennen sind als optisch dünne Kondensstreifen und deshalb öfters gemessen werden. Auch sind optisch dicke Kondensstreifen auf Satellitenbildern leichter zu erkennen und zu erfassen. In Modellen werden dagegen auch optisch dünne Kondensstreifen simuliert und fließen in die Berechnung der Mittelwerte ein.

Um Rückschlüsse aus den leicht erhöhten optischen Dicken der während ECLIF II/NDMAX gemessenen Kondensstreifen zu ziehen, ist es wichtig, das Kondensstreifenalter und den gesamten Lebenszyklus zu betrachten. Für optische Dicken von Kondensstreifen, die kleiner als 1 sind, ist der Strahlungsantrieb des Kondensstreifens proportional zu optischen Dicke (Meerkötter et al., 1999). Lee et al. (2021) geben eine konsolidierte Abschätzung des effektiven Strahlungsantriebs von Kondensstreifen mit 57.4 mW m^{-2} an. Die Abschätzungen basieren auf den optischen Dicken aus mehreren globalen Klimamodellen (Burkhardt und Kärcher, 2011; Chen und Gettelman, 2013; Schumann et al., 2015; Bock und Burkhardt, 2016; Bickel et al., 2020). Eine Studie von Gettelman

et al. (2021) berechnet einen ähnlichen effektiven Strahlungsantrieb für Kondensstreifen von 62 mW m^{-2} . Da die optischen Dicken der Kondensstreifen von ECLIF II/NDMAX etwas höher sind als die zugrunde liegenden optischen Dicken der aktuell besten Abschätzung des effektiven Strahlungsantriebs in Lee et al. (2021), ergibt sich auch ein höherer Strahlungsantrieb. Das liegt zum einen an den förderlichen Kondensstreifenbildungsbedingungen während ECLIF II/NDMAX im Januar 2018 und zum anderen an dem frühen Entwicklungsstadium der gemessenen Kondensstreifen.

Kapitel 7

Fazit

In dieser Dissertation wurden Eispartikelmessungen in jungen Kondensstreifen ausgewertet, die während des ECLIF II/NDMAX Flugexperiments durch die Verbrennung von Biotreibstoffgemischen in einem A320 entstanden sind. Der Datensatz ist umfangreich und ermöglicht die Beantwortung von Forschungsfragen (FF) zur Kondensstreifenbildung und -mitigation. Die erste Frage, die Gegenstand dieser Arbeit ist, lautet:

FF1 Welche Zusammenhänge lassen sich aus direkten Messungen junger Kondensstreifen und den atmosphärischen Bedingungen ziehen, unter denen die Kondensstreifen entstanden sind?

In dieser Arbeit werden Partikelgrößenverteilung, Eisemissionsindizes und der Extinktionskoeffizient von jungen Kondensstreifen mit der Feuchte, der Temperatur und dem Druck in der Umgebung in Zusammenhang gesetzt. Erstmals geschieht dies mit Daten aus flugzeuggetragenen Messungen. Es konnte gezeigt werden, dass die Extinktion als Maß für die Abschwächung der Strahlung durch den Kondensstreifen für ein Kondensstreifenalter zwischen 0.5 und 3 Minuten in den mittleren Flughöhen zwischen 9.1 und 9.8 km am größten war. Diese Flughöhen sind typisch für europäische Kurz- und Mittelstreckenflüge. Ein direkter Rückschluss ist, dass der Strahlungsantrieb durch eine Änderung der Flughöhe verändert werden kann. Allerdings kann eine Verringerung des Strahlungsantriebs in großen Flughöhen aufgrund der Komplexität der Kondensstreifenbildungsmechanismen nur konkret im vorliegenden Fall bestätigt werden.

In Flughöhen oberhalb von 11.4 km wurden sehr kleine Eispartikelgrößen gefunden. Der Durchmesser von 30% der Eispartikel war schätzungsweise kleiner als $0.5 \mu\text{m}$, lag also unterhalb der Nachweisgrenze der FFSSP, mit der die Eispartikel gemessen wurden. Diese kleinen Partikel sind auf das niedrige Wasserdampf-Mischungsverhältnis bei gleichzeitig guten Kondensstreifenbildungsverhältnissen zurückzuführen und bewirken in großen Flughöhen niedrige Extinktionskoeffizienten. Unterhalb von 8.2 km wurden Kondensstreifen bei einer Umgebungstemperatur oberhalb der Schmidt-Appleman Temperatur gefunden. Zwar gab es schon ähnliche Messungen (Schumann et al., 2017), aber weder im vorliegenden Umfang, noch in der Genauigkeit. Diese Messungen zeigen die Grenzen

des Schmidt-Appleman Kriteriums, das den Mischungsprozess im Abgasstrahl nicht als hochgradig turbulent abbildet, sondern stark vereinfacht. Werden die Ungleichgewichtsprozesse im Abgasstrahl in den Vorhersagemodellen nicht abgebildet, könnten dadurch Fehler in der globalen Abschätzung der Klimawirkung von Kondensstreifen entstehen.

Durch die parallele Messung von Eis und Ruß, welcher in diesem Fall auch Rußresiduen aus Eiskristallen beinhaltet, ist während ECLIF II/NDMAX eine innovative Messung gelungen. Es konnte so gezeigt werden, dass die Nukleation von Eis in diesem Fall hauptsächlich auf Ruß stattfand. Andere ultra-feine, wässrige Aerosolpartikel wie wässrige Schwefelsäure kommen nach den Erkenntnissen, die hier vorgestellt wurden, nicht zum Tragen. Für die Daten aus zwei Messflügen während ECLIF II/NDMAX wurde in dieser Arbeit berechnet, wie viele Rußpartikel abhängig von der Umgebungstemperatur in Eiskristalle aktiviert wurden. Der Rußaktivierungsanteil wird in aktuellen Modellen oft vereinfacht durch eine Nukleationsfunktion parametrisiert (Schumann, 2012; Kärcher et al., 2015; Bier und Burkhardt, 2019). Es gab bisher keine flugzeuggetragenen Messungen, die die Abhängigkeit des Rußaktivierungsanteils von der Temperatur untersucht haben. In dieser Arbeit wird erstmals ein Vergleich der berechneten Aktivierung aus den vorliegenden Messungen mit den verwendeten Nukleationsfunktionen in aktuellen Modellen gezogen. Es besteht eine Diskrepanz zwischen Messungen und Modellen und der Einfluss der Temperatur scheint größer zu sein als erwartet.

Nachdem im ersten Teil der Arbeit auf Fragestellungen zur Grundlagenforschung in der Kondensstreifenbildung eingegangen wurde, ging es im zweiten Teil der Arbeit um das Mitigationspotential durch den Einsatz von Biotreibstoffgemischen:

FF2 Wie stark kann die Klimawirkung von im Reiseflug gemessenen, jungen Kondensstreifen durch den Einsatz von aromatenarmen Biotreibstoffgemischen reduziert werden?

Der Zusammenhang zwischen dem Aromatengehalt in Treibstoffen und den Eisanzahlkonzentrationen von Kondensstreifen wurde bisher nicht direkt im Reiseflug gemessen. In dieser Arbeit wurden für den ECLIF II/NDMAX Datensatz in einem neuen Umfang Eisemissionsindizes von Kondensstreifen aus verschiedenen Treibstoffen berechnet, erstmals auch für unterschiedliche Flughöhen. Durch den Einsatz eines Treibstoffgemisches aus herkömmlichen Kerosin mit 30% pflanzlichem Biotreibstoff in einem A320 konnte eine Reduktion der Eisemissionsindizes bis 74% erreicht werden, abhängig von den Umgebungs- und Triebwerksbedingungen und dem Referenztreibstoff mit dem verglichen wurde. Diese Ergebnisse stimmen mit Rußreduktionen überein, die beim Einsatz regenerativer Treibstoffe zum Beispiel während des ACCESS Experiments im Reiseflug gemessen wurden (Moore et al., 2017). In dieser Arbeit wurde außerdem gezeigt, dass die Eisanzahlkonzentrationen nicht nur vom Aromatengehalt in den Treibstoffen abhängen, sondern auch von einem bestimmten Aromatentyp, dem

Naphthalen. Naphthalen verringert im Treibstoff den Wasserstoffgehalt und das Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff und wirkt besonders rußbildend. Bei ähnlichem Aromatengehalt konnten die Eisemissionsindizes durch eine Reduktion des Naphthalengehalts von 0.61 auf 0.05 Vol.-% um 20% reduziert werden.

Bei der Bewertung der Klimawirkung muss das Alter der Kondensstreifen berücksichtigt werden. Die flugzeuggetragenen Messungen liefern nur eine Momentaufnahme zu einem relativ frühen Zeitpunkt im Lebenszyklus der Kondensstreifen. Daraus lässt sich nur begrenzt ein Bild über die weitere Entwicklung des Kondensstreifen ableiten. Aus dem Profil der Extinktionskoeffizienten wurde für die jungen Kondensstreifen die optische Dicke berechnet. Hier lies sich in großen Flughöhen durch den Einsatz von Biotreibstoffgemischen eine Reduktion von 40 bis 52% nachweisen. Eine Reduktion der optischen Dicke durch einen geringeren Naphthalengehalt im Treibstoff konnte zu diesem frühen Zeitpunkt im Lebenszyklus der Kondensstreifen nicht nachgewiesen werden. Die gemessenen Kondensstreifen lagen insgesamt aufgrund der förderlichen Kondensstreifenbildungsbedingungen während ECLIF II/NDMAX im Januar 2018 in ihrer Klimawirkung leicht über dem Durchschnitt.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass Treibstoffgemische mit einem pflanzlichen Biotreibstoffanteil gut geeignet sind, um die Eiskristallanzahlen und damit die Klimawirkung von Kondensstreifen zu reduzieren.

Kapitel 8

Ausblick

Der folgende Ausblick diskutiert Verbesserungsmöglichkeiten in der Methodik von zukünftigen Kondensstreifenmessungen und in der Anwendung des Schmidt-Appleman Kriteriums. Außerdem wird auf die Rolle von alternativen Treibstoffen in der Luftfahrt eingegangen und die neuen Erkenntnisse in diesem Bereich werden im forschungspolitischen Umfeld diskutiert. Es ist ein zentrales Ergebnis dieser Arbeit, dass das Einmischen von Biotreibstoff und das gezielte Design eines Treibstoffes die Strahlungswirkung von Kondensstreifen in der Zukunft deutlich reduzieren kann.

Messmethoden der Zukunft

Die Methodik zur Kondensstreifenmessung wurde seit den 1980er Jahren ständig weiterentwickelt. Verbesserungspotential liegt bei Laserspektrometern heute vor allem in der elektronischen Hardware und den Lasern. Gerade bei kleinen Messimpulsen, also bei der Messung kleiner Partikel im untersten Mikrometerbereich, spielt elektrisches Rauschen eine Rolle. Durch den Einsatz von zusätzlichen Netzfiltern können unerwünschte Frequenzsignalanteile reduziert werden. Außerdem sollten mittels intelligenter Kabelführung Hoch- und Niedrigspannungen im Instrument separiert und wo möglich abgeschirmte Koaxialkabel eingesetzt werden. Damit kann das Signal-zu-Rausch Verhältnis für die Messung kleiner Partikel mit Durchmessern zwischen 0.1 und 1 μm verbessert werden.

Bei den Lasern geht die Entwicklung in den letzten Jahrzehnten weg von Gaslasern und hin zu Dioden- und Faserlaser (Eichler und Eichler, 2015). In der FFSSP kommt noch ein Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von 632.8 nm zum Einsatz. Für einen Laser dieser Wellenlänge hat der FFSSP-Laser eine relativ niedrige Leistung von 5 mW. Nachteil eines Helium-Neon-Lasers ist sein großer und aufwendiger Aufbau. Außerdem kann er leicht beschädigt werden. In der neueren FCDP ist ein moderner fasergekoppelter Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 785 nm verbaut. Fasergekoppelte Diodenlaser sind wesentlich kleiner und weisen ein genaueres Intensitätsprofil auf als der Helium-Neon-Laser. Neben dem Einsatz moderner elektronischer Bauteile, verspricht die synchrone Verwendung von zwei verschiedenen Wellenlängen zur Umgehung

von Mie-Ambiguitäten weiteres Entwicklungspotential. Bei diesem Konzept sind die oszillierenden Mieverteilungen für verschiedene Wellenlängen zueinander verschoben. Nach Vergleich des Messbereiches aus unterschiedlichen Wellenlängen für denselben Partikel kann die Größenbestimmung eingegrenzt werden, indem nur die Überschneidungen aus den beiden Messungen zur Größenbestimmung verwendet werden. Ein Nachteil für eine Anwendung auf dem Flugzeug ist die zusätzliche Größe und das Gewicht solcher dualen Lasersysteme, da sowohl ein zweiter Laser, als auch zusätzliche dichroitische Kombinatoren, Strahlteiler und die doppelte Anzahl an Detektoren eingesetzt werden müssen. Erste Ansätze für Laserspektrometer mit doppelter Wellenlänge gibt es bereits. Zum Beispiel wurde im Labor ein System mit mehreren Wellenlängen genutzt, um über die Partikelform Aschepartikel von Wassertropfen zu unterscheiden (Jurányi et al., 2015, 2016). Nagy et al. (2007) benutzten ein Spektrometer mit dualer Wellenlänge, um über den Brechungsindex das Material von Aerosolpartikel zu bestimmen. Mit einem mobilen Prototyp wurden bereits Feldmessungen durchgeführt (Nagy et al., 2017).

Auch der Einsatz von Quantensensoren ist mittlerweile möglich. Vorteile von Quantensensoren liegen in ihrer kleinen Größe, der hohen Auflösung, schnellen elektronischen Verarbeitung und Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzung. Flugzeuggetragene Messsystem auf Basis von Quantensensorik müssen jedoch noch entwickelt werden.

Anwendung des Schmidt-Appleman Kriteriums

Das Schmidt-Appleman Kriterium gibt an, ob sich ein Kondensstreifen bei vorliegenden atmosphärischen Bedingungen bildet oder nicht. Dabei spielt besonders die Temperatur eine Rolle, aber auch die relative Feuchte, welche aus dem Wasserdampf-Mischungsverhältnis abgeleitet wird. Das Überschreiten der Wassersättigung ist Voraussetzung für die Bildung der im Anschluss gefrierenden Wassertropfen im Kondensstreifen. Während des ECLIF II/NDMAX Experiments und auch während aller Vorgängerexperimente fanden die Wasserdampfmessungen an Bord des Messflugzeuges statt. Die aus den Messungen abgeleitete relative Feuchte musste auf das Testflugzeug zurückgerechnet werden, um die Kondensstreifenbildung zu beurteilen. Besonders bei Fernfeldmessungen können sich die Umgebungsbedingungen in der Atmosphäre schnell ändern. Daher ist eine gleichzeitige Wasserdampfmessung an Bord des Testflugzeugs in Zukunft sinnvoll.

Des Weiteren geht der Vortriebswirkungsgrad, das Verhältnis aus Nutz- und Verlustleistung im Triebwerk, in die Berechnung der Schmidt-Appleman Temperatur ein. Der Vortriebswirkungsgrad hängt vom Schublevel des Testflugzeugs ab, das mit Flughöhe, Fluggeschwindigkeit und Gewicht variiert. Eine Änderung des Vortriebswirkungsgrads um 0.03 führt zu einer Änderung der Schmidt-Appleman Temperatur um 1 K. Für die exakte Berechnung des Vortriebswirkungsgrades sind Triebwerksparameter nötig, die nur dem Hersteller bekannt sind: Neben-

stromverhältnis, Schubverhältnis und Einlass-, bzw. Auslassgeschwindigkeiten beider Triebwerkströme. In vielen physikalischen und klimatologischen Studien wird ein pauschaler Wert als Vortriebswirkungsgrad für einen Flugzeugtyp angenommen. In dieser Arbeit wurde der Vortriebswirkungsgrad nach der Methode Poll und Schumann (2020a) und Poll und Schumann (2020b) berechnet und damit für den Grenzfall der Kondensstreifenbildung möglichst genau bestimmt. In Zukunft sollte der Vortriebswirkungsgrad in jedem Schubfall über den gesamten Messflug ermittelt werden. Dazu müssen gegebenenfalls Herstellerangaben ergänzt oder Datenbanken für die Flugzeugleistungsparameter herangezogen werden.

Luftfahrttreibstoffe der Zukunft

Diese Arbeit zeigt, welches Potential in Biotreibstoffgemischen für die Kondensstreifenmitigation steckt. Da Kondensstreifen mehr als die Hälfte des effektiven Strahlungsantriebs aus dem Luftverkehr ausmachen, hat die Reduzierung der Kondensstreifen insgesamt einen großen Effekt. Dieser Effekt ist außerdem schnell umsetzbar, da Kondensstreifen nur eine relativ kurze Lebensdauer von mehreren Stunden haben. Die Kondensstreifenmitigation ist also eine unmittelbare Lösung zur Reduzierung der luftverkehrsbedingten Klimawirkung. Es gibt drei besonders wichtige Erkenntnisse aus dieser Arbeit, die zur Anwendung gebracht werden können:

Erstens kann allein das Beimischen von Biotreibstoff zu Kerosin Kondensstreifen schon stark reduzieren. Vor dem Hintergrund, dass weltweit noch wenig Biotreibstoff verfügbar ist, kann eine Umstellung der Treibstoffe in der Luftfahrtindustrie über eine Beimischung langsam erfolgen. Die EU fördert die Beimischung von Biotreibstoffen zu Luftfahrtkraftstoffen im Green Deal (Europäische Kommission, 2021). Die Produktionskapazitäten für Biotreibstoffe sollen hochgefahren und an EU-Flughäfen steigende Biotreibstoffmengen zu Verfügung gestellt werden. Wichtig ist es zu vermeiden, dass für die Biotreibstoffproduktion Ressourcen der Lebensmittelproduktion herangezogen werden.

Zweitens kann der Einsatz von Biotreibstoffen zunächst auf Gebiete mit einem hohen Risiko für Kondensstreifenausbrüche begrenzt werden. Zu der Erkenntnis, dass einige wenige Kondensstreifenausbrüche einen großen prozentualen Anteil an der gesamten Klimawirkung haben, trugen vor allem großskalige oder globale Simulation von Teoh et al. (2020) und Burkhardt et al. (2018) bei. Aber auch in dieser Arbeit wird sichtbar, wie stark die Kondensstreifenbildung von den Umgebungsbedingungen abhängt. Der Flugsicherungsdienstleister Maastricht Upper Area Control führt im Jahr 2021 gemeinsam mit dem DLR eine Machbarkeitsstudie zur Kondensstreifenvermeidung durch, bei der Modelle zur Kondensstreifenvorhersage im laufenden Betrieb getestet werden (MUAC und DLR, 2021). Bei ausreichend genauer Vorhersage kann ein gezielter Einsatz von Biotreibstoffen auf betroffenen Flugrouten einen großen Effekt haben.

Drittens wird in dieser Arbeit weltweit erstmals gezeigt, welche Auswirkungen das Design des Treibstoffes generell auf Kondensstreifen haben kann. Die beiden in dieser Arbeit verwendeten Biotreibstoffgemische führen aufgrund ihrer Zusammensetzung zu unterschiedlichen Eisemissionsindizes. Bei gleichem Aromatengehalt ist in einem der Treibstoffgemische der Aromatentyp Naphthalen zusätzlich reduziert. Oftmals ist auch bei herkömmlichen Kerosin Potential zur Verbesserung des Treibstoffes vorhanden, etwa durch eine komplette Entschwefelung oder Reduzierung des Aromaten- und Naphthalengehalts mit Hilfe einer zusätzlichen Hydroprozessierung.

Weitere Forschungsarbeit zu alternativen Treibstoffen ist nötig, um ihre Effekte auf Kondensstreifen und andere Emissionen zu quantifizieren. Es sollte eine Verbrennung von hundertprozentigem Biotreibstoff ohne Aromatengehalt wissenschaftlich untersucht werden. Durch eine gleichzeitige Optimierung von Treibstoff und Triebwerk, zum Beispiel eine Kombination aus Biotreibstoffen und Magerverbrennung, kann der luftverkehrinduzierte Strahlungsantrieb kurzfristig reduziert werden. Langfristig wird zum Beispiel die Wasserstoffverbrennung im Triebwerk eine Rolle spielen. Hier steht die Kondensstreifenforschung noch am Anfang und es muss untersucht werden, wie es zu einer Bildung eines Kondensstreifens in Abwesenheit von Rußpartikelemissionen kommt. Sicher ist, dass sich die Antriebskonzepte in der Luftfahrt verändern werden und diese Arbeit soll in Zukunft als Grundlage für die Beurteilung der Kondensstreifenmitigation durch Treibstoffalternativen dienen.

Abkürzungen

ACARE	Advisory Council for Aviation Research & Innovation Europe
ACCESS	Alternative Fuel Effects on Contrails & Cruise Emissions
AEI	Scheinbarer Emissionsindex
AFRC	Armstrong Flight Research Center
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATRA	Advanced Technology Research Aircraft
BP	The British Petroleum Company
CAS	Cloud and Aerosol Spectrometer
CoCiP	Contrail Cirrus Prediction Model
CONCERT	Contrail and Cirrus Experiment
CPC	Condensation Particle Counter
CRDS	Cavity-Ring-Down Spektrometrie
DC	Douglas Commercial
DLH	Dioden-Laser Hygrometer
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMT	Droplet Measurement Technologies
DOF	Depth of Field
ECA	Evolution Cryotechnique Type A
ECHAM	ECMWF Hamburg Global Atmospheric Circulation Model
ECLIF	Emissions and Climate Impact of Alternative Fuels
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EI	Emissionsindex
ERF	Effective Radiative Forcing
EU	European Union
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation
FCDP	Fast Cloud Droplet Probe
FFSSP	Fast Forward Scattering Spectrometer Probe

HALO	High Altitude and Long Range Research Aircraft
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
IAE	International Aero Engines
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KS	Kondensstreifen
METEOSAT	Meteorological Satellite
ML-CIRRUS	Mid-Latitude Cirrus Clouds: Formation, Lifetime, Properties & Radiative Impact
MUAC	Maastricht Upper Area Control
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDMAX	NASA DLR Multidisciplinary Airborne Experiment
NIST	National Institute of Standards and Technology
NO	Nordosten
NRC Canada	National Research Council of Canada
NSRC	National Suborbital Research Center
nvPM	non-volatile Particulate Matter
NW	Nordwesten
PMS	Particle Measurement Systems
PSD	Particle Size Distribution
PSL	Polystyren-Latex
Ref	Referenztreibstoff
RF	Radiative Forcing
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager
SPECinc	Stratton Park Engineering
SPK	Synthetic Paraffinic Kerosene
SSF	Semi-Synthetic Jet Fuel
TAS	True Air Speed
TRA	Temporary Reserved Area
TSI	Thermo-Systems Engineering Co.
UAP	Ultra-fine Aqueous Particles

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

A	Projizierte Querschnittsfläche
A_k	Kumulierte Querschnittsfläche
D	Mittlerer Durchmesser
$D_{i,max}$	Größter Durchmesser im Größenbereich i
$D_{i,min}$	Kleinster Durchmesser im Größenbereich i
F	Schub
I	Intensität des Lichts
IWC	Eiswassergehalt
K	Transfereffizienz
M	Molare Masse
N	Verdünnungsfaktor
N	Partikelanzahlkonzentration
$N_{Eis,i}$	Eispartikelanzahlkonzentration im Größenbereich i
N_{Eis}	Gesamte Eispartikelanzahlkonzentration
Q	Verbrennungswärme
RH	Relative Feuchte
RHI	Relative Feuchte über Eis
T	Transmissivität
T	Umgebungstemperatur
T_M	Umgebungstemperatur auf der Mischungslinie im Phasendiagramm von Wasser
T_{SA}	Schmidt-Appleman Temperatur
V_m	Molares Volumen
\bar{I}_S	Strahlungsflussdichte
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
d_e	Effektiver Durchmesser
h	Spezifische Enthalpie
m	Atmosphärische Masse
m	Spezifische Masse
n	Partikelanzahl
n	Brechungsindex
$n_{Eis,i}$	Eispartikelanzahl im Größenbereich i

p	Umgebungsdruck
p_i	Partialdruck
r	Seitenverhältnis
r	Radius
v	Fluggeschwindigkeit
x	Größenparameter
z	Vertikale Ausdehnung eines Kondensstreifens

Griechische Symbole

Φ	Strahlungsfluss
β_E	Extinktionskoeffizient
η	Vortriebwirkungsgrad
λ	Wellenlänge
ρ	Dichte
σ	Wirkungsquerschnitt
τ	Optische Dicke eines Kondensstreifens

Indizes

X_A	Absorption
X_E	Extinktion
X_S	Streuung
X_i	Festgelegter Größenbereich in einem Laserspektrometer
X_{CO_2}	Kohlendioxid
X_{Eis}	Eis
X_{H_2O}	Wasser (Wasserdampf)
X_L	Trockene Luft

Abbildungsverzeichnis

2.1	Satellitenaufnahmen von Kondensstreifen über dem Ärmelkanal .	8
2.2	Prozesse der Kondensstreifenbildung	9
2.3	Schmidt-Appleman Kriterium	11
2.4	Vertikale Profile von Eis- und Rußemissionen in Kondensstreifen	13
2.5	Strahlungsantriebe des Luftverkehrs	15
2.6	Ausschnitt Strahlungsantriebe des Luftverkehrs	16
2.7	Übersicht Kondensstreifenmessungen Schumann et al. (2017) . .	18
2.8	Optischen Kondensstreifenparameter während CONCERT	19
2.9	Karten der 2.4 und 0.4 Tage Vorhersage von Kondensstreifen . .	20
2.10	Foto Betankung des A320	21
2.11	HEFA Produktionsprozess	23
2.12	Leindotter Pflanze	24
2.13	Rußemissionsindizes während der ACCESS Flugkampagne	27
2.14	Änderungen der Eispartikeleigenschaften junger Kondensstreifen	28
2.15	Globale Verteilung des Strahlungsantriebs aus Kondensstreifen .	28
2.16	Moraba Rakete mit Kondensstreifen	30
2.17	Größenverteilung Aerosolpartikel Athena II	31
3.1	Streuphasenfunktion der Strahlung um Eispartikel	35
3.2	Streuquerschnitt von Eispartikeln	36
3.3	Streueffizienz von runden Eispartikeln	36
3.4	Foto de FFSSP	38
3.5	Schema der Streulichtdetektion in der FFSSP	39
3.6	Aufnahme der FFSSP ohne Abdeckung	40
3.7	Abtastung der FFSSP Detektor Signale	42
3.8	Versuchsaufbau zur Ausmessung der FFSSP Messfläche	44
3.9	Messfläche der FFSSP	45
3.10	Verteilungen der Signalspannungen bei der Größenkalibration . .	47
3.11	Größenkalibration: Signalspannungen und Streuquerschnitte . . .	48
3.12	Reaktionskurve der Größenkalibration	49
3.13	Foto Steuerbordseitige Tragflügelstation	51
3.14	Korrektur der Anzahlkonzentration für kleine Eispartikel	52
4.1	Position der FFSSP Seitenansicht	56
4.2	Position der FFSSP Frontansicht	56
4.3	Beispiel zur Berechnung des Emissionsindexes	60

5.1	Foto der DC-8 und A320 am 24. Januar 2018	64
5.2	Flugmuster der DC-8	66
5.3	Zeitreihe des Messfluges am 19. Januar 2018	68
5.4	Zeitreihe des Messfluges am 23. Januar 2018	69
5.5	Zeitreihe des Messfluges am 24. Januar 2018	70
5.6	Zeitreihe des Messfluges am 29. Januar 2018	71
5.7	Zeitreihe des Messfluges am 30. Januar 2018	72
5.8	Umgebungsparameter ECLIF II/NDMAX	74
5.9	Extinktion und Partikelgrößenverteilung	76
5.10	Temperaturabhängige Eis- und Rußemissionen	79
5.11	Rußaktivierungsanteil	81
5.12	Rußnukleation Kärcher et al. (2015)	82
5.13	Rußnukleation Bier und Burkhardt (2019)	82
6.1	Emissionsindizes für Treibstoffe aus ECLIF I und II	86
6.2	Eisemissionsindex-Größenverteilung für ECLIF I Treibstoffe . . .	88
6.3	Eisemissionsindizes über Rußemissionsindizes für ECLIF I und II	89
6.4	Treibstoffvergleich Eisemissionsindex	92
6.5	Vertikale Profile des Emissionsindex	93
6.6	Fotos Vorwärtskamera Kondensstreifen	94
6.7	Vertikale Profile des Extinktionskoeffizienten	96
6.8	Optische Kondensstreifendicken	97

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht typischer Treibstoffeigenschaften Lufthansa	25
2.2	Übersicht über bisherige Treibstoffexperimente	26
3.1	Übersicht über die Testpartikel der Größenkalibration	47
3.2	Größenkanäle der FFSSP	50
4.1	Instrumentierung während ECLIF II/NDMAX	55
5.1	Übersicht Treibstoffeigenschaften während ECLIF II/NDMAX	65
5.2	Übersicht über die Messflüge ECLIF II/NDMAX	67
5.3	Bedingungen und Messergebnisse am 24. Januar 2018	77
6.1	Atmosphärische und flugspezifische Parameter ECLIF I und II	87

Literaturverzeichnis

ASTM D7566, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/D7566-20C, 2020.

Airbus: Airbus Global Market Forecast 2019 - 2038, <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>, 2019.

Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, U., Caldeira, K., Matsumoto, K., Munhoven, G., Montenegro, A., und Tokos, K.: Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide, *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 37, 117–134, doi: 10.1146/annurev.earth.031208.100206, 2009.

Baumgardner, D. und Gandrud, B. E.: A comparison of the microphysical and optical properties of particles in an aircraft contrail and mountain wave cloud, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1129–1132, doi: 10.1029/98GL00035, 1998.

Baumgardner, D. und Spowart, M.: Evaluation of the Forward Scattering Spectrometer Probe. Part III: Time Response and Laser Inhomogeneity Limitations, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1990.

Baumgardner, D., Strapp, W., und Dye, J. E.: Evaluation of the Forward Scattering Spectrometer Probe. Part II: Corrections for Coincidence and Dead-Time Losses, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1985.

Baumgardner, D., Dye, J. E., und Gandrud, B. W.: Interpretation of measurements made by the forward scattering spectrometer probe (FSSP-300) during the airborne arctic stratospheric expedition, *J. Geophys. Res.*, 1992.

Baumgardner, D., Jonsson, H., Dawson, W., O'Connor, D., und Newton, R.: The cloud, aerosol and precipitation spectrometer: a new instrument for cloud investigations, *Atmos. Res.*, 59-60, 251–264, doi: 10.1016/S0169-8095(01)00119-3, 13th International Conference on Clouds and Precipitation, 2001.

Baumgardner, D., Abel, S. J., Axisa, D., Cotton, R., Crosier, J., Field, P., Gurganus, C., Heymsfield, A., Korolev, A., Krämer, M., Lawson, P., McFarquhar, G., Ulanowski, Z., und Um, J.: Cloud Ice Properties: In Situ Measurement Challenges, *Meteorol. Monogr.*, 58, 9.1 – 9.23, doi: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-16-0011.1, 2017.

- Bickel, M., Ponater, M., Bock, L., Burkhardt, U., und Reineke, S.: Estimating the Effective Radiative Forcing of Contrail Cirrus, *J. Clim.*, 33, 1991–2005, doi: 10.1175/JCLI-D-19-0467.1, 2020.
- Bier, A. und Burkhardt, U.: Variability in Contrail Ice Nucleation and Its Dependence on Soot Number Emissions, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 3384–3400, doi: 10.1029/2018JD029155, 2019.
- Bock, L. und Burkhardt, U.: Reassessing properties and radiative forcing of contrail cirrus using a climate model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 9717–9736, doi: 10.1002/2016JD025112, 2016.
- Boing: Boing Commercial Market Outlook 2020 – 2039, <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/>, 2020.
- Borrmann, S., Luo, B., und Mishchenko, M.: Application of the T-Matrix method to the measurement of aspherical (ellipsoidal) particles with forward scattering optical particle counters, *J. Aerosol Sci.*, 31, 789–799, 2000.
- Brasseur, G. P., Gupta, M., Anderson, B. E., Balasubramanian, S., Barrett, S., Duda, D., Fleming, G., Forster, P. M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., Halthore, R. N., Jacob, S. D., Jacobson, M. Z., Khodayari, A., Liou, K.-N., Lund, M. T., Miake-Lye, R. C., Minnis, P., Olsen, S., Penner, J. E., Prinn, R., Schumann, U., Selkirk, H. B., Sokolov, A., Unger, N., Wolfe, P., Wong, H.-W., Wuebbles, D. W., Yi, B., Yang, P., und Zhou, C.: Impact of Aviation on Climate: FAA’s Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 97, 561 – 583, doi: 10.1175/BAMS-D-13-00089.1, 2016.
- Brem, B. T., Durdina, L., Siegerist, F., Beyerle, P., Bruderer, K., Rindlisbacher, T., Rocci-Denis, S., Andac, M. G., Zelina, J., Penanhoat, O., und Wang, J.: Effects of Fuel Aromatic Content on Nonvolatile Particulate Emissions of an In-Production Aircraft Gas Turbine, *Environ. Sci. Technol.*, 49, 13 149–13 157, doi: 10.1021/acs.est.5b04167, 2015.
- Brenguier, J.-L., Bourriane, T., Coelho, A., Isbert, J., Peytavi, R., Trevarin, D., und Weschler, P.: Improvements of Droplet Size Distribution Measurements with the Fast-FSSP (Forward Scattering Spectrometer Probe), *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 15, doi: 10.1175/1520-0426(1998)015<1077:IODSDM>2.0.CO;2, 1998.
- Bräuer, T. und Hahn, V.: Reducing Ice Particle Concentrations in Contrails with Biofuels during the NDMAX flight campaign, in: *ONERA DLR Aviation Symposium*, Braunschweig, Mündlicher Vortrag, Gewinner des Preises *The best paper prepared and presented by young scientists*, 2020.
- Bräuer, T., Voigt, C., Kaufmann, S., Sauer, D. N., Schlager, H., Kleine, J., Hahn, V., Scheibe, M., Heckl, C., Jurkat-Witschas, T., Boose, Y., Schimpf, M., Moser,

- M., Huber, F., Shook, M., Moore, R. H., Diskin, G., DiGangi, J., LeClercq, P., und Anderson, B. E.: Airborne Measurements of Ice Particle Concentrations in Contrails from Alternative Fuels, *in: AGU American Geophysical Union Conference*, San Francisco, Postervortrag, 2019.
- Bräuer, T., Voigt, C., Sauer, D., Kaufmann, S., Hahn, V., Scheibe, M., Schlager, H., Diskin, G. S., Nowak, J. B., DiGangi, J. P., Huber, F., Moore, R. H., und Anderson, B. E.: Airborne Measurements of Contrail Ice Properties - Dependence on Temperature and Humidity, *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2020GL092166, 2021a.
- Bräuer, T., Voigt, C., Sauer, D., Kaufmann, S., Hahn, V., Scheibe, M., Schlager, H., Huber, F., Clercq, P. L., Moore, R. H., und Anderson, B. E.: Reduced ice number concentrations in contrails from low aromatic biofuel blends, *Atmos. Chem. Phys.*, akzeptiert, 2021b.
- Bräuer, T., Voigt, C., Sauer, D., Kaufmann, S., Hahn, V., Scheibe, M., Schlager, H., Nowak, J. B., Diskin, G. S., Huber, F., Moore, R., und Anderson, B.: Airborne Contrail Ice Measurements from Biofuel Blends, *in: EAC European Aerosol Conference*, mündlicher Vortrag, 2021c.
- Burkhardt, U. und Kärcher, B.: Global radiative forcing from contrail cirrus, *Nat. Clim. Chang.*, 1, 54–58, doi: 10.1038/nclimate1068, 2011.
- Burkhardt, U., Bock, L., und Bier, A.: Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions, *NPJ Clim. Atmos. Sci.*, 1, 37, doi: 10.1038/s41612-018-0046-4, 2018.
- Cain, J., DeWitt, M. J., Blunck, D., Corporan, E., Striebich, R., Anneken, D., Klingshirn, C., Roquemore, W. M., und Vander Wal, R.: Characterization of Gaseous and Particulate Emissions From a Turboshaft Engine Burning Conventional, Alternative, and Surrogate Fuels, *Energy Fuels*, 27, 2290–2302, doi: 10.1021/ef400009c, 2013.
- Chauvigné, A., Jourdan, O., Schwarzenboeck, A., Gourbeyre, C., Gayet, J. F., Voigt, C., Schlager, H., Kaufmann, S., Borrmann, S., Molleker, S., Minikin, A., Jurkat, T., und Schumann, U.: Statistical analysis of contrail to cirrus evolution during the Contrail and Cirrus Experiment (CONCERT), *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 9803–9822, doi: 10.5194/acp-18-9803-2018, 2018.
- Chen, C.-C. und Gettelman, A.: Simulated radiative forcing from contrails and contrail cirrus, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 12525–12536, doi: 10.5194/acp-13-12525-2013, 2013.
- Chin, J. S. und Lefebvre, A. H.: Influence of Fuel Chemical Properties on Soot Emissions from Gas Turbine Combustors, *Combust. Sci. Technol.*, 73, 479–486, doi: 10.1080/00102209008951664, 1990.
- Ciezki, H., Zhukov, V., Werling, L., Kirchberger, C., Naumann, C., Friess, M., und Riedel, U.: Advanced Propellants for Space Propulsion - A Task within

- the DLR Interdisciplinary Project "Future Fuels", European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), doi: 0.13009/EUCASS2019-276, 2019.
- Darecki, M., Edelstenne, C., Enders, T., Fernandez, E., Herteman, P. H. J.-P., Kerkloh, M., King, I., Ky, P., Mathieu, M., Orsi, G., Schotman, G., Smith, C., und Wörner, J.-D.: Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation, Tech. rep., EUROPEAN COMMISSION: Directorate-General for Research and Innovation, Directorate General for Mobility and Transport, doi: 10.2777/5026, 2011.
- Diskin, G. S., Podolske, J. R., Sachse, G. W., und Slate, T. A.: Open-path airborne tunable diode laser hygrometer, in: Diode Lasers and Applications in Atmospheric Sensing, edited by Fried, A., vol. 4817, pp. 196 – 204, International Society for Optics and Photonics, SPIE, doi: 10.1117/12.453736, 2002.
- Dye, J. E. und Baumgardner, D.: Evaluation of the Forward Scattering Spectrometer Probe. Part I: Electronic and Optical Studies, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1984.
- Eichler, H. J. und Eichler, J.: Laser - Bauformen, Strahlführung, Anwendungen, Springer Vieweg, 8 edn., 2015.
- Ettenreich, R.: Wolkenbildung über einer Feuersbrunst und an Flugzeugabgasen, *Meteorol. Zeitschrift*, 36, 355–356, 1919.
- Europäische Kommission: Verkehr umweltverträglicher machen, <https://ec.europa.eu/info/publications/delivering-european-green-deal.de>, doi: 10.2775/547243, green Deal, 2021.
- Faber, S., French, J. R., und Jackson, R.: Laboratory and in-flight evaluation of measurement uncertainties from a commercial Cloud Droplet Probe (CDP), *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 3645–3659, doi: 10.5194/amt-11-3645-2018, 2018.
- Francis, P. N., Jones, A., Saunders, R., Shine, K., Slingo, A., und Sun, Z.: An observational and theoretical study of the radiative properties of cirrus: Some results from ICE'89, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 120, 809–848, doi: 551.574.13:551.521.325, 1994.
- Freudenthaler, V., Homburg, F., und Jäger, H.: Contrail observations by ground-based scanning lidar: Cross-sectional growth, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 3501–3504, doi: 10.1029/95GL03549, 1995.
- Frömming, C., Marquart, S., Sausen, R., und Lee, D.: The impact of cruise altitude on contrails and related radiative forcing, *Meteorol. Zeitschrift*, 14, 563–572, doi: 10.1127/0941-2948/2005/0048, 2005.
- Gauss, M., Isaksen, I. S. A., Wong, S., und Wang, W.-C.: Impact of H₂O emissions from cryoplanes and kerosene aircraft on the atmosphere, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108, doi: 10.1029/2002JD002623, 2003.

- Gayet, J.-F., Febvre, G., Brogniez, G., Chepfer, H., Renger, W., und Wendling, P.: Microphysical and Optical Properties of Cirrus and Contrails: Cloud Field Study on 13 October 1989, *J. Atmos. Sci.*, 53, 126–138, doi: 10.1175/1520-0469(1996)053<0126:MAOPOC>2.0.CO;2, 1996.
- Gayet, J.-F., Shcherbakov, V., Voigt, C., Schumann, U., Schäuble, D., Jessberger, P., Petzold, A., Minikin, A., Schlager, H., Dubovik, O., , und Lapyonok, T.: The evolution of microphysical and optical properties of an A380 contrail in the vortex phase, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 6629–6643, 2012.
- Gerz, T., Dürbeck, T., und Konopka, P.: Transport and effective diffusion of aircraft emissions, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 103, 25 905–25 913, doi: 10.1029/98JD02282, 1998.
- Gottelman, A., Chen, C.-C., und Bardeen, C. G.: The Climate Impact of COVID-19 Induced Contrail Changes, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2021, 1–17, doi: 10.5194/acp-2021-210, 2021.
- Gierens, K., Kärcher, B., Mannstein, H., und Mayer, B.: Aerodynamic Contrails: Phenomenology and Flow Physics, *J. Atmos. Sci.*, 66, 217–226, doi: 10.1175/2008JAS2767.1, 2009.
- Gierens, K., Ästner, M. K., und Klatt, D. K.: Iridescent aerodynamic contrails: The Norderney case of 27 June 2008, *Meteorol. Zeitschrift*, 20, 305–311, doi: 10.1127/0941-2948/2011/0497, 2011.
- Grewe, V., Gangoli Rao, A., Grönstedt, T., Xisto, C., Linke, F., Melkert, J., Middel, J., Ohlenforst, B., Blakey, S., Christie, S., Matthes, S., und Dahlmann, K.: Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects, *Nature Commun.*, 12, 3841, doi: 10.1038/s41467-021-24091-y, 2021.
- Gössling, S. und Humpe, A.: The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change, *Glob. Environ. Change*, 65, 102 194, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102194, 2020.
- Heymsfield, A. J., Lawson, R. P., und Sachse, G. W.: Growth of ice crystals in a precipitating contrail, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1335–1338, doi: 10.1029/98GL00189, 1998.
- Hinds, W. C.: Aerosol Technology - Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, John Wiley & Sons, Inc., 2 edn., 1999.
- Holzäpfel, F.: Probabilistic Two-Phase Aircraft Wake-Vortex Model: Further Development and Assessment, *J. Aircr.*, 43, 700–708, doi: 10.2514/1.16798, 2006.
- ICAO Annex 16: to the Convention on International Civil Aviation - Environmental Protection - Volume II - Aircraft Engine Emissions, *International Civil Aviation Organization*, 2017.

- IPCC: Summary for Policymakers, book section SPM, Cambridge University Press, im Druck, 2021.
- Irvine, E. A., Hoskins, B. J., und Shine, K. P.: The dependence of contrail formation on the weather pattern and altitude in the North Atlantic, *Geophys. Res. Lett.*, 39, doi: 10.1029/2012GL051909, 2012.
- Iwabuchi, H., Yang, P., Liou, K. N., und Minnis, P.: Physical and optical properties of persistent contrails: Climatology and interpretation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117, doi: 10.1029/2011JD017020, 2012.
- Jeßberger, P., Voigt, C., Schumann, U., Sölch, I., Schlager, H., Kaufmann, S., Petzold, A., Schaeuble, D., und Gayet, J.-F.: Aircraft type influence on contrail properties, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, doi: 10.5194/acp-13-11965-2013, 2013.
- Jensen, E. J., Toon, O. B., Kinne, S., Sachse, G. W., Anderson, B. E., Chan, K. R., Twohy, C. H., Gandrud, B., Heymsfield, A., und Miake-Lye, R. C.: Environmental conditions required for contrail formation and persistence, *J. Geophys. Res.*, pp. 3929–3936, 1998.
- Jurányi, Z., Burtscher, H., Loepfe, M., Nenkov, M., und Weingartner, E.: Dual-wavelength light-scattering technique for selective detection of volcanic ash particles in the presence of water droplets, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 5213–5222, doi: 10.5194/amt-8-5213-2015, 2015.
- Jurányi, Z., Loepfe, M., Nenkov, M., und Burtscher, H.: Multi-angle, dual wavelength scattering measurement chamber for the structural measurement of combustion generated particles, *J. Aerosol Sci.*, 103, doi: 10.1016/j.jaerosci.2016.10.007, 2016.
- Kaltschmitt, M. und Neuling, U., eds.: Biokerosene - Status and Prospects, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-662-53065-8, 2018.
- Kaufmann, S., Voigt, C., Jeßberger, P., Jurkat, T., Schlager, H., Schwarzenboeck, A., Klingebiel, M., und Thornberry, T.: In situ measurements of ice saturation in young contrails, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 702–709, doi: 10.1002/2013GL058276, 2014.
- Kelley, M. C., Nicolls, M. J., Varney, R. H., Collins, R. L., Doe, R., Plane, J. M. C., Thayer, J., Taylor, M., Thuraiajah, B., und Mizutani, K.: Radar, lidar, and optical observations in the polar summer mesosphere shortly after a space shuttle launch, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 115, doi: 10.1029/2009JA014938, 2010.
- Kleine, J., Voigt, C., Sauer, D., Schlager, H., Scheibe, M., Jurkat-Witschas, T., Kaufmann, S., Kärcher, B., und Anderson, B. E.: In Situ Observations of Ice Particle Losses in a Young Persistent Contrail, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 13,553–13,561, doi: 10.1029/2018GL079390, 2018.

- Knollenberg, R. G.: Measurements of the Growth of the Ice Budget in a Persisting Contrail, *J. Atmos. Sci.*, 29, 1367 – 1374, doi: 10.1175/1520-0469(1972)029<1367:MOTGOT>2.0.CO;2, 1972.
- Knollenberg, R. G.: Techniques for probing cloud microstructure, in: In: Clouds - Their formation, pp. 15–89, 1981.
- Korolev, A., Emery, E., und Creelman, K.: Modification and Tests of Particle Probe Tips to Mitigate Effects of Ice Shattering, *J. Atmos. Ocean Tech.*, 30, 690 – 708, doi: 10.1175/JTECH-D-12-00142.1, 2013.
- Kärcher, B.: On the potential importance of sulfur-induced activation of soot particles in nascent jet aircraft exhaust plumes! This paper is dedicated to Professor Peter Fabian on the occasion of his 60th anniversary.1, *Atmos. Res.*, 46, 293–305, doi: 10.1016/S0169-8095(97)00070-7, 1998.
- Kärcher, B.: The importance of contrail ice formation for mitigating the climate impact of aviation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 3497–3505, doi: 10.1002/2015JD024696, 2016.
- Kärcher, B.: Formation and radiative forcing of contrail cirrus, *Nat. Commun.*, 9, 1824, doi: 10.1038/s41467-018-04068-0, 2018.
- Kärcher, B. und Yu, F.: Role of aircraft soot emissions in contrail formation, *Geophys. Res. Lett.*, 36, 1–5, doi: 10.1029/2008GL036649, 2009.
- Kärcher, B., Yu, F., Schröder, F., und Turco, R.: Ultrafine Aerosol Particles in Aircraft Plumes: Analysis of Growth Mechanisms, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2793–2796, doi: 10.1029/98GL02114, 1998.
- Kärcher, B., Burkhardt, U., Bier, A., Bock, L., und Ford, I. J.: The microphysical pathway to contrail formation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 7893–7927, doi: 10.1002/2015jd023491, 2015.
- Kärcher, B., Kleine, J., Sauer, D., und Voigt, C.: Contrail Formation: Analysis of Sublimation Mechanisms, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 13,547–13,552, doi: 10.1029/2018GL079391, 2018.
- Kärcher, B., Mahrt, F., und Marcolli, C.: Process-oriented analysis of aircraft soot-cirrus interactions constrains the climate impact of aviation, *Nature Commun. Earth Environ.*, 2, 113, doi: 10.1038/s43247-021-00175-x, 2021.
- Lance, S.: Coincidence Errors in a Cloud Droplet Probe (CDP) and a Cloud and Aerosol Spectrometer (CAS), and the Improved Performance of a Modified CDP, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 29, 1532–1541, doi: 10.1175/JTECH-D-11-00208.1, 2012.
- Laven, P.: MiePlot, <http://philiplaven.com/mieplot.htm>, version 4.6, 2021.
- Lee, D., Fahey, D., Forster, P., Newton, P., Wit, R., Lim, L., Owen, B., und Sausen, R.: Aviation and global climate change in the 21st century, *Atmospheric Environ.*, 43, 3520–3537, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.024, 2009.

- Lee, D., Fahey, D., Skowron, A., Allen, M., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S., Freeman, S., Forster, P., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R., Lim, L., Lund, M., Millar, R., Owen, B., Penner, J., Pitari, G., Prather, M., Sausen, R., und Wilcox, L.: The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, *Atmospheric Environ.*, p. 117834, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834, 2021.
- Lobo, P., Hagen, D. E., und Whitefield, P. D.: Comparison of PM Emissions from a Commercial Jet Engine Burning Conventional, Biomass, and Fischer–Tropsch Fuels, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 10744–10749, doi: 10.1021/es201902e, pMID: 22043875, 2011.
- Lufthansa: Lufthansa Group Sustainability Report, <https://www.lufthansagroup.com/media/downloads/en/responsibility/LH-sustainability-report-2017.pdf>, 2017.
- McFarquhar, G. M. und Heymsfield, A. J.: The Definition and Significance of an Effective Radius for Ice Clouds, *J. Atmos. Sci.*, 55, 2039–2052, doi: 10.1175/1520-0469(1998)055<2039:TDASOA>2.0.CO;2, 1998.
- Meerkötter, R., Schumann, U., Minnis, P., Doelling, D. R., Nakajima, T., und Tsushima, Y.: Radiative forcing by contrails, *Ann. Geophys.*, 17, 1080–1094, doi: 10.1007/s00585-999-1080-7, 1999.
- Mishchenko, M. I. und Travis, L. D.: T-matrix computations of light scattering by large spheroidal particles, *Opt. Commun.*, 109, 16–21, doi: 10.1016/0030-4018(94)90731-5, 1994.
- Molleker, S.: Charakterisierung von optischen Partikelspektrometern und in-situ Messungen zur Mikrophysik der polaren Stratosphärenwolken, Ph.D. thesis, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2013.
- Moore, R. H., Shook, M., Beyersdorf, A., Corr, C., Herndon, S., Knighton, W. B., Miake-Lye, R., Thornhill, K. L., Winstead, E. L., Yu, Z., Ziemba, L. D., und Anderson, B. E.: Influence of Jet Fuel Composition on Aircraft Engine Emissions: A Synthesis of Aerosol Emissions Data from the NASA APEX, AAFEX, and ACCESS Missions, *Energy & Fuels*, 29, 2591–2600, doi: 10.1021/ef502618w, 2015.
- Moore, R. H., Thornhill, K. L., Weinzierl, B., Sauer, D., D’Ascoli, E., Kim, J., Lichtenstern, M., Scheibe, M., Beaton, B., Beyersdorf, A. J., Barrick, J., Bulzan, D., Corr, C. A., Crosbie, E., Jurkat, T., Martin, R., Riddick, D., Shook, M., Slover, G., Voigt, C., White, R., Winstead, E., Yasky, R., Ziemba, L. D., Brown, A., Schlager, H., und Anderson, B. E.: Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions, *Nature*, 543, 411–415, doi: 10.1038/nature21420, 2017.
- MUAC und DLR: Maastricht Upper Area Control (EUROCONTROL) - Contrail prevention trial, <https://www.eurocontrol.int/article/reducing-impact-non-co2-climate-impact-eurocontrol-muac-and-dlr-partnering-contrail>, 2021.

- Nagel, D., Maixner, U., Strapp, W., und Wasey, M.: Advancements in Techniques for Calibration and Characterization of In Situ Optical Particle Measuring Probes, and Applications to the FSSP-100 Probe, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 24, 745 – 760, doi: 10.1175/JTECH2006.1, 2007.
- Nagy, A., Szymanski, W., Gál, P., Golczewski, A., und Czitrovszky, A.: Numerical and experimental study of the performance of the dual wavelength optical particle spectrometer (DWOPS), *J. Aerosol. Sci.*, 38, 467–478, doi: 10.1016/j.jaerosci.2007.02.005, 2007.
- Nagy, A., Czitrovszky, A., Kerekes, A., Veres, M., und Szymanski, W. W.: Real-Time Determination of Absorptivity of Ambient Particles in Urban Aerosol in Budapest, Hungary, *Aerosol Air Qual. Res.*, 16, 1–10, doi: 10.4209/aaqr.2015.05.0356, 2017.
- Noone, K. J. und Hansson, H.-C.: Calibration of the TSI 3760 Condensation Nucleus Counter for Nonstandard Operating Conditions, *Aerosol Sci. Tech.*, 13, 478–485, doi: 10.1080/02786829008959462, 1990.
- Petzold, A., Busen, R., Schröder, F. P., Baumann, R., Kuhn, M., Ström, J., Hagen, D. E., Whitefield, P. D., Baumgardner, D., Arnold, F., Borrmann, S., und Schumann, U.: Near-field measurements on contrail properties from fuels with different sulfur content, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 102, 29 867–29 880, doi: 10.1029/97JD02209, 1997.
- Podolske, J. R., Sachse, G. W., und Diskin, G. S.: Calibration and data retrieval algorithms for the NASA Langley/Ames Diode Laser Hygrometer for the NASA Transport and Chemical Evolution Over the Pacific (TRACE-P) mission, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108, doi: 10.1029/2002JD003156, 2003.
- Poll, I. und 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, *Aeronaut. J.*, pp. 1–39, doi: 10.1017/aer.2020.62, 2020a.
- Poll, I. und 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, *Aeronaut. J.*, 125, 1–45, doi: 10.1017/aer.2020.124, 2020b.
- Pregger, T., Schiller, G., Cebulla, F., Dietrich, R.-U., Maier, S., Thess, A., Lischke, A., Monnerie, N., Sattler, C., Clercq, P. L., Rauch, B., Köhler, M., Severin, M., Kutne, P., Voigt, C., Schlager, H., Ehrenberger, S., Feinauer, M., Werling, L., Zhukov, V. P., Kirchberger, C., Ciezki, H. K., Linke, F., Methling, T., Riedel, U., und Aigner, M.: Future Fuels—Analyses of the Future Prospects of Renewable Synthetic Fuels, *Energies*, 13, doi: 10.3390/en13010138, 2019.
- Rädel, G. und Shine, K. P.: Radiative forcing by persistent contrails and its dependence on cruise altitudes, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113, doi: 10.1029/2007JD009117, 2008.

- Rella, C. W., Chen, H., Andrews, A. E., Filges, A., Gerbig, C., Hatakka, J., Karion, A., Miles, N. L., Richardson, S. J., Steinbacher, M., Sweeney, C., Wastine, B., und Zellweger, C.: High accuracy measurements of dry mole fractions of carbon dioxide and methane in humid air, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 837–860, doi: 10.5194/amt-6-837-2013, 2013.
- Righi, M., Hendricks, J., und Sausen, R.: The global impact of the transport sectors on atmospheric aerosol: simulations for year 2000 emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 9939–9970, doi: 10.5194/acp-13-9939-2013, 2013.
- Roedel, W. und Wagner, T.: Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2011.
- Rosenberg, P.: Mie Scattering Conversion-Table Generator, p.d.rosenberg@leeds.ac.uk, version 1.1.7, 2013.
- Rossow, C.-C., Wolf, K., und Horst, P.: Handbuch der Luftfahrzeugtechnik, Carl Hanser Verlag München, 2014.
- Sanz-Morère, I., Eastham, S. D., Allroggen, F., Speth, R. L., und Barrett, S.: Effect of contrail overlap on radiative impact attributable to aviation contrails, *Atmos. Chem. Phys.*, pp. 1–62, 2020.
- Schmid, O., Reeves, J. M., Wilson, J. C., Wiedinmyer, C., Brock, C. A., Toohey, D. W., Avallone, L. M., Gates, A. M., und Ross, M. N.: Size-resolved particle emission indices in the stratospheric plume of an Athena II rocket, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108, doi: 10.1029/2002JD002486, 2003.
- Schröder, F., Kärcher, B., Duroure, C., Ström, J., Petzold, A., Gayet, J.-F., Strauss, B., Wendling, P., und Borrmann, S.: On the Transition of Contrails into Cirrus Clouds, *J. Atmos. Sci.*, doi: 10.1175/1520-0469, 2000.
- Schripp, T., Anderson, B., Crosbie, E. C., Moore, R. H., Herrmann, F., Oßwald, P., Wahl, C., Kapernaum, M., Köhler, M., Le Clercq, P., Rauch, B., Eichler, P., Mikoviny, T., und Wisthaler, A.: Impact of Alternative Jet Fuels on Engine Exhaust Composition During the 2015 ECLIF Ground-Based Measurements Campaign, *Environ. Sci. Technol.*, 52, 4969–4978, doi: 10.1021/acs.est.7b06244, 2018.
- Schripp, T., Anderson, B., LeClercq, P., Bauder, U., Corbin, J., Smallwood, G., Lobo, P., Crosbie, E. E., Shook, M., Miake-Lye, R., Yu, Z., Freedman, A., Whitefield, P. D., Robinson, C. E., Achterberg, S. L., Köhler, M., Oßwald, P., Grein, T., Sauer, D., und Voigt, C.: Aircraft Engine Particulate Matter and Gaseous Emissions from Sustainable Aviation Fuels: Results from Ground-based Measurements during the NASA/DLR Campaign ECLIF2/ND-MAX, *Elsevier Fuel*, in Vorbereitung, 2021.
- Schumann, U.: On conditions for contrail formation from aircraft exhausts, *Meteorol. Zeitschrift*, 5, 4–23, doi: 10.1127/metz/5/1996/4, 1996.

- Schumann, U.: A contrail cirrus prediction model, *Geosci. Model Dev.*, 5, 543–58, doi: 10.5194/gmd-5-543-2012, 2012.
- Schumann, U. und Heymsfield, A. J.: On the Life Cycle of Individual Contrails and Contrail Cirrus, *Meteorol Monogr.*, 58, 3.1 – 3.24, doi: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-16-0005.1, 2017.
- Schumann, U., Arnold, F., Busen, R., Curtius, J., Kärcher, B., Kiendler, A., Petzold, A., Schlager, H., Schröder, F., und Wohlfrom, K.-H.: Influence of fuel sulfur on the composition of aircraft exhaust plumes: The experiments SULFUR 1–7, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 107, AAC 2–1–AAC 2–27, doi: 10.1029/2001JD000813, 2002.
- Schumann, U., Mayer, B., Gierens, K., Unterstrasser, S., Jessberger, P., Petzold, A., Voigt, C., und Gayet, J.-F.: Effective Radius of Ice Particles in Cirrus and Contrails, *J. Atmos. Sci.*, 68, 300–321, doi: 10.1175/2010JAS3562.1, 2011.
- Schumann, U., Graf, K., Mannstein, H., und Mayer, B.: Contrails: Visible Aviation Induced Climate Impact, pp. 239–257, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-642-30183-4, 2012.
- Schumann, U., Jeßberger, P., und Voigt, C.: Contrail ice particles in aircraft wakes and their climatic importance, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2867–2872, doi: 10.1002/grl.50539, 2013.
- Schumann, U., Penner, J. E., Chen, Y., Zhou, C., und Graf, K.: Dehydration effects from contrails in a coupled contrail–climate model, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 11 179–11 199, doi: 10.5194/acp-15-11179-2015, 2015.
- Schumann, U., Baumann, R., Baumgardner, D., Bedka, S. T., Duda, D. P., Freudenthaler, V., Gayet, J.-F., Heymsfield, A. J., Minnis, P., Quante, M., Raschke, E., Schlager, H., Vázquez-Navarro, M., Voigt, C., und Wang, Z.: Properties of individual contrails: a compilation of observations and some comparisons, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 403–438, doi: 10.5194/acp-17-403-2017, 2017.
- Schumann, U., Bugliaro, L., Dörnbrack, A., Baumann, R., und Voigt, C.: Aviation Contrail Cirrus and Radiative Forcing Over Europe During 6 Months of COVID-19, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL092771, doi: 10.1029/2021GL092771, e2021GL092771 2021GL092771, 2021a.
- Schumann, U., Poll, I., Teoh, R., Koelle, R., Spinielli, E., Molloy, J., Koudis, G. S., Baumann, R., Bugliaro, L., Stettler, M., und Voigt, C.: Air traffic and contrail changes over Europe during COVID-19: a model study, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 7429–7450, doi: 10.5194/acp-21-7429-2021, 2021b.
- Stevens, M. H., Gumbel, J., Englert, C. R., Grossmann, K. U., Rapp, M., und Hartogh, P.: Polar mesospheric clouds formed from space shuttle exhaust, *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi: 10.1029/2003GL017249, 2003.

- Stevens, M. H., Meier, R. R., Chu, X., DeLand, M. T., und Plane, J. M. C.: Antarctic mesospheric clouds formed from space shuttle exhaust, *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi: 10.1029/2005GL023054, 2005.
- Teoh, R., Schumann, U., Majumdar, A., und Stettler, M. E. J.: Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption, *Environ. Sci. Technol.*, 54, 2941–2950, doi: 10.1021/acs.est.9b05608, 2020.
- Unterstrasser, S.: Large-eddy simulation study of contrail microphysics and geometry during the vortex phase and consequences on contrail-to-cirrus transition, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 7537–7555, doi: 10.1002/2013JD021418, 2014.
- Unterstrasser, S.: Properties of young contrails – a parametrisation based on large-eddy simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 2059–2082, doi: 10.5194/acp-16-2059-2016, 2016.
- Unterstrasser, S. und Gierens, K.: Numerical simulations of contrail-to-cirrus transition – Part 2: Impact of initial ice crystal number, radiation, stratification, secondary nucleation and layer depth, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 2037–2051, doi: 10.5194/acp-10-2037-2010, 2010.
- Unterstrasser, S. und Görtsch, N.: Aircraft-type dependency of contrail evolution, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 14,015–14,027, doi: 10.1002/2014JD022642, 2014.
- Unterstrasser, S., Gierens, K., Sölch, I., und Lainer, M.: Numerical simulations of homogeneously nucleated natural cirrus and contrail-cirrus. Part 1: How different are they?, *Meteorol. Zeitschrift*, 26, 621–642, doi: 10.1127/metz/2016/0777, 2017.
- Vázquez-Navarro, M., Mannstein, H., und Kox, S.: Contrail life cycle and properties from 1 year of MSG/SEVIRI rapid-scan images, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8739–8749, doi: 10.5194/acp-15-8739-2015, 2015.
- Voigt, C., Schumann, U., Jurkat, T., Schaeuble, D., H, S., A, P., Gayet, J.-F., M, K., J, S., S, B., Schmale, J., Jeßberger, P., Hamburger, T., Lichtenstern, M., Scheibe, M., Goubeyre, C., J, M., Kübbeler, M., Frey, W., und A, D.: In-situ observations of young contrails – overview and selected results from the CONCERT campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, doi: 10.5194/acp-10-9039-2010, 2010.
- Voigt, C., Schumann, U., Jessberger, P., Jurkat, T., Petzold, A., Gayet, J.-F., Krämer, M., Thornberry, T., und Fahey, D. W.: Extinction and optical depth of contrails, *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi: 10.1029/2011GL047189, 2011.
- Voigt, C., Schumann, U., Graf, K., und Gottschaldt, K.-D.: Impact of rocket exhaust plumes on atmospheric composition and climate - an overview, doi: 10.1051/eucass/201304657, 2013.

- Voigt, C., Schumann, U., und Graf, K.: Contrail formation in the tropopause region caused by emissions from an Ariane 5 rocket, doi: 10.1051/eucass/201608183, 2016.
- Voigt, C., Schumann, U., Minikin, A., Abdelmonem, A., Afchine, A., Borrmann, S., Boettcher, M., Buchholz, B., Bugliaro, L., Costa, A., Curtius, J., Dollner, M., Dörnbrack, A., Dreiling, V., Ebert, V., Ehrlich, A., Fix, A., Forster, L., Frank, F., Fütterer, D., Giez, A., Graf, K., Grooß, J.-U., Groß, S., Heimerl, K., Heinold, B., Hüneke, T., Järvinen, E., Jurkat, T., Kaufmann, S., Kenntner, M., Klingebiel, M., Klimach, T., Kohl, R., Krämer, M., Krisna, T. C., Luebke, A., Mayer, B., Mertes, S., Molleker, S., Petzold, A., Pfeilsticker, K., Port, M., Rapp, M., Reutter, P., Rolf, C., Rose, D., Sauer, D., Schäfler, A., Schlage, R., Schnaiter, M., Schneider, J., Spelten, N., Spichtinger, P., Stock, P., Walser, A., Weigel, R., Weinzierl, B., Wendisch, M., Werner, F., Wernli, H., Wirth, M., Zahn, A., Ziereis, H., und Zöger, M.: ML-CIRRUS: The Airborne Experiment on Natural Cirrus and Contrail Cirrus with the High-Altitude Long-Range Research Aircraft HALO, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98, 271–288, doi: 10.1175/BAMS-D-15-00213.1, 2017.
- Voigt, C., Kleine, J., Sauer, D., Moore, R. H., Bräuer, T., Clercq, P. L., Kaufmann, S., Scheibe, M., Jurkat-Witschas, T., Aigner, M., Bauder, U., Borrmann, S., Boose, Y., Crosbie, E., Diskin, G. S., DiGangi, J., Hahn, V., Huber, F., Nowak, J. B., Rauch, B., Rapp, M., Robinson, C., Schripp, T., Shook, M., Winstead, E., Ziemba, L., Schlager, H., und Anderson, B. E.: Cleaner burning jet fuels reduce contrail cloudiness, *Nature Commun. Earth Environ.*, doi: 10.1038/s43247-021-00174-y, 2021a.
- Voigt, C., Lelieveld, J., Schlager, H., Schneider, J., Curtius, J., Meerkötte, R., Bugliaro, L., Bohn, B., Erbertseder, T., Groß, S., Li, Q., Mertens, M., Pozzer, A., Sauer, D., Schumann, U., Tomsche, L., Borrmann, S., Bräuer, T., Crowley, J. N., Dörich, R., Dörnbrack, A., Edtbauer, A., Ernle, L., Fischer, H., Giez, A., Granzin, M., Grewe, V., Hahn, V., Harder, H., Heinritzi, M., Henke, R., Holanda, B., Jöckel, P., Kaiser, K., Krüger, O., Lucke, J., Marsing, A., Martin, A., Matthes, S., Pöhlker, C., Pöhlker, M., Pöschl, U., Reifenberg, S., Ringsdorf, A., Scheibe, M., Tadic, I., Williams, J., Zahn, A., Zauner-Wieczorek, M., und Rapp, M.: BLUESKY aircraft mission documents atmospheric composition changes during the Corona lockdown in spring 2020, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, eingereicht, 2021b.
- Wallace, J. M. und Hobbs, P. V.: Atmospheric Science, Elsevier, Amsterdam, 2 edn., 2006.
- Warnatz, J., Maas, U., und Dibble, R. W.: Combustion - Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 4 edn., doi: 10.1007/978-3-540-45363-5, 2006.
- Waterman, P. C.: Matrix formulation of electromagnetic scattering, *Proc. IEEE*, 53, 805–812, doi: 10.1109/PROC.1965.4058, 1965.

- Wendisch, M. und Yang, P.: Theory of Atmospheric Radiative Transfer - A Comprehensive Introduction, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012.
- Wendisch, M., Keil, A., und Korolev, A.: FSSP Characterization with Monodisperse Water Droplets, *J. Atmos. Ocean Technol.*, 13, doi: 10.1175/1520-0426(1996), 1996.
- Wollrab, A.: Aromatische Verbindungen, pp. 196–272, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-642-45144-7, 2014.
- Wong, H.-W. und Miake-Lye, R. C.: Parametric studies of contrail ice particle formation in jet regime using microphysical parcel modeling, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 3261–3272, doi: 10.5194/acp-10-3261-2010, 2010.
- Wong, H.-W., Beyersdorf, A. J., Heath, C. M., Ziemba, L. D., Winstead, E. L., Thornhill, K. L., Tacina, K. M., Ross, R. C., Albo, S. E., Bulzan, D. L., Anderson, B. E., und Miake-Lye, R. C.: Laboratory and modeling studies on the effects of water and soot emissions and ambient conditions on the properties of contrail ice particles in the jet regime, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 10 049–10 060, doi: 10.5194/acp-13-10049-2013, 2013.
- Yang, P., Hong, G., Dessler, A. E., Ou, S. S. C., Liou, K.-N., Minnis, P., und Harshvardhan: Contrails and Induced Cirrus: Optics and Radiation, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 91, 473 – 478, doi: 10.1175/2009BAMS2837.1, 2010.
- Zschoke, A., Scheuermann, S., und Ortner, J.: High Biofuel Blends in Aviation (HBBA), Tech. rep., Deutsch Lufthansa AG and Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe, 2012.

Danksagung

Zuerst möchte ich Prof. Dr. Christiane Voigt danken, die mir 2017 die Chance gab diese Dissertation in ihrer Abteilung Wolkenphysik am Institut für Physik in der Atmosphäre des DLR zu schreiben. Ich habe in den darauf folgenden Jahren viel von ihr gelernt. Danke für alle Entwicklungsmöglichkeiten, Chancen und neuen Erfahrungen und die Geduld.

Außerdem möchte ich mich bei Prof. Dr. Felix Huber bedanken, der mich trotz seiner anspruchsvollen Aufgaben als Direktor des Raumflugbetriebs und Astronautentrainings am DLR als Doktorvater betreut hat und mich immer wieder ermutigt hat über meine Grenzen hinaus zu gehen.

Ein großer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen in der Abteilungen Wolkenphysik, Spurengase und Verkehrsmeteorologie. Durch ihre fachliche und emotionale Unterstützung hat diese Arbeit umso mehr Spaß gemacht. Ich möchte mich besonders bei Valerian Hahn bedanken, der mir mit seiner Hilfsbereitschaft vom ersten Tag an den Einstieg in das Thema erleichtert und mir ein Verständnis für die Messinstrumente vermittelt hat (für Alina, Nils und Valerian: Pseudopodien). Außerdem gilt mein Dank Dr. Stefan Kaufmann, der mit viel Kompetenz die ECLIF II/NDMAX Messkampagne geplant und vorbereitet hat und auch in den Jahren danach eine Unterstützung war. Danke an Dr. Daniel Sauer für seine gelassenen Hilfestellungen zu allen fachlichen Themen. Danke an meinen Vorgänger Dr. Jonas Kleine und an Monika Scheibe und Christopher Heckl für ihre praktische und kollegiale Unterstützung. Danke an Prof. Dr. Ulrich Schumann und Dr. Klaus Gierens für das Teilen ihres großen Wissensschatzes zum Thema Kondensstreifen. Danke an die Kollegen der DLR Flugvorbereitung, der amerikanischen NSRC und dem Institut für Verbrennungstechnik in Stuttgart, die die beiden Flugzeuge während des ECLIF II/NDMAX Experiments vorbereitet und die Treibstoffgemische organisiert und analysiert haben.

Für das Korrekturlesen dieser Arbeit danke ich Dr. Theresa Harlaß, Valerian Hahn, Dr. Stefan Kaufmann, Dr. Tina Jurkat-Witschas und Prof. Dr. Christiane Voigt. Danke außerdem an Winfried Beer und Björn Brötz für ihre Unterstützung bei IT-Problemen und Fragen. Danke an unsere Sekretärinnen Susanne Flierl und Brigitte Ziegele und an Elzbieta Hamerski vom Prüfungsamt, für die netten Gespräche und die organisatorische Unterstützung.

Zum Ende Danke an meine Familie, die mir immer ein verlässlicher Rückhalt ist und ohne die ich nicht da wäre, wo ich heute bin.