

E-Kerosin: Non-CO₂ Effekte und knappe Energieressourcen – Sorgenfrei fliegen?

Strombasiertes Kerosin, Kondensstreifen, Routenoptimierung und globale Energiewende: Eine Bestandsaufnahme

Inhaltsverzeichnis

Sorgenfrei fliegen mit E-Kerosin?	3
Zusammenfassung.....	3
Klimawirkung und Non-CO ₂ -Effekte der Luftfahrt	3
Ergebnis: Ein Klimafaktor von 3 auf das reine CO ₂	5
Wie wirkt sich E-Kerosin auf die Non-CO ₂ -Effekte aus?	5
1. Direkte Reduktion der Emissionen	5
Fazit direkte Emissionsreduktion	6
2. Reduktionspotential durch veränderte Routenführung	6
Voraussetzung: Fortgeschrittene Energiewende	7
Fazit veränderte Routenführung, Klimaneutralität in 2050?	7
Quellen	8

Sorgenfrei fliegen mit E-Kerosin?

Zusammenfassung

Grünes E-Kerosin hat den großen Vorteil, CO₂-neutral zu verbrennen: Aus dem Triebwerk kommt nur so viel CO₂, wie das Kerosin bei seiner Herstellung zuvor der Atmosphäre entzogen hat, zumindest beim atmosfair fairfuel Standard mit CO₂ aus nicht-fossilen Reststoffen oder Direct Air Capture.

Heißt das nun, dass wir mit grünem E-Kerosin heute schon sorgenfrei klimaneutral fliegen können? Leider nein, denn auch E-Kerosin erzeugt noch eine Reihe von anderen Klimaeffekten ähnlich wie fossiles Kerosin. Dazu gehören insbesondere die Bildung von Kondensstreifen und Ozon in großen Flughöhen, die zusammengefasst „Non-CO₂-Effekte“ genannt werden. Diese erwärmen das Klima sogar doppelt so stark wie das reine CO₂ des Kerosins.

Dieses Papier stellt dar, wie E-Kerosin bei den Non-CO₂-Effekten abschneidet. Wir werden sehen, dass E-Kerosin deutlich geringere Non-CO₂-Emissionen aufweist und damit auch deutlich weniger Non-CO₂-Effekte verursacht. Auch wenn die Forschung hier noch keine abschließende Quantifizierung vornimmt, lässt sich grob schätzen, dass die Verwendung von 100% grünem E-Kerosin die Gesamtklimawirkung des Flugverkehrs (CO₂ und Non-CO₂) in etwa halbieren könnte.

Die verbleibenden Kondensstreifen und Ozonbildung und damit in Folge die gesamte Klimawirkung des Flugverkehrs könnten schließlich auf nahe null sinken, wenn zudem die Flugrouten und -höhen optimiert werden. Weil dabei allerdings der Kraftstoffverbrauch steigt, und E-Kerosin deutlich mehr Energie bei seiner Herstellung benötigt als in ihm enthalten ist, wird aus klimapolitischer Sicht abzuwägen sein: In welchem Verhältnis ist der hohe Energieaufwand bei der Herstellung von E-Kerosin zur Knappheit der erneuerbaren Energien angemessen, solange die Energiewende noch nicht abgeschlossen ist?

Grünes E-Kerosin ist damit ein wichtiger Einstieg in klimaschonendes Fliegen und kann richtig angewendet langfristig auch das klimaneutrale Fliegen bringen. So lange gilt: Weniger fliegen ist besser für das Klima.

Klimawirkung und Non-CO₂-Effekte der Luftfahrt

Wir geben hier zunächst eine Kurzübersicht über den Stand der Forschung zu Non-CO₂-Effekten und diskutieren den Einsatz von grünem E-Kerosin.

Wir betrachten die folgenden Non-CO₂-Effekte, die der Luftverkehr verursacht und die den atmosphärischen Strahlungshaushalt beeinflussen. Sie entstehen zusätzlich zu den reinen CO₂-Emissionen, die bei E-Kerosin und fossilem Kerosin gleich sind (3.16 kg CO₂/ kg Kerosin).

- Kondensstreifen: Die heißen, partikelreichen Abgase der Flugzeuge können unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen zur Kondensstreifenbildung führen. Die atmosphärischen Bedingungen für die Kondensstreifenbildung hängen von der Feuchtigkeit und Temperatur der Umgebungsluft und somit auch von der Jahreszeit ab (Yin, et al., 2018). Wenn Kondensstreifen entstehen, werden ihre optischen Eigenschaften (u.a. Reflektivität) und ihre Lebensdauer maßgeblich von der Umgebungsluft und der Anzahl der initialen Eisteilchen bestimmt (Burkhardt, 2018). Diese verhält sich im relevanten Bereich etwa linear zu der Zahl der Partikel im Abgas.

Neben der Lebensdauer und der optischen Beschaffenheit der Kondensstreifen bestimmt auch die Reflektivität des Untergrunds (abhängig von der Beschaffenheit und Farbe des Untergrunds, Fachbegriff: Albedo) und die Tageszeit ihre Klimawirkung. Mittelt man die Klimawirkung der Kondensstreifen über einen längeren Zeitraum und weltweit, so ist diese etwa so stark wie diejenige der CO₂-Emissionen des Flugverkehrs.

- NO_x: Stickoxide wirken sich auf die lokale Ozonkonzentration aus (analog der früheren Ozonsmogbildung in Städten), sowie in einem weiteren Schritt auf die Methankonzentration der Atmosphäre (Methanabbau). Beide Effekte haben entgegengesetzte Klimawirkung (erwärmend und abkühlend), wobei insgesamt die Erwärmungswirkung deutlich überwiegt. Auch hier gilt wie bei den Kondensstreifen als Faustregel, dass die netto-Erwärmungswirkung der Stickoxide von einem Flug insgesamt etwa so stark ist wie diejenige des CO₂ allein.
- Weitere Bestandteile: Wasserdampf führt aufgrund der kurzen Verweildauer in der Atmosphäre nur zu einer geringfügigen Erwärmung. Ruß führt unabhängig vom oben genannten Einfluss auf die Kondensstreifenbildung zu einer Erwärmung, Sulfatverbindungen dagegen wirken abkühlend. Grob betrachtet heben sich die Erwärmungswirkungen dieser Effekte gegenseitig weitgehend auf.

Als Vereinfachung der komplexen dynamischen Prozesse der unterschiedlichen Effekte hat die Forschung sogenannte Metriken eingeführt, die die Klimawirkung der oben aufgeführten Effekte mit der Klimawirkung von reinen CO₂-Emissionen vergleichen.

Die Metriken unterscheiden sich, beispielsweise in der Berücksichtigung der historischen Klimawirkungen oder der Rückkopplung mit dem Klimasystem. Dazu wählt man unter anderem einen Zeithorizont, über den die Klimawirkung betrachtet wird. Für welche Metrik und dazugehörigen Zeithorizont man sich entscheidet, hängt auch von der klimapolitischen Fragestellung ab. Im Rahmen der internationalen Klimapolitik und der Konvention des Kyoto-Protokolls zufolge wird meistens ein Zeithorizont von 100 Jahren angenommen, um die langlebige Wirkung von Gasen wie CO₂ oder Lachgas adäquat zu berücksichtigen.

Das deutsche Umweltbundesamt (UBA) empfiehlt für den Flugverkehr die Metrik *average temperature response (ATR₁₀₀)* über einen Zeitraum von 100 Jahren (Niklaß, et al., 2020). Weiterhin gibt es als allgemein (nicht speziell für en Flugverkehr) etablierte Metrik das *global warming potential (GWP)*, das vom *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* über Zeithorizonte von 20, 50 und 100 Jahren angegeben wird, je nachdem ob kurz- oder langfristige Klimafolgen betrachtet werden sollen. Lee et al. haben 2020 zudem noch das GWP* entwickelt, das nicht mehr die absoluten Effekte von verschiedenen Schadstoffen vergleicht, sondern ihre zeitliche Veränderung. Die Frage beim GWP* lautet also: Wieviel CO₂ müsste der Flugverkehr weltweit ausstoßen, um die gleiche Zunahme der Klimaerwärmung zu erzielen wie durch die Zunahme von z.B. Kondensstreifen zwischen 2000 und 2018?

Tabelle 1 führt diese Metriken für die oben beschriebenen Non-CO₂ Effekte auf. Bezugsgröße ist immer das CO₂, das hier als „Leitgas“ und zur Normierung mit einer Erwärmungswirkung von 1 angegeben ist. Je nach Metrik haben Kondensstreifen und Stickoxide einen Beitrag zur Klimawirkung, der mit dem der CO₂-Emissionen vergleichbar ist (siehe obige „Faustregel“). Wasserdampf, Ruß und Sulfatverbindungen haben eine vergleichsweise geringe und teilweise gegenläufige Wirkung.

	CO ₂	Kondensstreifen	NO _x	H ₂ O	Ruß	SO ₂	Σ	Quelle
Simple ATR ₁₀₀	1.00	1.00	1.2	0.2	N/A	N/A	3.4	(Niklaß, 2020)
GWP* ₁₀₀	1.00	1.77	0.33	0.04	0.02	-0.15	3.0	(Lee, 2020)
GWP ₅₀	1.00	1.09	0.28	0.04	0.02	-0.14	2.3	(Lee, 2020)
GWP ₂₀	1.00	2.32	0.86	0.08	0.04	-0.30	4.0	(Lee, 2020)

Tabelle 1: Vergleich der Metriken für die Klimawirkung des Flugverkehrs

Ergebnis: Ein Klimafaktor von 3 auf das reine CO₂

Insgesamt kommt man so zur Aussage, dass der Flugverkehr in der Summe (CO₂ und Non-CO₂) das Klima dreimal stärker erwärmt (in der Tabelle 3.0 bzw. 3.4) als sein CO₂ allein. Diesen „Faktor 3“ wendet atmosfair daher auf alle CO₂-Emissionen in großen Flughöhen auf die reinen CO₂-Emissionen an, um die Klimawirkung der Non-CO₂-Emissionen zu erfassen.

Wie wirkt sich E-Kerosin auf die Non-CO₂-Effekte aus?

Der Einsatz von synthetischem Kerosin im Luftverkehr beeinflusst die Non-CO₂-Effekte direkt durch eine veränderte Zusammensetzung der Abgase und indirekt durch die Option der Routenführung mit verringerter Klimawirkung. In diesem Abschnitt diskutieren wir dafür hypothetische Szenarien, die den Einsatz von 100% E- Kerosin vorsehen.

1. Direkte Reduktion der Emissionen

Eine vollständige Betankung mit E-Kerosin wirkt sich wie folgt auf die Emissionen aus:

- Der CO₂-Ausstoß sinkt bei grünem E-Kerosin unter dem Strich auf etwa 1% (nur noch Restemissionen aus der Vorkette, z.B. dem Anlagenbau), weil die Herstellung des E-Kerosins zuvor der Atmosphäre dieses CO₂-entzogen hat (Schmidt, et al., 2016).
- Die Partikelemissionen sinken je nach Schätzung um etwa 45% (Lobo, et al., 2011) bis 98% (Blakey, et al., 2010) (Corporan, et al., 2007). Verschiedene Studien mit unterschiedlicher Methodologie (Experimente am Boden oder in der Luft) kommen hier auf eine weite Spanne an Ergebnissen. Für eine genauere Quantifizierung sind weitere Studien notwendig (Gierens, et al., 2016).

Da die Zahl der Eiskerne sublinear von den Partikelemissionen abhängt, führt eine angenommene 45%ige Reduktion der Partikelemissionen zu einer etwa 20%igen Reduktion der Klimawirkung des *radiative forcings* der Kondensstreifen; eine 98%ige Reduktion der Partikelemissionen zu einer etwa 90%igen Reduktion des *radiative forcings* der Kondensstreifen (s. Abbildung 1) (Burkhardt, et al., 2018).

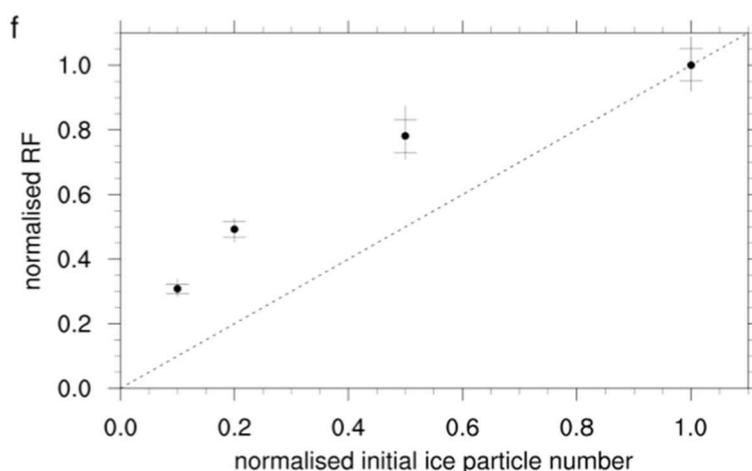


Abbildung 1: Klimawirkung (Strahlungsantrieb, RF) in Abhängigkeit der normalisierten Eispartikelzahl (Burkhardt, et al. 2018).

- Die Stickoxid-Emissionen sinken um bis zu 12 % (Blakey, et al., 2010) und damit auch die Erwärmungswirkung über Ozonbildung.
- Durch den fehlenden Schwefel synthetisch hergestellten E-Kerosin wird eine Reduzierung der Aerosole um einen Faktor 10 angenommen (Braun-Unkhoff et al., 2017)

Fazit direkte Emissionsreduktion

Die Non-CO₂-Effekte des Flugverkehrs werden durch den Einsatz von synthetischem Kerosin also deutlich verringert. Dies liegt am verringerten Partikel- und Stickoxidausstoß. Unter den vereinfachenden Annahmen, dass das E-Kerosin auch in der Vorkette komplett CO₂ frei ist und sich die Reduktion der Emissionsmengen linear auf die Klimawirksamkeit der Non-CO₂-Effekte auswirkt, erhalten wir folgende grobe Abschätzung für die Klimawirkung für den Einsatz von 100% E-Kerosin (Tabelle 2).

	CO ₂	Kondensstreifen	NO _x	Σ
Simple ATR ₁₀₀	1.00	1.00	1.2	3.4
Simple ATR ₁₀₀ , E-Kerosin	0.0	0.10 - 0.80	1.0	1.1 - 1.8
GWP* ₁₀₀	1.00	1.77	0.33	3.0
GWP* ₁₀₀ , E-Kerosin	0.0	0.4 - 1.4	0.3	0.7 - 1.7

Tabelle 2: Stark vereinfachte Grobabschätzung der Klimawirkung von grünem E-Kerosin

Die Wirkungen der Effekte über Wasserdampf, Sulfate und Ruß wurden in dieser Abschätzung vernachlässigt.

Es zeigt sich, dass die Verwendung von 100% E-Kerosin die Gesamtklimawirkung des Flugverkehrs durch die reduzierten Emissionen und nachfolgend Non-CO₂-Effekte deutlich senken würde. Die Klimawirkung könnte sich in diesem Fall geschätzt etwa 50% bis 75% reduzieren. Dies zeigt, dass E-Kerosin auch jenseits der reinen CO₂-Emissionen eine erhebliche Klimaschutzwirkung für den Flugverkehr haben kann. Im nächsten Abschnitt zeigen wir, dass sich dieses Potential durch veränderte Routenführung noch deutlich steigern lässt.

2. Reduktionspotential durch veränderte Routenführung

Zusätzlich zu der direkten Verringerung der Emissionen eröffnet der Einsatz von E-Kerosin weitere Möglichkeiten zur Verringerung der Non-CO₂-Effekte durch Flugroutenoptimierung.

Die Bildung von Kondensstreifen kann minimiert werden, indem Gebiete, in denen sich Kondensstreifen bilden können, umflogen werden. Typischerweise sind die Luftschichten, in denen die Luft kalt und feucht genug ist für die Bildung von dauerhaften Kondensstreifen, nur mehrere hundert Meter dick. Ihr über- oder unterfliegen bedeutet für das Flugzeug, von der optimierten Flughöhe abzuweichen, was den Treibstoffverbrauch und damit die CO₂-Emissionen erhöht. Außerdem weichen diese Routen von der Kosten- und -Zeitoptimierung ab.

Yin et al. finden, dass durch Flugroutenoptimierung die Strecken, auf denen die atmosphärischen Bedingungen für Bildung langlebiger Kondensstreifen erfüllt sind, im Mittel um 40% reduziert werden können, bei einem zeitlichen Mehreinsatz von weniger als 2% (Yin, et al., 2018). Dies zeigt, dass Routenoptimierung auch ohne den Einsatz von E-Kerosin für das Klima erhebliche Erleichterungen bringen kann.

Yamashita et al. fanden bei einer simulierten Optimierung von 100 Transatlantikflügen an einem typischen Wintertag eine Reduktion des ATR₂₀ um etwa zwei Drittel (Yamashita, et al., 2019). Dies entspricht einer nahezu vollständigen Reduktion der Non-CO₂-Effekte, da etwa ein Drittel der Klimawirkung vom CO₂ verursacht wird. Gleichzeitig stieg die Flugzeit in diesem Szenario durch die Umwege um 6% an, aber vor allem der Treibstoffverbrauch um etwa 20%. Dies wäre bei fossilem Kerosin aus Klimaschutzsicht ein erheblicher Nachteil dieses Szenarios. Bei CO₂-neutralem E-Kerosin dagegen entfällt dieser Umweltnachteil.

Nun ist der Nordatlantik generell ein Gebiet, in dem eher Kondensstreifen auftreten können, im Vergleich zur Äquatorregion. Daher können über dem Nordatlantik durch geänderte Flugrouten auch viel Kondensstreifen vermieden werden. Dazu kommt, dass Studien zur Flugroutenoptimierung bisher auf numerischen Simulationen basieren und noch der experimentellen Validierung bedürfen. Zudem ist für eine Optimierung einer realen Flugroute die Kenntnis der genauen Wettersituation notwendig, die aktuell nicht mit dieser Präzision gemessen wird (Grewe, et al., 2017).

Generell wird man auch in Zukunft nicht alle Kondensstreifengebiete umfliegen können, denn alleine beim Steig- und Sinkflug vom bzw. zum Flughafen wird man zeitweise diese Schichten durchstoßen müssen. Allerdings sollten diese unvermeidbaren Resteffekte klein bleiben im Vergleich zu den hier angesprochenen Einsparpotentialen auf längeren Flügen.

Voraussetzung: Fortgeschrittene Energiewende

Die Produktion von E-Kerosin erfordert mit den heute gängigen Verfahren ein mehrfaches der Energiemenge, die später im E-Kerosin enthalten ist. Solange die Energiewende durch den Ausbau von erneuerbaren Energien noch nicht die CO₂-Emissionen der gesamten Wirtschaft auf null gebracht hat, stellt sich die Frage, ob der Einsatz der noch knappen Erneuerbaren Energien für diese ineffiziente Nutzung gerechtfertigt werden kann, wenn sie an anderer Stelle CO₂ um ein Mehrfaches reduzieren können.

Es droht die Gefahr, dass durch die Verwendung von E-Kerosin erneuerbarer Strom an anderer Stelle fehlt. Aus diesem Grund kann nicht einfach gesagt werden, dass für den Klimaschutz eine möglichst schnelle Umstellung auf 100% E-Kerosin und optimierte Routenführung die beste Lösung ist. Stattdessen wird es nötig sein, die Entwicklung von E-Kerosin im Kontext der Entwicklung der Energiewende zu sehen und zu steuern.

Fazit veränderte Routenführung, Klimaneutralität in 2050?

Es zeigt sich, dass durch optimierte Routenführung die verbleibenden Non-CO₂-Effekte von E-Kerosin noch einmal erheblich bis nahezu vollständig reduziert werden können. Diese Erkenntnis basiert allerdings nur auf modellbasierten Szenarienrechnungen. Die dabei anfallenden Mehrverbräuche von Kerosin könnten aus Umweltsicht bei der Verwendung von 100% grünem E-Kerosin in Kauf genommen werden. Dies setzt allerdings voraus, dass die Energiewende so weit fortgeschritten ist, dass keine Knappheit an erneuerbaren Energien herrscht, die dann an anderer Stelle fehlen, wo sie aus Klimaschutzsicht effizienter einsetzbar sind.

Insgesamt dürfte dieses Szenario „klimaneutraler Flugverkehr“ mit den Annahmen

- Flugrouten sind optimiert (was auch erhebliche Veränderungen in den nationalen und internationalen Flugeit- und Sicherheitssystemen erfordert),
- E-Kerosin wird großindustriell hergestellt,
- Die Energiewende ist erfolgreich in einem Stadium ohne erhebliche Knappheit an erneuerbaren Energien,

nicht in den nächsten zwei Dekaden zu erwarten sein. Erst dann wäre es aber gerechtfertigt von „klimaneutralem Fliegen“ zu sprechen.

Quellen

- Blakey, R. & W., 2010. Aviation gas turbine alternative fuels: A review. *Proceedings of the Combustion Institute*, doi: 10.1016/j.proci.2010.09.011.
- Blakey, S., Rye, L. & Wilson, C. W., 2010. Aviation gas turbine alternative fuels: A review. *Proceedings of the Combustion Institute*, doi: 10.1016/j.proci.2010.09.011.
- Braun-Unkshoff, U. Riedel, C. Wahl, 2017. About the emissions of alternative jet fuels. *CEAS Aeronaut J (2017) 8:167–180*
- Burkhardt, B. & B., 2018. Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions. *npj Climate and Atmospheric Science*, doi: 10.1038/s4161-018-0046-4.
- Burkhardt, U., Bock, L. & Bier, A., 2018. Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions. *npj Climate and Atmospheric Science*, doi: 10.1038/s4161-018-0046-4.
- Corporan, D. B. e. a., 2007. Emissions Characteristics of a Turbine Engine and Research Combustor Burning a Fischer-Tropsch Jet Fuel. *Energy & Fuels*, doi: 10.1021/ef070015j.
- Corporan, E. et al., 2007. Emissions Characteristics of a Turbine Engine and Research Combustor Burning a Fischer-Tropsch Jet Fuel. *Energy & Fuels*, doi: 10.1021/ef070015j.
- Gierens, B.-U. L. C. e. a., 2016. Condensation trails from biofuels/kerosene blends scoping study. *European Commission*.
- Gierens, K. et al., 2016. Condensation trails from biofuels/kerosene blends scoping study. *European Commission*.
- Grewe, M. F. e. a., 2017. Feasibility of climate-optimized air traffic routing for trans-Atlantic flights. *Environmental Research Letters*, doi: 10.1088/1748-9326/aa5ba0.
- Grewe, V. et al., 2017. Feasibility of climate-optimized air traffic routing for trans-Atlantic flights. *Environmental Research Letters*, doi: 10.1088/1748-9326/aa5ba0.
- Lee, D. et al., 2020. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric environment (pre-proof)*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.
- Lee, F. S. e. a., 2020. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric environment (pre-proof)*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834 .
- Lobo, H. & W., 2011. *Environmental Science & Technology*, doi: 10.1021/es201902e.
- Lobo, P., Hagen, D. E. & Whitefield, P. D., 2011. Comparison of PM Emissions from a Commercial Jet Engine Burning Conventional, Biomass, and Fischer-Tropsch Fuels. *Environmental Science & Technology*, doi: 10.1021/es201902e.
- Niklaß, D. G. e. a., 2020. Integration of Non-CO2 Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA. *UBA* .
- Niklaß, M. et al., 2020. Integration of Non-CO2 Effects of Aviation in the EU ETS and under CORSIA. *UBA*.
- Schmidt, P. et al., 2016. Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. *UBA*.

Schmidt, W. R. e. a., 2016. Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. *UBA*.

Yamashita, H. et al., 2019. Various aircraft routing options for air traffic simulation in the chemistry-climate model EMAC 2.53: AirTraf 2.0. *Geoscientific Model Development (preprint)*, doi: 10.5194/gmd-2019-331.

Yamashita, Y. G. e. a., 2019. Various aircraft routing options for air traffic simulation in the chemistry-climate model EMAC 2.53: AirTraf 2.0. *Geoscientific Model Development (preprint)*, doi: 10.5194/gmd-2019-331.

Yin, F., Grewe, V., Frömming, C. & Yamashita, H., 2018. Impact on flight trajectory characteristics when avoiding the formation of persistent contrails for transatlantic flights. *Transportation Research Part D*, doi: 10.1016/j.trd.2018.09.017.

Yin, G. F. e. a., 2018. Impact on flight trajectory characteristics when avoiding the formation of persistent contrails for transatlantic flights. *Transportation Research Part D*, doi: 10.1016/j.trd.2018.09.017.