

# D-KULT-Info

Juni 2023

Das Verbundprojekt D-KULT (**D**emonstrator **K**lima- und **U**mweltfreundlicher **L**uft**T**ransport) erprobt Verfahren, um die Klimawirkung des Luftverkehrs durch optimierte Flugtrajektorien zu reduzieren. Ziele sind insbesondere die Entwicklung von Methoden und unterstützenden Tools zur Verminderung von klimawirksamen Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten des Luftverkehrs, z.B. Kondensstreifen-Zirren. Hier ist eine konzertierte Zusammenarbeit von Wetterdienst, Wissenschaft, Flugsicherung und Fluggesellschaften gefragt.

## Mehr als CO<sub>2</sub>

Die Klimawirkung des Luftverkehrs ist nach aktuellem Stand der Wissenschaft deutlich größer als die seiner reinen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Ursache hierfür sind die so genannten Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte, die in vielen anderen Sektoren anthropogener Aktivität auch auftreten. Sie erfahren jedoch beim Luftverkehr eine besondere Aufmerksamkeit, denn sie sind hier im Vergleich zu anderen Sektoren groß. Der Grund hierfür ist, dass der Luftverkehr meist in Höhen emittiert, in denen seine Emissionen anders wirken als am Boden und besonders klimawirksam sind.

Zu den Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten des Luftverkehrs gehören insbesondere Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren. Die Beiträge aufgrund der Stickoxidemissionen sind nicht direkt klimawirksam, führen jedoch zu Veränderungen bei den Treibhausgasen Ozon, Methan und Wasserdampf. Auch die direkten Wasserdampfemissionen der Triebwerke sowie die Emission von Aerosolen und deren Vorläufern weisen eine direkte Strahlungswirkung auf. Außerdem können diese die natürliche Bewölkung modifizieren.

Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte des Luftverkehrs können sowohl wärmend als auch kühlend wirken, wobei der wärmende Effekt überwiegt. Da sie im Vergleich zum CO<sub>2</sub> nur kurze atmosphärische Lebensdauern haben, werden die Effekte nicht gleichmäßig in der

Atmosphäre verteilt. Ihre Klimawirkung hängt deshalb stark von zahlreichen Parametern ab: geographischer Ort, Flughöhe, Zeitpunkt der Emission, lokaler Sonnenstand und Wetterlage. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Klimawirkung des Luftverkehrs durch geeignete Wahl der Flug-Routen und -Höhen (Flugtrajektorien) zu verringern.

## Schwerpunkte

D-KULT untersucht, ob sich solche klimaoptimierten Flugtrajektorien im praktischen Betrieb umsetzen lassen und welche Methoden und Tools hierfür nötig sind. Insbesondere soll Folgendes demonstriert und erprobt werden:

- Langlebige Kondensstreifen sollen durch Eingriffe in der Flugführung vermieden werden.
- Die aktuell genutzten Verfahren zur Planung von Flugtrajektorien sollen um eine Klimaoptimierung erweitert werden.

## Vermeidung langlebiger Kondensstreifen

Die Wasserdampfemissionen des Luftverkehrs führen in hinreichend kalter Atmosphäre zur Bildung von linienförmigen Eiswolken, den Kondensstreifen. Die meisten Kondensstreifen lösen sich innerhalb von wenigen Minuten wieder auf. Bei ausreichend hoher Luftfeuchtigkeit können sie weiter zu langlebigen Kondensstreifen wachsen, die besonders klimawirksam sind.

Um langlebige Kondensstreifen zu vermeiden, benötigt man zunächst eine möglichst genaue Vorhersage der thermodynamischen Bedingungen entlang der Flugtrajektorien. In einem zweiten Schritt müssen Regionen, in denen sich langlebige Kondensstreifen bilden können, vom Luftverkehr gemieden werden. Dies geschieht beispielsweise, indem der Fluglotse einzelne Flugzeuge um diese Gebiete herumführt bzw. ihnen eine andere Flughöhe zuweist. Damit die flüssige Abwicklung des Luftverkehrs nicht beeinträchtigt



# D-KULT

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



DLR DFS Deutsche Flugsicherung

Deutscher Wetterdienst  
Wetter und Klima aus einer Hand



BOEING



PACE



Lufthansa



Lufthansa Systems

AIRBUS

BDL

DHL



wird, dürfen die vertikalen Umleitungen maximal 2000 Fuß (zirka 600 m), betragen. In einem dritten Schritt wird anhand von Satellitenbildern analysiert, ob die Maßnahmen tatsächlich den gewünschten Erfolg bringen.

Dazu werden in einem so genannten Probebetrieb reale Flüge im oberen Luftraum über Deutschland umgeleitet. Der Probebetrieb läuft unter der Prämisse der sicheren, flüssigen und geordneten Abwicklung des Luftverkehrs und soll zeigen, dass sich die Bildung von langlebigen Kondensstreifen tatsächlich vermeiden lässt, indem relevante Gebiete umflogen werden.

### **Klimaoptimierte Planung von Flugtrajektorien**

Derzeit werden Flüge und ihre Flugtrajektorien wenige Stunden vor dem Start so geplant, dass sie im Rahmen der umfangreichen regulatorischen Vorgaben und nach Bedingungen, die von der jeweiligen Fluggesellschaft vorgegeben werden, optimal sind. Die Optimierungsziele sind hierbei z.B. minimale Flugzeit, minimaler Treibstoffverbrauch und/oder minimale Betriebskosten.

Um die Klimawirkung des Luftverkehrs bei der Planung der Flugtrajektorien berücksichtigen zu können, muss man die Beiträge der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte zur Klimaänderung vergleichen können. Hierzu berechnet man aus den individuellen Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten mittels einer geeigneten Metrik die zugeordneten CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Wegen der vergleichbar kurzen atmosphärischen Lebensdauer der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte kann man hier nicht wie beim Pariser Abkommen vorgehen, sondern benötigt eine spezielle Metrik, die auch die zu erwartende Klimawirkung berücksichtigt, wie z.B. der Average Temperature Response.

Basierend auf einer hinreichend genauen Wetterprognose wird nun für jeden Zeitpunkt und für jeden Ort eine Klimakostenfunktion basierend auf CO<sub>2</sub>-Äquivalenten berechnet. Mittels eines Preises für die CO<sub>2</sub>-Äquivalente (analog zum Emissionshandel) können dann die Klimakosten zu den übrigen Kosten eines Fluges addiert werden. Dies ermöglicht die Bestimmung der klimaoptimierten Flugtrajektorien mit den in der Flugplanung etablierten Optimierungsmethoden.

### **Umsetzung für den operationellen Luftverkehr**

Auf der praktischen Umsetzung solcher klimaoptimierter Flugtrajektorien im operationellen Betrieb ruhen große Hoffnungen. D-KULT entwickelt und erprobt dabei Lösungen, um noch bestehende Hindernisse auf dem Weg zu einer tatsächlichen Einführung zu überwinden:

1. Die Bildung langlebiger Kondensstreifen muss so sicher von den Wetterdiensten vorhersagt werden können, dass eine Umleitung des Luftverkehrs tatsächlich zum gewünschten Ergebnis, d.h. der Vermeidung dieser Kondensstreifen führt. Deshalb werden in D-KULT erstmals Umleitungen von realen Flügen innerhalb einer festgelegten Region erprobt und deren Auswirkungen auf Grundlage unabhängiger Messungen bewertet. Eine erfolgreiche Erprobung ist eine zwingende Voraussetzung für eine mögliche operationelle Einführung von klimaoptimierten Flugtrajektorien in größeren Lufträumen.
2. Die Klimawirkung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte muss in die operationellen Tools und Prozesse zur Planung der Flugtrajektorien integriert werden. Hierfür ist ein System erforderlich, das die Klimabeiträge eines Fluges innerhalb der für die Flugplanung verfügbaren Zeit in ausreichender Qualität berechnet. Das wird in

D-KULT erstmals für ein operationelles Flugplanungssystem umgesetzt.

3. Das Fliegen entlang klimaoptimierter Flugtrajektorien führt in der Regel zu einem höheren Treibstoffverbrauch und damit zu höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wir müssen sicher sein, dass dieser Betrag zur Klimaänderung im Mittel über alle Flüge kleiner ist als der Gewinn durch die Reduktion der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte. Auch hierzu wird D-KULT wichtige Beiträge liefern, weitere Forschungsprojekte werden erforderlich sein.
4. Bei einer Umleitung von Flügen im oberen Luftraum muss sichergestellt werden, dass der genehmigte Flugverkehr weiterhin sicher, geordnet und flüssig – also ohne Verzögerung abgewickelt werden kann. Denn die Berücksichtigung von Klimaaspekten bei der Trajektorienwahl kann zu Kapazitätsengpässen im Luftraum führen.

### Förderung

*Das Verbundprojekt D-KULT mit seinen sieben Partnern und seinen fünf assoziierten Partnern wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms gefördert.*

### Weitere Information:

Dr. Sigrun Matthes, DLR; [sigrun.matthes@dlr.de](mailto:sigrun.matthes@dlr.de)

Prof. Dr. Robert Sausen, DLR; [robert.sausen@dlr.de](mailto:robert.sausen@dlr.de)