



Technische  
Universität  
Braunschweig



# Klima und Fliegen – Lösungsansätze aus der Luftfahrtforschung

Herausgeber: Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt

Redaktion: Rolf Radespiel/Enrico Stoll/Peter Horst/Kai Höfner/Christoph Kessler/Lorenz Tichy

<https://doi.org/10.24355/dbbs.o84-202006091218-0>

## **Klima und Fliegen – Lösungsansätze aus der Luftfahrtforschung**

1. Ausgangslage.....	3
1.1. CO <sub>2</sub> -Ausstoß.....	3
1.2. Passagierentwicklung weltweit.....	4
2. Auswirkungen des Flugverkehrs auf die Erdatmosphäre.....	5
3. Neue Technologien zur Minderung der Emissionen und des Energieverbrauchs.....	6
3.1 Technologien am Flugzeug .....	6
3.2 Maßnahmen im Luftverkehrsmanagement.....	8
4. Ethik .....	10
4.1. Verantwortung des Einzelnen .....	10
4.2. Aufklärungsrolle der Ingenieure und Ingenieurinnen .....	10
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	11

# 1. Ausgangslage

## 1.1. CO<sub>2</sub>-Ausstoß

Das Flugzeug gehört aktuell mit einem klimawirksamen CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 201 g pro Personenkilometer zu den Verkehrsmitteln mit relativ starken Auswirkungen auf den Treibhauseffekt der Erdatmosphäre, vgl. die Flottendurchschnittswerte des Jahres 2017.

	Treibhausgase* in g/Pkm	Auslastung	Anmerkungen
<b>Pkw</b>	139	1,5 Pers./Pkw	
<b>Reisebus</b>	32	60 %	berücksichtigt Busse im Gelegenheitsverkehr (z.B. für Klassenfahrten und Kaffeefahrten) und Fernlinienbusse
<b>Eisenbahn, Fernverkehr</b>	36	56 %	basiert auf durchschnittlichem Strom-Mix in Deutschland
<b>Flugzeug</b>	201	82 %	unter Berücksichtigung aller klimawirksamen Effekte des Flugverkehrs (EWF: Emission Weighting Factor=2)
<b>Linienbus</b>	75	21 %	
<b>Eisenbahn, Nahverkehr</b>	60	27 %	
<b>Straßen-, Stadt- und U-Bahn</b>	64	19 %	

\* CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten  
g/Pkm: Gramm pro Personenkilometer

Quelle: TREMOD 5.82  
Umweltbundesamt 13.11.2018

### Abb. 1: Vergleich der durchschnittlichen Emission einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr, Bezugsjahr 2017

Der hohe Zahlenwert von 201 g/Pkm kommt insbesondere durch den direkten Ausstoß der Treibhausgase in die Stratosphäre und die damit verbundene stärkere Klimawirksamkeit zustande. Zusätzlich liegt der Verbrauch bei Kurzstreckenmissionen aufgrund des überproportionalen Energieaufwands beim Start oberhalb des Flottendurchschnitts. Aus diesem Grund ist im Reiseverkehr bei Distanzen von etwa 300 – 1000 km ein Umstieg auf die Bahn mit 36 g CO<sub>2</sub> pro Personenkilometer eine umweltfreundliche Alternative. Ähnliches gilt für den öffentlichen Nahverkehr, der mit 60 – 64 g/km deutlich weniger belastend ist, als ein PKW mit 139 g pro gefahrenem Personenkilometer bei durchschnittlich 1,5 Insassen.

## 1.2. Passagierentwicklung weltweit

Auch wenn der Zuwachs der Passagierzahlen in der Luftfahrt etwas schwankt, so steigt er doch seit den 1970er Jahren im Mittel um mehr als 5 % pro Jahr (siehe Abb. 2). Es gibt keine gesicherten Anhaltspunkte dafür, dass größere Krisen wie wirtschaftliche Einbrüche, militärische Konflikte oder Pandemien hieran grundsätzlich etwas ändern.<sup>1</sup> Während der heutige Luftverkehr nur mit etwa 4 % zu den klima-äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen beiträgt, wird dieser Anteil zukünftig ansteigen, da in anderen Wirtschaftssektoren CO<sub>2</sub>-Einsparungen technisch einfacher möglich sind.

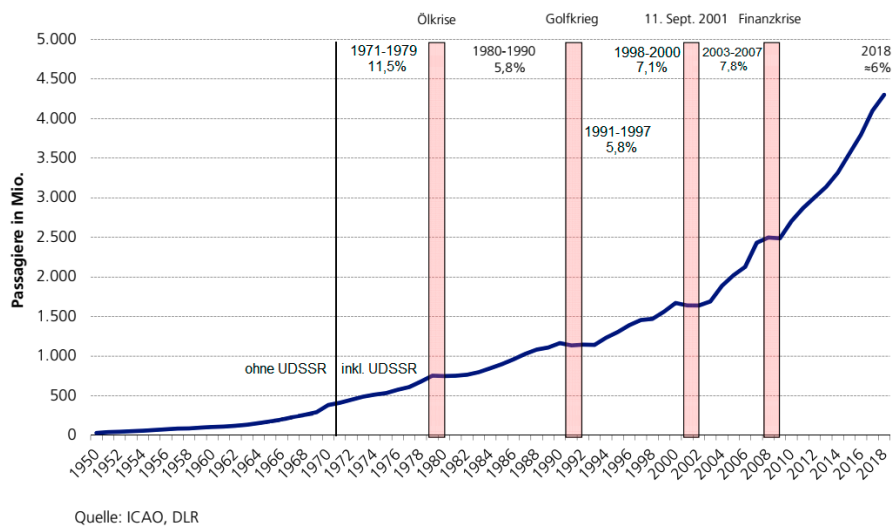


Abb. 2: Entwicklung der weltweiten Passagierzahlen von 1950 bis 2018

<sup>1</sup> Stand Mai 2020 geht die ICAO von einem Corona-bedingten Einbruch des globalen Luftverkehrs um mindestens 39 % aus (Quelle: VDI Nachrichten 15. Mai 2020)

## 2. Auswirkungen des Flugverkehrs auf die Erdatmosphäre

Die vom Flugverkehr verursachten Emissionen haben mehrere Auswirkungen auf die Atmosphäre:

- Generell führt die Emission von CO<sub>2</sub>, Stickoxiden, Kohlenmonoxid, Wasserdampf und Ruß zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre, die wiederum chemischen Reaktionen und Umwandlungsprozessen unterliegen.
- Das Treibhausgas CO<sub>2</sub> führt zu einer Erhöhung des Treibhauseffekts, also der Absorption langwelliger (terrestrischer) Strahlung und somit zu einem Anstieg der Temperatur der Atmosphäre und der Erdoberfläche.
- Ruß in der Atmosphäre führt zu einer zusätzlichen Absorption von Sonnenstrahlung und damit zu einer Erhöhung der Temperatur der Atmosphäre.
- Zusätzlich hat die Entstehung von Zirrus-Wolken durch Wasserdampfemissionen Auswirkungen auf die Strahlungsbilanz. Zirren reflektieren Sonnenstrahlung (abkühlender Effekt) und erhöhen die Absorption von terrestrischer Strahlung (wärmender Effekt).
- Bis auf die generelle Zunahme des CO<sub>2</sub>-Gehalts sind alle Auswirkungen sowohl zeitlich als auch räumlich sehr variabel. Daher hat eine Änderung der Flugrouten und -höhen (Flugtrajektorien) einen Einfluss auf die Klimawirksamkeit der Emissionen

## 3. Neue Technologien zur Minderung der Emissionen und des Energieverbrauchs

### 3.1 Technologien am Flugzeug

Die notwendige Vortriebsleistung der Triebwerke eines Flugzeugs hängt in den wesentlichen Phasen des Fluges maßgeblich vom zu überwindenden, aerodynamischen Widerstand ab. Eine drastische Reduzierung des Widerstands kann damit die Emissionen des Flugantriebs direkt reduzieren. Eine solche Reduzierung führt zu einem positiven „Schneeballeffekt“, weil durch die reduzierte Energiemenge zum Fliegen auch die Treibstoffmasse bzw. Masse von Energiespeichern sinkt und damit wiederum die Strukturmasse (Tanks, Fahrwerk, etc.) und letztlich die Antriebe kleiner ausfallen können. Dies senkt auch die Kosten.

Ohne eingehend alle komplexen Abhängigkeiten bei der Flugzeugauslegung darzustellen, lässt sich zusammenfassen, dass der Widerstand mit folgenden wesentlichen Maßnahmen reduziert werden kann.

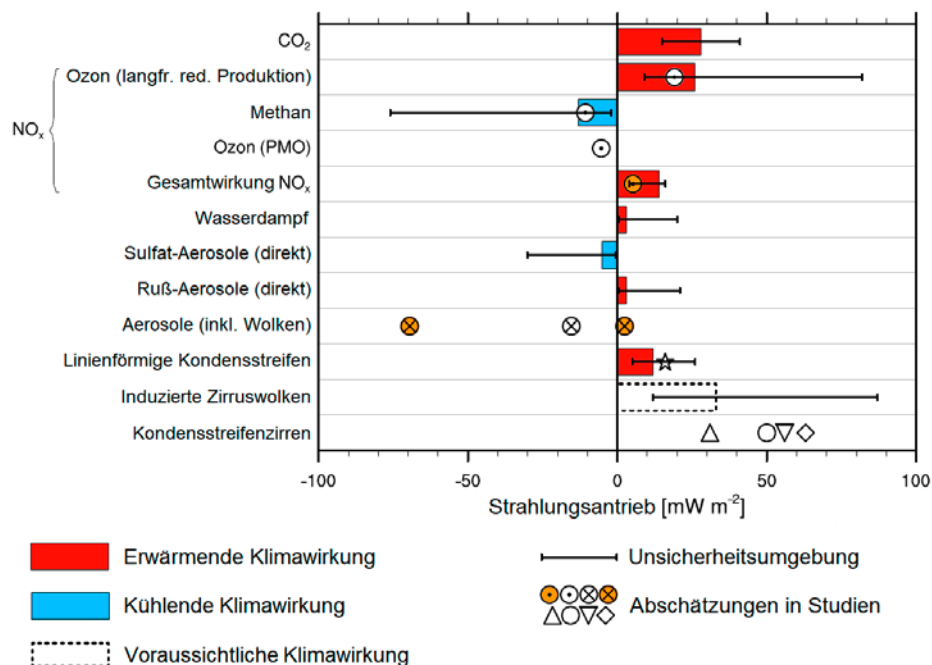
- Passive und aktive Laminarhaltung der Umströmung zur Verminderung der Reibungsverluste an großen Teilen der umströmten Oberfläche des Flugzeugs. Dieses geht unmittelbar in die Reduktion des Widerstandes ein. Forschungsbedarf und Komplexität der technischen Umsetzung sind jedoch hoch. Die langfristigen Potenziale dieser Technologie können mit bis zu 50 % im Kraftstoffverbrauch abgeschätzt werden.
- Der Widerstand eines Verkehrsflugzeugs hängt auch wesentlich vom Auftrieb ab. Der notwendige Auftrieb ist linear von der Masse des Flugzeugs abhängig. Daraus ergibt sich, dass eine Reduktion der Masse des leeren Flugzeuges eine gute Möglichkeit zur Reduktion des zu überwindenden Widerstands ist. Massenreduktion kann durch neue Bauweisen und Funktionsintegration, neue Materialien, sowie die Reduktion der beim Fliegen auftretenden Lasten am Flugzeug erreicht werden. Auch dies kann nicht ohne neue Technologien und Aufwand erreicht werden. Welche Gewichtseinsparungen sich gegenüber dem heutigen Stand der Technik, z.B. einer A350, erzielen lassen, ist abhängig von der Flugzeugmission und den Zulassungsregeln. Die Einsparungen könnten aber langfristig bis zu 40 % des heutigen Primärstrukturgewichts von Rumpf und Flügel betragen. Bezogen auf eine A320 könnte man so etwa 6,8 Tonnen Gewicht sparen, was etwa 1200 Liter Treibstoff auf einem Flug mit mittlerer Dauer bedeutet.
- Man kann den Widerstand weiterhin durch den Übergang auf neue Flugzeugkonfigurationen verringern, z.B. Blended Wing Body, Clean Wing Aircraft und andere. Dieses wurde bisher nicht umgesetzt, da die hierfür erforderlichen, extrem hohen Entwicklungskosten zu große wirtschaftliche Risiken für die Flugzeughersteller bedeuten.

Neben der Reduktion des Luftwiderstands bietet die Entwicklung von nachhaltigen Antriebstechnologien verschiedene Möglichkeiten, Treibhausgasemissionen zu minimieren oder gar vollständig zu vermeiden:

- Wie im Automobilbereich ist auch in der Luftfahrt eine Umstellung auf rein elektrische Flugzeuge im Prinzip möglich. Aufgrund der begrenzten Energiedichte von Batterien mit derzeit bekannten Technologien und der mit Batterien verbundenen Gewichtszunahme der Flugzeuge bietet sich diese Antriebsmöglichkeit aus heutiger Sicht zukünftig nur für Kurzstreckenflüge wie z.B. Inlandsflüge an.
- Für Kurz- und Mittelstrecken besteht zukünftig die Möglichkeit einen hybriden Flugantrieb einzusetzen, bei dem hocheffiziente, elektrische Antriebe für die Schuberzeugung an aerodynamisch günstigen Orten am Flugzeug sorgen. Diese Antriebe werden durch einen treibstoffbetriebenen Generator versorgt. So sind Treibstoffeinsparungen möglich, deren Größe heute mit ungefähr 10 – 20 % eingeschätzt wird.
- Für die Langstrecke sind mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen zur Energieerzeugung für elektrisch betriebene Flugzeuge denkbar. Diese Konzepte stehen aber aufgrund der geringen Dichte des Wasserstoffs und der Komplexität der Integration von Brennstoffzellen mit den nötigen Subsystemen in hochfliegenden Verkehrsflugzeugen noch ganz am Anfang.
- Eine für alle Strecken denkbare Alternative bieten Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen und parallel dazu vollständig synthetisierte Kraftstoffe, die mittels regenerativer Energien aus Wasser und CO<sub>2</sub> gewonnen werden. Beide Ansätze erlauben einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf, indem bei der Gewinnung CO<sub>2</sub> aus der Luft entfernt wird, das später durch die Verbrennung im Triebwerk wieder freigesetzt wird. Bei nachwachsenden Rohstoffen bestehen derzeit keine nachhaltigen Erzeugungsmöglichkeiten, um den Energiebedarf der Luftfahrt zu decken. Die Erzeugung von synthetischem Kerosin ist heute noch drei- bis fünfmal so teuer wie fossiles Kerosin und somit nicht wirtschaftlich. Auch in zukünftigen beispielsweise Wasserstoff-basierten Energiesystemen wird synthetisches Kerosin aufgrund der nötigen Produktionsschritte immer ein sehr teurer Kraftstoff bleiben.
- Die Weiterentwicklung der Technologien für bisherige Flugantriebe bieten in den kommenden Jahren durch weitere Steigerung der Nebenstromverhältnisse bis hin zu nichtummantelten, offenen Rotoren und Propellern noch Potenziale für weitere Treibstoffeinsparungen, die mit 10 – 20 % eingeschätzt werden.

## 3.2 Maßnahmen im Luftverkehrsmanagement

Die Emissionen von heutigen Gasturbinen-Flugtriebwerken sind in Abbildung 3 mit der typischen Wirkung aufgeführt. Nach aktuellen Untersuchungen des DLR kann man zusammenfassend sagen, dass die Klimawirkung in erster Linie auf den CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Ausstoß sowie auf die induzierte Wolkenbildung der Triebwerke zurückzuführen ist. Die Neigung zur Wolkenbildung ist dabei stark von den jeweiligen atmosphärischen Randbedingungen abhängig. Die in großer Höhe entstehenden Zirruswolken reflektieren die von der Erde abgestrahlte Wärme und lassen sie nicht ins Weltall entweichen. Die tatsächliche Klimawirksamkeit von Kondensstreifen und durch Abgas erzeugte Zirruswolken sind noch nicht fundiert abgesichert. Erste Abschätzungen und Modelle deuten aber darauf hin, dass sie einen vergleichbaren oder gar höheren Strahlungsantrieb als CO<sub>2</sub> aufweisen. Abbildung 3 macht zudem durch die horizontalen, schwarzen Balken die relativ großen Unsicherheiten in derzeitigen Prognosen deutlich. Diese Unsicherheiten erlauben einem verantwortungsvollen Menschen allerdings nicht die Schlussfolgerung, dass man sich um die durch Flugzeugemissionen verursachten Klimawirkungen nicht kümmern sollte.



Quelle: Grewe et al., "Mitigating the Climate Impact from Aviation: Achievements and Results of the DLR WeCare Project", Aerospace 2017, MDPI, 2017.

**Abb. 3** Einflüsse unterschiedlicher Emissionen des Luftverkehrs auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre



Die bisherigen Untersuchungen zeigen deutlich, dass sich die Klimawirkung der Zirruswolken durch Anpassung der Flugtrajektorien reduzieren lässt. Untersuchungen des DLR zeigen, dass sich die Klimawirkung der Zirruswolken um bis zu 20 % reduzieren lässt, wenn man für klimaschonende Umwege eine Erhöhung der Kosten für den Flug in Kauf nimmt. Je nach der Entwicklung der Kostenstruktur für Luftverkehrsgesellschaften in der Zukunft könnten die Mehrkosten für klimaschonende Routen bei Langstreckenflügen auch wirtschaftlich gerechtfertigt sein.

Während die Luftverkehrsgesellschaften ihren Betrieb schon heute hinsichtlich der Kosten, des Nutzens für den Kunden, und der Gewährleistung und Verbesserung der Flugsicherheit systematisch optimieren, eröffnen neue Technologien im Luftverkehrsmanagement und die Einführung politisch festgelegter, auf Klimaschutz gerichteter Rahmenbedingungen für die Zukunft weitere Potenziale für die Einsparung von klimaschädlichen Emissionen. Hier sind neben den klimaschonenden Routen bei Langstrecken beispielhaft die Entwicklung von leistungsfähigen Unterstützungssystemen für Piloten und Fluglotsen, die weitere Digitalisierung und Automatisierung zur Optimierung des Flottenbetriebs und die nahtlose Integration des Luftverkehrs in das Gesamtverkehrssystem zu nennen.

## 4. Ethik

### 4.1. Verantwortung des Einzelnen

Die Aussicht auf zukünftig verfügbare technische Lösungen für den klimaneutralen Luftverkehr ist für die Lösung der gegenwärtigen und zukünftigen Probleme des Klimawandels nicht hinreichend. In der Technologieentwicklung wird mit wissenschaftlichen Methoden für einen prognostizierten Bedarf von Güter- und Personentransport in der Zukunft optimiert. Wegen der langen Zyklen der Produktentwicklung in der Luftfahrt wird die effektive Technologieeinführung aber zwei oder sogar drei Dekaden in Anspruch nehmen.

Letztendlich liegt es somit heute in der Verantwortung des Einzelnen zu entscheiden, ob für eine beabsichtigte Reise wirklich geflogen werden muss oder nicht. Die Alternativen sind jedem bekannt und wie oben dargestellt auch meist umweltverträglicher. Sicherlich kann für eine Langstrecke, z.B. eine Reise über den Atlantik nicht auf das Flugzeug verzichtet werden, aber selbst hier ist es möglich, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in eigener Verantwortung zu verringern. So wurden CO<sub>2</sub>-Kompensationsanbieter wie z.B. Atmosfair, Klima-Kollekte und Primaklima von der Stiftung Warentest mit "sehr gut" beurteilt und errechnen ein freiwillig zu bezahlendes Kompensations-Geld je nach CO<sub>2</sub>-Verbrauch des Flugzeugs. Dieses wird dann wiederum in Projekte zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung investiert.

### 4.2. Aufklärungsrolle der Ingenieure und Ingenieurinnen

Die Arbeit von Ingenieuren und Ingenieurinnen zielt grundsätzlich darauf ab, Technologien zu entwickeln, mit denen die Allgemeinheit verantwortungsvoll umgeht. Im VDI-Positionspapier zu den ethischen Grundsätzen des Ingenieurberufs heißt es: "Ingenieurinnen und Ingenieure sind sich der Einbettung technischer Systeme in gesellschaftliche, ökonomische und ökologische Zusammenhänge bewusst und berücksichtigen entsprechende Kriterien bei der Technikgestaltung, die auch die Handlungsbedingungen künftiger Generationen achtet ..."

Natürlich ist es nicht immer möglich, alle gesellschaftlichen Einflüsse oder auch Spätfolgen im Detail abzusehen. Umso wichtiger ist es daher, dass Ingenieurinnen und Ingenieure eine Aufklärungsrolle annehmen, in der sie Risiken abschätzen und diese transparent kommunizieren.


## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Flugzeug gehört aktuell mit einem klimawirksamen CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 201g pro Personenkilometer zu den Verkehrsmitteln, die die Umwelt mit ihren Emissionen sehr belasten. Aus diesem Grund stellt bei Reisen über Distanzen von etwa 300-1000km ein Umstieg auf die Bahn mit 36g CO<sub>2</sub> pro Personenkilometer eine umweltfreundliche Alternative dar.

Die vom Flugverkehr verursachten Emissionen haben dabei mehrere Auswirkungen auf die Atmosphäre. Die Treibhausgase CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> führen zu einer Erhöhung des Treibhauseffekts, während Ruß in der Atmosphäre zu einer zusätzlichen Absorption von Sonnenstrahlung und damit zu einer Erhöhung der Temperatur der Atmosphäre führt. Wolkenbildung wie Zirren durch Kondensstreifen und zusätzlich induzierter Zirkus tragen nach heutigem Wissen ebenfalls zu einem großen Teil der Klimawirkung durch die Luftfahrt bei.

Aus technischer Sicht existieren eine große Zahl von fundierten Ansätzen, um die schädlichen Emissionen von Verkehrsflugzeugen drastisch zu reduzieren und langfristig einen klimaneutralen Luftverkehr zu verwirklichen. Für die Erforschung bestehen in Braunschweig hervorragende Kompetenzen, die im Niedersächsischen Forschungszentrum für Luftfahrt der TU Braunschweig (NFL) gebündelt sind und den Exzellenzcluster „Sustainable and Energy Efficient Aviation“ (SE<sup>2</sup>A) mit einer langjährigen Finanzierung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft ermöglichen. Der Cluster SE<sup>2</sup>A arbeitet als ein interdisziplinärer Forschungsverbund daran, den Energiebedarf für künftige Verkehrsflugzeuge drastisch zu reduzieren, neue, nachhaltige Ansätze für Energiespeicher und Energiewandlung in Flugzeugen zu erarbeiten und die ökologische Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Luftverkehrssystems ganzheitlich zu bewerten und zu optimieren. Dies erfordert Grundlagenforschung und die kreative und tiefgehende Verfolgung von disruptiven Lösungen, die nur langfristig verwirklicht werden können. Es ist nicht vorstellbar, dass eine Forschungseinrichtung für sich allein diese großen Aufgaben bewältigen kann. Daher haben sich national die TU Braunschweig, die LU Hannover und das DLR im NFL zusammengeschlossen und kooperieren eng miteinander, und die TU Braunschweig ist international in einer strategischen Allianz mit der TU Delft verbunden.

Die in der Luftfahrttechnik zu erarbeitenden Technologien für die Zukunft lösen aber nicht alle Probleme. Vielmehr muss auch der mobile, verantwortungsvolle Nutzer beitragen. Hier ist es schon heute möglich, durch sorgfältige Wahl des Verkehrsmittels den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in Eigenregie zu verringern. Weiterhin eröffnen CO<sub>2</sub>-Kompensationsanbieter die Möglichkeit, zum Ausgleich der unvermeidlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Fernreisen einen individuellen Beitrag zu leisten. Eine besondere Aufgabe in der Zukunftsvorsorge kommt den Ingenieuren und Ingenieurinnen zu. Sie entwickeln Technologien und stellen sie der Allgemeinheit für einen verantwortungsvollen Umgang damit zur Verfügung. Darüber hinaus haben sie die Aufgabe, Gesellschaft und Entscheidungsträger über Technologieaufwand, Technologiefolgen und Risiken aufzuklären.



Herausgeber  
Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt  
Technische Universität Braunschweig  
Hermann-Blenk-Str. 42  
38108 Braunschweig  
Telefon +49 531 391-9821  
nfl@tu-braunschweig.de  
www.tu-braunschweig.de/nfl

Redaktion  
Rolf Radespiel/Enrico Stoll/Peter Horst/Kai Höfner/Christoph Kessler/Lorenz Tichy

