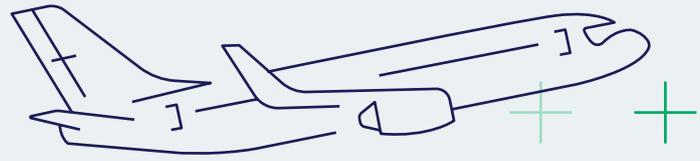


# Klimawirkung der Luftfahrt



## Welche Emissionen entstehen beim Fliegen?

Die Luftfahrt ist derzeit für etwa 3 bis 5 Prozent des globalen anthropogenen Klimawandels verantwortlich. Das klingt zwar wenig, dieser Anteil wird aber voraussichtlich aufgrund des stetigen Wachstums der Branche zukünftig ansteigen. Die Luftfahrt wird insbesondere aufgrund langer Lebens- und Entwicklungszyklen von Luftfahrzeugen, hoher Sicherheitsanforderungen sowie weiterer

Faktoren als besonders anspruchsvoller Sektor für die Defossilisierung betrachtet. Bei schneller fortschreitender Defossilisierung anderer Sektoren steigt der prozentuale Anteil des Luftverkehrs am Klimawandel. Der Einfluss des Flugbetriebs auf unser Klima kann im Kern auf zwei Effekte zurückgeführt werden: Die Klimawirksamkeit des emittierten CO<sub>2</sub> und die Wirkungen der Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### CO<sub>2</sub>-Effekte

Der Mechanismus hinter der Klimabelastung durch CO<sub>2</sub>-Emissionen ist vergleichbar mit dem im bodengebundenen Verkehr: Bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigem Treibstoff entstehen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die den Treibhauseffekt in der Atmosphäre verstärken. Weil seit Beginn der kommerziellen Luftfahrt kontinuierlich Maßnahmen ergriffen wurden, um den Treibstoffverbrauch zu reduzieren, ist dieser im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern pro Personenkilometer eher moderat.

### Nicht CO<sub>2</sub>-Effekte

Etwa 50–70 Prozent der Klimawirkung des Luftverkehrs geht auf Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen zurück. Das liegt primär an der Höhe, in der die Emissionen ausgestoßen werden. Kommerzielle Flüge finden je nach Flugzeugtyp auf einer Höhe zwischen 10 und 15 km in der Tropopause statt und verursachen dort zusätzliche Treibhauseffekte. Die tatsächlichen Auswirkungen variieren mit den atmosphärischen Bedingungen und sind aufgrund der Komplexität der Wirkungszusammenhänge mit vielen Unsicherheiten behaftet.

#### Kondensstreifen und Wolkenbildung

Kondensstreifen sind Eiswolken, die durch Kondensation von Wasserdampf an Kondensationskeimen (z. B. Rußteilchen) entstehen. Kondensstreifen weisen – wie natürliche Wolken auch – eine bedingte Lichtdurchlässigkeit auf. Tagsüber reflektieren Kondensstreifen einerseits Sonnenlicht zurück in den Weltraum und schließen andererseits Wärme über der Erdoberfläche ein. In der Nacht ist kein Sonnenlicht vorhanden, welches reflektiert werden könnte, sodass die Kondensstreifen ausschließlich Wärme über der Erdoberfläche einschließen.

#### NO<sub>x</sub> Stickoxide

Im Luftverkehr entstehen Stickoxide (NO<sub>x</sub>) als unerwünschte Nebenprodukte bei der Verbrennung von Kerosin in Flugzeugtriebwerken. NO<sub>x</sub> ist ein stark reaktives Reizgas, das gesundheitsschädigend für Menschen, Tiere und Pflanzen ist. So führt NO<sub>x</sub> zu saurem Regen, der Boden und Gewässer belastet. NO<sub>x</sub> verringert zudem die Nährstoffverfügbarkeit für Pflanzen und hemmt deren Wachstum. Neben den direkten Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit beeinflussen NO<sub>x</sub>-Emissionen die Ozon-(O<sub>3</sub>)- und Methan-(CH<sub>4</sub>)-Konzentration sowie den stratosphärischen Wasserdampf, was im Mittel zu einer Erwärmung der Atmosphäre führt.

### SO<sub>x</sub> und Ruß- Aerosole

Schwefeloxide (SO<sub>x</sub>) entstehen bei der Verbrennung von schwefelhaltigen Kraftstoffen (z. B. konventionellem fossilem Kerosin). Ruß besteht größtenteils aus Kohlenstoff und ist ein unerwünschtes Nebenprodukt unvollständiger Verbrennungsprozesse kohlenstoffhaltiger Brennstoffe. Aerosolpartikel können die einfallende Sonnenstrahlung streuen und reflektieren und damit kühlend wirken oder sie absorbieren und damit die Wärmeabstrahlung erhöhen. Darüber hinaus wirken sie als Kondensationskeime und führen zu verstärkter Wolken- und Kondensstreifenbildung. Ähnlich wie NO<sub>x</sub> beeinflussen SO<sub>x</sub>-Emissionen nicht nur das Klima, sondern führen auch zu saurem Regen.

### Methan und Ozon

Methan (CH<sub>4</sub>) Emissionen resultieren aus der unvollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen während des Flugbetriebs. CH<sub>4</sub> hat eine wesentlich höhere atmosphärische Treibhauswirkung als CO<sub>2</sub>, obwohl es in geringeren Konzentrationen vorkommt und schneller abgebaut wird. Es absorbiert effizient Infrarotstrahlung und trägt so zur Erwärmung der Atmosphäre bei. Zudem ist CH<sub>4</sub> ein Vorläufer für andere Verbindungen wie Ozon (O<sub>3</sub>) in der Troposphäre, die ihrerseits zur Erwärmung beitragen können.

### H<sub>2</sub>O

Analog zu den bereits beschriebenen Treibhausgasen absorbiert und reflektiert Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) Strahlung und führt so zu einer Erwärmung. H<sub>2</sub>O wird zwar nicht als bedeutender Initialtreiber der Klimaerwärmung gesehen, ist aber durch den Rückkopplungseffekt ein wesentlicher Akteur des Klimawandels. So kann vor allem H<sub>2</sub>O in der Stratosphäre die Wirkung anderer, langlebigerer Treibhausgase um den Faktor zwei bis drei verstärken.

## Wie lassen sich verschiedene Flugemissionen sinnvoll vergleichen?

Die Emissionen beim Fliegen wirken unterschiedlich auf Atmosphäre und Klima. Sie sind abhängig von Randbedingungen wie etwa Temperatur, Druck, Feuchte oder Flughöhe. Zudem variiert ihre Lebensdauer von wenigen Stunden bis hin zu mehreren tausend Jahren. Diese Unterschiede machen einen Vergleich der Klimawirkung so komplex, dass sich ein eigenes Forschungsfeld dafür gebildet hat. Zur Bewertung, Gewichtung und Zusammenfassung verschiedener Treibhausgasemissionen werden Metriken und Klimaindikatoren genutzt.

Insgesamt geht es weniger um das Messen von Emissionen – dies ist relativ präzise möglich – sondern um die Beurteilung der gemessenen Werte hinsichtlich ihrer Wirkung auf Klima und Umwelt. Um Emissionen miteinander vergleichen und bewerten zu können, dienen die vergleichsweise

gut quantifizierbaren CO<sub>2</sub>-Emissionen als Referenz, während übrige Treibhausgasemissionen in "CO<sub>2</sub>-Äquivalente" umgerechnet werden. Dabei werden je nach Metrik unterschiedliche Methoden, Detaillierungsgrade und Betrachtungszeiträume angewendet. Die Ergebnisse können je nach Berechnungsart stark variieren. Aussagen zur Klimaschädlichkeit des Luftverkehrs hängen daher immer wesentlich von der verwendeten Metrik ab.

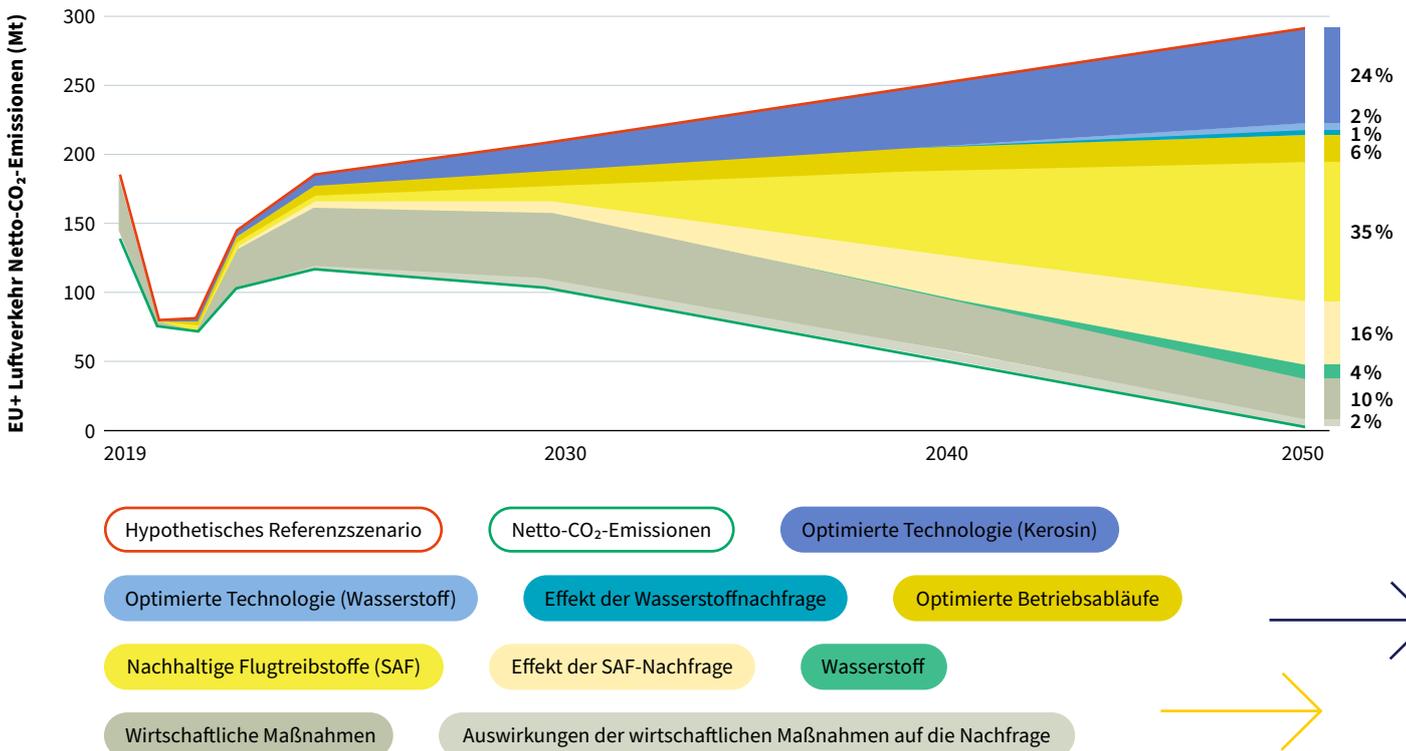
Die Umrechnung in CO<sub>2</sub>-Äquivalente ist essenziell, um Maßnahmen im Luftverkehr zu bewerten. Der Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen, neuen Technologien oder die Anpassung von Flugrouten wirkt sich unterschiedlich auf die einzelnen Emissionen aus. Mit einer gemeinsamen Basis lässt sich aber abwägen, ob die Einsparung der einen Emission die Zunahme einer anderen rechtfertigt.

# Wie kann die Luftfahrt klimaverträglicher werden?

Die Vielfalt der Emissionen im Luftverkehr führt dazu, dass sie nicht mit einem einzigen Ansatz klimafreundlicher gestaltet werden kann – es braucht einen ebenso vielfältigen Lösungsmix. Die Luftfahrt ist zudem eine konservative, sicherheitsgetriebene Branche mit sehr langen Entwicklungs- und Lebenszyklen, in der Innovationen nur schrittweise Einzug halten. Eine Prognose zeigt, mit welchen Maßnahmen die Klimawirkung des Luftverkehrs in Zukunft beeinflusst werden kann und welche Anteile den einzelnen Maßnahmen im Laufe der Zeit zugeschrieben werden.

## Dekarbonisierungsplan für die europäische Luftfahrt

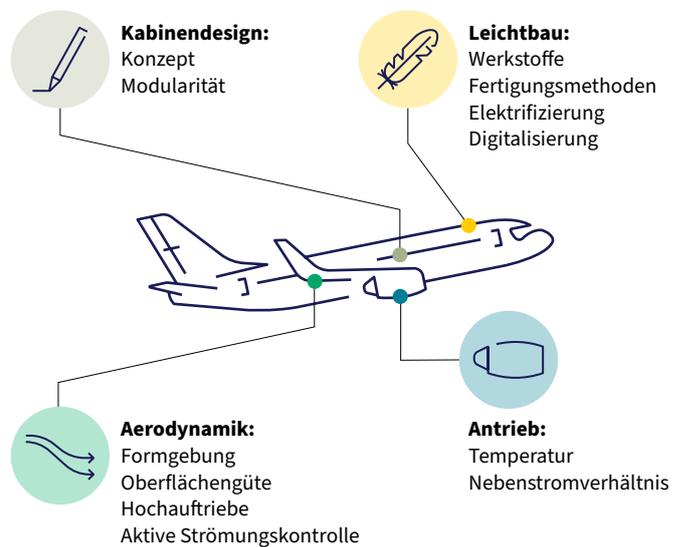
Alle Flüge im Geltungsbereich EU+ (EU, UK sowie Europäische Freihandelszone)



Quelle: Darstellung gemäß des Berichts „Destination 2050 – A route to net zero European aviation“ auf Basis von Daten des Royal Netherlands Aerospace Centre und SEO Amsterdam Economics

### Optimierung der Technik

Die Optimierung der existierenden Flugzeugtechnologie kann die Effizienz erheblich steigern und Emissionen im Betrieb reduzieren. Einige Innovationen können auch nachträglich im Rahmen eines Retrofits oder im laufenden Betrieb um- oder nachgerüstet werden. Die größten Effizienzsteigerungen wurden bisher in den Bereichen Leichtbau und Werkstoffkunde, Aerodynamik, Avionik und Antriebstechnik erzielt. Außerdem haben die optimierte Ausnutzung des verfügbaren Kabinen- oder Frachtraumes bereits zu großen Effizienzsteigerungen geführt. In den meisten Fällen handelt es sich um interdisziplinäre Optimierungen, die durch die fortschreitende Digitalisierung unterstützt werden.



## Optimierung der Betriebsabläufe

Analog zur Optimierung der Flugzeugtechnik trägt auch die Verbesserung der Betriebsabläufe am Boden und in der Luft zu einem klimafreundlicheren Flugbetrieb bei. Die Elektrifizierung des Vorfelds und der Einsatz klimafreundlichen Ground Support Equipments ermöglichen eine emissionsarme Abfertigung der Flugzeuge und ein möglichst spätes Anlassen der Triebwerke am Boden. In der Luft sparen optimierte Flugrouten Kraftstoff ein. Das Umfliegen klimasensibler Gebiete kann die Klimawirkung ebenfalls vermindern.

## Alternative Antriebsarten

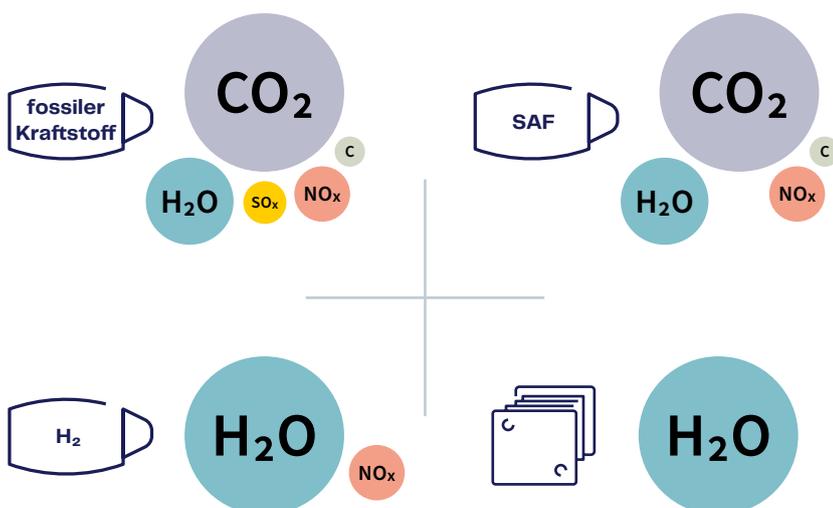
Will man Emissionen im Luftverkehr über die Optimierung bestehender Technologien und Abläufe hinaus verringern, müssen alternative Antriebsarten eingesetzt werden.

Zum einen können **erneuerbare Drop-In-Treibstoffe (SAF)** mit nahezu neutraler CO<sub>2</sub>-Bilanz eingesetzt werden. Drop-In-Kraftstoffe weisen im Vergleich zu fossilem Kerosin nahezu identische Eigenschaften auf und können bereits heute in der bestehenden Flotte eingesetzt werden. Bei der Verwendung von 100% SAF entstehen keine Schwefeloxide und geringere Rußemissionen, ansonsten ist die Zusammensetzung des Abgasstrahls ähnlich dem von fossilem Kerosin. Der Einsatz von 100% SAF ist theoretisch möglich, jedoch ist derzeit maximal ein Anteil von 50% im Kraftstoff zugelassen. Die derzeit verfügbaren SAF-Mengen liegen weltweit im unteren einstelligen Prozentbereich und der Hochlauf schreitet nur schleppend voran. Durch die reduzierten Kondensationskeime verringert die Nutzung von

SAF die Bildung von Kondensstreifen allerdings signifikant. **Wasserstoff** als Treibstoff verursacht noch weniger Emissionen. Bei der Verbrennung in einer modifizierten Turbine entstehen viel Wasserdampf und geringe Mengen an NO<sub>x</sub>. Bei der Umwandlung von Wasserstoff in einem Brennstoffzellenantrieb wird elektrisch geflogen und lediglich Wasserdampf freigesetzt. Die Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff erfordert allerdings massive Änderungen an sämtlichen Systemen des Flugzeugs und eine völlig neue Infrastruktur an den Flughäfen.

Die einzige Antriebsart, die während des Fluges gänzlich ohne THG-Emissionen auskommt, ist das **batterieelektrische Fliegen**. Ein rein batterieelektrischer Antrieb ist jedoch nach heutigem Stand der Technik in der kommerziellen Luftfahrt allenfalls für kurze Strecken umsetzbar und sinnvoll. Verschiedene Hybridkonzepte, die mehrere Antriebsarten kombinieren, werden derzeit erforscht.

## Emissionen im Betrieb



### Well-to-Wheel- vs. Tank-to-Wheel-Kraftstoffanalysen

In der nebenstehenden Abbildung sind die **Tank-to-Wheel Emissionen** dargestellt. Diese Methodik berücksichtigt nur die Emissionen, die bei der Umwandlung des Kraftstoffs während der Nutzung entstehen. Der **Well-to-Wheel-Ansatz** (vom Bohrloch bis zum Rad) berücksichtigt dagegen die Emissionsfreisetzung und -bindung während der Produktion, der Aufbereitung, des Transports bis einschließlich der Nutzung des Treibstoffs im Flugzeug.

