

# Globaler Wandel am Beispiel der Luftfahrt Klima, Ressourcen, Globalisierung und Demographie

## **Kapitel 5** **Energieeinsatz im Luftverkehr**

Unterrichtsmaterial  
für die Oberstufe am Gymnasium in Bayern  
Geographie

Jürgen Patzke  
Diplom-Geograph und Studienrat  
Lehrer in der Wirtschaft 2012/13

München 2013

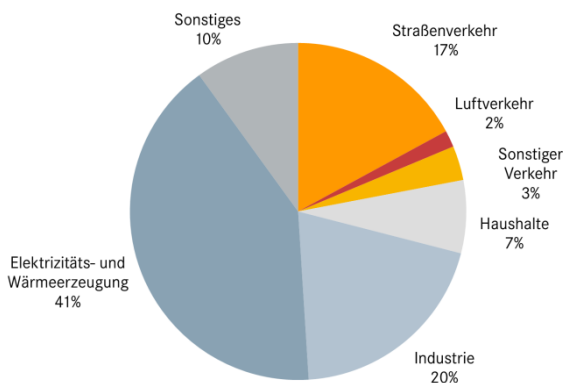
## 5 Energieeinsatz im Luftverkehr

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der zivilen Luftfahrt konnten seit 1960, als die Boeing 707 und die Douglas DC-8 das Jet-Zeitalter eröffneten, um gut 70 % pro Passagierkilometer gesenkt werden. Für die Zukunft ist die weitere Reduktion klimawirksamer Emissionen entscheidend, zumal dadurch ein großes Potenzial ausschöpfbar ist (M1).

Die IATA (International Air Transport Association) und das ACARE der Europäischen Kommission (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) haben für den Zeitraum bis 2050 ein ehrgeiziges Programm zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Luftfahrt definiert (M3). So strebt die IATA für den Luftverkehr ab dem Jahr 2020 ein CO<sub>2</sub>-neutrales Wachstum an und bis zum Jahr 2050 sollen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der gesamten Luftfahrt halbiert werden. Dazu sind Effizienzsteigerungen in allen Entwicklungsfeldern notwendig. Abschätzungen der MTU Aero Engines zeigen, dass mit den nachfolgenden Verbesserungen (in Klammern prozentuale Effizienzsteigerung gegenüber dem Jahr 2000) die Ziele erreicht werden können:

- Flugzeugdesign (30 %): effizientere Konfiguration von Rumpf und Tragflächen bis hin zum Nurfügler
- Luftverkehrsmanagement (20 %): Eine optimierte Nutzung des Luftraums verspricht kürzere Verbindungen und weniger Warteschleifen. Zudem sollen der kraftstoffsparende allmähliche Aufstieg während des Reiseflugs (Cruise Climb) und der kontinuierliche Sinkflug (Continuous Descent Approach) ermöglicht werden.
- Neue Triebwerkstechnologien (50 %): Konzepte für höheren Vortriebswirkungsgrad und neue Kreisprozesse für verbesserten thermischen Wirkungsgrad
- Alternative Kraftstoffe (Anteil von 80 %): Biokraftstoffe und regenerativ produzierte synthetische Kraftstoffe

Die beiden letztgenannten Entwicklungsfelder bergen die größten Potenziale. Die MTU Aero Engines arbeitet auch hier mit Hochdruck an Lösungen für die Zukunft.



M2: Verteilung der 30 Gt globaler CO<sub>2</sub>-Emissionen 2010 nach Sektoren (Quelle: OECD/International Energy Agency 2012, „CO<sub>2</sub>-Emissions from Fuel Combustion – Highlights“)

Der Antrieb heutiger Flugzeuge bedingt noch die Freisetzung von Treibhausgasen. Einen Versuch, die gesamte Klimawirksamkeit des Luftverkehrs abschätzen zu können, stellt der RFI-Faktor (Radiative Forcing Index) dar. Dieser berücksichtigt alle relevanten Emissionsarten und überdies die Atmosphärensicht, in der die Freisetzung erfolgt, sowie die Verweildauer in der Atmosphäre.

Erwärmung durch:

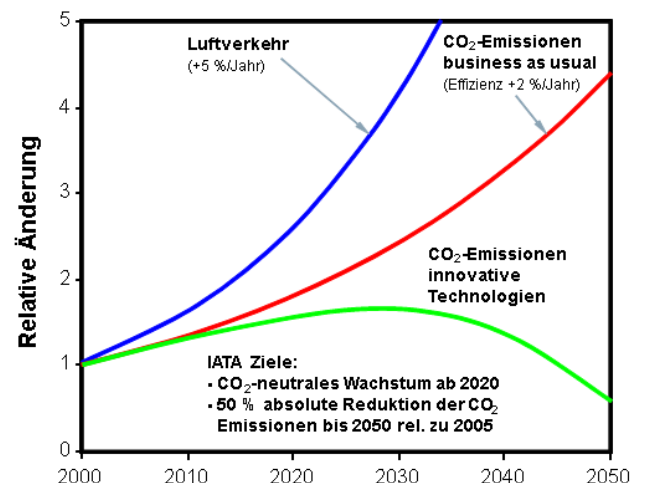
- CO<sub>2</sub>
- Stickoxide: Bildung von Ozon
- Wasserdampf: Zirkus-Wolken, Kondensstreifen
- Rußpartikel: Absorption von Sonnenstrahlung

Abkühlung durch:

- Stickoxide: Abbau von Methan
- Sulfataerosole: Reflexion von Sonnenstrahlung

Es gibt noch keine gesicherten Forschungsergebnisse, doch der Weltklimarat IPCC geht von einem RFI-Faktor des Luftverkehrs von 2,7 aus. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt veranschlagt ähnliche Werte. Die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs wäre demnach um diesen Faktor größer als die ihrer bloßen CO<sub>2</sub>-Emissionen (M2). Allerdings ist daraus nicht ablesbar, dass das Flugzeug um diesen Faktor schädlicher ist als andere Verkehrsträger. Für diese müssten ebenfalls entsprechende Korrekturfaktoren errechnet werden, da auch sie Stickoxide, Wasserdampf und Aerosole emittieren.

M1: RFI-Faktor in der Luftfahrt



M3: Programm zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 (Quelle: MTU Aero Engines)

## Neue Triebwerkstechnologien

Um den Wirkungsgrad moderner Turbofan-Triebwerke zu erhöhen, hat man in den vergangenen Jahrzehnten das Bypass-Verhältnis zwischen Hauptstrom (durch das Kerntriebwerk mit Verdichter, Brennkammer und Turbine beschleunigte Luft) und Nebenstrom (beschleunigt durch den Fan) auf 1:10 vergrößert. Dazu muss der Fan immer größer werden und langsamer drehen, da die Umfangsgeschwindigkeit an der Schaufelspitze begrenzt ist. Die den Fan antreibende Niederdruckturbinen wird dadurch ebenfalls auf niedrige Drehzahlen gezwungen, die den Wirkungsgrad vermindern.

Die Getriebefan-Technologie des PW1000G (Kapitel 2, M2) behebt dieses Problem. Ein Planetengetriebe erlaubt, dass sich der Fan langsamer dreht als die Niederdruckturbinen, die bei hohen Geschwindigkeiten optimal läuft. Somit können beide Sektionen des Triebwerks ihren höchsten Wirkungsgrad erreichen. Das PW1000G kommt mit 15% CO<sub>2</sub>-Einsparung 2014 auf den Markt.

Um 2025 werden verbesserte Fantechnologien, z. B. der CRISP (gegenläufiger ummantelter Propfan) mit 20 %, und ab 2035 neue Kerntriebwerke z. B. mit Wärmetauscher mit 30 % CO<sub>2</sub>-Reduktion verfügbar sein. Die MTU Aero Engines ist an der Erforschung und Entwicklung all dieser Zukunftstechnologien beteiligt.

## Alternative Kraftstoffe

Das Zeitalter fossiler Energieträger geht aus Gründen der Klimawirksamkeit und der zunehmenden Verteuerung (Verknappung nach „Peak-Oil“-Zeitpunkt) dem Ende zu. Für die Substitution des aus Erdöl hergestellten Kerosins werden verschiedene Treibstoffe untersucht.

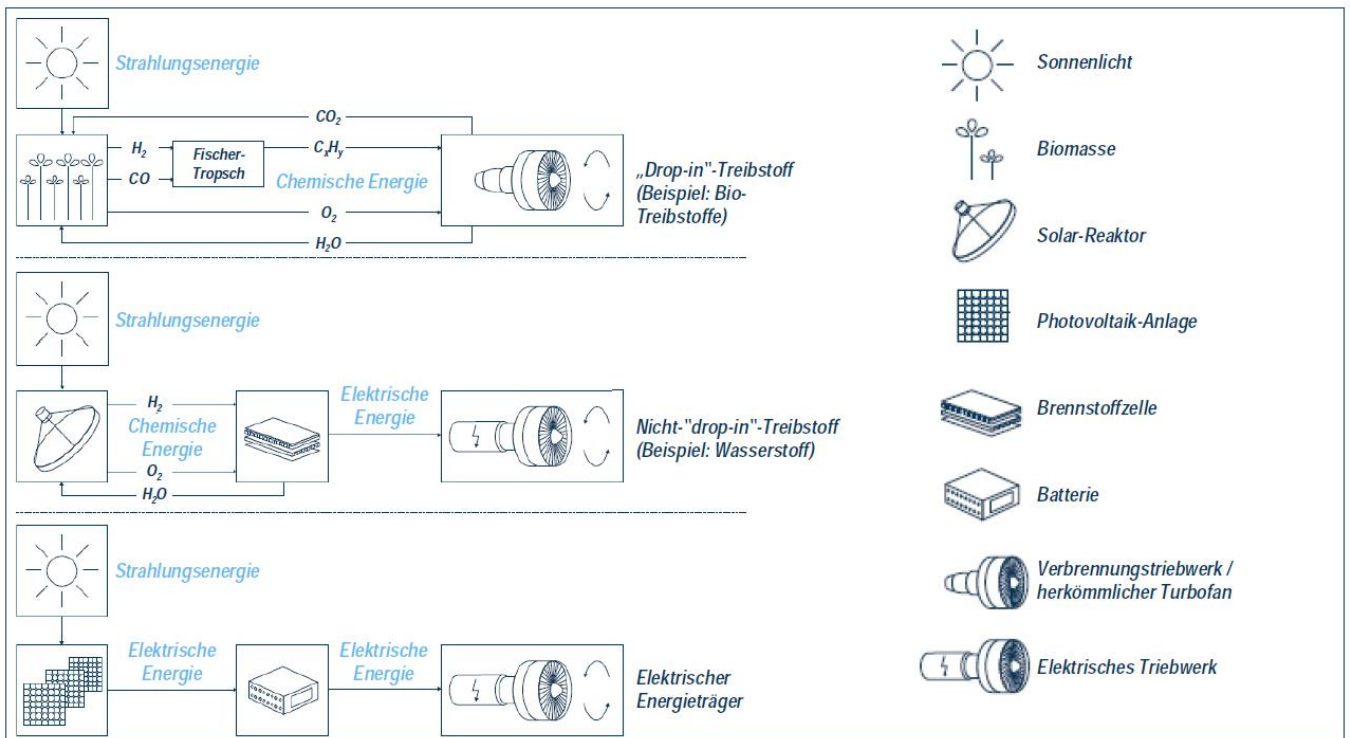
Wünschenswerte Eigenschaften sind:

- Geringe Modifikationen an Flugzeug und Triebwerk
- Einfache Infrastruktur am Boden
- Technologiereife

Notwendige Eigenschaften sind:

- Hohe gravimetrische Energiedichte [MJ/kg]
- Hohe volumetrische Speicherkapazität [MJ/l]
- Sicherheit: niedriger Gefrierpunkt, hoher Siedebereich
- Langfristig gesicherte Verfügbarkeit
- Geringe Klimawirksamkeit

Die MTU Aero Engines beteiligt sich über das „Bauhaus Luftfahrt“ an Forschungsprojekten zur Zukunft der Luftfahrt. Die Wissenschaftler ziehen als künftige Flugzeugantriebe (M4) synthetische Kraftstoffe aus Biomasse (M5), Solarkerosin, Wasserstoff für Brennstoffzellen und elektrisches Fliegen in Betracht.



M4: Optionen für alternative Flugkraftstoffe und Energieträger (Quelle: Bauhaus Luftfahrt e. V.)

Der erste längere Versuch mit Biokerosin unter Realbedingungen wurde von Juli bis Dezember 2011 mit einem Airbus 321 der Lufthansa durchgeführt, wobei das Flugzeug 1.187-mal zwischen Hannover und Frankfurt im Einsatz war. Eines der beiden V2500-Triebwerke wurde mit einem 50:50-Gemisch aus Kerosin und Biokerosin versorgt, wozu Veränderungen am Flugzeug nicht erforderlich waren (Drop-In-Treibstoff). Die 800 für den Versuch benötigten Tonnen Biokraftstoff stellten die bis dahin größte je erzeugte Menge an HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) dar. Als Rohstoffe dienten Leindotteröl aus den USA (80 %), Purgiemussöl aus Indonesien (15 %) und Schlachtabfälle aus Finnland (5 %). Das Forschungsvorhaben unter Mitwirkung der MTU hat die Alltagstauglichkeit von Biokerosin bewiesen. Allerdings ist es noch deutlich teurer als übliches Kerosin. Neben dem Kostenaspekt ist wichtig, dass die künftige Produktion von Biokerosin nicht in Konkurrenz zur Herstellung von Lebensmitteln steht, dass ökologisch unerwünschte Monokulturen vermieden werden und dass die gesamte CO<sub>2</sub>-Bilanz günstig ist.

M5: BurnFAIR-Versuch 2011 (Quelle: MTU Aero Engines)

Biokerosin kann über verschiedene Produktionsrouten hergestellt werden, z. B. durch Hydrieren von Pflanzenölen (HVO) oder durch Fischer-Tropsch-Synthese (BTL: Biomass to Liquid). Modifikationen am Flugzeug und Triebwerk sind bei diesen zugelassenen Kraftstoffen nicht nötig, da sie dem mineralischen Kerosin chemisch weitgehend entsprechen. Als Rohstoffe kommen Energiepflanzen, Holz und Bioabfall in Frage, wobei die langfristige Verfügbarkeit und eine durchgehend nachhaltige Produktion auf großen Landflächen aber nicht gesichert sind. Für den Ersatz der in Europa derzeit benötigten Menge Kerosin von 60 Millionen Tonnen pro Jahr durch Biokerosin bräuchte man zwischen 8 und 24 % der europäischen Agrarfläche.

Eine vielversprechende Alternative bietet die Verwendung von Algen als Rohstoff. Geeignete Mikroalgen sind sehr ölhaltig, vermehren sich schnell und bringen über 30-mal mehr Biomasse pro Flächeneinheit als etwa Raps hervor. Die Ansprüche an die Anbauflächen sind gering, und zur Bewässerung kann Salz-, Schmutz- und sogar Industrieabwasser verwendet werden. Zudem nehmen die Algen bei der Photosynthese viel CO<sub>2</sub> auf. Versuchsanlagen werden auf Big Island im US-Bundesstaat Hawaii betrieben.

Solarkerosin oder STL (Solar-to-Liquid) kann auch mit dem Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellt werden. Dabei wird der Umweg über die Biomasse vermieden und konzentrierte Sonnenenergie direkt zur Erzeugung von Synthesegas (H<sub>2</sub> und CO) aus CO<sub>2</sub> und Wasser genutzt. Die Machbarkeit der Herstellung von Solarkerosin ist in den USA und der Schweiz nachgewiesen worden, an der Technologiereife zur industriellen Herstellung wird noch gearbeitet.

Wasserstoff hat eine hohe Energiedichte, doch das Speichervolumen ist sehr groß. Das Flugzeug benötigt einen großen, für den -256 °C kalten Wasserstoff aufwändig isolierten Tank. Die direkte Verbrennung in üblichen Triebwerken ist mit geringen Modifikationen möglich. Alternativ kann Wasserstoff auch über eine Brennstoffzelle ein Elektrotriebwerk in Gang setzen. In beiden Fällen wird kein CO<sub>2</sub> freigesetzt, aber eine erhebliche Menge Wasserdampf. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt betreibt bereits ein kleines Brennstoffzellenflugzeug, das bisher nur seinen Piloten transportieren kann.

Elektroantriebe für Flugzeuge scheitern bisher an den verfügbaren Energiespeichern, deren heutige Energiedichte und Speicherkapazität um den Faktor 10 bis 20 verbessert werden müssen. Die großen Fortschritte der vergangenen Jahre in der Batterietechnik sind aber vielversprechend.



M6: Entwurf eines Elektroflugzeugs (Quelle: Bauhaus Luftfahrt e. V.)

Treibstoff/Energieträger	Quelle	Energiedichte	Modifikationen	Technologie- reife	Langfristige Verfügbarkeit	Klima- wirksamkeit
Kerosin						
BTL- oder HVO-Kerosin						
STL-Kerosin						
Flüssiger Wasserstoff						
Elektrische Batterie						

M7: Bewertungsmatrix der Kraftstoffe und Flugantriebe (Quelle: MTU Aero Engines)

#### **AUFGABEN**

- A1: Ordnen Sie die mit dem Luftfahrt-RFI abgebildeten Effekte (M1) in den Strahlungshaushalt der Erde ein!*
- A2: Stellen Sie zusammen, welche Herausforderungen bei der Optimierung des Luftverkehrsmanagements bestehen!*
- A3: Arbeiten Sie für den fächerübergreifenden Unterricht mit Physik ein Referat zur CRISP-Technologie und zum Wärmetauscher-Propfan aus!*
- A4: Erklären Sie am Beispiel des Biokerosins, was unter der gesamten CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Energieträgers zu verstehen ist!*
- A5: Bewerten Sie in einer tabellarischen Übersicht (M7) die alternativen Flugtreibstoffe. Geben Sie jeweils die Rohstoffquelle an und füllen Sie die restlichen Felder mit Signaturen für „günstig“, „nicht einwandfrei“ und „ungünstig“!*
- A6: Begründen Sie, warum im globalen Maßstab die langfristige Verfügbarkeit und die durchgehend nachhaltige Produktion von Bio-Rohstoffen auf großen Flächen nicht gesichert sind!*
- A7: Begründen Sie, warum der Elektroantrieb bei entsprechender Technologiereife besonders nachhaltig wäre!*