

# LANGFRISTIGE SICHERUNG DES LUFTVERKEHS DURCH NEUE ANTRIEBSTECHNOLOGIEN UND ALTERNATIVE BRENNSTOFFE

Jörg Sieber

MTU Aero Engines, München, Deutschland

## Zusammenfassung

Das absehbare Ende wirtschaftlich verfügbarer Ölreserven und Restriktionen infolge der sich verschärfenden Klimaänderung stellen den Luftverkehr heute vor neue und einschneidende Herausforderungen. Die Gesellschaft erwartet von der Luftfahrtindustrie, dass sie ihren weiter stark steigenden Bedarf nach Mobilität befriedigt und dabei Umwelt und Ressourcen schont. Dazu reicht die Geschwindigkeit an technologischen Verbesserungen, die die Luftfahrt in der Vergangenheit erzielt hat, zukünftig nicht mehr aus.

Die endlichen Ölreserven und die negativen Klimawirkungen erfordern die Umstellung des Luftverkehrs von fossilen auf regenerative Energiequellen. Die heute überschaubaren alternativen Energieträger werden deshalb auf Luftfahrttauglichkeit, Umweltverträglichkeit und Realisierbarkeit untersucht. Aus heutiger Sicht kann synthetisches Kerosin, das bevorzugt aus nicht zur Nahrungsmittelproduktion genutzter Biomasse hergestellt werden muss, mittelfristig einen Ersatz für fossiles Kerosin bieten. Zur Energieversorgung des Luftverkehrs ist langfristig auch der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft mit solarer Energieerzeugung denkbar. Dazu sind jedoch erhebliche Investitionen in die Infrastruktur und große Änderungen am Flugzeug notwendig.

Parallel zur Einführung alternativer Brennstoffe müssen die technologischen Entwicklungen verstärkt werden. Der Antrieb bietet mit neuen Konzepten für den Vortriebserzeuger und den Gasturbinenkreisprozess noch erhebliche Potentiale. Diese werden zusammen mit Ideen zu verbesserten Fluggeräten, Verkehrsmanagement und Luftfahrtbetrieb analysiert und die Auswirkungen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet.

Insgesamt zeigen die Abschätzungen, dass auch nach dem Ende des Ölzeitalters und unter Berücksichtigung von Umweltrestriktionen ein Luftverkehr, der den Bedürfnissen der Gesellschaft entspricht, technisch möglich ist.

## 1. EINLEITUNG

Der Luftverkehr blickt auf eine beeindruckende Erfolgsgeschichte zurück, er ist zu einem Massenverkehrsmittel mit über 2 Mrd. Passagieren pro Jahr geworden. Die rasanten technologischen Verbesserungen der letzten Jahre ermöglichen deutliche Verbesserungen bezüglich Ökonomie und Ökologie. Trotzdem steht der Luftverkehr heute vor neuen Herausforderungen, die im wesentlichen durch die endlichen Energievorräte und die sich verschärfende Klimaänderung gekennzeichnet sind. Mit der ACARE Vision 2020 wurden sehr ehrgeizige Ziele für die Luftfahrt definiert, die jedoch aufgrund des rasanten Verkehrswachstums in Summe noch keine Entlastung für Umwelt und Ressourcen bringen. Ein wesentlicher Grund für die Probleme liegt im dem für Turbofan- und Turboproptriebwerke fast ausschließlich verwendeten Kerosin aus fossilen Quellen.

## 2. RANDBEDINGUNGEN

### 2.1. Ressourcen

Die Randbedingungen der Energieversorgung haben sich in letzter Zeit dramatisch verschlechtert. So verbraucht die Welt seit 1981 mehr Öl pro Jahr als neu entdeckt wird [1] und der Ölpreis (in US\$/barrel) hat sich in den letzten 10 Jahren mehr als verzehnfacht (siehe BILD 1). Zwar beträgt die Reichweite der heute nachgewiesenen

Weltölreserven bei Fortschreibung der Produktion noch 40 - 50 Jahre, trotzdem geht die Internationale Energieagentur (IEA) davon aus, dass der Rohölbedarf nur noch bis zum Jahr 2030 sicher befriedigt werden kann [2].

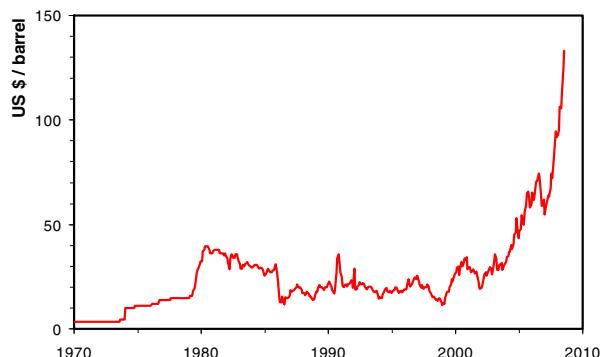


BILD 1. Ölpreisentwicklung (Price of West Texas Intermediate Crude, monthly, NSA)

### 2.2. Umwelt

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die beobachtete Klimaänderung durch Menschen verursacht wird und die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen daran den wesentlichen Anteil haben. Der Anteil der Luftfahrt am globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoss beträgt heute nur ca. 2% (BILD 2). Zur

Klimaänderung durch die Luftfahrt tragen neben dem CO<sub>2</sub>-Ausstoss auch die NOx-Emissionen sowie die Bildung von Kondensstreifen und Zirruswolken maßgeblich bei [3]. Der gesamte Beitrag der Luftfahrt zur Klimaänderung wird daher auf 3% geschätzt.

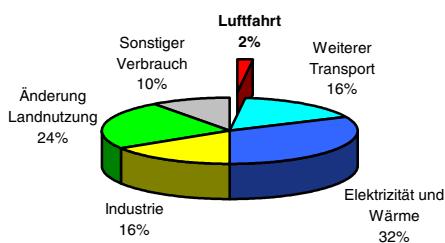


BILD 2. Quellen der weltweiten CO<sub>2</sub> Emissionen  
(Quelle: World Ressource Institute)

Zur Begrenzung der Klimaänderung werden zunehmend ordnungspolitische Regelungen diskutiert. So sollen ab 2012 die Airlines im europäischen Luftverkehr am Emission Trading System teilnehmen. Die genauen Randbedingungen werden zur Zeit verhandelt, zunächst wird ein großer Teil der Emissionsrechte zugeteilt während längerfristig alle Emissionsrechte zugekauft werden müssen. Außerdem hat die EU-Kommission ein Gesetzespaket zum Klimaschutz beschlossen, das eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses um 20% bis zum Jahr 2020 im Vergleich zum Jahr 1990 vorsieht [4].

Noch stärkere Einschränkungen folgen aus den Berechnungen vieler Klimaforscher, die einen Temperaturanstieg von 2° infolge anthropogener Effekte als gerade noch tolerierbar und daher als anzustrebende Obergrenze ansehen [5]. Das entspricht einer Begrenzung der jährlichen Pro-Kopf-Emissionen auf 2 t CO<sub>2</sub> (zum Vergleich CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschland 2005: 10,4 t pro Jahr und Einwohner) und würde für alle Verbraucher fossiler Energien einschneidende Beschränkungen bedingen.

### 2.3. Konsequenzen

Rohöl steht als Energielieferant zu akzeptablen Preisen nur noch für einen begrenzten Zeitraum zur Verfügung. Außerdem erwartet die Gesellschaft zukünftig von allen Verbrauchern einschließlich der Luftfahrt eine deutliche Reduktion der klimaschädlichen Emissionen.

Die Luftfahrt konnte in den vergangenen 40 Jahren den spezifischen Verbrauch (Brennstoff pro Passagier-kilometer) bereits um 70% reduzieren was einer jährlichen Verbesserung von 3% pro Jahr entspricht. Trotzdem konnte ein Anstieg der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Luftfahrt infolge des starken Verkehrswachstums nicht verhindert werden. Eine Verminderung der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist bei dem prognostizierten Verkehrswachstum von ca. 5% pro Jahr durch technologische Verbesserungen allein nicht zu erreichen.

Zur langfristigen Sicherung des Luftverkehrs ist es daher notwendig, die Energieversorgung der Luftfahrt schrittweise von fossilen Energieträgern auf regenerative Quellen umzustellen und dabei auch die Klimawirkungen des Luftverkehrs deutlich zu reduzieren. Die IATA (International Air Transport Association) hat deshalb langfristig für das Ziel „Zero Emission“ verkündet [7].

Die dazu notwendigen Technologieentwicklungen zu alternativen Brennstoffen müssen wegen der langen Einsatzdauer von 25 Jahren von Flugzeug und Triebwerk sofort gestartet werden.

### 2.4. Zukünftiger Weltluftverkehr

Zur Bewertung alternativer Energiequellen ist eine Abschätzung des künftigen Energiebedarfs der Luftfahrt notwendig. Das Passagieraufkommen ist in der Vergangenheit jährlich um etwa 5% angewachsen und wird sich in den nächsten Jahren ähnlich entwickeln (BILD 3 blaue punktierte Linie). Längerfristig ist jedoch eine Stabilisierung des Luftverkehrs zu erwarten, da die Weltbevölkerung nicht mehr unbegrenzt wachsen wird und auch der Bedarf an Flugleistungen pro Person endlich ist. Der maximale Bedarf an Flugleistungen kann aus dem heutigem Flugaufkommen für hochentwickelte Länder bei Annahme einer weiteren Steigerung und Ausdehnung auf die gesamte Erdbevölkerung abgeschätzt werden. Unter der Annahme einer maximalen Weltbevölkerung von 10 Mrd. Einwohnern und einer Flugleistung von 10000 km pro Einwohner und Jahr (zum Vergleich geflogene Strecke je Schweizer Bürger 2006 5285 km) ergibt sich eine Bedarfsgrenze (BILD 3 blau gestrichelt), die um den Faktor 25 über dem Wert von 2005 liegt.

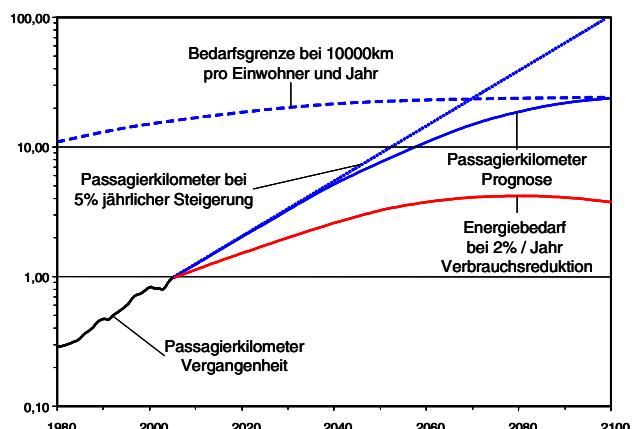


BILD 3. Abschätzung des zukünftigen Weltluftverkehrs und Energiebedarfs

Die Entwicklung des Weltluftverkehrs wird durch diese beiden Grenzlinien bestimmt und kann damit näherungsweise beschrieben werden (BILD 3 blaue Linie). Unter der Annahme einer jährlichen Reduktion des spezifischen Verbrauchs um 2% kann daraus der Energiebedarf der Weltluftfahrt direkt berechnet werden (BILD 3 rote Linie).

## 3. ALTERNATIVE BRENNSTOFFE

### 3.1. Kerosin

Turbofan- und Turboproptriebwerke für Flugzeuge werden heute nahezu ausschließlich mit Kerosin auf Erdölbasis betrieben. Kerosin ist der ideale Brennstoff für Flugzeuge aufgrund seiner hohen Energiedichte (gravimetrische Energiedichte 43,1 MJ/kg), großen Speicherfähigkeit (volumetrische Energiedichte 34,2 MJ/l), dem niedrigem

Gefrierpunkt (-47°C), der guten Temperaturstabilität (Siedebereich 180 - 230°C), der etablierten und sicheren Handhabbarkeit (Zündgrenzen, Verdunstungsverhalten) sowie weltweiter Verfügbarkeit und vorhandener Infrastruktur.

### 3.2. Anforderungen an alternative Brennstoffe

Alternative Brennstoffe müssen eine mit Kerosin vergleichbare hohe Energiedichte (gravimetrische Energiedichte) und Speicherfähigkeit (volumetrische Energiedichte) sowie eine sichere Handhabbarkeit aufweisen. Zur Vermeidung der Ressourcen- und Klimaprobleme des fossilen Kerosins muss für den alternativen Brennstoff zusätzlich die langfristig gesicherte Verfügbarkeit und eine geringe Klimawirkung gefordert werden. Wünschenswerte Eigenschaften sind daneben geringe notwendige Modifikationen an Flugzeug und Triebwerk, eine einfache Infrastruktur am Boden sowie ein einfacher Übergang (Drop-In Lösung) von fossilem Kerosin auf den neuen Brennstoff.

### 3.3. Energiedichte

Die Energiedichte des Brennstoffs ist in der Luftfahrt im Gegensatz zu anderen Einsatzbereichen von entscheidender Bedeutung. In BILD 4 sind daher die Energiedichten möglicher Energieträger gegenübergestellt.

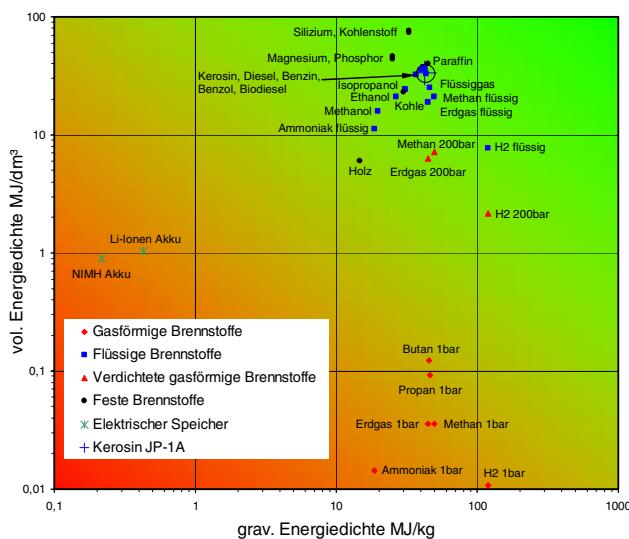


BILD 4. Energiedichte alternativer Energieträger

Die flüssigen Kohlenwasserstoffe Kerosin, Diesel, Benzin, Benzol und Biodiesel liegen auf einem vergleichbar hohen Niveau. Ebenfalls relativ hohe Energiedichten liefern Alkohole, Flüssiggas, flüssiges Methan und flüssiger Wasserstoff. Dagegen sind Akkumulatoren und gasförmige Brennstoffe für die Luftfahrt ungeeignet. Die höchste gravimetrische Energiedichte besitzt Wasserstoff, allerdings muss der Wasserstoff verflüssigt werden, um auch eine akzeptable volumetrische Energiedichte zu erhalten. Auch einige Festbrennstoffe wie z.B. Silizium erreichen interessante Energiedichten. Sie sollen im folgenden jedoch nicht näher betrachtet werden, da ihre Einführung noch erhebliche technologische Vorarbeiten erfordern würde.

### 3.4. Brennstoffe aus fossilen Quellen

Als Alternative zu Kerosin aus Rohöl bietet sich als schnell zu realisierende Lösung die Nutzung der großen Lagerstätten von Ölsanden in Kanada und Venezuela an (in Alberta werden z.B. 300 Mrd. Barrel vermutet im Vergleich zu Ölreserven von 1200 Mrd. Barrel). Die Ölgewinnung aus Ölsand (Bitumen) ist jedoch sehr energieaufwendig und erfordert bereits die Hälfte der gewonnenen Energie. Große Umweltprobleme durch hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoss und Wasserbedarf sind deshalb zu erwarten.

Weitere fossile Energiequellen sind Ergas- und Kohlevorkommen. Die Verfügbarkeit aller fossilen Energiequellen wird kontrovers diskutiert, allgemein wird von einer Reichweite bei gleichbleibendem Verbrauch von 40 bis 50 Jahren für Erdöl, 70 Jahren für Erdgas und 200 Jahren für Kohle ausgegangen. Damit ist nur mit Kohle eine längere Versorgungssicherheit zu erzielen. Zur Herstellung von Kerosin aus Kohle und Gas stehen verschiedene erprobte Verfahren zur Verfügung. Am bekanntesten ist die Fischer-Tropsch-Synthese, die bereits ab 1934 großtechnisch angewandt wurde. Das erzeugte Kerosin ist praktisch identisch mit Kerosin auf Erdölbasis und erfüllt damit alle Luftfahrtanforderungen, so dass keine Änderungen am Flugzeug, Antrieb und in der Infrastruktur notwendig sind.

Synthetisches Kerosin aus Kohle (CTL Coal to Liquid) wird heute von Sasol in Südafrika produziert und in Johannesburg wird dem Kerosin bis zu 40% CTL-Anteil beigemischt. Nachteilig ist der sehr hohe CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei der Produktion und damit die sehr ungünstige CO<sub>2</sub>-Bilanz (1,8 - 2,9 mal höherer CO<sub>2</sub>-Ausstoss im Vergleich zu Kerosin aus Rohöl [7], [9]).

Sehr interessant für Länder mit großen Erdgasvorkommen zur Lösung des Transportproblems von Erdgas (z.B. Quatar) ist synthetischer Brennstoff auf Erdgasbasis (GTL Gas to Liquid). Shell betreibt seit 1993 die erste kommerzielle GTL-Anlage in Malaysia. Der Energieaufwand zur Produktion ist etwas günstiger als bei CTL, weist jedoch ebenfalls eine ungünstige CO<sub>2</sub>-Bilanz auf (1,3 - 1,5 mal höherer CO<sub>2</sub>-Ausstoss im Vergleich zu Kerosin aus Rohöl [8], [7]).

Zu den fossilen Energiequellen gehört auch Flüssiggas (LPG Liquefied Petroleum Gas), ein Gemisch aus Propan und Butan sowie eventuell weiteren Kohlenwasserstoffverbindungen, das in Raffinerien aus Erdöl hergestellt wird und bei der Förderung von Öl und Erdgas anfällt. Es lässt sich bei Raumtemperatur bereits bei geringem Druck (5 - 10 bar) verflüssigen, weist allerdings eine um 27% geringere volumetrische Energiedichte als Kerosin auf.

Aus Ergas lässt sich durch Verflüssigung ebenfalls ein denkbarer Brennstoff mit der Bezeichnung LNG (Liquefied Natural Gas) für die Luftfahrt herstellen. Der Hauptbestandteil von Erdgas ist Methan und eine Speicherung im flüssigen Zustand bedingt Temperaturen < -162°C. Zum Transport von Ergas werden zunehmend Flüssiggastankschiffe eingesetzt. Nachteilig ist auch hier die geringe volumetrische Energiedichte (45% geringer als Kerosin).

Trotz einer etwas günstigeren CO<sub>2</sub>-Bilanz sind Flüssiggas und Flüssigerdgas keine Alternative zu Kerosin aus Erdöl,

da sie keine höhere Versorgungssicherheit bieten. Auf lange Sicht könnten die großen Vorkommen an Methanhydrat auf den Meeresböden (Energiereserven größer als Kohle) eine Rohstoffquelle für flüssiges Methan mit deutlich längerer Reichweite liefern. Allerdings ist die Gewinnung bisher ungelöst und es muss bei der Produktion sichergestellt werden, dass das sehr stark wirkende Treibhausgas Methan (20-30 mal stärker als CO<sub>2</sub>) nicht in die Atmosphäre gerät.

### 3.5. Regenerative Brennstoffe

Die langfristige Versorgungssicherheit lässt sich nur sicherstellen, wenn es gelingt, die Energieversorgung auf erneuerbare Energien umzustellen. Als Kraftstoffe für den bodengebundenen Verkehr haben sich in den letzten Jahren Bio-Kraftstoffe der ersten Generation einen beachtlichen Marktanteil erobern können. Dazu gehören Alkohole, Pflanzenöle und Biodiesel.

Alkohol in Form von Ethanol oder Methanol wird aus zucker-, stärke oder cellulosehaltigen Pflanzen (Getreide, Zuckerrüben) gewonnen und befindet sich bereits in großtechnischer Produktion. Für die Luftfahrt sind Ethanol und Methanol weniger geeignet, da die gravimetrische Energiedichte mit 38% bzw. 54% deutlich unter der von Kerosin liegt.

Ebenfalls zu den Bio-Kraftstoffen der ersten Generation gehören Pflanzenöle und Rapsölmethylester (Biodiesel). Pflanzenöle werden direkt aus Raps, Soja, Palmöl oder anderen ölhaltigen Pflanzen gewonnen, während Biodiesel zur Verbesserung der Eigenschaften aus Raps oder anderen Pflanzenölen durch Umesterung hergestellt wird. Biodiesel wird zur Zeit in Deutschland bereits dem fossilen Diesel mit einem 5% Anteil beigemischt. Für die Luftfahrt sind diese Brennstoffe wegen ihres hohen Gefrierpunkts (Biodiesel -10°C, Palmöl 27°C) ungeeignet.

Problematisch bei allen Bio-Kraftstoffen der ersten Generation ist der hohe Bedarf an Ackerflächen, die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und die Umweltbelastung durch Düngung und Pestizide.

Deutliche Verbesserungen bieten Biokraftstoff der zweiten Generation (BTL Biomass to Liquid), die mittels Kraftstoffsynthese z.B. dem Fischer-Tropsch-Verfahren aus Biomasse hergestellt werden. Sie erlauben die Verwendung beliebiger Biomasse, erbringen höhere Flächenerträge, da die ganze Pflanze verwendet wird und gestatten die Anpassung des Brennstoffs an die Luftfahrtanforderungen. Pilotanlagen produzieren bereits (z.B. Choren 18 Mio. l Sun-Diesel pro Jahr), noch in diesem Jahrzehnt ist die großtechnische Produktion geplant.

Alle Bio-Brennstoffe weisen eine günstigere CO<sub>2</sub>-Bilanz auf als Kerosin aus Rohöl, da bei der Verbrennung nur die Menge an CO<sub>2</sub> frei wird, die die Pflanzen zuvor absorbiert haben (jedoch Verluste bei Anbau und Synthese). Hauptnachteil sind die erforderlichen großen Flächen und die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Längfristig ist auch eine Gewinnung der Biomasse aus Algen denkbar, die hohe Wachstumsraten aufweisen und auf nicht für die Landwirtschaft geeigneten Flächen produziert werden können.

Als erster Schritt bei der Einführung von Bio-Brennstoffen

bietet sich die Streckung von Kerosin aus Rohöl durch Beimischung von alternativen Brennstoffen an (Blending). Zur Einhaltung der geltenden Standards für Kerosin ist die Beimischung von Bio-Kraftstoffen der ersten Generation jedoch stark begrenzt.

Schon seit einigen Jahren wird die Einführung einer Wasserstoffwirtschaft diskutiert. Für die Verkehrsluftfahrt kommt Wasserstoff wegen der Speichermöglichkeiten nur in flüssiger Form in Betracht. Wasserstoff weist die höchste gravimetrische Energiedichte (2,8 mal leichter als Kerosin) jedoch eine niedrige volumetrische Energiedichte (4,4 mal voluminöser als Kerosin) auf. Ein möglicher Weg zur Wasserstoffversorgung bestünde aus einer Stromerzeugung mittels Photovoltaik bzw. solarthermischer Kraftwerke im Wüstengürtel der Erde, dem Transport der elektrischen Energie mittel Hochspannungsgleichstromnetz zu Wasserstoffproduktionsstätten in der Nähe der Flughäfen in denen mittels Elektrolyse aus Wasser Wasserstoff gewonnen wird, der anschließend noch verflüssigt wird. Erste Testflüge mit einer TU154 mit Wasserstoffantrieb wurden bereits Ende der 1980er Jahre durchgeführt.

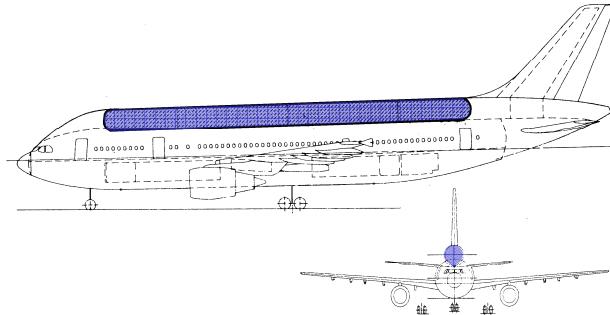


BILD 5. Airbus Studie A310 mit LH<sub>2</sub>-Tank [9]

Die Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff bedingt massive Änderungen am Flugzeug (BILD 5), da der Tank voluminöser ist und eine gute Isolierung notwendig wird (Temperatur flüssiger Wasserstoff -253°C). Dagegen erfordert die Verbrennung von Wasserstoff nur relativ geringe Modifikationen an der Brennkammer, jedoch größere Modifikationen an Anbaugeräten und Kraftstoffsystem. Kritisch sind die schlechte Handhabbarkeit, die schlechte Langzeitspeicherbarkeit (Verdampfung des flüssigen Wasserstoffs) und vor allem die sehr hohen Investitionen in die Versorgungsinfrastruktur, die neu aufgebaut werden müsste. In der Übergangszeit ist außerdem eine parallele Versorgungsinfrastruktur an allen Flughäfen notwendig. Wasserstoff aus solarem Strom verursacht keine CO<sub>2</sub>-Emissionen, trägt jedoch über den Wasserdampfausstoß ebenfalls zur Klimaänderung bei.

### 3.6. Bewertung der alternativen Brennstoffe

Eine erste grobe Bewertung der vorgestellten alternativen Brennstoffe zeigt Bild 6. Die fossilen Energieträger scheiden alle wegen mangelnder langfristiger Verfügbarkeit und ungünstiger Klimawirkung aus. Nur synthetisches Kerosin aus Kohle (CTL) kann auf Kosten der Klimaänderung für längere Zeit ein Ersatz für Kerosin aus Rohöl sein.

Von den erneuerbaren Energieträgern zeigt synthetisches Kerosin aus Biomasse (BTL) die besten Eigenschaften.

Eine längerfristige Alternative, die erhebliche Investitionen in die Infrastruktur erfordert, ist noch Wasserstoff.

Energieträger	Quelle	Energie-dichte	Speicher Hand-habung	Langfrist Verfüg-barkeit	Klima-wirkung
Kerosin	Öl, Ölsande	+	+	-	-
GTL, CTL Kerosin	Kohle, Ergas	+	+	0 Kohle	-
Flüssiggas	Öl, Erdgas	0	Drucktank	-	-
Flüssigerdgas (Methan) LNG Liquefied Natural Gas	Erdgas	0	Isoliertank	-	-
Ethanol, Methanol	Biomasse	-	+	-	+
Methylester, Pflanzenöl	Biomasse	0	gefriert	-	+
BTL Kerosin	Biomasse	+	+	0	+
Methan flüssig	Biomasse	0	Isoliertank	0	+
Flüssiger Wasserstoff LH2 Liquefied Hydrogen	solar	+	Isoliertank	+	+

BILD 6. Bewertung alternativer Energieträger  
+ günstig 0 denkbar - ungünstig

Die Realisierbarkeit einer Brennstoffversorgung durch erneuerbare Energien wird u.a. durch die Verfügbarkeit der notwendigen Flächen bestimmt. Für die beiden erfolgversprechenden alternativen Brennstoffe synthetisches Kerosin aus Biomasse (BTL) und solarer Wasserstoff wurden daher an Hand von in der Literatur angegebenen Daten die notwendigen Flächen abgeschätzt. Dabei wurde für den Energiebedarf der Luftfahrt der zu erwartende Maximalwert (Kapitel 2.4) angesetzt.

Die Flächenerträge von Energiepflanzen zur Biomasseproduktion variieren je nach Pflanzenart. Für Raps kann z.B. ein Jahresertrag von 4000 l je Hektar [10] erwartet werden. Daraus ergibt sich ein gesamter Flächenbedarf von ~3,2 Mio. km<sup>2</sup> zur Versorgung der Luftfahrt. Diese Fläche entspricht bereits 20% der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Erde. Eine Versorgung der Luftfahrt durch Biomasse aus Landanbau ist daher wegen der starken Beeinträchtigung der Nahrungsmittelproduktion unmöglich. Nur eine Biomasseproduktion auf landwirtschaftlich bisher nicht genutzten Flächen kann eine Lösung darstellen wie z.B. BILD 7 mit der erforderlichen Fläche innerhalb der Sahara zeigt. Airbus könnte sich z.B. einen Ersatz von 30% des fossilen Kerosins durch Kerosin aus Biomasse bis zum Jahr 2030 vorstellen.

Die erforderlichen Flächen zur Produktion von solarem Wasserstoff sind wegen der im Vergleich zu Pflanzen höheren Wirkungsgrade deutlich niedriger. In den Wüstengürteln der Erde steht eine mittlere eingestrahlte Energie von mehr als 2000 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr zur Verfügung, die mittels Fotovoltaik oder solarthermischer Kraftwerke zur Stromproduktion genutzt werden kann. Durch Elektrolyse von Wasser kann daraus der Wasserstoff gewonnen werden. Mit üblichen Wirkungsgraden für Solarzellen, die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, die Wasserstoffelektrolyse, die Verflüssigung von Wasserstoff [11] und unter Berücksichtigung von Speicherverlusten ergibt sich ein Flächenbedarf von ~90.000 km<sup>2</sup> zur Stromproduktion. Dies entspricht nur etwa der 1,2-fachen Größe von Bayern bzw. 0,17% der Wüstenflächen der Erde (siehe BILD 7), so dass eine Energieversorgung der Luftfahrt mit solarem Wasserstoff

durch den Flächenbedarf nicht eingeschränkt ist.

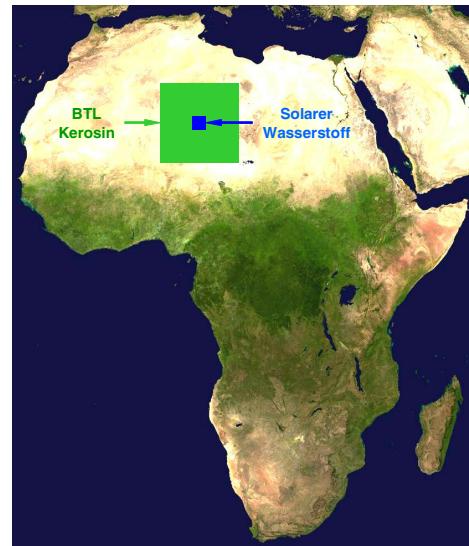


BILD 7. Flächenbedarf zur Energieversorgung der Luftfahrt

Neben den bisher beschriebenen Verfahren zur Herstellung von synthetischem Kerosin und Wasserstoff werden weitere Verfahren diskutiert, deren Potential allerdings noch unsicher ist. So hat das DLR bereits vor einigen Jahren ein solarthermisches Verfahren zur direkten Spaltung von Wasser in Wasserstoff mittels thermo-chemischer Kreisprozesse demonstriert und vor kurzem eine Solarversuchseinrichtung in Spanien in Betrieb genommen [12] und die Sandia National Laboratories arbeiten sogar an der direkten Umwandlung von CO<sub>2</sub> in synthetische Kraftstoffe durch Sonnenenergie [13].

## 4. TECHNOLOGIEENTWICKLUNG

Die Umstellung der Luftfahrt auf alternative Brennstoffe kann die Ressourcen und Klimaprobleme nicht allein lösen. Alternative Brennstoffe werden voraussichtlich höhere Kosten verursachen und benötigen große Flächen, so dass zur Begrenzung des Energiebedarfs die Effizienz des Luftverkehrssystems weiter gesteigert werden muss.

### 4.1. Antrieb

Einen wesentlichen Teil der Verbesserungen muss das Triebwerk liefern. Da der Gesamtwirkungsgrad eines Flugtriebwerks vom Vortriebswirkungsgrad (Umsetzung der Strömungsgeschwindigkeit in Schub) und dem thermischen Wirkungsgrad (Gasturbinenkreisprozess) abhängt, eröffnen sich zwei grundsätzlich verschiedene Wege zu verringertem Brennstoffverbrauch. Die großen Verbesserungen in der Effizienz von Flugtriebwerken in den letzten 50 Jahren beruhen vor allem auf höheren Vortriebswirkungsgraden durch ein gesteigertes Bypassverhältnis und höheren thermischen Wirkungsgraden infolge höherer Brennkammeraustrittstemperaturen und Gesamtdruckverhältnisse. Hier werden jedoch zunehmend Grenzen erreicht, die nur mit neuen Konzepten überwunden werden können.

#### 4.1.1. Hochbypasstriebwerke

Bereits ab 2013 werden daher die ersten sogenannten Getriebefan Triebwerke (BILD 8) zum Einsatz kommen, die mit einem Getriebe den Fan von der Niederdruckturbine entkoppeln und so optimale Drehzahlen für beide Komponenten ermöglichen.

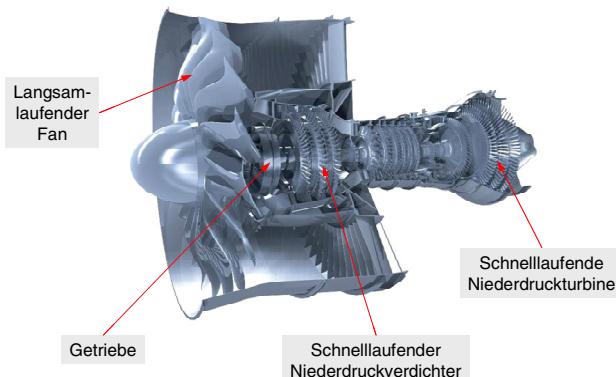


BILD 8. Getriebefan Triebwerk

Der Wunsch nach immer höherem Bypassverhältnis für niedrige Lärmemission und hohen Vortriebswirkungsgrad stößt beim konventionellem Turbofantriebwerk an Grenzen. Der große Fan muss immer langsamer drehen und zwingt damit der Niederturbine Drehzahlen auf, die große Stufenzahlen (hohes Gewicht) und schlechte Wirkungsgrade bedingen. Damit ergibt sich trotz steigendem Bypassverhältnis ein ungünstiger Brennstoffverbrauch (BILD 9). Mit einem Getriebe kann dagegen ein schnelllaufendes Niederdrucksystem mit hohen Wirkungsgraden und geringen Stufenzahlen für niedriges Gewicht verwirklicht werden.

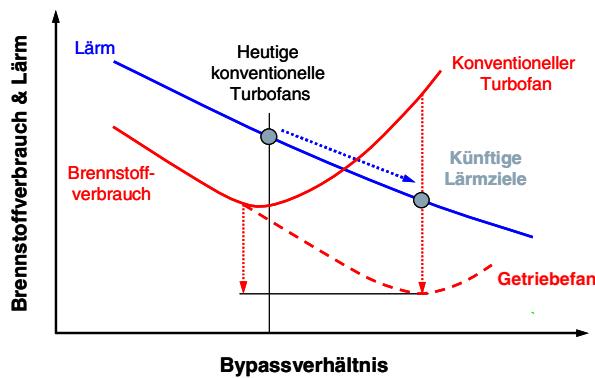


BILD 9. Vergleich von Brennstoffverbrauch und Lärmemission des konventionellen Turbofan Getriebefan-Triebwerks

Pratt & Whitney und MTU haben daher in einem umfangreichen Technologieprogramm in den vergangenen 20 Jahren die notwendigen Technologien erarbeitet (BILD 10). In allen Demonstratoren war MTU für die schnelllaufende Niederdruckturbine, die sich durch hohe mechanische Belastung und hohe Mach-Zahlen auszeichnet sowie für Verdichteranteile verantwortlich.

Das Getriebefankonzept verspricht Verbrauchsvorteile von 15% gegenüber einem Turbofan-Triebwerk des

Jahres 2000, so dass sowohl Mitsubishi für ihr Regionalflugzeug MRJ als auch Bombardier für die C-Serie den Getriebefan als Antrieb ausgewählt haben.



BILD 10. Technologie und Demonstratorprogramm zum Getriebefan

Flugtests am Flying Testbed von P&W einer B747 wurden bereits erfolgreich gestartet, so dass einer Markteinführung ab 2013 nichts mehr im Wege steht. Das Getriebefankonzept ist aufgrund seiner Verbrauchs vorteile natürlich noch besser für längere Flugstrecken geeignet, so dass der Getriebefan auch der optimale Antrieb für den B737- und A320-Nachfolger ist.

Durch Weglassen der Gondel kann das Bypassverhältnis noch weiter gesteigert werden und man erhält den Open Rotor. Für eine drallfreie und damit verlustarme Strömung müssen zwei gegenläufigen Rotoren verwendet werden. Die Entwicklung dieses Triebwerkskonzepts wurde bereits in den 80-er Jahren nach dem ersten Ölpreisschock in den USA von General Electric und Pratt&Whitney-Allison vorangetrieben.



BILD 11. Open Rotor Triebwerk P&W-Allison 578-DX

Beim GE36 von GE wurde der gegenläufige Rotor direkt von einer gegenläufigen Niederdruckturbine angetrieben während beim 578-DX von Pratt&Whitney, Hamilton Standard und Allison die Rotoren über ein Getriebe mit der Niederdruckturbine verbunden waren. Beide Triebwerke wurden an einer B727 bzw. MD80 Ende der 80-er im Flug getestet (Bild 11). Die Entwicklungen wurden jedoch wegen ungelöster Lärmprobleme und wieder sinkender Energiepreise gestoppt. Die Lärmemission lag in etwa auf dem Niveau der damals gültigen ICAO Stage 3 Vorschriften, so die Triebwerke heute nicht mehr zugelassen werden könnten. Gegenüber dem Getriebefan verspricht der Open Rotor zwar einen etwas geringeren Brennstoffverbrauch. Dem stehen allerdings deutlich höhere Lärmemissionen, Installationsprobleme und ungelöste Sicherheitsfragen gegenüber.

#### 4.1.2. Neue Kreisprozesse

Der thermische Wirkungsgrad eines Triebwerks konnte in der Vergangenheit durch immer höhere Temperaturen und Druckverhältnisse gesteigert werden. Auch hier sind allmählich technisch sinnvolle Grenzwerte für den normalen Gasturbinenprozess erreicht, so dass neue Kreisprozesse in Betracht gezogen werden müssen (BILD 12). In nationalen und europäischen Forschungsprojekten werden daher bereits Triebwerke mit Zwischenkühler und Abgaswärmetauscher untersucht. Der Zwischenkühler erlaubt bei gleichem Temperaturniveau deutlich höhere Druckverhältnisse und führt so zu einem verbesserten thermischen Wirkungsgrad. Triebwerke mit Abgaswärmetauscher gehen noch einen Schritt weiter und führen die Wärmeenergie im Abgas dem Triebwerk wieder zu.

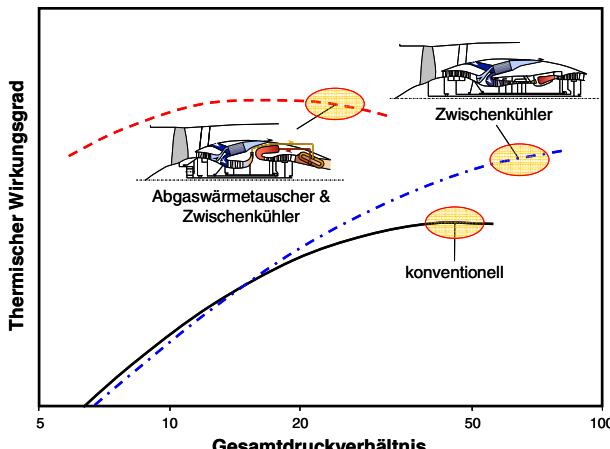


BILD 12. Thermischer Wirkungsgrad verschiedener Gasturbinenkreisprozesse

Daneben werden in Studien intensiv auch revolutionäre Konzepte verfolgt. Beispielsweise kann durch eine Zwischenüberhitzung mittels einer weiteren Brennkammer zwischen Hoch- und Niederdruckturbine die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr erhöht werden, so dass sich ein gesteigerter thermischer Wirkungsgrad ergibt. Genauso verspricht die Verbrennung bei konstantem Volumen (Constant Volume Combustion und Pulse Detonation) höhere thermische Wirkungsgrade. Diese Ansätze werden sicherlich noch längere Zeit bis zur Serieneinführung benötigen. Der erste Schritt zu neuen Kreisprozessen mit der Einführung eines Zwischenkühlers

hat dagegen bereits eine hohe Technologiereife erreicht.

#### 4.1.3. Claire Technologieprogramm

Zur Bewältigung der Zukunftsanforderungen hat MTU das Technologieprogramm Claire (Clean Air Engine Technology Program) definiert, das in 3 Schritten den Brennstoffverbrauch um 30% reduzieren soll (BILD 13).

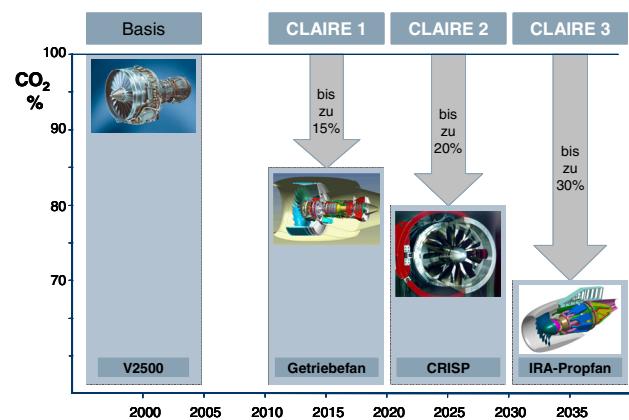


BILD 13. Claire Technologieprogramm

Die erste Stufe entspricht einem verbesserten Getriebefan-Triebwerk, das ab 2015 zur Verfügung steht. In der nächsten Stufe soll der Fan durch einen gegenläufigen Fan ersetzt werden. Die MTU hat bereits mit dem CRISP (Couter Rotating Integrated Shrouded Prop) Technologieprogramm die Grundlagen für gegenläufige ummantelte Fans erarbeitet. Der gegenläufige Fan verspricht Vorteile bei Wirkungsgrad und Durchsatz aber vor allem einen erweiterten Betriebsbereich, der die bei sehr hohen Bypassverhältnissen ansonsten erforderliche Verstelldüse oder Verstellschaufeln überflüssig machen kann.

Im dritten Schritt soll schließlich das Kerntriebwerk durch das schon angesprochene Wärmetauschertriebwerk ersetzt werden.

#### 4.1.4. Weitere Verbesserungen

Neben den beschriebenen grundlegenden Konzeptänderungen werden auch kontinuierliche Verbesserungen der Komponenten dem Antrieb helfen die Zukunftsanforderungen zu erfüllen. Besonders die Einführung aktiver Elemente wie z.B. Pump- und Spaltkontrolle im Hochdruckverdichter bietet bisher ungenutztes Potential.

Im Gesamtsystem Flugzeug/Antrieb gewinnt die optimale Integration des Triebwerks im Flugzeug wegen der hohen Bypassverhältnisse immer mehr an Bedeutung. Hier eröffnen sich durch verteilte Antriebe neue Möglichkeiten.

Alle Verbesserungen zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs führen automatisch zu verminderten CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen lassen sich zusätzlich durch die Einführung neuer Brennkammerkonzepte deutlich reduzieren. So werden in den laufenden Forschungsprojekten Konzepte zur Magerverbrennung entwickelt, die die NO<sub>x</sub>-Emissionen um bis zu 80% gegenüber den Zulassungsvorschriften (ICAO CAEP II) reduzieren.

## 4.2. Flugzeug

Ansätze zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs und damit der CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen beim Flugzeug sind eine verbesserte Aerodynamik (verringerte Strömungswiderstände), eine Verringerung des Gewichts (reduzierter Schubbedarf) und verbesserte Systeme (verringelter Energiebedarf).

Den größten Effekt verspricht die Laminarisierung der Strömung an Flügel, Leitwerken, Gondel und Rumpf, da laminare Grenzschichten deutlich geringere Reibungswiderstände als turbulente Grenzschichten verursachen. Normalerweise schlägt die Grenzschicht an Verkehrsflugzeugen nach einer gewissen Strömungslänge in eine turbulente Grenzschicht um. Durch gezielte Beeinflussung der Grenzschicht mittels Absaugen oder Aufbringen von Folien mit Mikrostrukturen ähnlich einer Haifischhaut (Rilets) lassen sich jedoch größere Gebiete mit laminarer Grenzschicht und damit reduzierte Strömungswiderstände erzwingen.

Die Form der Flügel ist ein Kompromiss für verschiedene Flugzustände. Durch aktive Anpassung des Flügels (morphing aircraft) an die jeweils optimale Form lässt sich der benötigte Auftrieb bei minimalem Widerstand einstellen. Außerdem können durch solche Flügel die schweren und Strömungswiderstände verursachenden Klappen ersetzt werden.

Die verstärkte Nutzung kohlefaser verstärkter Bauteilen für Rumpf und Flügel ermöglicht deutliche Gewichtseinsparungen, die sich unmittelbar in einem reduzierten Verbrauch niederschlagen.

Durch den Ersatz der üblichen hydraulisch und pneumatisch betriebenen Systeme wie Aktuatoren, Pumpen, Enteisung und Kabinenbelüftung durch verteilte elektrisch betriebene Komponenten (more-/all-electric aircraft) lassen sich Energiebedarf und Gewicht senken. Längerfristig ist dabei auch eine emissionsfreie Energieerzeugung über Brennstoffzellen möglich.

Untersucht werden auch ganz neue Flugzeugkonzepte (siehe BILD 14) wie z.B. Nurflügler, die eine weitere Reduktion der Strömungswiderstände ermöglichen.



BILD 14. Beispiele für neue Flugzeugkonzepte (Airbus)

## 4.3. Luftverkehrsmanagement und Flugbetrieb

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) schätzt, dass das heutige Luftverkehrsmanagement 12% unnötige Flugbewegungen verursacht und dadurch 73 Mio. t CO<sub>2</sub> zusätzlich ausgestoßen werden [14]. Durch eine Harmonisierung der Flugsicherungssysteme können Flugrouten verkürzt und Warteschleifen vermieden werden, so dass zumindest ein Teil dieser unnötigen CO<sub>2</sub>-Emissionen entfällt. In Europa wird deshalb die Einführung des Single European Sky angestrebt.

Weiterhin kann durch langsameres Fliegen, das sich auf Kurzstrecken kaum auf die Flugzeit auswirkt, aufgrund des reduzierten Luftwiderstands der Verbrauch gesenkt werden. Insbesondere bei verstärkter Nutzung von Turbopropantrieben oder bei Einführung des Open Rotors muss auf diese Option zurückgegriffen werden.

Für Langstreckenflüge bietet sich die Luftbetankung an, da die Menge des mitgeführten Brennstoffs und damit der Schubbedarf reduziert werden kann. Durch engen Formationsflug können Flugzeuge ihren Energiebedarf ebenfalls reduzieren. Die dafür notwendigen technischen Änderungen am Flugzeug (Betankungsmöglichkeiten, automatische Steuerungen) sind prinzipiell verfügbar.

## 5. GESAMTERGEBNIS

In Summe weisen die angeführten Technologien ein überwältigendes Potential zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten Jahren auf wie Bild 15 zeigt (Werte nach [15]).

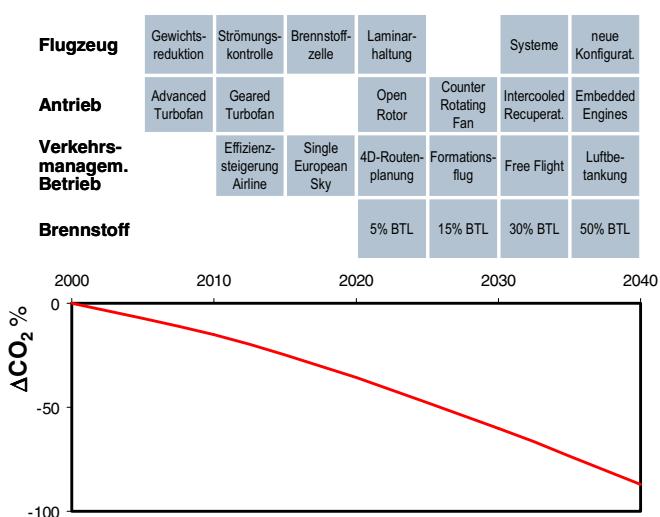


BILD 15. Erwartete Reduktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Luftverkehr

Im Durchschnitt ergibt sich eine jährliche Reduktion von 5% und damit die vollständige Kompensation des Verkehrswachstums. Einen wesentlichen Anteil an diesem Erfolg hat die Einführung von synthetischem Kerosin aus Biomasse. Doch auch die technologischen Verbesserungen liegen mit 3,3% pro Jahr über den 2%, die in jüngster Zeit erreicht wurden. Wenn es gelingt, die in Bild 15 angeführten Technologien umzusetzen, werden die

CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich langsamer anwachsen als in der Vergangenheit und ab dem Jahr 2035 ist erstmals eine Verminderung der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Luftfahrt möglich (BILD16).

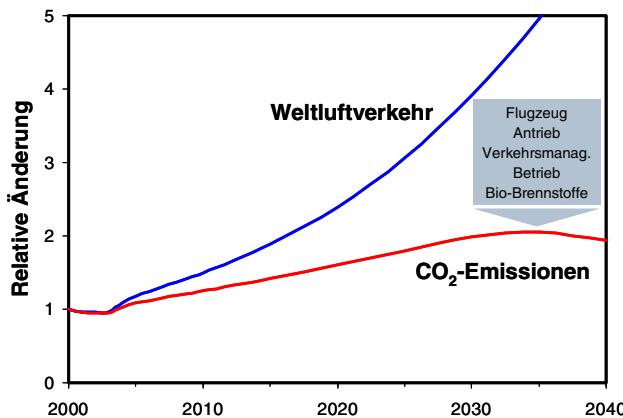


BILD 16. Entwicklung der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Luftverkehr bei Umsetzung der Maßnahmen entsprechend BILD 15

Die geforderte Reduktionen der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 20% bis zum Jahr 2020 gegenüber dem Stand von 1990 kann die Luftfahrt jedoch nicht erreichen. Deshalb muss die Luftfahrt im kurz- bis mittelfristigen Bereich den durch das starke Verkehrswachstum bedingten Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch CO<sub>2</sub>-Reduktionen außerhalb des Luftfahrtbereichs kompensieren. Die IATA (International Air Transport Association) hat dazu ein 4-Säulenmodell [16] vorgeschlagen, das zusätzlich zu den hier beschriebenen Verbesserungen durch Technologien, Luftverkehrsmanagement und Betrieb noch ordnungspolitische Maßnahmen vorsieht.

## 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Ein Luftverkehr ist auch nach dem Ende der Ölrroräte möglich und die Bedürfnisse der Gesellschaft können weiter befriedigt werden.
- Synthetisches Kerosin aus Biomasse und solarer Wasserstoff sind luftfahrtgeeignet und können eine nachhaltige und weitgehend klimaneutrale Energieversorgung der Luftfahrt sicherstellen.
- Eine vollständige Energieversorgung der Luftfahrt durch synthetisches Kerosin aus Biomasse von Landflächen ist wegen des großen Landbedarfs nicht möglich. Die Produktion von Kerosin aus Algen ist wegen der höheren Flächenerträge vielversprechend. Eine abschließende Bewertung von synthetischem Kerosin aus Algen ist zur Zeit noch nicht möglich.
- Zur Energieversorgung des Luftverkehrs ist langfristig auch der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft denkbar. Es sind jedoch erhebliche Investitionen in die Infrastruktur und große Änderungen am Flugzeug notwendig. Ein Umstieg auf Wasserstoff ist nur in einem abgestimmten Vorgehen mit den wichtigsten Energieverbrauchern und Energieversorgern sinnvoll.
- Eine Vielzahl von technologischen Verbesserungen an Flugzeug und Antrieb werden untersucht bzw. sind

bereits in der Entwicklung. Zusammen mit Verbesserungen beim Luftverkehrsmanagement und im Betrieb können noch erhebliche Effizienzsteigerungen erreicht werden, so dass der Energiebedarf, der durch alternative Brennstoffe abgedeckt werden, muss minimiert werden kann.

- Kurzfristige Forderungen nach einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Luftfahrt können nur im Rahmen des Emission Trading Systems durch Kompensation an anderer Stelle bewerkstelligt werden. Langfristig kann die Luftfahrt jedoch aus eigener Kraft den CO<sub>2</sub>-Ausstoss durch Technologien und erneuerbare Energien reduzieren.
- Wegen der langen Produktzyklen der Fluggeräte müssen die Untersuchungen zu alternativen Brennstoffen bereits heute gestartet werden. Die deutsche Luftfahrtindustrie hat daher im Rahmen des BDLI (Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie) das Projekt „Öko-effizientes Fliegen“ [17] gestartet, das langfristig klimaneutrales Fliegen ermöglichen soll.

## 7. SCHRIFTTUM

- [1] ASPO Association for the Study of Peak Oil and Gas, Newsletter No. 80
- [2] International Energy Agency IEA, World Energy Outlook 2007
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), [www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation](http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation)
- [4] Vorschlag der EU Kommission vom 23.01.2008 [www.ec.europa.eu/environment/climat/climate\\_action.htm](http://www.ec.europa.eu/environment/climat/climate_action.htm)
- [5] Umweltbundesamt Presse-Information 15/2006
- [6] IATA Press Release No. 21 04 June 2007
- [7] D. Daggett, O. Hadaller, R. Walther, Alternative Fuels and their Potential Impact on Aviation, ICAS 2006
- [8] A. Waibel, Luftverkehr und Klima, Lufthansa, Seminar Technische Universität München, 2008
- [9] R. Faaß, Cryoplane, Airbus, Hamburg 2001
- [10] Biokraftstoffe, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2006
- [11] J. Nitsch, Potentiale der Wasserstoffwirtschaft, Expertise für WBGU-Hauptgutachten, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, 2003
- [12] Start Projekt HYDROSOL II, DLR Mitteilung vom 31.03.2008
- [13] Sandia National Laboratories, Sandia's Sunshine to Petrol project seeks fuel from thin air, News Releases Dezember 5, 2007
- [14] G. Bisignani, Key Priorities for Developing Next Generation ATM Systems, IATA Maastricht, 2007
- [15] J. Szodruch, W. Grimme, E. Stumpf, Luftransport der Zukunft, [www.dglr.de/veroeffentlichungen](http://www.dglr.de/veroeffentlichungen)
- [16] Aviation & Climate Change, IATA, GIACC Montreal, February 26, 2008
- [17] Öko-effizientes Fliegen, Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie, Berlin, 2008