

## Luftfahrt und Klimawandel

---

*Relevanz alternativer Kraftstoffe und des  
EU Emissionshandels*

**Vorlesungsreihe von VDI, DGLR, RAeS  
25.06.2009, Hamburg, HAW**

**Dr. Andreas Kuhlmann  
Bauhaus Luftfahrt**

## Das Bauhaus Luftfahrt

### Als gemeinnütziger Verein 2005 gegründet von

- EADS (einschließlich Tochterunternehmen)
- Liebherr-Aerospace
- MTU Aero Engines
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

### Ein visionäres Systemhaus für die Luftfahrt

- Förderung der Kooperation zwischen der Industrie, der Wissenschaft und der Politik
- Interdisziplinäre Forschung in den Bereichen Wirtschaft, Technik und Design



**Ziel: Neue Lösungsansätze für die Mobilität von Morgen**



# Agenda

## Das Problem

- Die Klimadebatte, das Ressourcenproblem, die ACARE-Ziele

## Der Rahmen

- Die Anreize: Ökonomie des Umweltproblems
- Das Europäische Emissionshandels-System

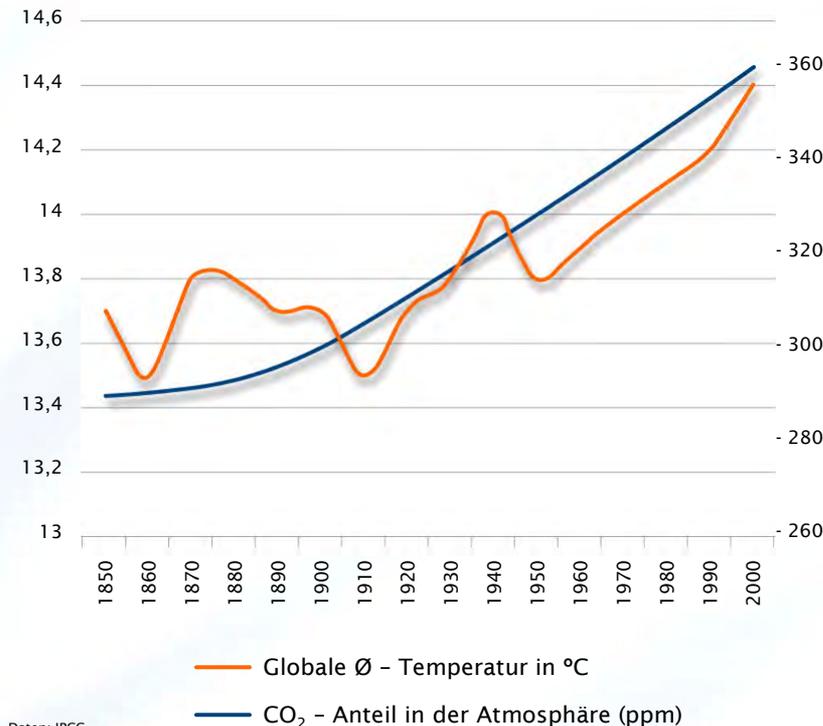
## Der mögliche Weg

- Alternative Kraftstoffe

# Der Klimawandel: Die Herausforderung des 21. Jahrhunderts



Bilder: © Fotolia.com



Seit Beginn der systematischen Aufzeichnung des Klimas ist die **Temperatur parallel mit der Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration** in der Atmosphäre kontinuierlich **angestiegen**.

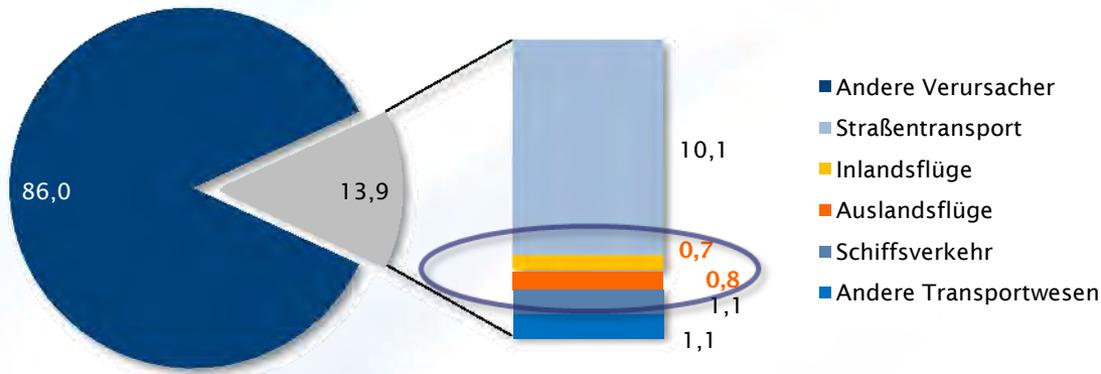
Der **vom Menschen verursachte Klimawandel** ist heute im wesentlichen **wissenschaftlicher Konsens**.

**Wie genau** aber welche menschliche Tätigkeit den Klimawandel beeinflusst, ist oft noch nicht bekannt.

Die gegenwärtige Debatte um Bio-kraftstoffe zeigt, dass das **Verständnis der Klimawirkungen in vielen Fällen noch unzureichend** ist.

# Der Klimawandel: die Rolle des Luftverkehrs

Globale Treibhausgasanteile nach Sektor (in %)



Daten: World Resources Institute, 2005



Der globale Luftverkehr verursacht **weniger als 2%** der Treibhausgasemissionen.

Durch **Höheneffekte** erreichen diese Abgase jedoch eine größere Klimawirkung.

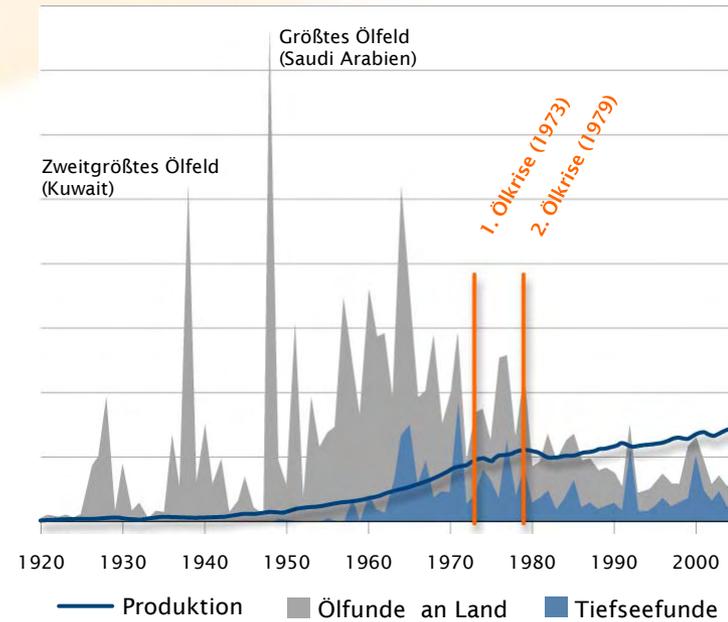
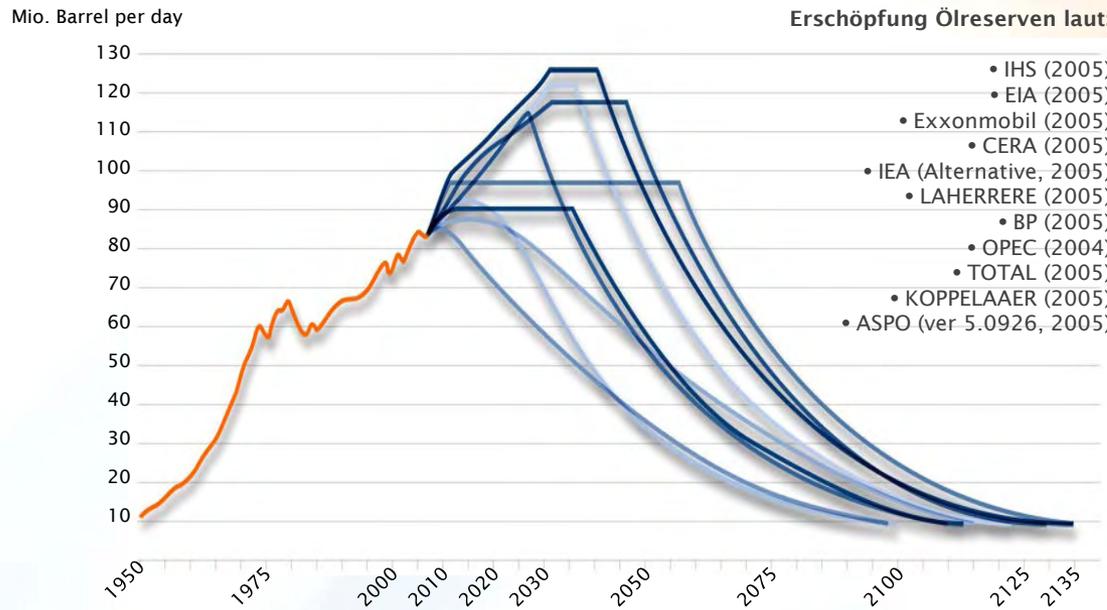
Wie stark genau dieser Effekt ist, ist jedoch noch immer umstritten.

*Einer Studie (2007) des Max Planck Instituts für Meteorologie zufolge liegt der Gesamteffekt bei 3-7%.*

*Einem aktuellen Artikel der IPCC-Autoren zufolge (2009) liegt der Gesamteffekt bei 4,9% (Unsicherheitsbereich: 2-14%), wenn man Zirrenbildung berücksichtigt.*

# Ressourcenknappheit – oder die Endlichkeit des Öls

## Globale Ölfunde und Ölproduktion



Quelle: Energy Watch Group. Crude Oil The Supply Outlook, 2007



## Die selbst auferlegten Ziele der Luftfahrt

- **ACARE Vision 2020**

- **50% Reduzierung der CO2 Emissionen** pro Passagierkilometer (RPK)
- 80% Reduktion der NOX Emissionen
- Halbierung des wahrgenommenen Fluglärms
- 5-fache Reduktion der Flugunfälle
- Luft-Transportsystem, das in der Lage ist 16 Millionen Flüge pro Jahr abzuwickeln
- 99% aller Flüge haben weniger als 15 min Verspätung

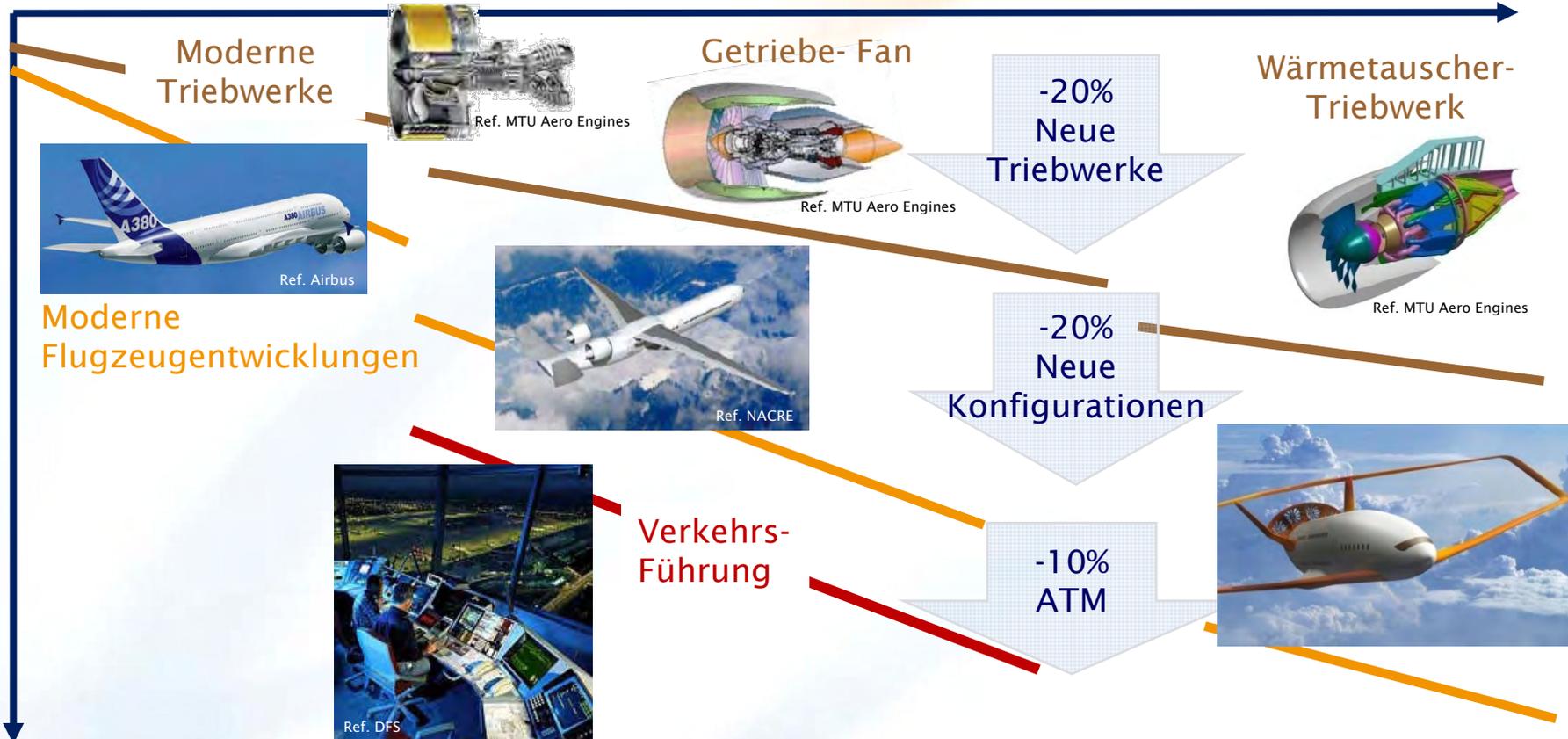
- **IATA**

- **Emissionsfreies Fliegen im Jahr 2050**
- Pressemeldung 04.07.2007, „IATA Calls for a Zero Emissions Future“

# Das ACARE-CO<sub>2</sub>-Ziel

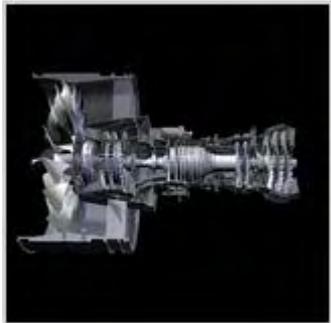
Verbrauchs - Niveau 2000

2020 Technologie



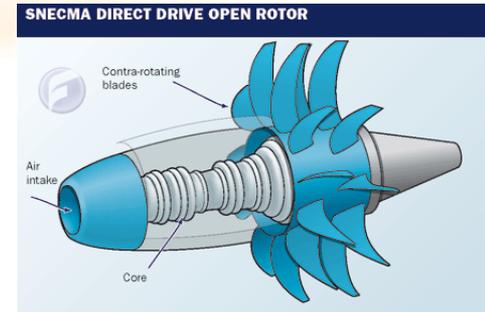
**50% Reduzierung von Verbrauch bzw. Emissionen bis 2020**

## Neue Triebwerkskonzepte



### Getriebefan

- Pratt & Whitney und MTU
- Fan und Turbine müssen nicht mehr in gleicher (jeweils suboptimaler) Geschwindigkeit laufen sondern können über ein Getriebe jeweils separat optimal eingestellt werden
- Potenzial: Experten erwarten 20-25%
- Erwartete Marktreife: 2013



### Open Rotor

- Rolls Royce und General Electric
- Erhebliche Verbesserung des Nebenstromverhältnisses
- Potenzial: Testergebnisse aus den 1980ern deuten auf Einsparpotenzial von 30% hin
- Erwartete Marktreife: 2017



# Agenda

## Das Problem

- Die Klimadebatte, das Ressourcenproblem, die ACARE-Ziele

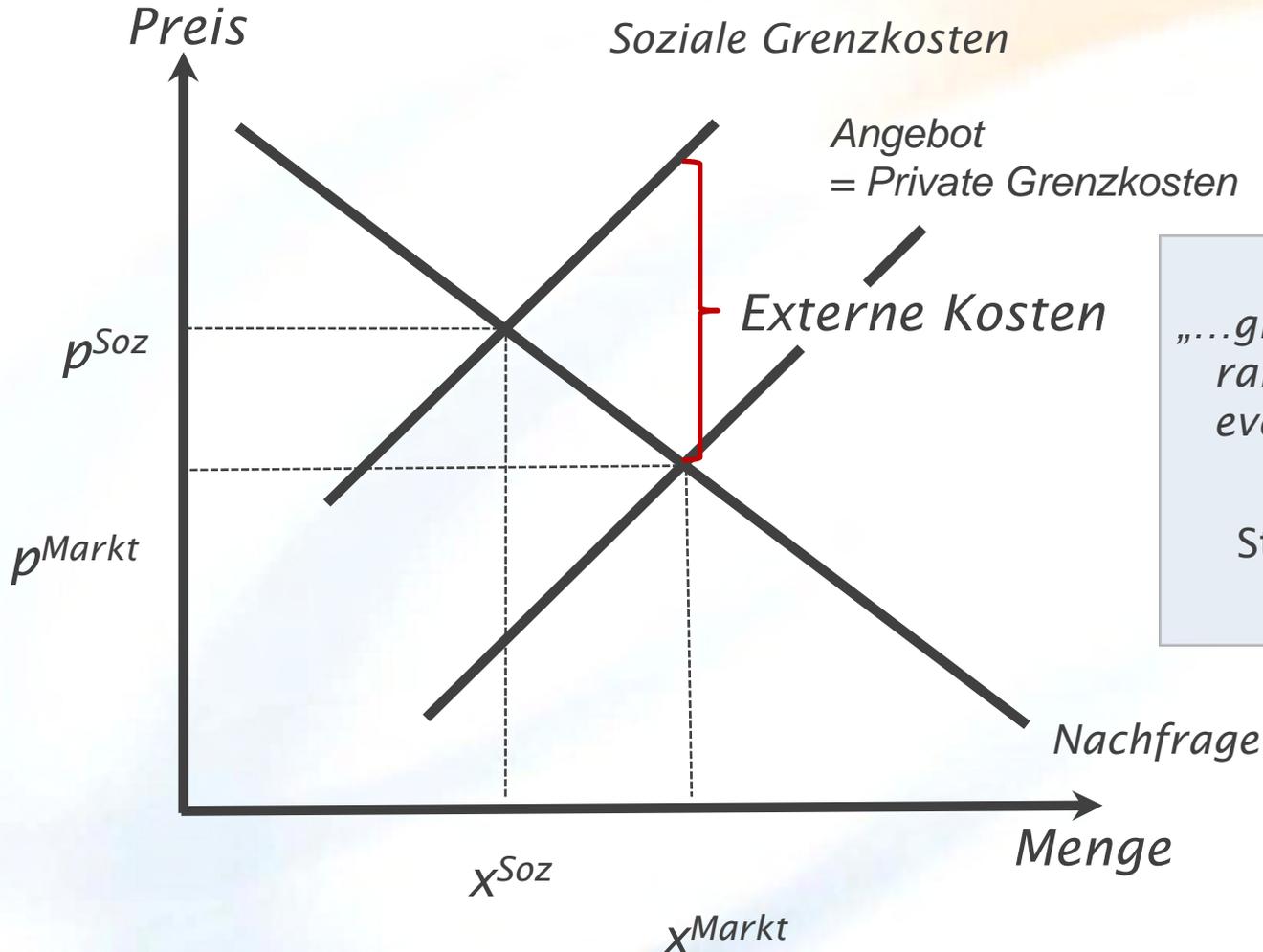
## Der Rahmen

- Die Anreize: Ökonomie des Umweltproblems
- Das Europäische Emissionshandels-System

## Der mögliche Weg

- Alternative Kraftstoffe

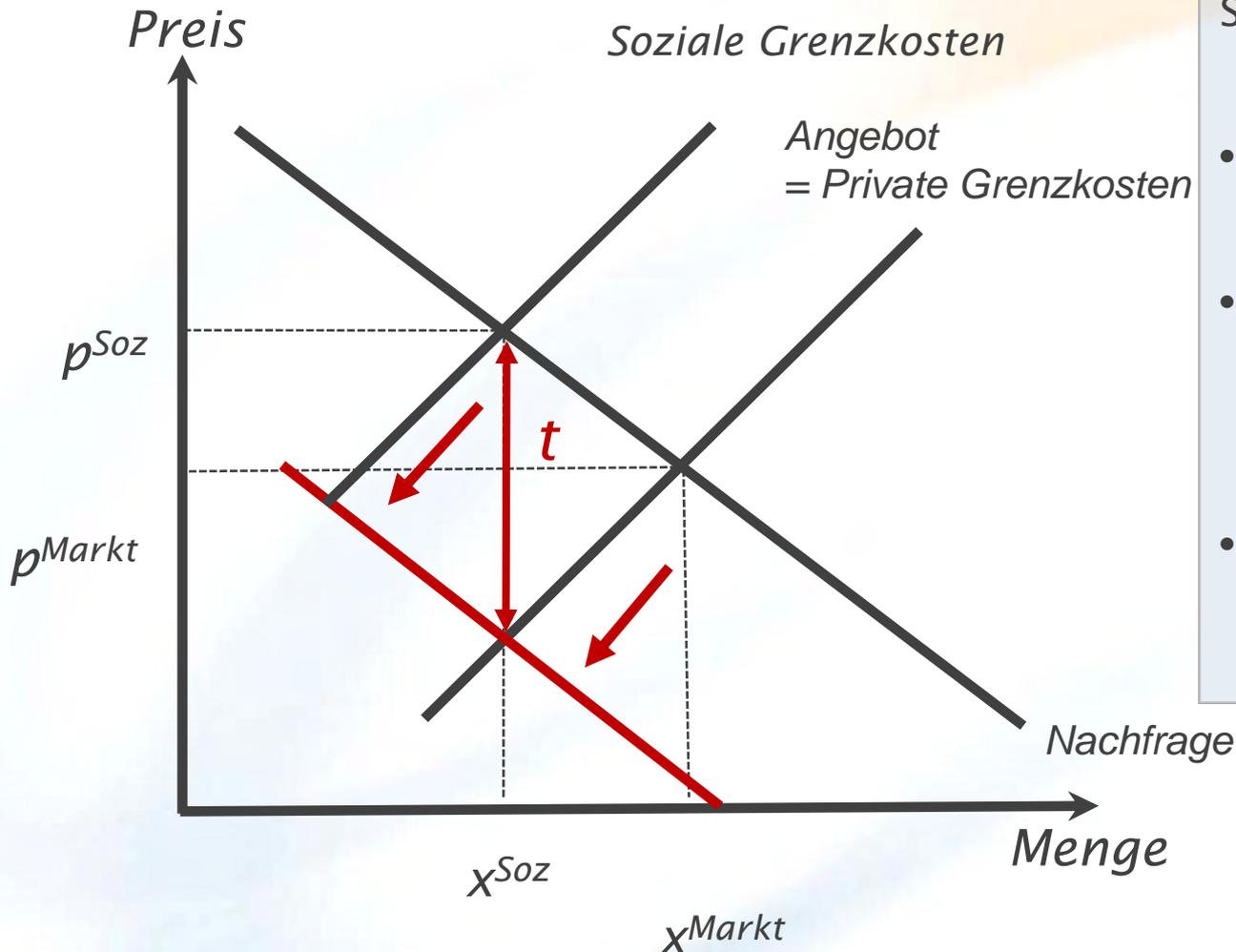
## Die Natur des Problems: Externe Effekte



„...greatest and widest ranging market failure ever seen.“

Stern Report (2006)

## Die Natur des Problems: Externe Effekte



### Steuern / Zertifikate

- Marktpreise werden simuliert.
- Reduziert die Nachfrage bis zum gewünschtem / optimalem Niveau
- Reduzierung erfolgt dort, wo es am kostengünstigsten ist.

# Agenda

## Das Problem

- Die Klimadebatte, das Ressourcenproblem, die ACARE-Ziele

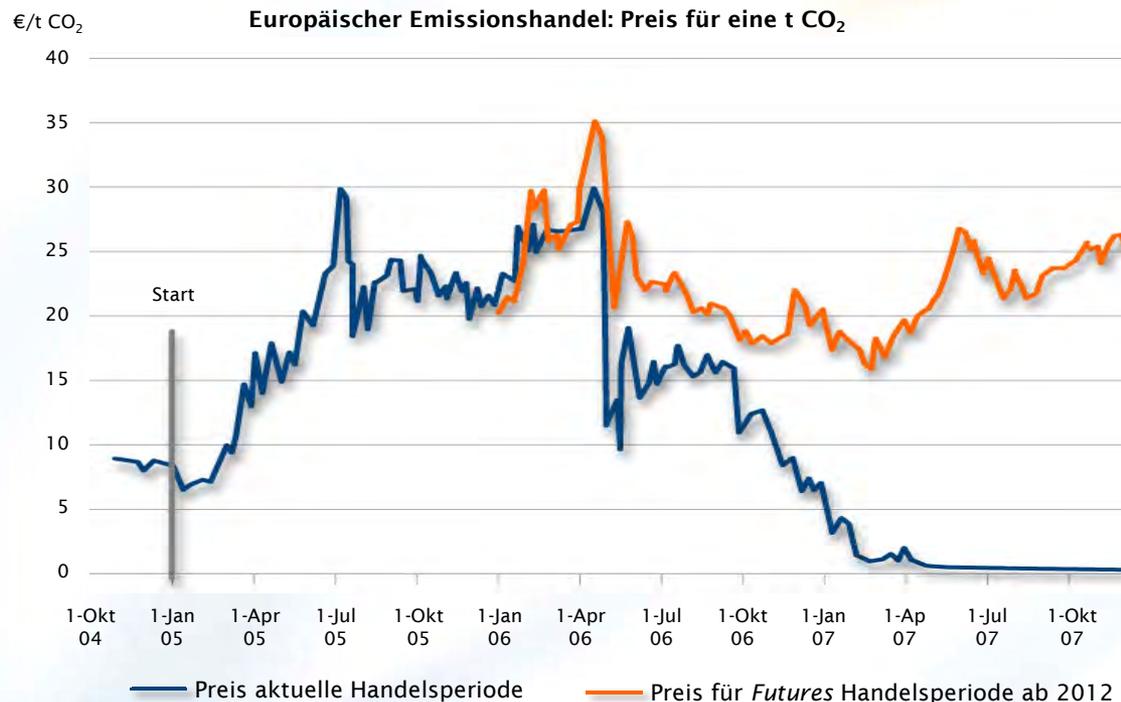
## Der Rahmen

- Die Anreize: Ökonomie des Umweltproblems
- Das Europäische Emissionshandels-System

## Der mögliche Weg

- Alternative Kraftstoffe

## Das Europäische Emissionshandels-System (ETS)



Bilder: © Fotolia.de Quelle: EEX

- Einführung 2005, zunächst v.a. für stationäre Kraftwerke und ausgewählte Industrien.
- 2. Handelsperiode: (Spot Preis): aktuell: 13 €
- Futures: 15 – 27 € (15,16 € für Dez. 2012 am 24.06.09)
- Volumen ETS: 2.298 Mio. tCO<sub>2</sub> (2007)  
2.081 Mio. tCO<sub>2</sub> (2008-2012)  
1.720 Mio. tCO<sub>2</sub> (2020)

# Die Luftfahrt im Europäischen Emissionshandel (ETS)

## Aktueller Stand

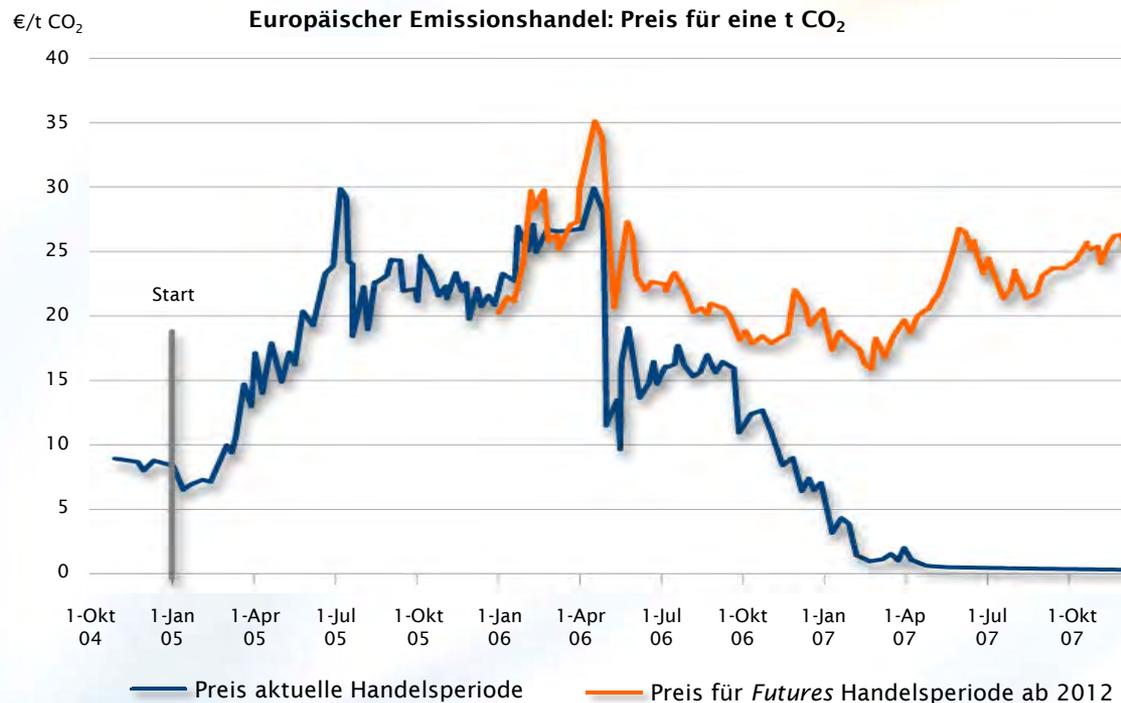
- **Gültigkeit:**
  - Ab 2012 alle Flüge die an einem **Flughafen in der EU starten oder landen** mit MTOW > 5,7t (z.B. nicht Cessna Citation I)
  - Betrifft **Ungefähr ein Drittel** der weltweiten RPK.
- **Zertifikate:**
  - Gesamtmenge: 97% (ab 2013 95%) der mittleren Emissionen von 2004–2006 → ca. 210 Mio. t CO<sub>2</sub> .
  - Kontingent: 15% der Zertifikate versteigert, potentiell höhere Anteile in den folgenden Jahren. Freie Zuteilung von 82%, 3% Reserve für Neue.
  - Zuteilung erfolgt pro Airline auf Basis der RTK im vorletzten Jahr
  - Offenes System: Zertifikate aus anderen Sektoren des ETS können gekauft werden.

## Die Luftfahrt im Europäischen Emissionshandel (ETS)

### Zeitlicher Ablauf bis Beginn

- **Monitoringkonzepte:** Übermittlung 31.08., Genehmigung 31.12.09
- **Überwachungszeitraum:** 01.01.-31.12.2010
  - Treibstoffverbrauch ist für jeden Flug / jeden Treibstoff zu überwachen (ab 10.000t CO<sub>2</sub> / Jahr) → ergeben mit Emissionsfaktoren CO<sub>2</sub>-Verbrauch
  - Emissionsfaktoren: Kerosin = 3.1, **Biomasse = 0**
- 31.03.2011 Übermittlung der geprüften Tonnenkilometerberichte
- 30.09.2011 EU-Kommission veröffentlicht Richtwert für die Zuteilung
- **31.12.2011** Entscheidung über die **Zuteilung**

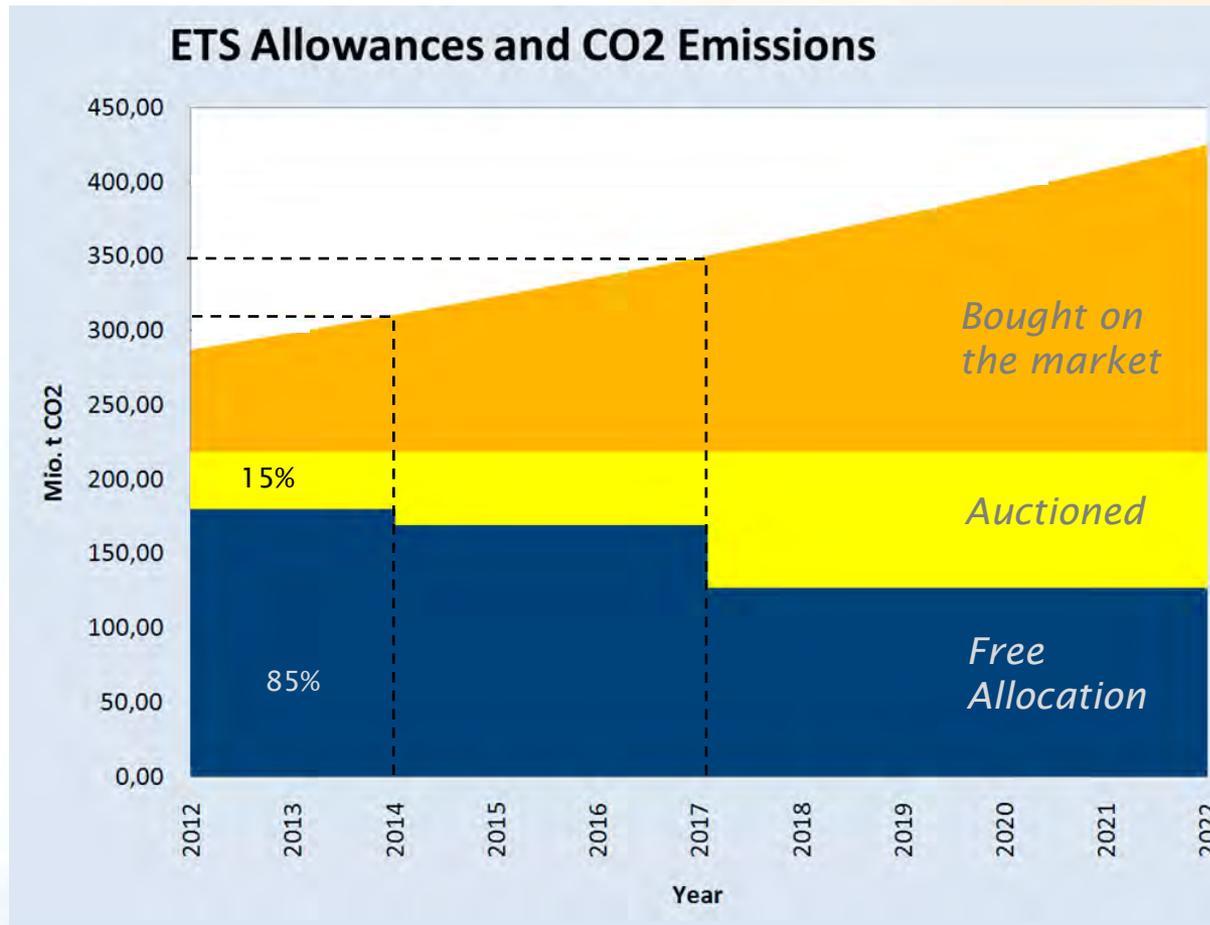
## Das Europäische Emissionshandels-System (ETS)



Bilder: © Fotolia.de Quelle: EEX

- **Für den Luftverkehr:**  
210 Mio. t zusätzlich,  
ca. 10% (Ø 2004 – 2006)
- **Wachstumsprognosen:**  
5% RTK, 4% CO<sub>2</sub>
- **Nachfrage** nach  
Zertifikaten in 2012:  
ca. 280 - 290 Mio. t
- Airlines werden  
erhebliche Mengen  
Zertifikate **am Markt  
zukaufen** müssen  
(offenes System!)

## Das Europäische Emissionshandels-System (ETS)



- **Kosten für Zertifikate 2012** (ersteigerte und neue, bei 10-30 €/tCO<sub>2</sub>):

755 - 2.265 Mio €

- **Kosten 2012-2020** (neue Zertifikate, 10-30 €/tCO<sub>2</sub>):

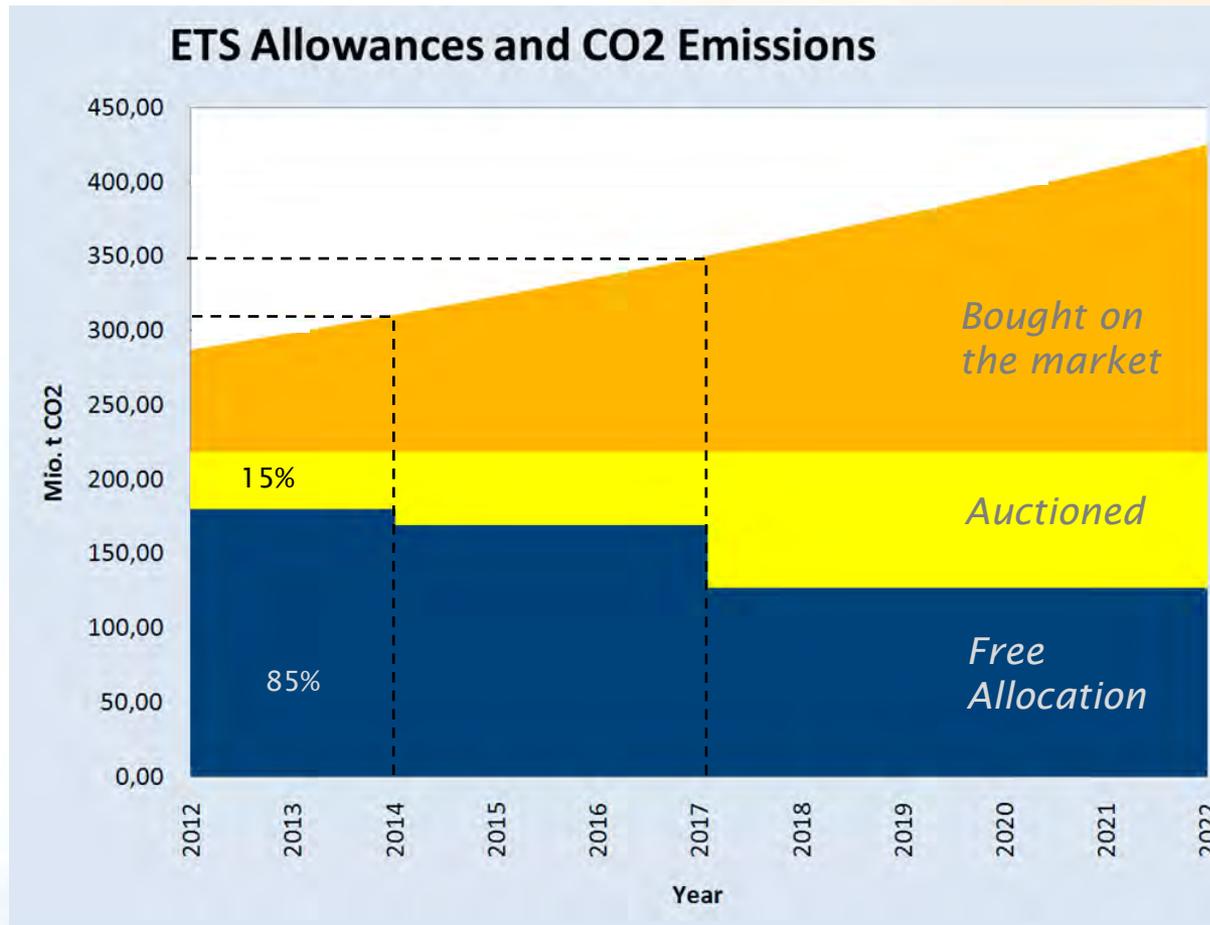
10.750 - 32.250 Mio €  
(akkumuliert)

- Für einen **typischen Anwender 2012**:

86 - 101 Mio €

(Quelle: DLR mit 20€/tCO<sub>2</sub>)

## Das Europäische Emissionshandels-System (ETS)



- Auswirkungen auf den **Ticketpreis** (EU Schätzung, 30€/tCO<sub>2</sub>):  
**5 - 40 Euro in 2020**
- Auswirkungen auf die Nachfrage (EU Schätzung). 2020 höchstens 7% weniger als 2005
- Aber: Reduktion der Nachfrage nicht das Ziel an sich.

**Reduktion der Emissionen erfolgt im stationären Bereich. Das ist ökonomisch gewünscht und kosteneffizient!!**

## Bewertung ETS Luftfahrt

- **Verzerrung des Wettbewerbs** durch Langstreckenflüge nichteuropäischer Fluglinien :
  - Für nicht-europäische Fluggesellschaften: Nur die **neusten Langstreckenflugzeuge** fallen unter das ETS (ohne Feeder-Flotte)
  - Für europäische Fluggesellschaften: Die **gesamte Flotte** (inkl. Feeder-Flotte).
  - Europäische Fluggesellschaften weisen dadurch **höhere mittlere Emissionen pro RTK** auf und bekommen entsprechend relativ weniger freie Zertifikate zugeteilt. (Zuteilung auf Basis der RTK)
  - **Umgehung** der europäischen Hubs bei Verbindungen zwischen Amerika und Asien.
- **Hohe Preisschwankungen und unsichere Preishöhe der Zertifikate** können den Anreiz, in neues Equipment zu investieren verringern.
- **Aber: Windfall-Profits** für die Fluglinien aufgrund frei zugeteilter Zertifikate.

## Bewertung ETS generell

- **Grundsätzlich richtiger Ansatz**
  - Ökonomisch sinnvolles Instrument
  - Kritikpunkte im Detail der Ausgestaltung
- **Problematisch** (klimapolitisch):
  - Leider nur Regional, nicht weltweit. → Problem der Leakage-Effekte: Verschiebung der Nachfrage in andere Länder, ein regionaler Ansatz löst nicht das Klimaproblem – *jedoch ist der Europäische Vorstoß ggf. ein notwendiger Stein, der einen internationalen Prozess ins Rollen bringt*
  - Alle Sektoren, die zum Klimawandel beitragen, müssen mit eingeschlossen werden. (Strenggenommen: Alle ökonomischen Aktivitäten die CO2 emittieren.)

## Agenda

### Das Problem

- Die Klimadebatte, das Ressourcenproblem, die ACARE-Ziele

### Der Rahmen

- Die Anreize: Ökonomie des Umweltproblems
- Das Europäische Emissionshandels-System

### Der mögliche Weg

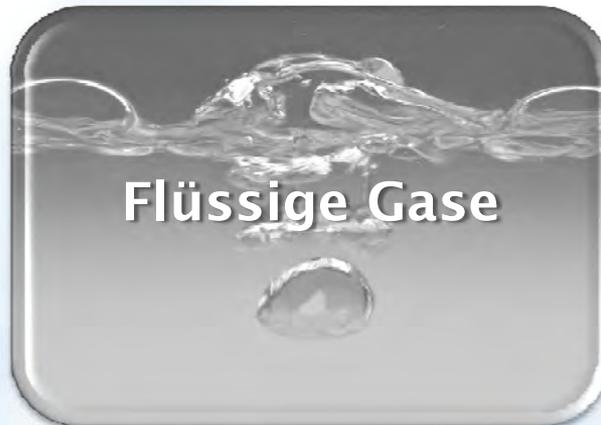
- Alternative Kraftstoffe

## Alternative Kraftstoffe



Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: *Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications*, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

## Alternative Kraftstoffe



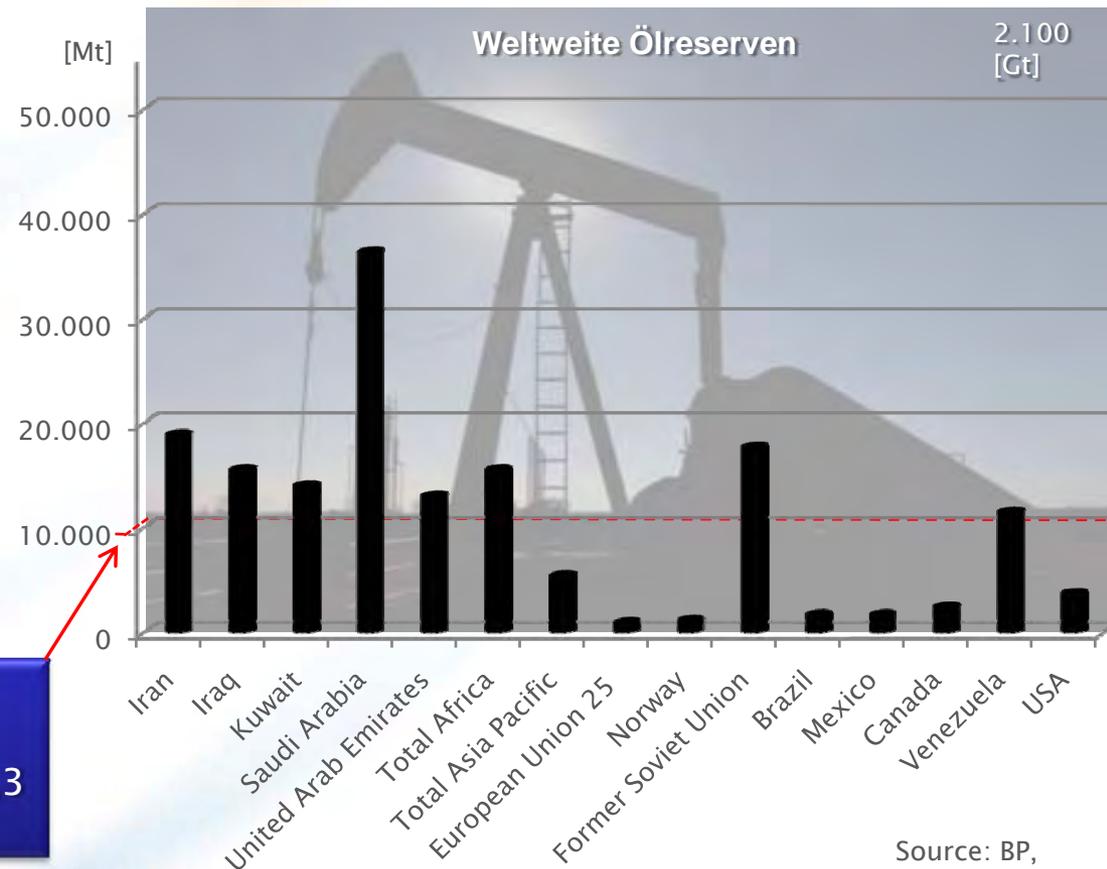
Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: *Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications*, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

## Kraftstoffe aus unkonventionellem Öl

- Ölsande (Kanada)
- Ölschiefer (USA)
- Schweröl (Venezuela)



Welt-Energie-  
nachfrage  
2007: 11099,3  
Mtoe



Source: BP, 2007

Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications, unveröffentlichtes Manuscript 2009

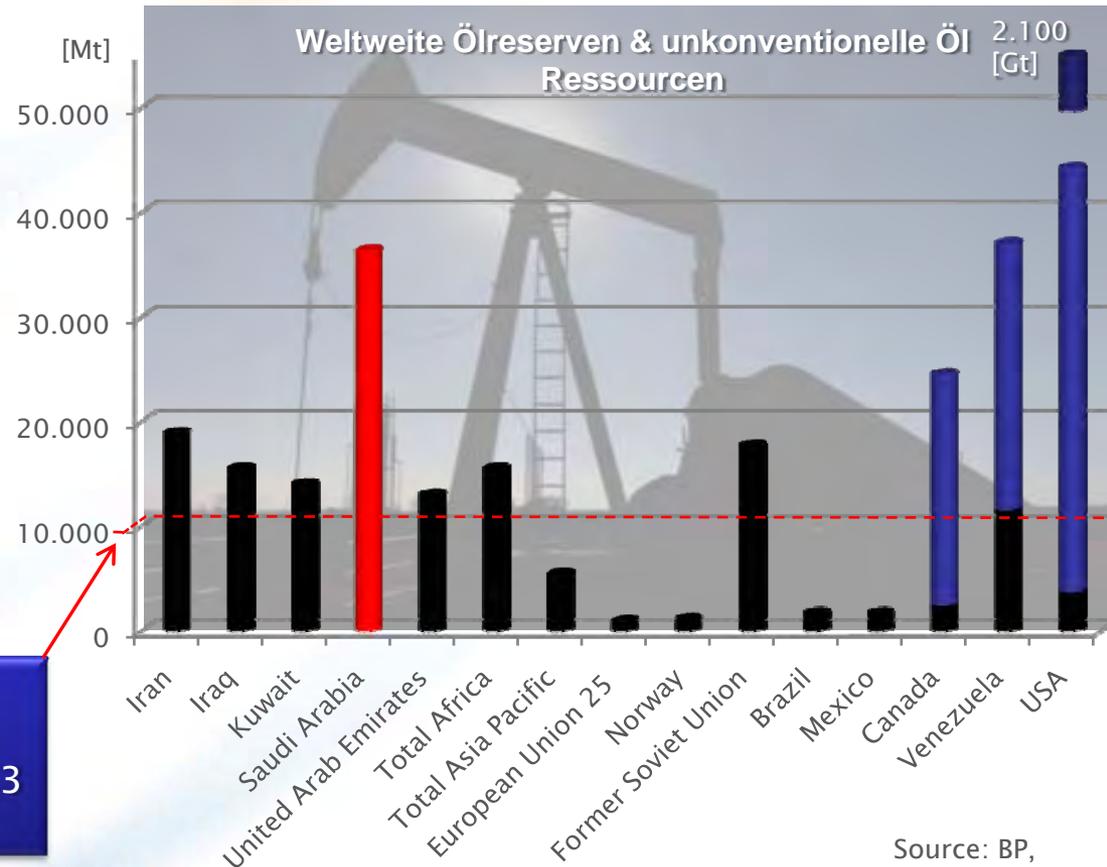
# Kraftstoffe aus unkonventionellem Öl



- Ölsande (Kanada)
- Ölschiefer (USA)
- Schweröl (Venezuela)

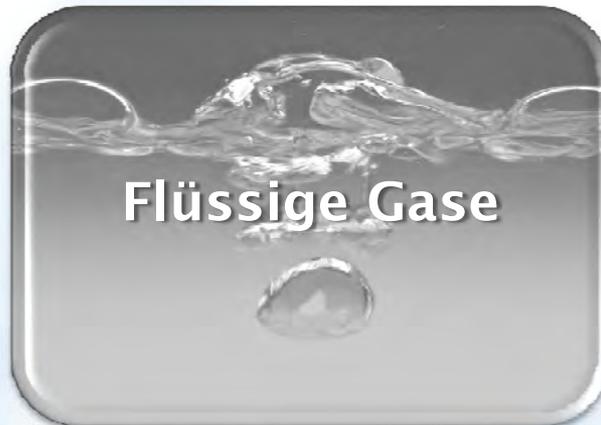


**Welt-Energie-nachfrage  
2007: 11099,3  
Mtoe**



Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications, unveröffentlichtes Manuscript 2007

## Alternative Kraftstoffe



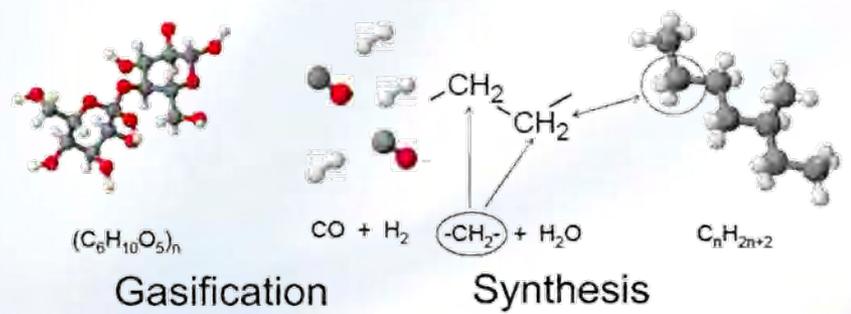
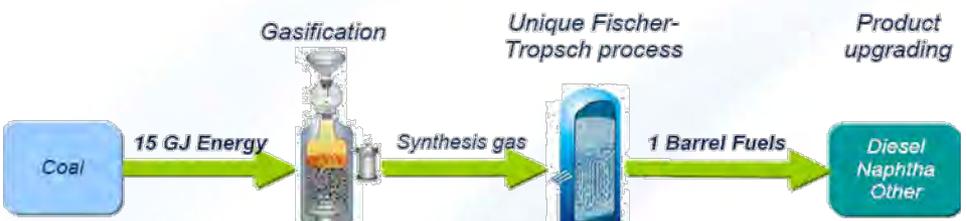
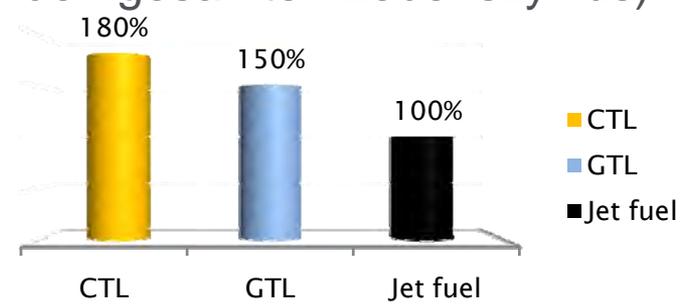
Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: *Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications*, unveröffentlichtes Manuskript, 2009



# Synthetische Kraftstoffe

- Coal-to-Liquid (CTL)
- Gas-to-Liquid (GTL)

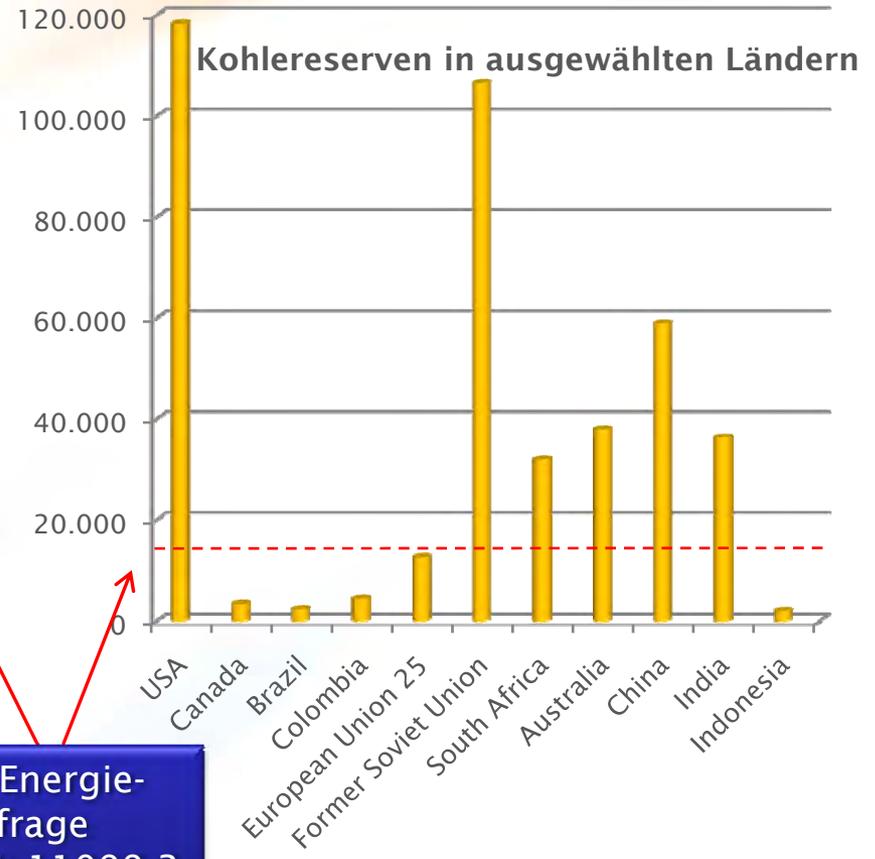
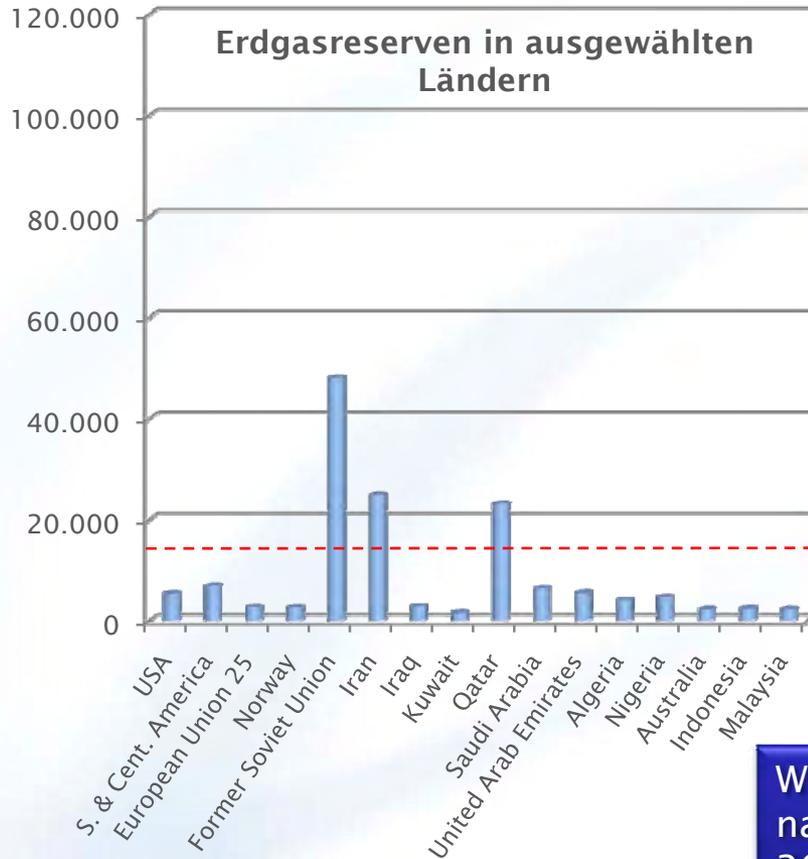
- Hoher Energiegehalt pro Masse und Volumen (~ Kerosin)
- Niedriger Gefrierpunkt: ~ -50 C
- Exzellente thermale Stabilität
- Kein Schwefelanteil
- (Fast) Keine Ruß-Partikel
- **Beimischungsfähig**
- Aber: hohe CO<sub>2</sub> Emissionen (über den gesamten Lebenszyklus):



Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications, u... Quelle: Daggett et al. 2007



# Synthetische Kraftstoffe

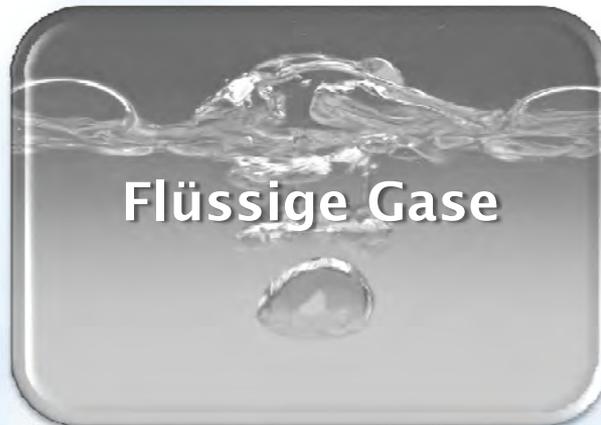


**Welt-Energie-nachfrage  
2007: 11 099,3  
Mtoe**

Quelle: BP, 2008

Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

## Alternative Kraftstoffe



Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: *Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications*, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

## Biokraftstoffe (1. Generation)



**Ethanol**  
(aus Zuckerrohr, Zuckerrübe,  
Mais, Weizen)

**Biodiesel**  
(Raps, Soja, Palmöl, Babassu,  
Jatropha, etc.)

- Signifikante Probleme für Triebwerk und Flugzeugzelle – z.B. bzgl. **Gefrierpunkt** und **Thermostabilität**
- **Niedrigerer Energiegehalt** als bei Kerosin
- **Niedriger Flächenertrag** (außer bei Zuckerrohr und Ölpalme)
- Wettbewerb zwischen **Kraftstoff-** und **Ernährungspflanzen**
- **Beschränkte Beimischungsfähigkeit**
- Praktikabel für Kolbenmotoren



Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

## Biokraftstoffe (nächste Generation)



Ethanol  
(Zellulose)

Butanol  
(Fermentation aber  $\neq$  Ethanol)

Biomass-to-Liquid (BTL)  
(Chinaschilf, Miscanthus,  
schnellwachsende Bäume)

Hydrierte Pflanzenöle (HVO)  
(Raps, Soja, Palmöl, Babassu,  
Jatropha, etc.)

- Hoher Energiegehalt (~ Kerosin), außer Ethanol & Butanol
- BTL: Synfuel wie CTL & GTL
- HVO: vielversprechender Bio-Flug-Kraftstoff (ähnlich zu BTL)
- Beimischungsfähig (außer: Ethanol & Butanol)



Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

## Biokraftstoffe (Rohstoffe der nächsten Generation)



Algen

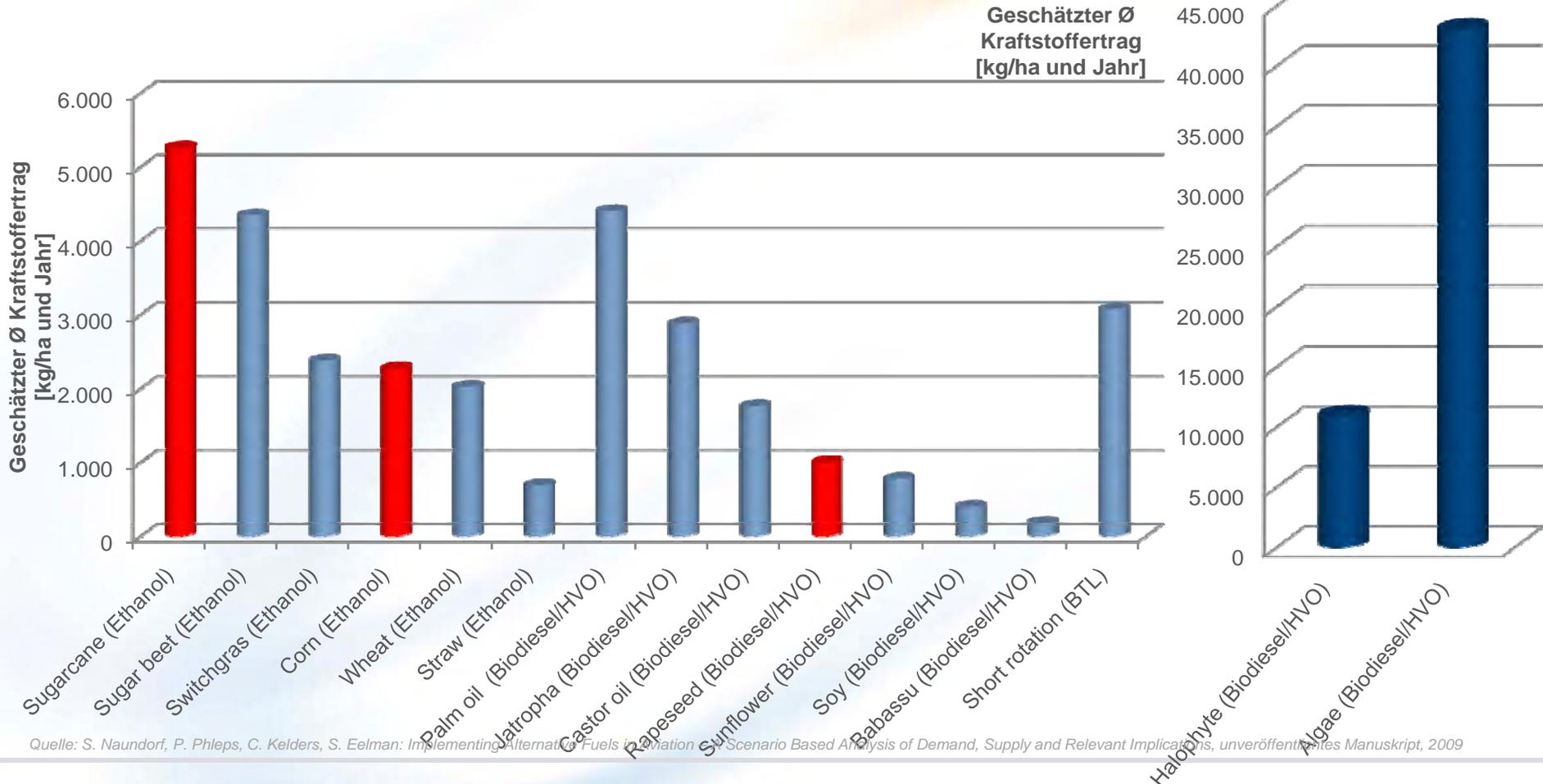
Halophyte

- **Kein Wettbewerb** mit Agrarflächen (wächst auf Flächen, die für die Landwirtschaft ungeeignet sind)
- Ø geschätzte jährliche **Flächenerträge** sind **extrem hoch**
- Aber...
- **Großtechnische Produktion** und Pflanzung ist bisher unerprobt
- Bisher noch kein Algen-Stamm mit der richtigen **Kohlenstoff-Kettenlänge** gefunden



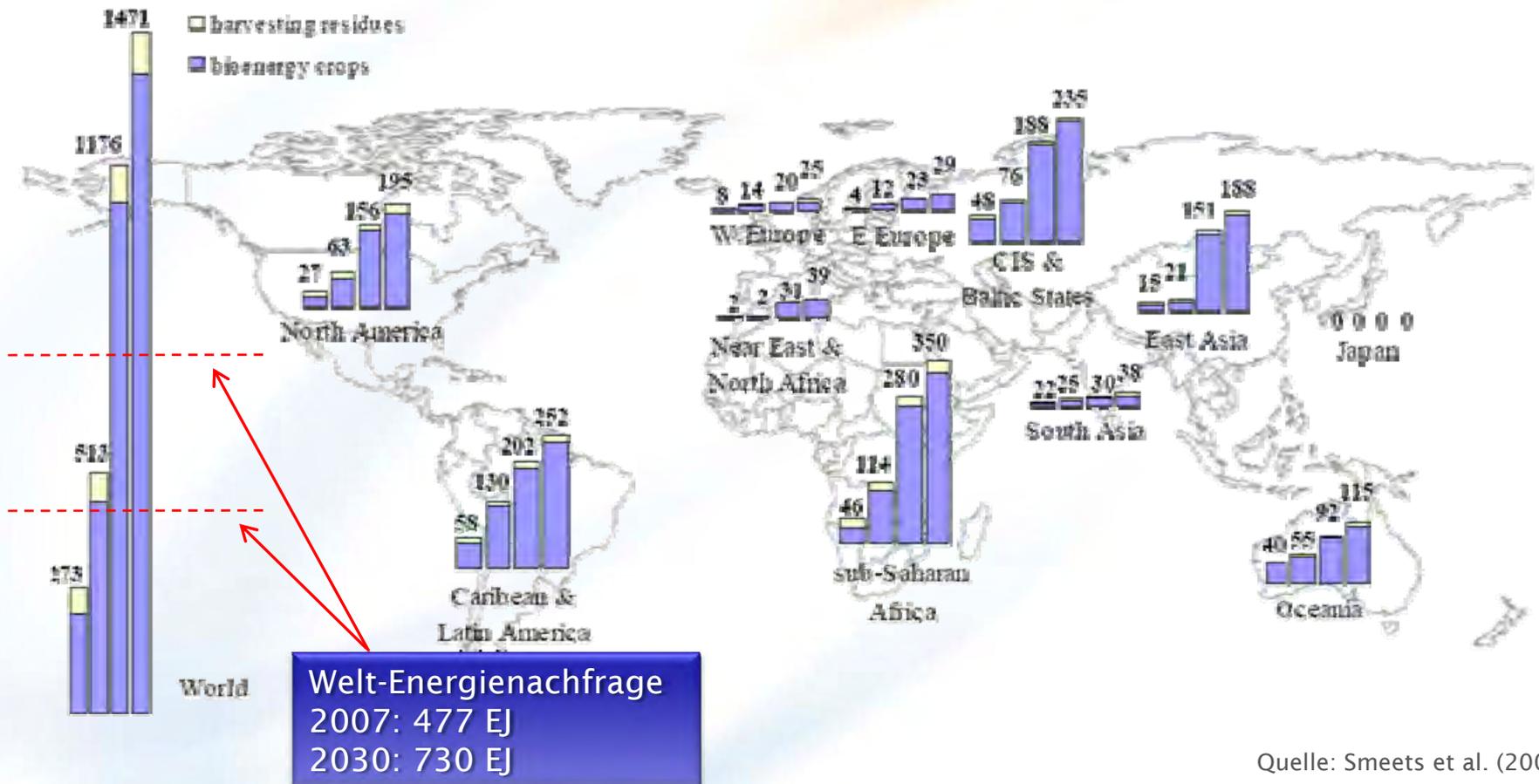
Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

# Potenzial: Kraftstofffertrag pro Hektar

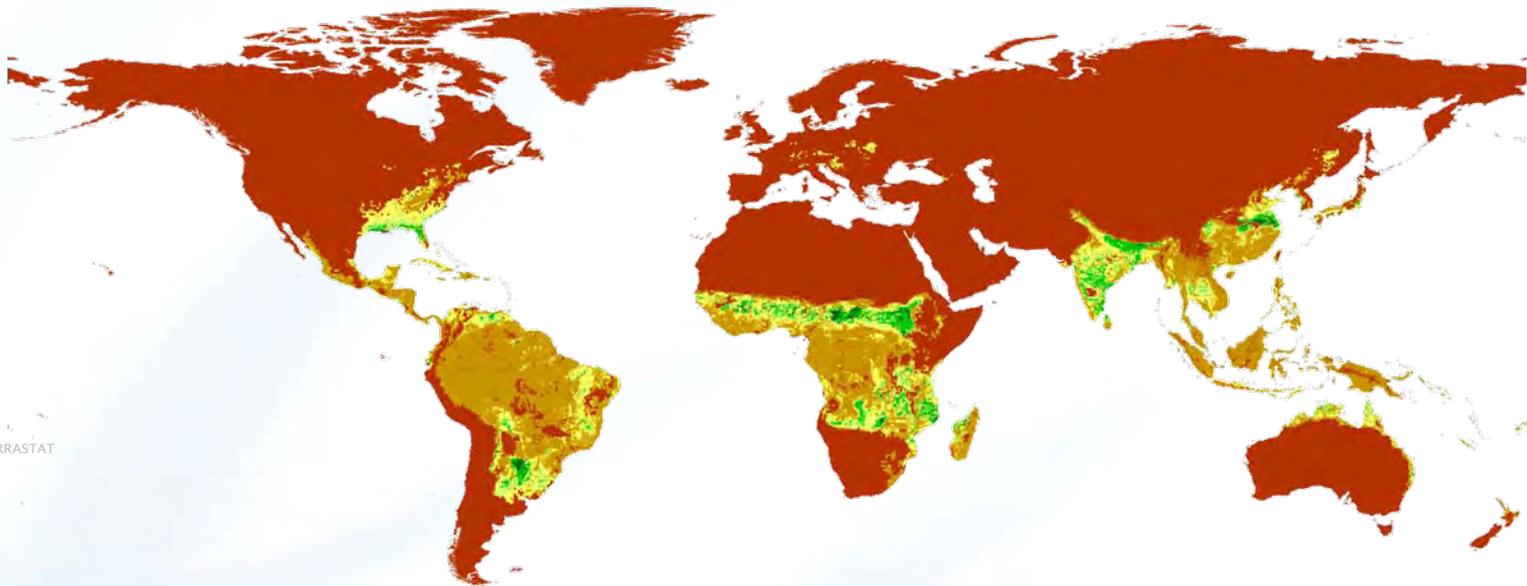


Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: Implementing Alternative Fuels in Aviation - A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

# Potenzial von Biokraftstoffen (Szenarien für 2050)



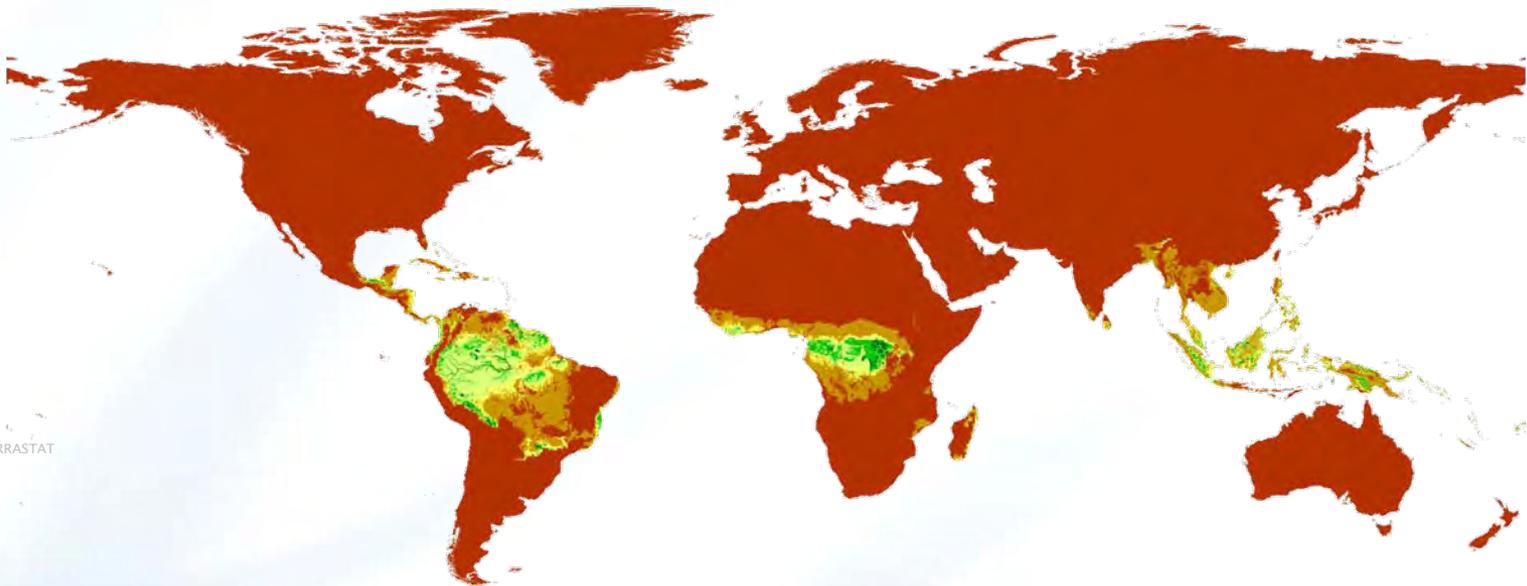
# Regionale Verfügbarkeit



Karte: FAO/AGL TERRASTAT

Mais

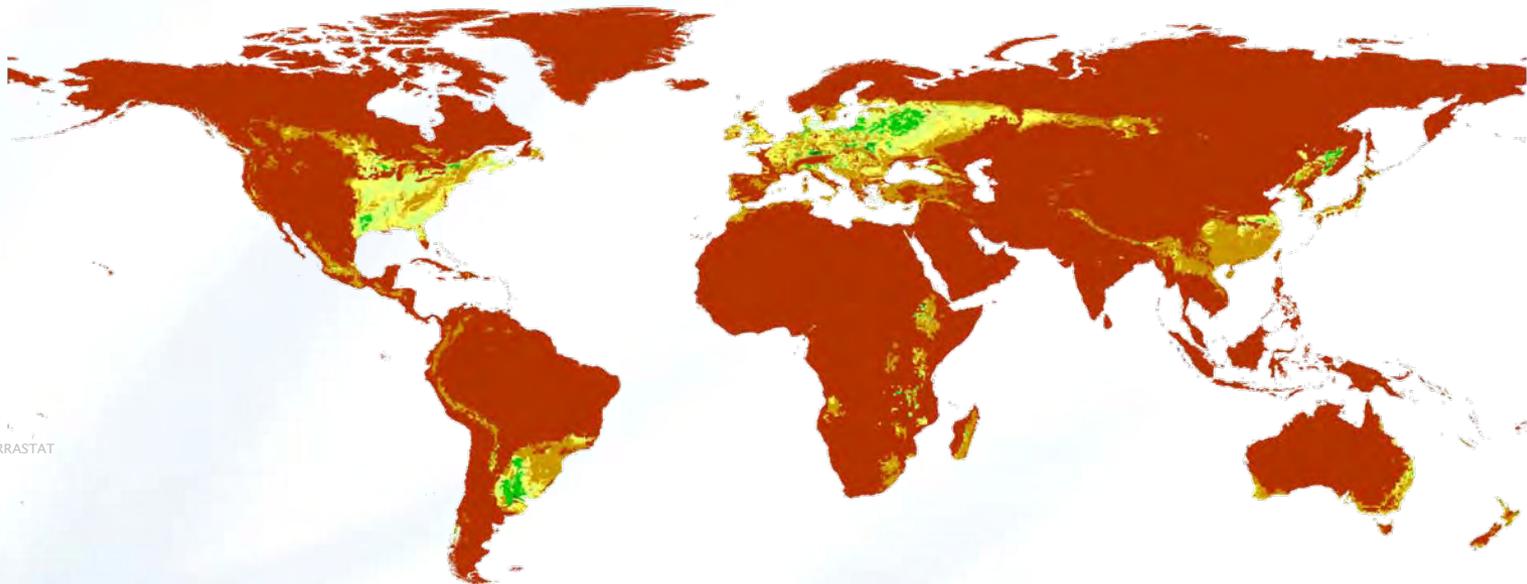
## Regionale Verfügbarkeit



Karte: FAO/AGL TERRASTAT

Ölpalme

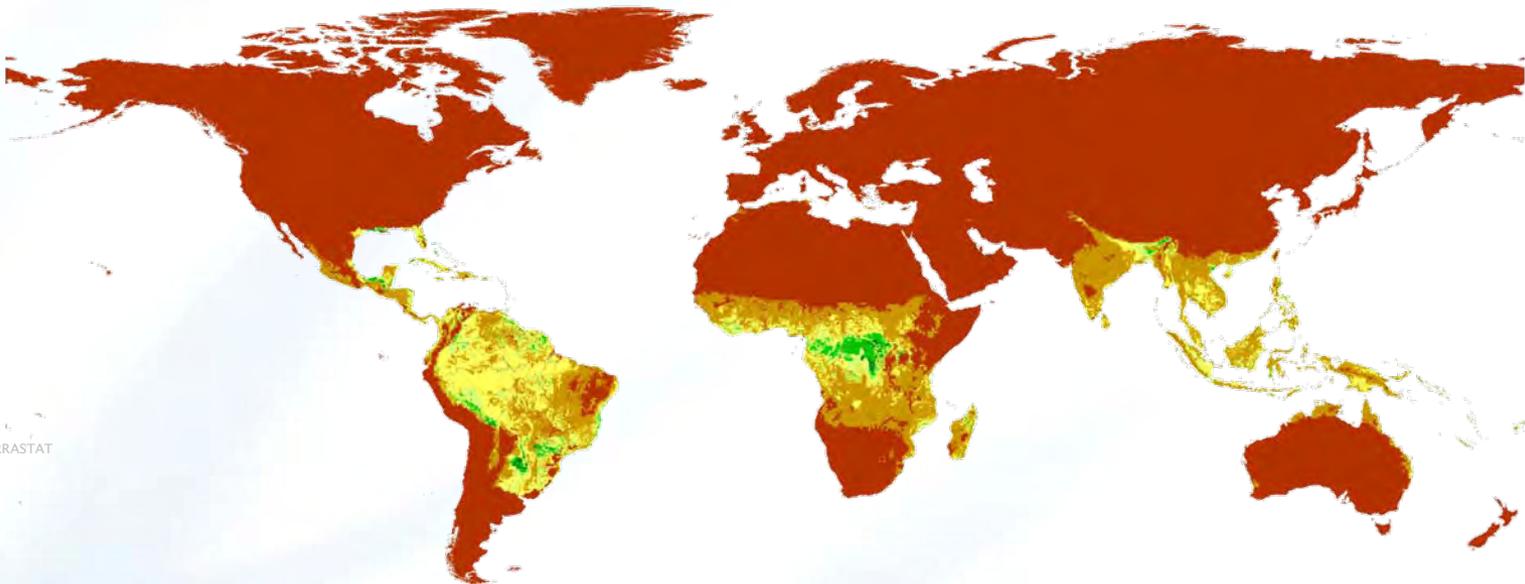
# Regionale Verfügbarkeit



Karte: FAO/AGL TERRASTAT

Raps

## Regionale Verfügbarkeit



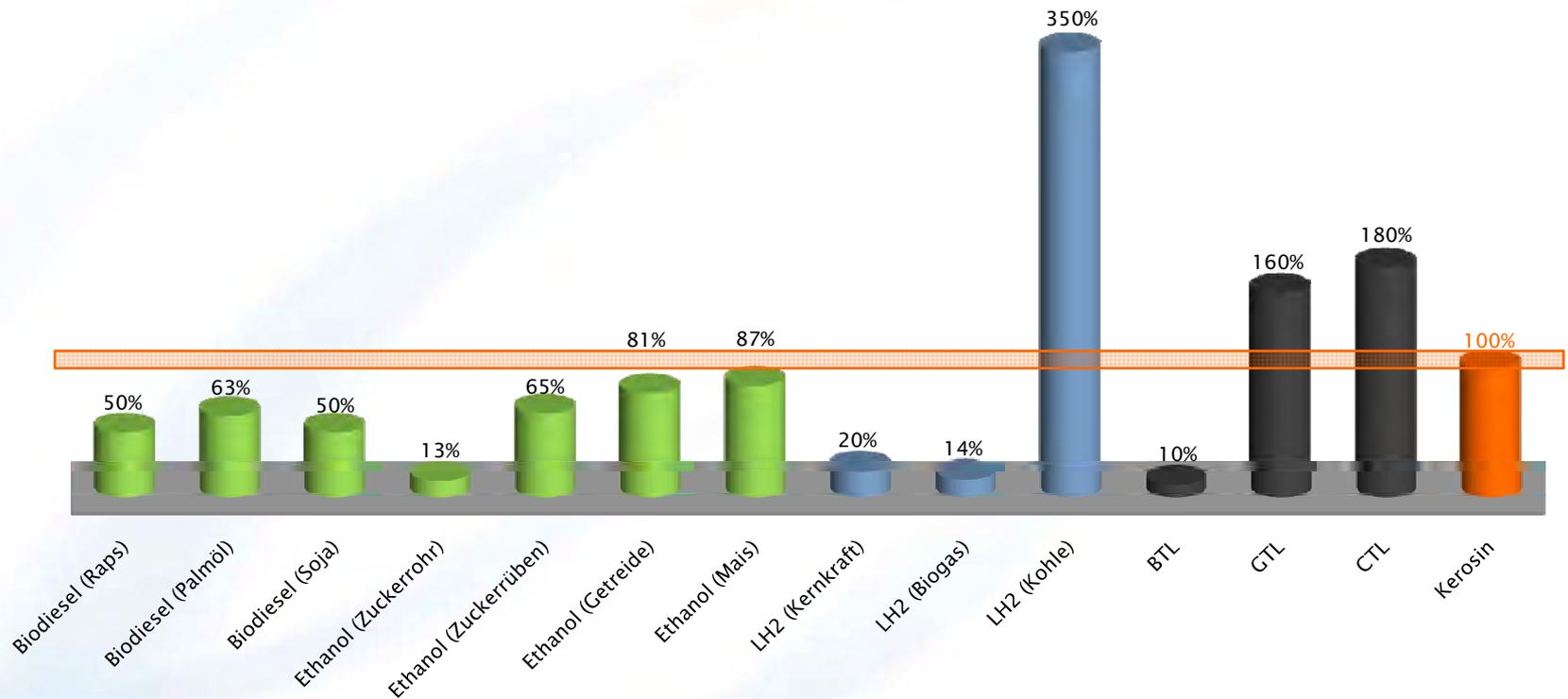
Karte: FAO/AGL TERRASTAT

Zuckerrohr

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

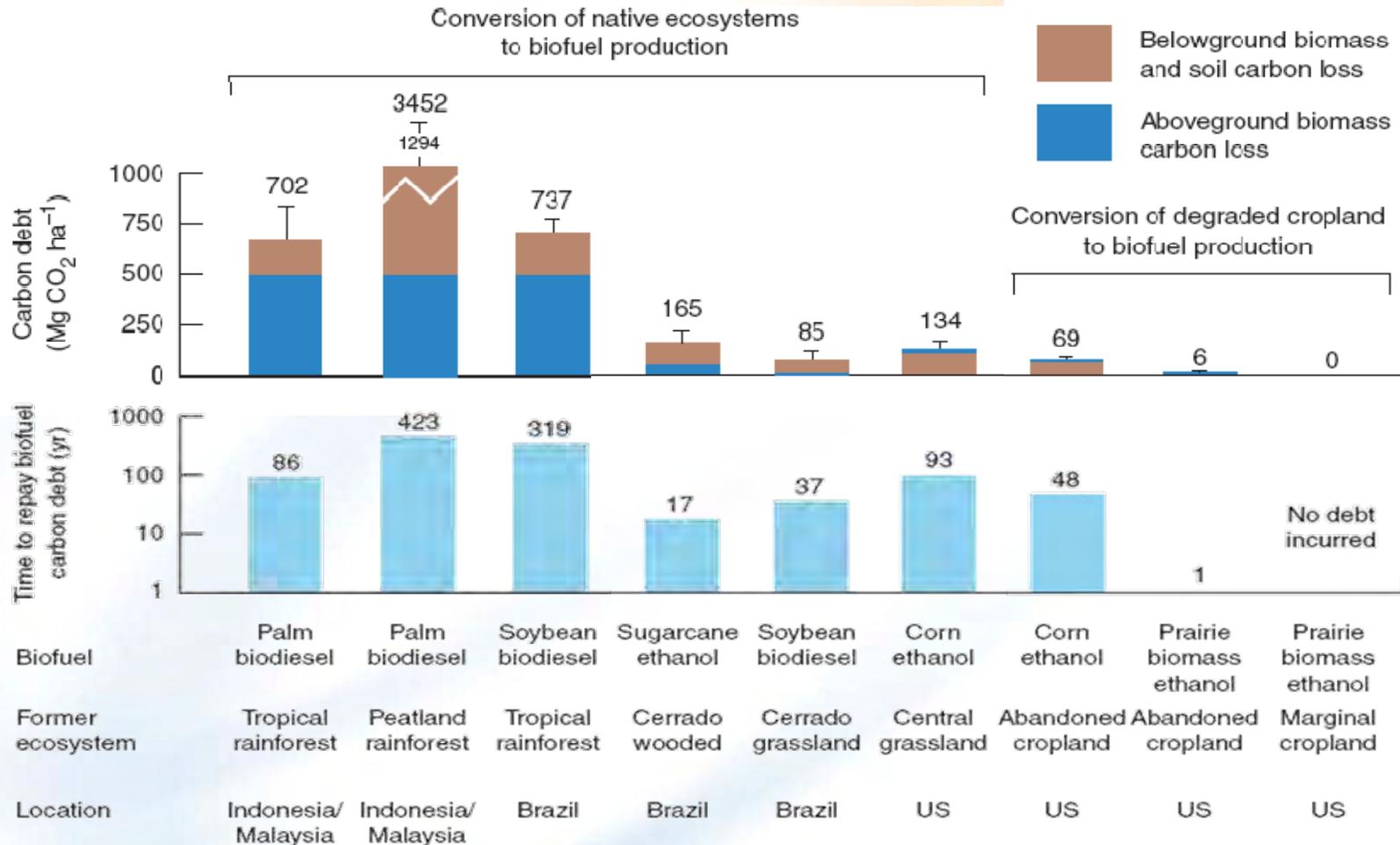


CO<sub>2</sub>-Bilanzen alternativer Kraftstoffe (Kerosin entspricht 100%)



Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

# Negative Klimawirkung durch Boden-Konversion



## Alternative Kraftstoffe



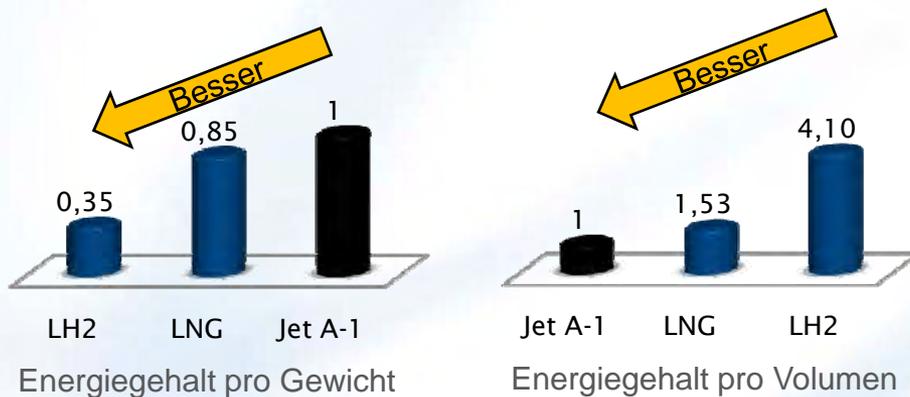
Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: *Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications*, unveröffentlichtes Manuskript, 2009



## Flüssiggase

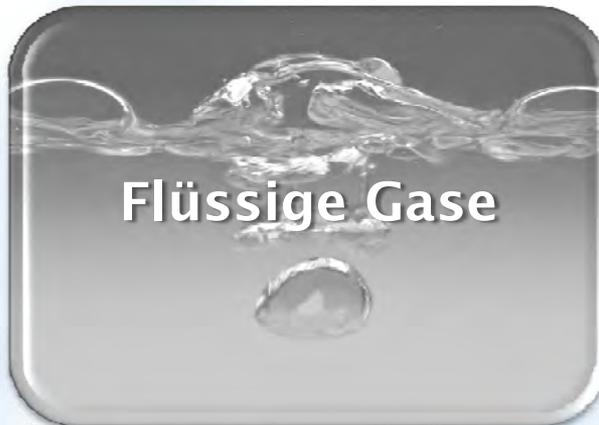
- **Flüssiges Erdgas (LNG)**  
(Erd- und Biogas)
- **Flüssiger Wasserstoff (LH<sub>2</sub>)**  
(Rohölbasiert, Dampf-Reformierung von Erdgas, Elektrolyse, Biogas)

- Höherer Energiegehalt pro Masse aber viel niedriger pro Volumen (im Vergleich zu Kerosin)
- **Signifikante Änderungen** von Triebwerk, Flugzeugzelle und Infrastruktur notwendig.
- **Nicht Beimischungsfähig!!**
- Keine zeitnah praktikable Lösung.



Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: *Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications*, unveröffentlichtes Manuskript, 2009

## Alternative Kraftstoffe



Quelle: S. Naundorf, P. Phleps, C. Kelders, S. Eelman: *Implementing Alternative Fuels in Aviation – A Scenario Based Analysis of Demand, Supply and Relevant Implications*, unveröffentlichtes Manuskript, 2009



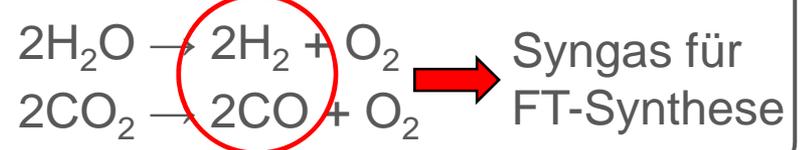
## Neue Ansätze, neue Ressourcen...

- Sunlight-to-Liquid (STL), Sandia National Laboratory, USA  
 “CR5”process: Counter Rotating Ring Receiver Reactor Recuperator



- Syngas Produktion mit Sonnenlicht
- Geschätzte Tagesproduktion des Prototypen:

22kg H<sub>2</sub>O + 18kg CO<sub>2</sub> → 9,5l Synfuel



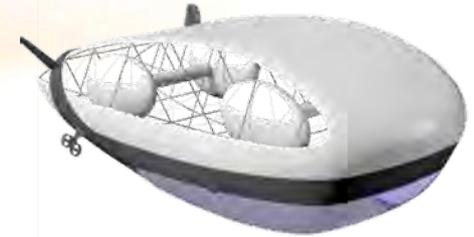
- Methanhydrat



- Schätzungen des globalen Bestandes von Kohlenstoff, der in Methanhydraten gebunden ist **übersteigen die Mengen**, die in den weltweiten **Öl, Gas und Kohle**reserven stecken [Buffet & Archer, 2004]
- Mögliche Methanproduktion bei gleichzeitiger C-Sequestrierung

## Zusammenfassung

- **Klimawandel und Ressourcenknappheit**
  - Sind ernst zu nehmende Probleme – insbesondere für die in der Öffentlichkeit sehr präzente Luftfahrt
- **Technische Neuerungen**
  - Das Erreichen der ACARE-Ziele ist technologisch eine große Herausforderung und aufgrund der langsamen Markt-Durchdringung neuer Technologien kaum realistisch.
- **Emissionshandel**
  - Sinnvolles Instrument, wenn auch in regionalem Einsatz problematisch
- **Alternative Kraftstoffe**
  - Potenzial, die CO<sub>2</sub>-Bilanz und die Kraftstoff-Verfügbarkeit zu verbessern, verringerte Belastung der Airlines durch Emissionshandel.  
Aber: Nachhaltigkeits-Probleme, Höheneffekte und Zirrenbildung wirken trotz (theoretisch) geschlossenem CO<sub>2</sub> Kreislauf negativ → *Langfristiger Klimaschutz ist mit Verbrennungsmotoren kaum zu erreichen.*



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**



**Kontakt:**

Dr. Andreas Kuhlmann  
Bauhaus Luftfahrt  
Programme Ökonomie

[Andreas.Kuhlmann@bauhaus-luftfahrt.net](mailto:Andreas.Kuhlmann@bauhaus-luftfahrt.net)