

Integrierte Analyse technisch orientierter Pfade für den zukünftigen PW-Antrieb

BFE-Forschungstagung Verkehr, 10. September 2008

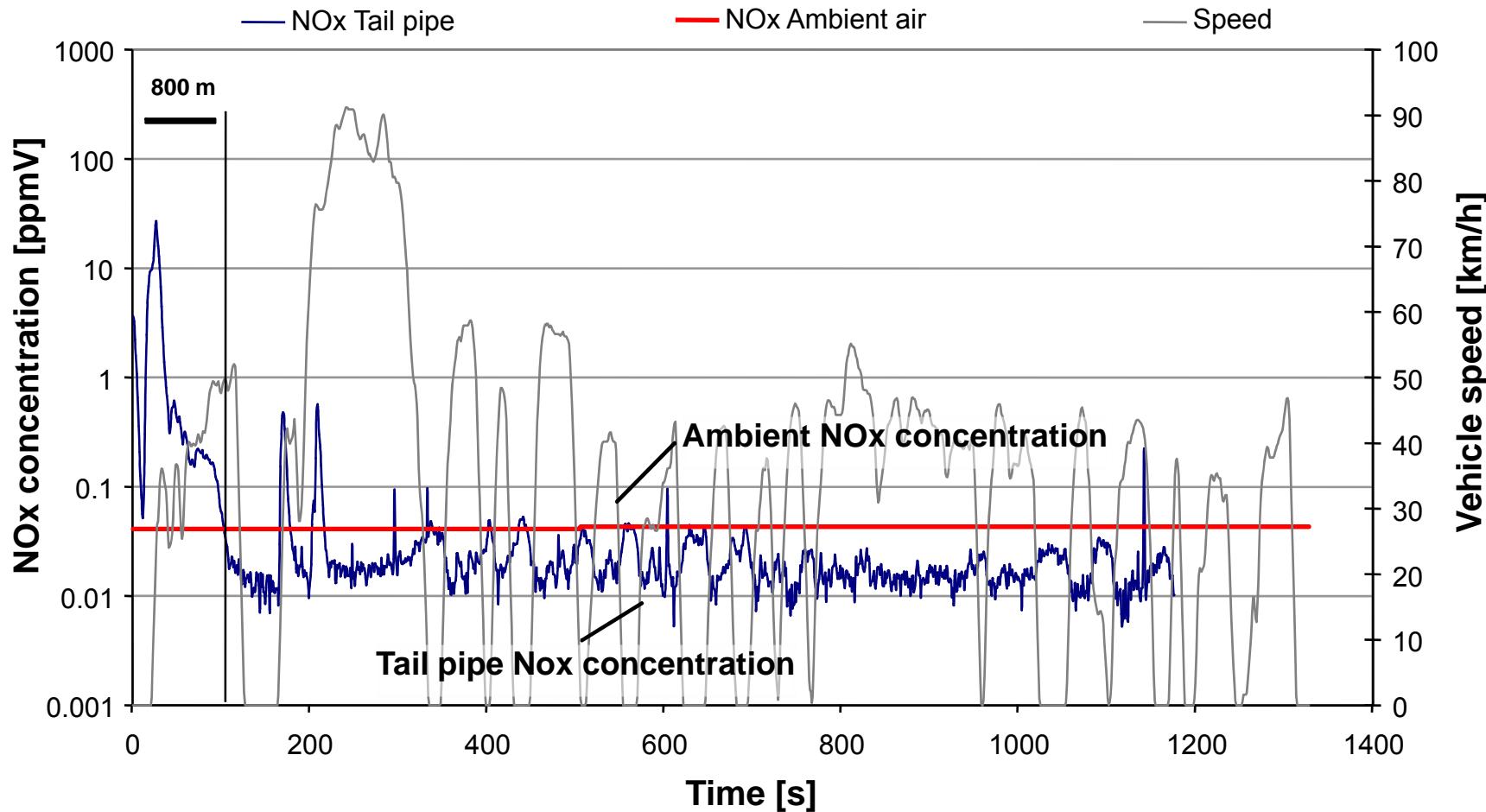
Fabrizio Noembrini, Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme
Koautoren: Fanny Frei, Prof. Konstantinos Boulouchos



Inhalt

- Einführung und Motivation
- Die Rolle des Verkehrs
- Technologiepfade für den Automobilantrieb
- Quantitative Auswertung einzelner Studienfälle
- Weitere Aspekte
- Schlussfolgerungen

Lokale Emissionen sind nicht die grosse Herausforderung



Clean Engine Vehicle (CEV)

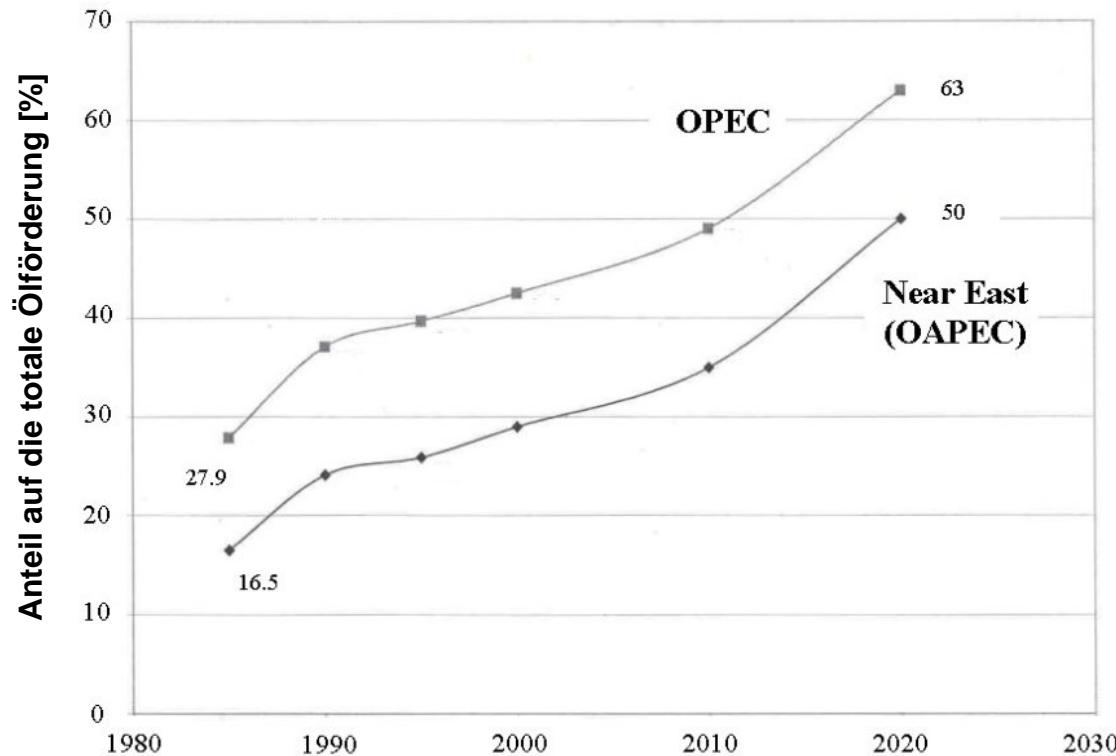
EMPA Dübendorf, Abt. Verbrennungsmotoren/Feuerungen (137)
ETH Zürich, Lab. für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)
ETH Zürich, Institut für Mess- und Regeltechnik (IMRT)

Gründe zur Förderung der Effizienz und der Erneuerbaren

- **Abhängigkeit und Rekonzentration**
- **Knappheit und „mid depletion point“ der Ölförderung**
- **Klimawandel**

...aufgrund von Kosten, Versorgungssicherheit und Umweltauswirkungen

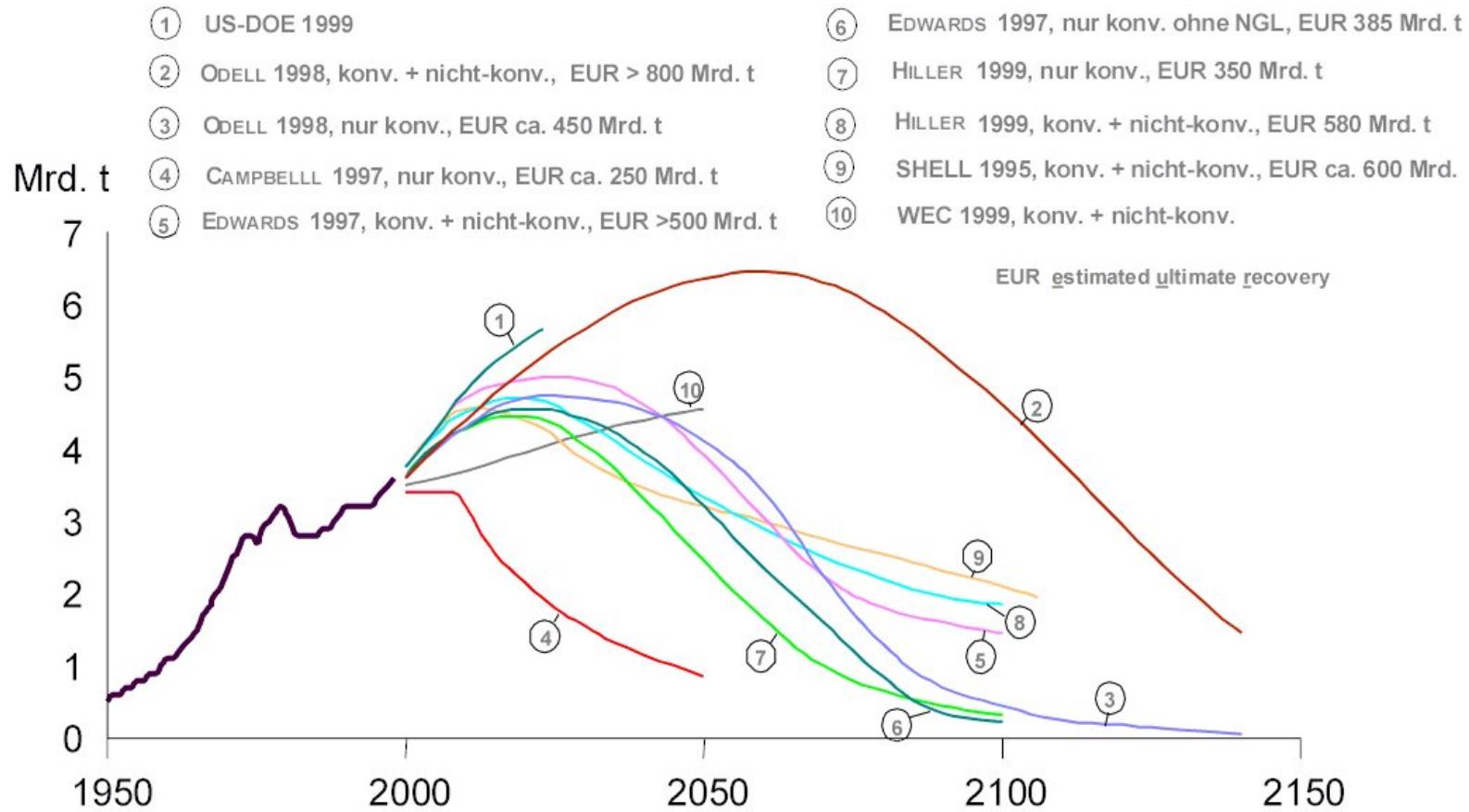
Rekonzentration der Ölförderung



- Rekonzentration in politisch instabilen Regionen erhöht die Wahrscheinlichkeit von grossen Preisschwankungen.
- Der Verkehr basiert weltweit, mit ca. 95% des Endenergieverbrauchs, auf Öl.

Quelle: Esso, 2000

Maximum in der globalen Ölfordernung



Mögliche relevante Preiserhöhungen infolge der kleinen Elastizität der Nachfrage

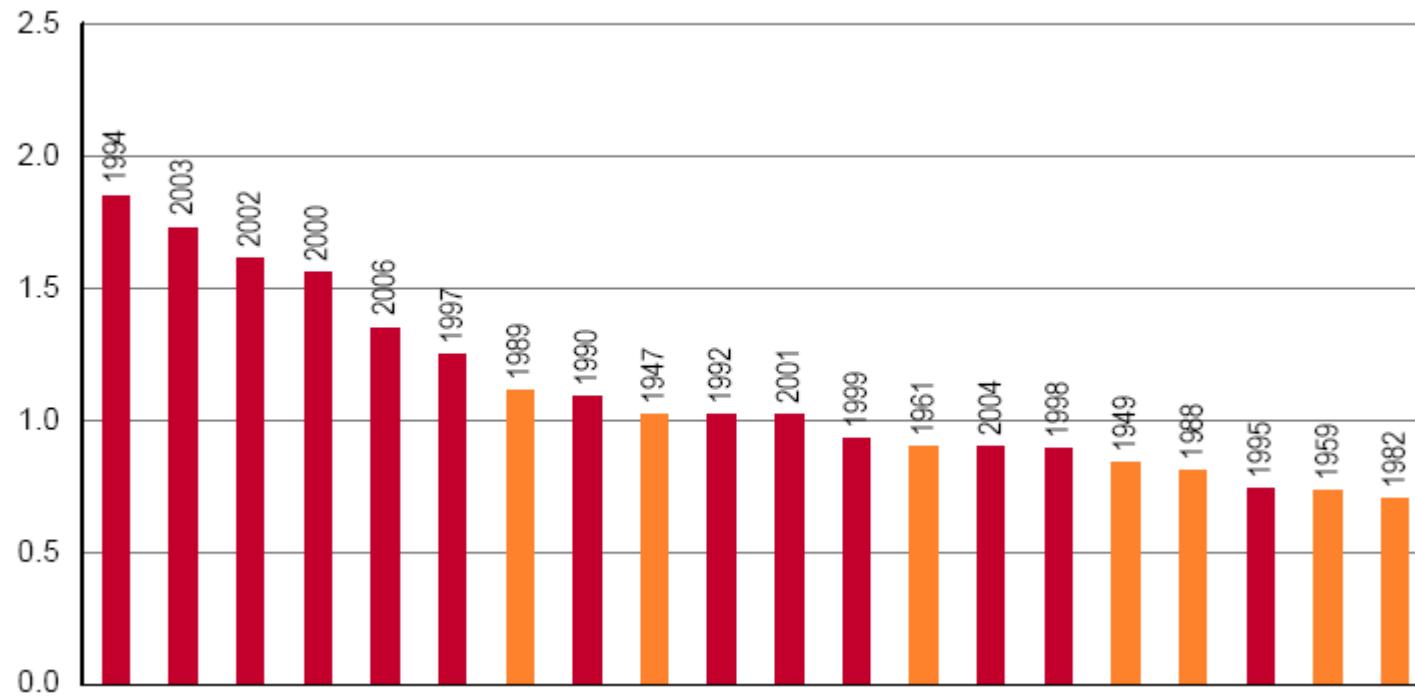
Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2000

Verbrennung fossiler Energieträger

- Ca. 1 Mia. Jahre war die notwendige Zeit zur Erzeugung der fossilen Reserven.
- Die Erschöpfungsgeschwindigkeit ist ca. 2 Mio. Mal schneller als der Entstehungsprozess.
- Wir verbrauchen in 4 Stunden fossile Vorräte, deren Entstehung 1'000 Jahre brauchte!

Klimawandel - die wärmsten Jahre

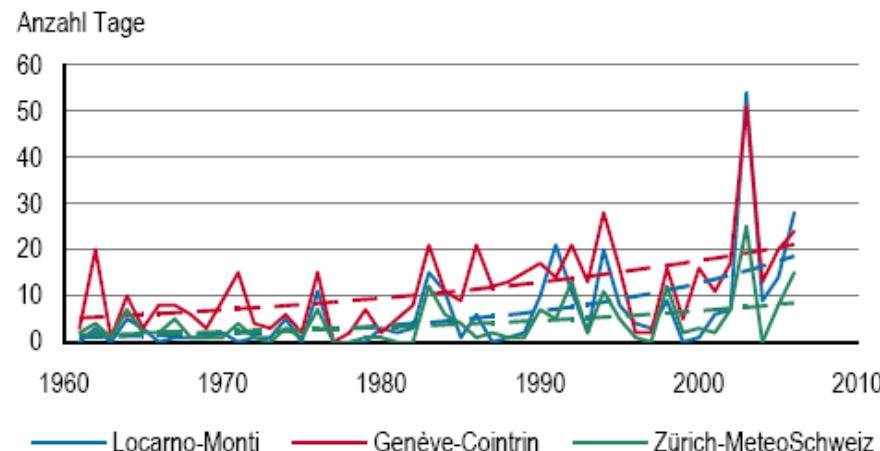
Abweichung zur Norm 1961-1990 [°C]



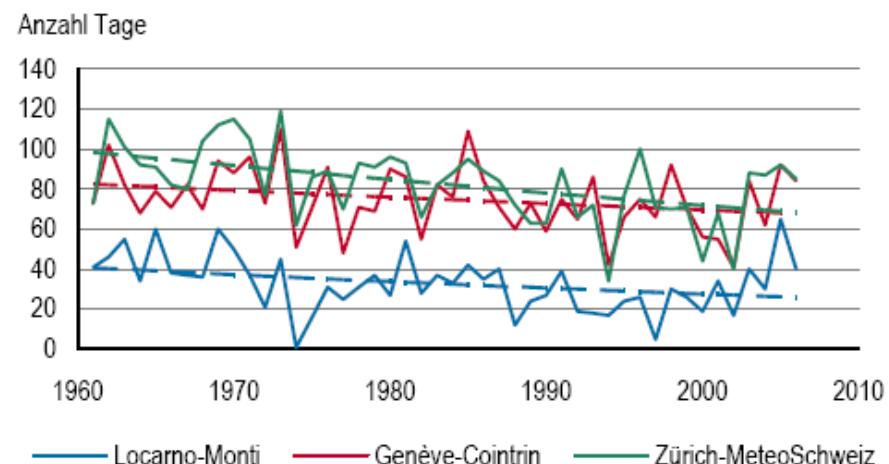
Quelle: MeteoSchweiz

Klimawandel – Hitze- und Frosttage

Hitze

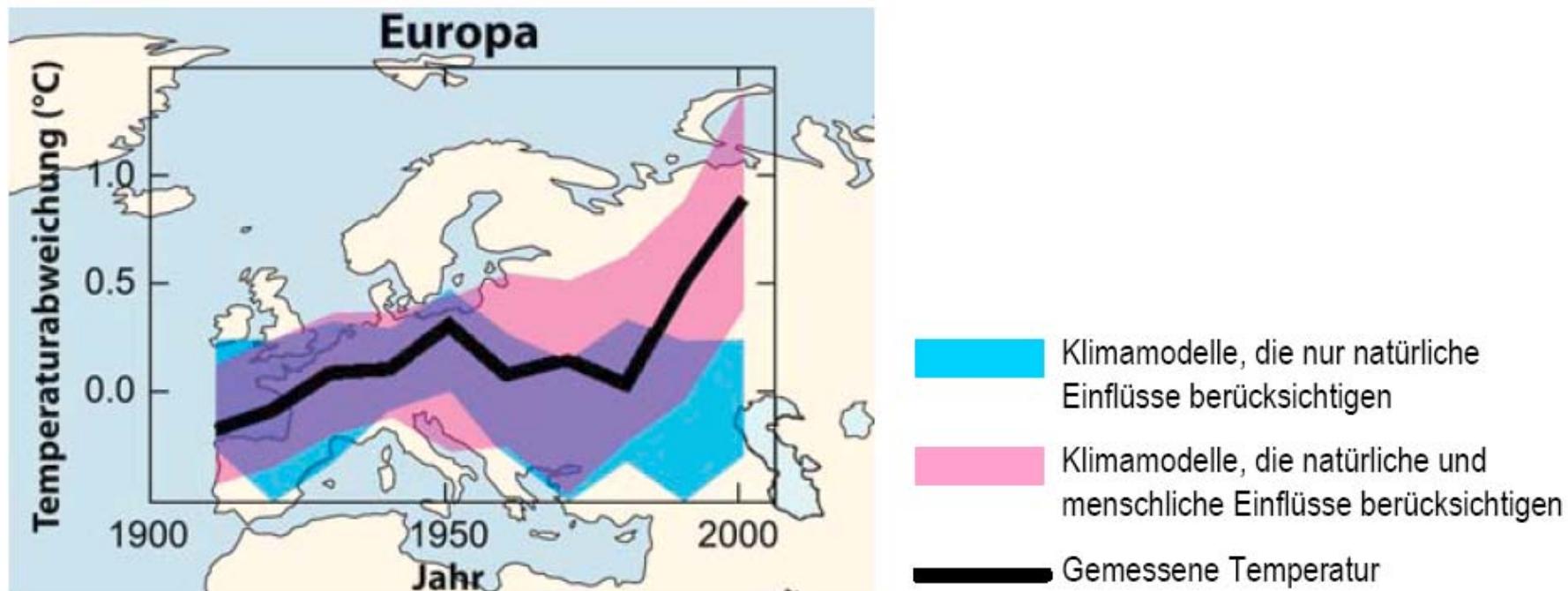


Frosttage



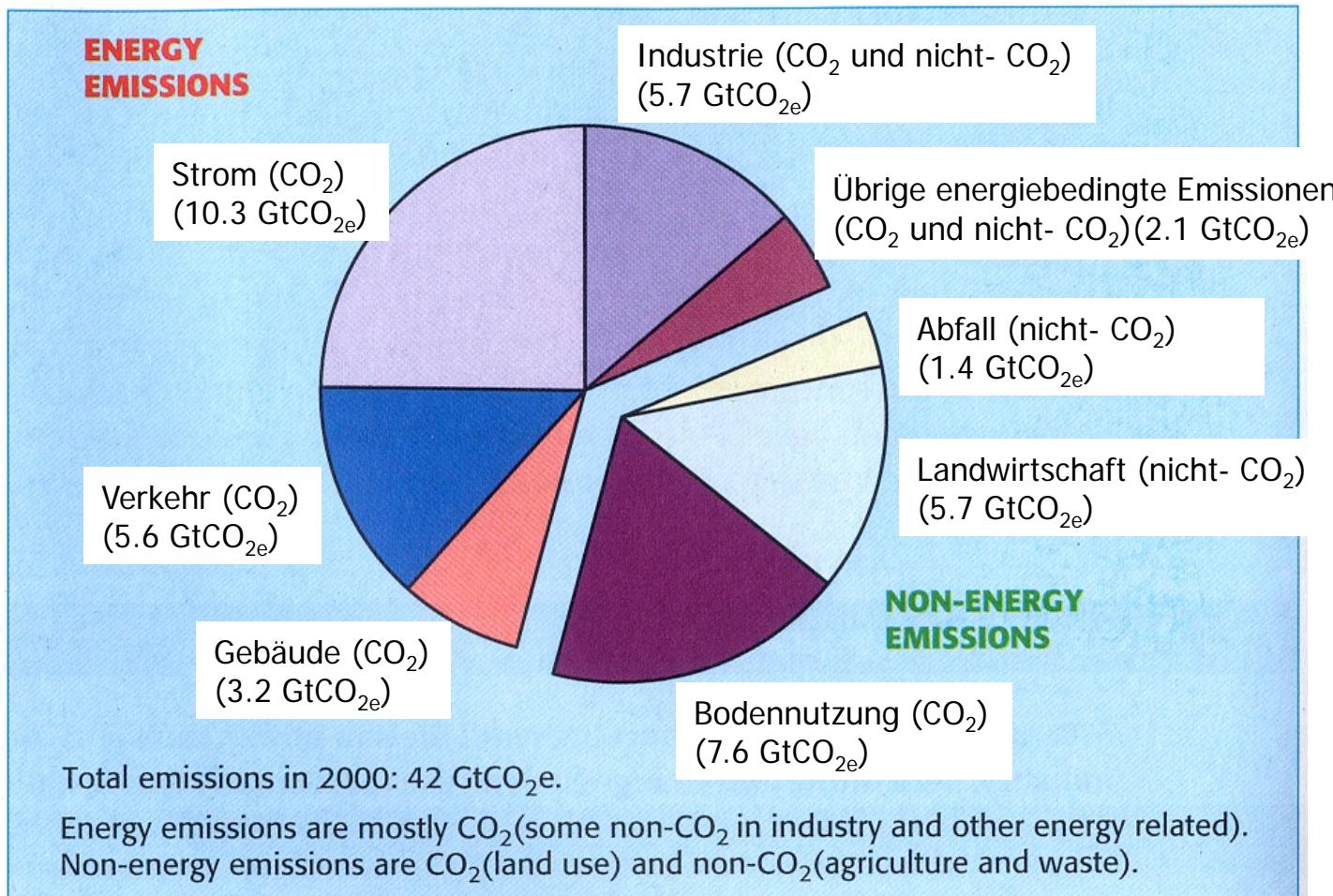
Quelle: MeteoSchweiz, 2007

Klimawandel - Modellierungsergebnisse und gemessene Werte



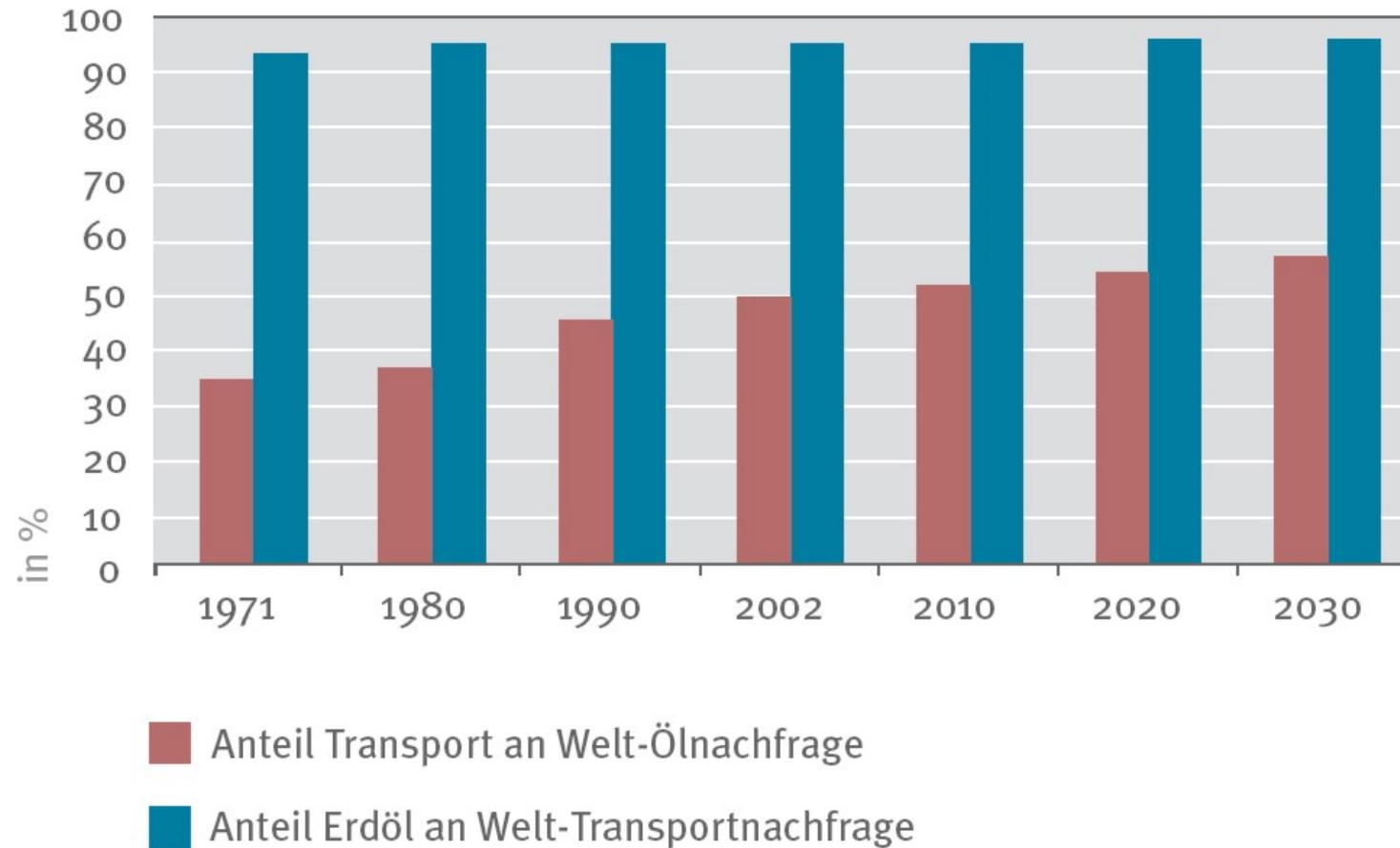
Quelle: IPCC (2007)

Quellen der Treibhausgasemissionen im Jahre 2000



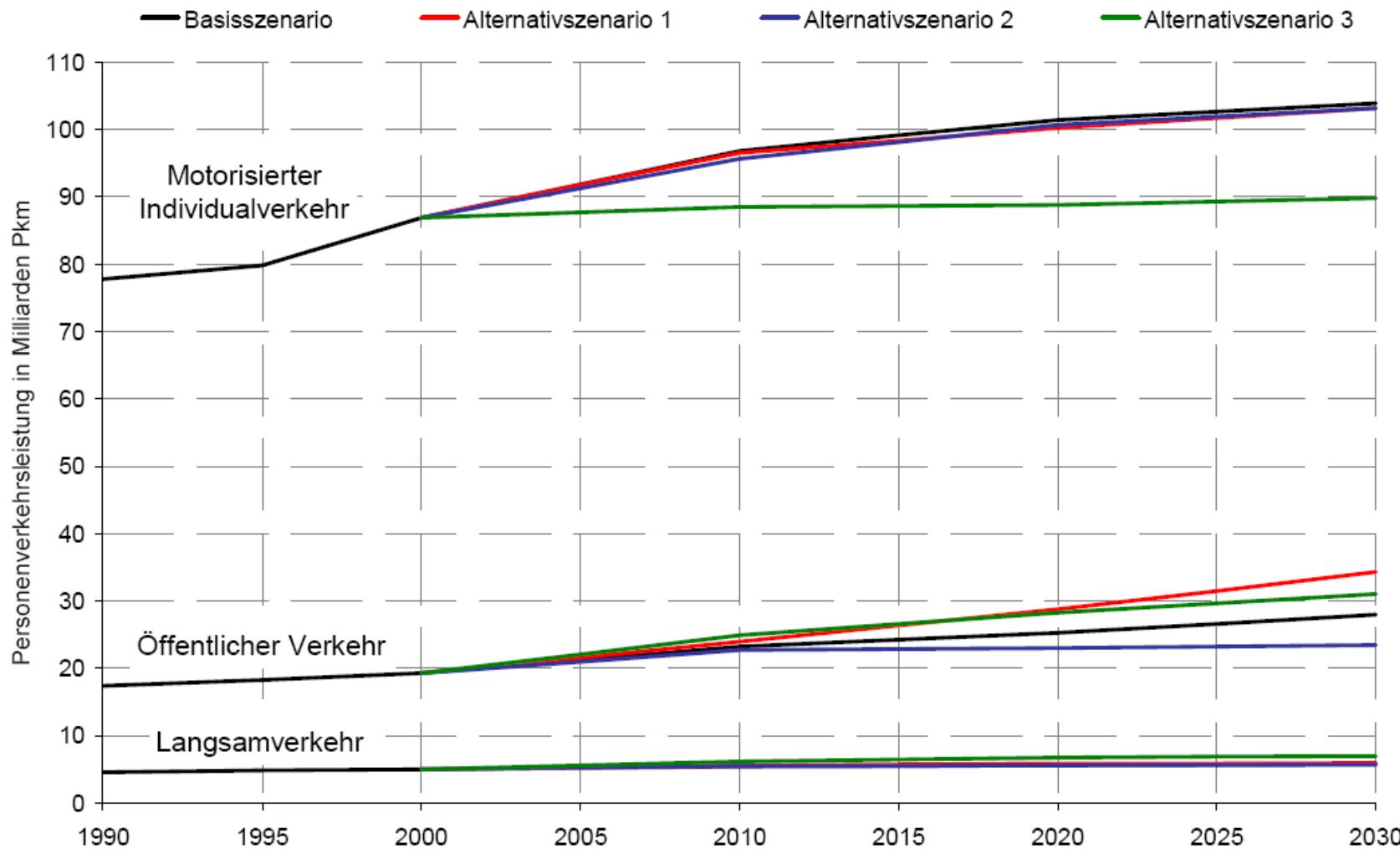
Quelle: Stern Review, 2006

Anteil des Transports im globalen Ölbedarf



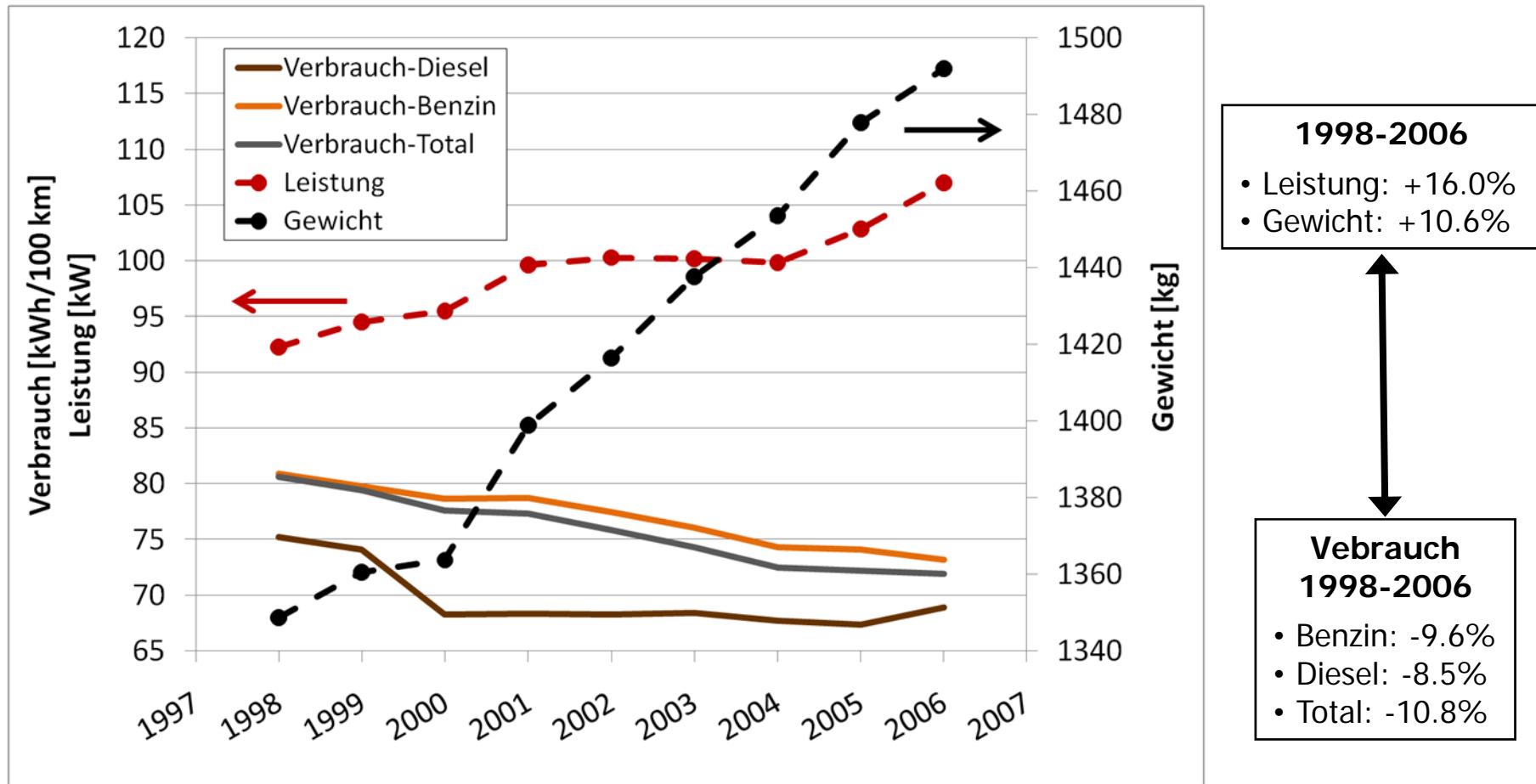
Quelle: Erdöl-Vereinigung, „Die langfristige Verfügbarkeit von Erdöl“, 2006

Personenverkehr nach Szenarien und Verkehrsmittel



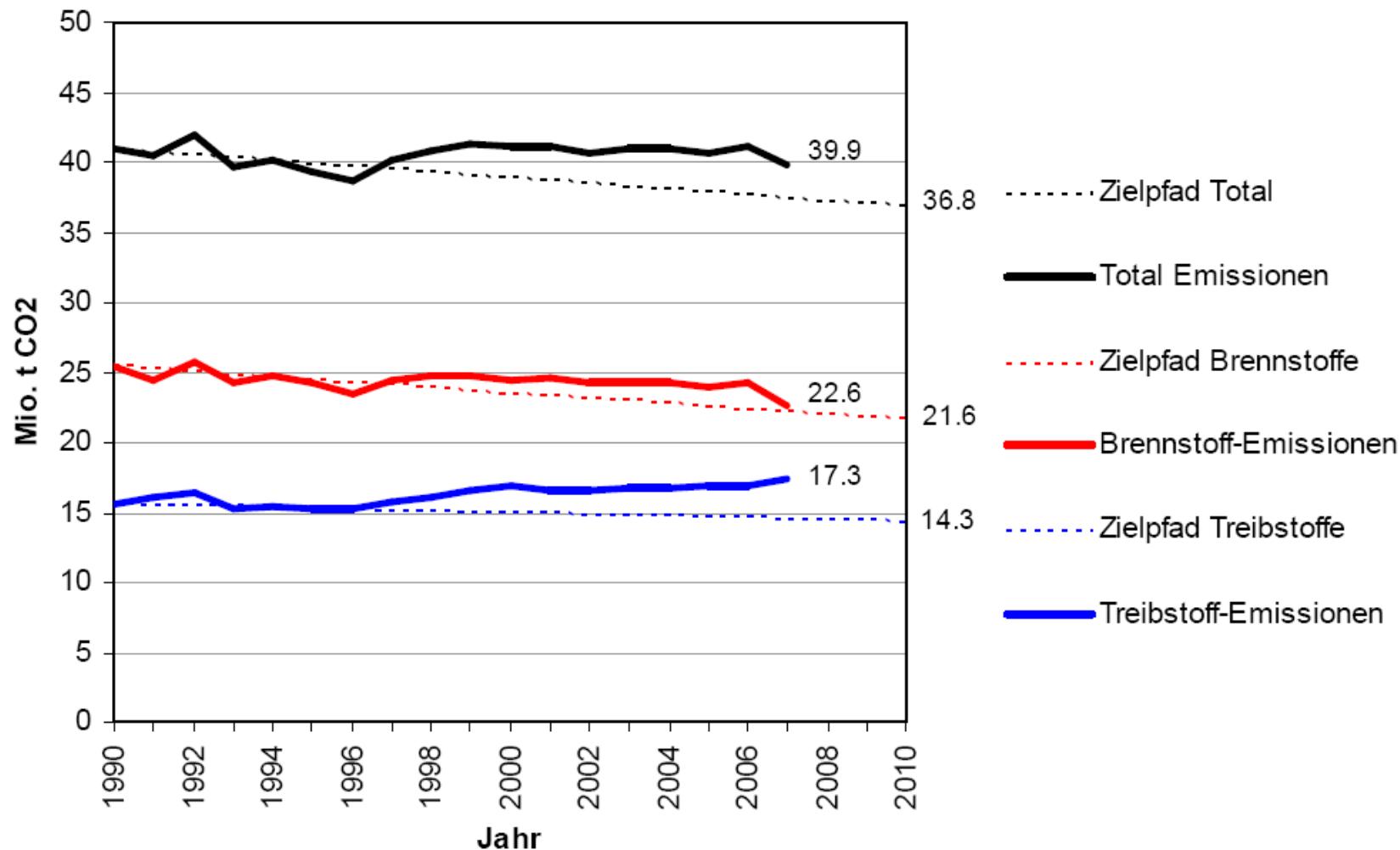
Quelle: ARE, „Perspektiven des Schweizerischen Personenverkehrs bis 2030“, 2006

Trends für PW-Gewicht, -Leistung und -Verbrauch in der Schweiz



Datenquelle: AutoSchweiz; Graphik: LAV, 2008

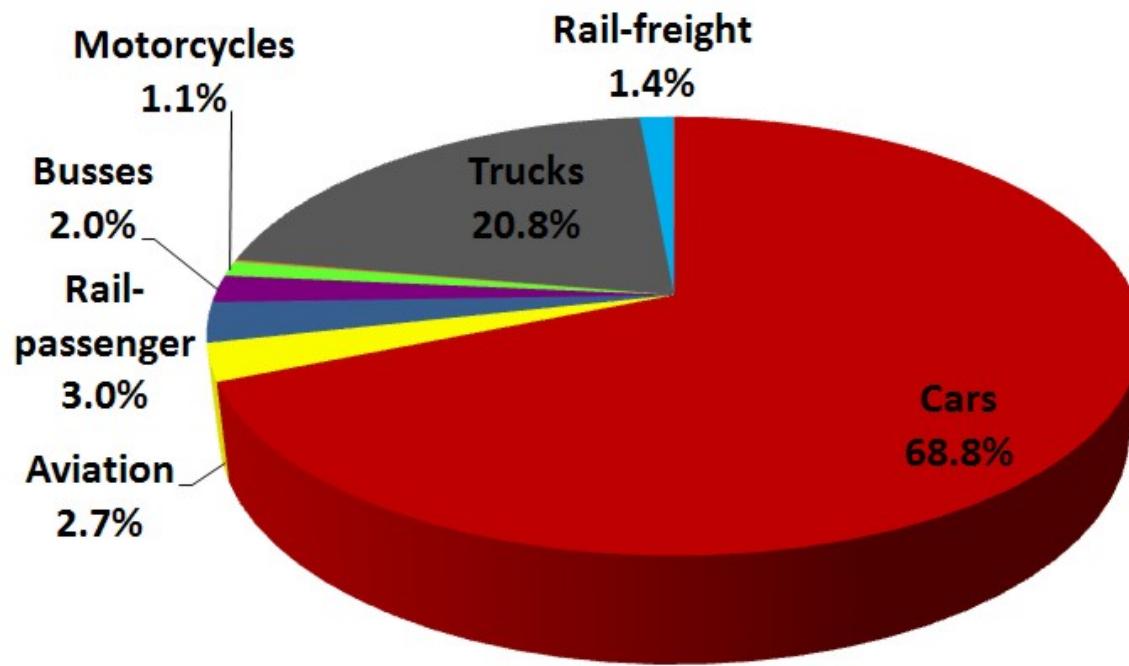
Soll- und Ist-Zustand in der Schweiz



Quelle: BAFU, 2008

Die Relevanz des motorisierten individuellen Verkehrs

Anteile am gesamten Endenergiebedarf des Verkehrs in der Schweiz in 2008



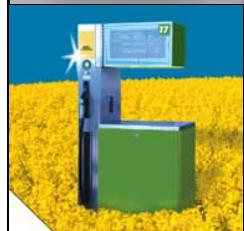
Quelle: Energie-Navigator, LAV, 2008

Technologiepfade für den zukünftigen Automobilantrieb



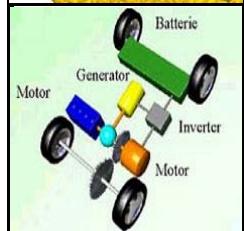
Evolution des **Ottomotors**
Evolution des **Dieselmotors**

Downsizing, Direkteinspritzung mit hohen Variabilitäten, flexible Hochaufladung, variable Ventile, flexible Geometrien, kombinierte Abgasnachbehandlung

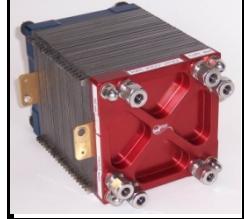


Evolution des Verbrennungsmotors (Diesel, Otto) **PLUS**

Neue Kraftstoffe (biogene, gasförmig/flüssig, synthetische/H₂-angereicherte Reformate)



Zunehmende **Hybridisierung** (mild, voll,...) über Verbrennungsmotor als „Range Extender“ und schliesslich weitgehend **Elektrobetrieb** (nach Mitte des 21. Jh.)



Umstellung auf Wasserstoff und Brennstoffzellenantrieb (sehr unwahrscheinlich, da extrem elektrizitäts-, ressourcen- und kostenintensiv)

2000

2050

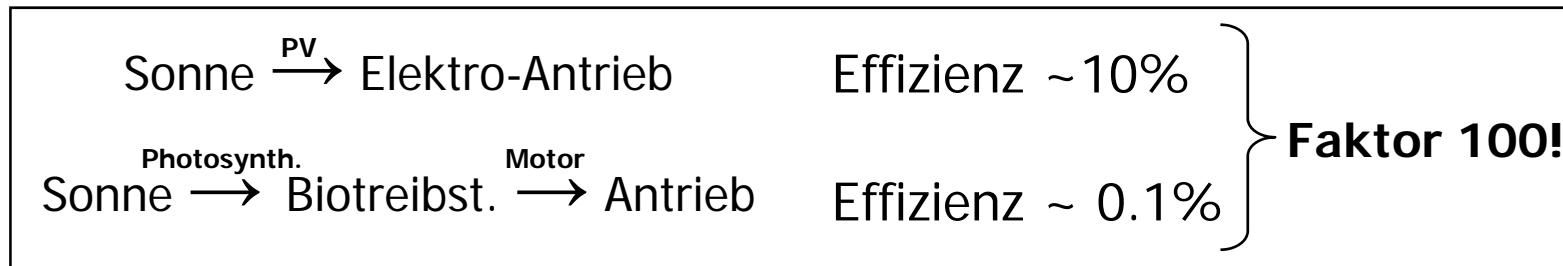
Ökobilanz und Potential von Biotreibstoffen

- CO₂-Einsparung nur bei wenigen Alternativen mind. 50% gegenüber Benzin/Diesel (fossil) bei Berücksichtigung aller vorgelagerter Verluste
- Gesamtökobilanz der grossen Mehrheit von Biotreibstoffen eher negativ; nur Methan/Holz/Altöle/Reststoffe eindeutig vorteilhaft
- Beispiel: Palmöl aus Indonesien ---> Waldrodung setzt pro Hektar 3mal mehr CO₂ frei, als beim Pflanzenwachstum für die Biotreibstoffsproduktion!

=> Potential aus „einheimischer“ Produktion (umweltkompatibel)

für CH: weniger als 10% des heutigen Flottenverbrauchs

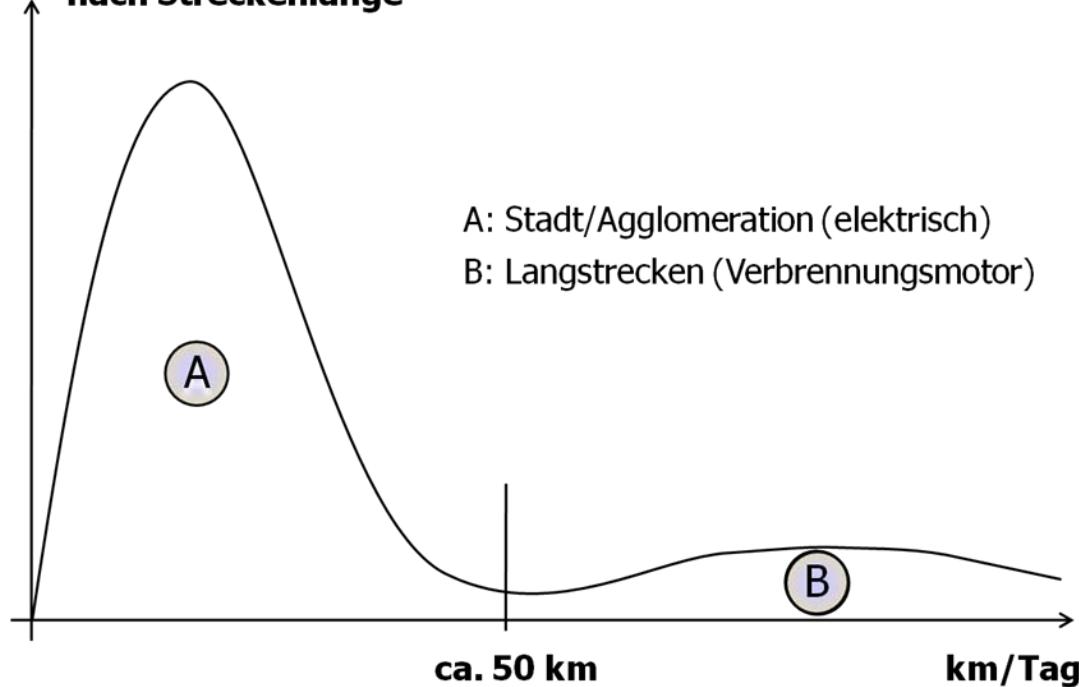
für D: max. 20% des heutigen Flottenverbrauchs



Datenquelle: R. Zah, EMPA, 2007

„Steckdosen“-Hybrid: ein langfristig sinnvolles Konzept

Verteilung der Tagesfahrten
nach Streckenlänge

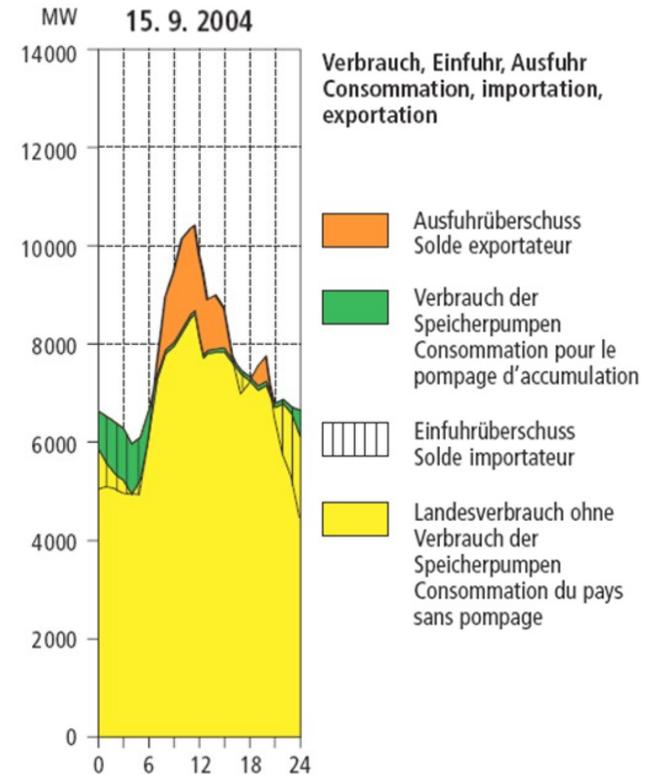


Qualitative Abbildung

Voraussetzungen für sinnvollen Einsatz:

- Stromerzeugung ist CO₂-arm (am besten CO₂-frei)
- Fortschritte Kosten, Speicherdichte bei Batterien erforderlich

Schwankender Bedarf/Produktion
an Elektrizität (Tagesgang)



Quelle: BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2004

Ziele für einen wettbewerbsfähigen Brennstoffzelle-Antrieb

- „Elektrizität → Energie am Rad“-Effizienz für Elektro-Pkw ist heute ca. 65-70%.

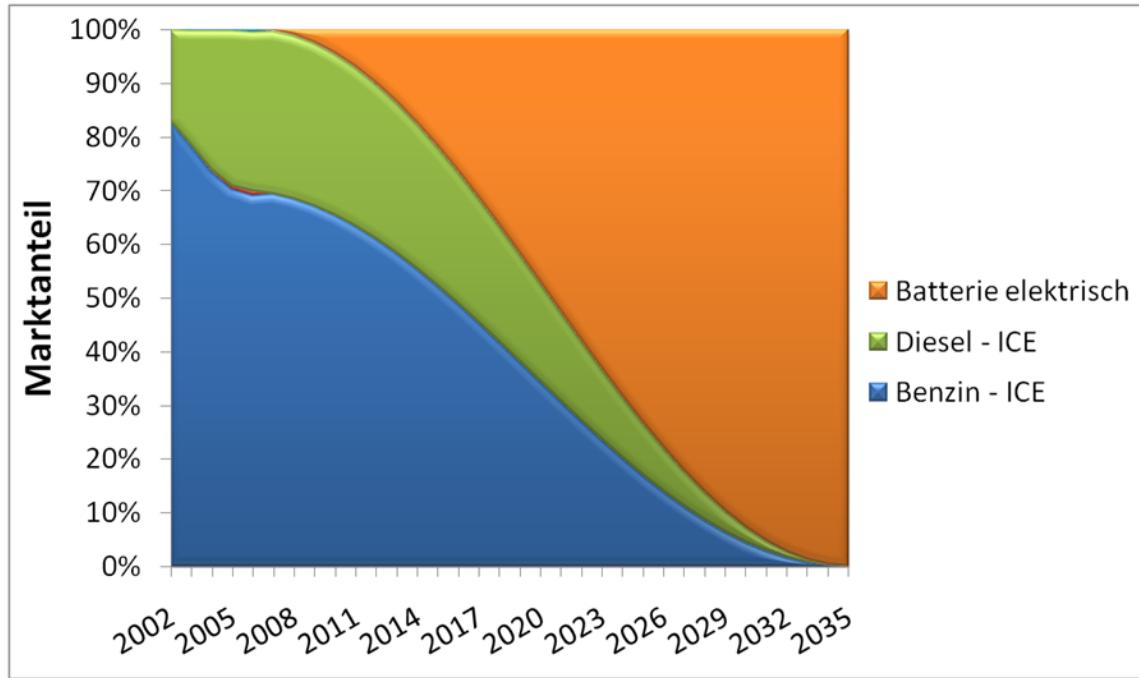
- Deshalb folgendes Ziel:

$$\eta_{El \rightarrow Rad} \Big|_{BZ - H_2} = \eta_{Elektrolyse} \cdot \eta_{H_2-Speicherung, Transport} \cdot \eta_{BZ} > 65\% !$$

gegenüber 25% – 30% heute

- F&E über H₂ und Brennstoffzellen muss diese Herausforderung ansprechen, aber es ist kaum denkbar, dass dieses Ziel je erreicht wird.

Analysierte Optionen, Markt- und Flottenanteil



- Zunahme des Marktanteils der neuen Fahrzeuge mit einer spezifischen Antriebsart bis 100% in 2035
- Betrachtete Fälle: - Batterie elektrisch
 - H₂ Hybridmotor
 - H₂ Brennstoffzelle
 - Plug-in Hybrid

Endenergiebedarf in 2035 für verschiedene Substitution-Szenarien des PW-Antriebs in der Schweiz

- Der kleinste Wert weist die Batterie elektrisch-Option auf, knapp unter der 80 PJ Marke.

Wenn Wasserstoff als Endenergie betrachtet wird:

- Der Endenergiebedarf ist kleiner für alle Optionen im Vergleich zu dem Referenzszenario.
- Die Brennstoffzelle- und die Plug-in Hybrid-Option liegen ca. 30% höher als die Batterie elektrisch-Option.

Wenn die zur Wasserstoffherstellung notwendige Elektrizität als Endenergie betrachtet wird:

- Die H₂-Hybridmotor-Option erreicht ca. den Wert des Referenzszenarios.
- Der Endenergiebedarf für die Brennstoffzelle-Option ist ca. 30% kleiner als derjenige der H₂-Hybridmotor-Option und 20% grösser als derjenige der Plug-in Hybrid-Option.

Achtung: diese Angaben beziehen sich auf den Gesamtenergiebedarf, inkl. konventionelle PW.

Quelle: Energie-Navigator, LAV, 2008

Zusätzlich nötige installierte Kraftwerksleistung in 2035 für verschiedene Substitution-Szenarien des Pkw-Antriebs in der Schweiz

- Die notwendige Zusatzkapazität variiert stark in Abhängigkeit der gewählten Antriebsart-Option, und zwar von ca. 1 GW_{el} bis ca. 5 Gw_{el} (Annahme: 90% Auslastung im Jahresmittel).
- Die maximal mögliche elektrische Leistung heute in der Schweiz beträgt ca. 13 GW.
- Die Plug-in Hybrid-Option weist den geringsten zusätzlichen elektrischen Bedarf auf; dazu kommt aber hier noch der (Bio-)Treibstoffbedarf, der in den anderen Varianten nicht auftaucht.

Quelle: Energie-Navigator, LAV, 2008

Spezifischer Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen in 2035 in Abhängigkeit des Antriebssystems und der Stromproduktionsart

Betreffend Primärenergiebedarf:

- Die H₂ Hybridmotor-Variante weist einen kleineren Primärenergiebedarf im Vergleich zum Referenzszenario erst ab Wirkungsgrade für die Elektrizitätsproduktion höher als 85% auf.
- Ab elektrische Wirkungsgrade von 40% ist die Batterie elektrisch-Option besser als die Plug-in Hybrid-Variante. Für kleinere Werte ist aber der gesamte Primärenergiebedarf der Plug-in Hybrid-Variante kleiner.
- Die graue Energie (z.B. der Batterie oder der Brennstoffzelle) wurde nicht berücksichtigt.

Betreffend CO₂-Emissionen:

- Ab spezifische Emissionen für die Elektrizitätsproduktion von ca. 0.6 kg CO₂/kWh_{el} weist die Plug-in Hybrid-Variante den tiefsten pro km CO₂-Emissionswert auf.
- Die Brennstoffzelle-Option ist nur bis einem spezifischen Emissionswert für die Elektrizitätsproduktion von ca. 0.2 kg CO₂/kWh_{el} besser als die Plug-in Hybridvariante.

Quelle: Energie-Navigator, LAV, 2008

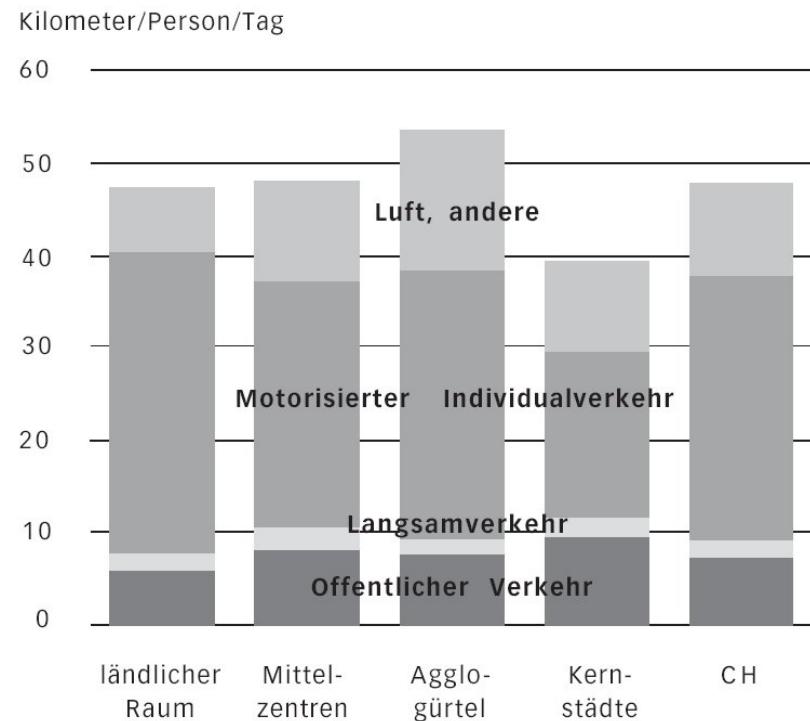
Weitere wichtige Aspekte/Massnahmen

- Kostenwahrheit, wirtschaftliche (Lenkungs-)instrumente
- Raumplanung
- Verkehrsregelung, Informations- und Kommunikationstechnik
- Kombinierte Mobilität, Park&Ride
- Car sharing
- EcoDrive

Beispiel:

Die Rolle der Raumplanung und Siedlungspolitik

- Einwohner der Ballungszentren: 33% des Transportbedarf durch ÖV
- Einwohner ländlicher Räume: 15% des Transportbedarf durch ÖV
- Einfluss auch auf den absoluten Transportbedarf:
 - Durchschnittlich: 37 km pro Kopf und Tag
 - Einwohner der Ballungszentren: 30 km
 - Einwohner der Agglomerationen: 53 km



Quelle: Dossier modal split, ARE, 2003

Schlussfolgerungen

- Anthropogene **Treibhausgasemissionen** (allen voran CO₂) führen höchstwahrscheinlich zu einer spürbaren globalen **Temperaturerhöhung**.
- Der Anteil des individuellen Verkehrs an den gesamten Treibhausgasemissionen ist zur Zeit eher bescheiden, wird aber wachsen → Massnahmen erforderlich!
- Globale Strategie: Entkarbonisierung verschiedener Sektoren in sinnvoller zeitlicher Abfolge.

Für eine **klimaschonende individuelle Mobilität** ist eine Umstellung realistisch durch:

- konsequente Weiterentwicklung der Motoren-technologie
- unterstützenden Einsatz von Biotreibstoffen
- reduziertes Fahrzeuggewicht
- vermehrte Hybridisierung
- fortschreitende Elektrifizierung über Plug-in Hybride, bis zum vollelektrischen Antrieb, aber erst wenn die Elektrizitätserzeugung weitgehend CO₂-frei wird

→ d.h.: Erdölprodukte müssen prioritär für den Personen- und Güterverkehr (langfristig vor allem für Schiffs- und Lufttransport) „reserviert“ werden!

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

fnoembri@ethz.ch

www.lav.ethz.ch