

Anmerkungen zur globalen Energieproblematik und zur möglichen Rolle der Fischer-Tropsch-Synthese für die zukünftige Bereitstellung flüssiger Kraftstoffe

Andreas Jess, Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik, Universität Bayreuth

Workshop Wasserstoff, Hanau, 12. Mai 2011

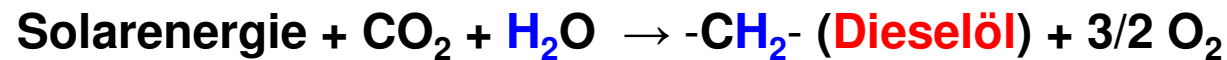


- **Wo stehen wir heute?**
(Ist-Zustand der globalen Energieversorgung)
- **Was steht uns noch zur Verfügung?**
(Reserven & Ressourcen fossiler Energieträger)
- **Wieviel Energie braucht der Mensch?**
(Zusammenhang von Energieverbrauch und sozialen Indikatoren)
- **Welchen Energieverbrauch verträgt die Erde?**
(Zusammenhang von Energieverbrauch und dem ökologischer Fussabdruck)
- **Was sollten wir tun?**
(Energiepläne für eine glückliche Menschheit und einen glücklichen Planeten)

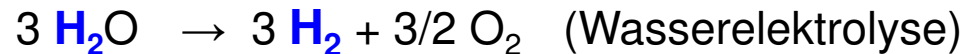
Was hat das mit Wasserstoff zu tun?

- **Wo stehen wir heute?**
(Ist-Zustand der globalen Energieversorgung)
- **Was steht uns noch zur Verfügung?**
(Reserven & Ressourcen fossiler Energieträger)
- **Wieviel Energie braucht der Mensch?**
(Zusammenhang von Energieverbrauch und sozialen Indikatoren)
- **Welchen Energieverbrauch verträgt die Erde?**
(Zusammenhang von Energieverbrauch und dem ökologischer Fussabdruck)
- **Was sollten wir tun?**
(Energiepläne für eine glückliche Menschheit und einen glücklichen Planeten)

technische Photosynthese:



Teilschritte:



- **Wo stehen wir heute?**
(Ist-Zustand der globalen Energieversorgung)

- Was steht uns noch zur Verfügung?
(Reserven & Ressourcen fossiler Energieträger)

- Wieviel Energie braucht der Mensch?
(Zusammenhang von Energieverbrauch und sozialen Indikatoren)

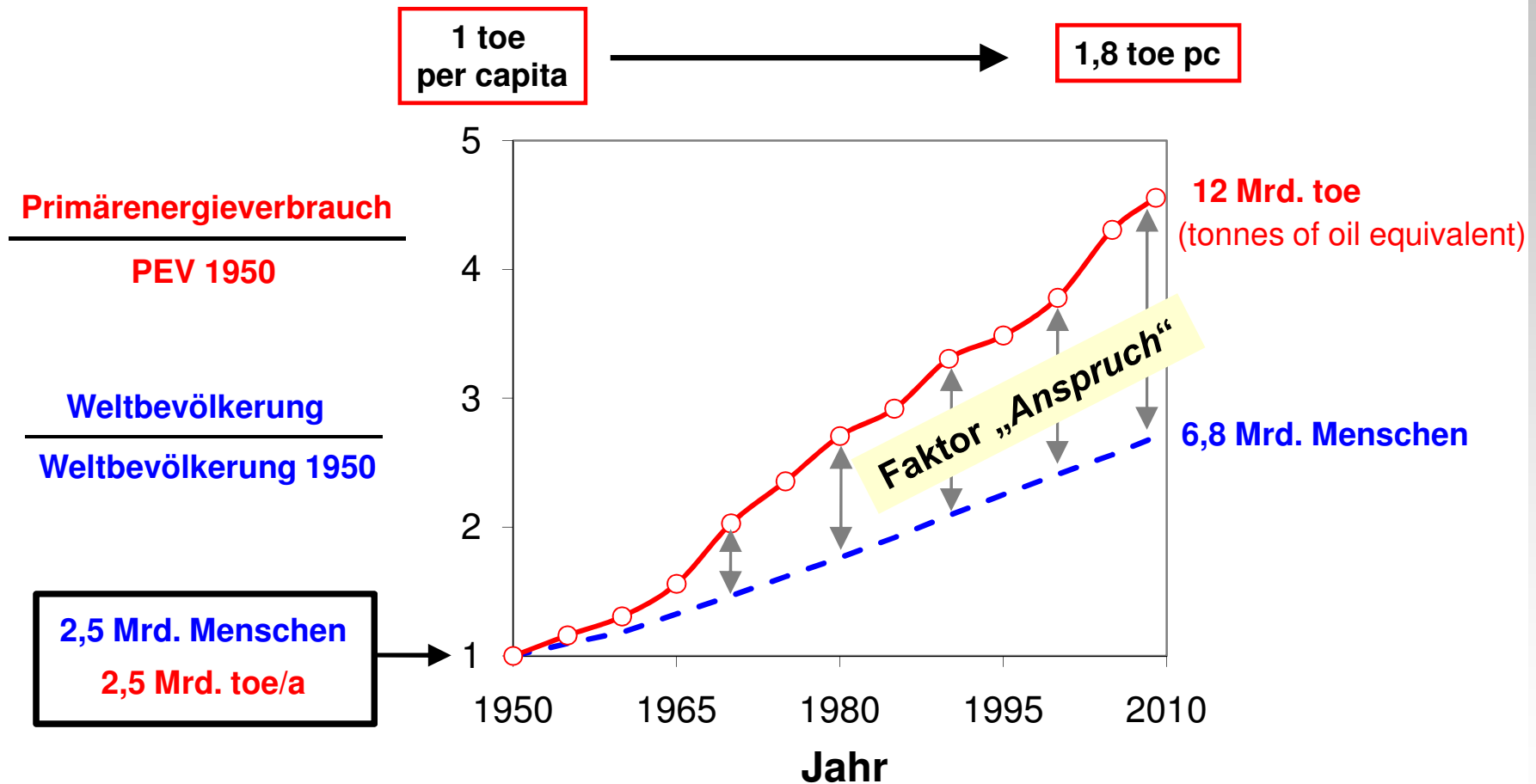
- Welchen Energieverbrauch verträgt die Erde?
(Zusammenhang von Energieverbrauch und dem ökologischer Fussabdruck)

- Was sollten wir tun?
(Energiepläne für eine glückliche Menschheit und einen glücklichen Planeten)

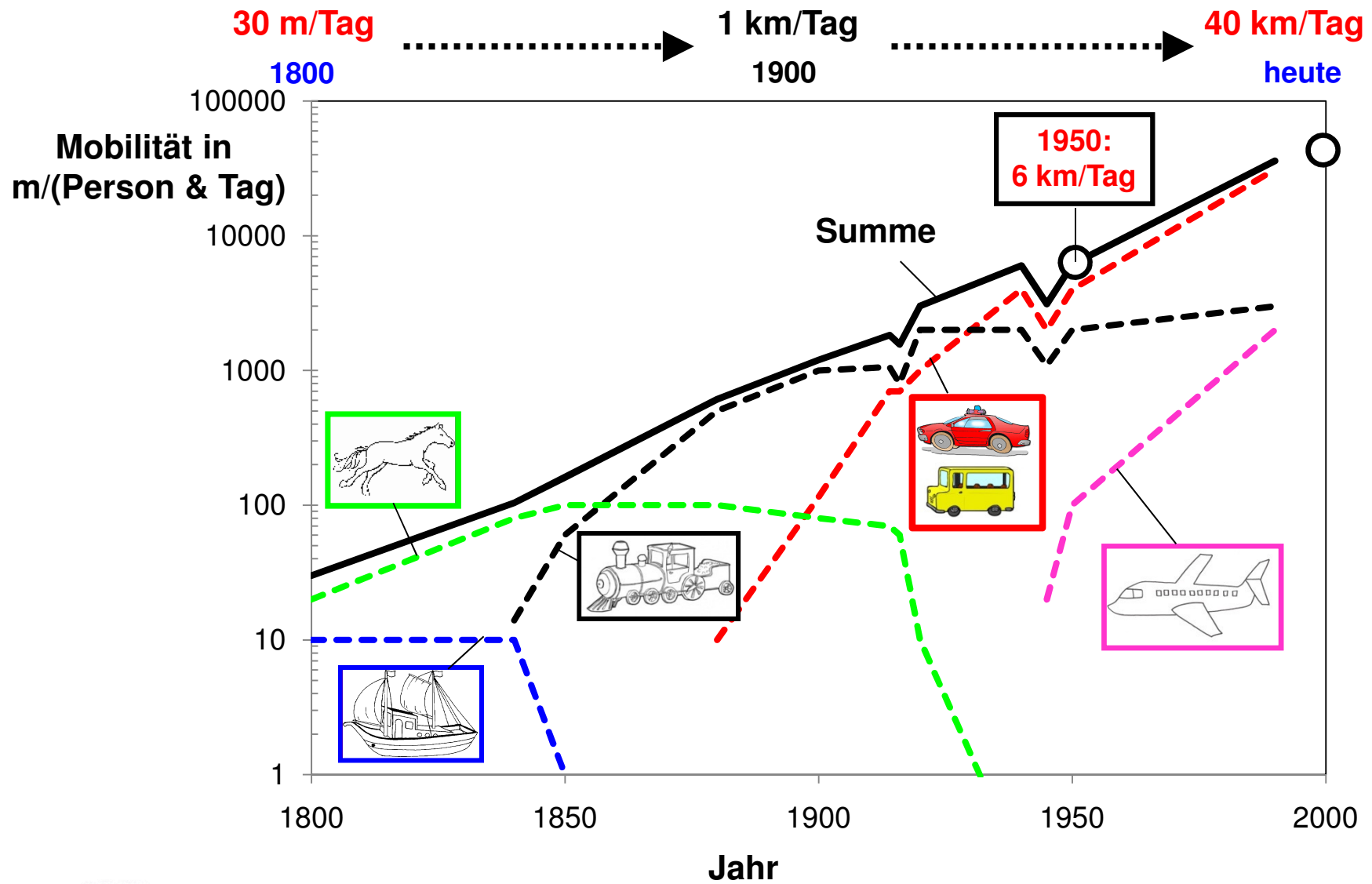


Entwicklung des Weltenergieverbrauchs und der Weltbevölkerung

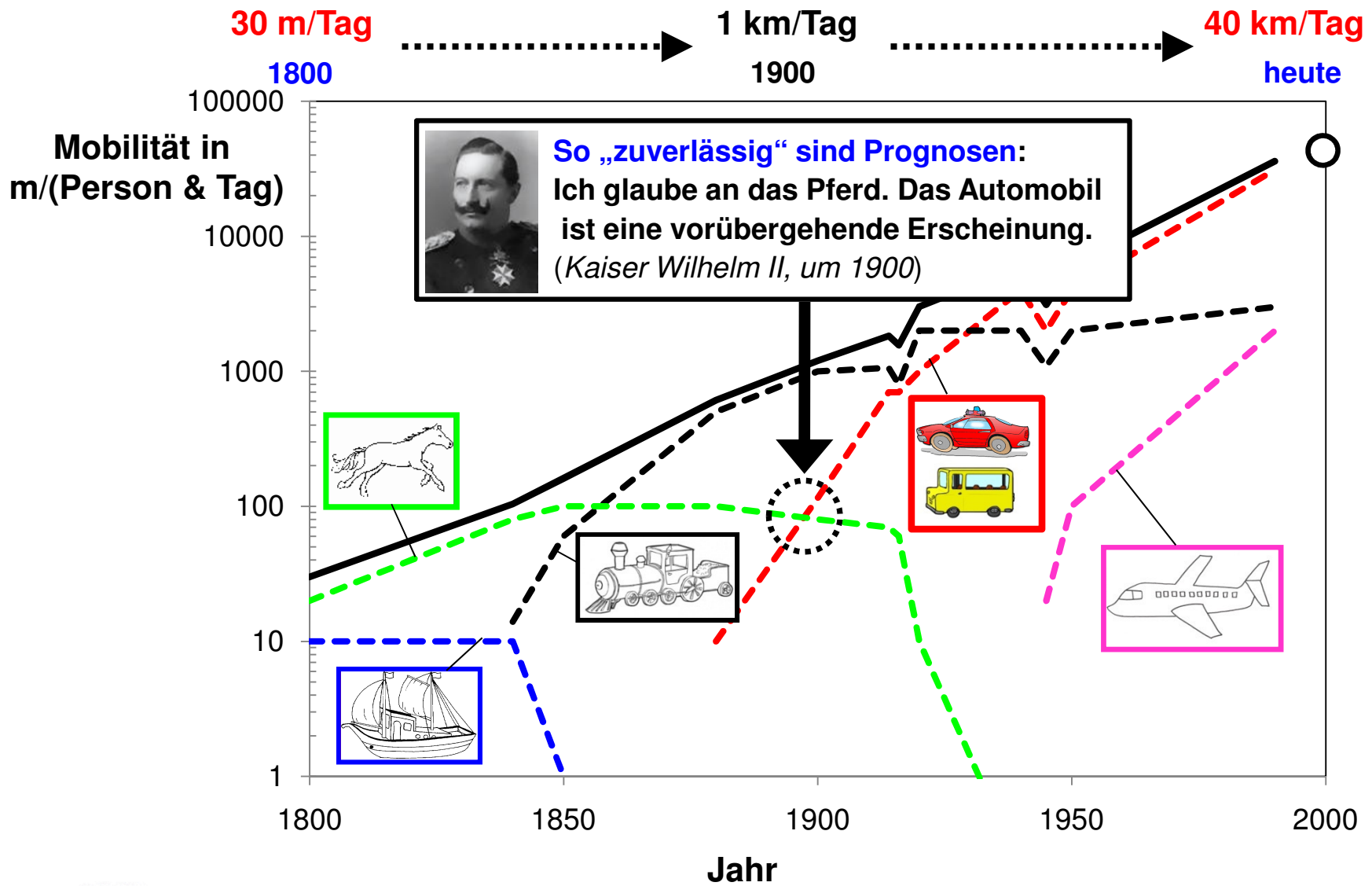
Die beiden globalen Hauptprobleme:
(1) Wir sind zu viele und (2) wir (v.a. einige von uns) wollen zu viel.



Entwicklung der täglichen Mobilität in Frankreich 1800 - 1990



Entwicklung der täglichen Mobilität in Frankreich 1800 - 1990



Energieverbrauch und weitere ausgewählte Verbrauchsindikatoren

Land	Energie in toe pc (2008) (in Grundumsätzen = 2400 kcal/Tag)	Kraftstoff ¹ in Liter pc (2005)	Wasser ² in Liter pc (2000)	Landfläche in Fußballfeldern pc (1 FF = 7300 m ²) (2009)	Länge des Streckennetzes der Eisenbahn in cm pc (2005)	PkWs ³ pc (2005)	Bevölk. in Mio. (2009)
USA	7.5 (90)	2116	?	?	72	0.5	307
Deutschl.	4.1 (49)	698			52 ⁴	0.6	82
Japan	3.9 (47)	690			21	0.3	127
China	1.6 (19)	84			6	0.02	1339
Indien	0.5 (6)	21			5	0.01	1166
Welt	1.8 (22)	291			16	0.1	6800

¹ Motorenbenzin und Dieselöl.

² domestic water (drinking, washing, bathing) and water for production of agricult./industr. goods incl. internal and external footprints.

³ Privatfahrzeuge mit mehr als zwei Rädern und maximal 9 Sitzplätzen.

⁴ 42000 km Streckennetz/80 Mio = 52 cm.

Energieverbrauch und weitere ausgewählte Verbrauchsindikatoren

Land	Energie in toe pc (2008) (in Grundumsätzen = 2400 kcal/Tag)	Kraftstoff ¹ in Liter pc (2005)	Wasser ² in Liter pc (2000)	Landfläche in Fußballfeldern pc (1 FF = 7300 m ²) (2009)	Länge des Streckennetzes der Eisenbahn in cm pc (2005)	PkWs ³ pc (2005)	Bevölk. in Mio. (2009)
USA	7.5 (90)	2116	6800	4.1	72	0.5	307
Deutschl.	4.1 (49)	698	4200	0.6	52 ⁴	0.6	82
Japan	3.9 (47)	690	3200	0.4	21	0.3	127
China	1.6 (19)	84	1900	1.0	6	0.02	1339
Indien	0.5 (6)	21	2900	0.4	5	0.01	1166
Welt	1.8 (22)	291	3400	3.0	16	0.1	6800

¹ Motorenbenzin und Dieselöl.

² domestic water (drinking, washing, bathing) and water for production of agricult./industr. goods incl. internal and external footprints.

³ Privatfahrzeuge mit mehr als zwei Rädern und maximal 9 Sitzplätzen.

⁴ 42000 km Streckennetz/80 Mio = 52 cm.



Was würde passieren, wenn alle Inder und Chinesen bereits heute so Auto fahren würden wie wir Deutschen bzw. US-Amerikaner?





globaler Kraftstoffverbrauch:

Verhalten wie Deutsche: + 60 % (2,1 Mrd. t/a → 3,3 Mrd. t/a)

Verhalten wie US-Amerikaner: + 290 % (2,1 Mrd. t/a → 6 Mrd. t/a)

Δ = derzeitiger Weltölverbrauch



Ist-Zustand der Energieversorgung: Primärenergieverbrauch (2007)

Energieträger	Deutschland	Welt
Erdöl	35 %	34 %
Kohle	24 %	25 %
Erdgas	23 %	21 %
Kernenergie	12 %	6 %
Biomasse (Holz, Biodiesel, Biogas...)	4 %	11 %
Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik, Solarthermie Geothermie, Gezeiten	2 %	3 %

Quellen: BMWi, BMU, IEA

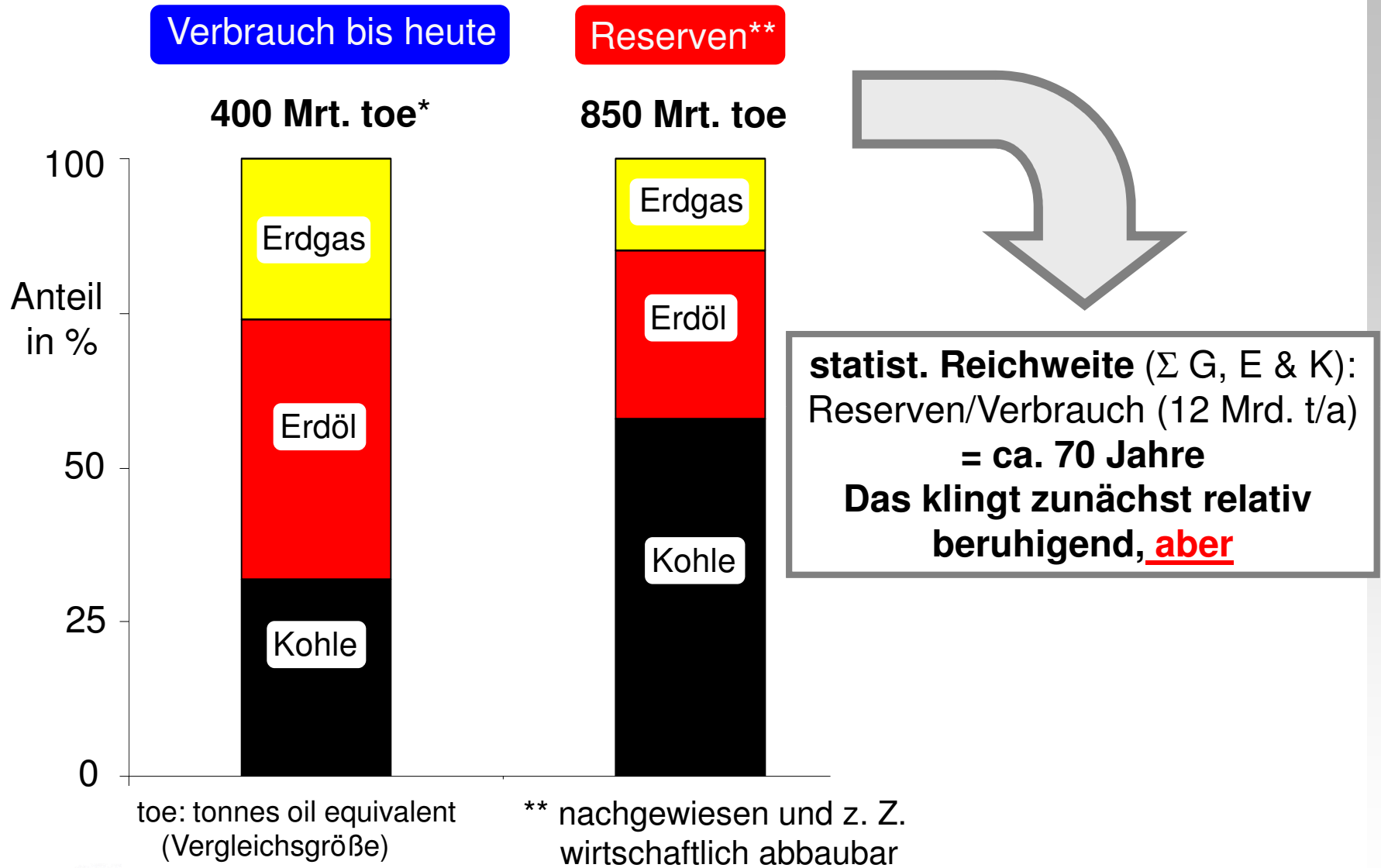
Ist-Zustand der Energieversorgung: Primärenergieverbrauch (2007)

Energieträger	Deutschland	Welt	
Erdöl	} 82 %	} 80 %	fossile Energie
Kohle			
Erdgas			
Kernenergie	12 %	6 %	Kernenergie
Biomasse (Holz, Biodiesel, Biogas...)	} 6 %	} 14 %	regenerative Energie
Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik, Solarthermie Geothermie, Gezeiten			

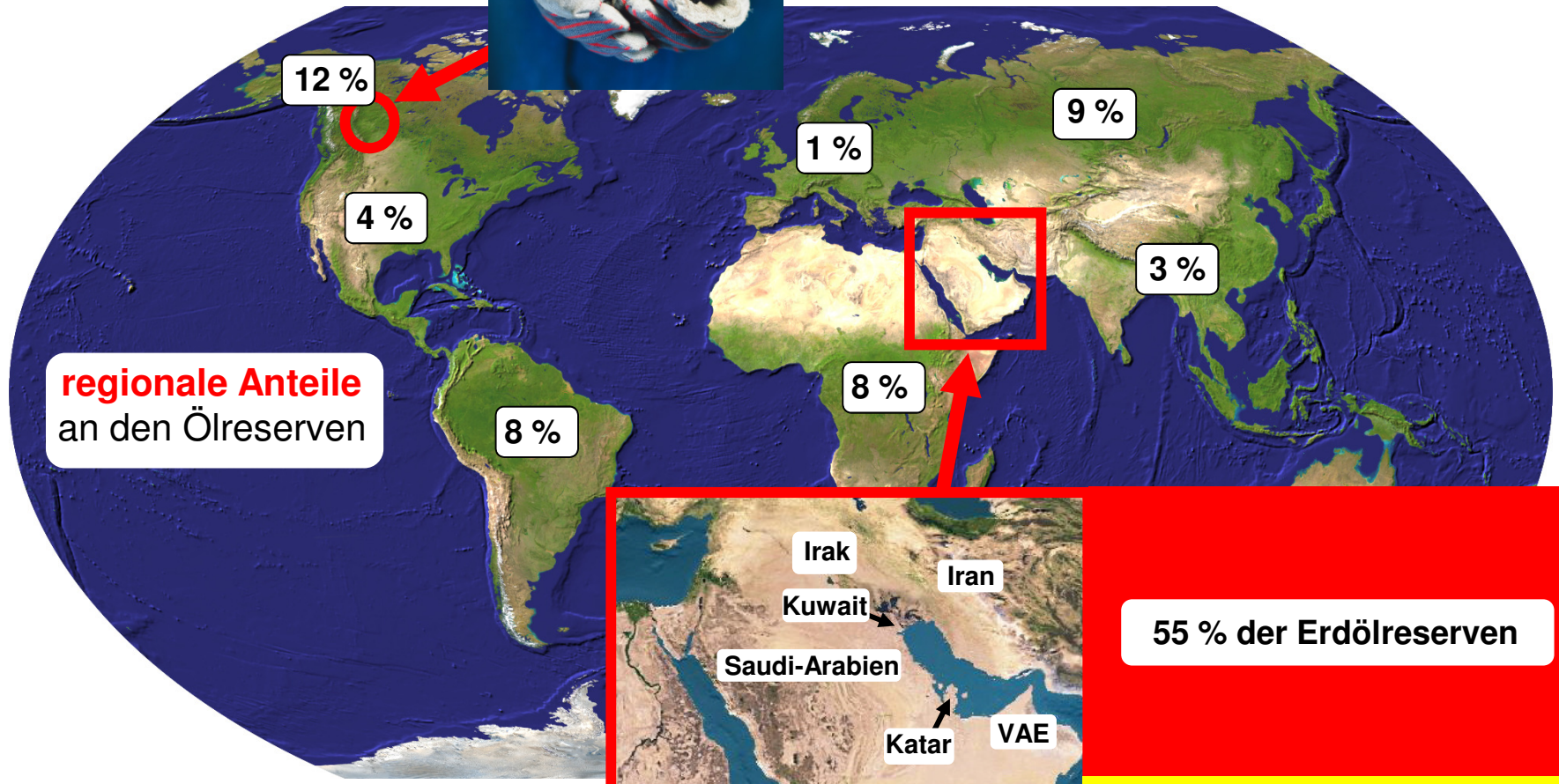
Quellen: BMWi, BMU, IEA

- Wo stehen wir heute?
(Ist-Zustand der globalen Energieversorgung)
- **Was steht uns noch zur Verfügung?**
(Reserven & Ressourcen fossiler Energieträger)
- Wieviel Energie braucht der Mensch?
(Zusammenhang von Energieverbrauch und sozialen Indikatoren)
- Welchen Energieverbrauch verträgt die Erde?
(Zusammenhang von Energieverbrauch und dem ökologischer Fussabdruck)
- Was sollten wir tun?
(Energiepläne für eine glückliche Menschheit und einen glücklichen Planeten)

Fossile Energieträger: globale Reserven



Ölreserven

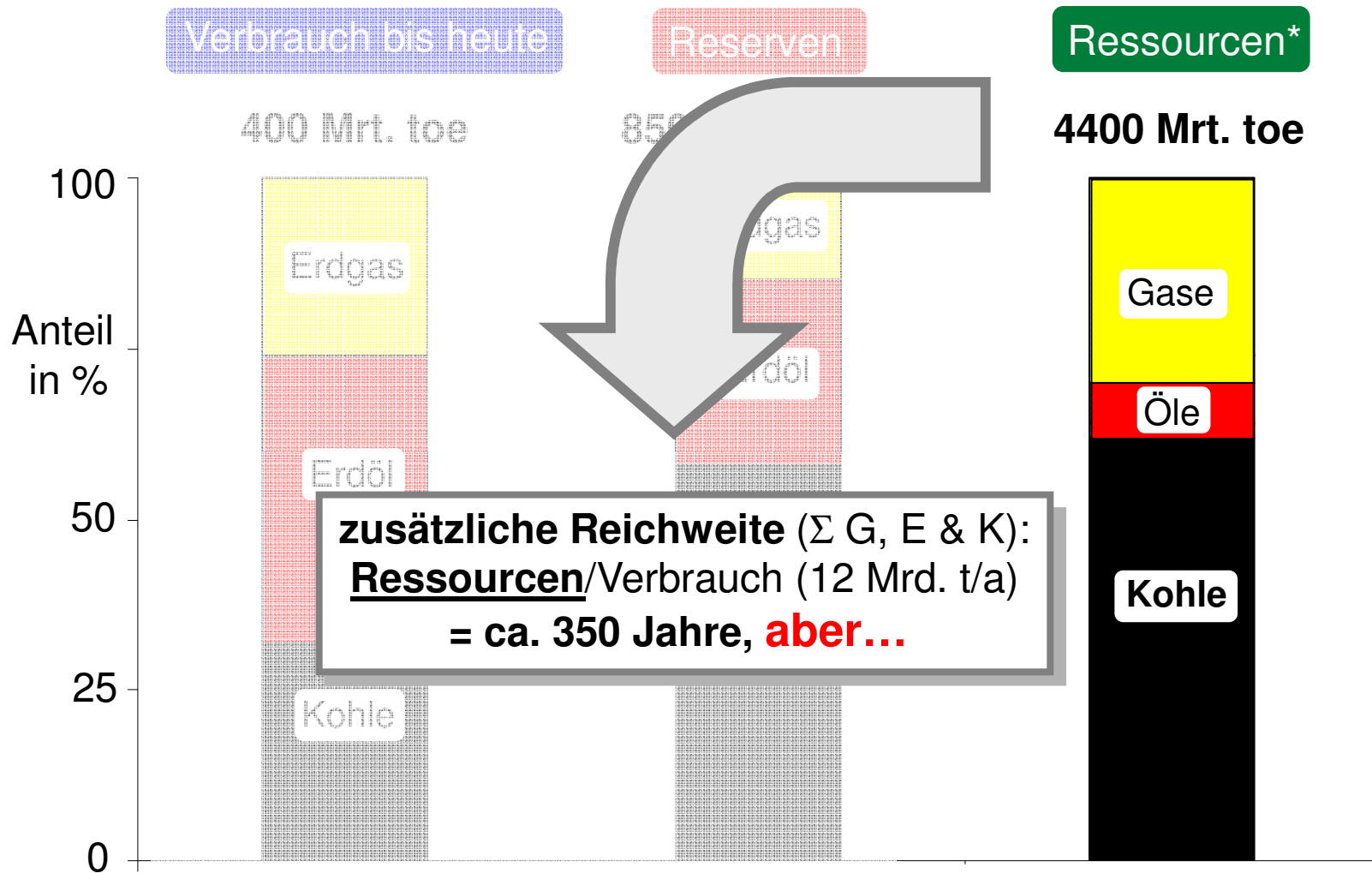


55 % der Erdölreserven

38 % der Erdgasreserven

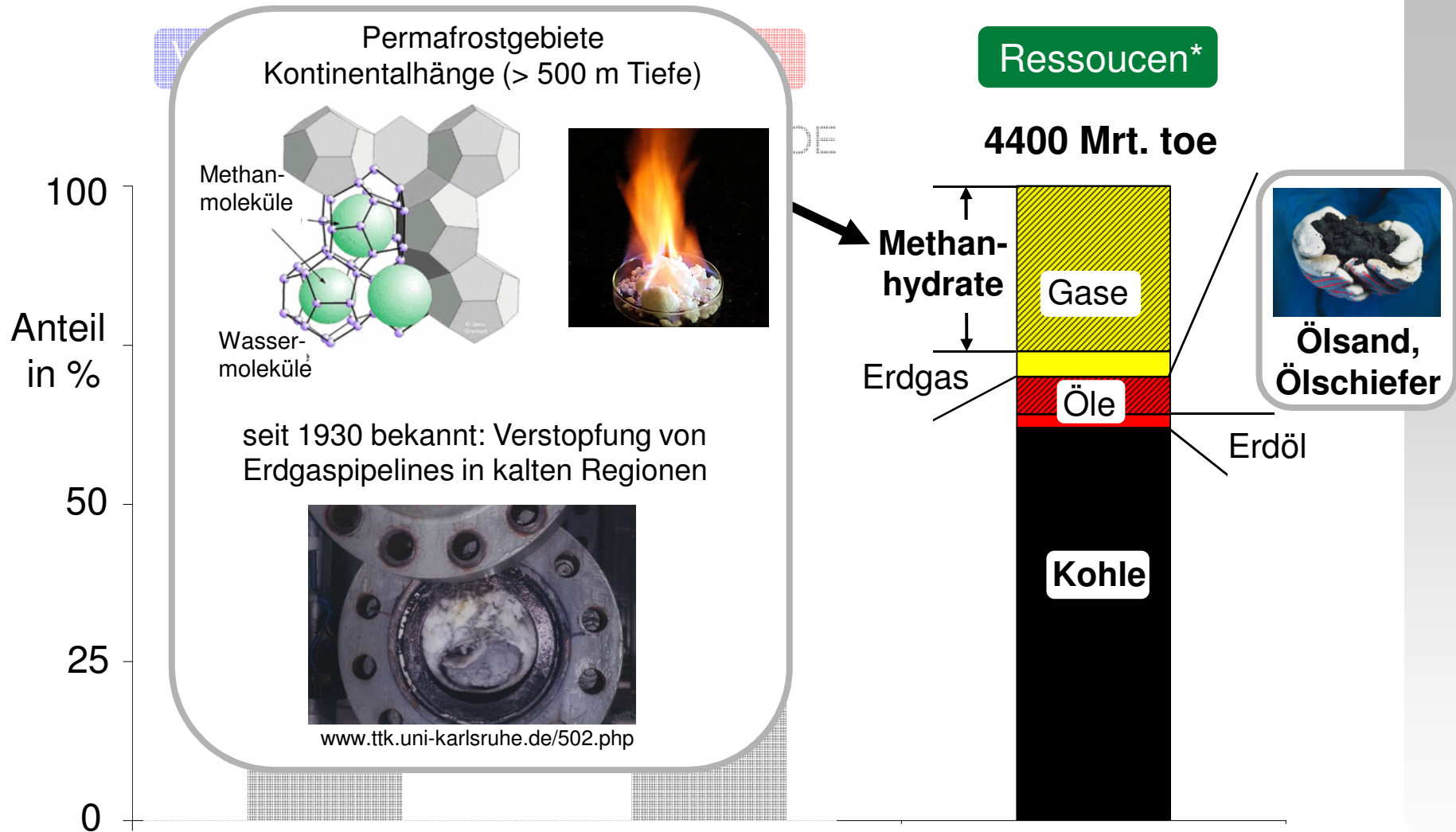
Quelle: BP Energy Data

Fossile Energieträger: globale Ressourcen



* nachgewiesen, aber noch nicht wirtschaftlich abbaubar

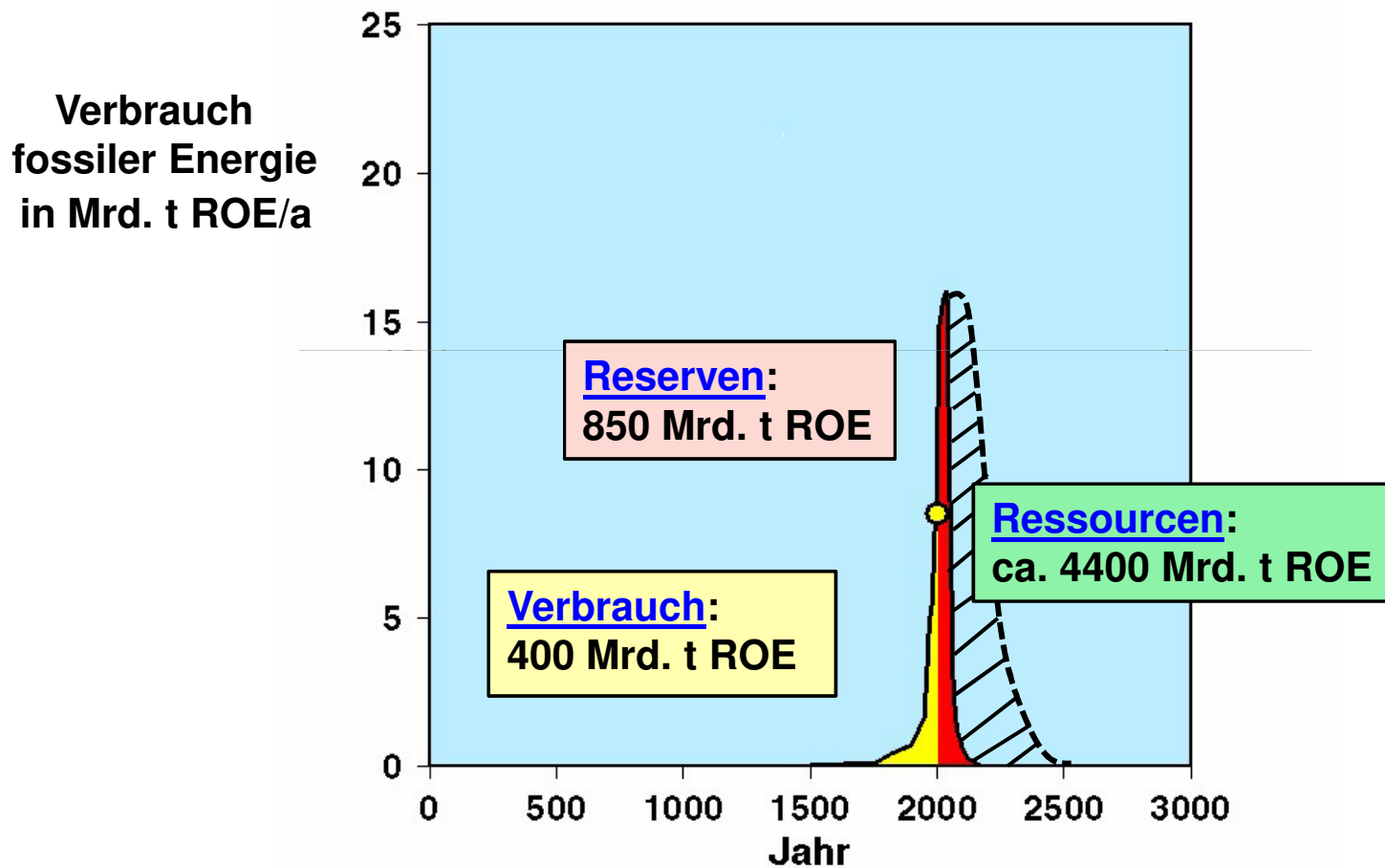
Fossile Energieträger: globale Reserven und Ressourcen



* nachgewiesen, aber noch nicht wirtschaftlich abbaubar

Fossile Energieträger: weltweiter Verbrauch

Die Verfügbarkeit fossiler Energie ist nicht das Hauptproblem, sondern die Folgen (Klima, Kosten & η_{energie} bei Ölsand/Ölschiefer, Kohle.....).



- Wo stehen wir heute?
(Ist-Zustand der globalen Energieversorgung)
- Was steht uns noch zur Verfügung?
(Reserven & Ressourcen fossiler Energieträger)
- **Wieviel Energie braucht der Mensch?**
(Zusammenhang von Energieverbrauch und sozialen Indikatoren)
- Welchen Energieverbrauch verträgt die Erde?
(Zusammenhang von Energieverbrauch und dem ökologischer Fussabdruck)
- Was sollten wir tun?
(Energiepläne für eine glückliche Menschheit und einen glücklichen Planeten)

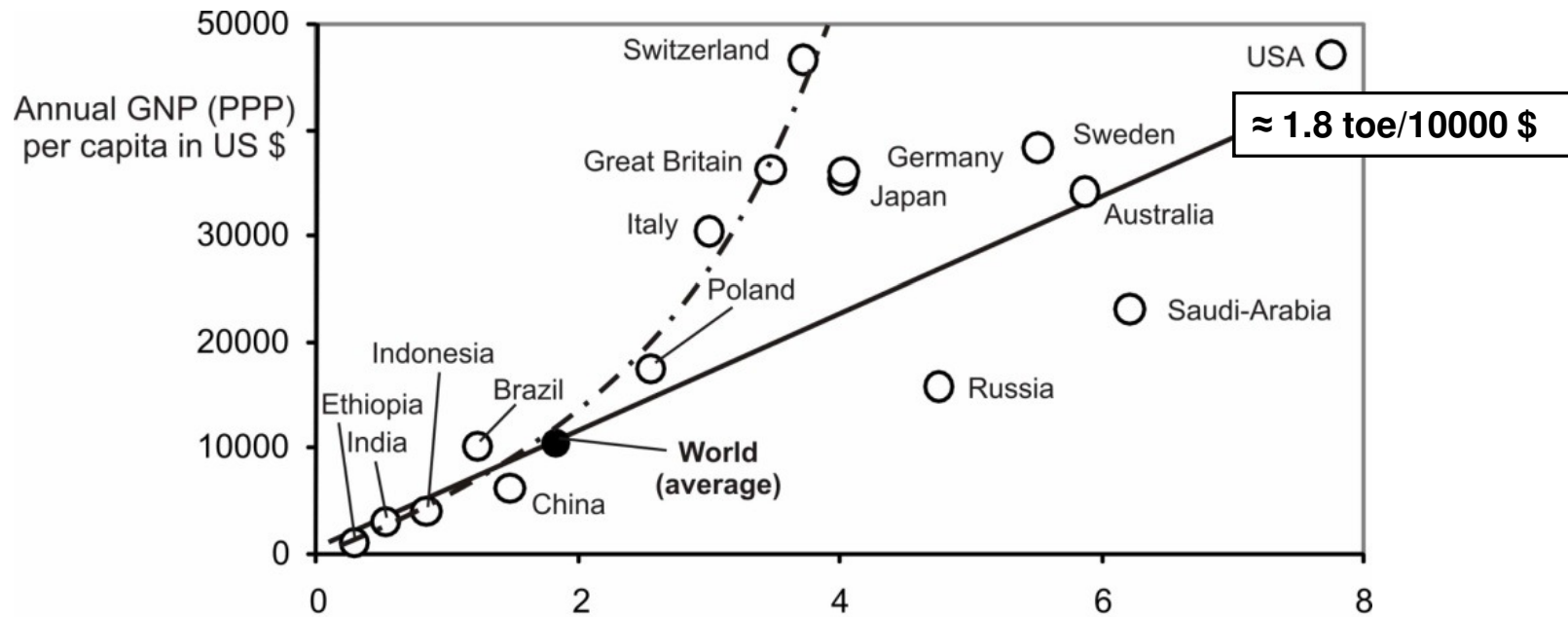
Wie hoch ist der minimale Energieverbrauch pro Kopf (E_{min})? (Wohlstand, Bildung, Gesundheit, Zufriedenheit = *scenario of happy world population*)



Wie hoch ist der minimale Energieverbrauch pro Kopf (E_{min})? (Wohlstand, Bildung, Gesundheit, Zufriedenheit = *scenario of happy world population*)



Bruttosozialprod. je Einw. (Kaufkraftparität USA)

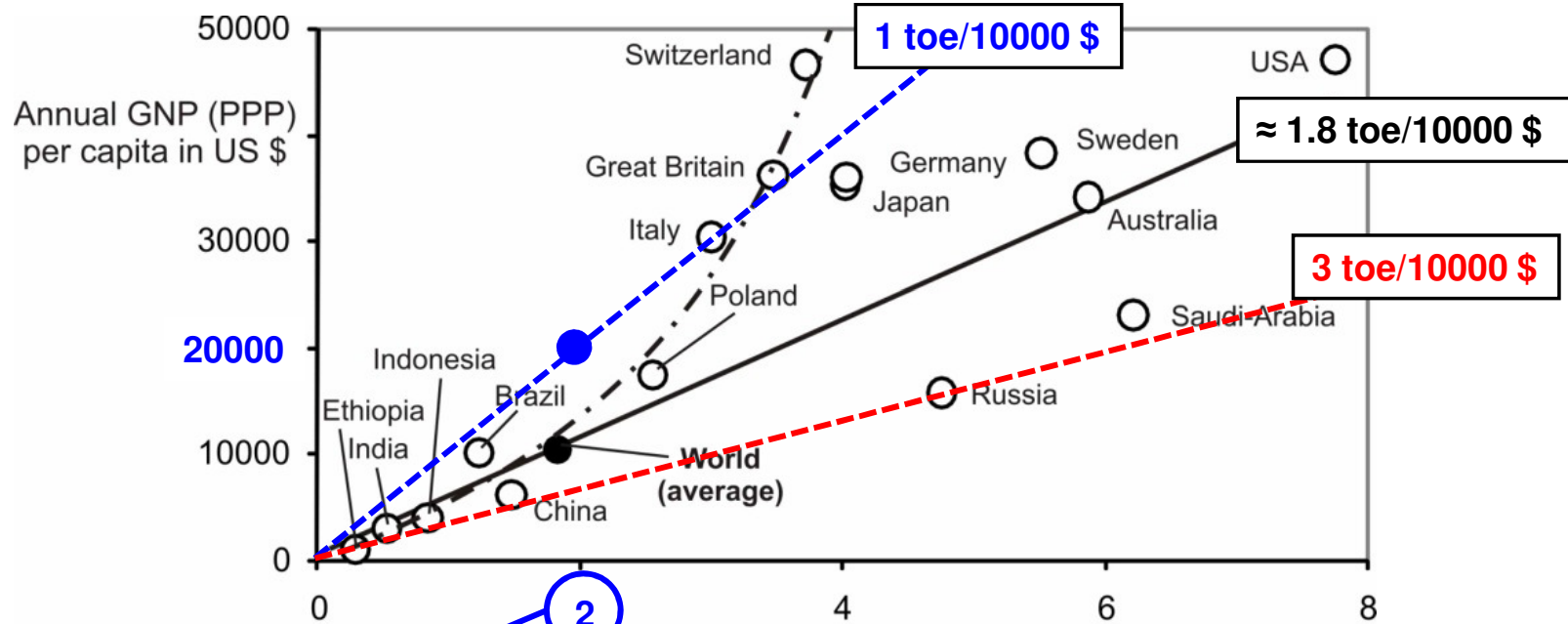


Energieverbrauch pro Kopf in toe pc

Wie hoch ist der minimale Energieverbrauch pro Kopf (E_{min})? (Wohlstand, Bildung, Gesundheit, Zufriedenheit = *scenario of happy world population*)



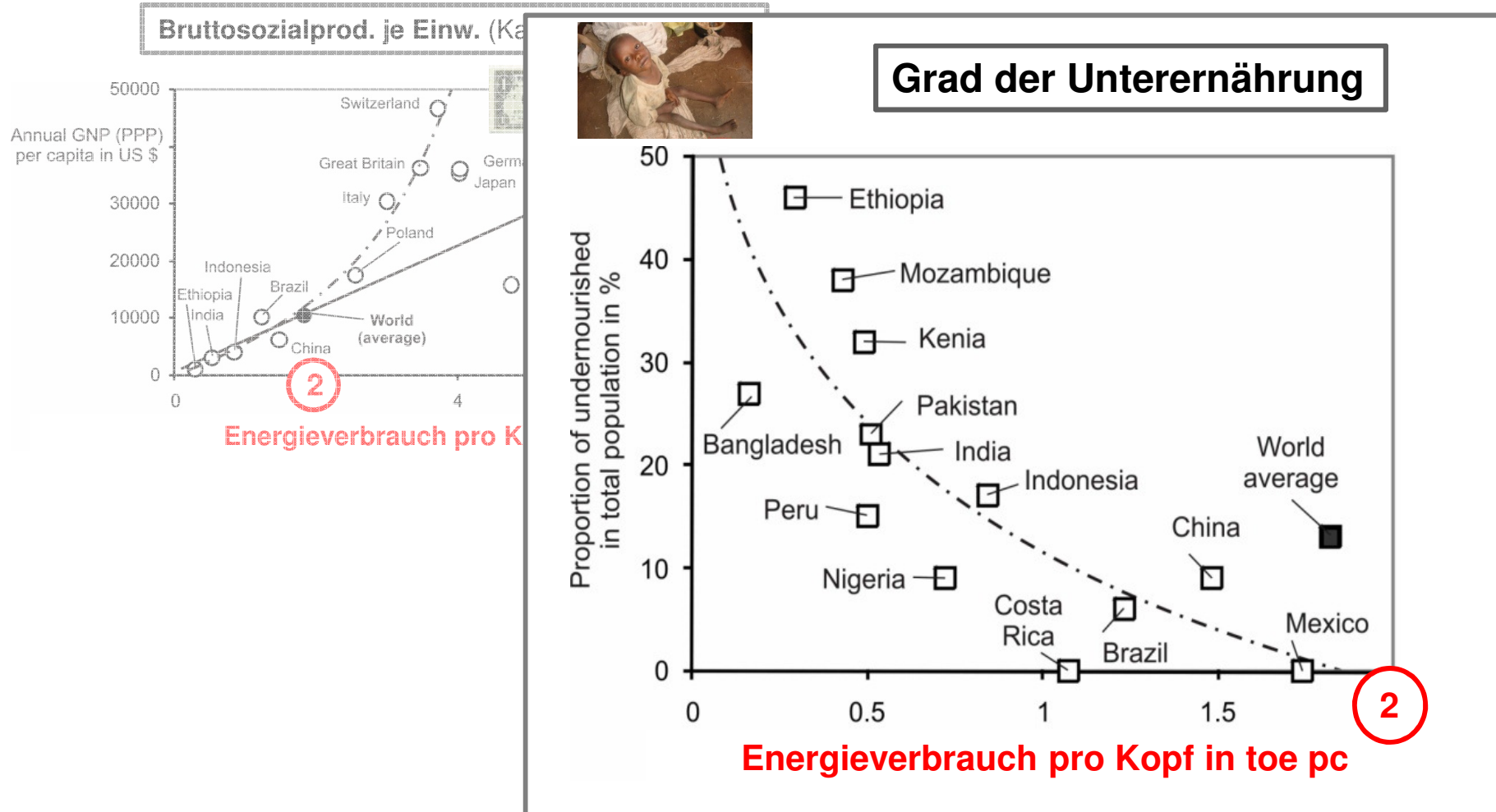
Bruttosozialprod. je Einw. (Kaufkraftparität USA)



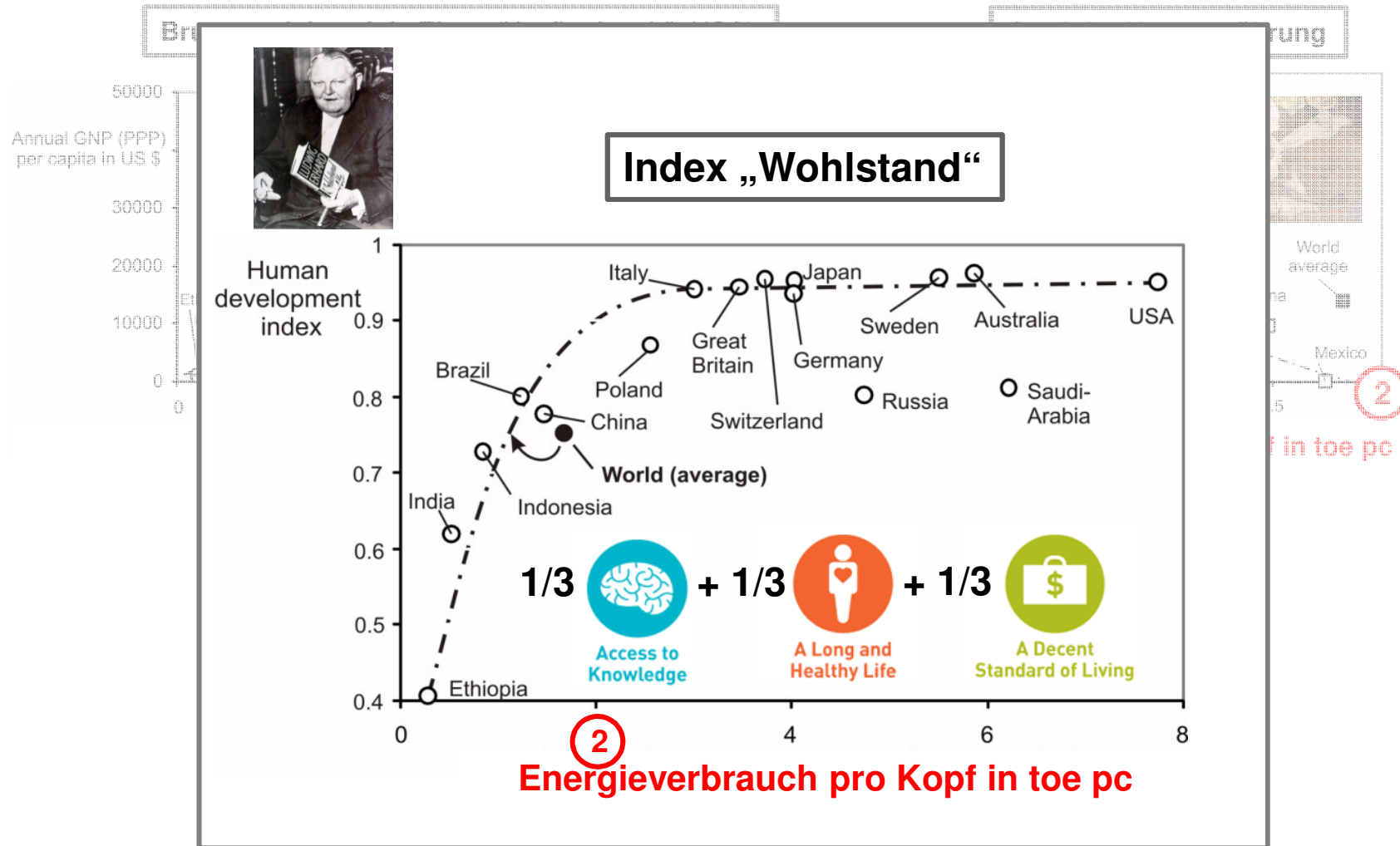
erster Anhaltwert für globales Ziel?

Energieverbrauch pro Kopf in toe pc

Wie hoch ist der minimale Energieverbrauch pro Kopf (E_{min})? (Wohlstand, Bildung, Gesundheit, Zufriedenheit = *scenario of happy world population*)



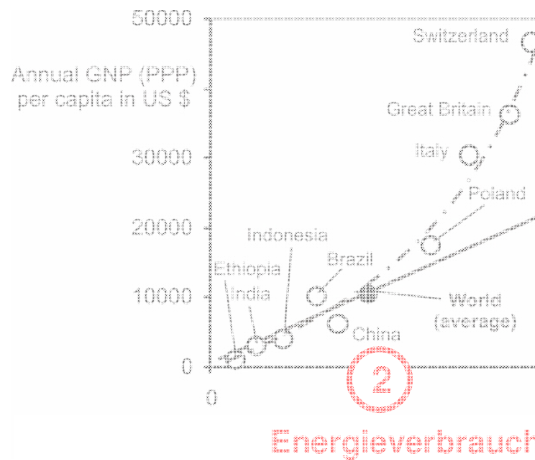
Wie hoch ist der minimale Energieverbrauch pro Kopf (E_{min})? (Wohlstand, Bildung, Gesundheit, Zufriedenheit = *scenario of happy world population*)



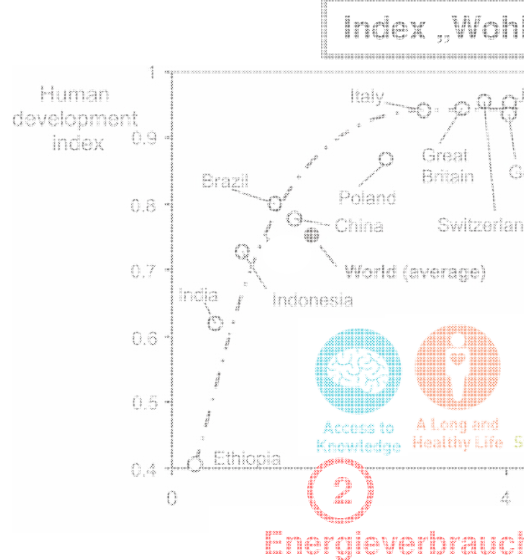
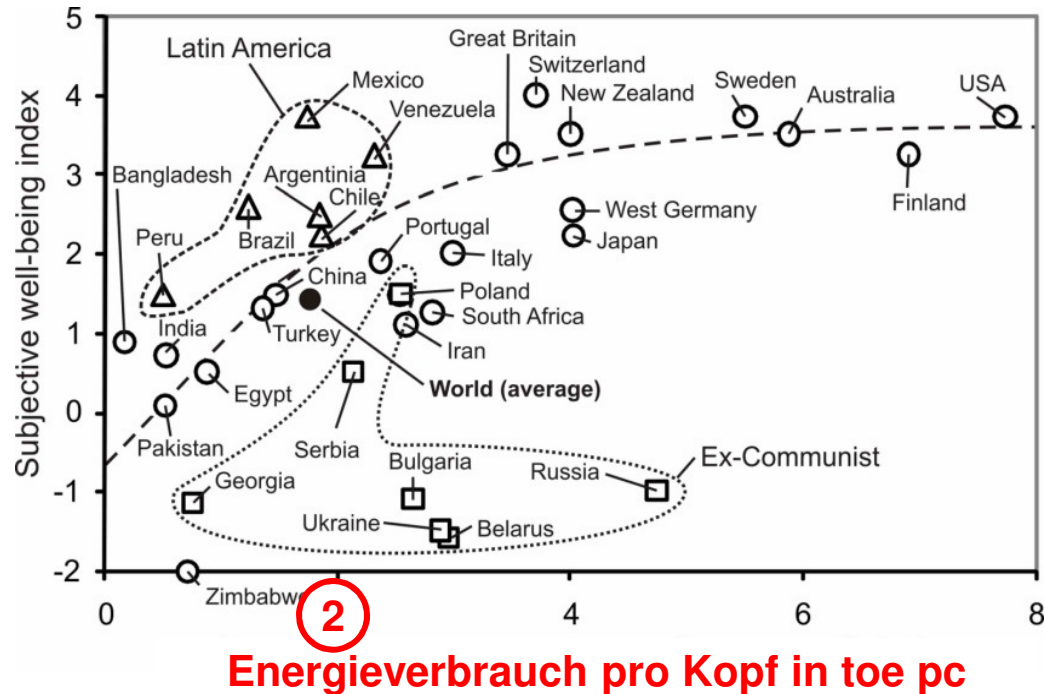
Wie hoch ist der minimale Energieverbrauch pro Kopf (E_{min})? (Wohlstand, Bildung, Gesundheit, Zufriedenheit = *scenario of happy world population*)

Bruttosozialprod. je Einw. (Kaufkraftparität USA)

Grad der Unterernährung

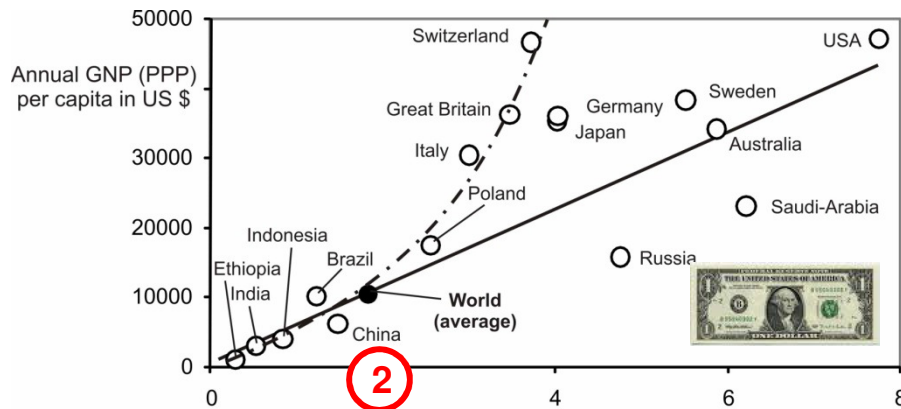


Index „subjektives Wohlbefinden“



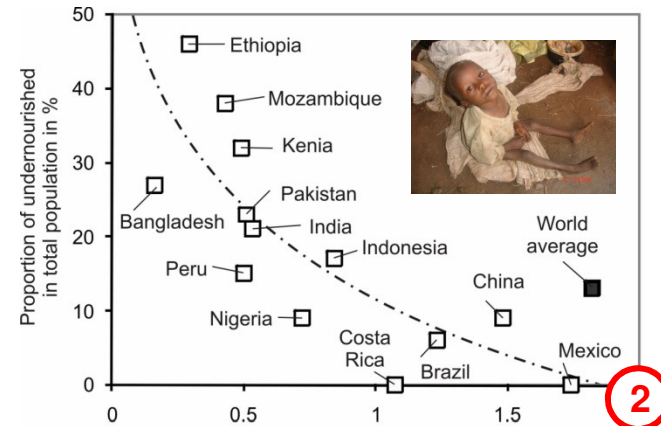
Wichtige soziale Indikatoren (Wohlstand/Wohlbefinden) zeigen, dass der minimale Energieverbrauch pro Kopf und Jahr etwa 2 toe beträgt.

Bruttosozialprod. je Einw. (Kaufkraftparität USA)



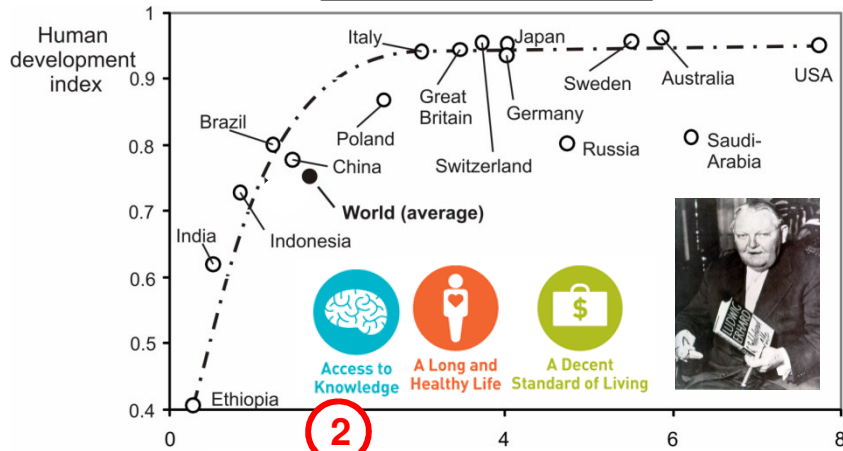
Energieverbrauch pro Kopf in toe pc

Grad der Unterernährung



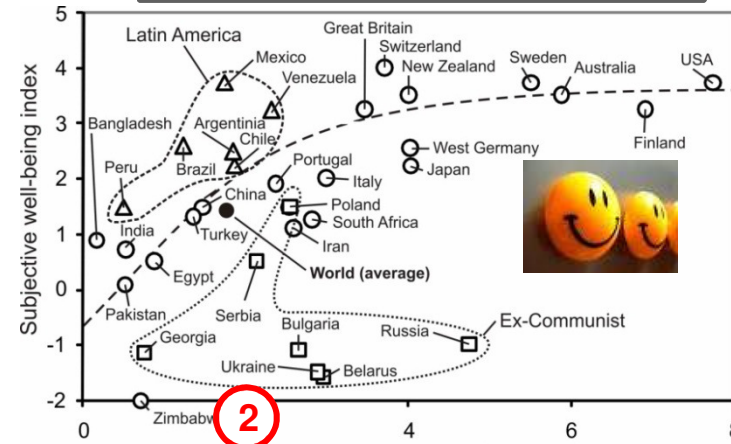
Energieverbrauch pro Kopf in toe pc

Index „Wohlstand“



Energieverbrauch pro Kopf in toe pc

Index „subjektives Wohlbefinden“



Energieverbrauch pro Kopf in toe pc



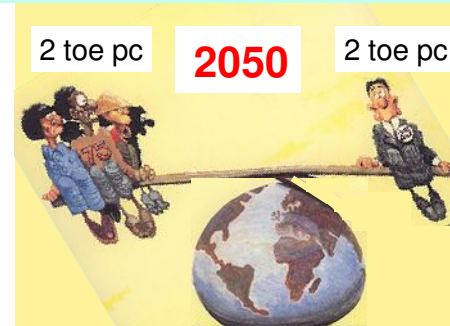
- Wo stehen wir heute?
(Ist-Zustand der globalen Energieversorgung)
- Was steht uns noch zur Verfügung?
(Reserven & Ressourcen fossiler Energieträger)
- Wieviel Energie braucht der Mensch?
(Zusammenhang von Energieverbrauch und sozialen Indikatoren)
- **Welchen Energieverbrauch verträgt die Erde?**
(Zusammenhang von Energieverbrauch und dem ökologischer Fussabdruck)
- Was sollten wir tun?
(Energiepläne für eine glückliche Menschheit und einen glücklichen Planeten)

Eckdaten und Kernfragen der zukünftigen Energieversorgung

- 1 Soziale Indikatoren (Wohlstand/Wohlbefinden/gesicherte Ernährung) zeigen, dass der **minimale jährliche Energieverbrauch etwa 2 toe pc** (per capita) beträgt.



Szenario "happy world population"



- 2 **2010** (7 Mrd. Menschen, 1,8 toe pc):
Energieverbrauch: 12 Mrd. toe/a
-
- 2050** (9 Mrd. Menschen, 2 toe pc):
E.-Verbrauch: 18 Mrd. toe/a

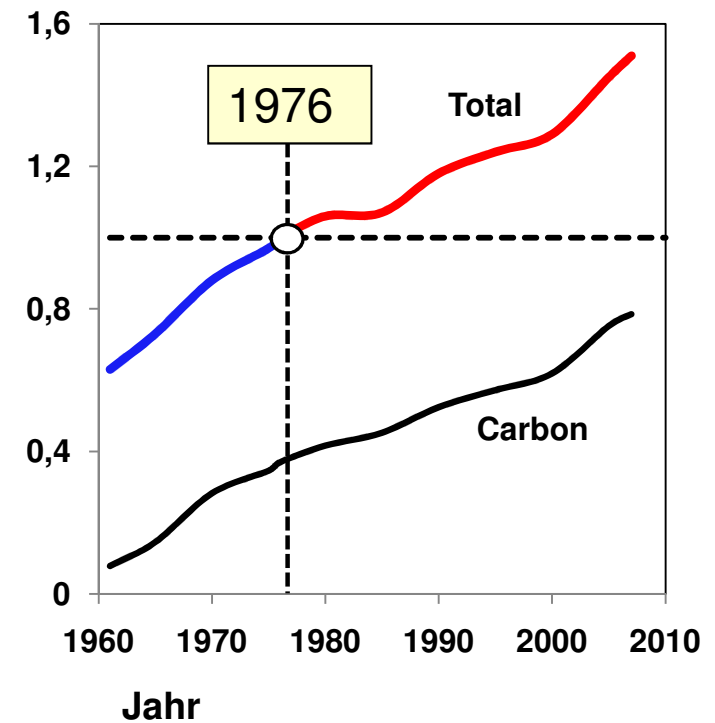
Die meisten Prognosen gehen sogar vom doppelten bis dreifachen Verbrauch in 2050 aus!!

Ecological footprint 2005

Region	Population in billion	Ecological footprint per head in planet Earths
Africa	0.90	0.7
Asia-Pacific	3.56	0.8
Middle East and Central Asia	0.37	1.1
Latin America & Caribbean	0.55	1.1
Europe (non-EU)	0.24	1.7
Europe (EU)	0.49	2.2
North America	0.33	4.4
World	6.48	1.3

footprint data from Global footprint network (2009)

Global footprint in planet Earth



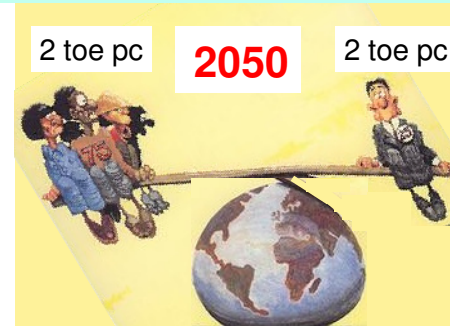
2005: Carbon footprint (52%), Ackerland (24%), Weideland (10%), Wälder (9%), Fischgründe (3%), bebaute Fläche (2%).

Eckdaten und Kernfragen der zukünftigen Energieversorgung

- 1 Soziale Indikatoren (Wohlstand/Wohlbefinden/gesicherte Ernährung) zeigen, dass der **minimale jährliche Energieverbrauch etwa 2 toe pc** (per capita) beträgt.

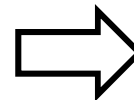


Szenario "happy world population"



- 2 2010 (7 Mrd. Menschen, 1,8 toe pc):
Energieverbrauch: 12 Mrd. toe/a
- 2050 (9 Mrd. Menschen, 2 toe pc):
E.-Verbrauch: 18 Mrd. toe/a

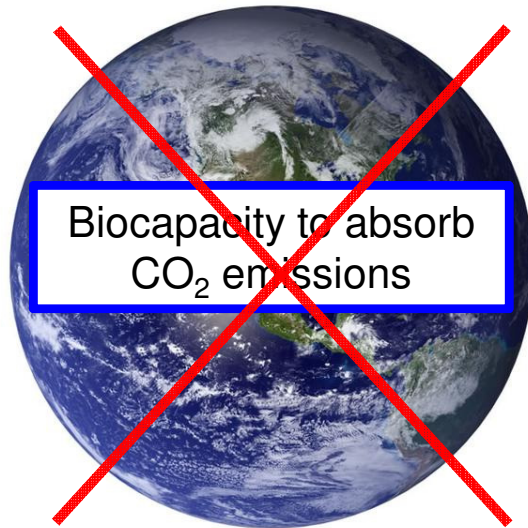
- 3 **Ökologischer Fußabdruck* in 2050 = two planet Earths** (bei heutigem Energiemix).



* Human demand on Earth's ecosystems = productive land/sea area needed to regenerate consumed

Vermutlich einzige Chance zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks

2050



Einzig Alternative:
Umstellung auf regenerative Energien



- Wo stehen wir heute?
(Ist-Zustand der globalen Energieversorgung)
- Was steht uns noch zur Verfügung?
(Reserven & Ressourcen fossiler Energieträger)
- Wieviel Energie braucht der Mensch?
(Zusammenhang von Energieverbrauch und sozialen Indikatoren)
- Welchen Energieverbrauch verträgt die Erde?
(Zusammenhang von Energieverbrauch und dem ökologischer Fussabdruck)
- **Was sollten wir tun?**
(Energiepläne für eine glückliche Menschheit und einen glücklichen Planeten)

Potentiale erneuerbarer Energien und Energieplan für 9 Mrd. Menschen

Energy source	Energy potential and consumption (goal) in billion toe		
	Today ¹	Potential ¹ (estimation based on data from MacKay)	Scenario for a happy planet <u>and a happy world population</u> (2 toe per capita and year)
Wind	0.06	4.5	1.8 ²
Hydro	0.7	1.2	0.6 ³
Tide and wave	< 0.1	0.2	0.1
Geothermal	< 0.1	1.5	0.7
Commercial biomass	0.4	1.8 ⁴	0.9
Concentrated solar power⁵	< 0.1	54	13.9
Nuclear (once-through reactor) ⁶	0.6	1.4	-
Nuclear (fast breeder) ⁶	-	85.5	-
Total	≈ 2	150	18

¹ direct equivalence method , 1 kJ of electricity is 1 kJ of chemical energy. Values for “today”: substitution equivalence method.

² This production of electrical power would require the operation of 2 million state-of-the-art wind turbines.

³ Economically feasible hydropower reached if the currently installed capacity is increased by a factor of about 2.5.

⁴ According to Heinloth (2003), the feasible potential of commercial biomass for heat (20%), fuels (25%) and electricity (55%) is in total 0.2 toe pc and year.

⁵ According to the DESERTEC plan, the economic potential is 54 billion toe per year . Photovoltaic energy systems are neglected.

⁶ Assumption that also the uranium extracted from oceans (98% of total) can be used (MacKay, 2008).

Potentiale erneuerbarer Energien und Energieplan für 9 Mrd. Menschen

Energy source	Energy potential and consumption (goal) in billion toe		
	Today ¹	Potential ¹ (estimation based on data from MacKay)	Scenario for a happy planet and a happy world population (2 toe per capita and year)
Wind	0.06	4.5	1.8 ²
Hydro	0.7	1.2	0.6 ³
Tide and wave	< 0.1	0.2	0.1
Geothermal	< 0.1	1.5	0.7
Commercial biomass	0.4	1.8⁴	0.9
Concentrated solar power⁵	< 0.1	54	13.9
Nuclear (once-through reactor) ⁶	0.6	1.4	-
Nuclear (fast breeder) ⁶	-	85.5	-
Total	≈ 2	150	18

¹ direct equivalence method , 1 kJ of electricity is 1 kJ of chemical energy. Values for “today”: substitution equivalence method.

² This production of electrical power would require the operation of 2 million state-of-the-art wind turbines.

³ Economically feasible hydropower reached if the currently installed capacity is increased by a factor of about 2.5.

⁴ According to Heinloth (2003), the feasible potential of commercial biomass for heat (20%), fuels (25%) and electricity (55%) is in total 0.2 toe pc and year.

⁵ According to the DESERTEC plan, the economic potential is 54 billion toe per year . Photovoltaic energy systems are neglected.

⁶ Assumption that also the uranium extracted from oceans (98% of total) can be used (MacKay, 2008).

Zur Rolle vom Biomasse an der globalen Energieversorgung

Energieträger	Welt
Erdöl	34 %
Kohle	25 %
Erdgas	21 %
Kernenergie	6 %
Biomasse (Holz, Biodiesel, Biogas)	11 %
Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik, Solarthermie Geothermie, Gezeiten	3 %

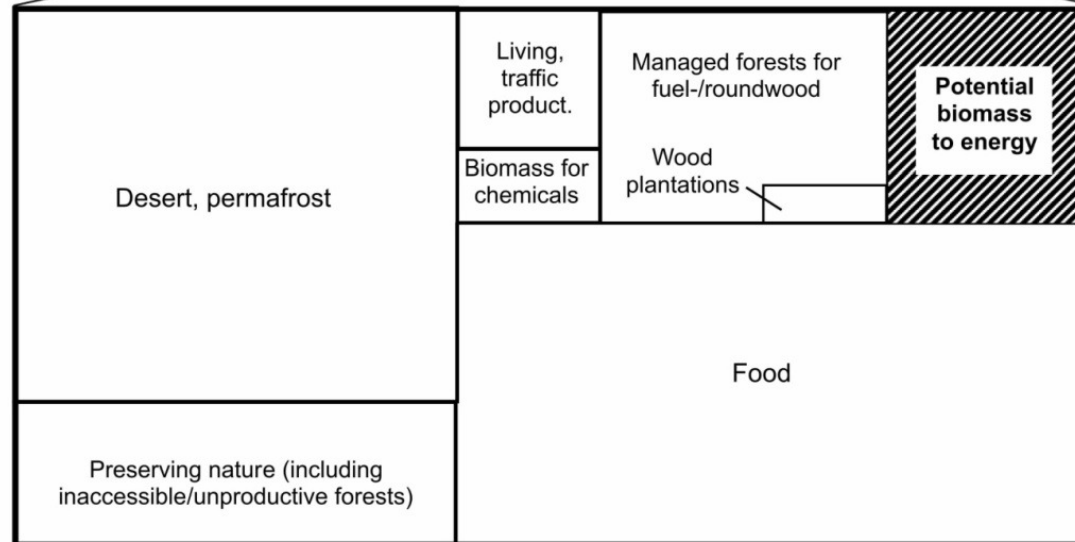
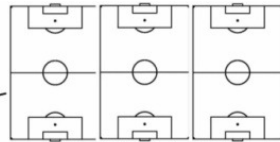
**70 % traditionelle*
Biomasse**, d.h.
auch Abholzung in
Entwicklungsländern!

* traditionell: nicht
kommerziell gehandelt

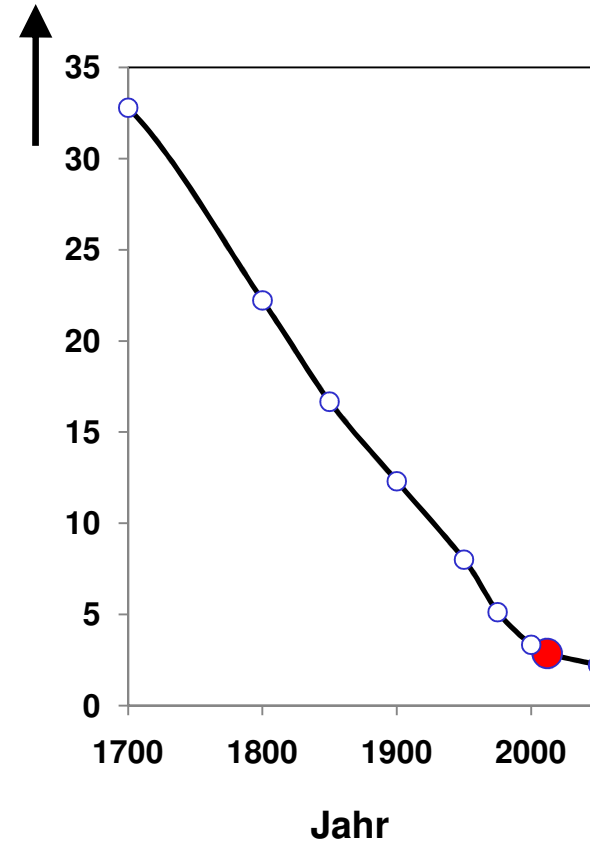
Quellen: BMWi, BMU, IEA

Flächenbedarf 2010 (globaler Mittelwert)

2010 (6,8 Mrd. Menschen)
3 Fußballfelder je Einwohner
 (D: 0,6 FF je Einwohner)

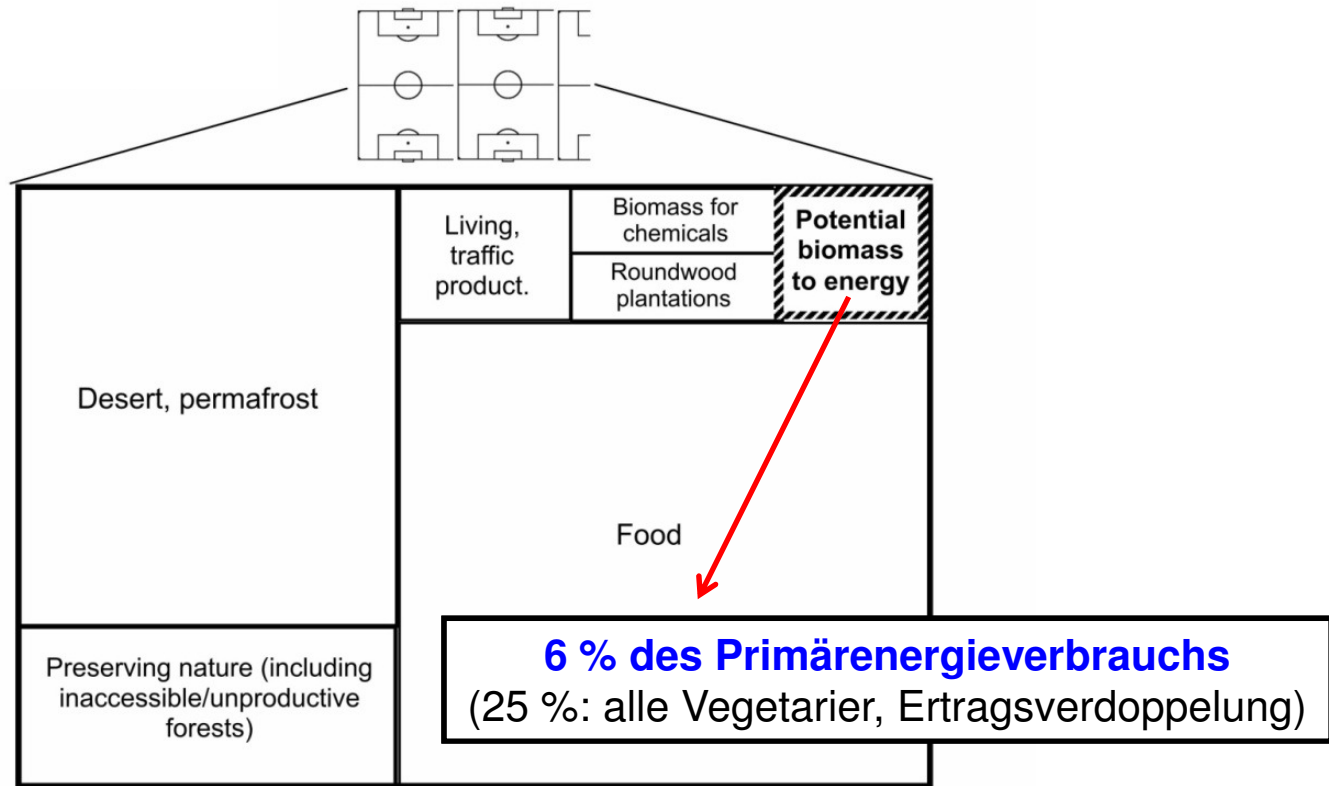


Landfläche/Einwohner in Fußballfeldern



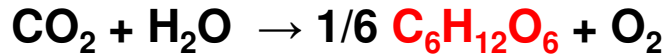
Flächenbedarf 2050 (globaler Mittelwert)

2050 (9 Mrd. Menschen)
2,3 Fußballfelder je Einwohner



Natürliche und synthetische Photosynthese

natürliche Photosynthese:



technische Photosynthese (Konzept):

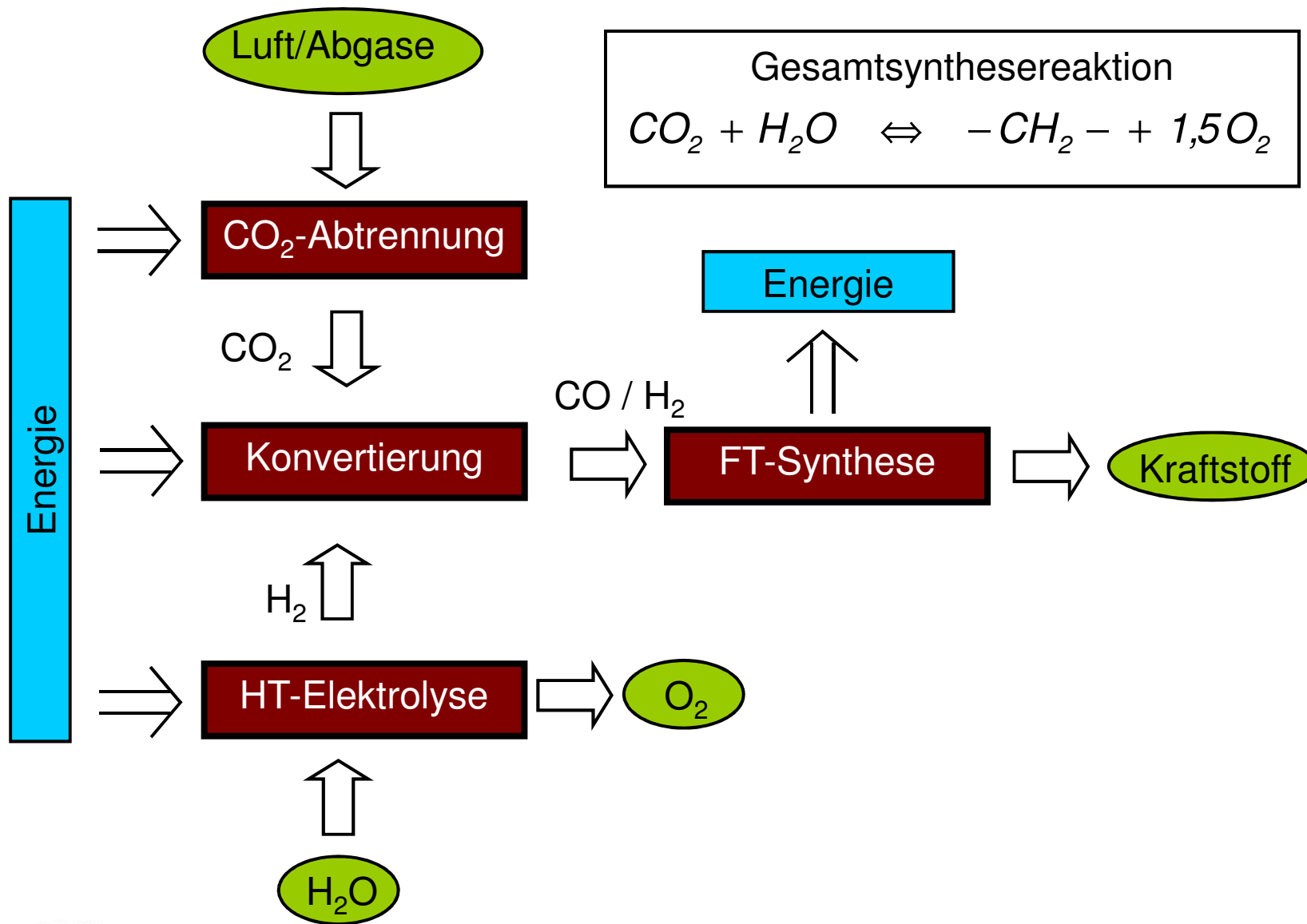


Vorteile der techn. Photosynthese (gegenüber der natürlichen PS)

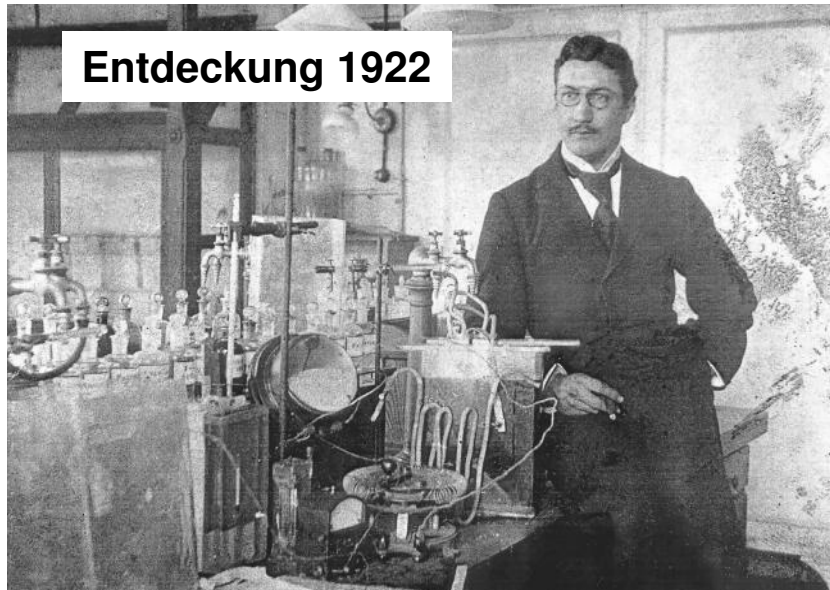
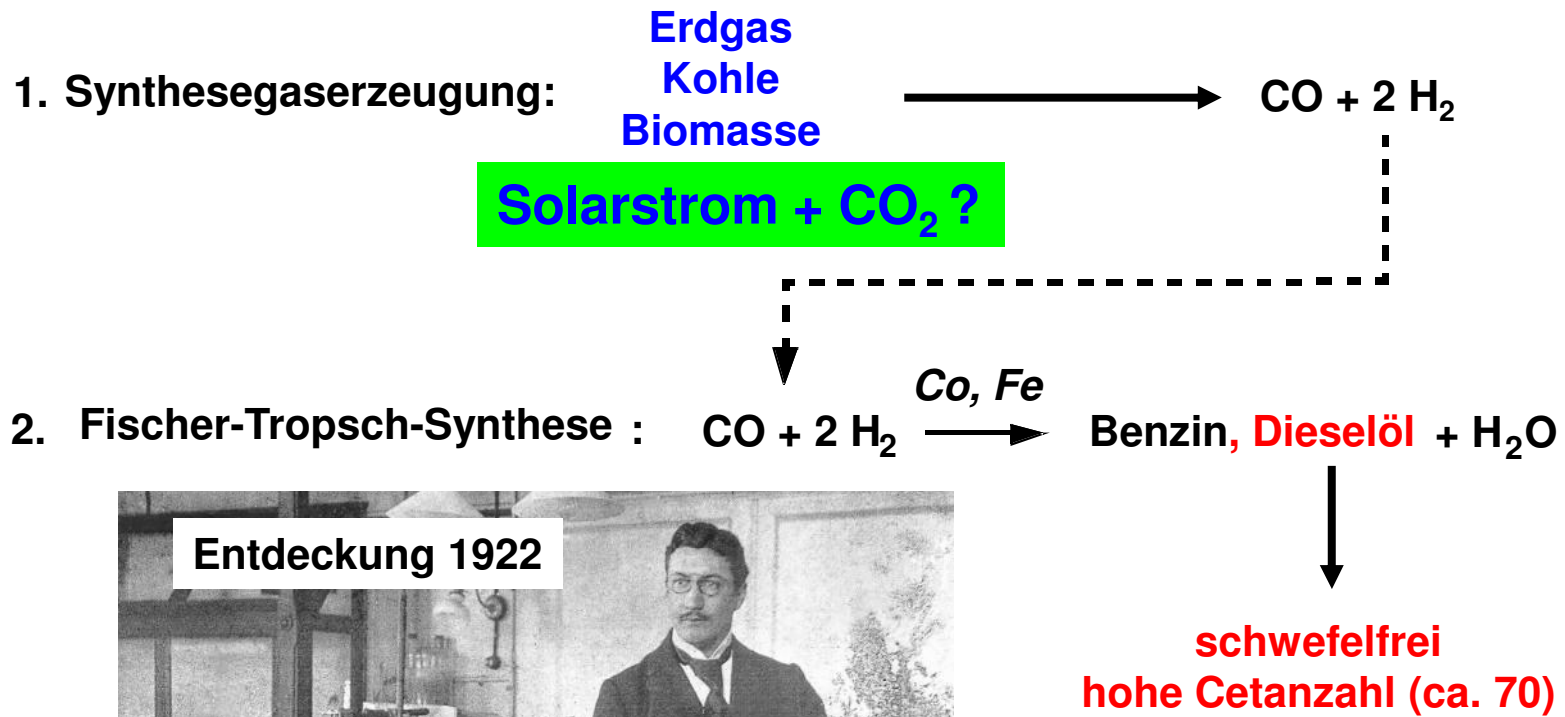
- **höhere Energiedichte** (Faktor 3 massebezogen, Faktor 6 volumenbezogen)
- **geringerer Flächenbedarf*** (6% der für natürliche PS notwendigen)
- **“wertlosere” verfügbare Fläche nutzbar** (“Wüste versus Acker”)

* 300 m² Wüste pc für 2 toe/a gegenüber 5400 m² biol. produktiver Fläche

Die technische Photosynthese - Konzept



Nutzung von Erdgas, Biomasse (u. Kohle) durch Fischer-Tropsch-Synthese

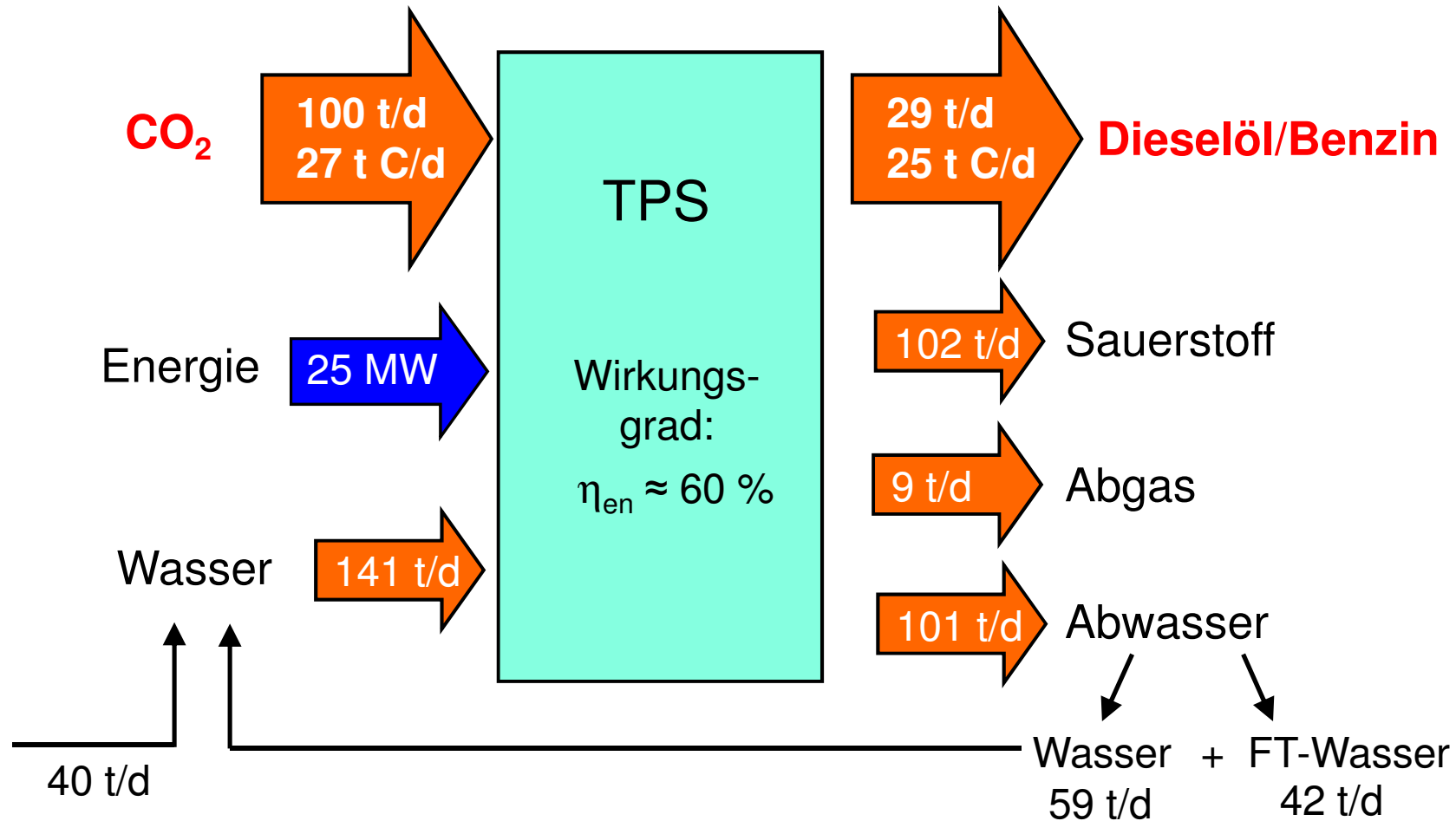


Aktuell betriebene und geplante Fischer-Tropsch Anlagen (2010)

Land	Kapazität in ROE/a (gerundet)	Inbetriebnahme	Rohstoff
Südafrika	6 Mio. t	1955 - 1982	Kohle
Südafrika	1 Mio. t	1992	Erdgas
Malaysia	1 Mio. t	1993	
Katar	2 Mio. t	2006	
Summe (2010)	10 Mio. t		
Katar	23 Mio. t	bis ca. 2011	Erdgas
Nigeria, Algerien, Kolumbien, Trinidad	5 Mio. t	?	
Summe ab 2011	ca. Mio. 30 t , d .h. "nur" 1 % der heutigen Welterdölförderung		



Die technische Photosynthese (TPS) - Massen- und Energiebilanz



Kosten der Stromerzeugung und notwendige **Flächen** für Solarthermie

derzeit noch sehr hohe Kosten:

Type of power plant	Estimated costs in €/liter renewable diesel ($\eta = 0.6$)
Wind (onshore/offshore)	1.1 / 2.8
Hydro	1.0
Biomass	1.3
Solar photovoltaic ¹	3.5
Solar thermal ²	2.6
<i>Comparison: diesel oil from crude oil (Germany 2010 without taxes)</i>	<i>0.7</i>

machbarer Flächenbedarf:

300 m² Wüste pro Person zur Erzeugung von 2 t flüssige Kraftstoffe/a.
(Zum Vergleich: **5400 m² biol. produktive Fläche** für entsprechende Menge an Biomasse.)

1600 km x 1600 km für globale Versorgung (9 Mrd. Menschen mit 2 toe/a in 2050).

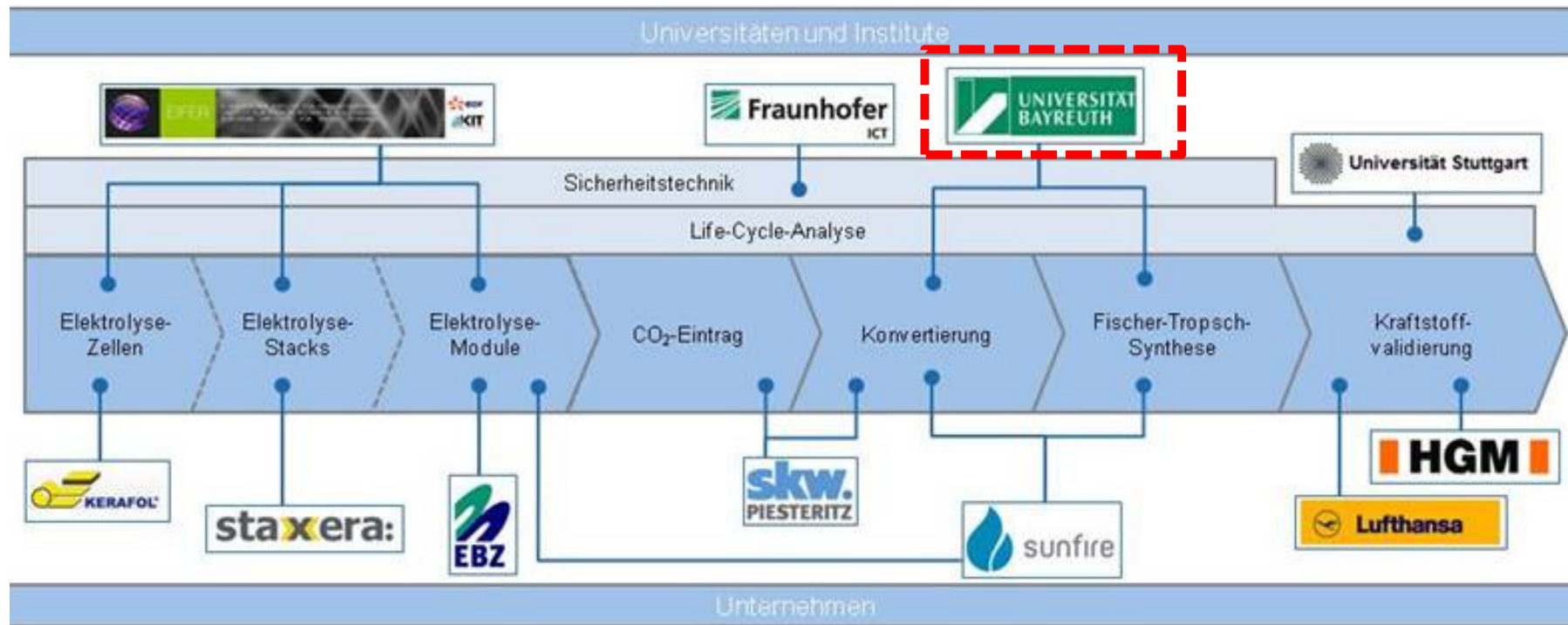
Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2011, Dec. 2010.

Lewis, N. S., Powering the planet. MRS Bulletin, 32, Oct. 2007, 808 - 820.

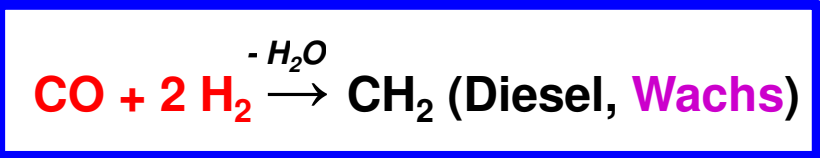
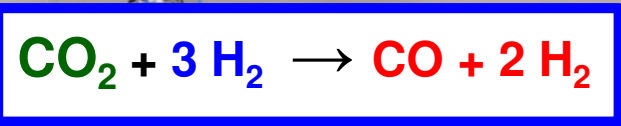
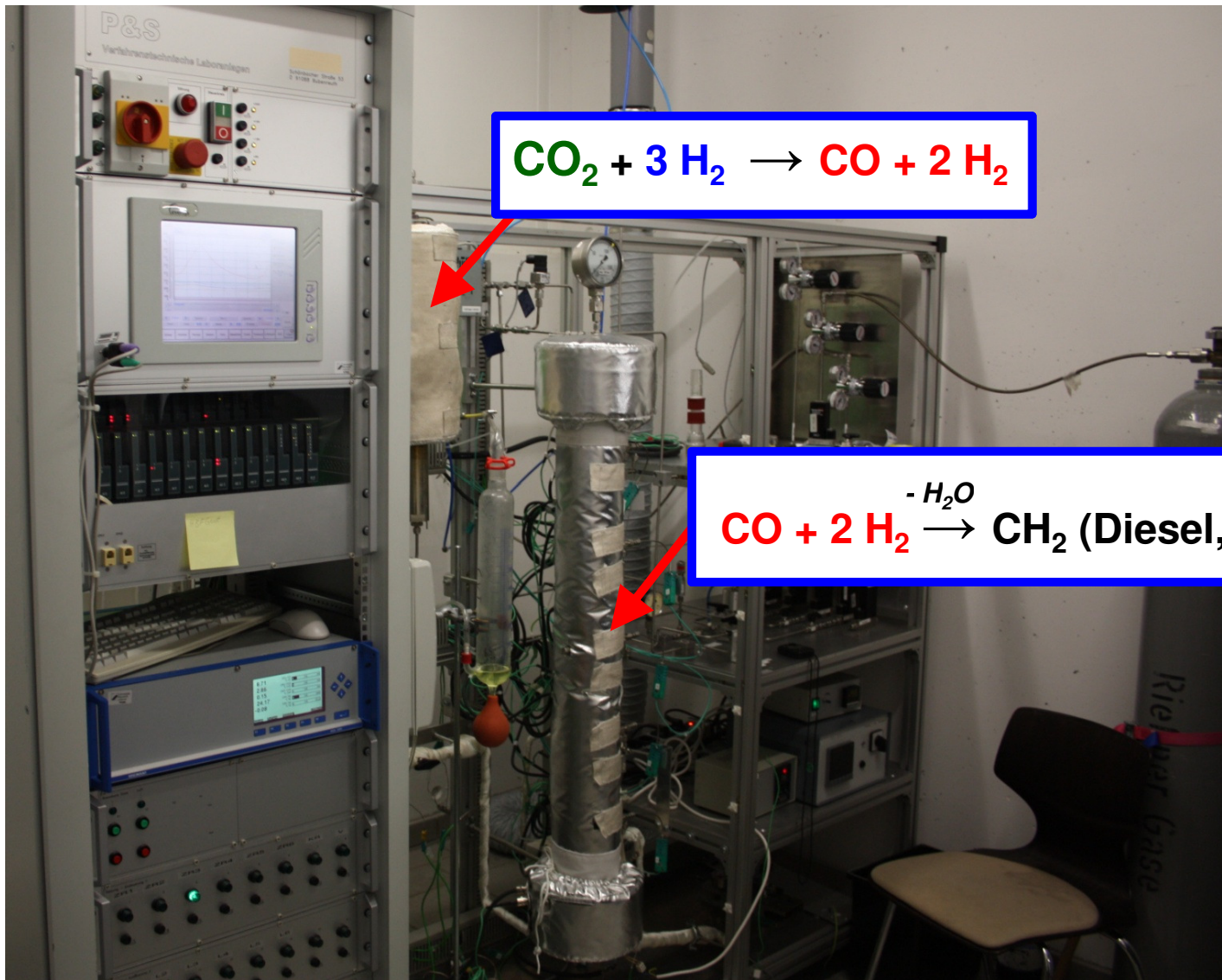
H. Burkhardt, H., La Physique au Canada 2007, 1 - 3.

Jess et al. Chem.- Ing. Techn Sonderheft Energie, 2011

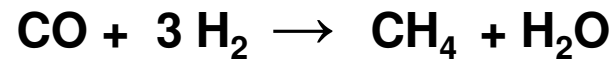
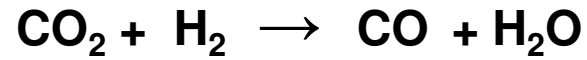
BMBF-Antrag zur technischen Photosynthese



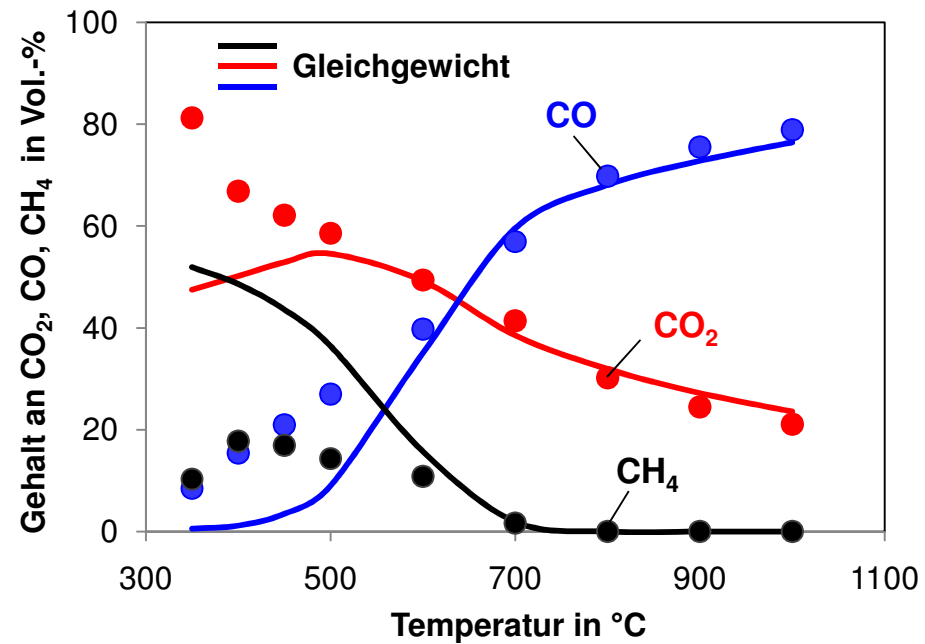
Forschungsthemen/Versuchsanlage zur Umsetzung von CO₂ in Dieselöl



Reverse Wassergas-Shift-Reaktion an einem kommerziellen Katalysator



Verweilzeit (Leerrohr, 800 °C): **0,04 s**

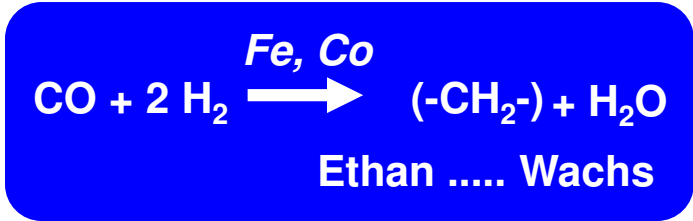


26% CO₂, 58% H₂, 16% N₂

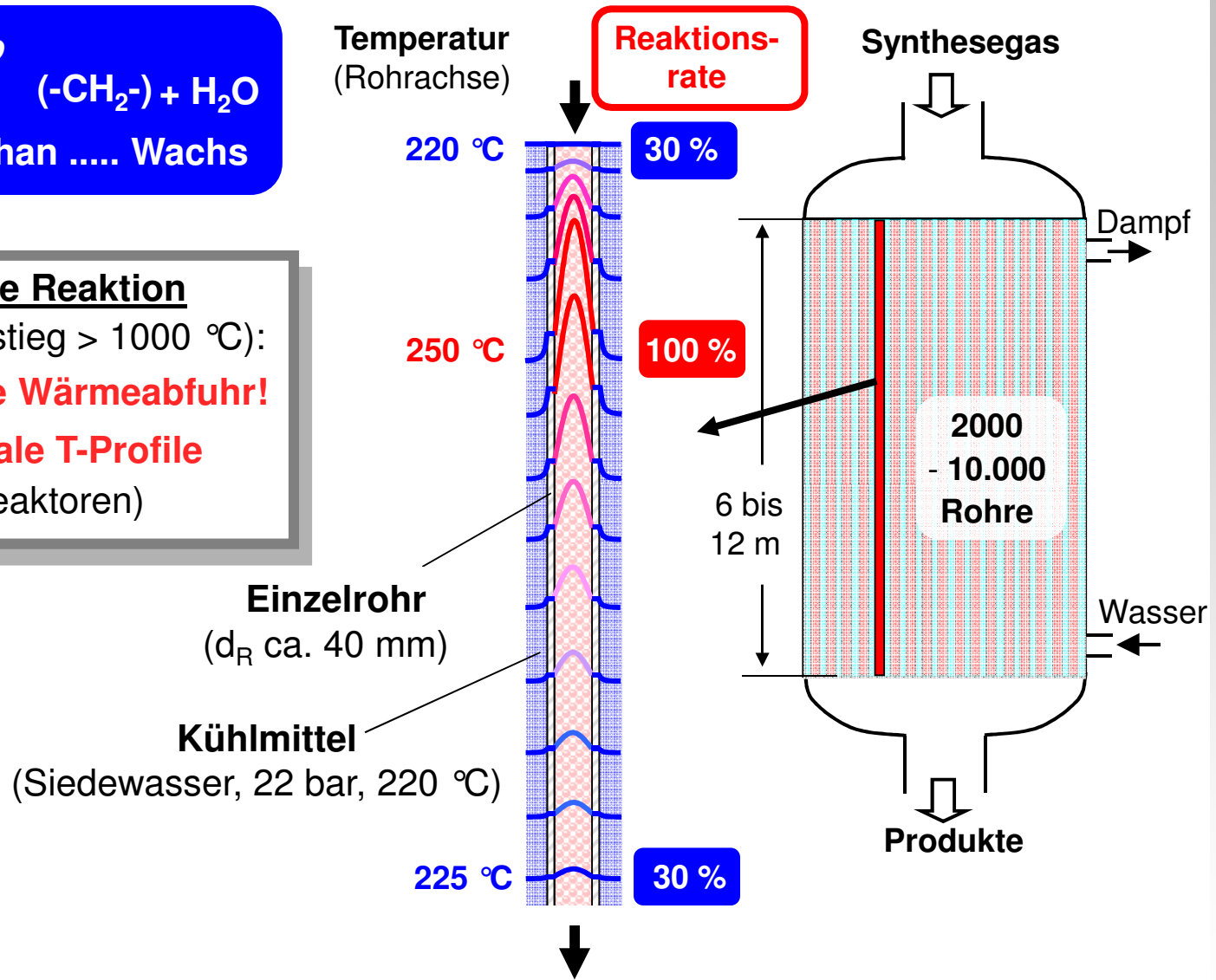
V_{ges}: 98 NI/h, m_{Kat}: 3 g



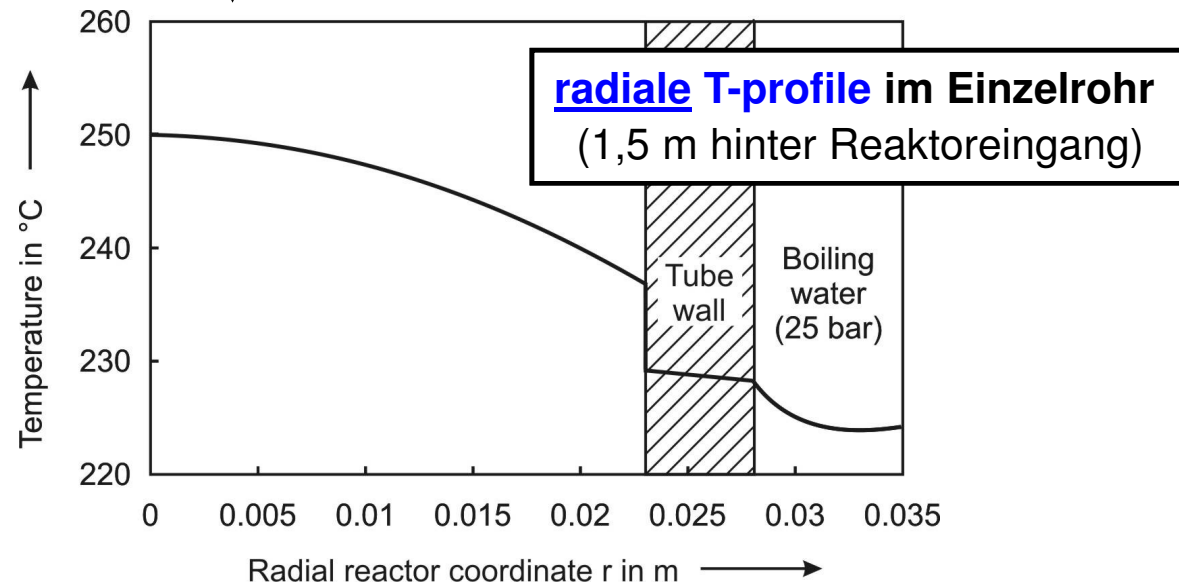
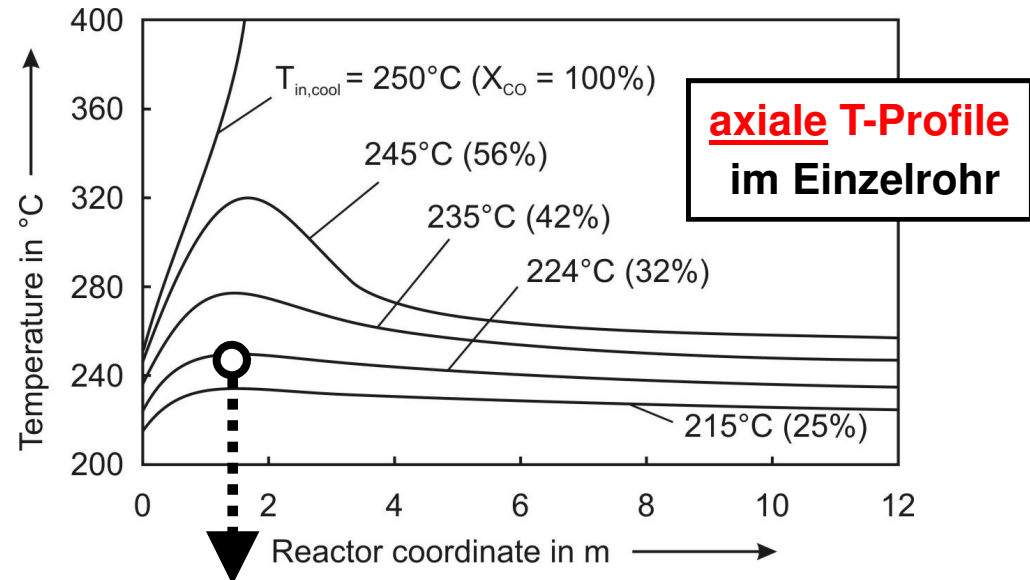
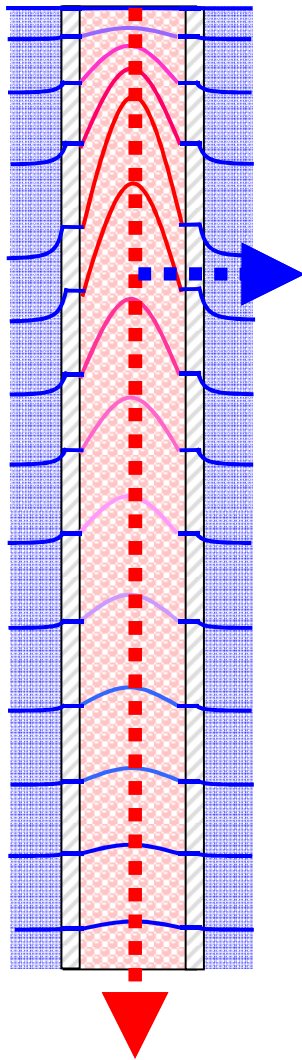
Reaktionstechnik der Fischer-T.-Synthese: Hauptproblem Wärmeabfuhr



stark exotherme Reaktion
 (adiabater T-Anstieg > 1000 °C):
problematische Wärmeabfuhr!
radiale und axiale T-Profile
 (in Rohrbündelreaktoren)



Fischer Tropsch Festbettreaktor: Bedeutung der Wärmeabfuhr (Fe-Kat.)



Kann die „solarbetriebene“ Fischer-Tropsch Synthese einen entscheidenden Beitrag zur Lösung der Energieprobleme beitragen?

„Zuverlässigkeit“ von Prognosen:



**Ich glaube an das Pferd.
Das Automobil ist eine vorübergehende Erscheinung.**
(Kaiser Wilhelm II, um 1900)

Dennoch:

**Wir müssen uns jetzt mit neuen Technologien
für kommende Generationen beschäftigen!**



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

