



Solarenergie WS 2009/2010

Michael Doran

Universität Heidelberg & Schmid Technology
GmbH Schwetzingen



Infos

- Priv.-Doz. Dr. Michael Doran
- e-mail: Michael.Doran@thphys.uni-heidelberg.de
- URL: www.thphys.uni-heidelberg.de/~doran
- Vorkenntnisse: hilfreich aber nicht wirklich notwendig sind:
 - Thermodynamik
 - Quantenmechanik
 - Festkörperphysik



Literatur

- Antonio Luque, Steven Hegedus, „Handbook of Photovoltaic Science & Engineering“
- Martin A. Green, „Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications“
- Volker Quaschnig, „Regenerative Energiesysteme“
- Adolf Goetzberger, Bernhard Voß, Joachim Knobloch, „Sonnenenergie, Photovoltaik“ (out of print)
- Simon M. Sze, Kwok K. Ng, „Physics of Semiconductor Devices“



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung, Marktdata und Fakten
2. Die Sonne, Sonnenstand & Spektrum
3. Photovoltaik Teil I (eher einfach):
 - a) Grundprinzip der Photovoltaik
 - b) Die Unterschiedlichen Umsetzungen: kristalline Zellen, Dünnschichtmodule, Organische Zellen
 - c) Herstellungsprozess
4. Nicht konzentrierende Solarthermie
5. Konzentrierende Solarthermie: Kraftwerke
6. Photovoltaik Teil II (mit *wirklichen* Rechnungen):
 - a) Der Halbleiter
 - b) Erzeugung von Loch-Elektron Paaren und Rekombination
 - c) Die Diode
 - d) Die beleuchtete Solarzelle
 - e) Ersatzschaltbild und Abschattung von Solarmodulen



1. Einleitung, Marktdaten & Fakten

- 1.1 Der Energiebegriff, Energieerzeugung Status Quo
- 1.2 Photovoltaik Markt
- 1.3 Klimawandel



1.1 Der Energiebegriff

- Im Technischen Bereich wird Energie in SI Einheiten, also Watt-Sekunden gemessen. Die Leistung ist natürlich die Ableitung der Energie nach der Zeit: $P = \frac{dW}{dt}$

Begriff	Definition	Energieformen
Primärenergie	Energie in ursprünglicher, noch nicht aufbereiteter Form	z.B. Rohöl, Kohle, Uran, Solarstrahlung
Endenergie	Energie in der Form, wie sie dem Endverbraucher zugeführt wird	z.B. Erdgas, Heizöl, Strom
Nutzenergie	Energie in der vom Endverbraucher genutzten Form	z.B. Licht, Wärme zur Heizung, Antriebsenergie für Maschinen



Primär, End und Nutz im Beispiel

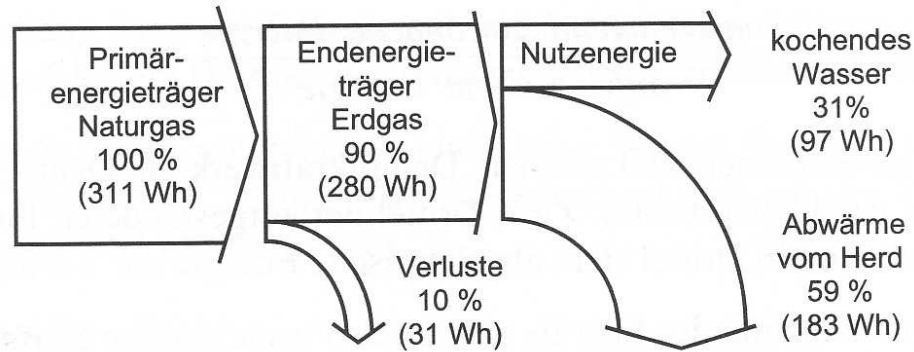


Bild 1.2 Energiewandlungskette und Verluste beim Wasserkochen am Gasherd

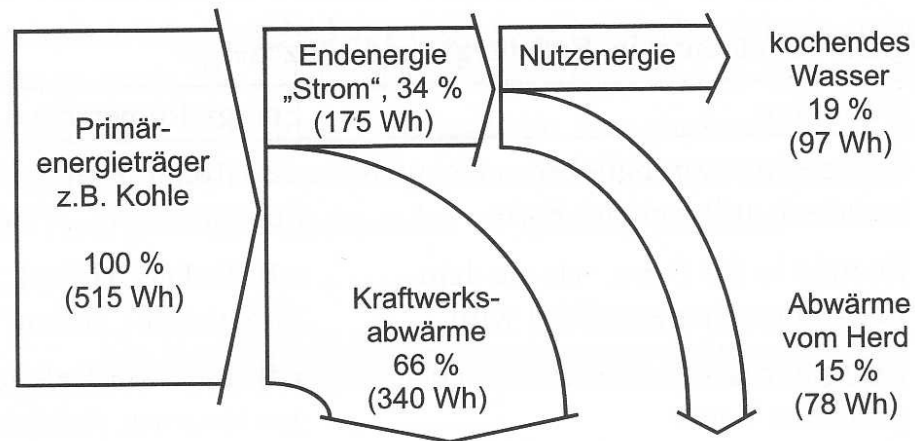
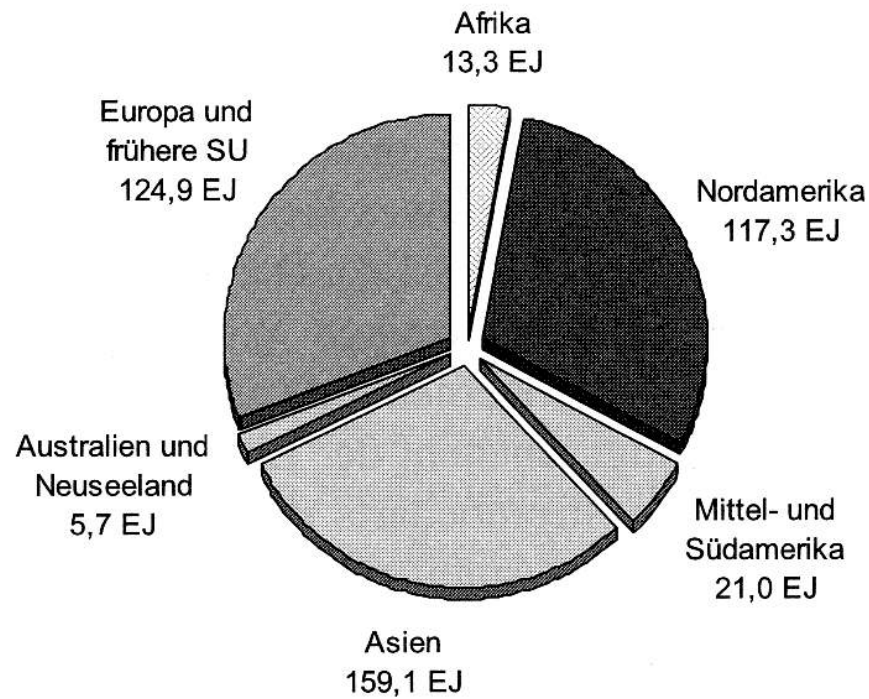


Bild 1.3 Energiewandlungskette und Verluste beim Wasserkochen am Elektroherd

Quelle: V. Quaschnig



Welt Primärenergieverbrauch 2005



Quelle: V. Quaschnig

Umrechnungsfaktor:
 $10^6 \text{ J} = 278 \text{ Wh}$

$$\begin{aligned} 1 \text{ EJ} &= 10^{18} \text{ J} \\ &= 278 \text{ TWh} = 278 \times 10^{12} \text{ Wh} \end{aligned}$$



Pro Kopf Verbrauch weltweit

Energieverbrauch pro Kopf

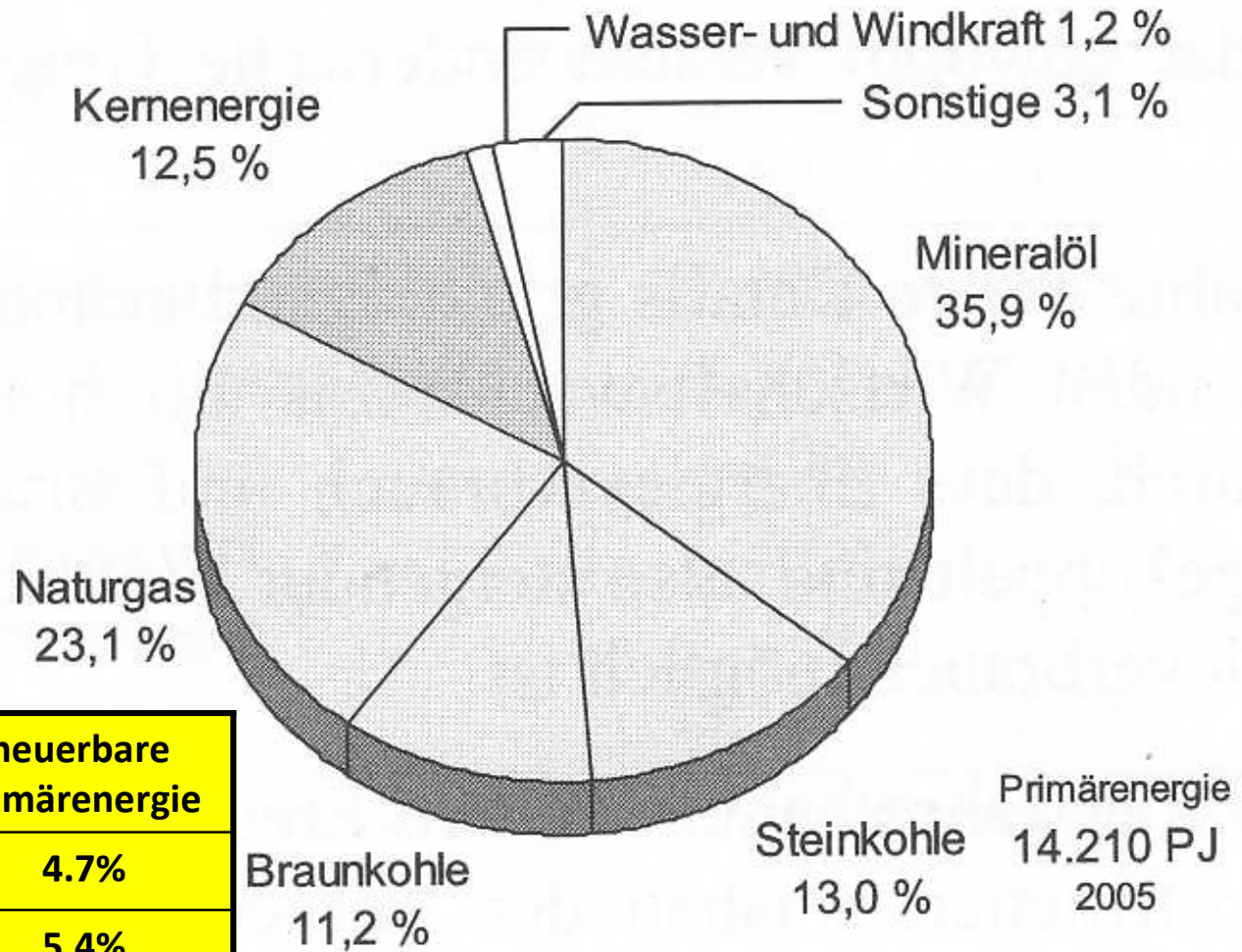
in Gigajoule (GJ)												
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
AFRIKA	26,7											
NORDAMERIKA	263,7											
USA	322,8											
SÜDAMERIKA	40,1											
ASIEN	35,3											
China	32,3											
Japan	147,9											
EUROPA (OECD - Länder)	136,9											
Deutschland	187,9	182,8	178,2	175,3	174,1	175,5	180,8	179,1	178,2	174,2	174,9	178,5
Frankreich	163,5	171,9	168,2	170,5	163,5	169,6	178,4	172,5	177,4	177,0	177,9	182,6
Großbritannien	155,1	159,4	158,8	160,3	164,8	161,2	168,1	163,4	165,2	165,8	165,0	167,5
Italien	112,6	115,7	115,2	113,5	111,8	117,5	117,0	118,5	121,7	123,8	124,5	124,3
Spanien	98,3	101,8	103,7	100,1	105,0	110,3	108,3	114,6	120,0	125,1	130,4	132,4
Niederlande	186,2	195,4	191,9	192,5	192,7	195,4	202,8	198,4	198,1	194,7	198,5	201,5
EUROPA (Nicht-OECD-Länder)	98,5	83,8	75,5	73,3	69,5	74,7	79,5	76,3	73,9	67,3	68,5	
Frühere SU	195,3	193,3	178,1	165,3	144,5	138,8	136,0	130,5	128,5	131,3	133,2	

$1.8 \times 10^{11} J = 500 \times 10^5 Wh$
 bei $365 \times 24h$ pro Jahr bedeutet
 $\sim 5700W$
 jedes Deutschen!



Energiemix in Deutschland

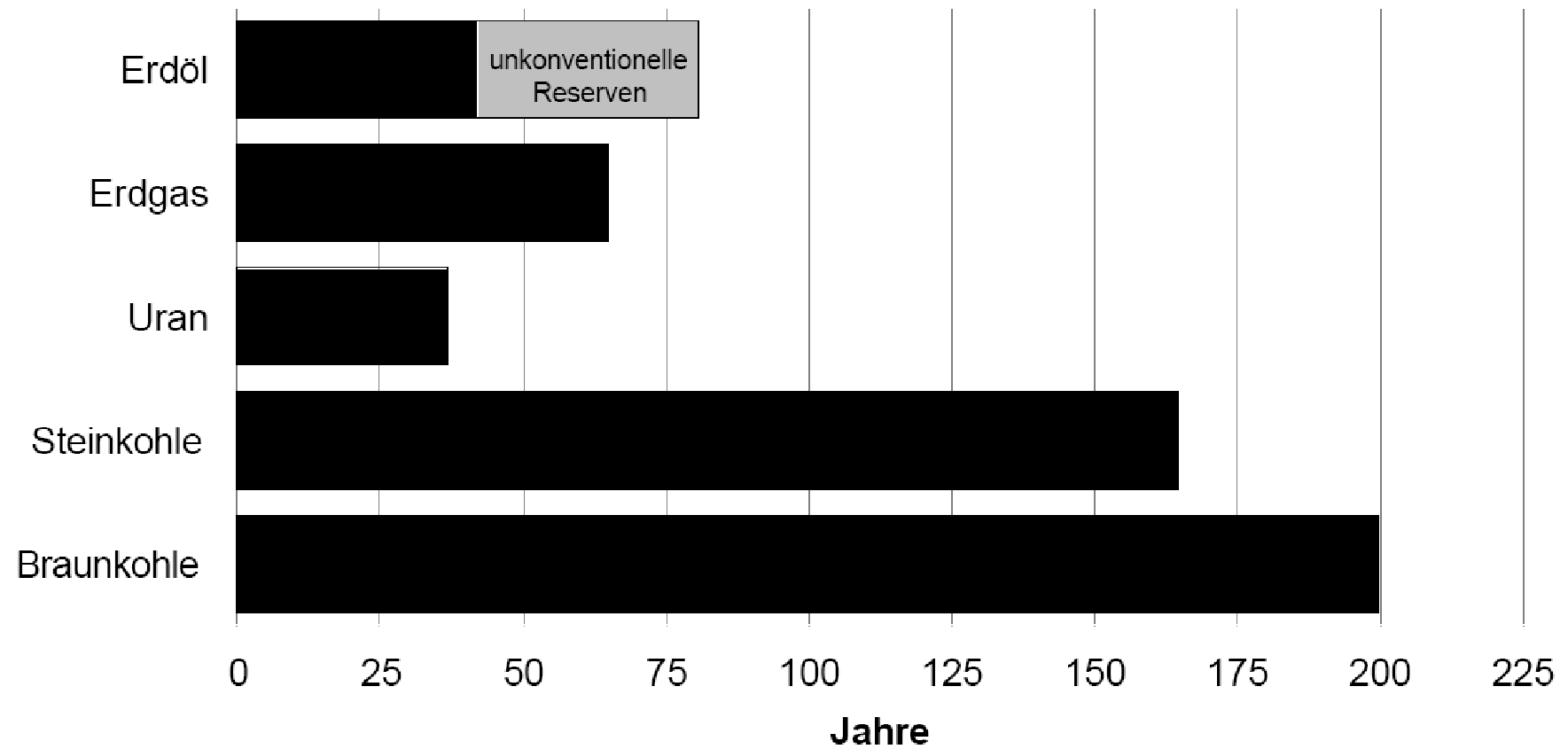
Quelle: V. Quaschnig



	Erneuerbare Stromerzeug.	Erneuerbare Primärenergie
2005	10.4%	4.7%
2006	11.7%	5.4%
2007	14.2%	6.6%



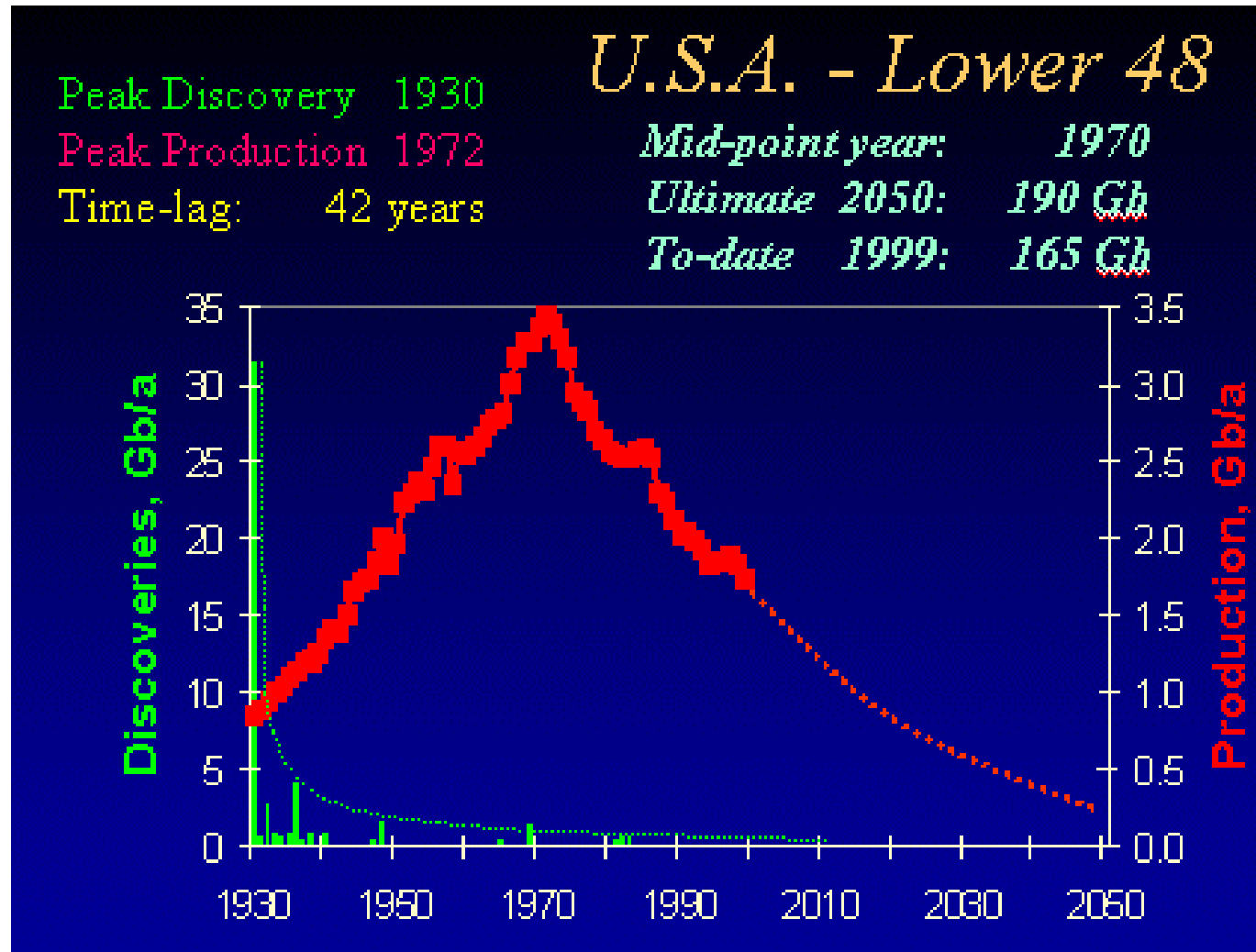
Statische Reichweite der Reserven



Quelle: Martin Pehnt

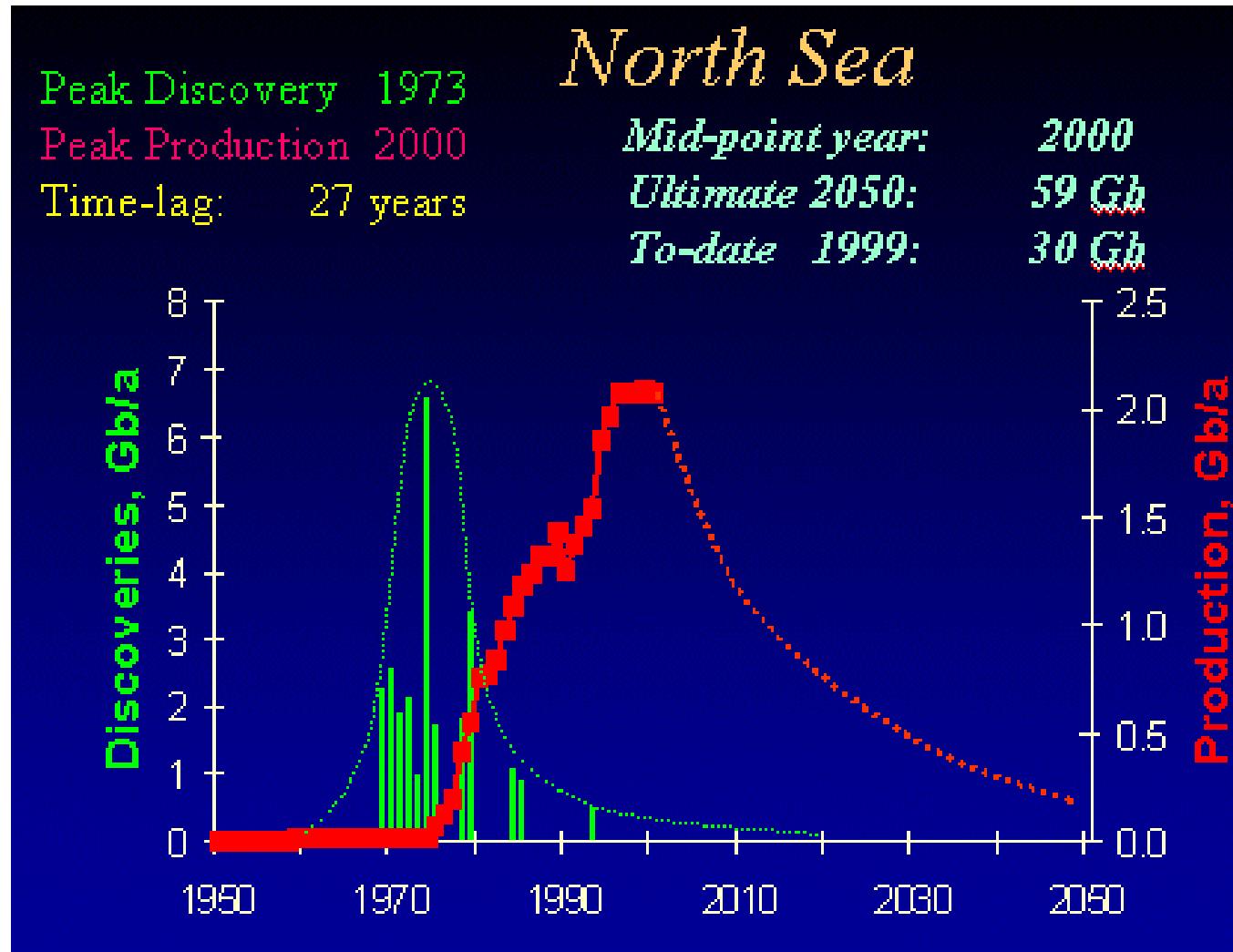


Öl, Gas, Kohle & Uran sind knapp





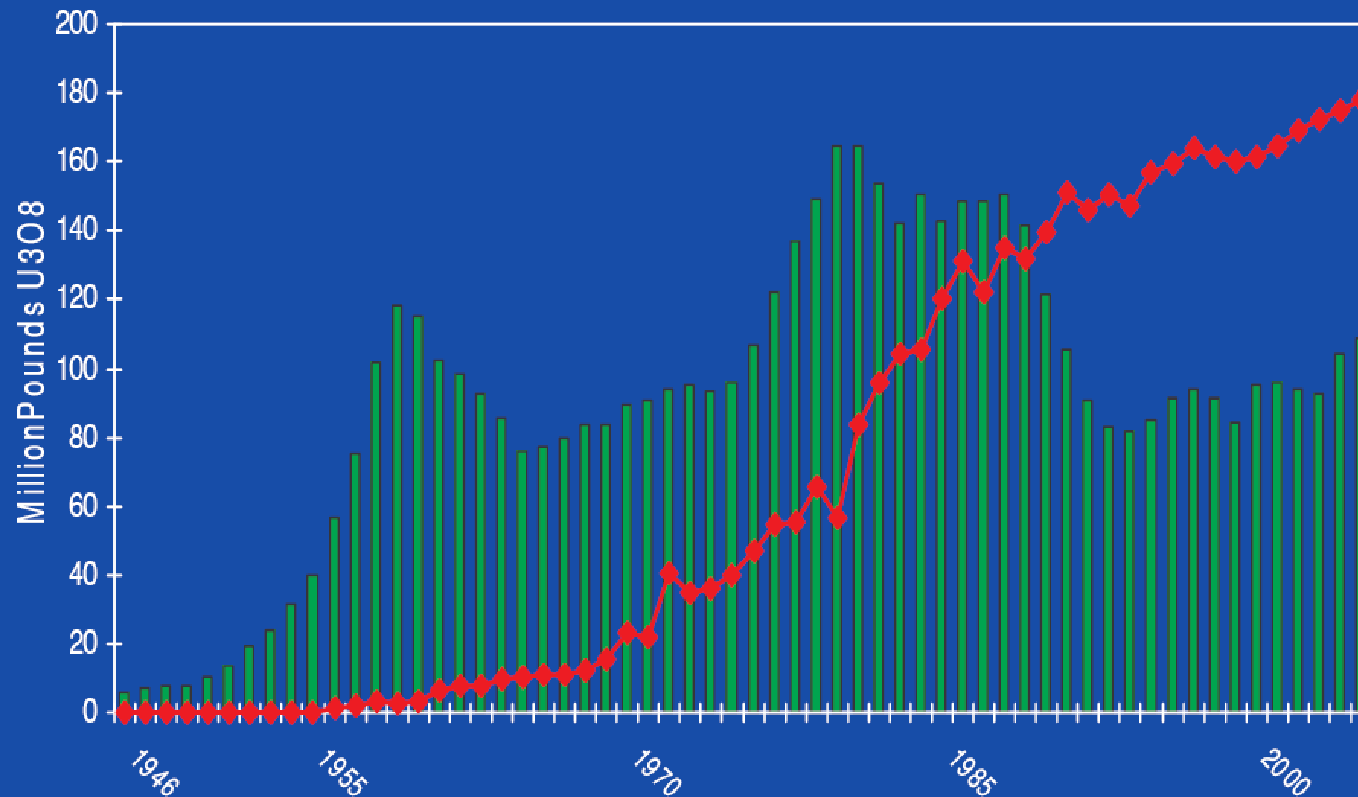
Peak-Oil in der Nordsee





Kernkraft als Lösung? (I)

Uranium Market Fundamentals

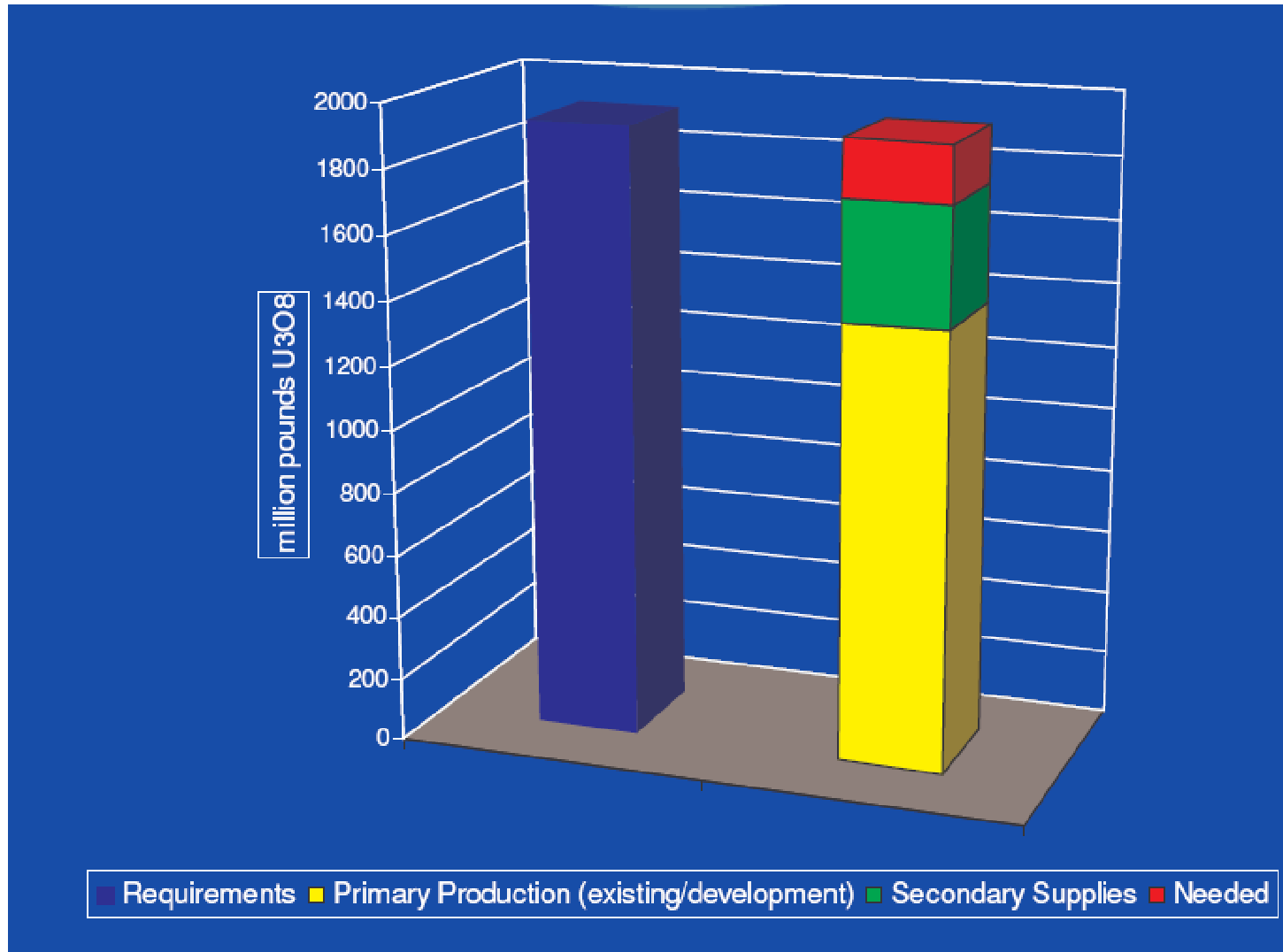


■ Production ◆ Consumption

Quelle: Uranium One



Kernkraft als Lösung? (II)

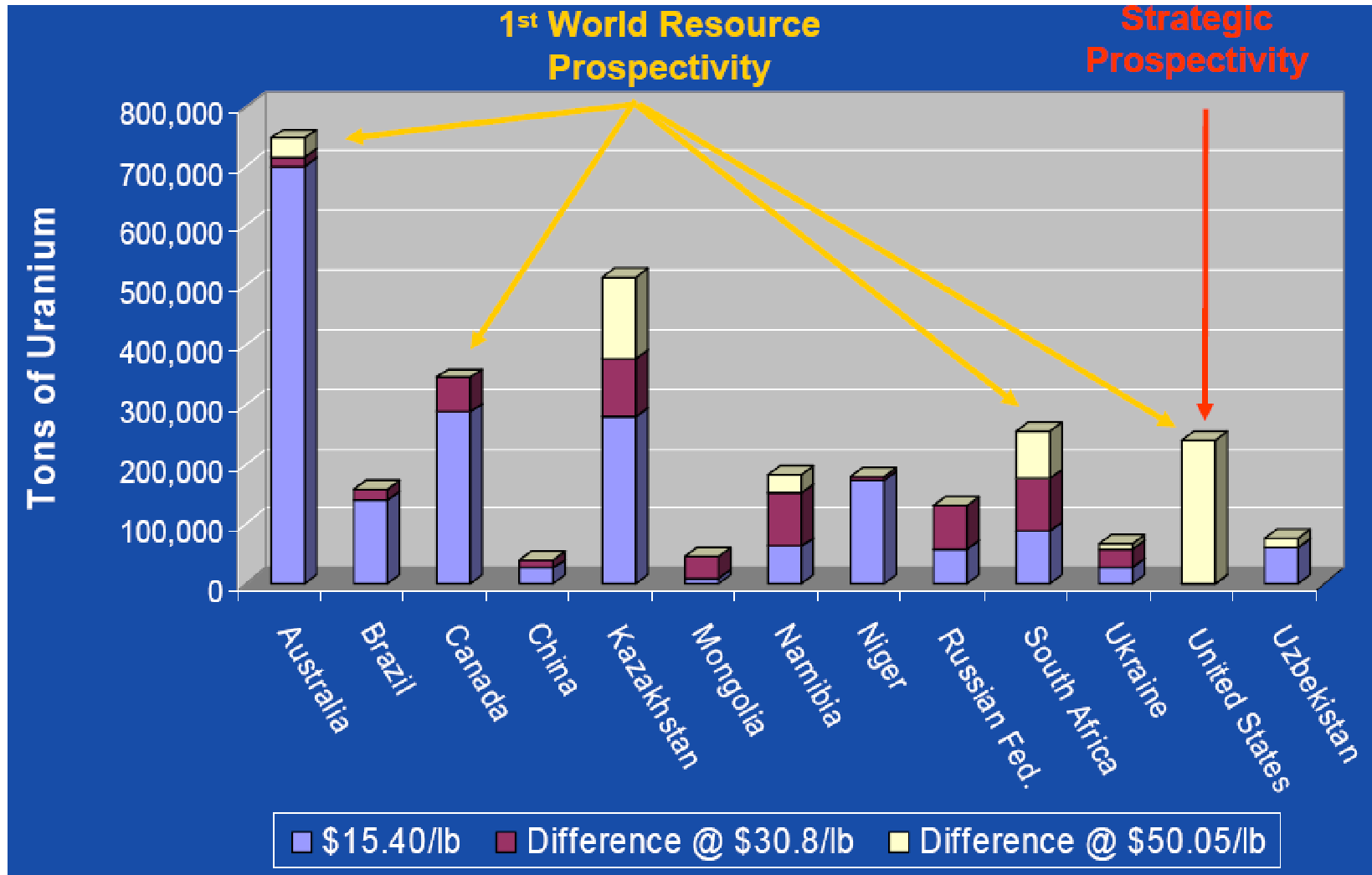


Quelle: Uranium One

Kummulierter Zeitraum: 2006-2015



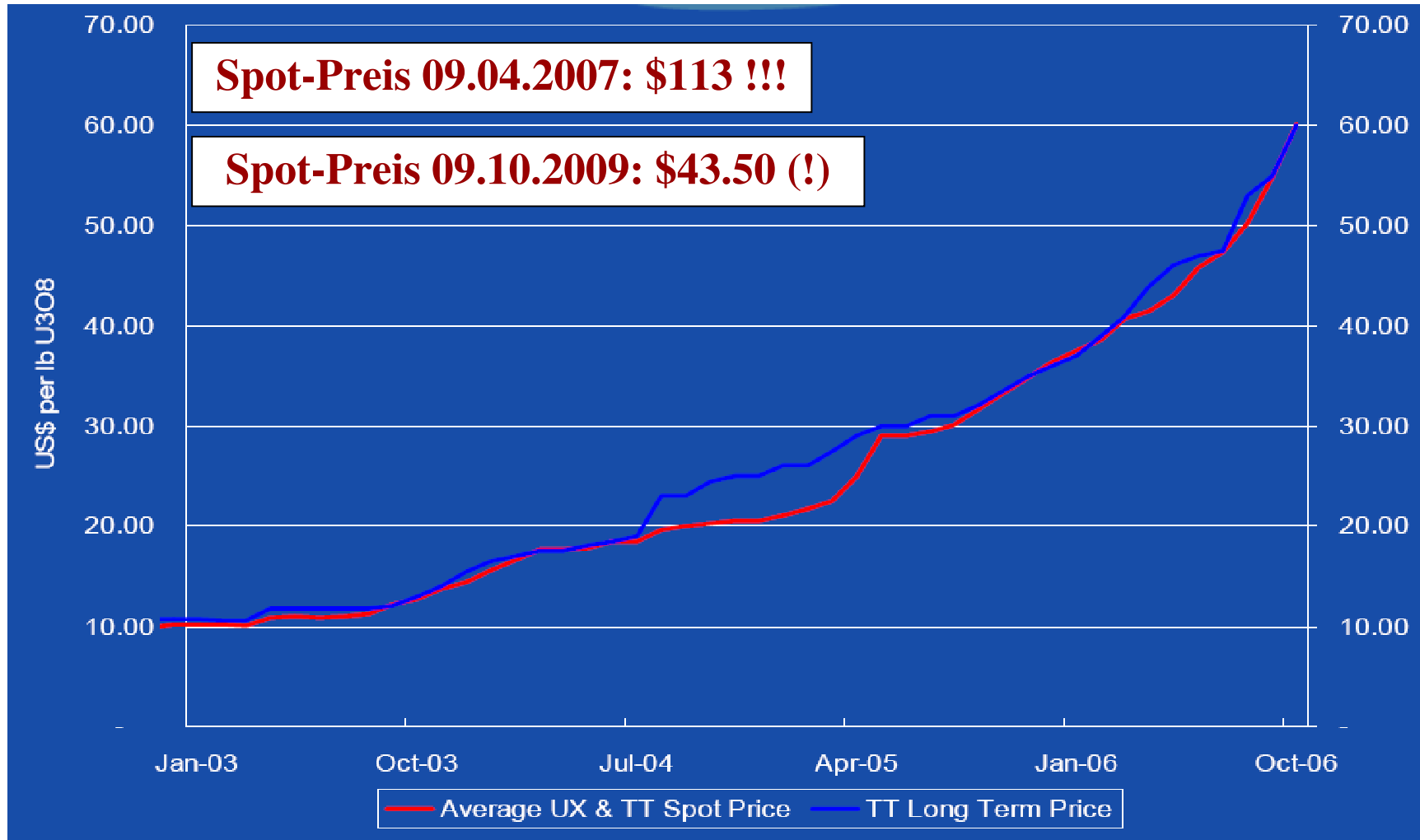
Kernkraft als Lösung? (III)



Quelle: Uranium One



Kernkraft als Lösung? (IV)

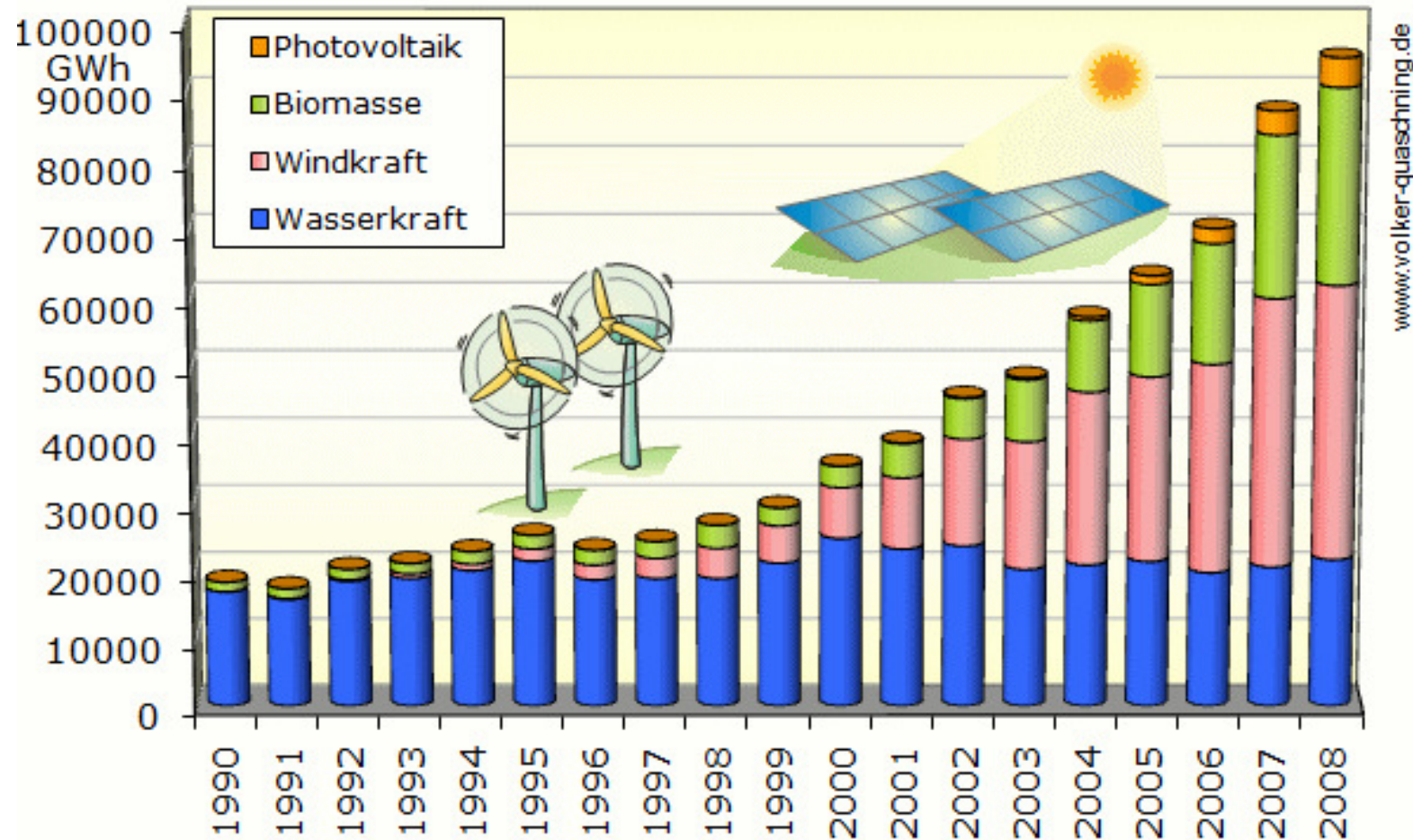


Quelle: Uranium One



Stromerzeugung durch regenerative Energien

Gesamterzeugung 2007 ca. 617 TWh in Deutschland

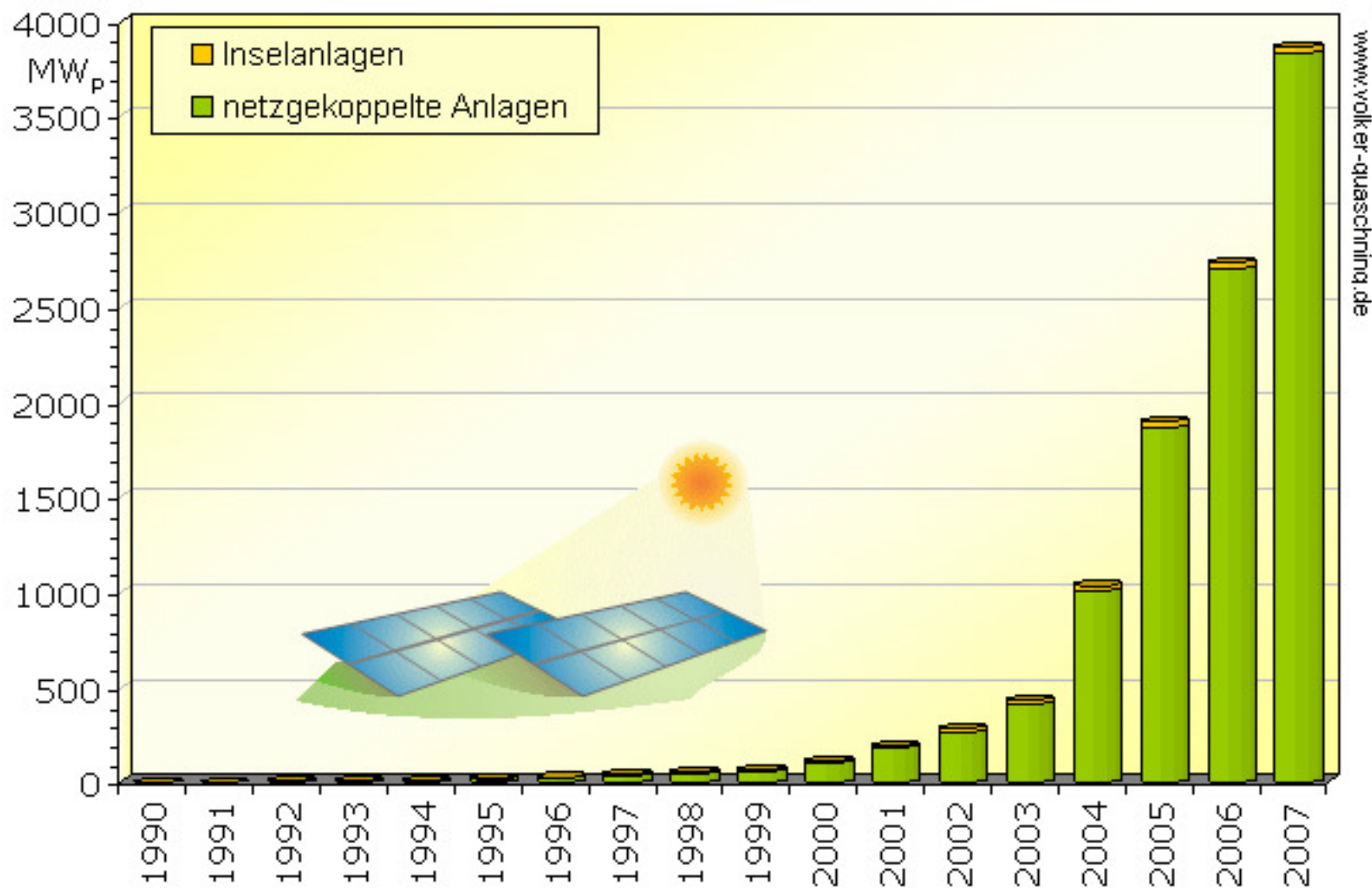


www.volker-quaschnig.de

Quelle: V. Quaschnig



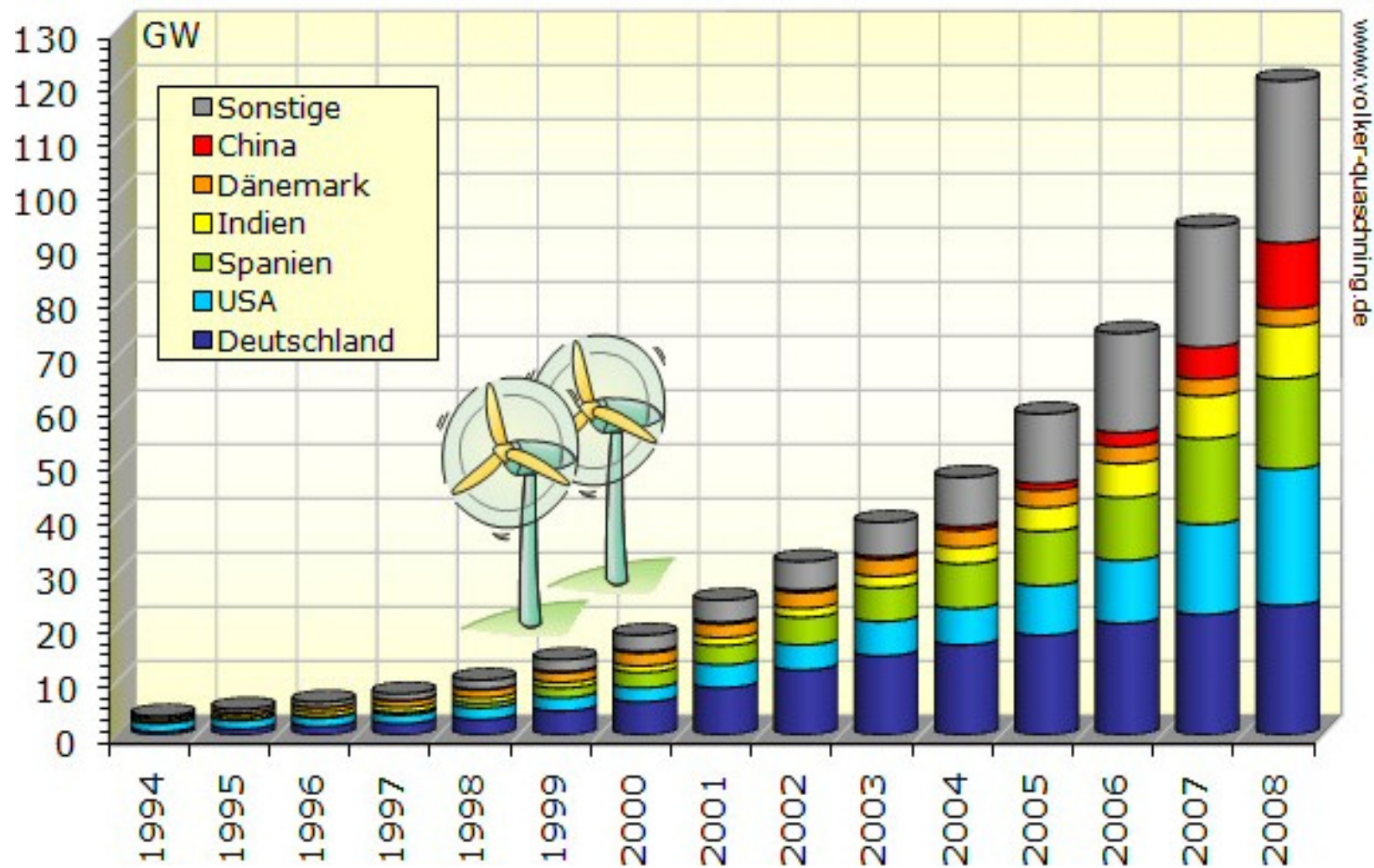
Bislang installierte Photovoltaik Leistung



Quelle: V. Quaschnig



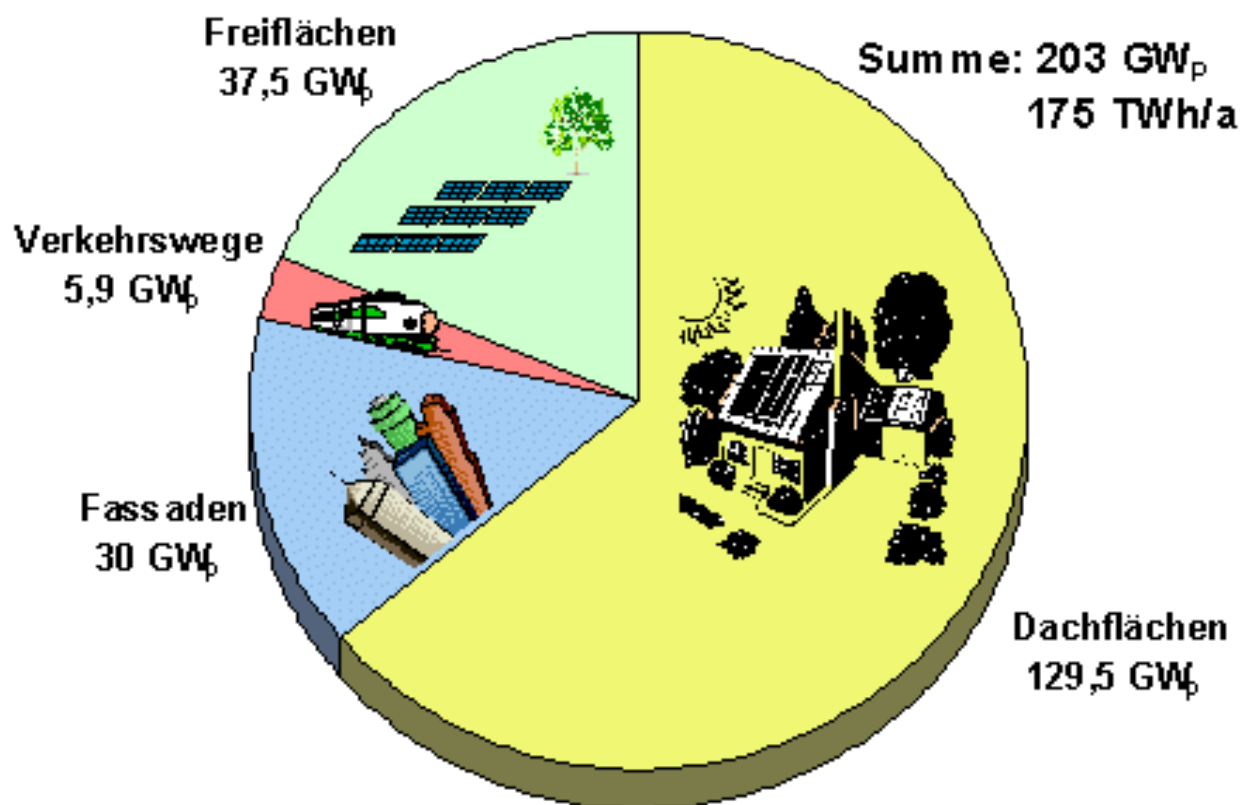
Weltweite installierte Windenergieleistung



Quelle: V. Quaschnig



Potential der Photovoltaik in Deutschland



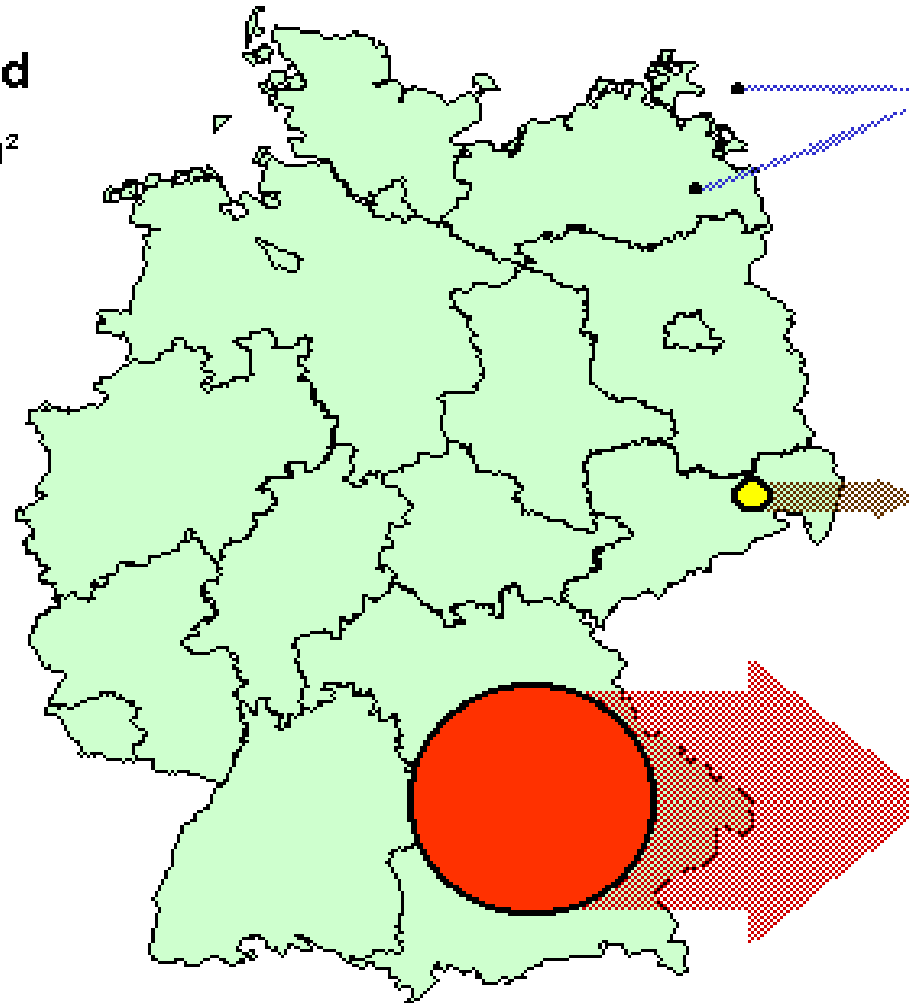
Quelle: V. Quaschnig



Und so viel Fläche wird dafür benötigt ...

Deutschland

357.148 Mio. m²



Windkraft

Rotorfläche:
142 Mio. m²
(0,04 %)

Turmgrundfläche:
0,7 Mio. m²
(0,0002 %)

Photovoltaik

1.357 Mio. m²
(0,4 %)

im Vergleich: Siedlungs- und Verkehrsfläche

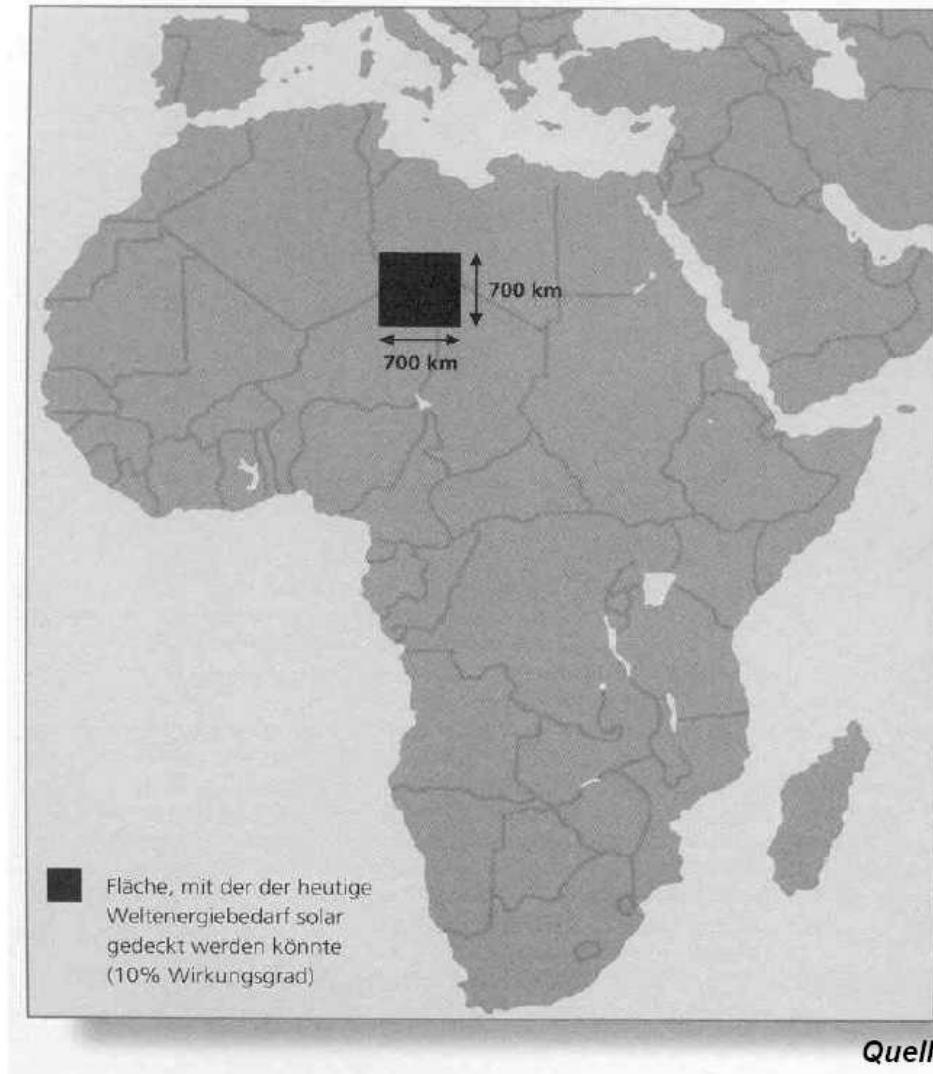
41.072 Mio. m²
(11,5 %)

Quelle: V. Quaschning



Vergleichsweise wenig Fläche benötigt

Benötigte Fläche zur
Deckung des
Weltenergiebedarfs
aus Solarenergie.



Quelle: Martin Pehnt

Quelle: Witzel, Seifried

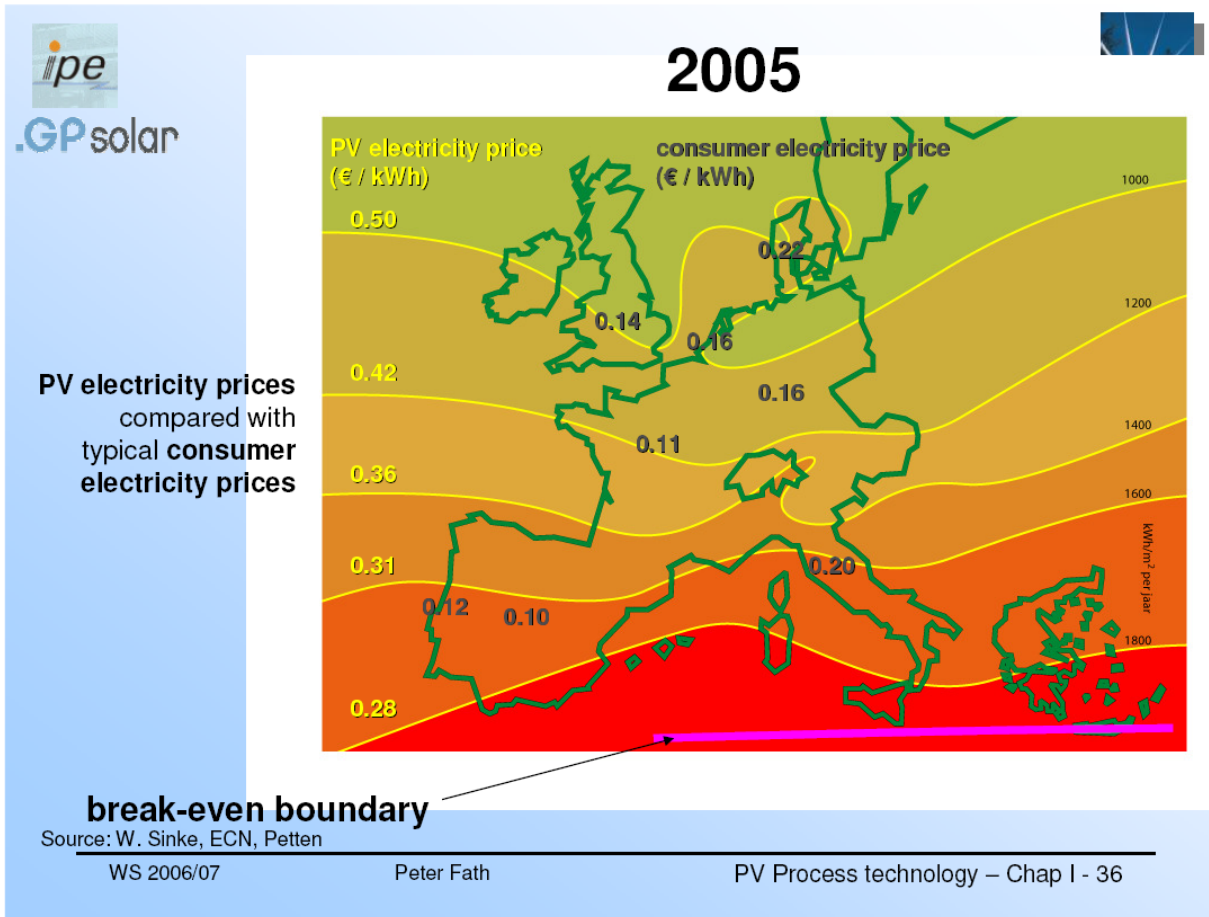


1.2 Der Photovoltaik Markt

- Bis Ausbruch der Finanzkrise war der Markt für Photovoltaiksysteme subventionsgetrieben: die Produktion reichte gerade aus, die Märkte mit den höchsten Subventionen zu bedienen. Daher waren die *Preise* seit einigen Jahren stabil und fielen nicht weiter.
- Die *Kosten* der Hersteller dagegen fallen stetig.
- Das große Ziel ist „*grid-parity*“ d.h. Solarstrom zu Preisen, welche ein normaler Haushalt beim Energieversorger für konventionellen Strom zahlt.
- Sobald die *Preise* auf und unter *grid-parity* fallen eröffnet sich ein riesiger Markt.
- Die *Kosten* sind schon in einigen sonnigen Ländern bei *grid-parity* angelangt
- „Dank“ der Finanzkrise und dem Wegbrechen von Subventionen in Spanien ist 2009 durch Überkapazitäten der Produzenten gekennzeichnet und die *Preise sind stark gefallen*.

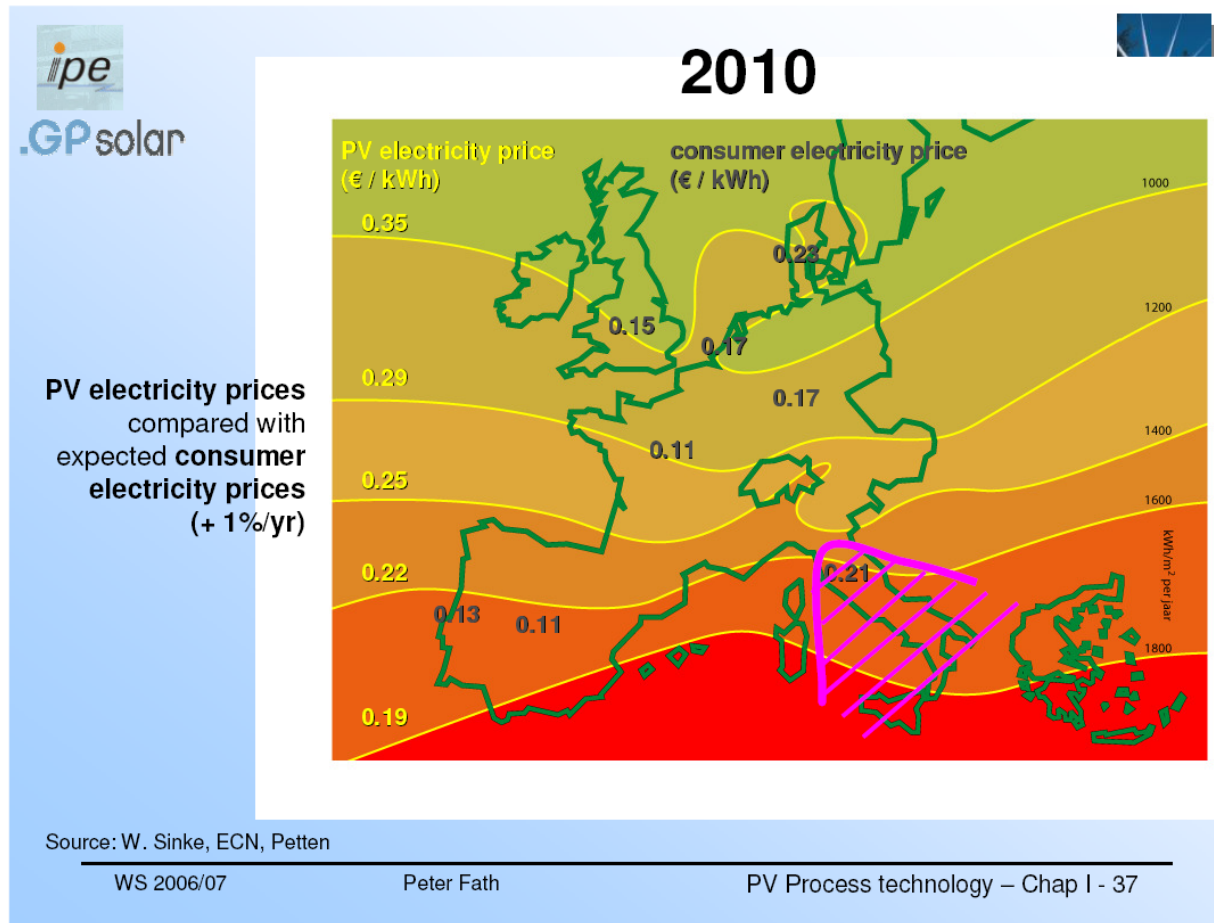


Photovoltaik Preise & Strompreise 2005



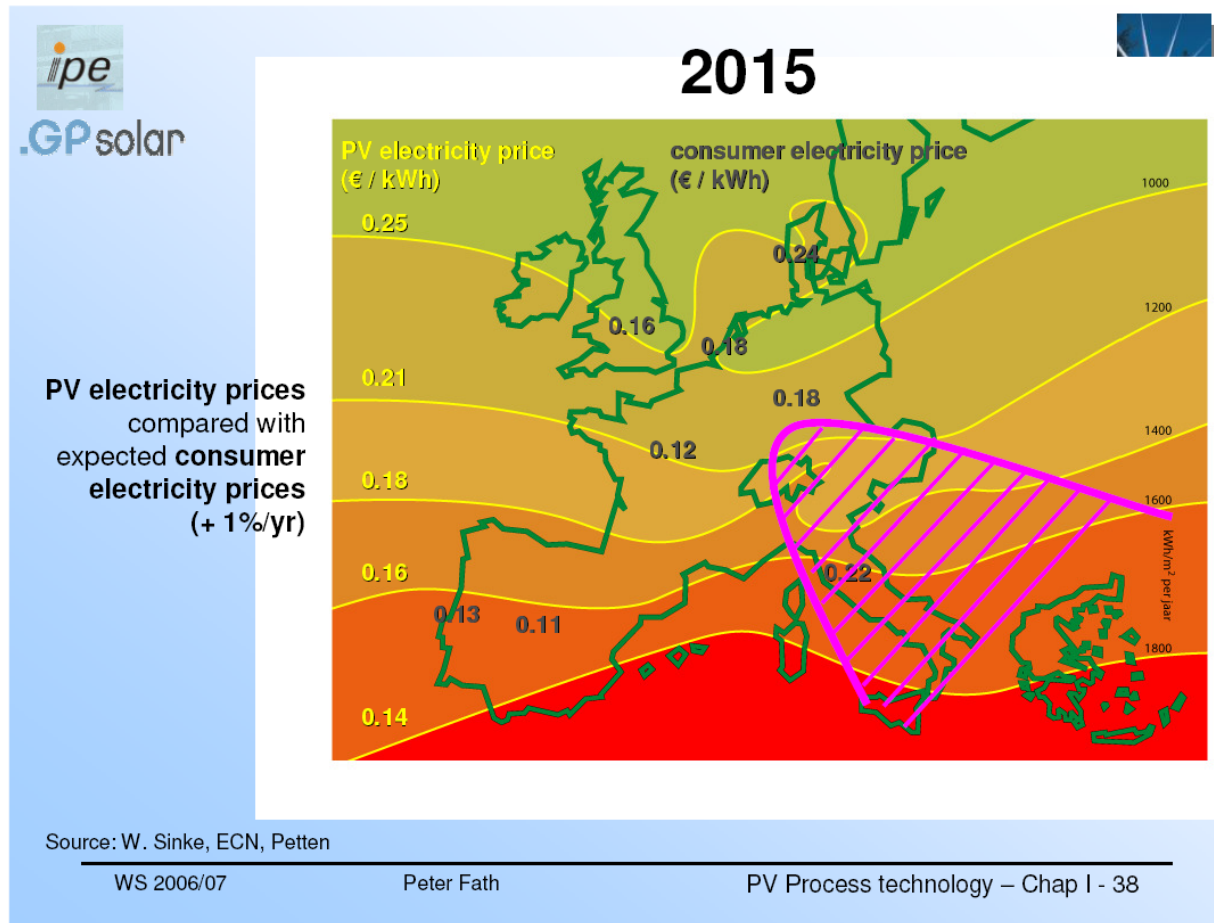


Photovoltaik Preise & Strompreise 2010



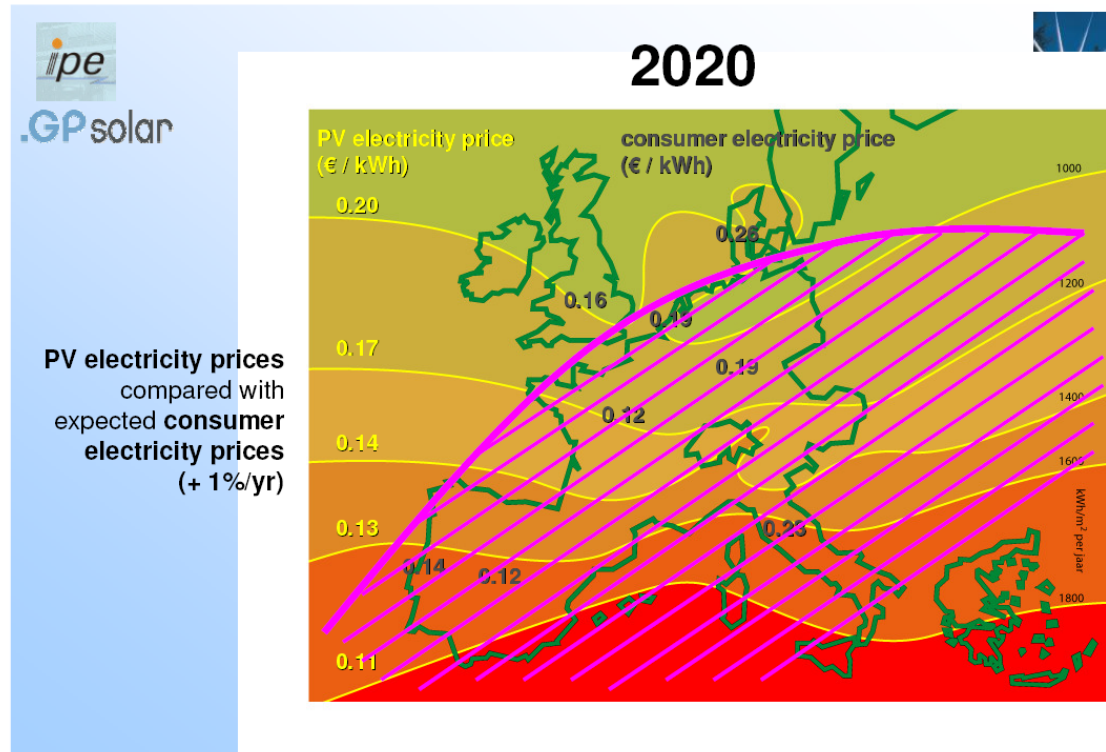


Photovoltaik Preise & Strompreise 2015



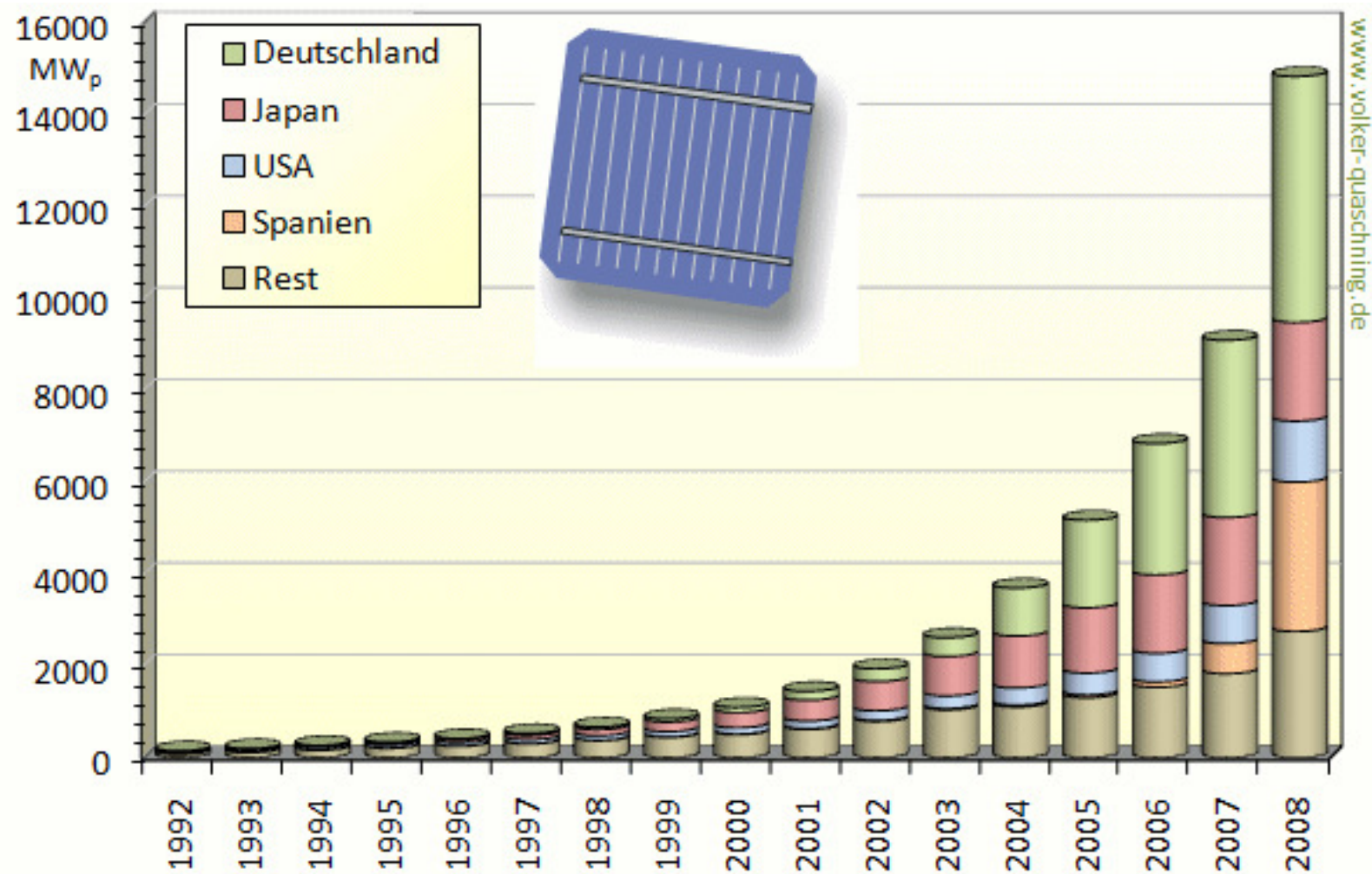


Photovoltaik Preise & Strompreise 2020





Weltweit installierte Photovoltaikleistung

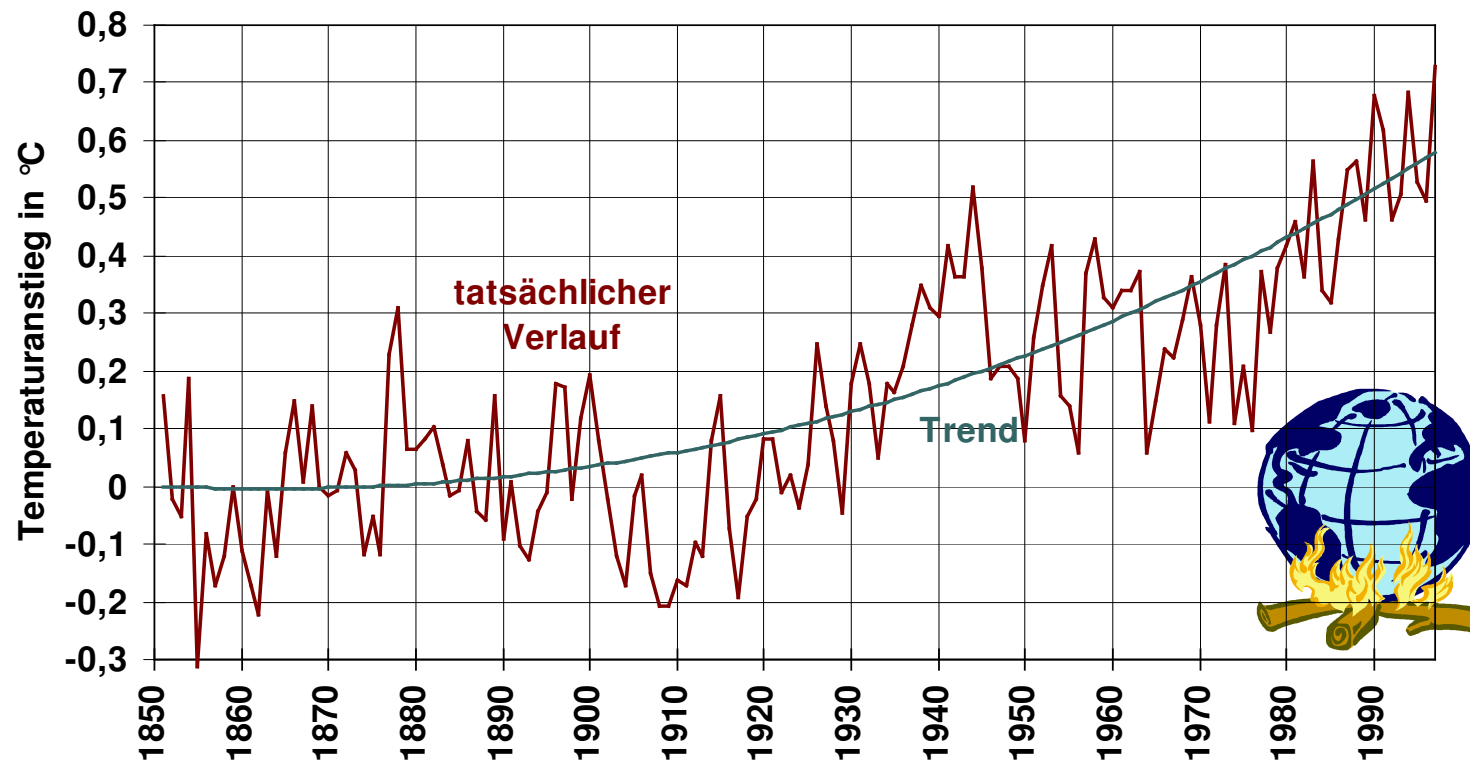


Quelle: V. Quaschnig



1.3 Klimawandel

Anstieg der mittleren globalen bodennahen Durchschnittstemperatur



Daten: Max-Planck-Institut für Meteorologie

Quelle: V. Quaschnig

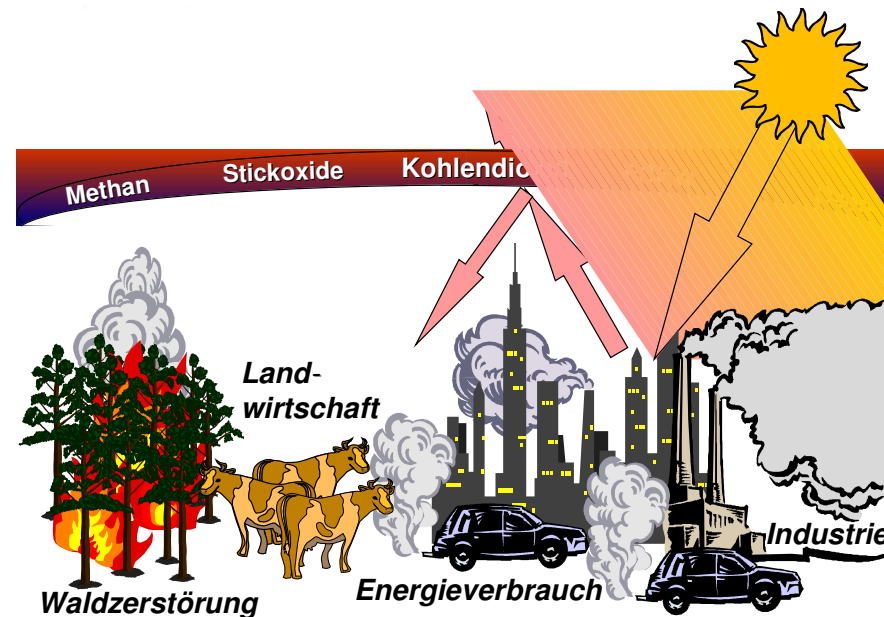


Treibhausgase

Tabelle 1.7 Charakteristika der Treibhausgase in der Atmosphäre [Sch98, IPC01]

Treibhausgas	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	O ₃	FCKW11	H-FKW23
Konzentration in ppm	381	1,766	0,314	0,03	0,000268	0,000014
Verweilzeit in der Atmosphäre und Biosphäre in Jahren	5 – 200	12	114	0,1	45	260
Konzentrationsanstieg in %/Jahr	0,4	0,4	0,25	0,5	-0,5	3,9
Spezifisches Treibhauspotenzial	1	32	150	2.000	14.000	10.000
Anteil am Treibhauseffekt in %	61	15	4	<9	11 (alle CKW)	

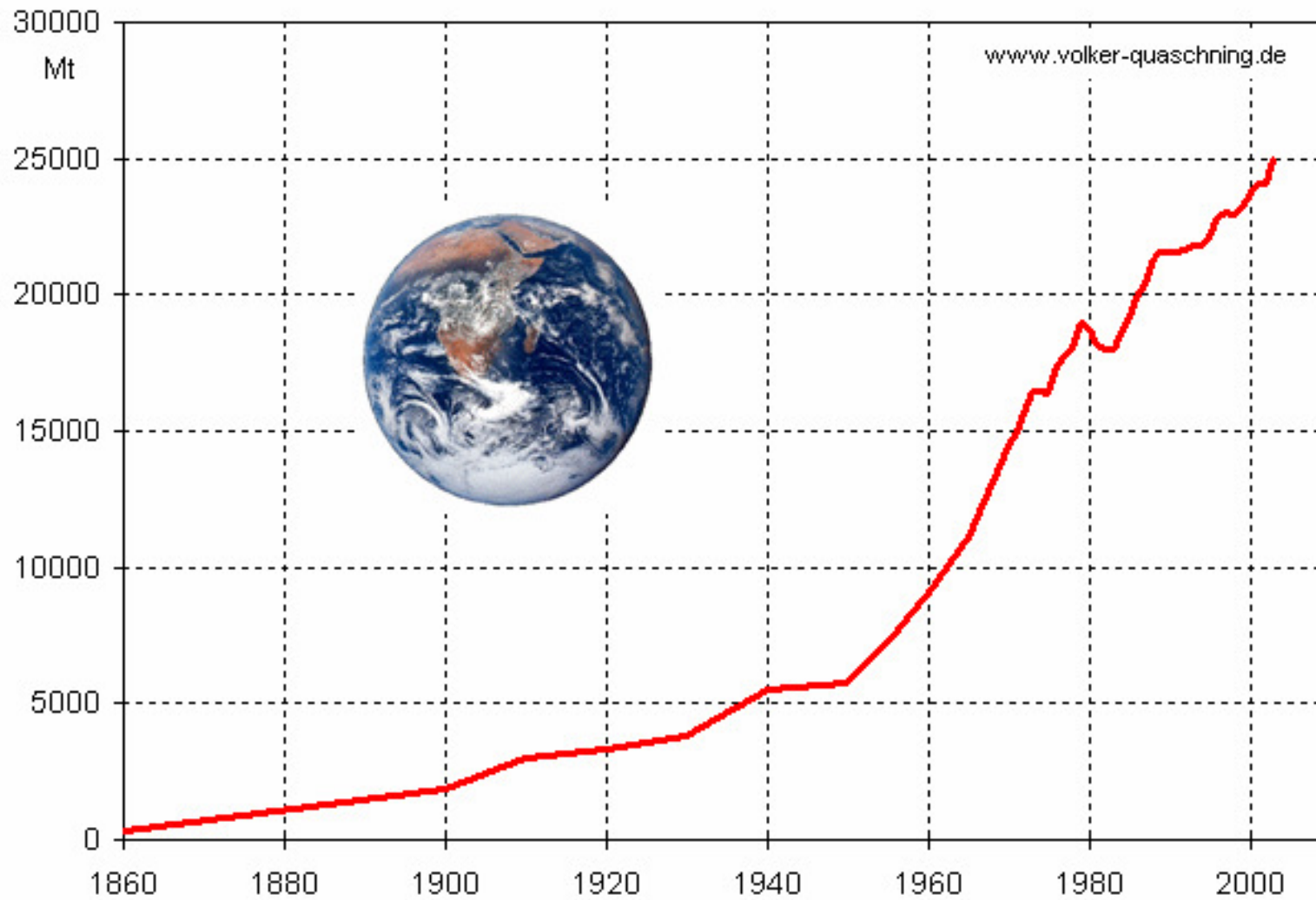
Quelle: V. Quaschnig



Grafik: Volker Quaschnig



CO₂ Emissionen Weltweit





Kyoto Verpflichtung und Realität

Tabelle 1.16 Reduktionsverpflichtungen nach dem Kyoto-Protokoll und bisherige Entwicklung bei den Vertragspartnern [Sar99, UNF06]

Vertragsparteien	Verpflichtungen gemäß Kyoto-Protokoll	Treibhausgas-Emissionen in Mt (CO ₂ -Äquivalente; ohne Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)			Veränderung zwischen 1990 und 2004
		1990	2000	2004	
EU	-8 %	4.265	4.139	4.235	-0,7 %
Liechtenstein, Monaco, Schweiz	-8 %	53	52	53	+0,4 %
Bulgarien, Estland, Lettland, Litauen, Rumänien, Slowakei, Slowenien, Tschechien	-8 %	805	443	493	-38,8 %
USA	-7 %	6.103	6.976	7.068	+15,8 %
Japan	-6 %	1.272	1.346	1.355	+6,5 %
Kanada	-6 %	599	725	758	+26,6 %
Polen, Ungarn	-6 %	688	468	472	-31,4 %
Kroatien	-5 %	31	25	29	-5,4 %
Neuseeland	±0 %	62	70	75	+22,5 %
Weißrussland	±0 %	127	70	74	-41,6 %
Russland	±0 %	2.975	1.945	2.024	-32,0 %
Ukraine	±0 %	925	395	413	-55,3 %
Norwegen	+1 %	50	54	55	+10,3 %
Australien	+8 %	423	504	529	+25,1 %
Island	+10 %	3	4	3	-5,0 %
Summe	-5,2 %	18.381	17.215	17.638	-4,0 %

Quelle: V. Quaschnig