



---

# Solarenergie SS 2007

Michael Doran

Universität Heidelberg & Schmid Technology  
GmbH Schwetzingen



## Infos

---

- Priv.-Doz. Dr. Michael Doran
- e-mail: [Michael.Doran@thphys.uni-heidelberg.de](mailto:Michael.Doran@thphys.uni-heidelberg.de)
- URL: [www.thphys.uni-heidelberg.de/~doran](http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~doran)
- Vorkenntnisse: hilfreich aber nicht wirklich notwendig sind: Thermodynamik, Quantenmechanik und Festkörperphysik



## Literatur

---

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



# Vorläufiges Inhaltsverzeichnis

---

1. Einleitung, Marktdata und Fakten
2. Die Sonne, Sonnenstand & Spektrum
3. Photovoltaik
4. Nicht konzentrierende Solarthermie
5. Konzentrierende Solarthermie: Kraftwerke



# 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:  $P = \frac{dW}{dt}$

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



# Primär, End und Nutz im Beispiel

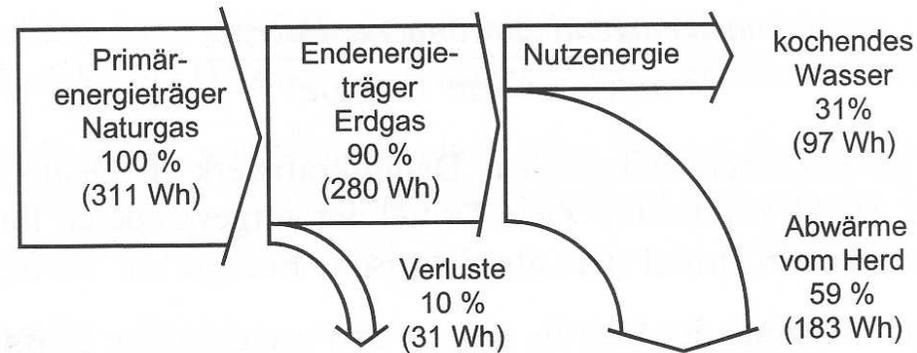


Bild 1.2 Energiewandlungskette und Verluste beim Wasserkochen am Gasherd

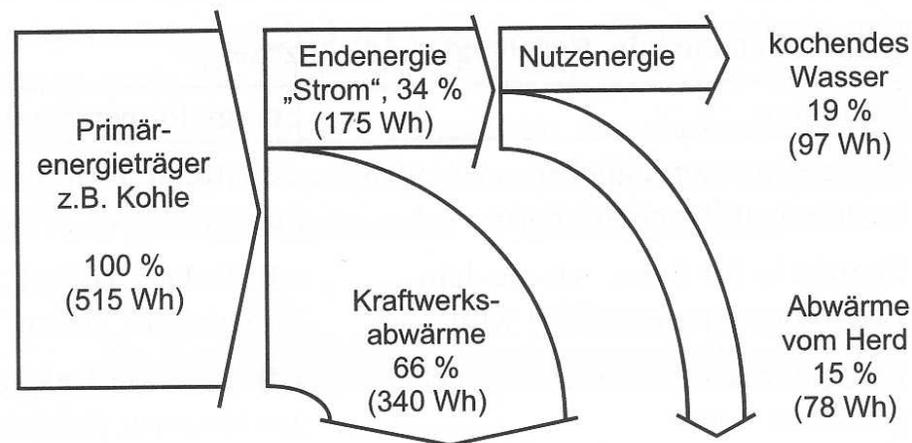
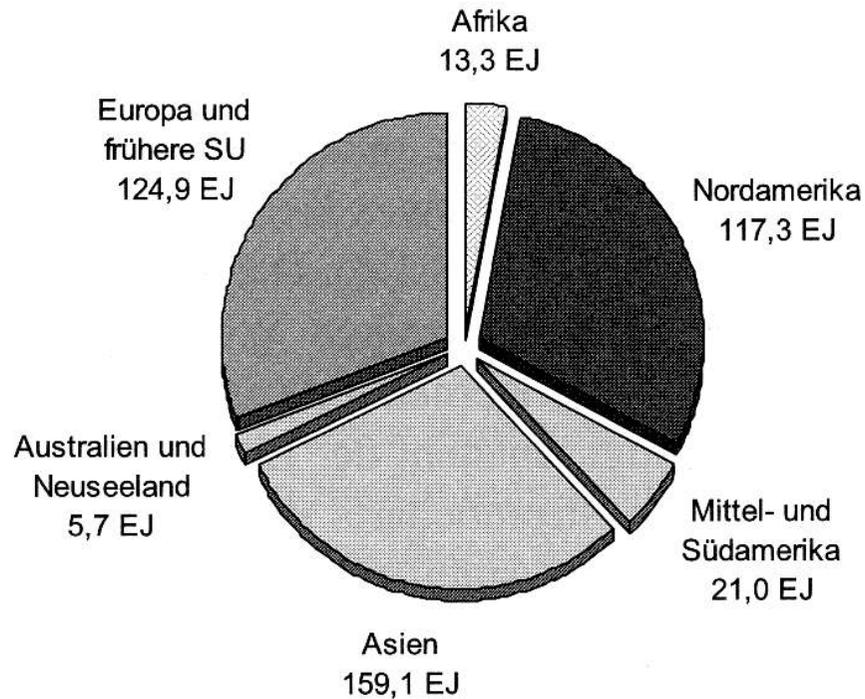


Bild 1.3 Energiewandlungskette und Verluste beim Wasserkochen am Elektroherd

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

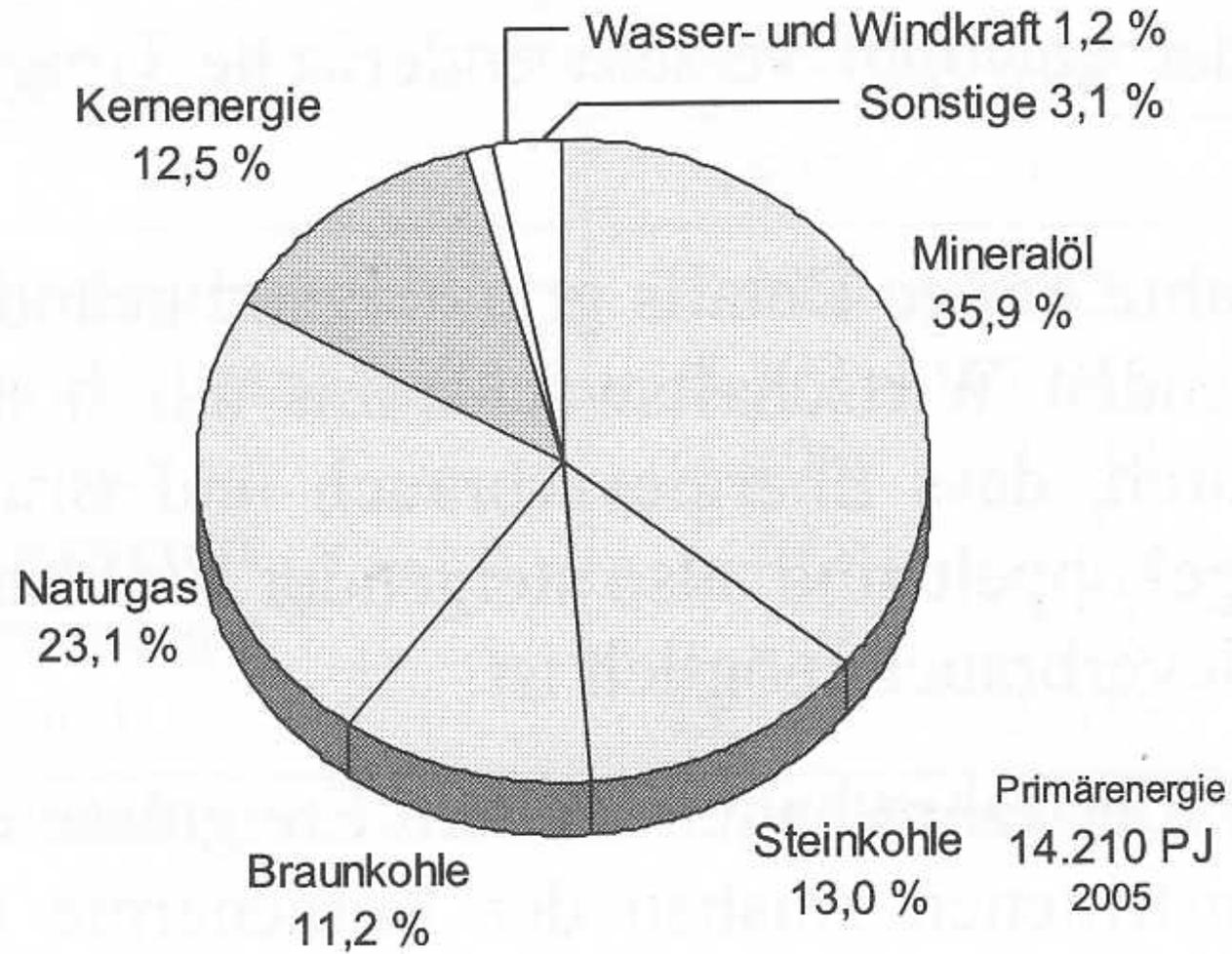
		in Gigajoule (GJ)											
		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
AFRIKA	26,7												
NORDAMERIKA	263,7												
USA	322,8												
SÜDAMERIKA	40,1												
ASIEN	35,3												
China	32,3												
Japan	147,9												
EUROPA (OECD - Länder)	136,9												
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!



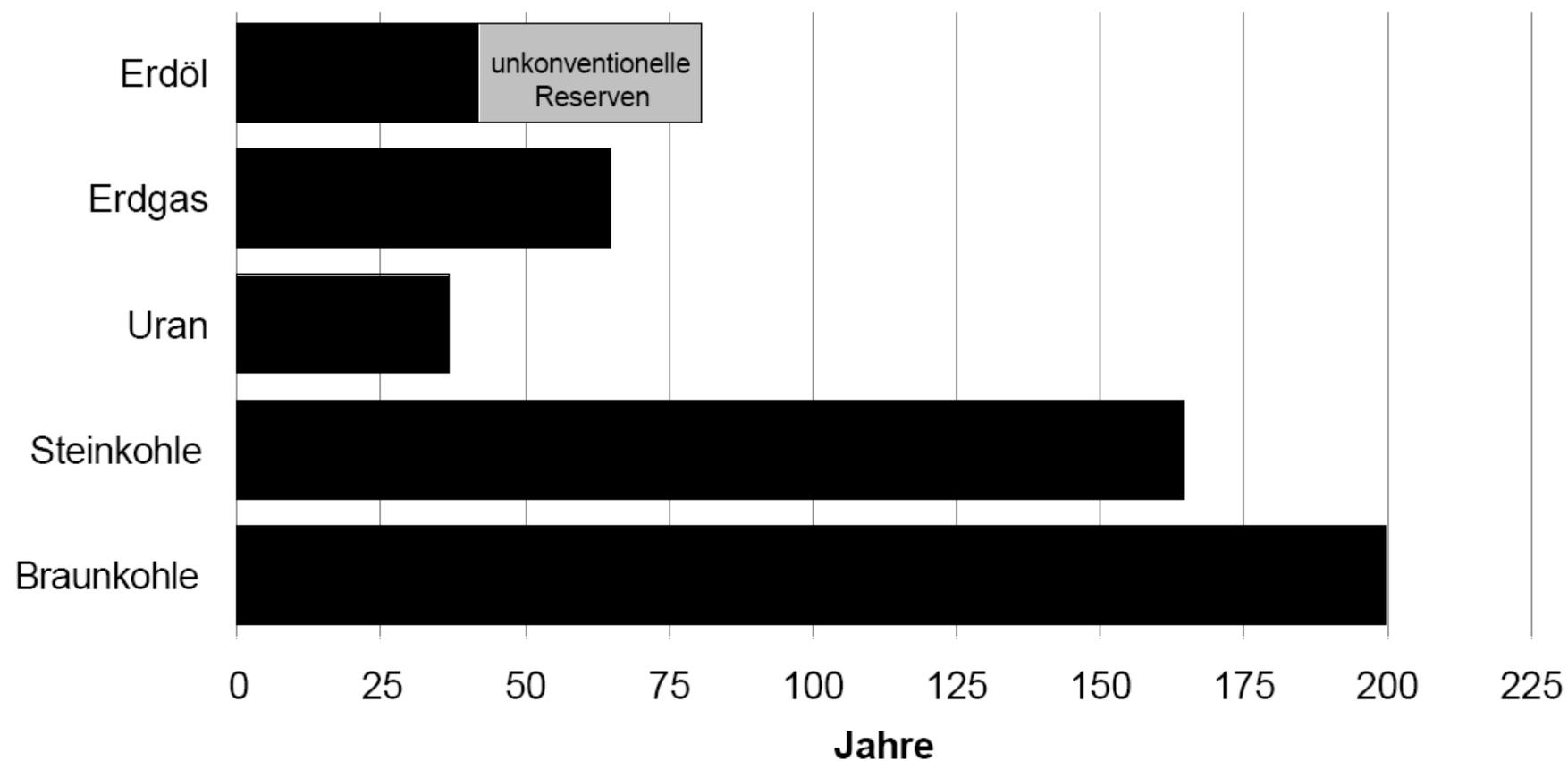
# Energiemix in Deutschland

Quelle: V. Quaschnig





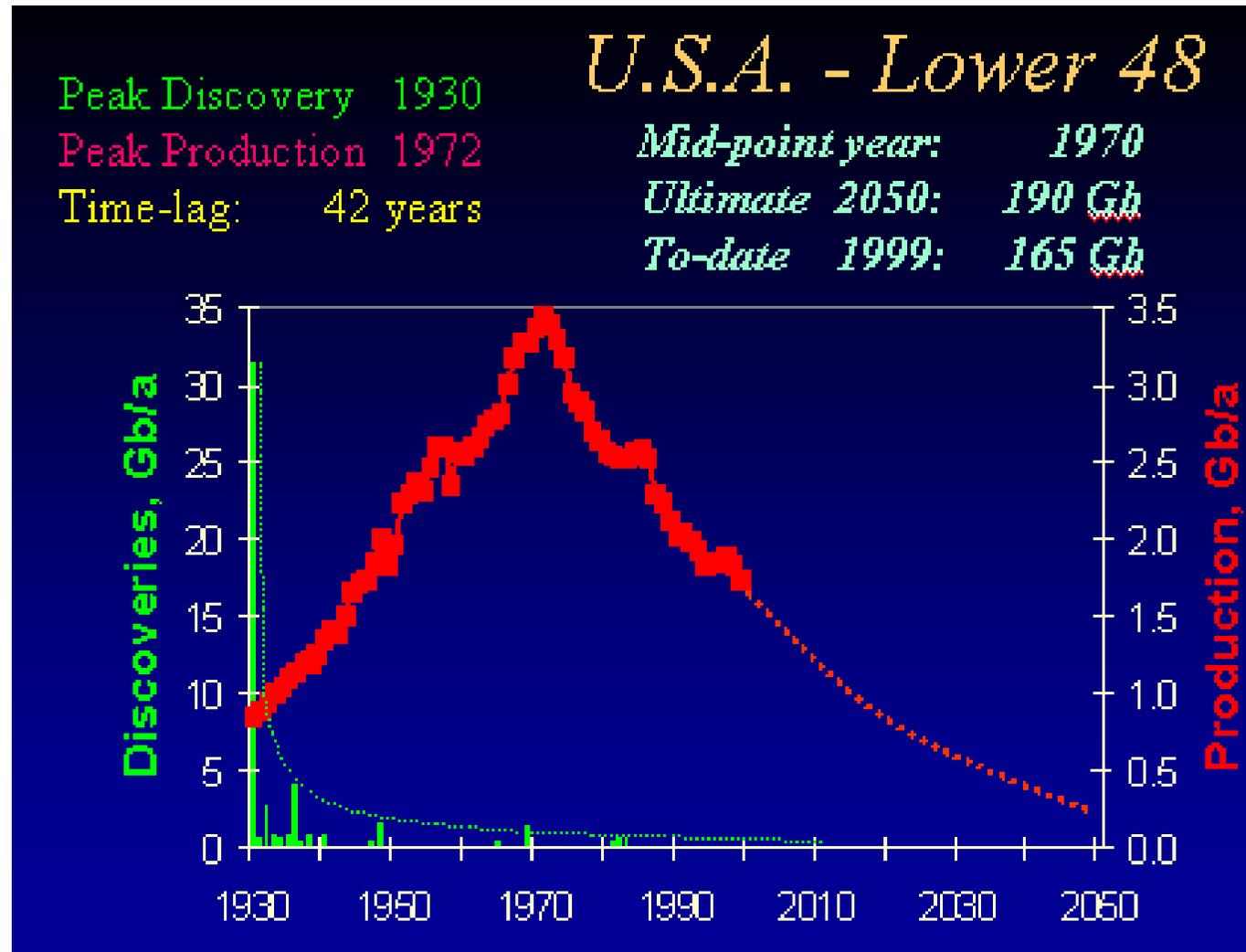
# Statische Reichweite der Reserven



Quelle: Martin Pehnt

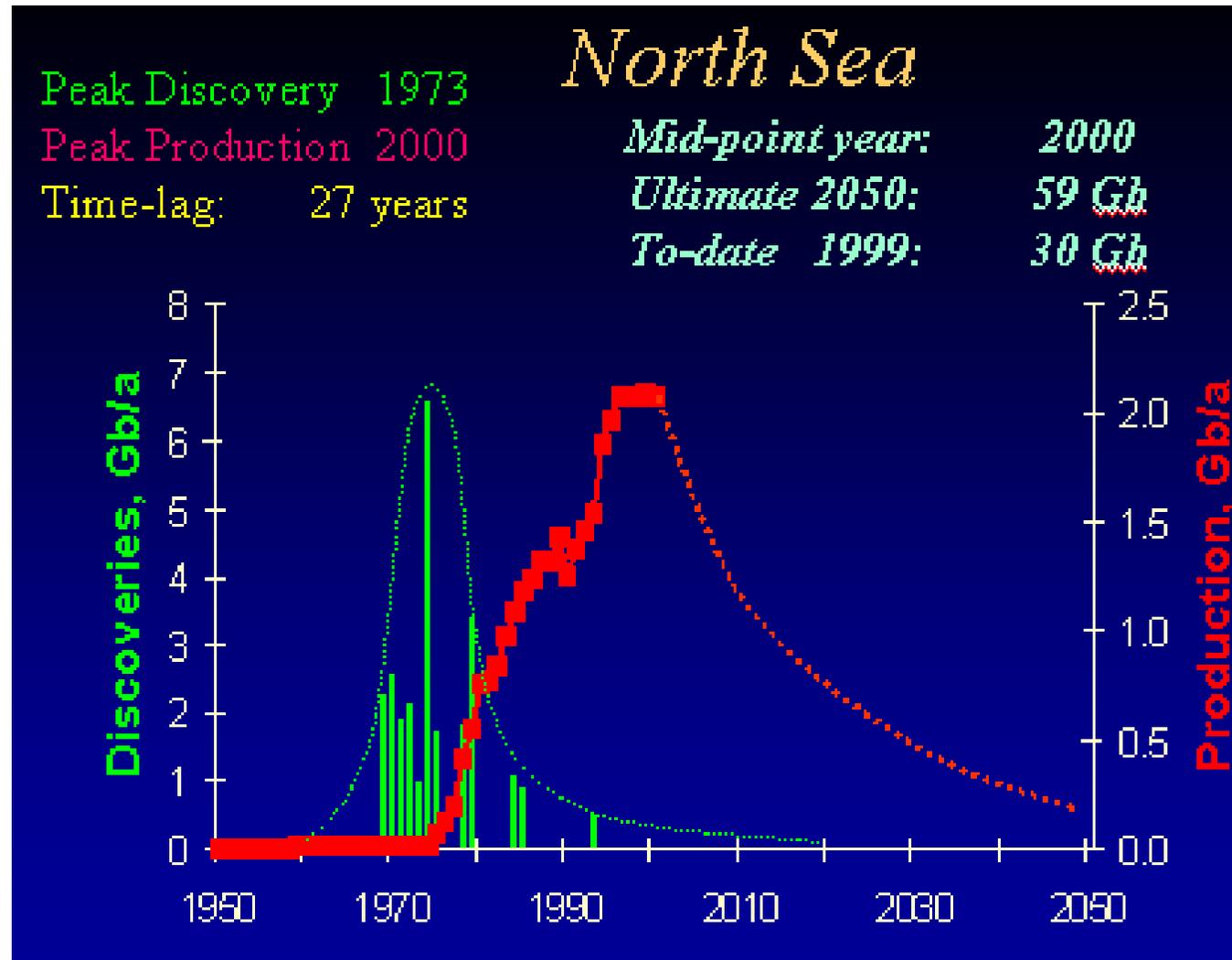


# Öl, Gas, Kohle & Uran sind knapp





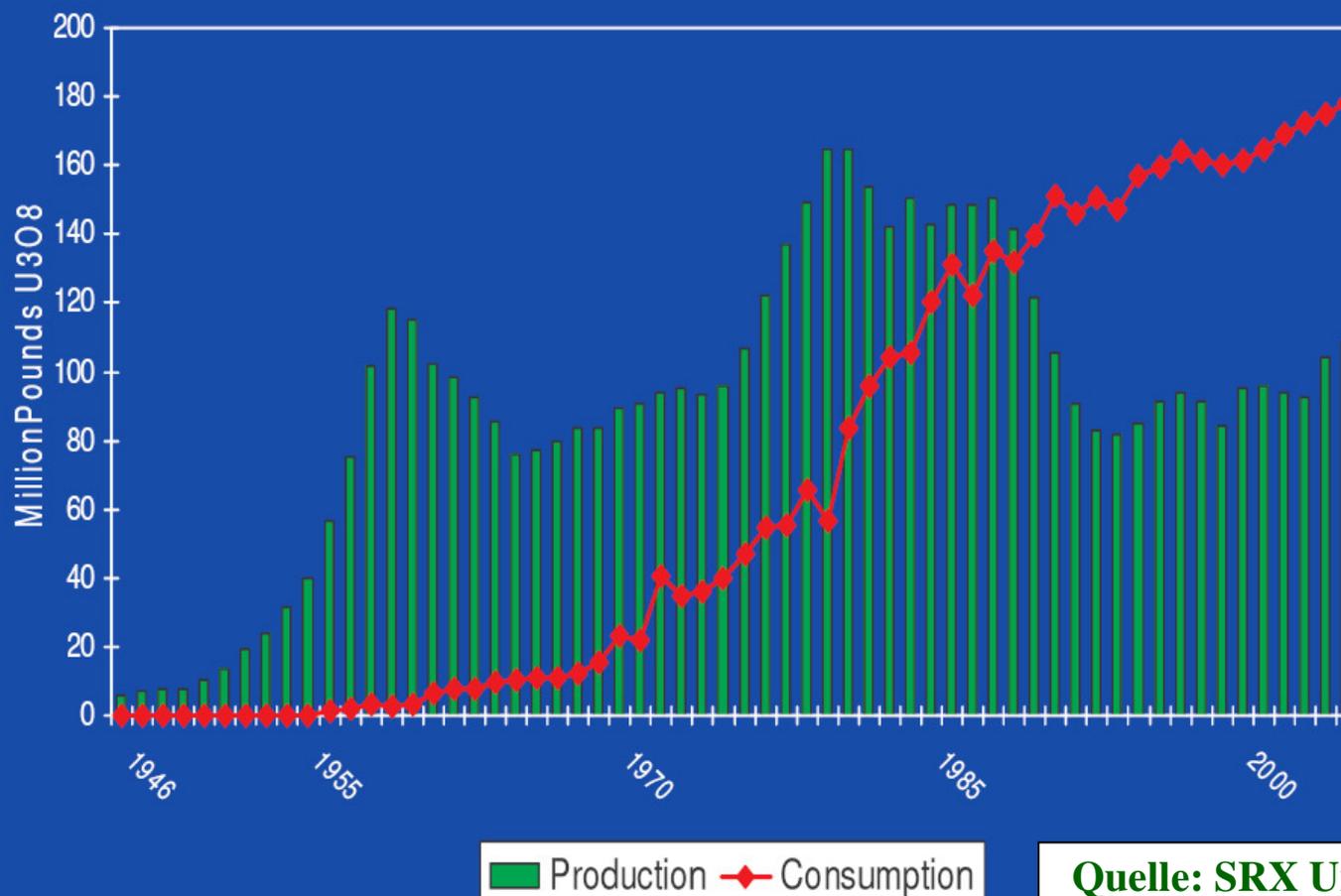
# Peak-Oil in der Nordsee





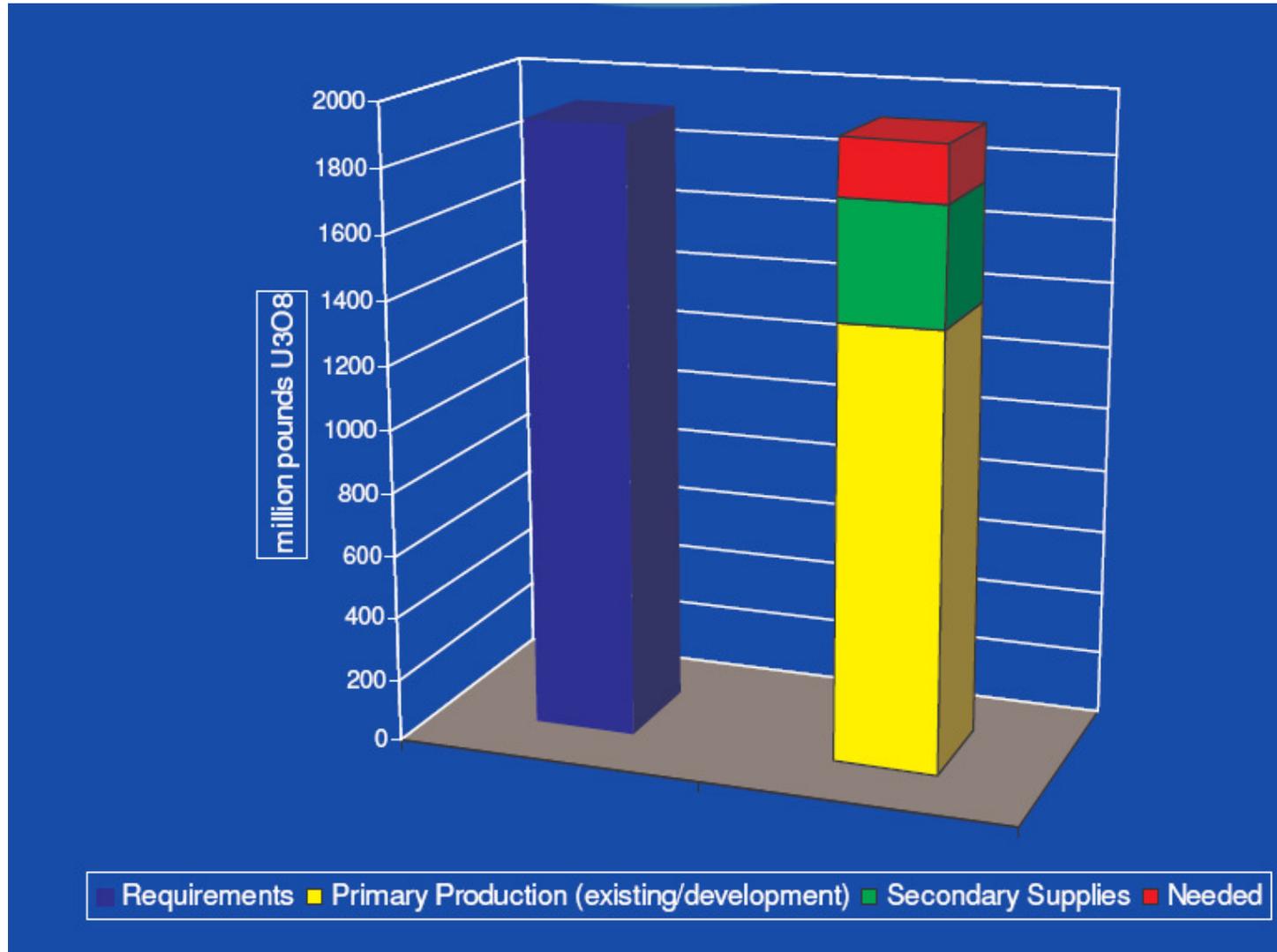
# Kernkraft als Lösung? (I)

## Uranium Market Fundamentals





# Kernkraft als Lösung? (II)

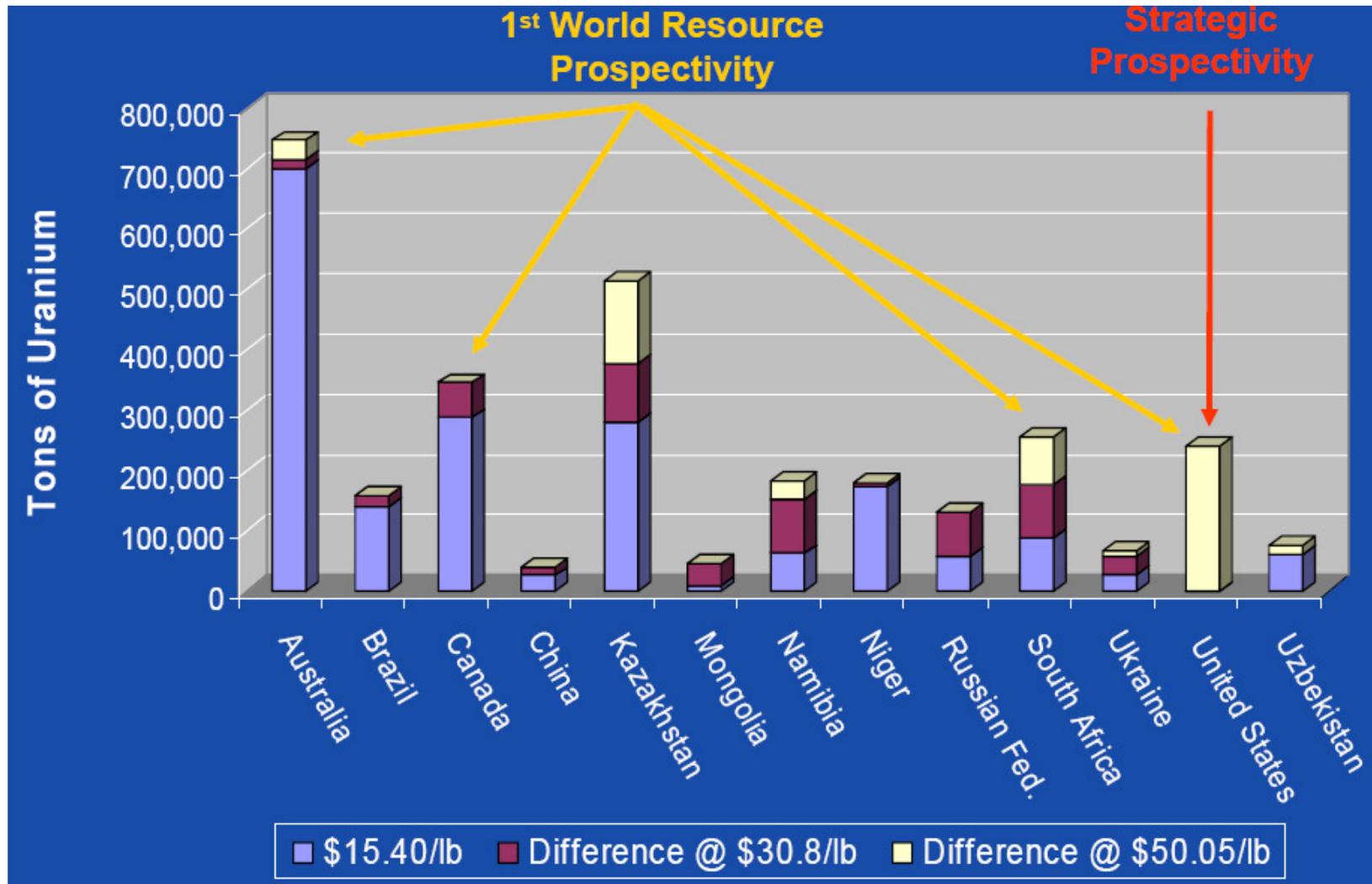


Quelle: SRX Uranium One

Kummulierter Zeitraum: 2006-2015



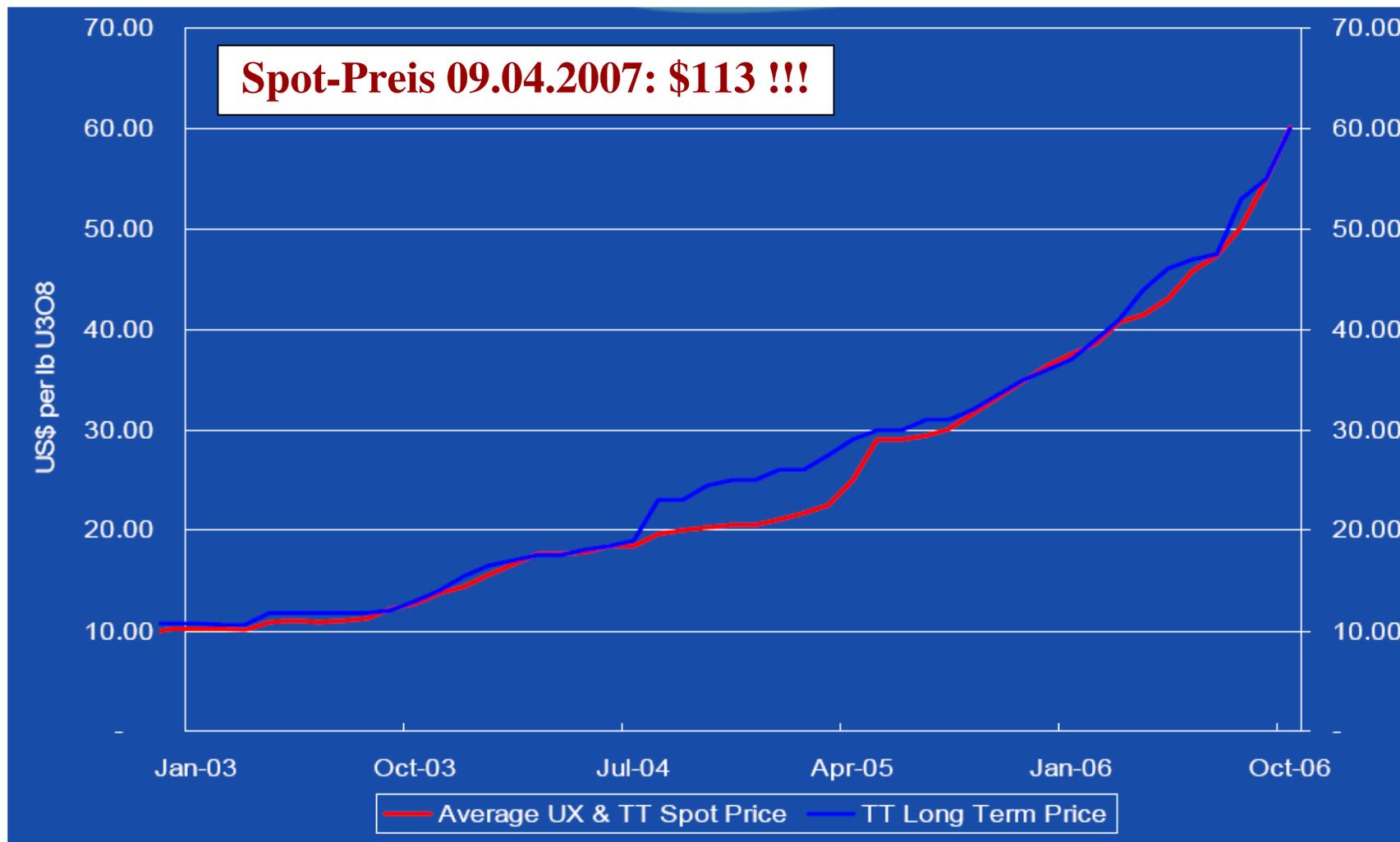
# Kernkraft als Lösung? (III)



Quelle: SRX Uranium One



# Kernkraft als Lösung? (IV)

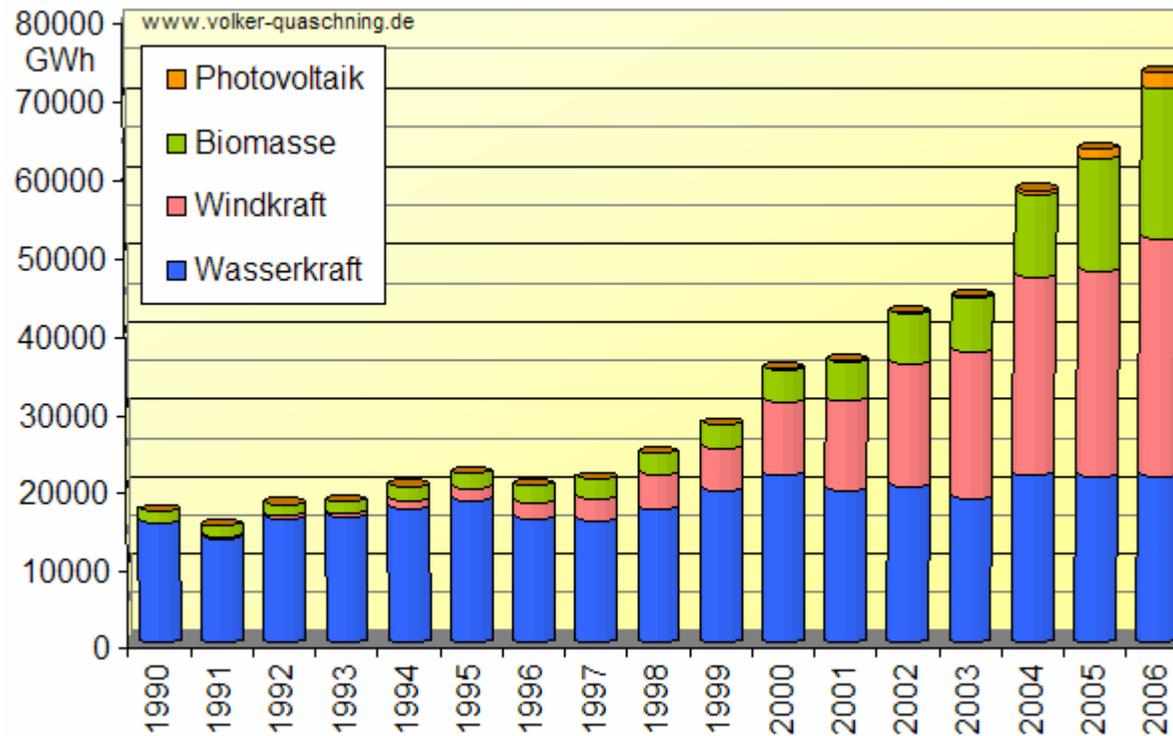


Quelle: SRX Uranium One



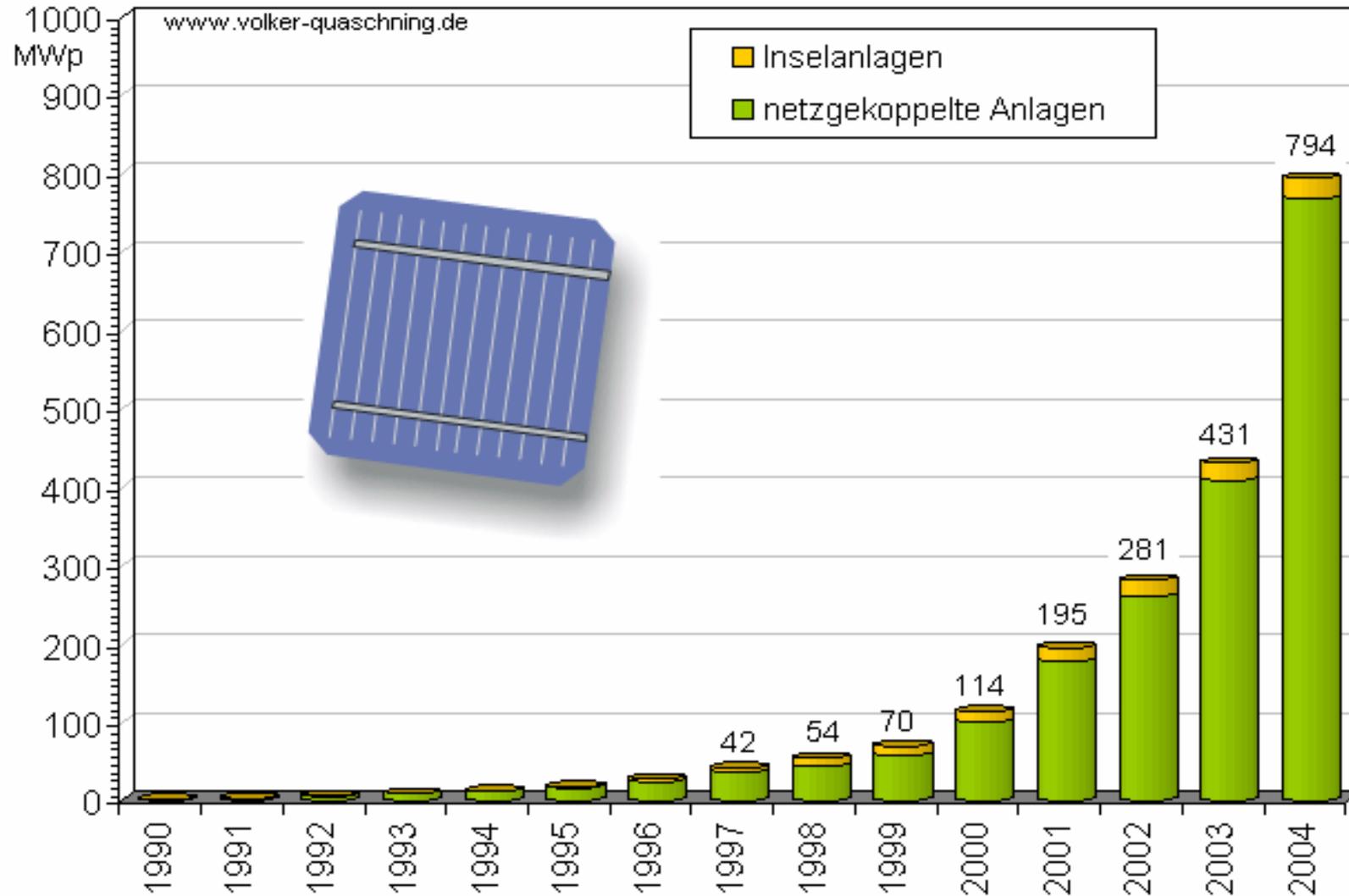
# Stromerzeugung durch regenerative Energien

Gesamterzeugung 2005 ca. 600 TWh in Deutschland



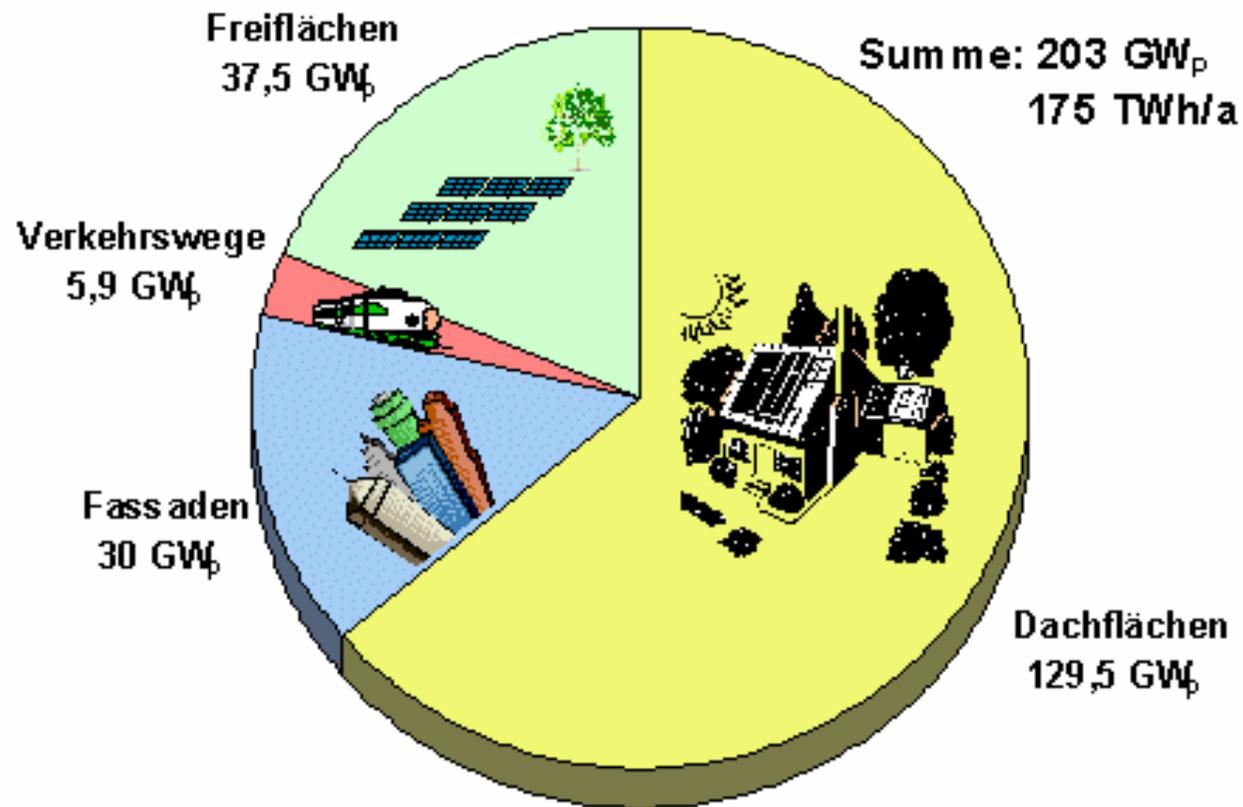


# Bislang installierte Photovoltaik Leistung





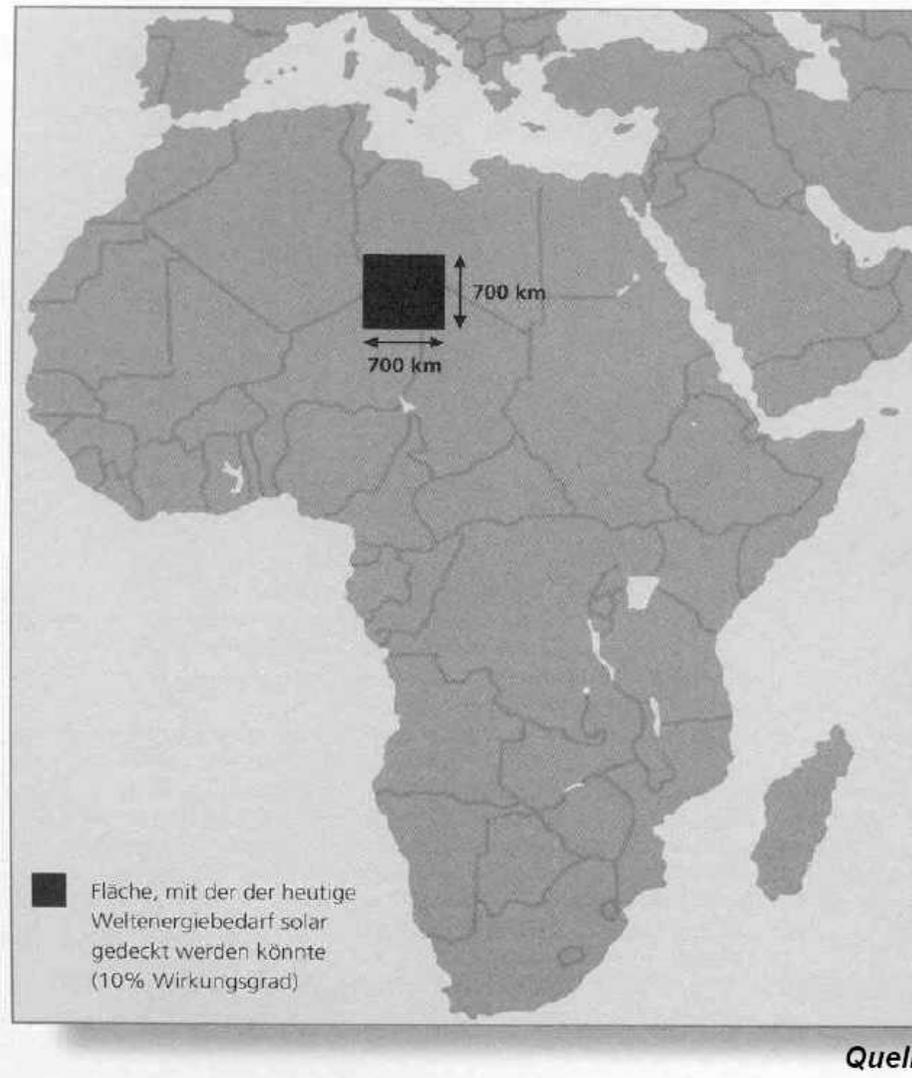
# Potential der Photovoltaik in Deutschland





## Vergleichsweise wenig Fläche benötigt

Benötigte Fläche zur Deckung des **Weltenergiebedarfs** aus Solarenergie.



Quelle: Martin Pehnt

Quelle: Witzel, Seifried



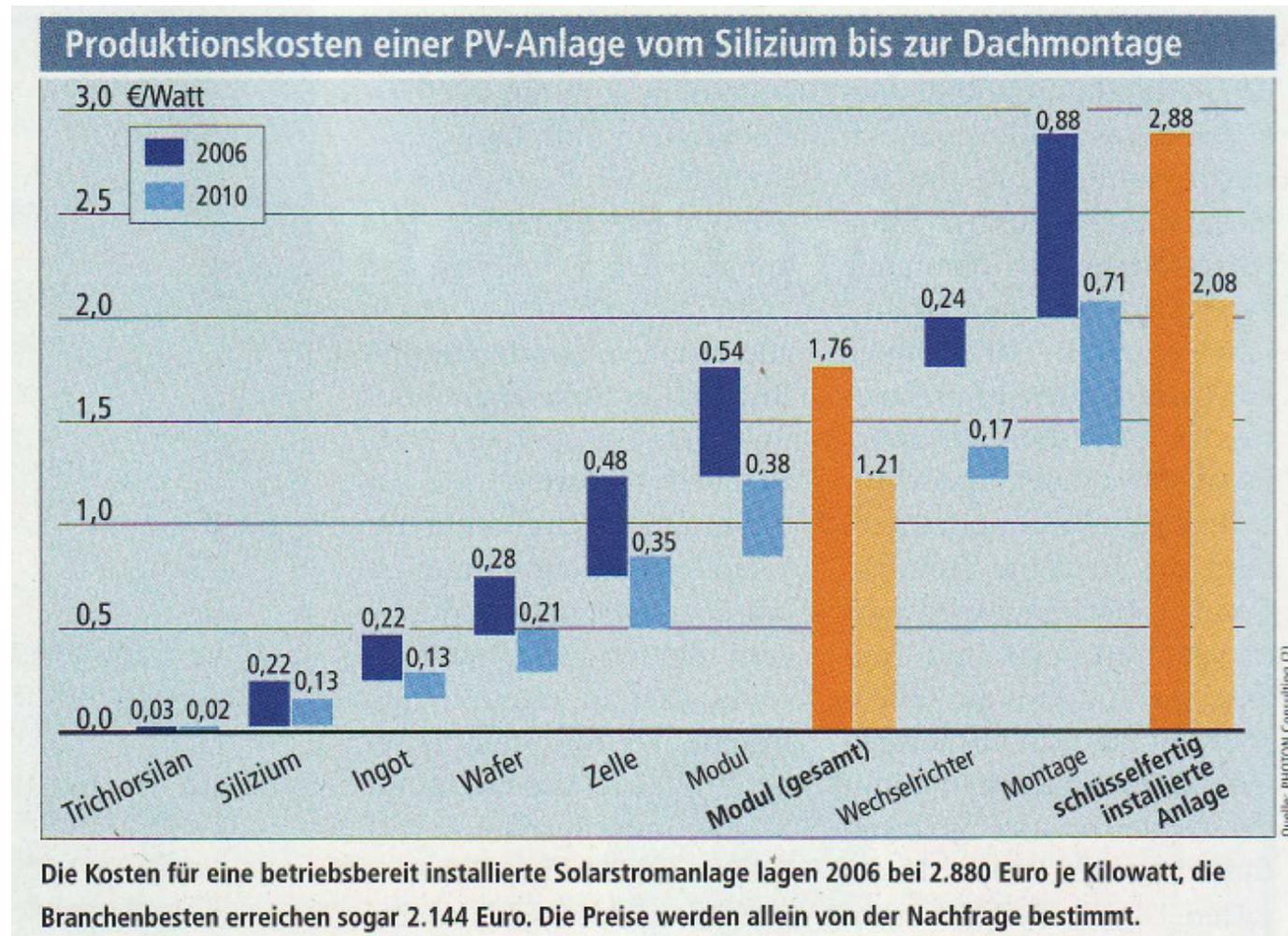
## 1.2 Der Photovoltaik Markt

---

- Momentan (und für die nächsten Jahre) ist der Markt für Photovoltaiksysteme subventionsgetrieben: die Produktion reicht gerade aus, die Märkte mit den höchsten Subventionen zu bedienen. Daher sind die *Preise* seit einigen Jahren stabil und fallen 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



# Kosten (nicht Preise!) der Photovoltaik I

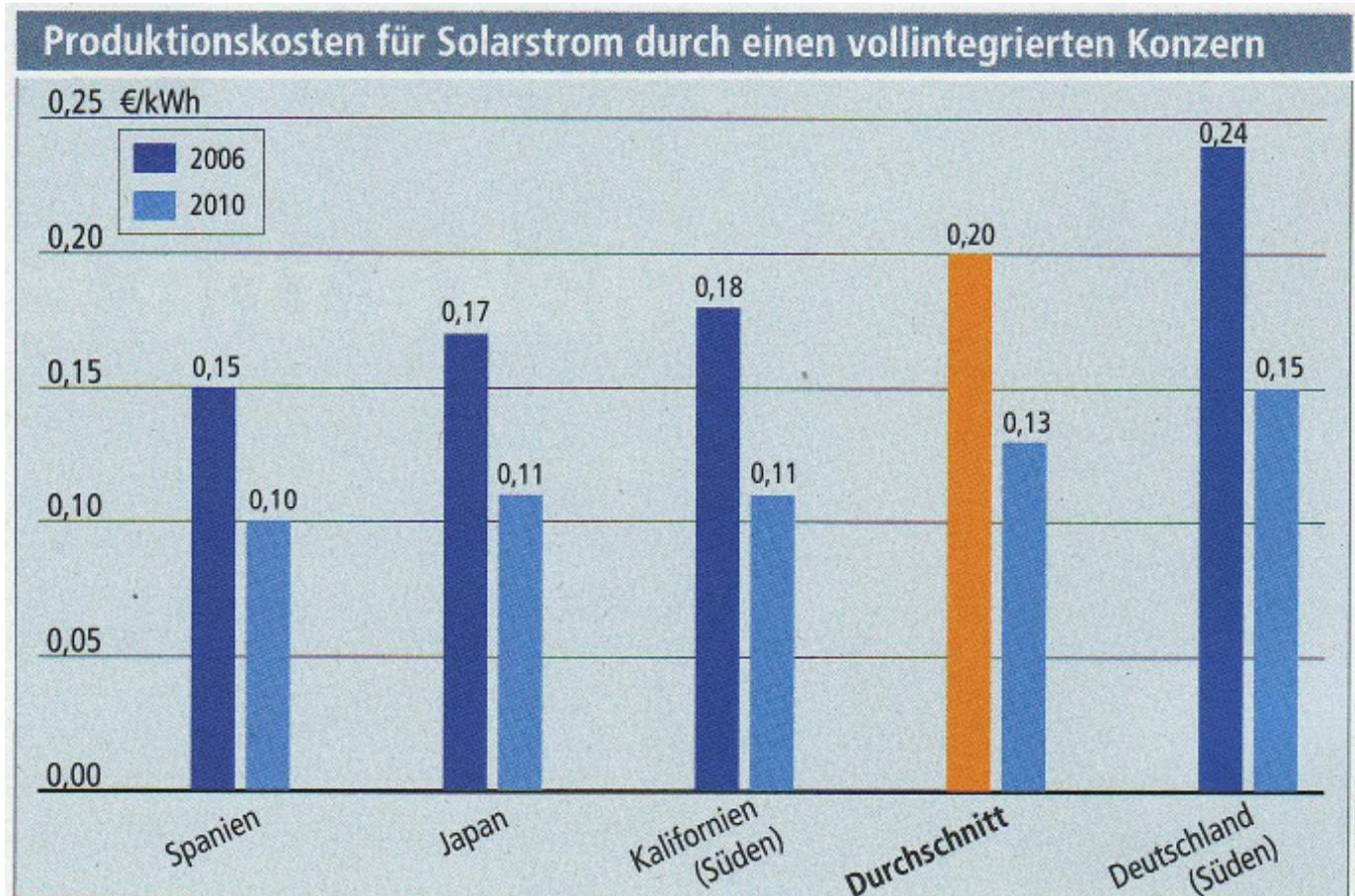


Quelle: Photon Magazin 03/2007

Preise sind eher bei 4-6 Euro/Watt!



# Kosten (nicht Preise!) der Photovoltaik II

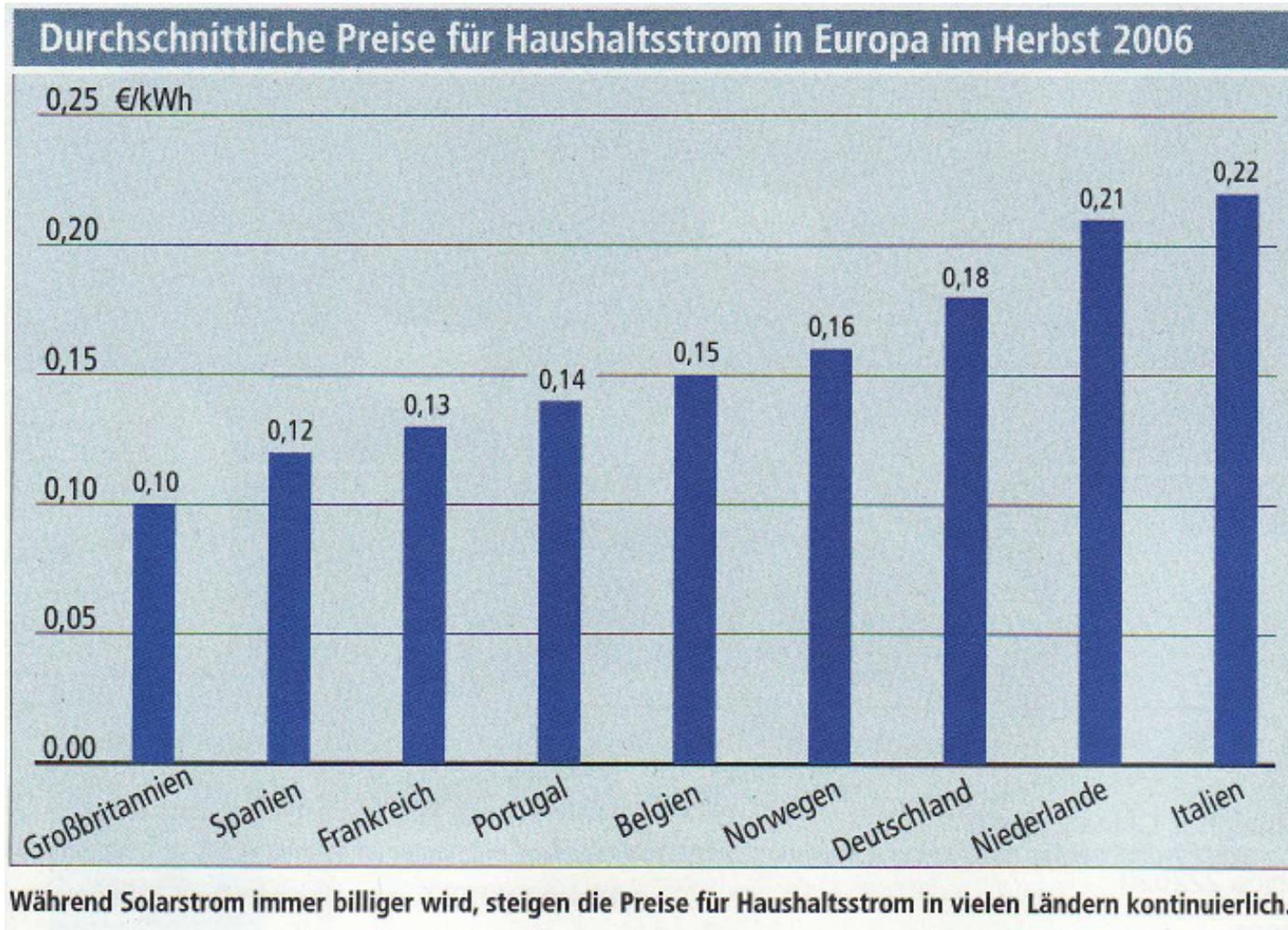


Produktionskosten für Solarstrom, wie sie ein professioneller Kraftwerksbetreiber erreichen kann: Selbst in Süddeutschland sind bereits heute 24 Eurocent je Kilowattstunde drin. 2010 werden es dann nur noch 15 Eurocent sein.

Quelle: Photon Magazin 03/2007



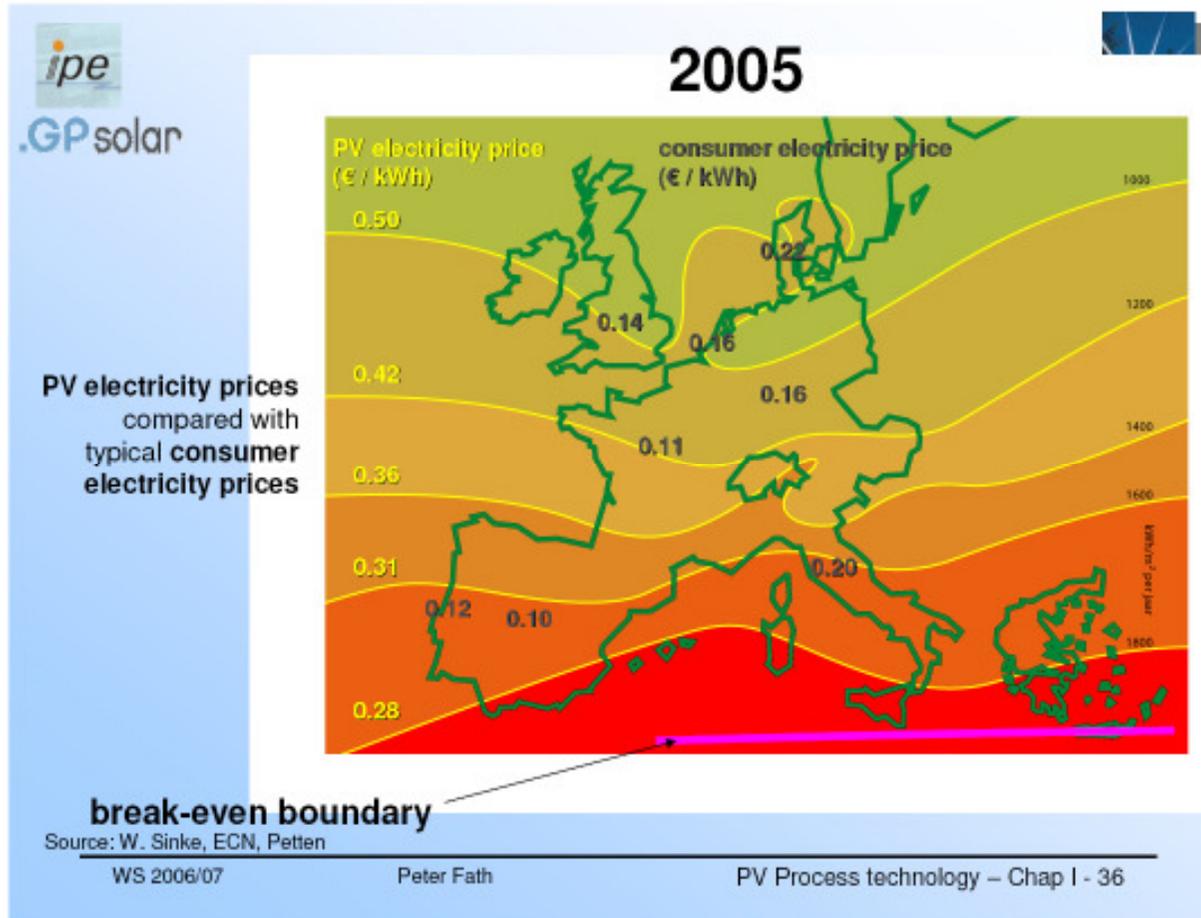
# Kosten (nicht Preise!) der Photovoltaik III



Quelle: Photon Magazin 03/2007

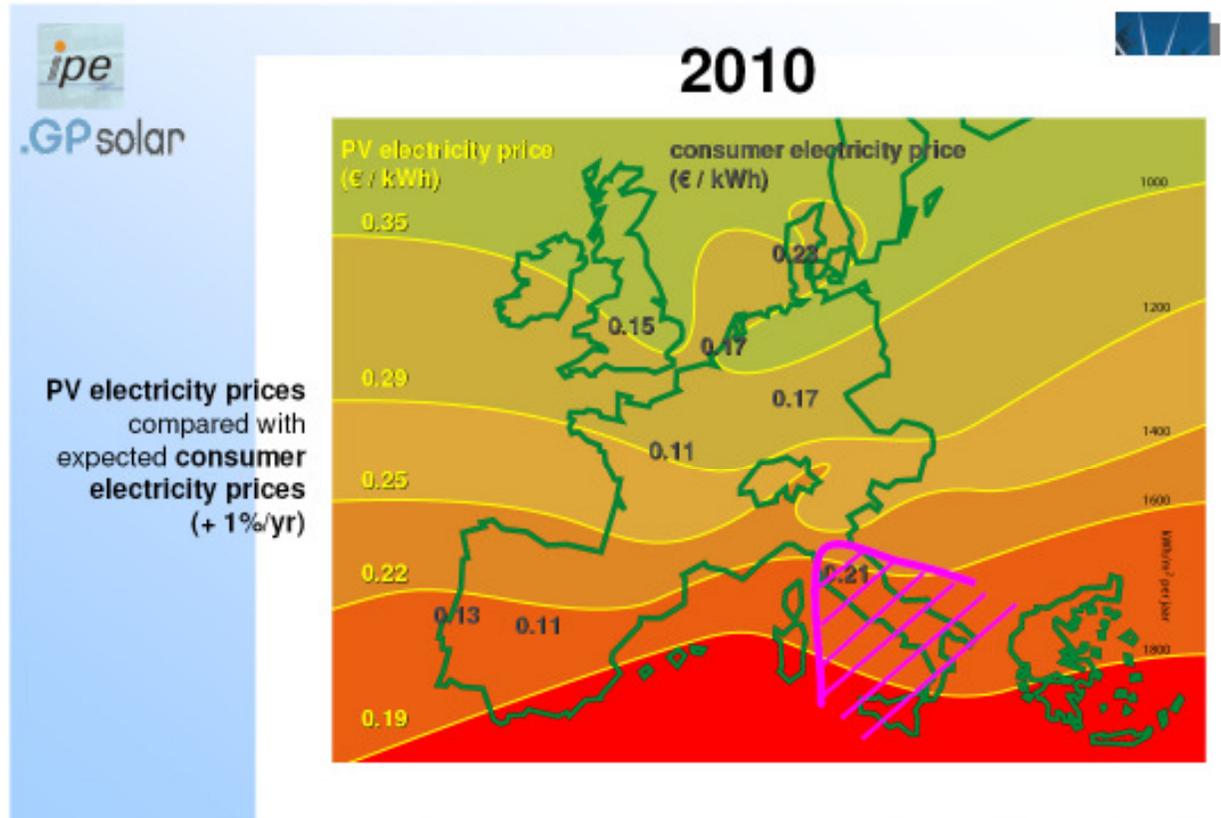


# Photovoltaik Preise & Strompreise 2005





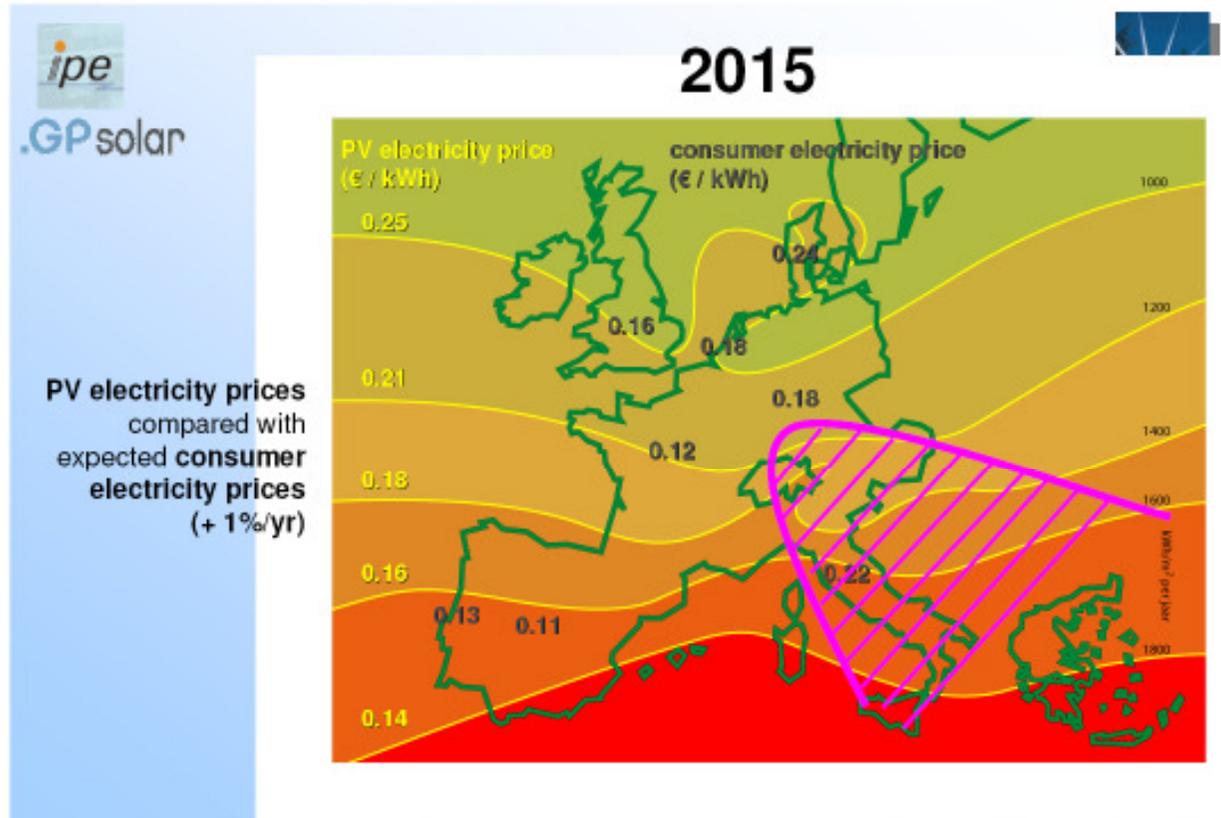
# Photovoltaik Preise & Strompreise 2010



Source: W. Sinke, ECN, Petten

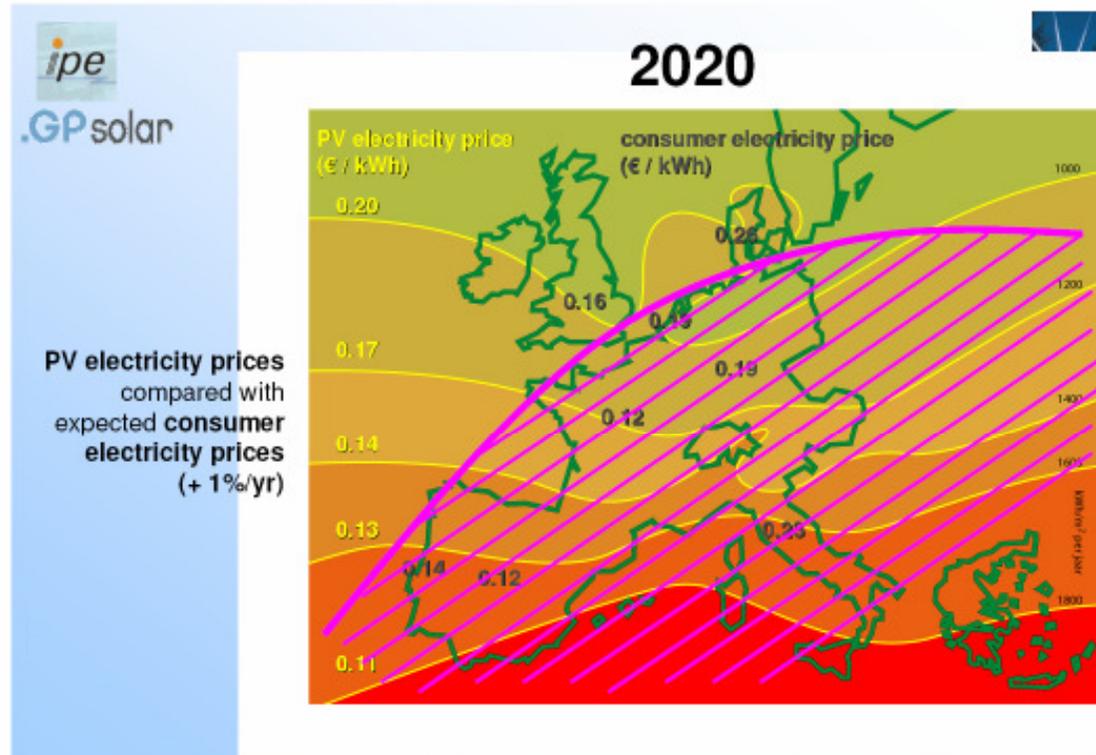


# Photovoltaik Preise & Strompreise 2015





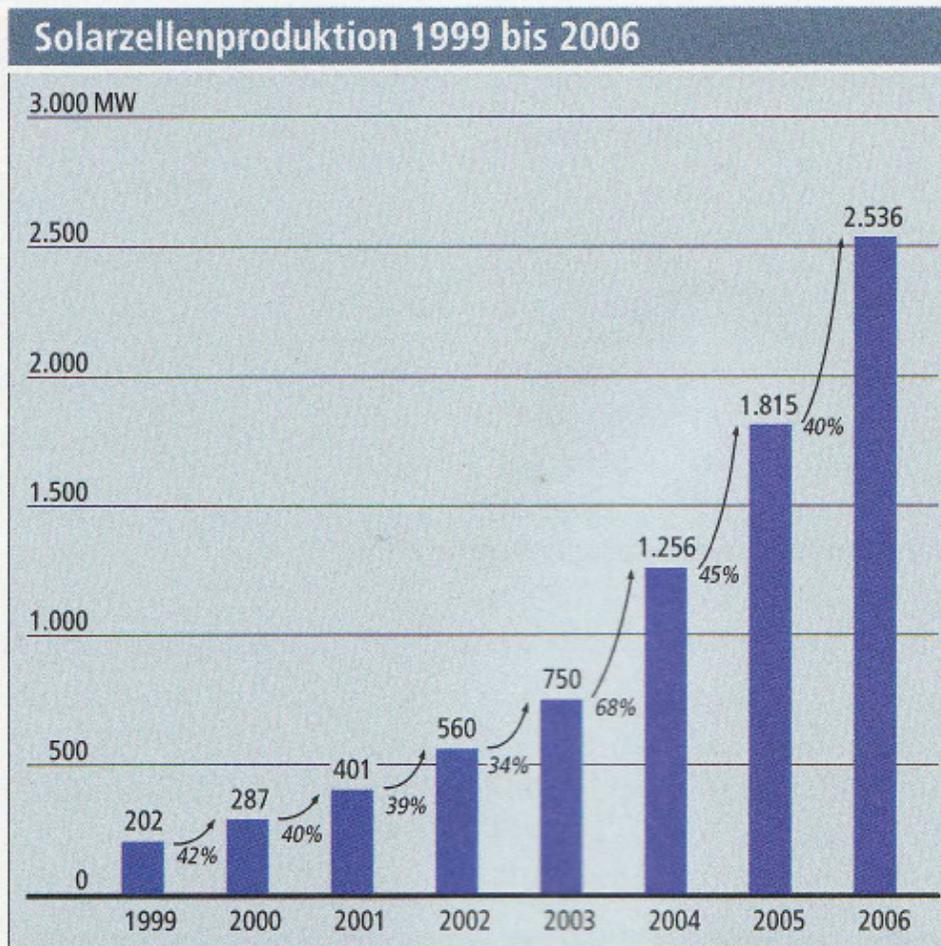
# Photovoltaik Preise & Strompreise 2020



Source: W. Sinke, ECN, Petten



# Wachstum liegt bei 40% pro Jahr



© Solar Verlag GmbH

Quelle: Photon Magazin 03/2007

Siliziummangel? Das Wachstum bei der Solarzellenproduktion betrug 2006 satte 40 Prozent. Das ist zwar etwas weniger als die 45 Prozent des Vorjahres, dafür werden in diesem Jahr dann aber 55 Prozent erwartet.



# Weltweit installierte Photovoltaikleistung

---

Tabelle 1.9 Weltweit installierte Photovoltaikleistung in  $\text{GW}_p$  (Daten: [IEA06b, Qua06])

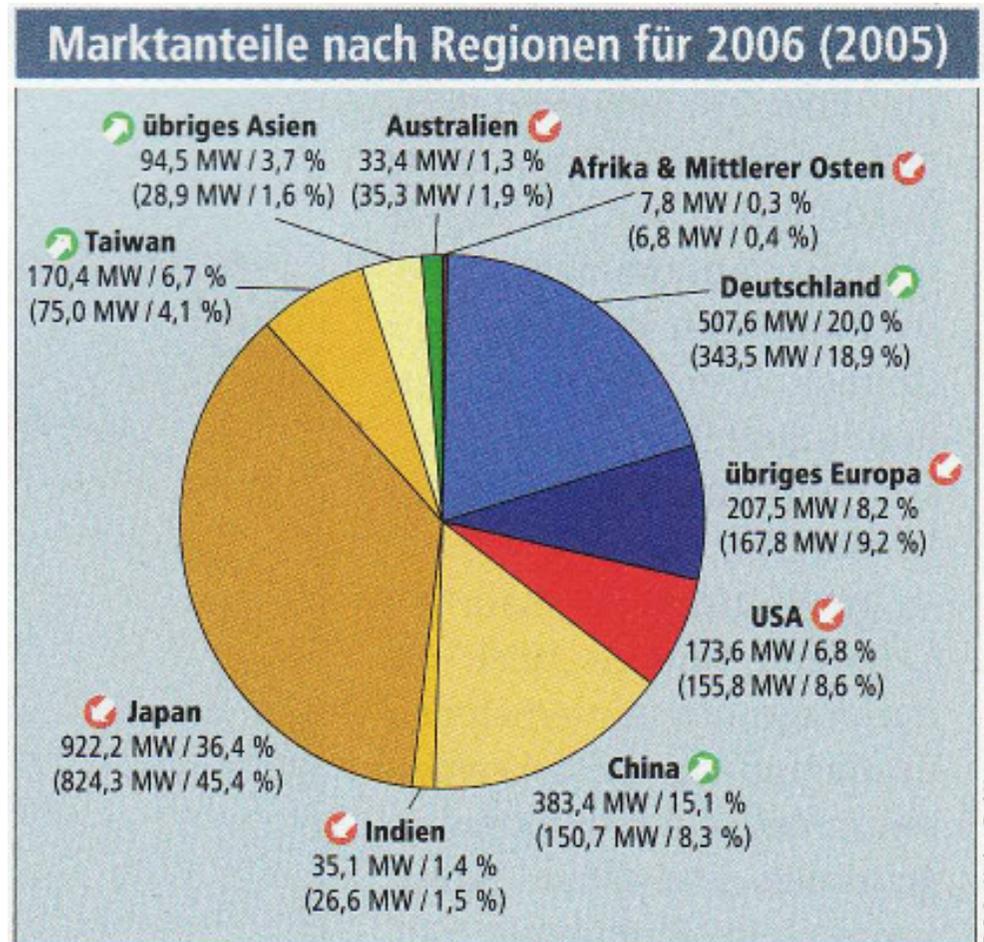
Jahr	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2003	2004	2005
Japan	0,019	0,031	0,060	0,133	0,330	0,637	0,860	1,132	1,422
Deutschland	0,006	0,012	0,028	0,054	0,114	0,277	0,410	0,794	1,429
USA	0,044	0,058	0,077	0,100	0,139	0,212	0,275	0,376	0,479
Andere	0,082	0,169	0,256	0,382	0,517	0,813	1,054	1,398	1,850
Welt	0,15	0,27	0,42	0,67	1,10	1,94	2,62	3,70	5,18

Quelle: V. Quaschnig



# Deutschland ist sehr gut positioniert

Bsp: Produktion von Solarzellen.

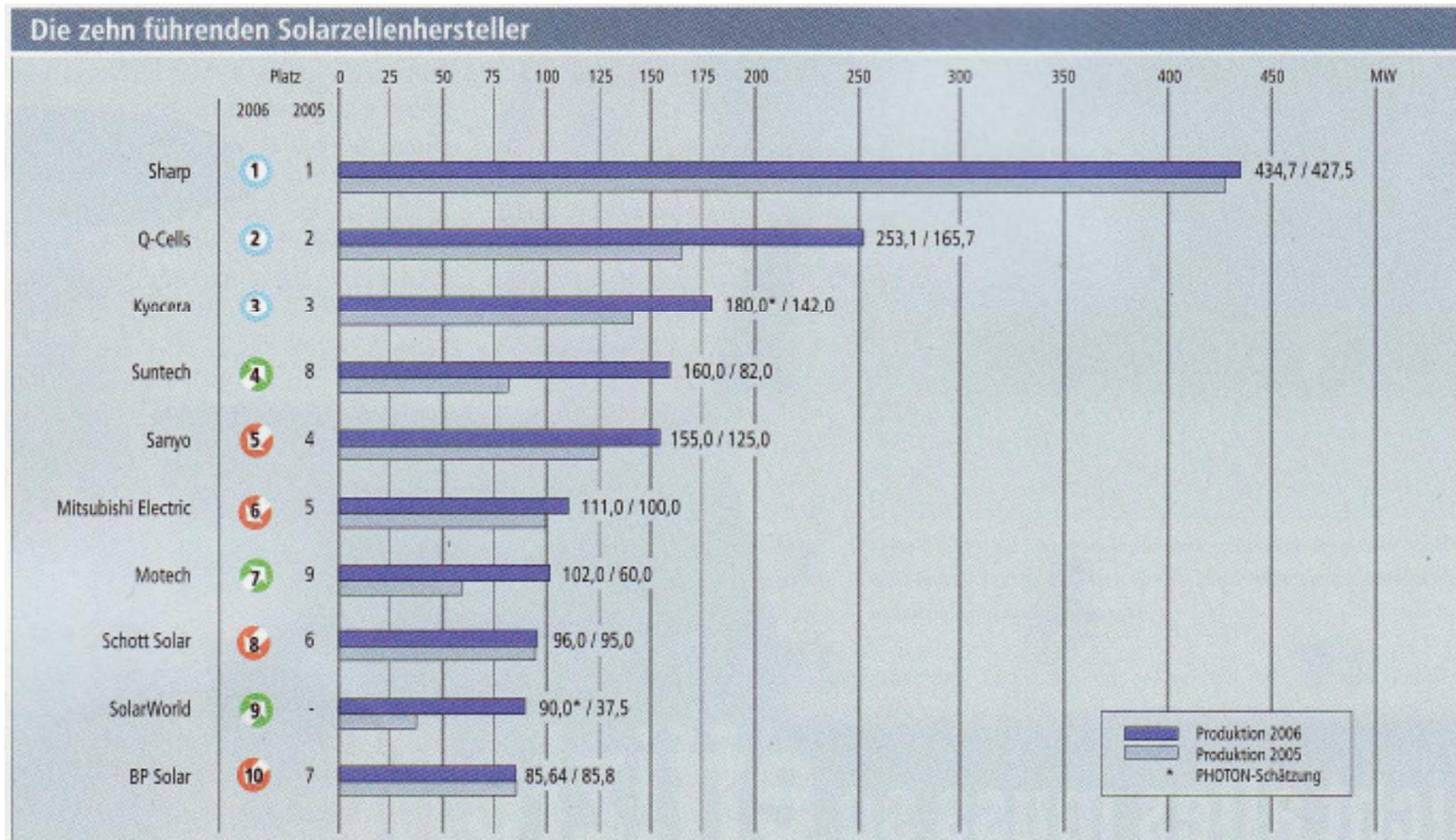


Quelle: Photon Magazin 03/2007

Asien auf dem Vormarsch: Die asiatischen Länder hatten 2005 bereits einen Marktanteil von 60,9 Prozent, 2006 sogar von 63,3 Prozent. Die Produktion verlagert sich dabei von Japan nach Taiwan und vor allem China – dem Land mit dem schnellsten Produktionsausbau.



# Deutschland ist sehr gut positioniert: Zellen

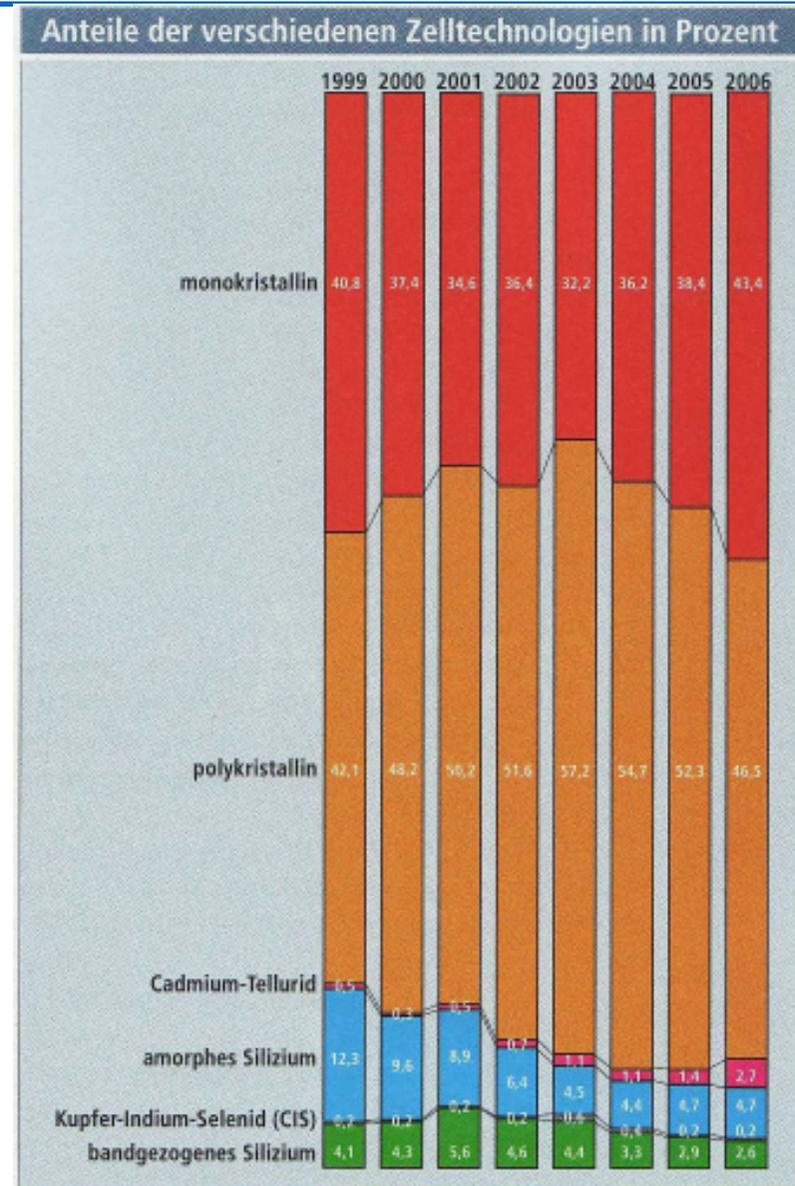


Alles eine Frage der Siliziumvorräte: Weltmarktführer Sharp konnte seine Produktion praktisch nicht steigern – die wenigen Megawatt mehr stammen ausschließlich aus dem Dünnschichtbereich. Q-Cells und die chinesische Suntech Power haben dagegen überproportional zugelegt und sogar ihre eigenen Prognosen übertroffen.

Quelle: Photon Magazin 03/2007



# Marktanteile der Photovoltaik Technologien

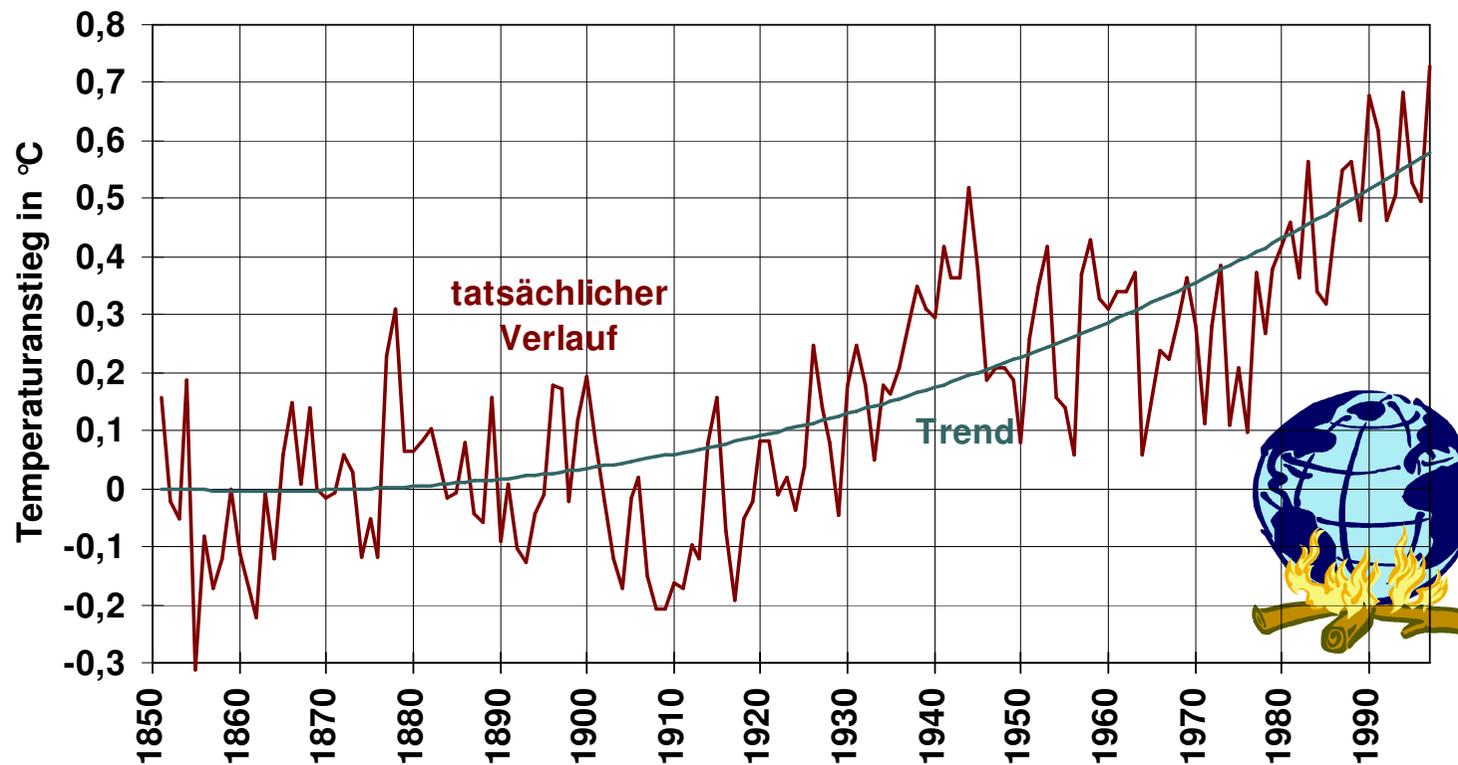


Quelle: Photon Magazin 03/2007



# 1.3 Klimawandel

## Anstieg der mittleren globalen bodennahen Durchschnittstemperatur



Daten: Max-Planck-Institut für Meteorologie

Quelle: V. Quaschnig

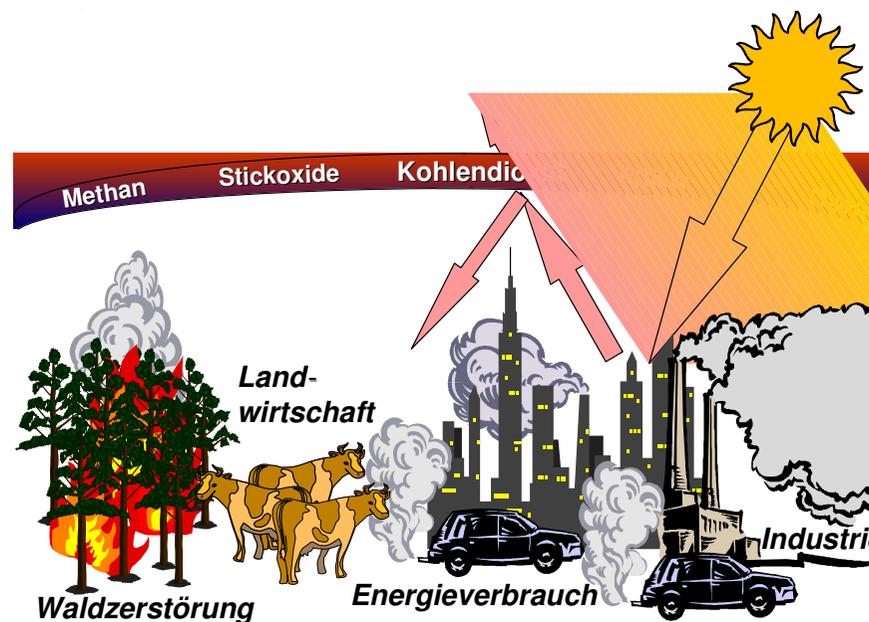


# Treibhausgase

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

Treibhausgas	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	O <sub>3</sub>	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)	

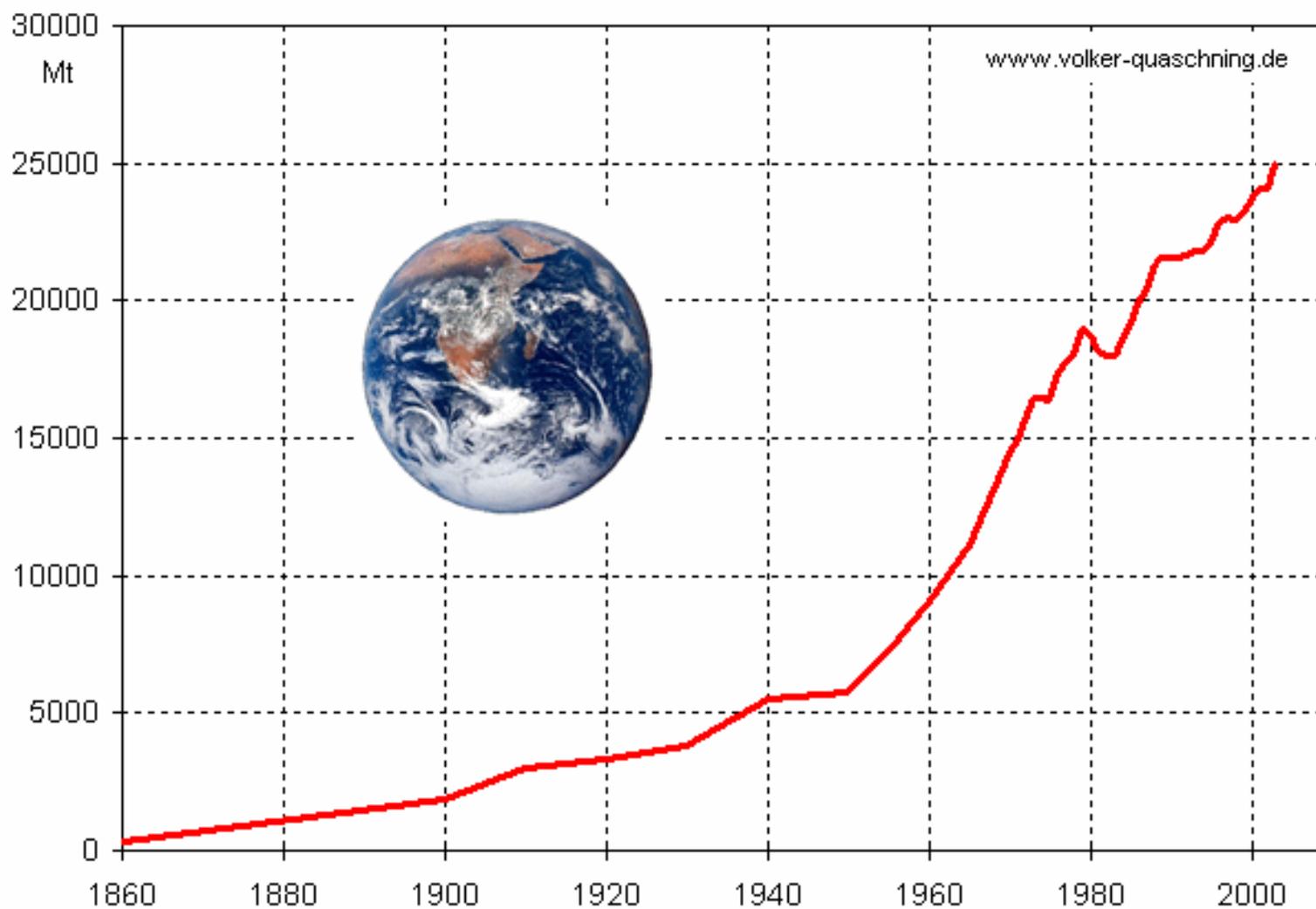
Quelle: V. Quaschnig



Gratik: 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 <sub>2</sub> -Äquivalente; ohne Landnutzungs- änderung 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