

# I. Einleitung

---

## I.0 Allgemeine Informationen:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heering/Prof. Dr. rer. nat Uli Lemmer

Lichttechnisches Institut, Geb. 30.34, Raum 223

Tel: 0721-608-2531

E-Mail: [uli.lemmer@lti.uni-karlsruhe.de](mailto:uli.lemmer@lti.uni-karlsruhe.de),

[wolfgang.heering@lti.uni-karlsruhe.de](mailto:wolfgang.heering@lti.uni-karlsruhe.de)

URL: [www.lti.uni-karlsruhe.de](http://www.lti.uni-karlsruhe.de)

Folien+“Skript“ (  $\geq$  Vorlesungsfolien): als .pdf-File von der LTI-Homepage herunterzuladen

Prüfung: mündl., Termin nach Vereinbarung

Vorkenntnisse: Quantenmechanik/Halbleiterbauelemente/  
Thermodynamik hilfreich

# I.1: Empfohlene Literatur

---

## Empfohlene Bücher:

Adolf Goetzberger, Bernhard Voß, Joachim Knobloch,  
Sonnenenergie, Photovoltaik

Martin A. Green: „Solar Cells: Operating Principles, Technology, and  
System Applications“

Volker Quaschnig , „Regenerative Energiesysteme“, m. CD-ROM

M. Kaltschmitt, A. Wiese, W. Streicher (Hrsg.), „Erneuerbare  
Energien“

....

... Links auf der LTI-Homepage

# Vorlesung Solarenergie: Terminplanung

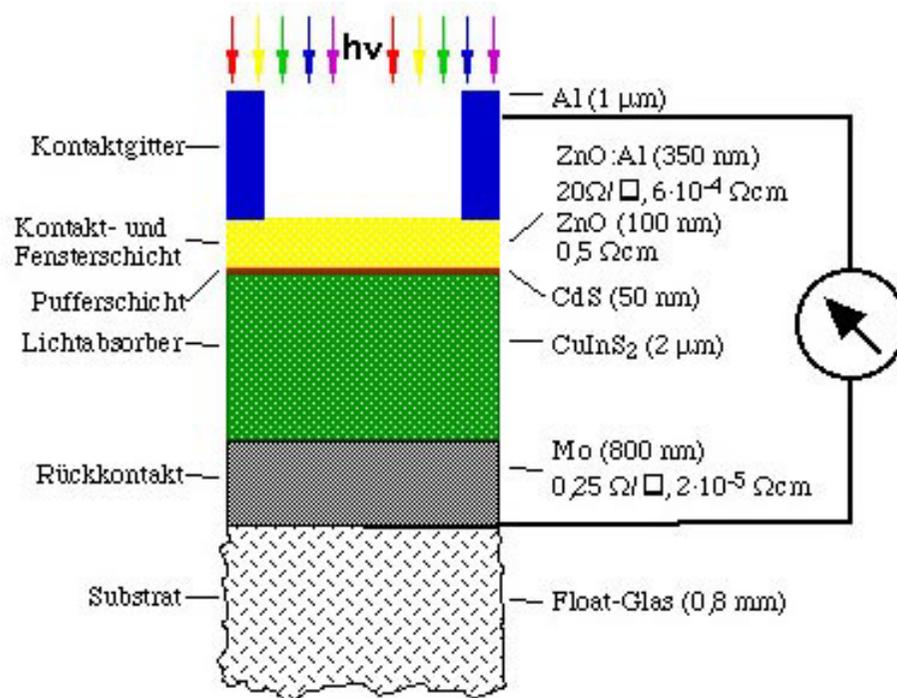
Vorläufige Terminplanung Vorlesung „Solarenergie“ WS 2005/2006

Stand: 25.10.2005

Termin	Thema	Dozent
Di. 25.10.	Wirtschaftliche Aspekte/Energiequelle Sonne	Lemmer/Heering
Fr. 04.11.	Halbleiterphysikalische Grundlagen photovoltaischer Materialien	Lemmer
Di. 01.11.	Allerheiligen	-
Di. 08.11.	Symposium Automobile Displaytechnik	-
Fr. 11.11.	Kristalline pn-Solarzellen	Heering
Di. 15.11.	Elektrische Eigenschaften	Heering
Di. 22.11.	Optimierung kristalliner Solarzellen	Lemmer
Fr. 25.11.	Technologie kristalliner Solarzellen	Lemmer
Di. 29.11.	Anorganische Dünnschichtsolarmzellen	Lemmer
Di. 6.12.	Organische Dünnschichtsolarmzellen	Lemmer
Fr. 9.12.	Third generation Photovoltaics	Lemmer
Di. 13.12.	Photovoltaische Systeme I	Heering
Fr. 16.12.	Photovoltaische Systeme II	Heering
Di. 20.12.	Solarkollektoren	Heering
	Weihnachtsferien	
Di. 10.01.	Passive Sonnenenergienutzung	Heering
Di. 17.01.	Solarthermische Kraftwerke I	Lemmer
Fr. 20.01.	Energiespeiche/Solarchemie	Heering
Di. 24.01.	Kostenrechnungen zu Solaranlagen	Heering
Di. 31.01.	Energieszenarien	Lemmer
Anfang Februar	Exkursion	Heering/Lemmer

# I.3: Impressionen der Vorlesung: Solarzellen

## Photovoltaik- Was ist eine Solarzelle ?



Licht wird von einem Halbleiter absorbiert

Erzeugung von mobilen Ladungsträgern

Trennung von Ladungsträgern

Elektrische Spannung an Kontakten

Stromfluß im externen Stromkreis

# Solarthermische Kraftwerke: Parabolrinnen

Die Stromerzeugung in solarthermischen Kraftwerken ist im Prinzip billiger und auch schon im grösseren Massstab realisiert.

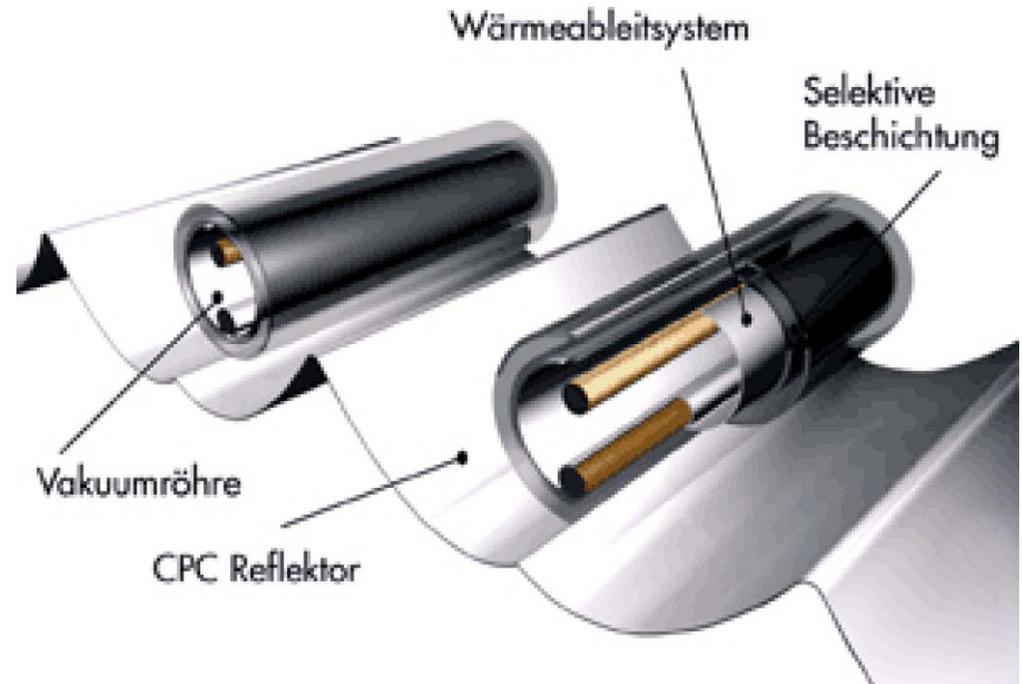


# Solarthermische Kraftwerke: Solarturm

Höchste Wirkungsgrade und niedrigste Kosten sind in Solarturmkraftwerken zu erwarten.



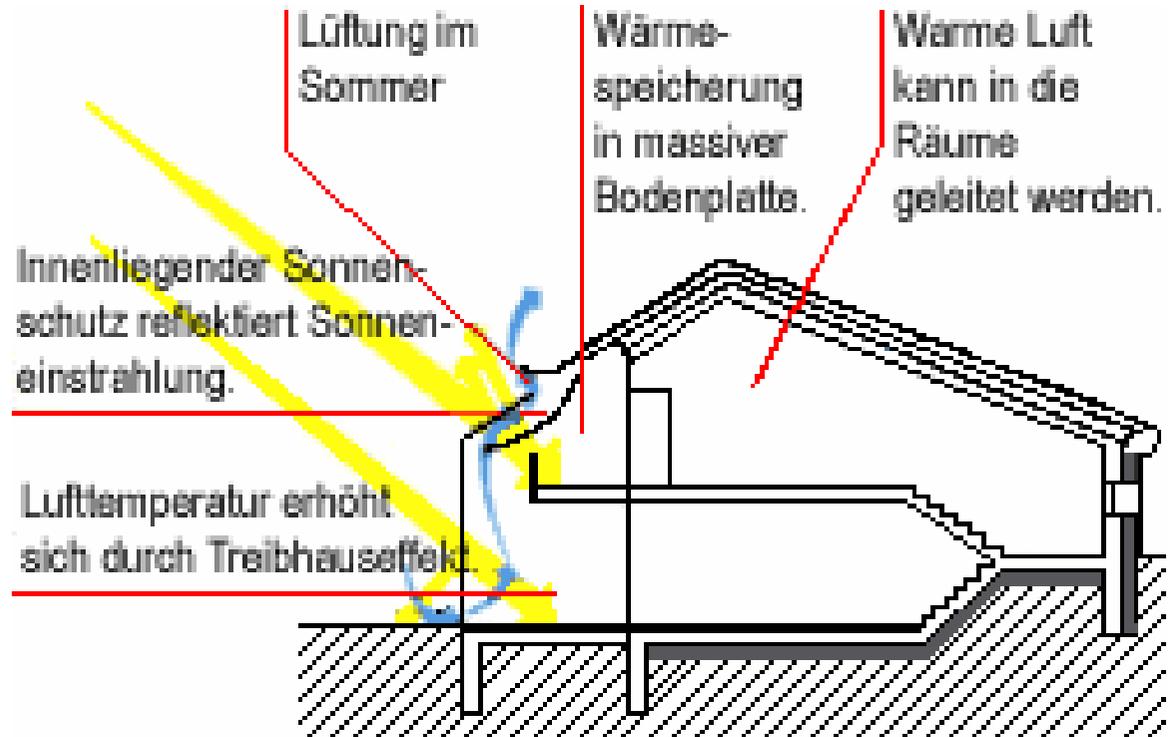
# Solarkollektoren: CPC-Vakuumröhrenkollektor



Solarkollektoren zur Warmwassergewinnung sind relativ gut etablierte Systeme und zudem ausgefeilte optische und thermodynamische Systeme.

# Passive Solarenergienutzung

Passive Solarenergienutzung ist die direkteste Form einer nachhaltigen Energieversorgung und hat noch riesige Potentiale.



# I.4 Wirtschaftliche Aspekte

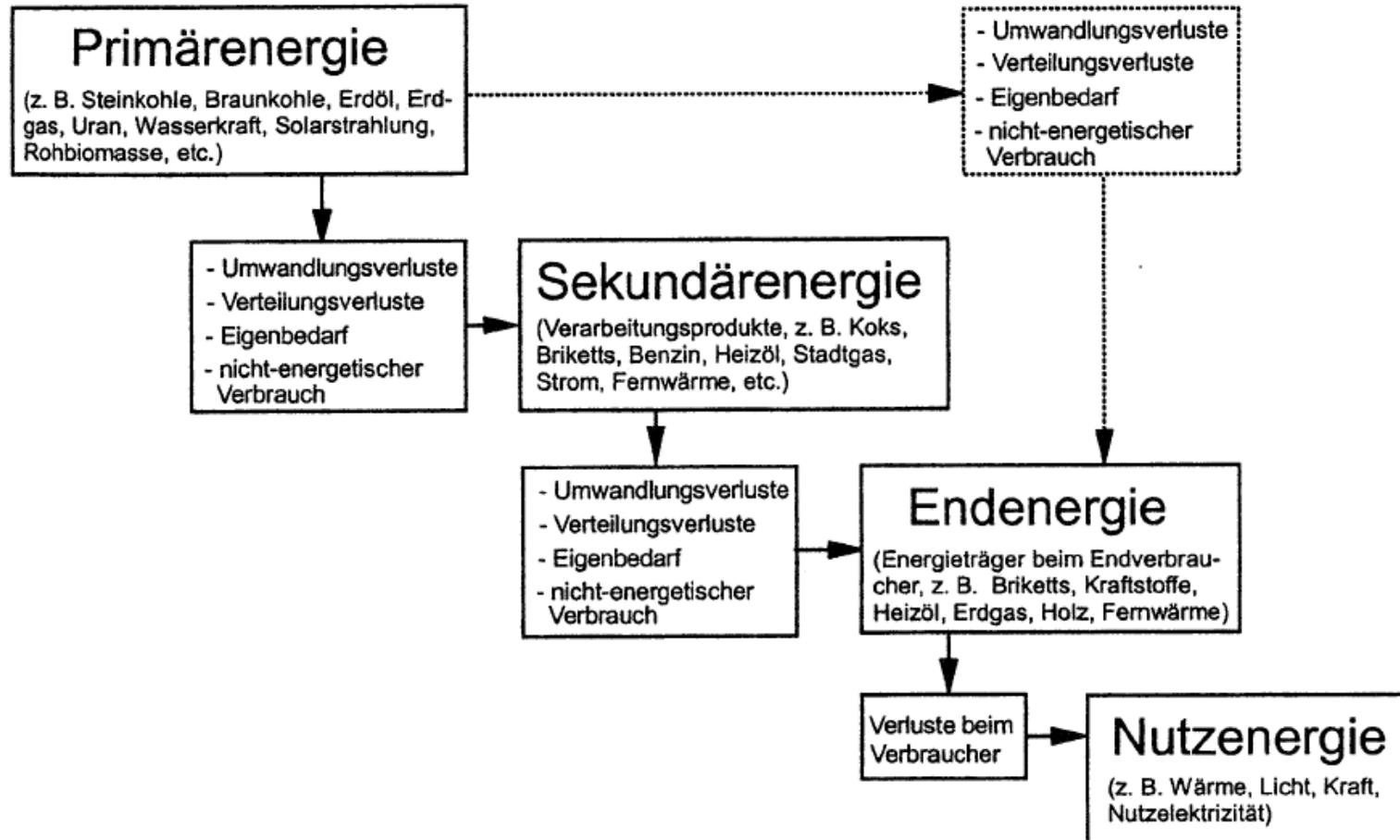


Abb. 1.1 Energiewandlungskette

# Primärenergieverbrauch nach Ländern und Regionen

	in Exajoule											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
<b>WELT</b>	360,8	365,3	366,8	371,1	373,8	382,7	394,4	397,6	399,3	406,9	416,9	
<b>AFRIKA</b>	16,7	17,3	17,4	17,6	18,0	18,7	19,2	19,8	20,2	20,7	21,3	
<b>NORDAMERIKA</b>	94,7	95,5	97,5	99,4	101,6	102,7	105,3	106,6	107,5	110,6	113,3	112,3
USA	80,7	81,4	83,0	84,6	86,3	87,4	89,6	90,6	91,4	94,1	96,5	95,5
<b>SÜDAMERIKA</b>	14,2	14,3	14,7	15,0	15,9	16,4	17,2	17,7	18,5	18,7	19,1	
<b>ASIEN</b>	100,8	103,9	108,2	113,4	118,7	125,2	130,8	133,5	133,2	136,2	141,4	
China	36,9	37,0	38,4	40,6	42,4	45,2	47,2	47,4	47,3	47,6	48,5	
Japan	18,3	18,7	19,0	19,2	20,1	20,7	21,3	21,6	21,4	21,6	21,9	21,8
<b>EUROPA</b>												
(OECD - Länder)	68,0	69,1	68,4	68,7	68,8	70,2	72,9	72,6	73,5	73,4	74,0	75,4
Deutschland	14,9	14,6	14,4	14,2	14,2	14,3	14,8	14,7	14,6	14,3	14,4	14,7
Frankreich	9,5	10,0	9,9	10,1	9,7	10,1	10,6	10,3	10,6	10,7	10,8	11,1
Großbritannien	8,9	9,2	9,1	9,2	9,5	9,3	9,8	9,5	9,6	9,7	9,7	9,8
Italien	6,4	6,6	6,5	6,5	6,4	6,7	6,7	6,8	7,0	7,1	7,2	7,2
Spanien	3,8	4,0	4,0	3,9	4,1	4,3	4,3	4,5	4,7	5,0	5,2	5,3
Niederlande	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2
<b>EUROPA</b>												
(Nicht-OECD-Länder)	5,9	5,0	4,5	4,3	4,1	4,3	4,6	4,4	4,3	3,9	4,0	
<b>Frühere SU</b>	56,4	56,2	52,0	48,3	42,2	40,6	39,7	38,1	37,4	38,1	38,6	
<b>PAZIFIK</b>	4,3	4,2	4,3	4,5	4,5	4,6	4,9	5,0	5,0	5,2	5,4	

Quelle der Tabellen:  
BMWA

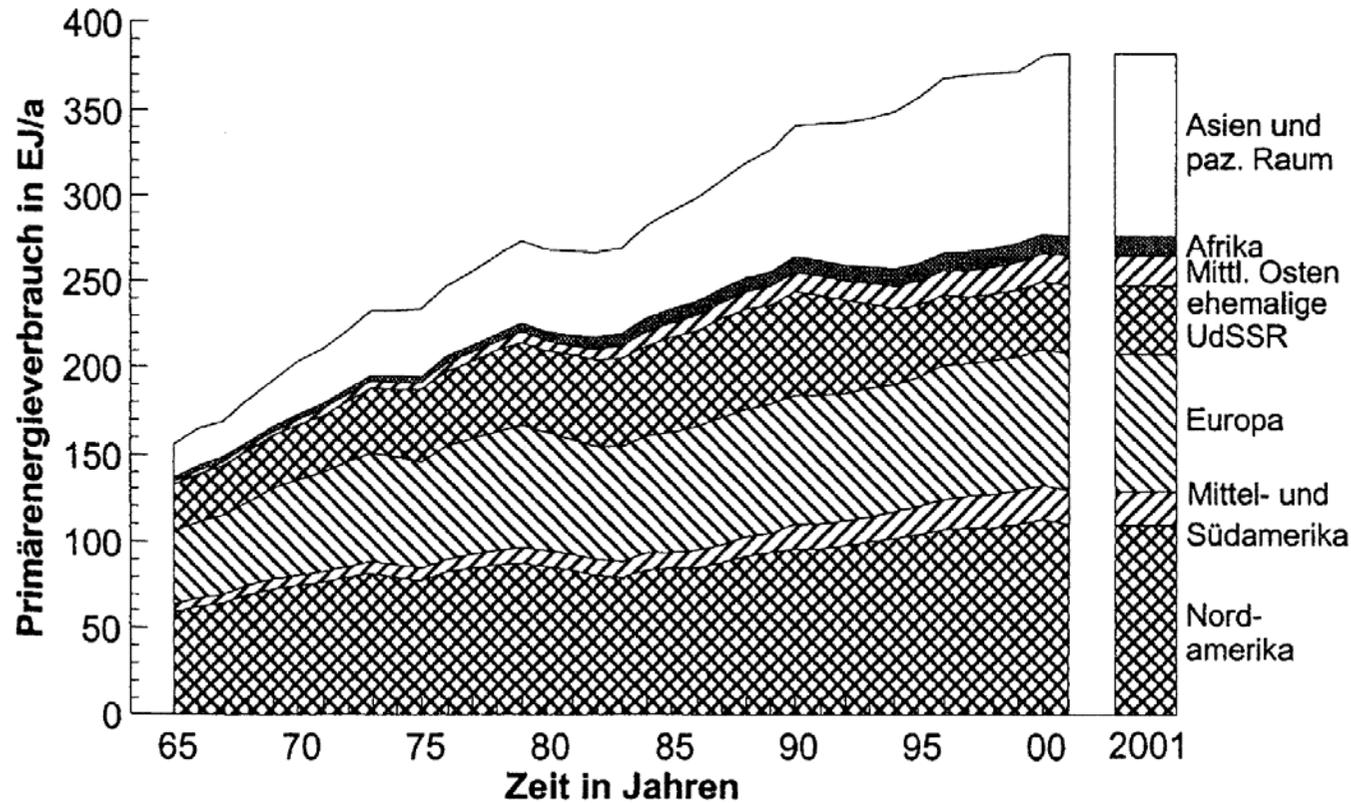
1 Exajoule  
=  $10^{18}$ J

Hinweis: Differenzen zu den Angaben für Deutschland in den Tabellen auf Seite 10 und 11 aufgrund unterschiedlicher Berechnungsverfahren.

Quelle: Internationale Energie Agentur 2003

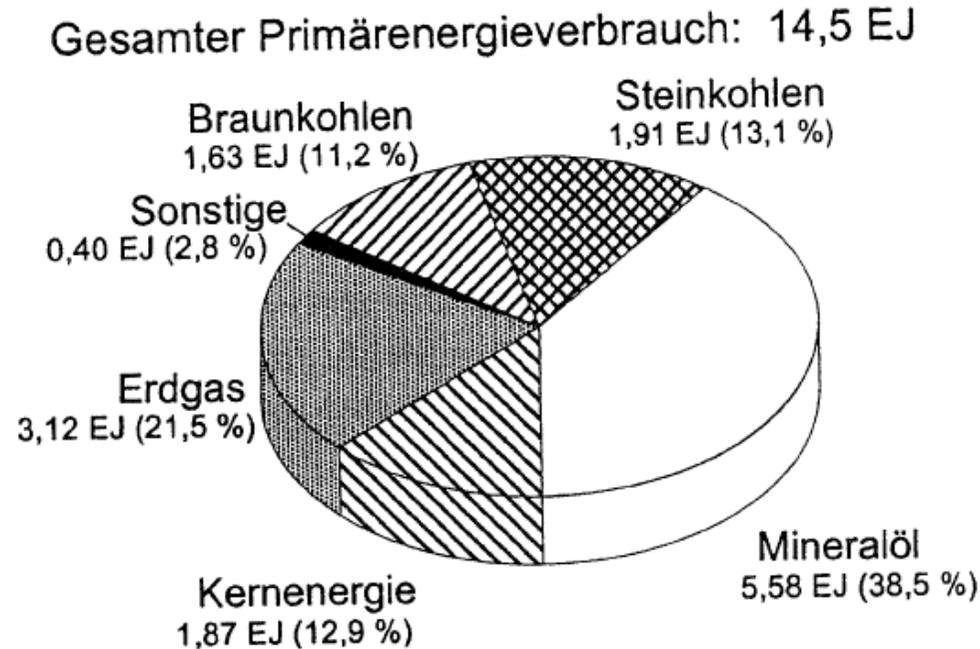
Energieeintrag der  
Sonne pro Jahr:  
 $5.6 \cdot 10^{23}$ J

# Primärenergieverbrauch: Welt



**Abb. 1.2** Entwicklung des weltweiten Verbrauchs an fossilen Primärenergieträgern sowie an Wasserkraft (Daten nach /1-3/)

# Primärenergieverbrauch: Deutschland



**Abb. 1.5** Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Deutschland im Jahr 2001 (Daten u. a. nach /1-27/)

Energieeinheiten:            1 PJ = 1 Petajoule =  $10^{15}$  J = 0.001 EJ  
                                     1 TWh = 1 Terawattstunde =  $10^9$  kWh = 3.6 PJ

1 Mio Tonnen Steinkohleeinheiten = 1 Mio t SKE  $\cong$  29.3 PJ

(Primärenergie = Endenergie + Verluste + Nichtenergetischer Verbrauch)

# Primärenergieverbrauch: Deutschland

## Primärenergieverbrauch nach Energieträgern

Deutschland

in Petajoule (PJ)

Energieträger	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Mineralöl	5.217	5.525	5.612	5.731	5.681	5.689	5.808	5.753	5.775	5.599	5.500	5.577	5.369
Steinkohle	2.306	2.330	2.196	2.139	2.140	2.060	2.090	2.065	2.059	1.967	2.008	1.928	1.885
Braunkohle	3.201	2.507	2.176	1.983	1.861	1.734	1.688	1.595	1.514	1.473	1.547	1.630	1.659
Naturgas <sup>1)</sup>	2.315	2.444	2.414	2.550	2.592	2.812	3.145	3.005	3.031	3.022	3.025	3.124	3.113
Kernenergie	1.668	1.609	1.733	1.675	1.650	1.682	1.764	1.859	1.764	1.855	1.849	1.873	1.800
Wasser- und Windkraft <sup>2)</sup>	58	53	62	64	67	83	73	77	80	91	106	111	132
Sonstige <sup>3)</sup>	141	143	126	167	195	209	178	259	297	316	319	346	361
<b>Gesamtverbrauch</b>	<b>14.905</b>	<b>14.610</b>	<b>14.319</b>	<b>14.309</b>	<b>14.185</b>	<b>14.269</b>	<b>14.746</b>	<b>14.614</b>	<b>14.521</b>	<b>14.323</b>	<b>14.354</b>	<b>14.590</b>	<b>14.319</b>

Energieeinheiten:                    1 PJ = 1 Petajoule =  $10^{15}$  J = 0.001 EJ

    1 TWh = 1 Terawattstunde =  $10^9$  kWh = 3.6 PJ

    1 Mio Tonnen Steinkohleeinheiten = 1 Mio t SKE  $\cong$  29.3 PJ

(Primärenergie = Endenergie + Verluste + Nichtenergetischer Verbrauch)

# Energieverbrauch pro Kopf

	in Gigajoule (GJ)											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
<b>AFRIKA</b>	26,7	27,0	26,5	26,2	26,2	26,5	26,5	26,7	26,5	26,6	26,8	
<b>NORDAMERIKA</b>	263,7	261,4	263,4	265,4	268,2	268,4	271,8	271,8	271,1	275,8	280,7	
USA	322,8	322,0	324,9	327,9	331,3	332,4	337,6	337,9	337,6	344,7	350,2	334,1
<b>SÜDAMERIKA</b>	40,1	39,9	40,3	40,2	42,1	42,6	44,1	44,7	45,8	45,8	45,9	
<b>ASIEN</b>	35,3	33,7	34,6	35,7	36,8	38,2	39,3	39,6	38,9	39,2	40,2	
China	32,3	32,0	32,8	34,2	35,4	37,3	38,6	38,4	37,8	37,7	38,2	
Japan	147,9	150,8	153,2	154,1	161,2	165,2	169,2	171,0	169,2	170,4	172,9	171,4
<b>EUROPA</b>												
(OECD - Länder)	136,9	138,1	136,0	135,8	135,3	137,6	142,2	141,1	142,2	141,5	141,8	143,8
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
<b>EUROPA</b>												
(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	
<b>Frühere SU</b>	195,3	193,3	178,1	165,3	144,5	138,8	136,0	130,5	128,5	131,3	133,2	

In D also im Schnitt ein andauernder Verbrauch von

$$\frac{178,5 \cdot 10^9 \text{ J}}{365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} \approx 5660 \text{ W}$$

# Endenergieverbrauch nach Energieträgern

Deutschland

in Petajoule (PJ)

Energieträger	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Steinkohlen	571	532	483	428	446	455	447	460	390	393	410	382
Braunkohlen	975	555	353	295	221	178	165	130	104	94	80	73
Kraftstoffe <sup>1)</sup>	2.533	2.548	2.618	2.693	2.660	2.711	2.704	2.725	2.777	2.865	2.823	2.742
Heizöl schwer	190	187	181	180	177	157	150	149	139	124	105	201
Heizöl leicht	1.256	1.500	1.484	1.535	1.461	1.436	1.589	1.496	1.427	1.222	1.174	1.233
Gase <sup>2)</sup>	1.870	2.008	2.005	2.108	2.124	2.260	2.502	2.401	2.415	2.404	2.382	2.520
Strom	1.638	1.615	1.602	1.587	1.605	1.648	1.674	1.690	1.709	1.718	1.730	1.741
Fernwärme	383	378	356	355	349	366	344	309	310	290	334	345
Sonstige <sup>3)</sup>	54	44	44	54	68	110	111	175	186	192	204	219
<b>Insgesamt</b>	<b>9.472</b>	<b>9.366</b>	<b>9.127</b>	<b>9.234</b>	<b>9.110</b>	<b>9.322</b>	<b>9.686</b>	<b>9.535</b>	<b>9.458</b>	<b>9.300</b>	<b>9.241</b>	<b>9.456</b>

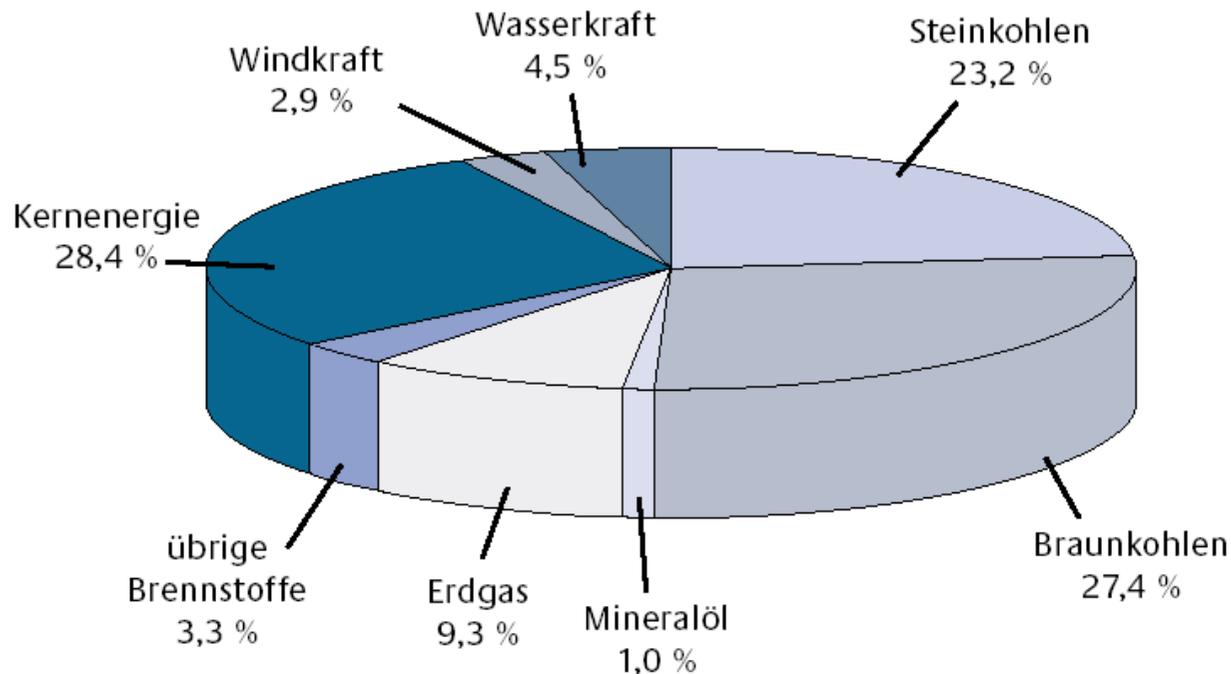
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
<b>Energieverbrauch je Kopf der Bevölkerung</b>													
- Primärenergieverbrauch (Gigajoule)	188	183	178	176	174	175	180	178	177	174	175	177	174
- Bruttostromverbrauch (kWh)		6.736	6.598	6.487	6.498	6.609	6.651	6.670	6.739	6.731	6.905	6.876	

Durchschnittlicher andauernder Stromverbrauch v.

$$\frac{6876kWh}{365 \cdot 24h} = 785W$$

# I.4 Stromerzeugung: Deutschland

Bruttostromerzeugung nach Energieträgern  
2002



Insgesamt: 581.6 TWh  $\cong$  2094 PJ (in 2002)

### Beitrag erneuerbarer Energien zum Primärenergieverbrauch (Angaben in Petajoule)

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Wasserkraft	77	66	66	63	71	75	85	86
Wind	6	7	11	17	20	34	38	60
Photovoltaik			0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	1
Holz, Stroh u. a. feste Stoffe	124	125	185	205	209	191	182	182
Klärschlamm, Müll, Deponiegas	45	46	54	65	73	55	56	57
Klärgas u. sonstige Biomasse	15	18	20	21	23	16	14	11
sonstige Erneuerbare <sup>1)</sup>	7	7	7	8	8	9	22	11
<b>Insgesamt</b>	<b>274</b>	<b>270</b>	<b>344</b>	<b>379</b>	<b>403</b>	<b>380</b>	<b>398</b>	<b>408</b>
prozentualer Anteil am Primärenergieverbrauch	1,9	1,8	2,4	2,6	2,4	2,6	2,7	2,8
prozentualer Anteil an der Stromerzeugung	4,8	4,3	4,5	4,8	5,4	6,7	6,5	7,6

in 2004: Anteil der Photovoltaik an der Stromerzeugung  $\approx 0.098 \%$

## Elektrizitätserzeugung regenerativer Kraftwerke in TWh (Mrd. kWh)

Quelle: V. Quaschnig

Jahr	Wasserkraft	Windkraft	Biomasse	Solarthermie	Photovoltaik	Geothermie
1990	2.167,4 <sup>a)</sup>			0,509 <sup>a)</sup>		
1991	2.209,7 <sup>a)</sup>			0,601 <sup>a)</sup>		
1992	2.207,0 <sup>a)</sup>			0,576 <sup>a)</sup>		
1993	2.338,7 <sup>a)</sup>			0,694 <sup>a)</sup>	0,2 <sup>c)</sup>	
1994	2.355,7 <sup>a)</sup>	6,3 <sup>c)</sup>		0,639 <sup>a)</sup>	0,2 <sup>c)</sup>	
1995	2.474,7 <sup>a)</sup>	8,0 <sup>c)</sup>		0,639 <sup>a)</sup>	0,3 <sup>c)</sup>	
1996	2.512,0 <sup>a)</sup>	9,7 <sup>c)</sup>		0,701 <sup>a)</sup>	0,4 <sup>c)</sup>	42,1 <sup>b)</sup>
1997	2.572,1 <sup>a)</sup>	12,7 <sup>c)</sup>		0,693 <sup>a)</sup>	0,5 <sup>c)</sup>	
1998	2.566,9 <sup>a)</sup>	16,4 <sup>c)</sup>		0,674 <sup>a)</sup>	0,6 <sup>c)</sup>	
1999	2.614,8 <sup>a)</sup>	21,4 <sup>c)</sup>		0,632 <sup>a)</sup>	0,7 <sup>c)</sup>	
2000	2.625,8 <sup>a)</sup>	31,4 <sup>c)</sup>			0,9 <sup>c)</sup>	49,6 <sup>c)</sup>
2001	2.570,6 <sup>a)</sup>	38,2 <sup>c)</sup>	140 <sup>c)</sup>		1,2 <sup>c)</sup>	
2002		50,3 <sup>c)</sup>			1,6 <sup>c)</sup>	
2003						

# Das Problem: Stromgestehungskosten

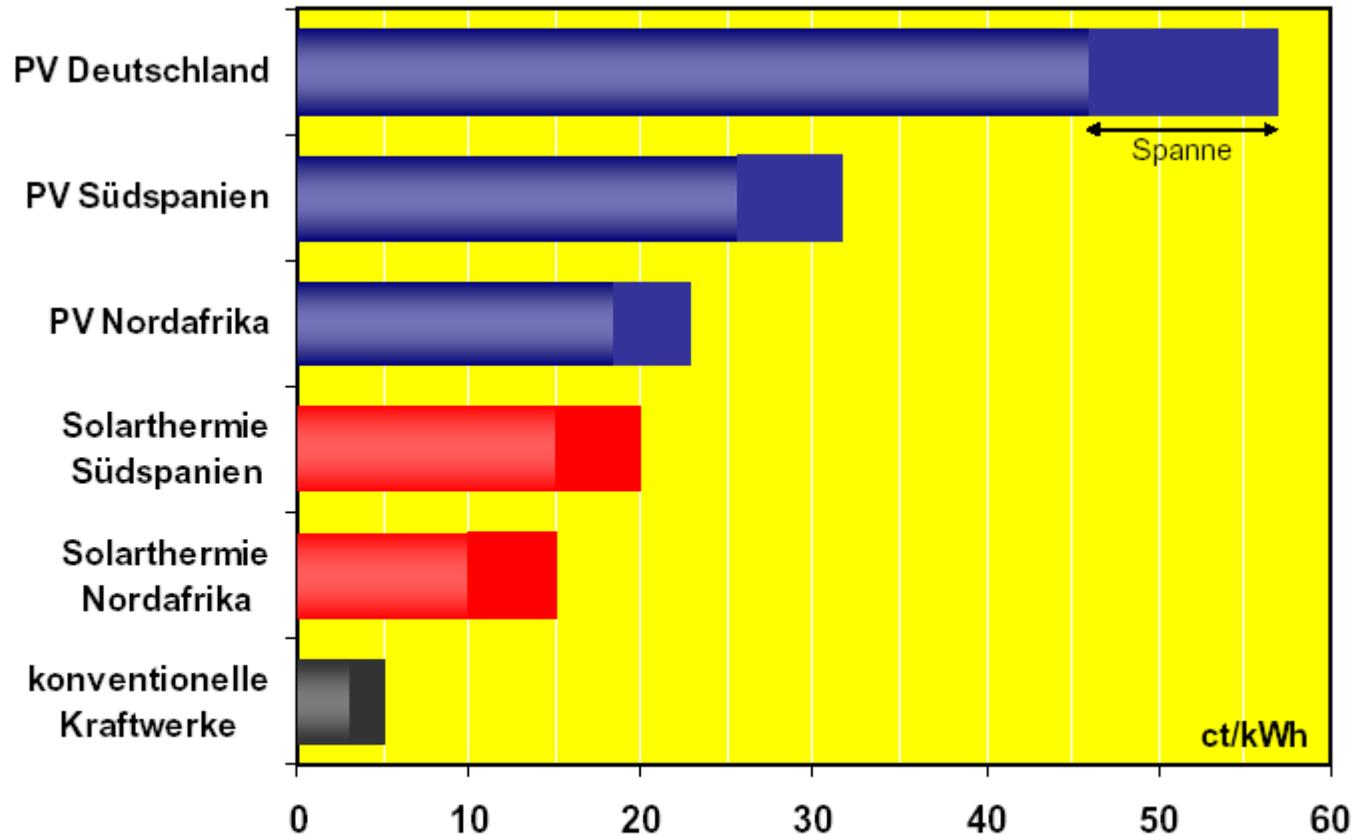
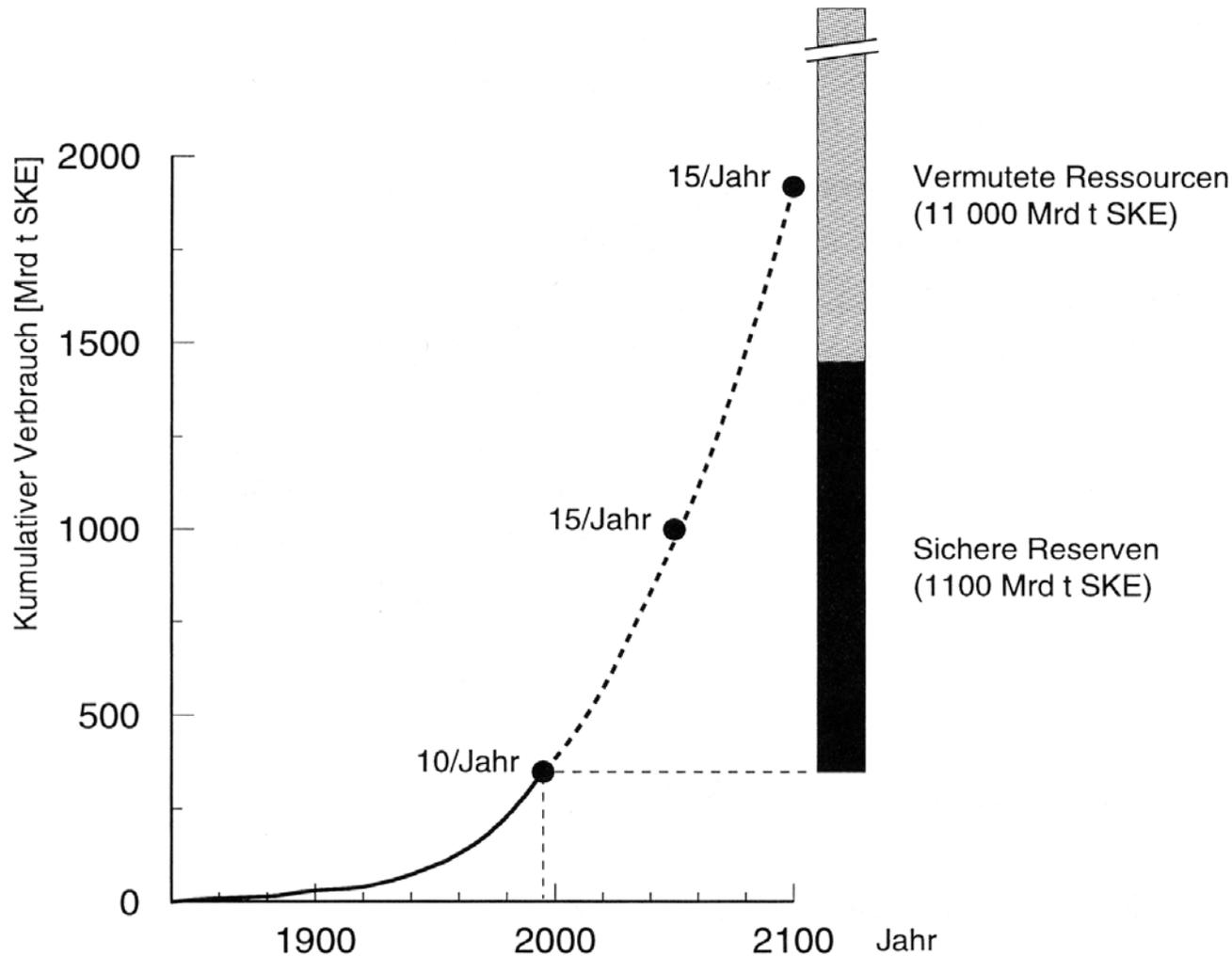


Bild 3: Stromgestehungskosten der Photovoltaik, solarthermischer und fossiler Kraftwerke bei heutigem Stand der Technik

# Warum mit Solarenergie beschäftigen ?



- Beschränkte Ressourcen an fossilen Brennstoffen

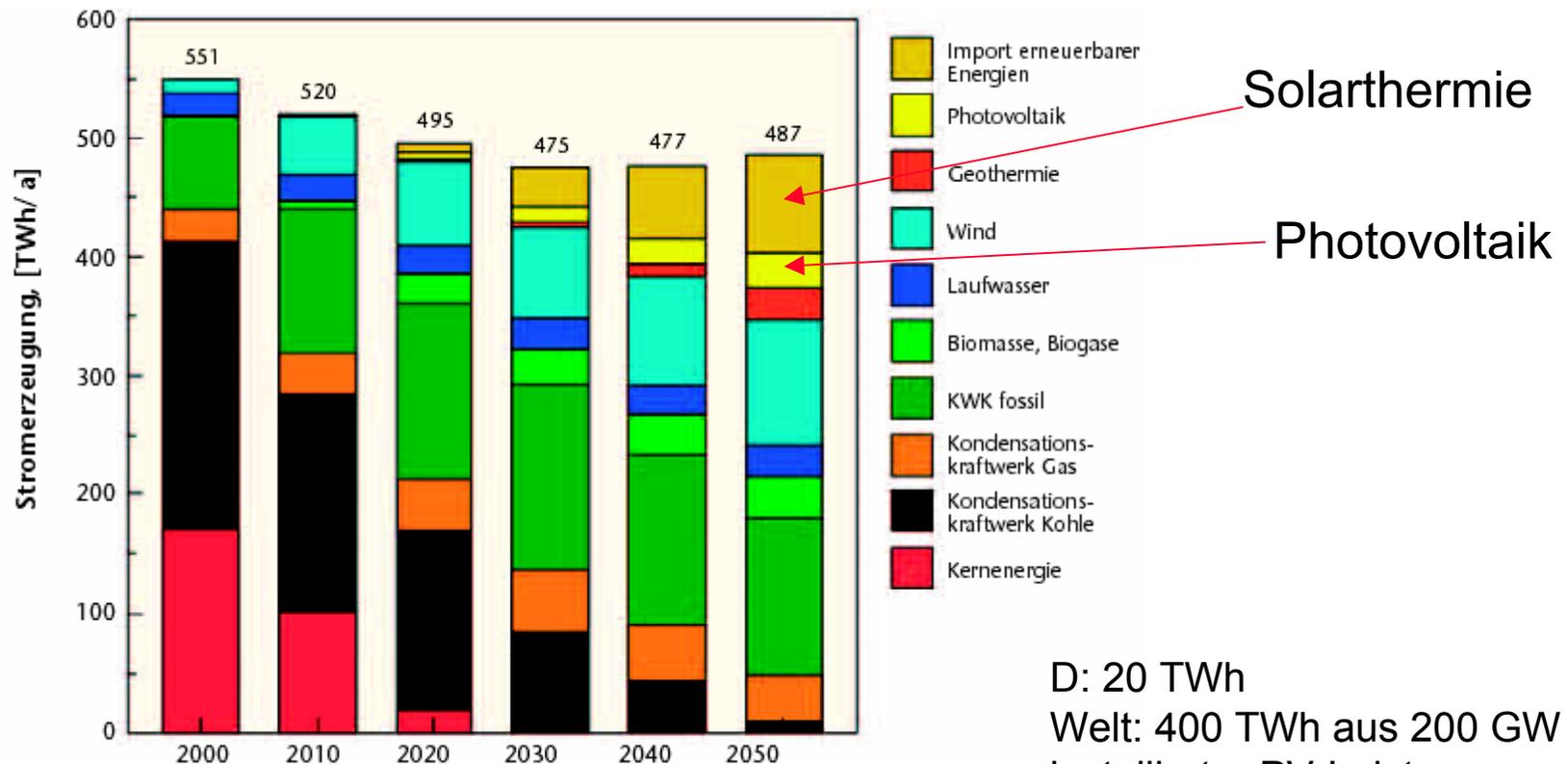
- Ausstieg aus der Kernenergie

- Treibhauseffekt

....

# Warum mit Solarstrom beschäftigen ?

Alle Szenarien für eine zukünftige Stromversorgung sehen einen wichtigen Beitrag der Solarenergie vor:

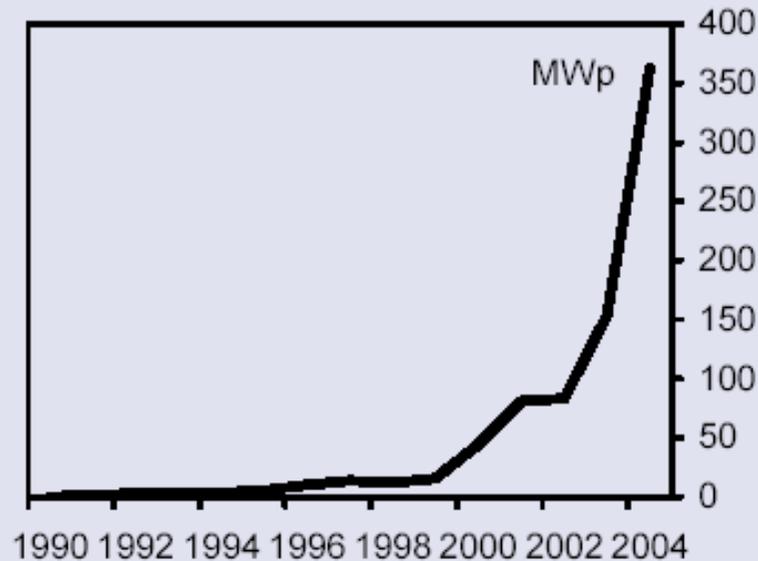


D: 20 TWh  
Welt: 400 TWh aus 200 GW  
installierter PV-Leistung  
( $\approx 2000 \text{ km}^2$  Solarzellenfläche)

# Jährlich installierte PV-Peakleistung

## Marktentwicklung Photovoltaik in Deutschland

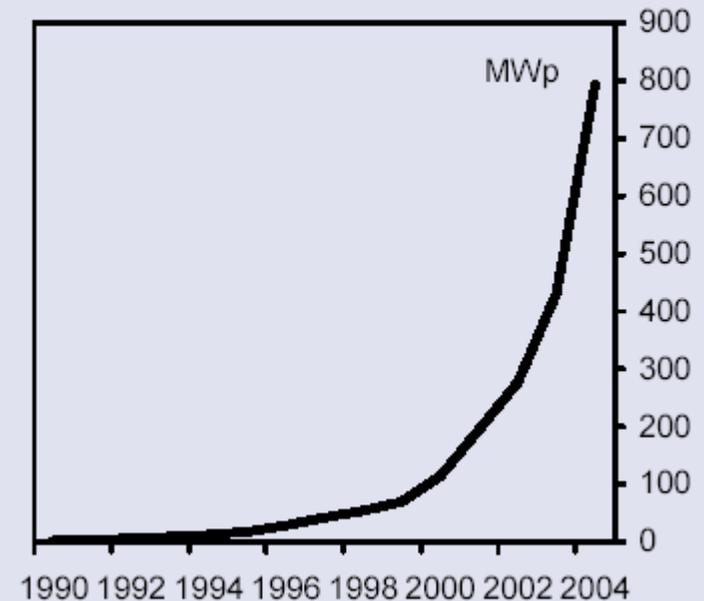
Jährlich installierte Leistung



Quellen: IEA, BSI

## Marktentwicklung Photovoltaik in Deutschland

Gesamte installierte Leistung (Bestand)



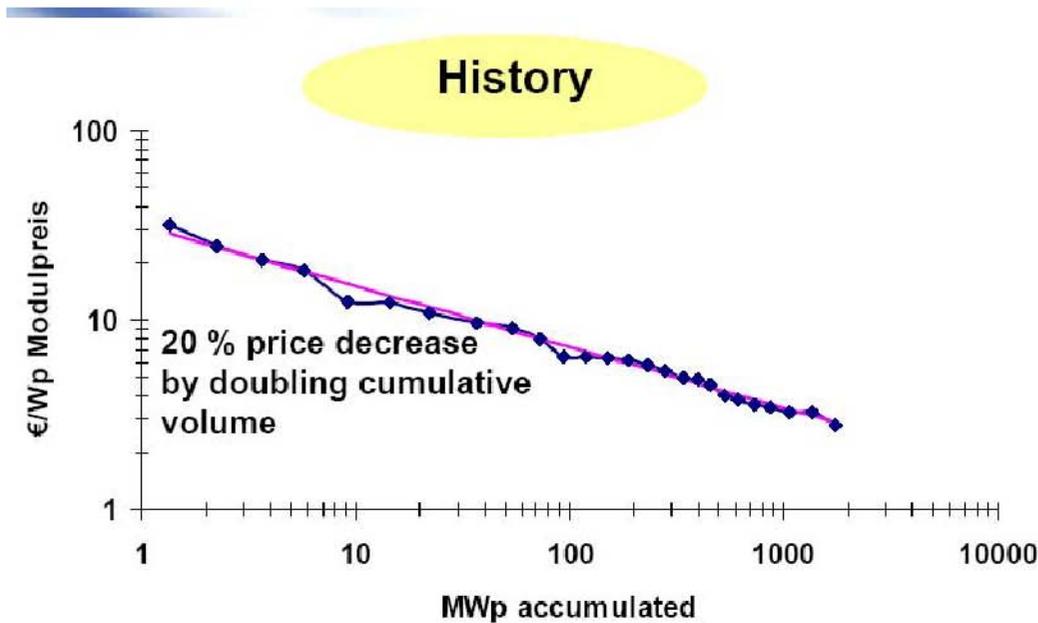
Quellen: IEA, BSI

- PV ist ein echter Wachstumsmarkt
- immer größerer Anteil netzgekoppelter Anlagen

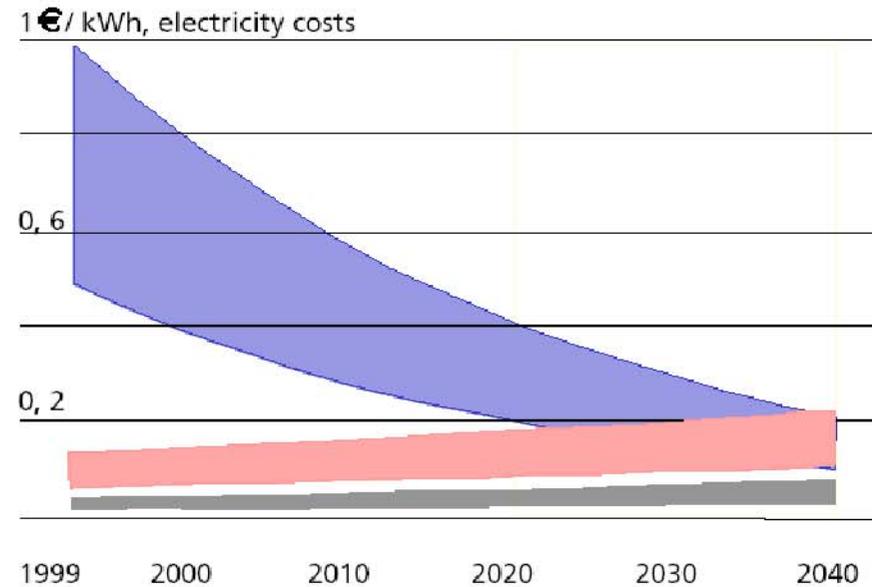


# Solarzellen: Kosten

## Vergangenheit: Modulkosten



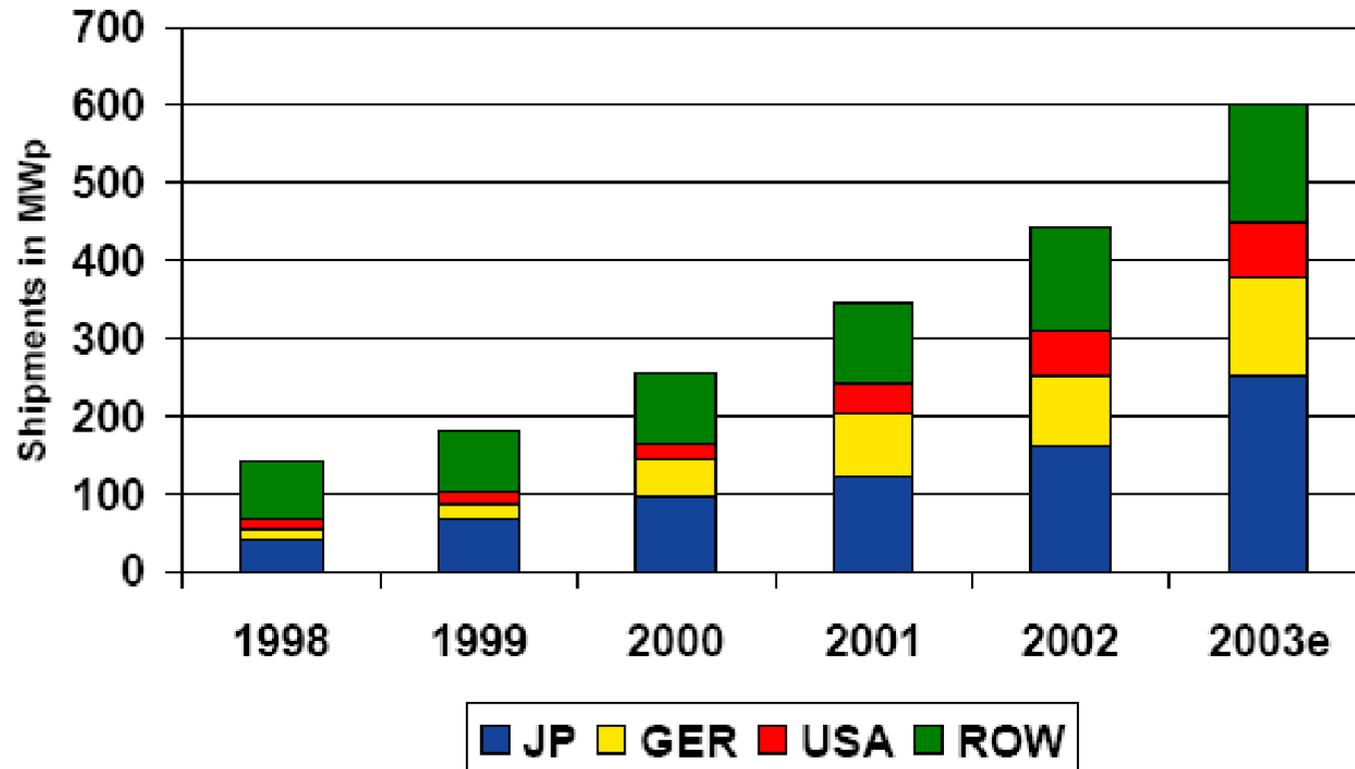
## Zukunft: Stromgestehungskosten



Quelle: RWE Schott Solar

# PV in Deutschland

## Historical Market Growth of the Solar Electricity Industry by region



Source: PV News & Strategies Unlimited

Follen Bangkok, ppt / 22.01.2004 / Rapp

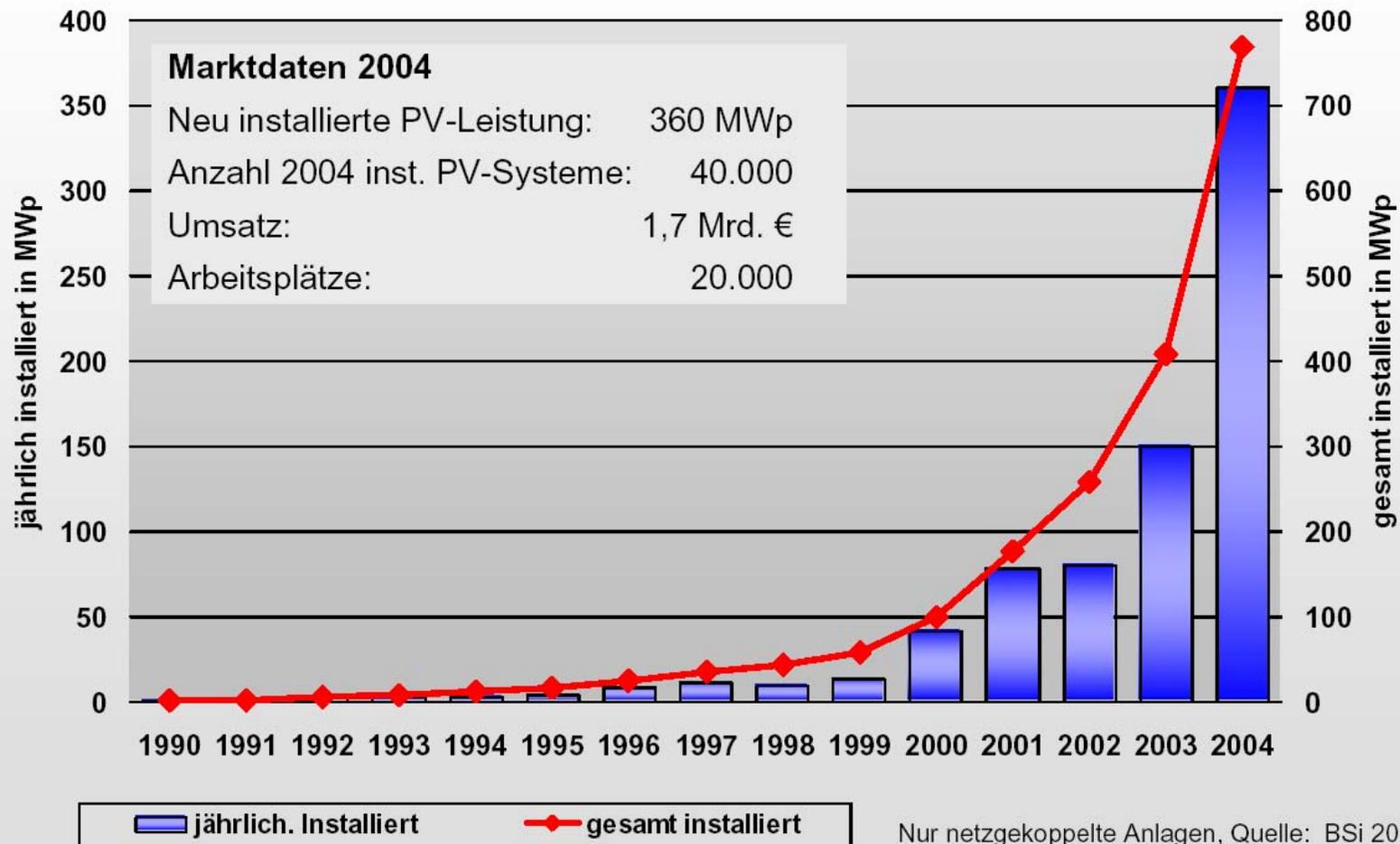
© RWE SCHOTT Solar GmbH

ROW: Rest of the world

# PV in Deutschland



## Marktentwicklung Photovoltaik in Deutschland: Jährlich und gesamt installierte Photovoltaik-Leistung

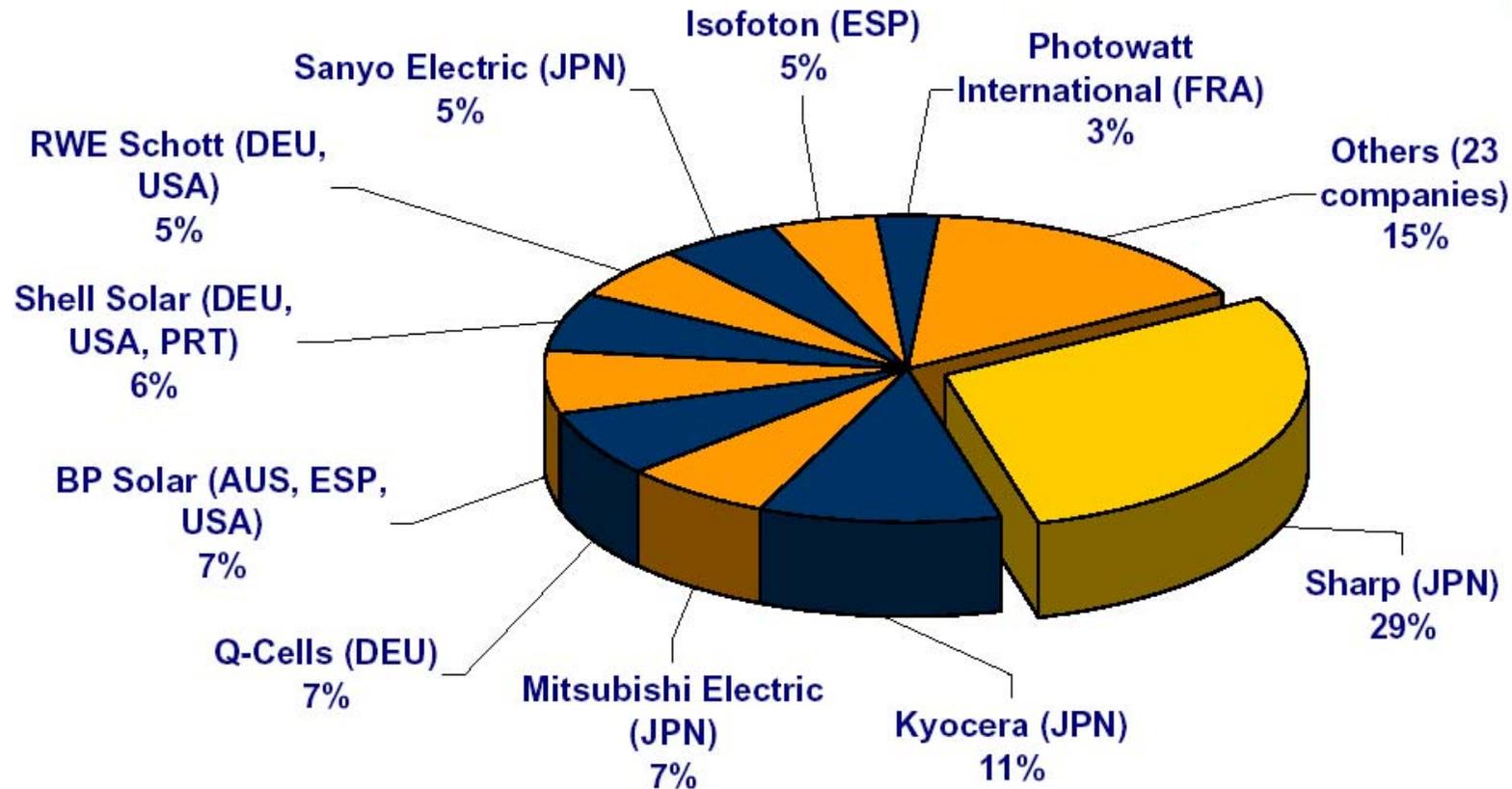


# PV in Deutschland

**Figure 6: Share of PV cell production by company in 2004 (%)**

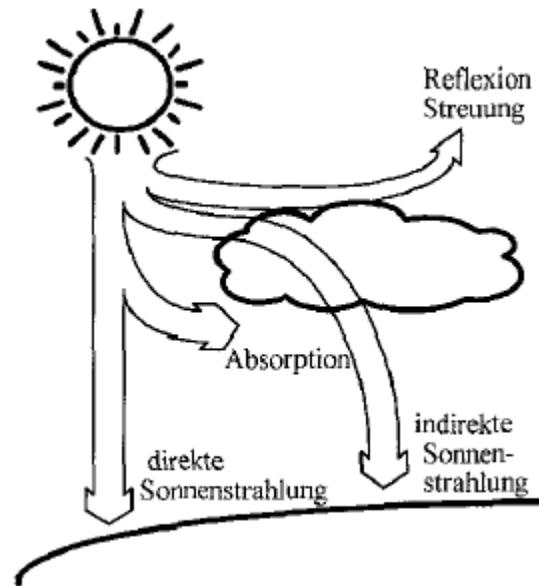
Graph downloaded from the IEA-PVPS website, <http://www.iea-pvps.org>

Data may be reproduced with acknowledgement to the IEA Photovoltaic Power Systems Programme



# II. Die Sonne als Energiequelle

## Globalstrahlung als natürliche Strahlungsquelle



### Globalstrahlung

- Summe aus direkter Sonnenstrahlung und Himmelsstrahlung

### Himmelsstrahlung

- entsteht durch Streuung der direkten Sonnenstrahlung an den Luftmolekülen.

# Sonne

---

- 1390 000 km Durchmesser
- mittlere Massendichte von  $1,41 \text{ g/cm}^3$
- mittlere Entfernung von der Erde etwa 108 Sonnendurchmesser (8,3 Lichtminuten)

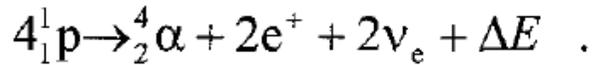
## Sonneninneres:

- heisses Plasma ionisierter Atome
- Bei Temperaturen über  $20 \cdot 10^6 \text{ K}$  **Fusion von Wasserstoff – Energieträger**

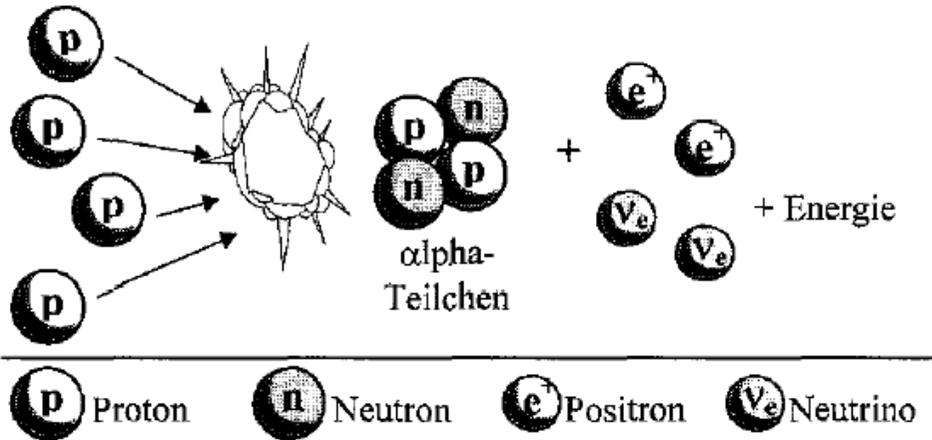
## Sonnenoberfläche:

- **Photosphäre**
  - 200 km dicke, gasförmige Schicht mit Sonnenflecken und Granulation
  - emittiert den Hauptanteil des beobachtbaren Sonnenlichts
- **Chromosphäre** (außen, mehrere tausend Kilometer dick)
  - besteht aus i.w. Wasserstoff und dünneren Gasen aus Ca, Fe, Na, O
  - Absorptionslinien (Fraunhofer Linien): 393, 397, 431, 486, 527, 589, 656, 687, 761 nm.
- **Sonnenkorona**
  - Linienhafte Emission hochionisierter Metallatome eines Plasmas von ca.  $2 \cdot 10^6 \text{ K}$

# Spezif. Ausstrahlung, Oberflächentemperatur



$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$



$$\frac{dM_S}{dt} = \Delta m \cdot \frac{dN_S}{dt} = 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$$

$$\Phi_S = \frac{dE_S}{dt} = \frac{dM_S}{dt} \cdot c^2 = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Massendefekt der Kernfusion setzt Energie frei, die als Strahlungsleistung auftritt.

$$\frac{\Phi_S}{A_S} = 63,11 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$$

Spezifische Ausstrahlung der Sonne mit Oberfläche  $A_S$

$$\frac{\Phi_S}{A_S} = \sigma_B \cdot T^4$$

Stefan-Boltzmann-Gesetz für Sonne als Schwarzer Körper

$$\Rightarrow T = 5777\text{K}$$

Oberflächentemperatur der Sonne – Abschätzung nach unten

# Sonnenspektrum

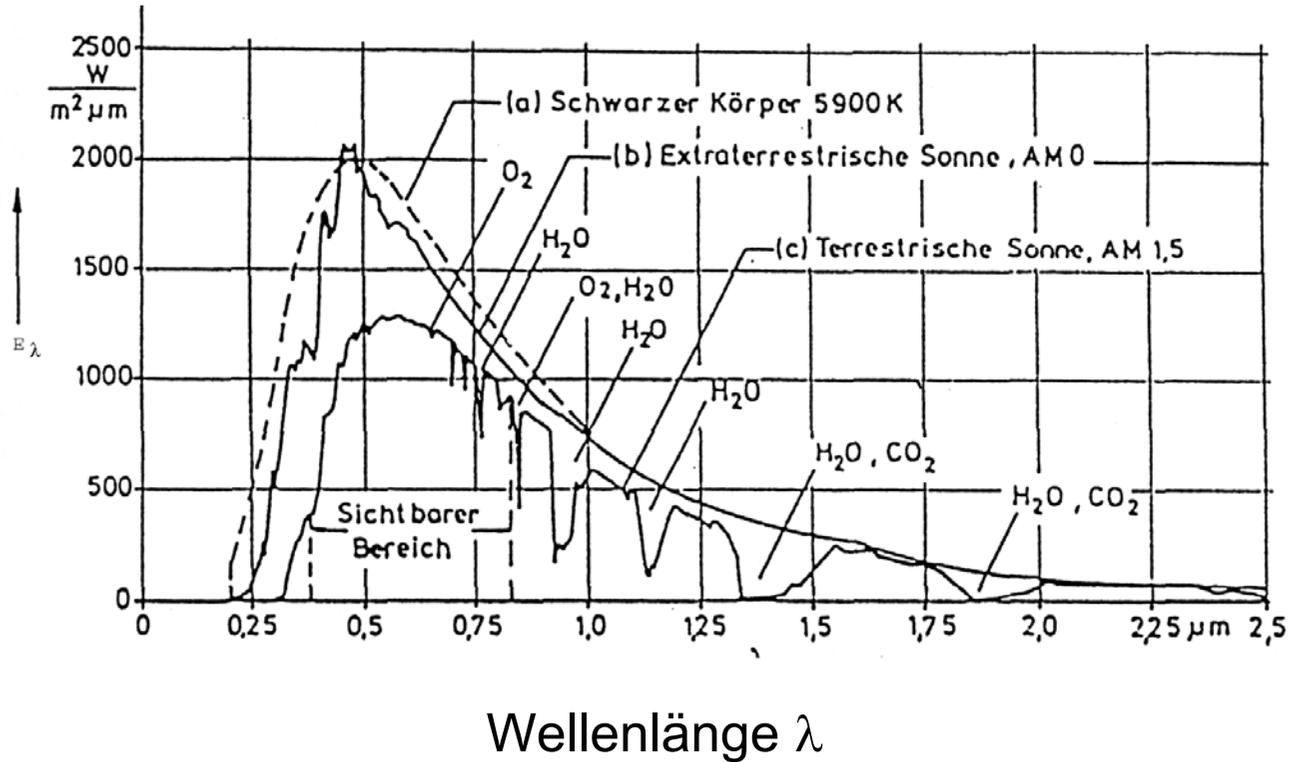
---

## Extraterrestrisches Sonnenspektrum:

- Kontinuierliches Spektrum mit Maximum bei 478 nm
- beschreibbar mit der Planck'schen Formel der spektralen Strahldichte eines Schwarzen Körpers der Temperatur  $T=5900\text{K}$ :

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/(kT\lambda)) - 1}$$

# Spektrale Bestrahlungsstärken $E_\lambda$



1. Schwarzer Körper von 5900 K
2. Extraterrestrische Sonnenstrahlung (AM=0) bei mittlerem Sonnenstand nach WMO
3. Terrestrische Sonne für AM=1,5

# Extraterrestrische Solarkonstante

---

Integriert man die spektrale Bestrahlungsstärke der extraterrestrischen Sonne über den gesamten Wellenlängenbereich, so erhält man die **extraterrestrische Solarkonstante**:

$$E_0 = 1367 \pm 7 \text{ W m}^{-2}$$

$$E_0 = \frac{\Phi_S}{4\pi \langle r_{SE}^2 \rangle}$$

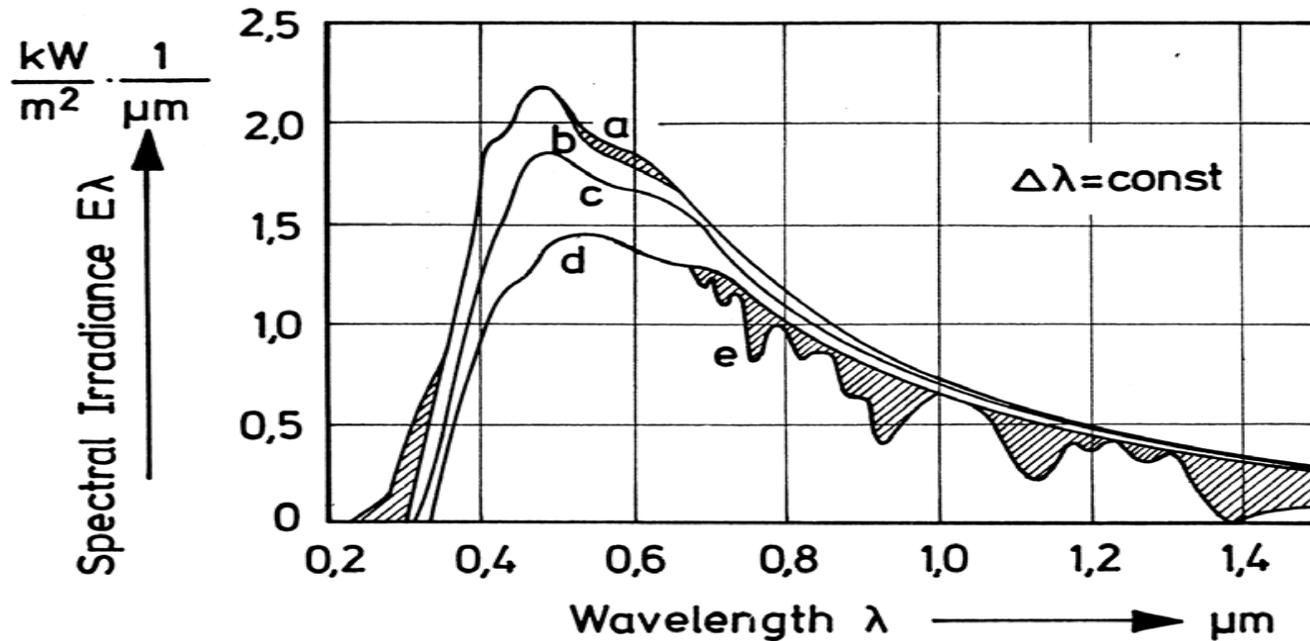
Mittelwert der Bestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre auf einer Fläche senkrecht zur Sonneneinstrahlung bei einer mittleren Entfernung  $r_{SE}$  zwischen Erde und Sonne.

# Absorption und Streuung in der Erdatmosphäre

Durchgang durch Erdatmosphäre führt zu Schwächung der Strahlung durch  
Absorption und Streuung:

- **Ozonschicht** ( $O_3$ ) in der Stratosphäre filtert Strahlung unter 300nm heraus.
- **Spurengase** ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ , Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Aerosole) in der Troposphäre **absorbieren** im Infraroten.
- **Rayleigh-Streuung** erfolgt i.w. an den Luftmolekülen (mit Durchmesser  $< \lambda$ ).  
Streuquerschnitt proportional zu  $\lambda^{-4}$   
→ Blaue Strahlung wird stärker herausgestreut als rote
- **Mie-Streuung** an Staubteilchen und Verunreinigungen der Luft (Aerosolen) mit Durchmesser  $> \lambda$  - im Hochgebirge gering, stärker in Industriegebieten

# Absorption und Streuung direkter Sonnenstrahlung



## Spektrale Verteilung direkter Sonnenstrahlung nach verschiedenen Absorptions- und Streuprozessen

- a) extraterrestrische Sonnenstrahlung
- b) nach Absorption durch Ozon,
- c) nach Rayleigh-Streuung,
- d) nach Absorption und Streuung durch Aerosole,
- e) nach Absorption durch Wasserdampf und Sauerstoff  $\Rightarrow$  direkte Sonnenstrahlung am Erdboden

# Einfallswinkel der Sonnenstrahlung

$\gamma_S$  Sonnenhöhe

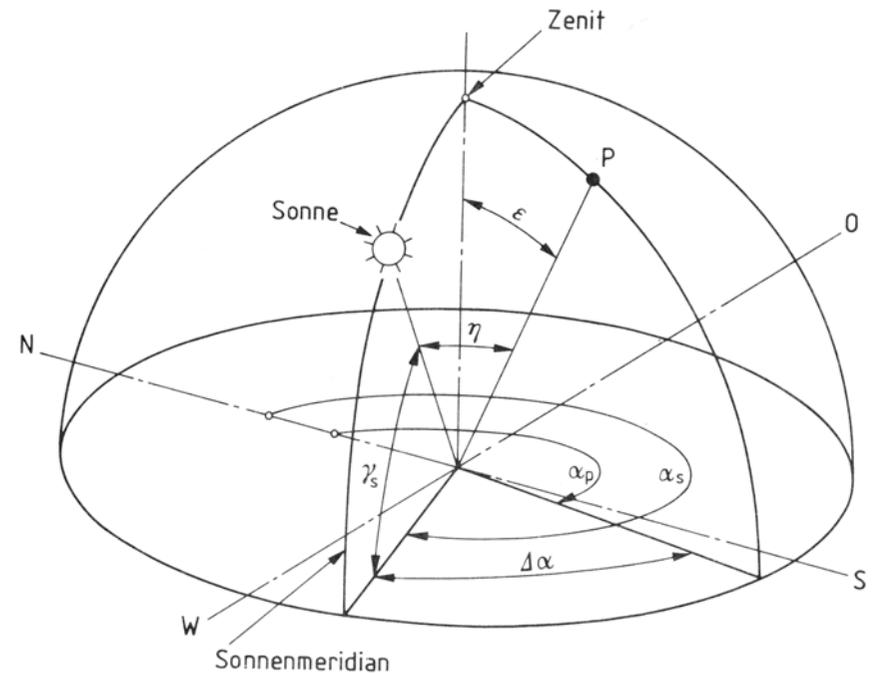
$\alpha_S$  Sonnenazimut

Wintersonnenwende am 21. Dezember:  
Sonnenstand senkrecht über  $23,5^\circ$  südlicher Breite

Sommersonnenwende am 21. Juni  
Sonnenstand senkrecht über  $23,5^\circ$  nördlicher Breite

Karlsruhe auf  $49^\circ$  nördlicher Breite  
 $49^\circ + 23,5^\circ = 72,5^\circ < 90^\circ - \gamma_S < 49^\circ - 23,5^\circ = 25,5^\circ$

Bei Frühlingsanfang am 21. März und Herbstanfang am 21. September, wenn die Sonne senkrecht über dem Äquator steht, ist der Einfallswinkel für Karlsruhe mittags  $49^\circ$  bzw. die Sonnenhöhe  $41^\circ$ .



Winkel zur Berechnung der  
Sonneneinstrahlung

# Air Mass und horizontale Bestrahlungsstärke

Maß der Gesamtextinktion ist der Linke-Trübungsfaktor  $T_L$ :

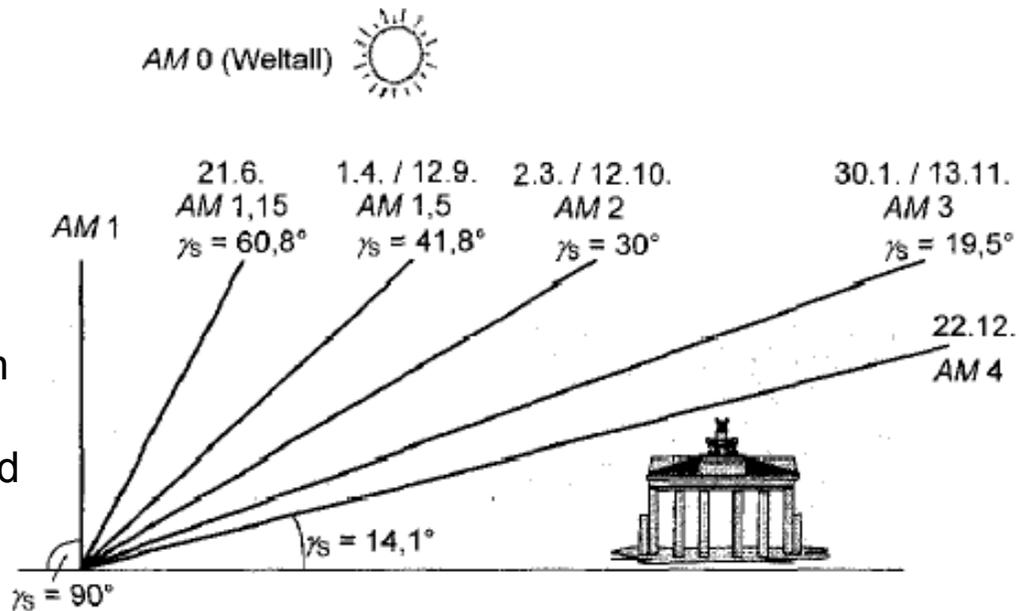
$$E_S = E_0 \sin(\gamma_S) \exp(-T_L \cdot \delta_R \cdot AM \cdot p / p_0) \quad \text{Horizontaleinstrahlung der Sonne}$$

$\delta_R$  = mittlere optische Dicke der reinen, trockenen Rayleigh-Atmosphäre

$p/p_0$  = Luftdruckkorrektur

$$AM = \frac{1}{\sin(\gamma_S)}$$

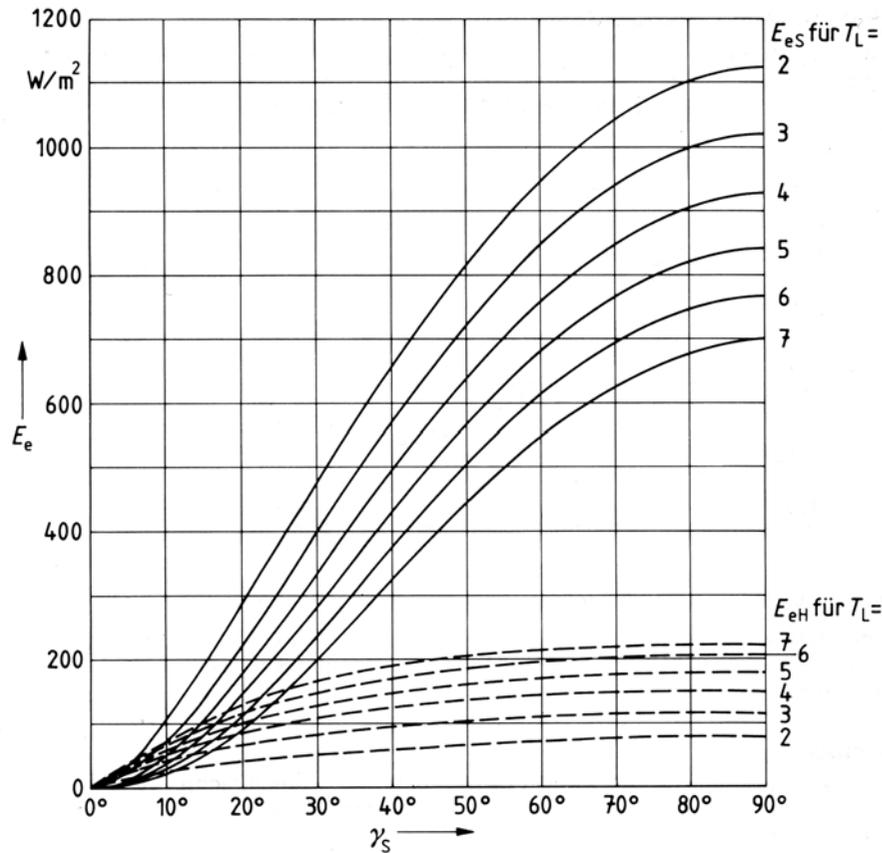
AM-Werte für Berlin an verschiedenen Tagen bei Sonnenhöchststand



**Air mass:**  $AM > 1$  berücksichtigt den längeren Luftweg der Sonnenstrahlung bei schrägem Einfall.

Faktor  $\sin(\gamma_S)$  von  $E_0$  durch Flächenprojektion in die horizontale Empfangsebene

# Horizontale terrestrische Bestrahlungsstärken für verschiedene Sonnenhöhen und Trübungen



Horizontale Bestrahlungsstärke  $E_S$  durch die Sonne und  $E_H$  durch den Himmel in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe bei klarem Himmel und verschiedenen Trübungs Faktoren (nach Linke)

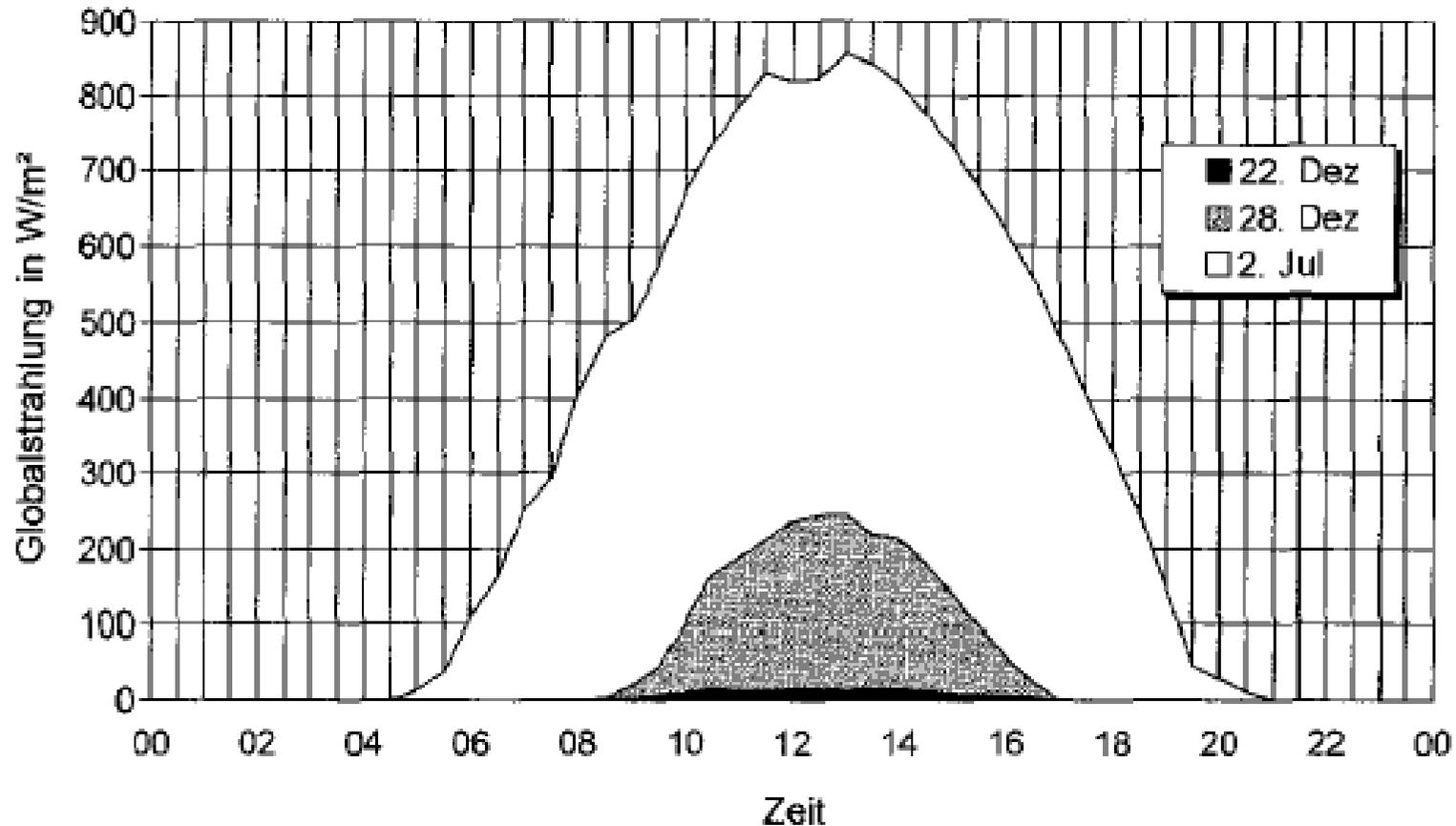
Bedingt durch die Erdrotation mit 1 U/Sterntag und elliptische Bahnbewegung der Erde um die Sonne mit einer mittleren Geschwindigkeit von 29,79 km/s ändert sich der Sonnenstand mit der Jahreszeit, der Tageszeit und der geographischen Breite.

# Reduktionseinflüsse in Abhängigkeit der Sonnenhöhe

$\gamma_s$	$AM$	Absorption	Rayleigh-Streuung	Mie-Streuung	Gesamtschwächung
90°	1,00	8,7 %	9,4 %	0 ... 25,6 %	17,3 ... 38,5 %
60°	1,15	9,2 %	10,5 %	0,7 ... 29,5 %	19,4 ... 42,8 %
30°	2,00	11,2 %	16,3 %	4,1 ... 44,9 %	28,8 ... 59,1 %
10°	5,76	16,2 %	31,9 %	15,4 ... 74,3 %	51,8 ... 85,4 %
5°	11,5	19,5 %	42,5 %	24,6 ... 86,5 %	65,1 ... 93,8 %

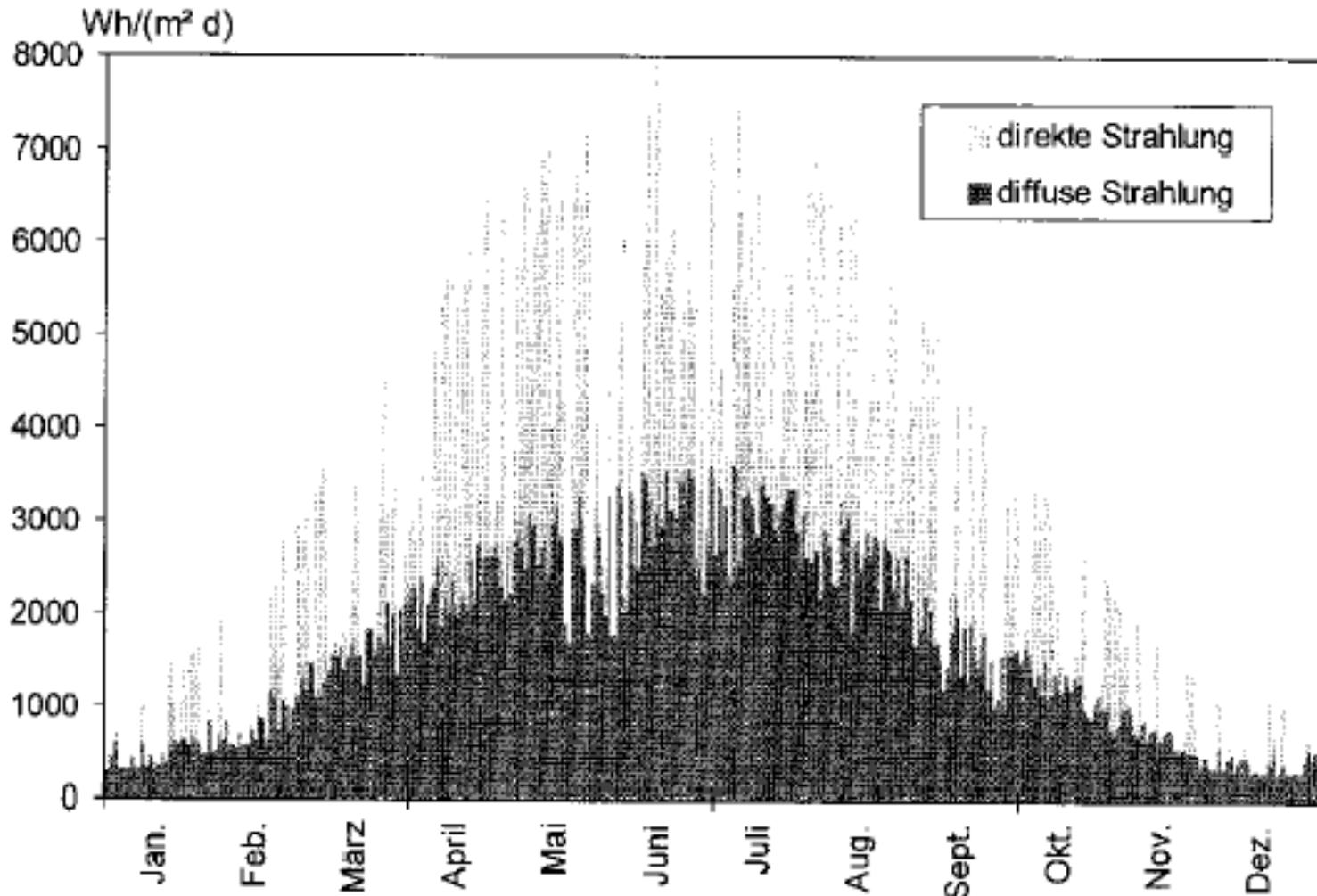
Hinzu kommen Reduktionen infolge von Witterungseinflüssen wie starke Bewölkung, Schneefall oder Regen.

# Tagesgänge der Globalstrahlung



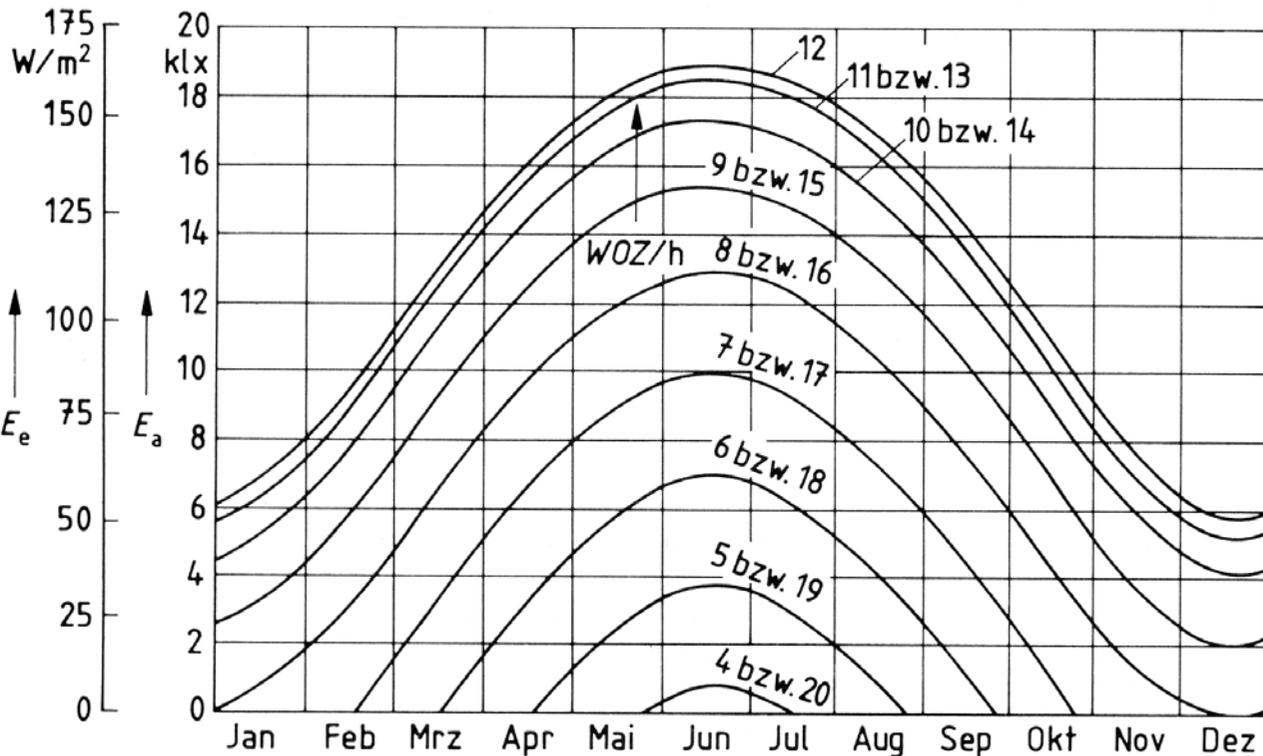
Karlsruhe am 2.7., einem wolkenlosen Sommertag, am 22.12., einem stark bedecktem Wintertag, und am 28.12.1991, einem wolkenlosen Wintertag

# Tagessummen von Direkt- und Diffusstrahlung



Typischer Verlauf für Berlin. Beachte die starke Variabilität!

# Monatsgänge der Globalstrahlung



Horizontale  
Beleuchtungsstärke  $E_v$  und  
horizontale Bestrahlungsstärke  
 $E$  bei bedecktem Himmel für  
51° nördlicher Breite in  
Abhängigkeit von Jahres und  
Tageszeit

AM 1,5: Standardspektrum für die Messung von Wirkungsgraden von terrestrischen Solarzellen,

Integration von AM = 1,5: maximale terrestrische Globalbestrahlungsstärke für AM = 1,5.

$$E_{AM=1,5} = 1,0 \text{ kW/m}^2 \quad (\text{keine Trübung, klare Himmel, senkrecht Sonne})$$

# Tagesbestrahlungen in Deutschland

Sonnenenergie: Strahlungsdaten für Deutschland

Max. Bestrahlungsstärke variiert nicht stark

Große Unterschiede in den solaren Energien, die in einem Jahr auf eine horizontale Fläche an verschiedenen Orten fallen.

Deutschland: Bestrahlung 1000 kWh/(m<sup>2</sup>a).

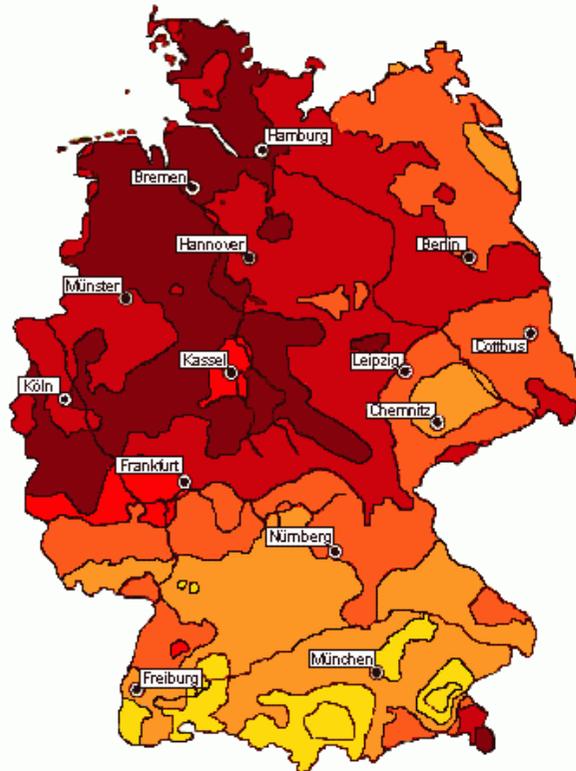
≈1000 Sonnenstunden pro Jahr (mit 1kWh/m<sup>2</sup>)  
Jahresmittel: 115 W/m<sup>2</sup>.

Saudi-Arabien: 2500 kWh/(m<sup>2</sup>a), Mittel 285 W/m<sup>2</sup>

Erde: Mittel 230 W/m<sup>2</sup>.

D: Sommereinstrahlung =5\*Wintereinstrahlung

Durchschnittliche Sonnenstunden pro Jahr (direkter Sonnenstrahlung mit mindestens 0,2 kW/m<sup>2</sup>)  
Deutschland 1300 – 1900 h.



mittlere Tagessummen in kWh/m<sup>2</sup>



3.30 - 3.15   3.15 - 3   3 - 2.88   2.88 - 2.74   2.74 - 2.60   2.60 - 2.47

# Tagessummen für deutsche Orte

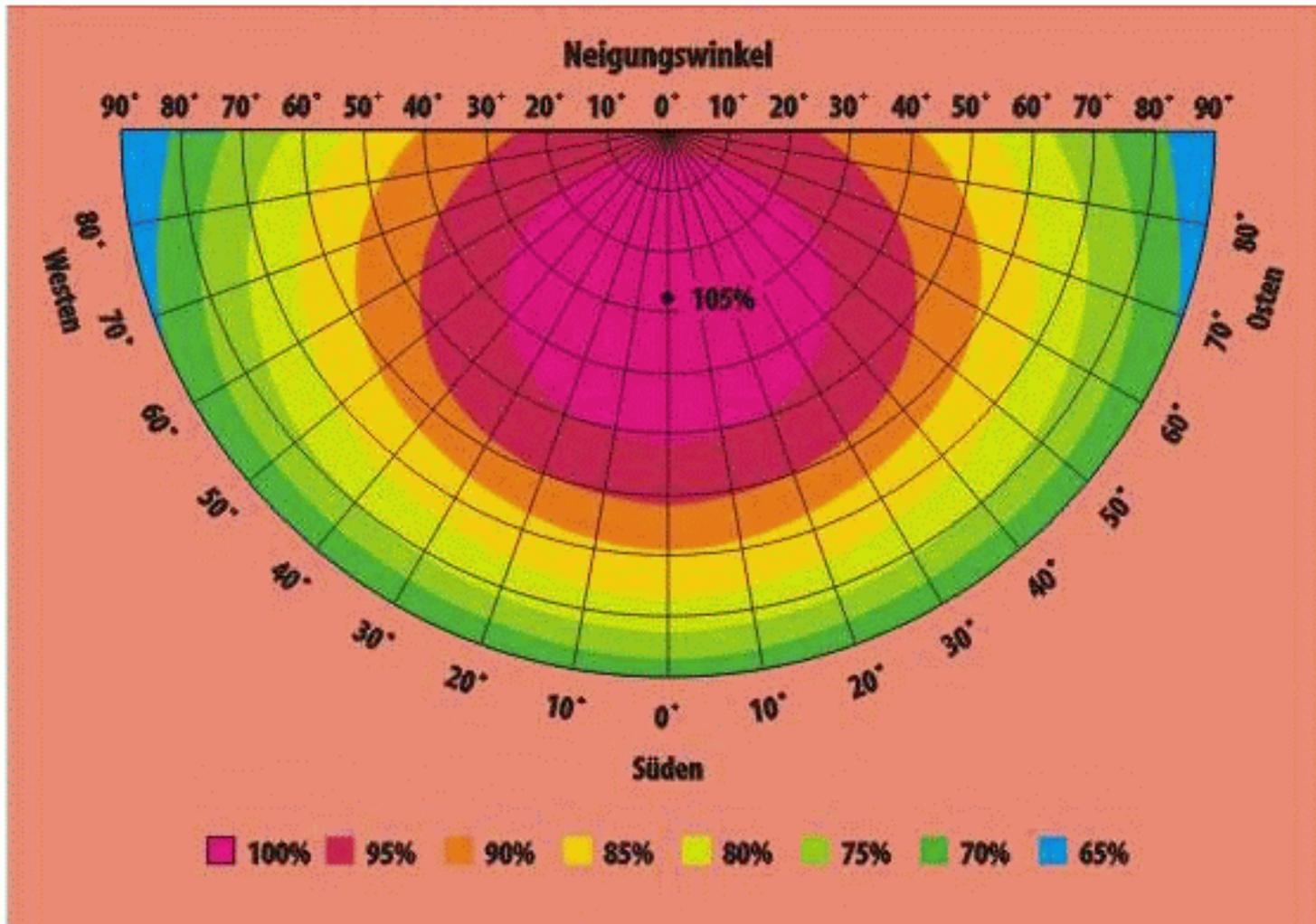
## Tagessummen der Globalstrahlung für Orte in Deutschland

Ort	Durchschnittliche Globalstrahlung pro Tag (kWh/m <sup>2</sup> *d). Bezug: ebene Fläche												kWh m <sup>2</sup> /a
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
<b>Berlin</b>	0,54	1,14	2,47	3,72	4,83	5,56	5,02	4,21	3,16	1,59	0,64	0,39	1015
<b>Hamburg</b>	0,48	1,01	2,13	3,60	4,65	5,29	4,66	3,89	2,82	1,39	0,58	0,33	940
<b>Bremen</b>	0,49	1,07	2,07	3,58	4,64	5,15	4,52	3,87	2,81	1,44	0,62	0,37	934
<b>Hannover</b>	0,51	1,10	2,18	3,62	4,69	5,24	4,59	3,95	2,86	1,49	0,64	0,38	953
<b>Göttingen</b>	0,56	1,18	2,32	3,58	4,57	5,09	4,49	3,80	2,84	1,55	0,68	0,43	947
<b>Braunlage</b>	0,58	1,22	2,34	3,62	4,55	5,15	4,56	3,79	2,90	1,63	0,68	0,45	959
<b>Dortmund</b>	0,53	1,16	2,28	3,73	4,67	4,71	4,33	3,79	2,85	1,53	0,72	0,43	937
<b>Essen</b>	0,56	1,13	2,20	3,52	4,51	4,94	4,36	3,80	2,83	1,59	0,72	0,43	932
<b>Bocholt</b>	0,56	1,15	2,32	4,01	4,93	5,15	4,61	3,90	2,86	1,46	0,72	0,42	978
<b>Münster</b>	0,54	1,17	2,32	3,95	4,96	5,08	4,59	3,86	2,94	1,52	0,70	0,41	978
<b>Osnabrück</b>	0,51	1,10	2,11	3,48	4,54	5,05	4,37	3,75	2,78	1,53	0,66	0,40	923
<b>Köln</b>	0,62	1,26	2,42	3,91	4,73	4,95	4,58	4,10	3,04	1,78	0,79	0,51	996
<b>Aachen</b>	0,63	1,26	2,43	3,92	4,74	4,96	4,59	4,11	3,05	1,79	0,79	0,52	1000
<b>Trier</b>	0,63	1,29	2,47	3,76	4,77	5,08	4,91	4,07	3,04	1,65	0,74	0,49	1004
<b>Lüdenscheid</b>	0,53	1,19	2,37	3,49	4,48	4,45	4,03	3,48	2,76	1,54	0,70	0,43	897
<b>Kahler Asten</b>	0,59	1,25	2,36	3,65	4,72	4,80	4,43	3,68	2,87	1,60	0,69	0,43	947
<b>Frankfurt</b>	0,63	1,29	2,56	3,86	4,92	5,29	5,04	4,26	3,15	1,67	0,72	0,48	1033
<b>Mannheim</b>	0,69	1,37	2,72	4,04	5,11	5,37	5,34	4,48	3,34	1,81	0,78	0,54	1086
<b>Stuttgart</b>	0,75	1,42	2,60	3,78	4,83	5,23	5,37	4,53	3,37	2,03	0,88	0,61	1080
<b>Tübingen</b>	0,78	1,42	2,64	3,86	4,79	5,18	5,36	4,45	3,33	2,02	0,96	0,63	1079
<b>Karlsruhe</b>	0,71	1,36	2,67	3,89	5,05	5,37	5,42	4,55	3,38	1,90	0,81	0,57	1088
<b>Freiburg</b>	1,04	1,75	2,78	4,24	5,06	5,63	5,69	4,67	3,73	2,25	0,12	0,84	1160
<b>München</b>	0,77	1,44	2,60	3,83	4,72	5,27	5,25	4,41	3,48	2,06	0,87	0,57	1076
<b>Kempten</b>	0,91	1,58	2,80	3,79	4,06	4,90	5,13	4,47	3,43	2,19	1,04	0,76	1085
<b>Ulm</b>	0,75	1,40	2,69	3,90	4,88	5,26	5,43	4,54	3,34	1,83	0,80	0,56	1080
<b>Regensburg</b>	0,72	1,37	2,69	2,98	4,92	5,38	5,36	4,43	3,35	1,87	0,78	0,54	1088
<b>Würzburg</b>	0,65	1,33	2,63	3,94	4,99	5,40	5,26	4,37	3,20	1,76	0,76	0,51	1062

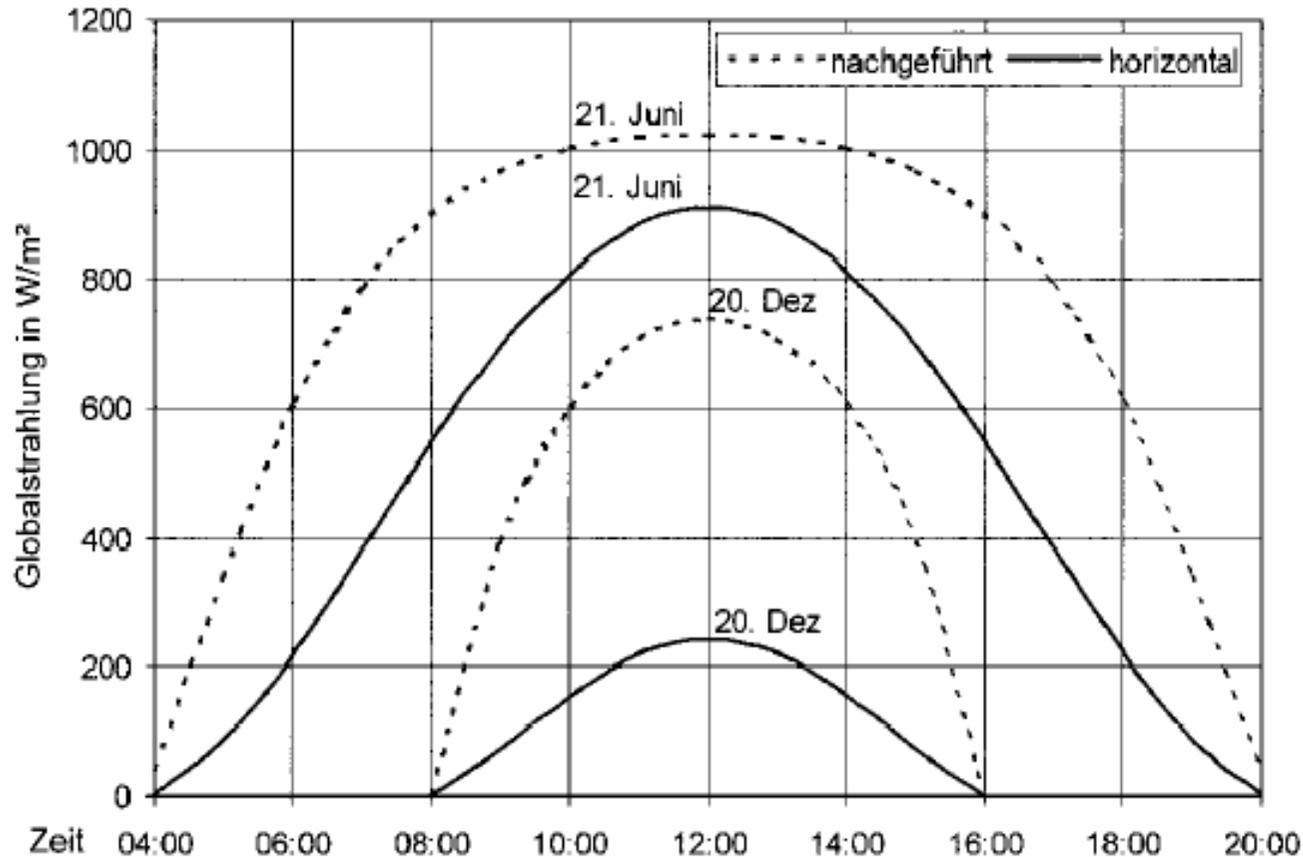


# Globalstrahlung in der Anlagenebene

Energieertrag bezogen auf den bei optimaler Ausrichtung der Empfängerfläche



# Strahlungsgewinn durch Nachführung



Unterschiede der Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen und der nachgeführten Fläche für wolkenlose Tage und  $50^\circ$  geografische Breite