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,

wolfgang.heering@lti.uni-karlsruhe.de

URL: www.lti.uni-karlsruhe.de

Folien+“Skript“ (≥ Vorlesungsfolien): als .pdf-File von der LTI-Homepage herunterzuladen (siehe auch Vorlesungen SS 2004 !!)

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 Quaschning , „Regenerative Energiesysteme“, m. CD-ROM

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

....

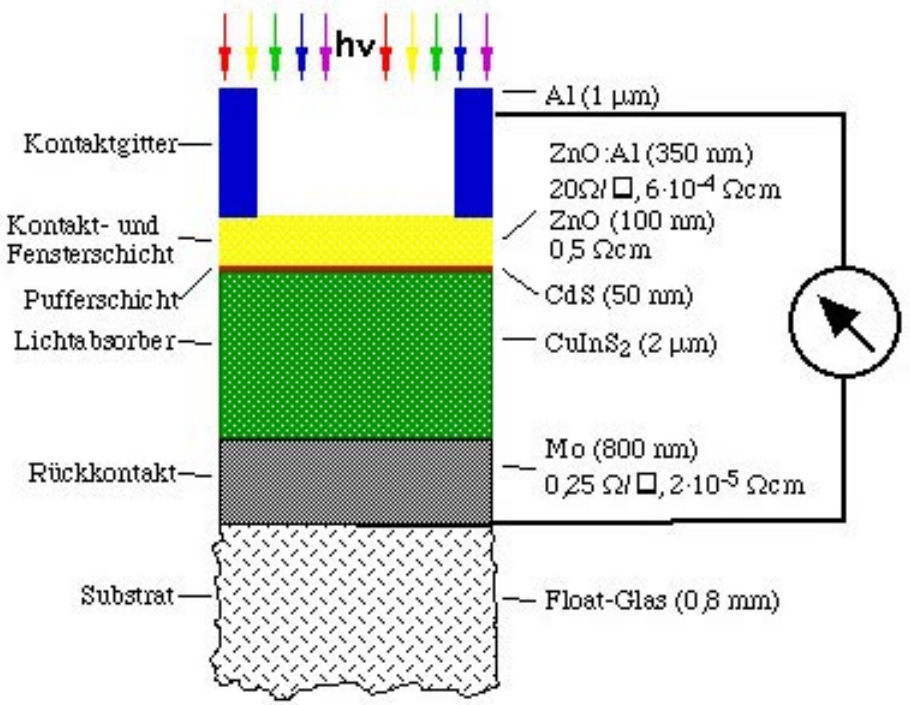
… Links auf der LTI-Homepage

Vorlesung Solarenergie: Terminplanung

Termin	Thema	Dozent
Di. 19.10.	Wirtschaftliche Aspekte/Energiequelle Sonne	Lemmer/Heering
Di. 26.10.	Halbleiterphysikalische Grundlagen photovoltaischer Materialien	Lemmer
Fr. 29.10.	Kristalline pn-Solarzellen	Heering
Di. 2.11.	Elektrische Eigenschaften	Heering
Di. 9.11.	Optimierung kristalliner Solarzellen	Lemmer
Fr. 12.11.	Technologie kristalliner Solarzellen	Lemmer
Di. 16.11.	Anorganische Dünnschichtsolarzellen	Lemmer
Di. 23.11.	Third Generation Photovoltaics	Lemmer
Fr. 26.11.	Organische Dünnschichtsolarzellen	Lemmer
Di. 30.11.	Photovoltaische Systeme I	Heering
Di. 7.12.	Photovoltaische Systeme I	Heering
Fr. 10.12.	Solarkollektoren	Heering
Di. 14.12.	Passive Sonnenenergienutzung	Heering
Di. 11.1.	Solarthermische Kraftwerke I	Lemmer
Di. 18.1.	Energiespeicher/Solarchemie	Heering
Di. 25.1.	Kostenrechnungen zu Solaranlagen	Heering
Di. 1.2.	Energieszenarien	Lemmer
Di. 15.2.	Exkursion	Heering/Lemmer

I.3: Impressionen der Vorlesung: Solarzellen

Was ist eine Solarzelle ?



Licht wird von einem Halbleiter absorbiert

↓

Erzeugung von mobilen Ladungsträgern

↓

Trennung von Ladungsträgern

↓

Elektrische Spannung an Kontakten

↓

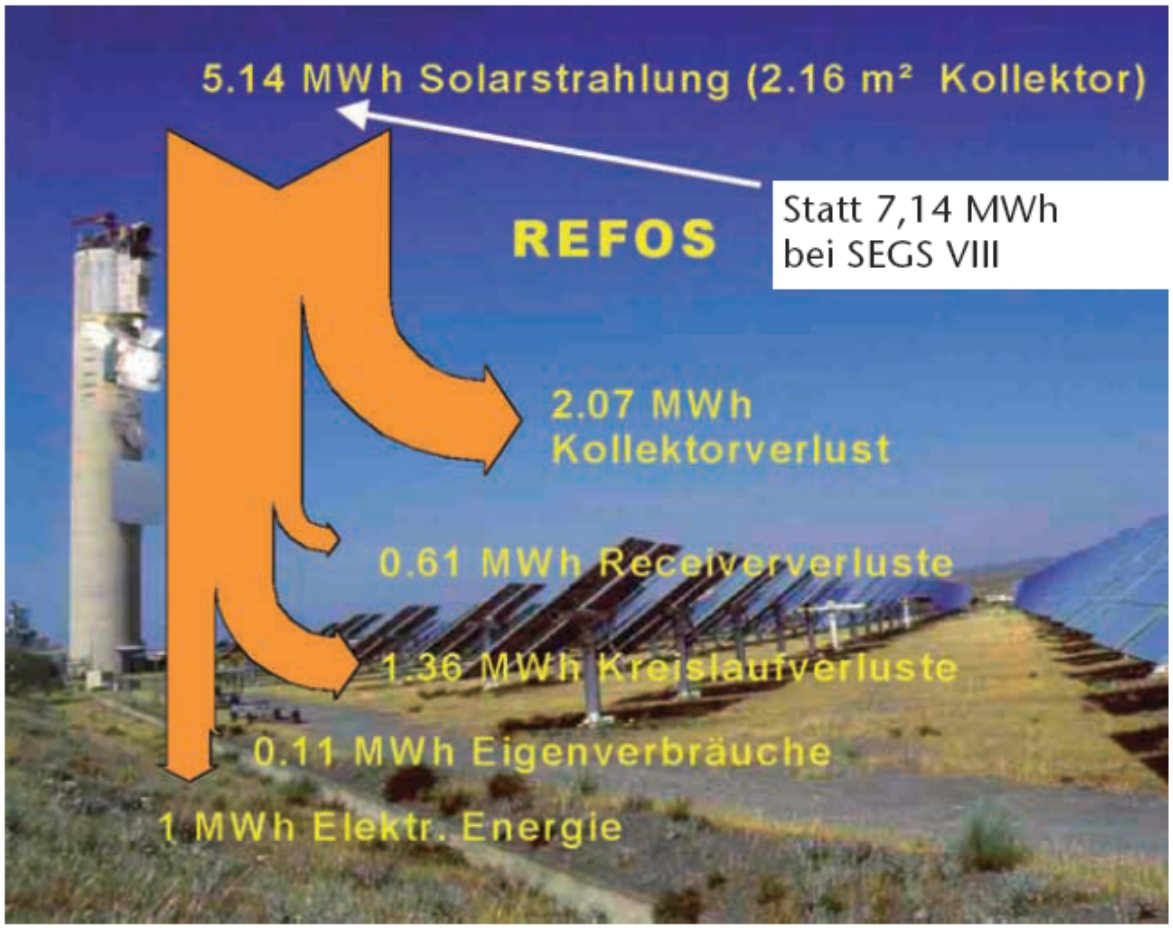
Stromfluß im externen Stromkreis

Solarthermische Kraftwerke: Parabolrinnen

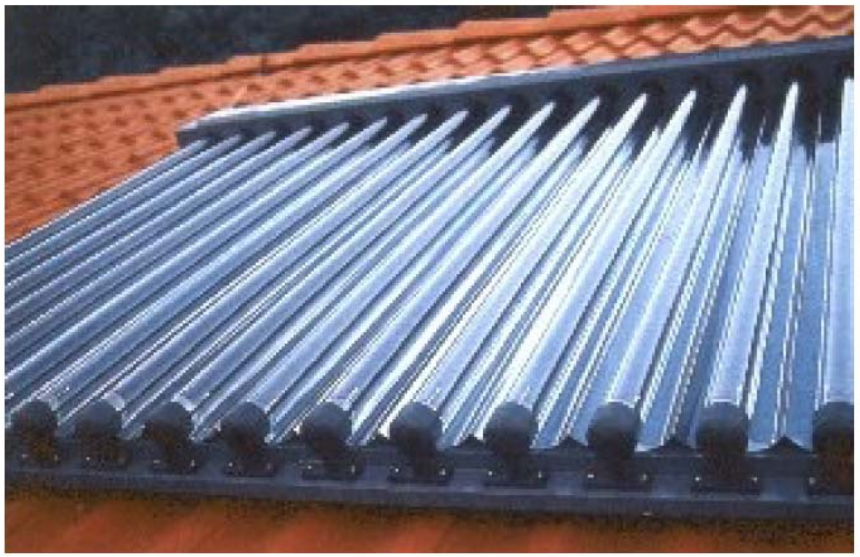
Die Stromerzeugung in solarthermischen Kraftwerken
ist im Prinzip billiger und auch schon in grösserem Massstab realisiert.

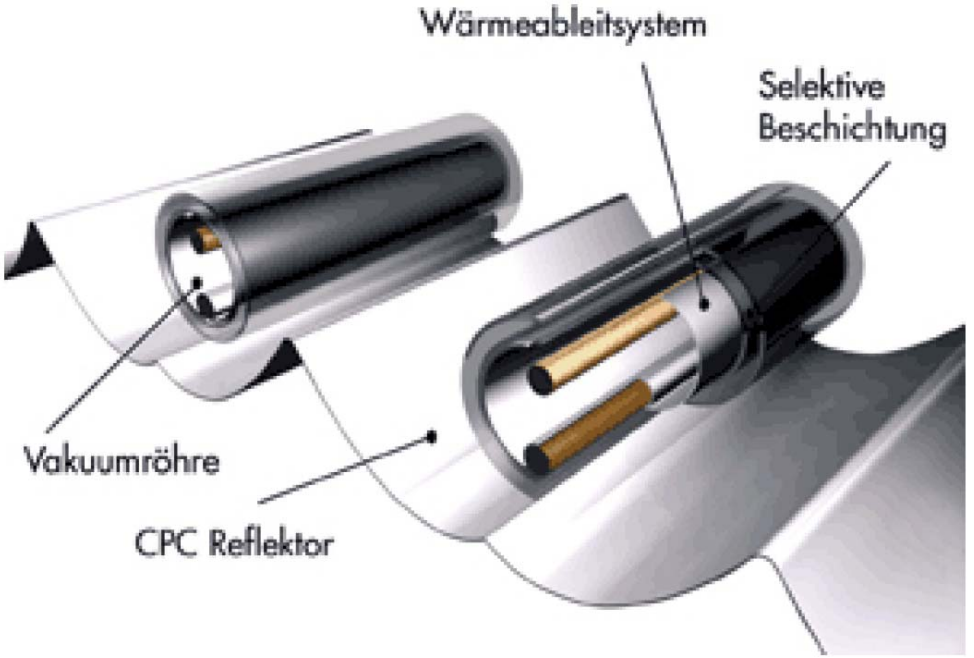
Solarthermische Kraftwerke: Solarturm

Höchste Wirkungsgrade und niedrigste Kosten sind in Solarturmkraftwerken zu erwarten.



Solarkollektoren: CPC-Vakuumröhrenkollektor

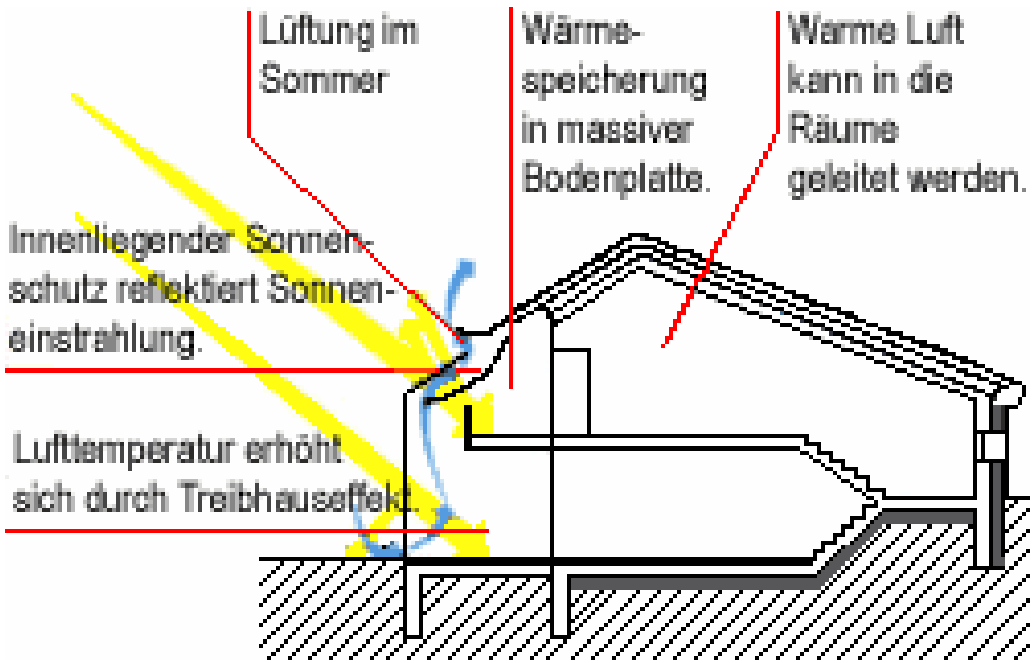




Solarkollektoren zur Warmwassergewinnung sind relativ gut etablierte Systeme und ausgefeilte optische und thermodynamische Systeme.

Passive Solarenergienutzung

Passive Solarenergienutzung ist die direkteste Form der Energieeinsparung und hat noch riesige Potentiale für eine zukünftige Energieversorgung.



I.4 Wirtschaftliche Aspekte

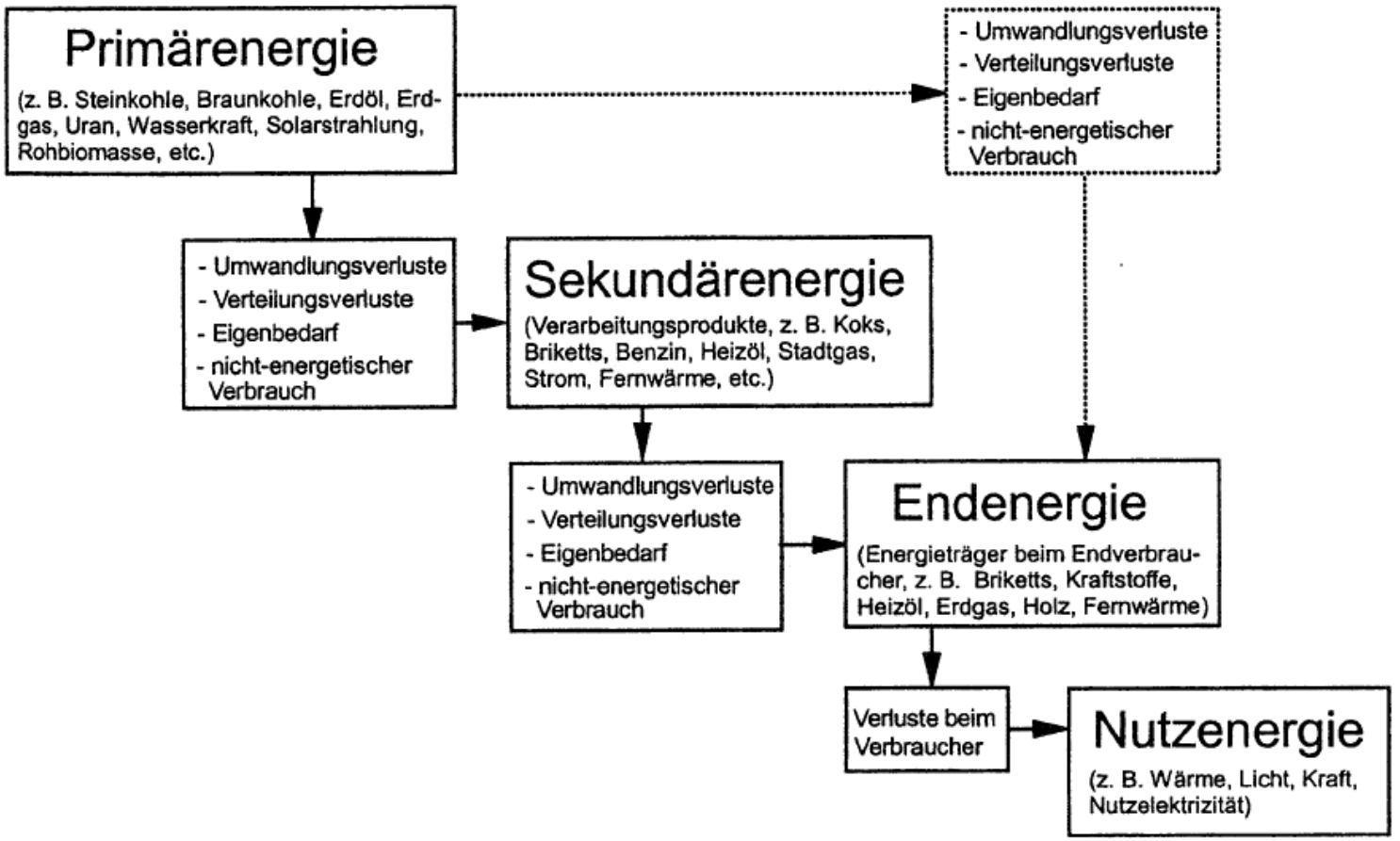


Abb. 1.1 Energiewandlungskette (nach /1-1/)

Quelle: Kaltschmitt et al.

Primärenergieverbrauch der Welt nach Ländern und Regionen

in Exajoule

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
WELT	361,0	365,5	367,2	371,8	374,1	383,5	395,5	398,7	400,2	406,2
AFRIKA	16,6	17,3	17,4	17,6	18,0	18,7	19,1	19,8	20,3	20,5
NORDAMERIKA	94,6	95,3	97,2	99,4	101,3	102,6	105,1	107,1	108,5	111,4
USA	80,6	81,2	82,7	84,6	86,0	87,3	89,4	91,1	92,3	95,0
SÜDAMERIKA	14,1	14,4	14,7	15,0	16,0	16,5	17,3	17,9	18,6	18,7
ASIEN	101,2	104,4	108,9	114,2	119,5	126,2	132,1	134,1	132,9	135,1
China	37,0	37,1	38,5	40,7	42,5	45,4	47,4	47,1	46,5	46,3
Japan	18,4	18,8	19,1	19,3	20,2	20,8	21,4	21,7	21,4	21,6
EUROPA (OECD - Länder)	67,9	68,8	68,1	68,4	68,5	70,0	72,6	72,3	73,1	73,1
Deutschland	14,9	14,5	14,3	14,2	14,1	14,2	14,7	14,5	14,4	14,1
Frankreich	9,5	10,0	9,8	10,0	9,7	10,0	10,6	10,3	10,7	10,7
Großbritannien	8,9	9,2	9,1	9,2	9,5	9,4	9,8	9,5	9,6	9,6
Italien	6,4	6,5	6,5	6,4	6,4	6,7	6,7	6,8	7,0	7,1
Spanien	3,8	3,9	4,0	3,9	4,1	4,3	4,2	4,5	4,7	5,0
Niederlande	2,8	2,9	2,9	2,9	2,9	3,1	3,2	3,1	3,1	3,1
EUROPA (Nicht-OECD-Länder)	5,9	5,0	4,5	4,4	4,1	4,3	4,6	4,4	4,3	3,9
Frühere SU	56,4	56,2	52,0	48,3	42,2	40,6	39,7	38,0	37,4	38,3
PAZIFIK	4,3	4,2	4,3	4,5	4,6	4,6	4,9	5,1	5,1	5,3

1 Exajoule = 10^{18}J

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

Primärenergieverbrauch: Welt

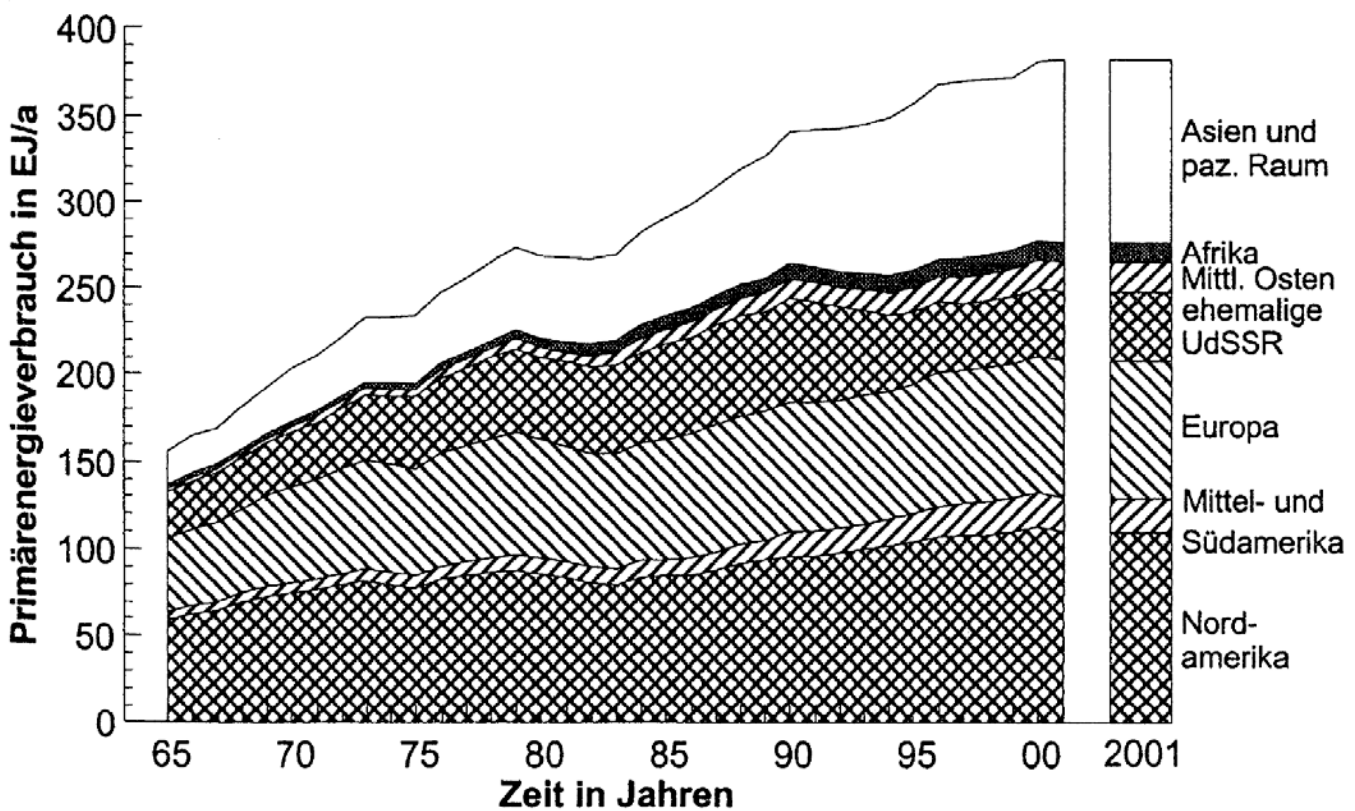


Abb. 1.2 Entwicklung des weltweiten Verbrauchs an fossilen Primärenergieträgern sowie an Wasserkraft (Daten nach /1-3/)

Primärenergieverbrauch: Deutschland

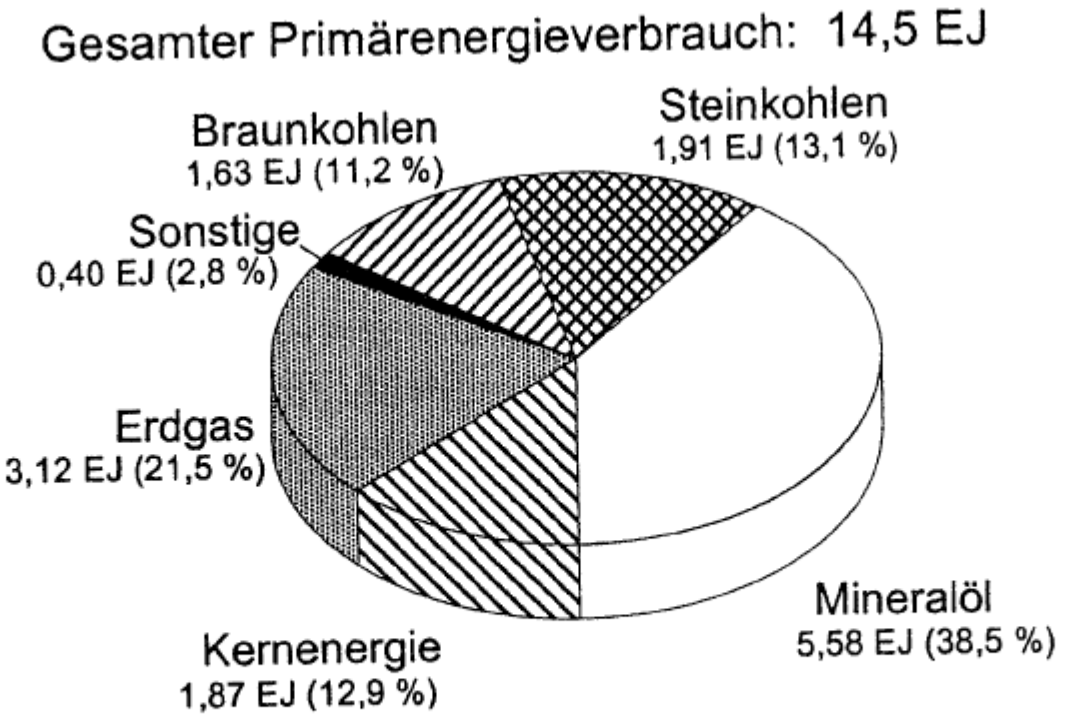


Abb. 1.5 Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Deutschland im Jahr 2001 (Daten u. a. nach /1-27/)

Primärenergieverbrauch: Deutschland

Primärenergieverbrauch nach Energieträgern

Deutschland

in Petajoule (PJ)

Energieträger	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Mineralöl	5.238	5.547	5.628	5.746	5.693	5.689	5.808	5.753	5.775	5.598	5.489	5.577
Steinkohle	2.306	2.330	2.196	2.139	2.139	2.060	2.090	2.065	2.059	1.964	2.008	1.905
Braunkohle	3.201	2.507	2.176	1.983	1.861	1.734	1.688	1.595	1.514	1.468	1.547	1.630
Naturgas [1)]	2.316	2.433	2.408	2.546	2.592	2.826	3.161	3.022	3.048	3.028	2.995	3.124
Kernenergie	1.668	1.609	1.733	1.675	1.650	1.682	1.764	1.859	1.764	1.852	1.849	1.867
Wasser- und Windkraft [2)]	58	53	62	64	67	83	73	78	80	88	106	111
Sonstige [3)]	129	132	116	157	182	195	162	242	281	269	284	287
Gesamtverbrauch	14.916	14.611	14.319	14.310	14.184	14.269	14.746	14.614	14.521	14.267	14.278	14.501

Quelle der Tabellen: BMWi

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 ≅ 29.3 PJ

(Primärenergie = Endenergie + Verluste + Nichtenergetischer Verbrauch)

Energieverbrauch pro Kopf

Welt

	in Gigajoule (GJ)									
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
AFRIKA	26,8	27,0	26,5	26,2	26,3	26,6	26,6	26,8	26,8	26,5
NORDAMERIKA	263,1	260,9	262,8	265,4	267,4	267,7	271,1	273,1	273,7	277,9
USA	322,5	321,2	324,0	327,9	330,1	332,0	336,9	339,9	341,3	348,1
SÜDAMERIKA	40,0	40,0	40,3	40,4	42,3	42,9	44,3	45,0	46,1	45,6
ASIEN	64,5	65,2	66,8	68,7	70,6	73,2	75,3	75,1	73,2	73,0
China	32,6	32,3	33,1	34,5	35,7	37,7	38,9	38,3	37,4	36,9
Japan	148,7	151,6	153,9	154,8	162,0	166,0	170,0	171,8	169,1	170,3
EUROPA (OECD - Länder)	136,4	137,5	135,3	135,1	134,6	137,0	141,5	140,3	141,4	140,8
Deutschland	187,6	181,8	177,2	174,3	173,2	174,3	179,6	177,2	176,0	172,0
Frankreich	162,8	171,0	167,1	169,5	163,1	169,0	177,4	172,1	177,4	177,2
Großbritannien	155,0	158,4	157,6	158,9	162,9	160,4	166,0	161,1	162,8	162,1
Italien	112,0	115,1	114,5	112,7	111,1	116,8	116,2	117,6	120,7	122,8
Spanien	97,6	101,4	103,7	100,1	105,0	110,1	108,2	114,5	119,9	125,8
Niederlande	186,2	194,5	191,2	191,6	191,8	198,2	204,4	200,6	198,0	196,2
EUROPA (Nicht-OECD-Länder)	98,5	83,7	76,0	74,4	70,0	74,9	79,7	75,5	73,2	66,4
Frühere SU	195,3	193,2	178,2	165,2	144,4	138,8	136,0	130,5	128,6	132,0

In D also im Schnitt ein andauernder Verbrauch von $\frac{172 \cdot 10^9 \,\mathrm{J}}{365 \cdot 24 \cdot 3600 \mathrm{s}} \approx 5450 \mathrm{W}$

Endenergieverbrauch nach Energieträgern

Deutschland

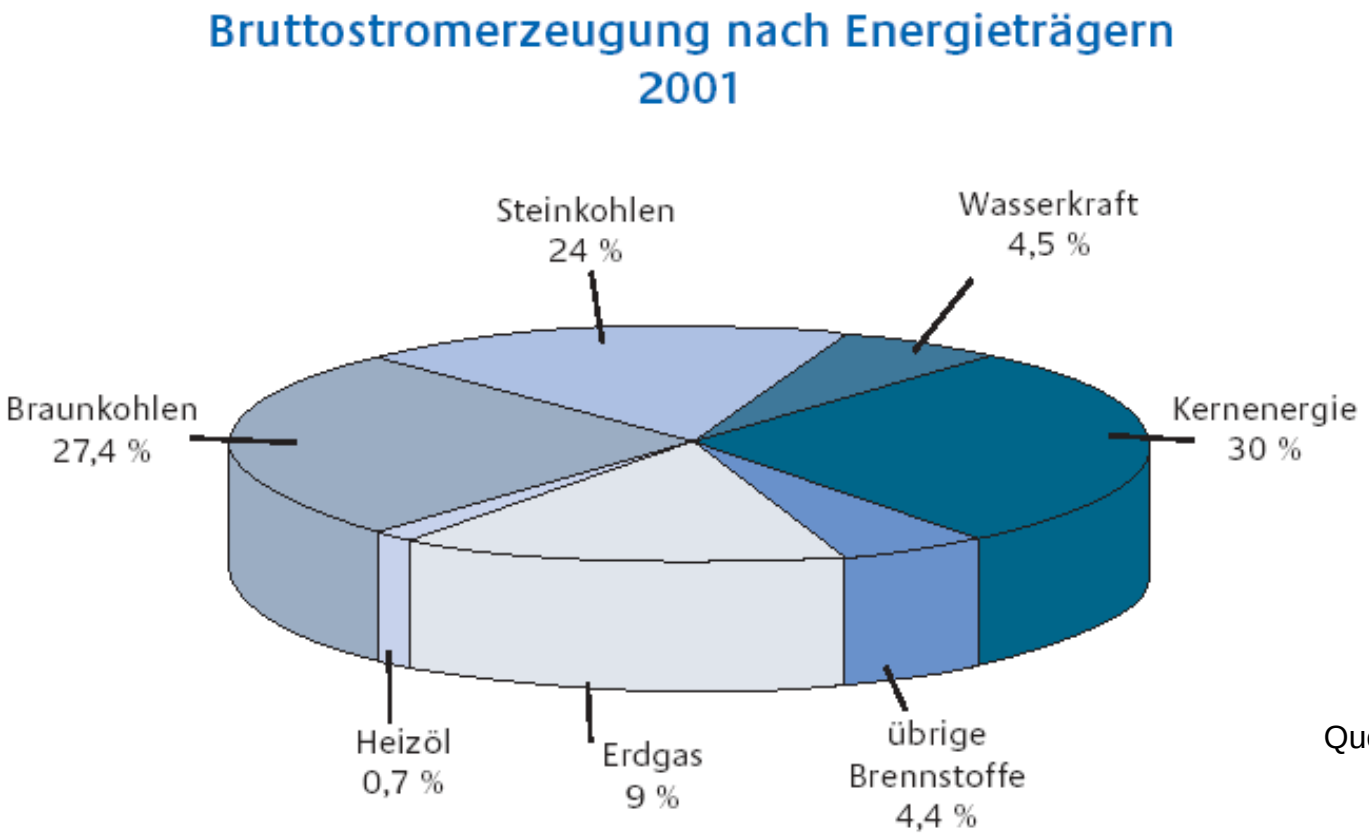
in Petajoule (PJ)

Energieträger	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Steinkohlen	572	532	484	427	446	454	447	461	386	381	407
Braunkohlen	974	553	351	295	221	178	165	130	103	88	80
Kraftstoffe [1]	2.533	2.548	2.618	2.694	2.658	2.747	2.704	2.725	2.778	2.866	2.826
Heizöl schwer	192	187	182	180	177	158	150	149	139	123	111
Heizöl leicht	1.255	1.500	1.483	1.535	1.461	1.435	1.589	1.496	1.427	1.224	1.147
Gase [2]	1.870	2.008	2.006	2.107	2.124	2.261	2.501	2.400	2.415	2.391	2.377
Strom	1.607	1.565	1.549	1.527	1.538	1.649	1.676	1.695	1.699	1.710	1.729
Fernwärme	383	378	356	355	349	366	344	309	311	342	334
Sonstige [3]	55	45	45	54	69	109	112	175	186	184	186
Insgesamt	**9.441**	**9.316**	**9.074**	**9.174**	**9.043**	**9.357**	**9.688**	**9.540**	**9.444**	**9.310**	**9.197**

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Energieverbrauch je Kopf der Bevölkerung												
- Primärenergieverbrauch (Gigajoule)	188	183	178	176	174	175	180	178	176	174	174	177
- Bruttostromverbrauch (kWh)		6.736	6.598	6.487	6.498	6.609	6.651	6.670	6.739	6.731	6.907	

Durchschnittlicher andauernder Stromverbrauch v. 788 W

I.4 Stromerzeugung: Deutschland



Quelle: BMWi

Insgesamt: 609.6 TWh ≅ 2194.6 PJ (in 2000)

1. Beitrag erneuerbarer Energien zum Primärenergieverbrauch [1] (Angaben in Petajoule)							
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Wasserkraft	77	66	66	63	71	75	
Wind	6	7	11	17	20	34	
Photovoltaik					0,1	0,1	
Holz, Stroh u. a. feste Stoffe	124	125	185	205	182	191	
Klärschlamm, Müll, Deponiegas	45	46	54	65	53	55	
Klärgas u. sonstige Biomasse	16	18	20	21	8	16	
sonstige Erneuerbare [2]	7	7	7	8	8	9	
Insgesamt	**275**	**270**	**344**	**379**	**342**	**380**	**398**
prozentualer Anteil am Primärenergieverbrauch [1]	2,1	1,8	2,3	2,4	2,5	2,7	2,7
prozentualer Anteil am gesamten Stromverbrauch [3]	5,2	4,5	4,6	5,2	6,0	7,1	7,3

in 2001: Anteil der Photovoltaik an der Stromerzeugung $\approx 0.03\ \%$

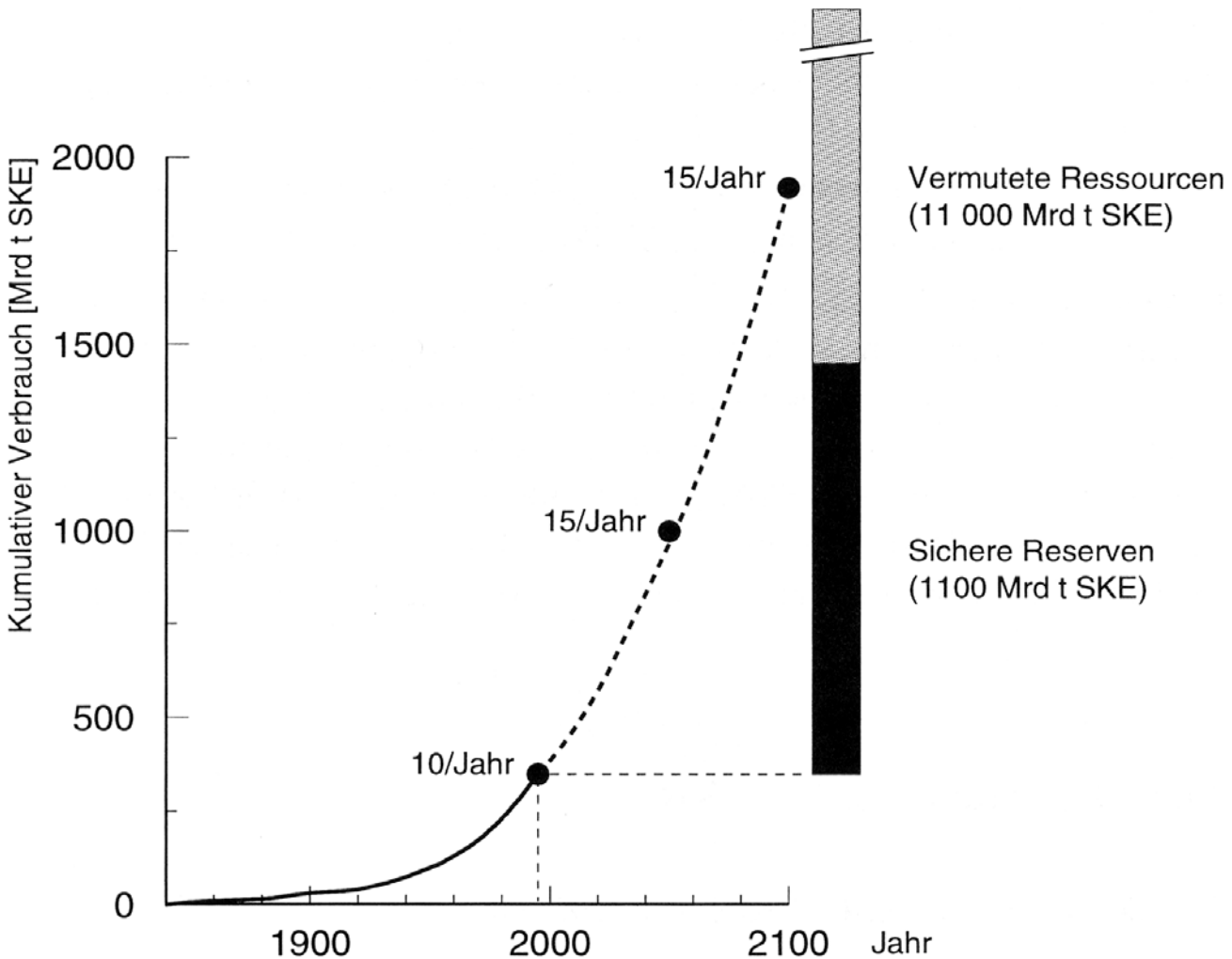
Das Problem: Stromgestehungskosten

Kraftwerks-Typ	typ. Leistung pro Kraftwerk	Investitions-Kosten $\frac{\text{DM}}{\text{kW installiert. Leist.}}$	Stromgestehungs-Kosten $\frac{\text{DM}}{\text{kWh}}$
Kohle-KW	1 000 MW	2 000	0.07
Erdgas-Turbine	200 MW	1 000	0.05
GUD-KW[a]	1 000 MW	2 000	0.07
Kern-KW	1 300 MW	4 000	0.10
Biomasse-Verbr.-KW	50 MW	2 000	0.10
Biomasse-Vergasungs- + Verbrennungs-KW	10 MW	3 000	0.15
Wasserkraft kleine Anl.	bis ca. 1 MW	6 000	0.20
große Anl.	ca. 50 MW bis einige 1 000 MW	12 000	0.35
Windkraft[b]	0.5 MW	2 000	0.14
Photovoltaik-KW[c]	1 kW/(10m^2)	heute 20 000 / künftig 7 000	heute 1.50 / künftig 0.50
Solarthermisches KW[d]	200 MW	heute 9 000 / künftig 5 000	heute 0.50 / künftig 0.15

[a] GUD $\hat{=}$ Gas- und Dampf-Kombikraftwerk, betrieben mit Erdgas und Kohle
[b] mit zeitlich beschränkter Verfügbarkeit, ohne Strom-Speicherung
[c] mit zeitlich beschränkter Verfügbarkeit, ohne Strom-Speicherung
[d] heute noch ohne, künftig mit Wärmespeicher zur Stromerzeugung „rund um die Uhr"

Quelle: Heinloth

Warum mit Solarenergie beschäftigen ?



- Beschränkte Ressourcen an fossilen Brennstoffen

- Ausstieg aus der Kernenergie

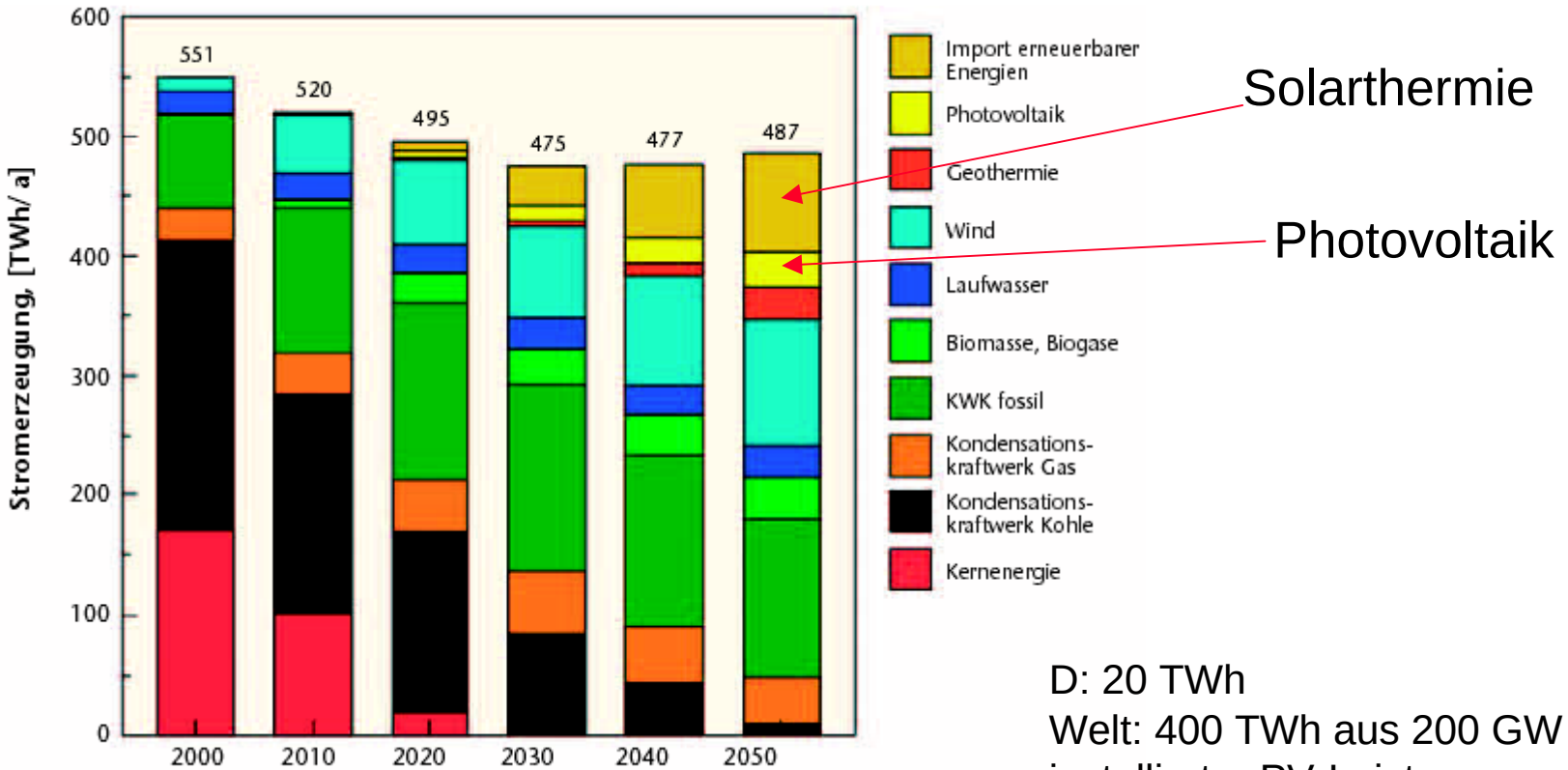
- Treibhauseffekt

....

Quelle: Heinloth

Warum mit Solarstrom beschäftigen ?

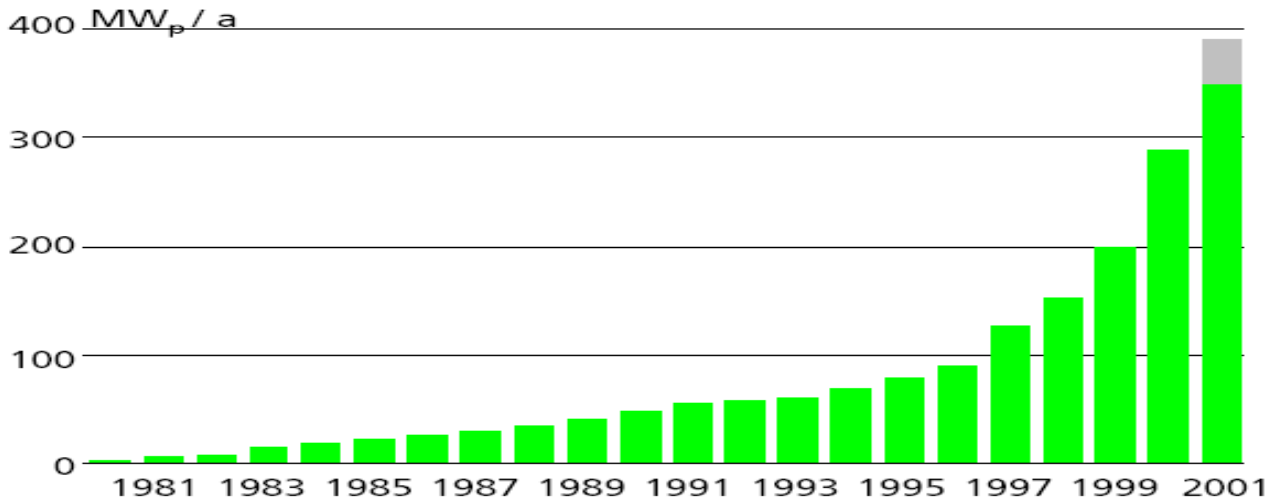
Alle Szenarien für eine zukünftige Stromversorgung sehen einen wichtigen Beitrag der Solarenergie vor:



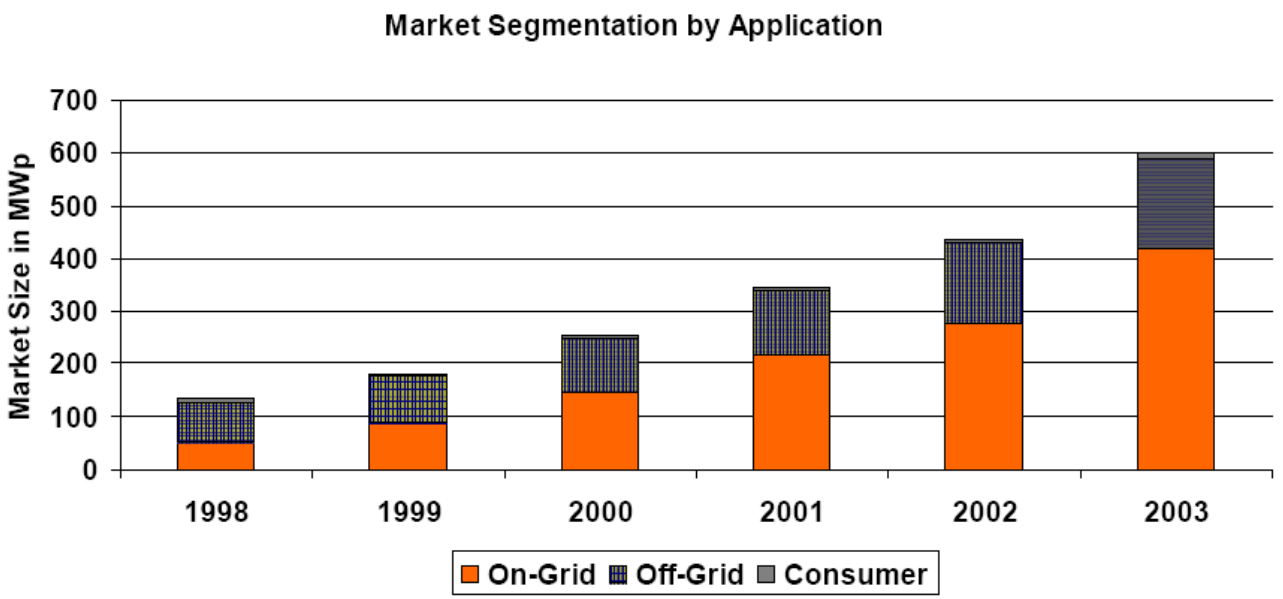
D: 20 TWh
Welt: 400 TWh aus 200 GW installierter PV-Leistung
(≈ 2000 km^2 Solarzellenfläche)

Nachhaltigkeitsszenario Stromerversorgung D (J. Nitsch et al.)

Jährlich installierte PV-Peakleistung



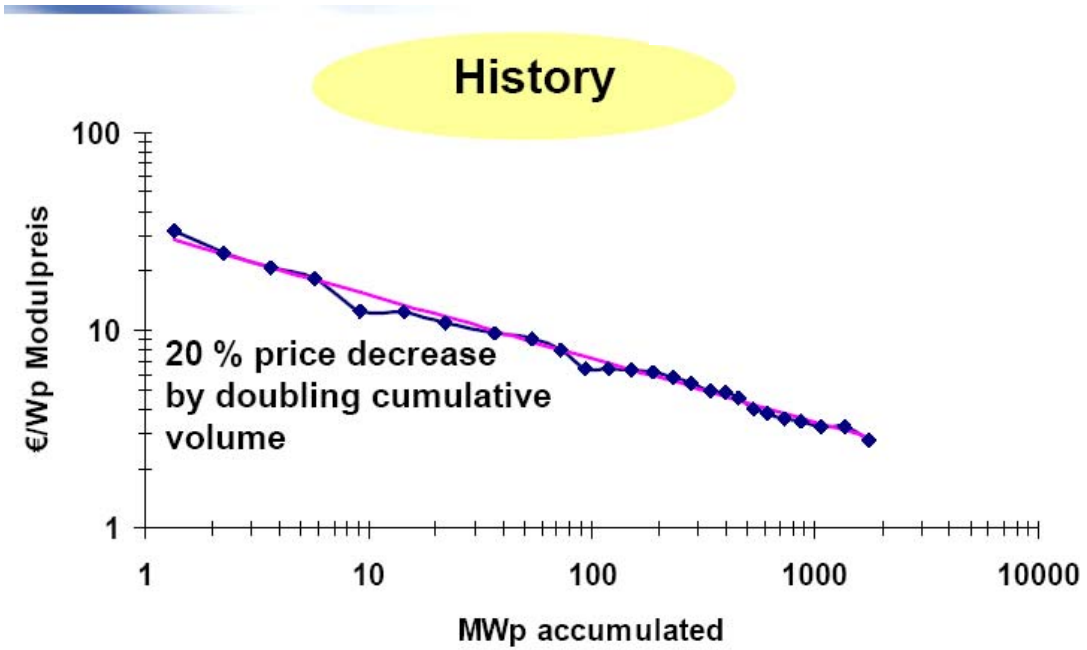
→ PV ist ein echter Wachstumsmarkt



Quellen: FhG ISE, RWESchottSolar

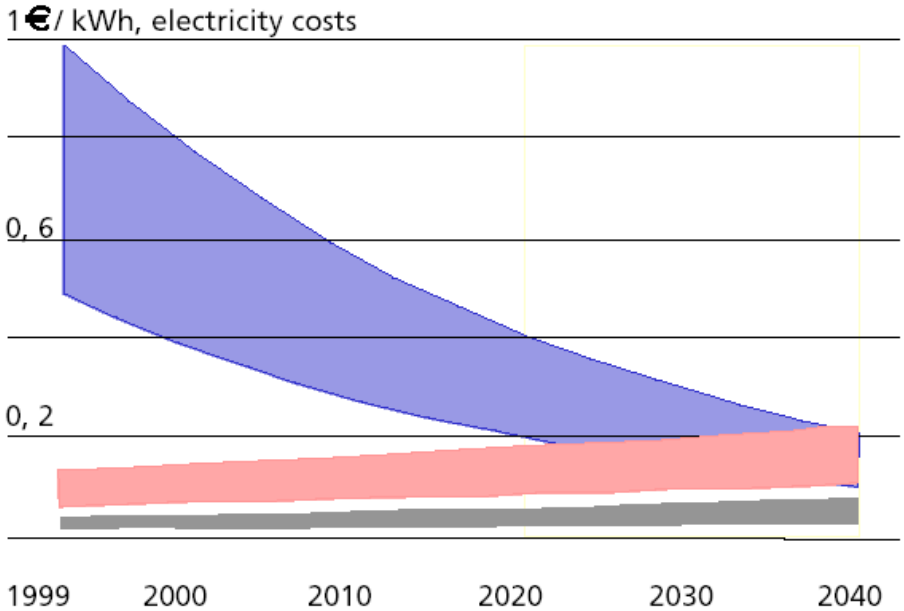
Solarzellen: Kosten

Modulkosten: Vergangenheit



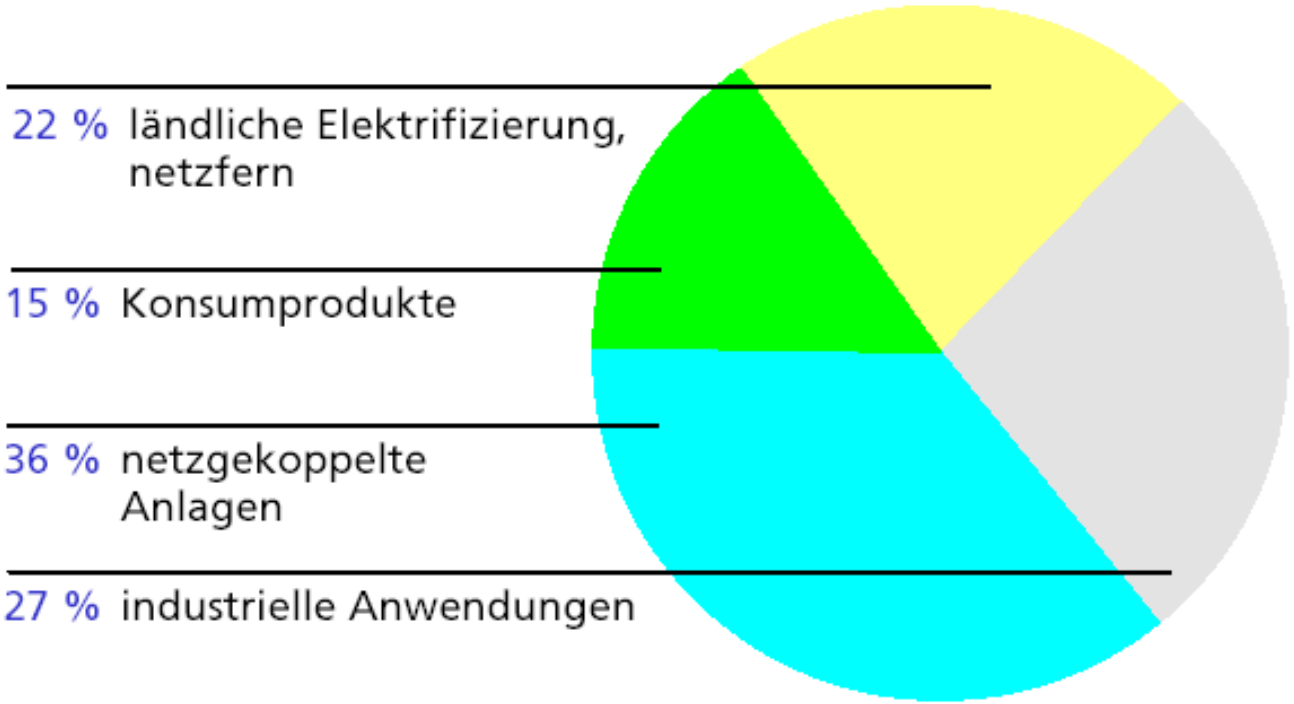
Quelle: RWE Schott Solar

Stromgestehungskosten: Zukunft



Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme

PV-Markt



PV ist ein sehr diverser Markt

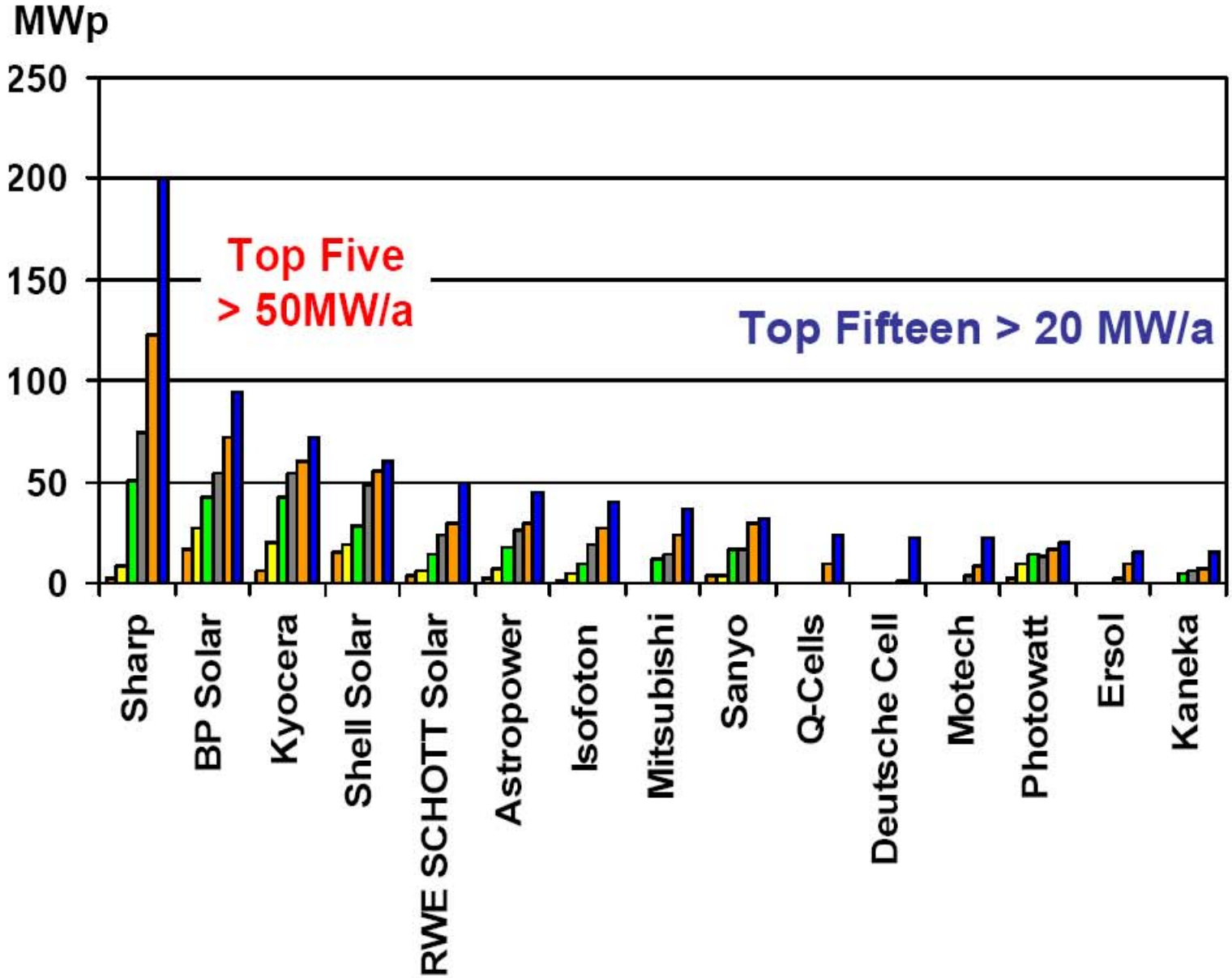
Quelle: Siemens Solar, 1999

... und PV ist ein auch ein deutsches Geschäft

Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme

PV Cell and Module Production Companies Worldwide

RWE SCHOTT Solar

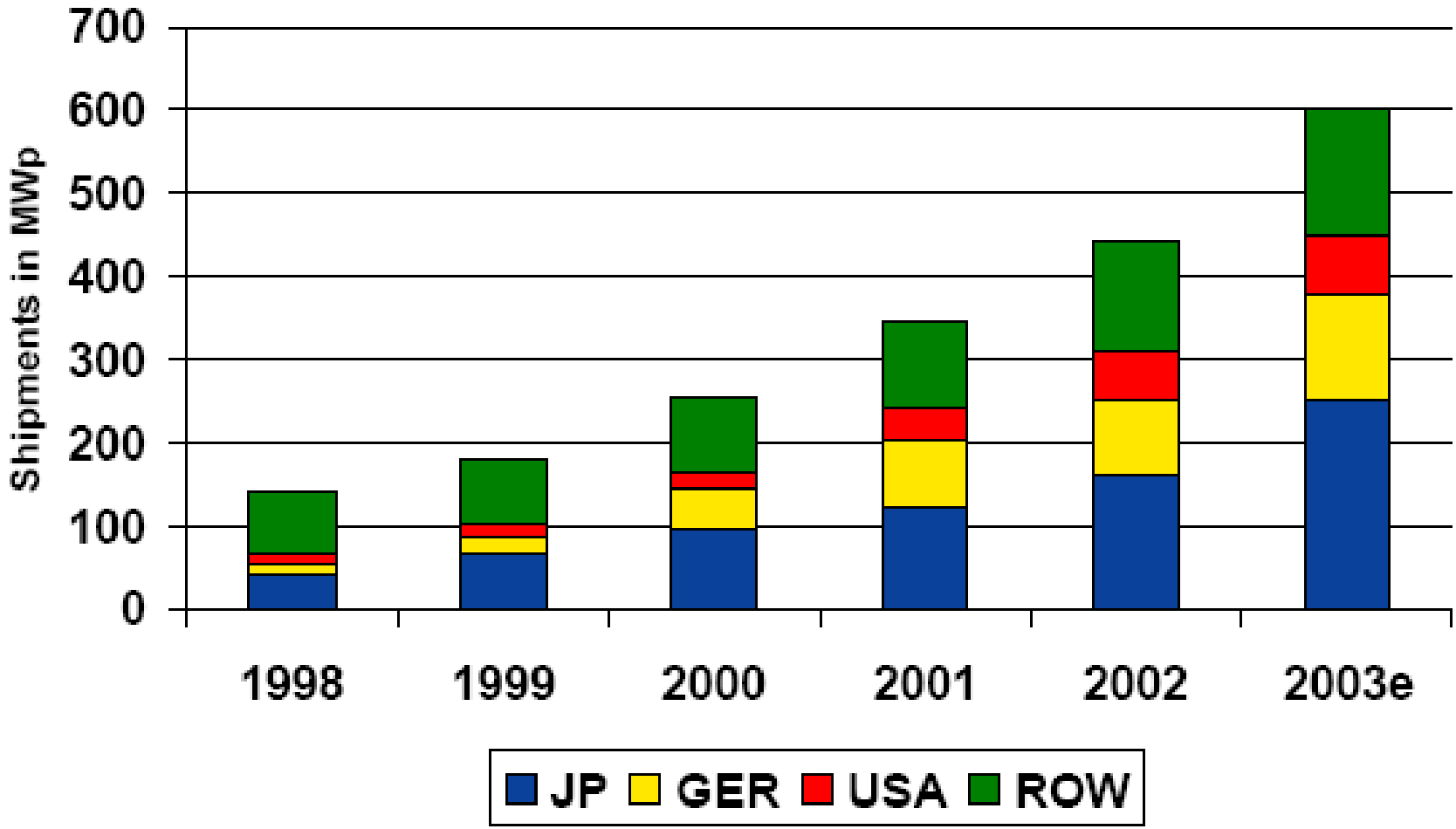


PV News, March 2002,
Vol. 21/No.3, Paul D. Maycock

Photon Interneational March 2003
Photon April 2003

Producers publications

Historical Market Growth of the Solar Electricity Industry by region

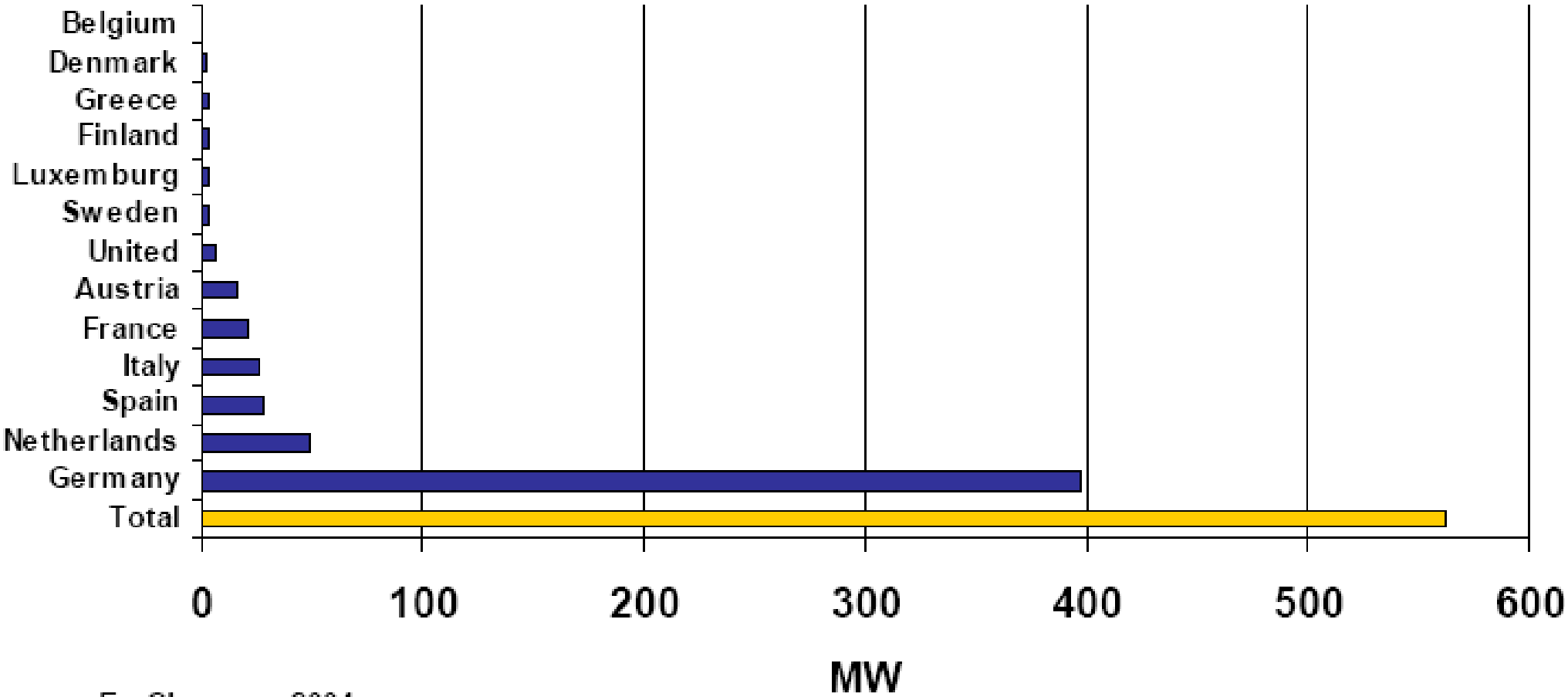


Source: PV News & Strategies Unlimited

© RWE SCHOTT Solar GmbH

Installierte PV-Leistung in Deutschland

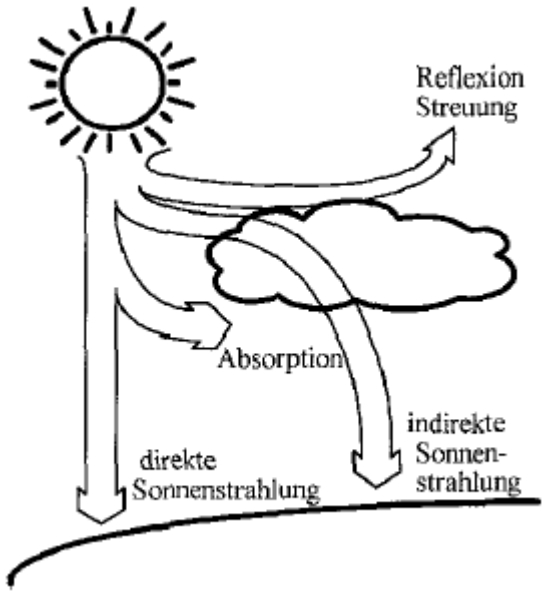
Figure 1: Total Installed Power in Europe



Source: EurObserver 2004

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 g/cm^3
- mittlere Entfernung von der Erde etwa 108 Sonnendurchmesser (8,3 Lichtminuten)

Sonneninneres:

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

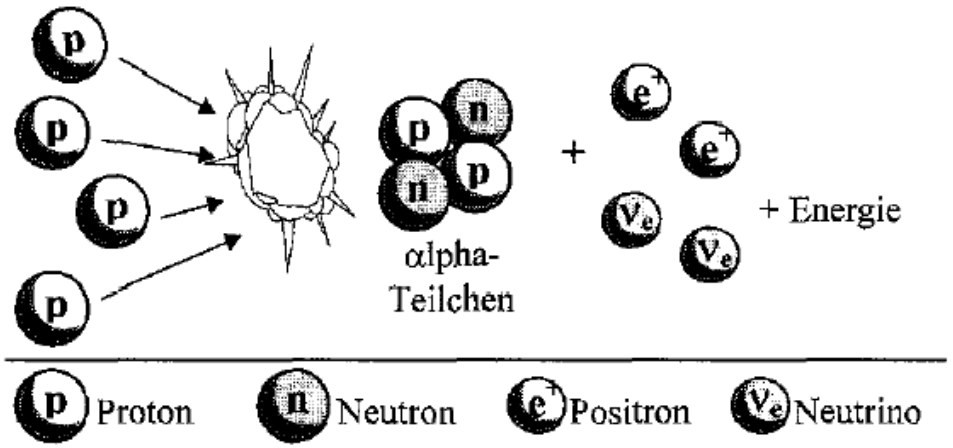
Sonnenoberfläche:

- **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. $2 \cdot 10^6$K

Spezif. Ausstrahlung, Oberflächentemperatur

$$4_1^1\mathrm{p} \rightarrow {}_2^4\alpha + 2\mathrm{e}^+ + 2\nu_\mathrm{e} + \Delta E \quad .$$

$$\Delta \mathrm{E} = \Delta \mathrm{m} \cdot \mathrm{c}^2$$



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

$$\Phi_\mathrm{S} = \frac{\mathrm{dE_S}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{dM_S}}{\mathrm{dt}} \cdot \mathrm{c}^2 = 3,845 \cdot 10^{26}\,\mathrm{W}$$

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

$$\boxed{\frac{\Phi_\mathrm{S}}{\mathrm{A_S}} = 63,11 \frac{\mathrm{MW}}{\mathrm{m}^2}}$$

Spezifische Ausstrahlung der Sonne mit Oberfläche A_S

$$\frac{\Phi_\mathrm{S}}{\mathrm{A_S}} = \sigma_\mathrm{B} \cdot \mathrm{T}^4$$

Stefan-Boltzmann-Gesetz für Sonne als Schwarzer Körper

$$\Rightarrow \boxed{\mathrm{T} = 5777\mathrm{K}}$$

Oberflächentemperatur der Sonne – Abschätzung nach unten

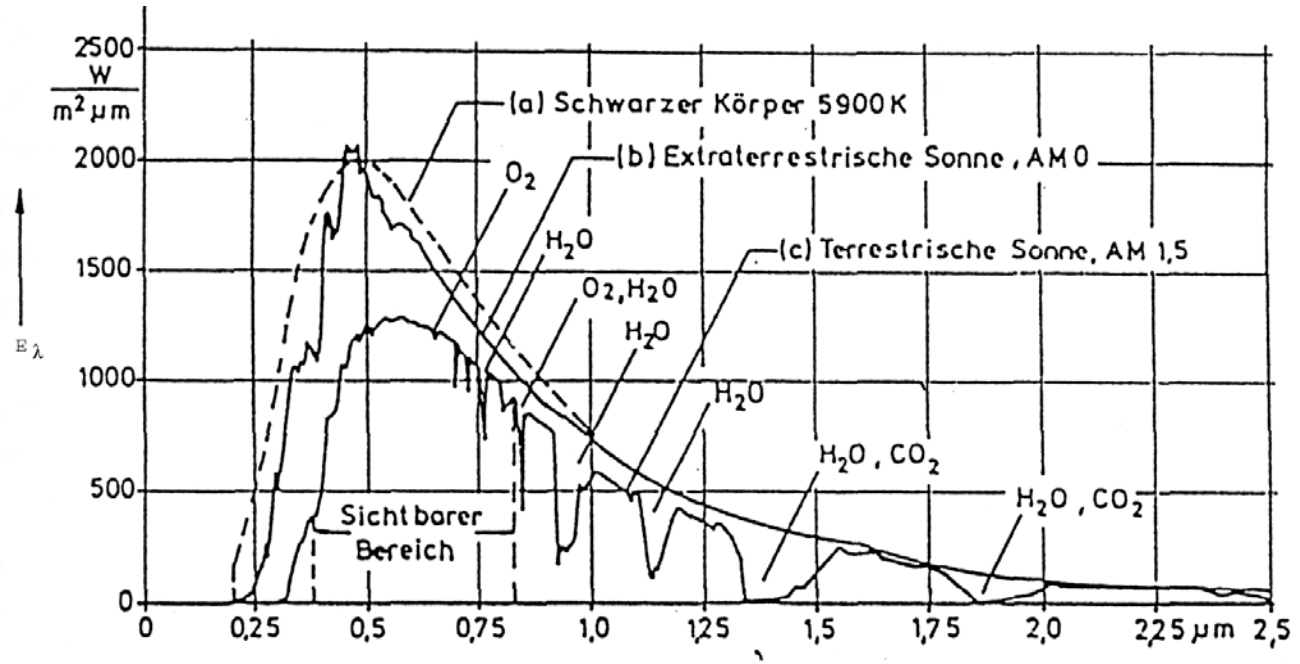
Sonnenspektrum

Extraterrestrisches Sonnenspektrum:

- Kontinuierliches Spektrum mit Maximum bei 478 nm
- beschreibbar mit der Planck‘schen Formel der spektralen Strahldichte eines Schwarzen Körpers der Temperatur T=5900K:

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

Spektrale Bestrahlungsstärken E_λ



Wellenlänge λ

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:**

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

$$\mathrm{E_0} = \frac{\Phi_\mathrm{S}}{4\pi \left\langle \mathrm{r_{SE}}^2 \right\rangle}$$

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**:

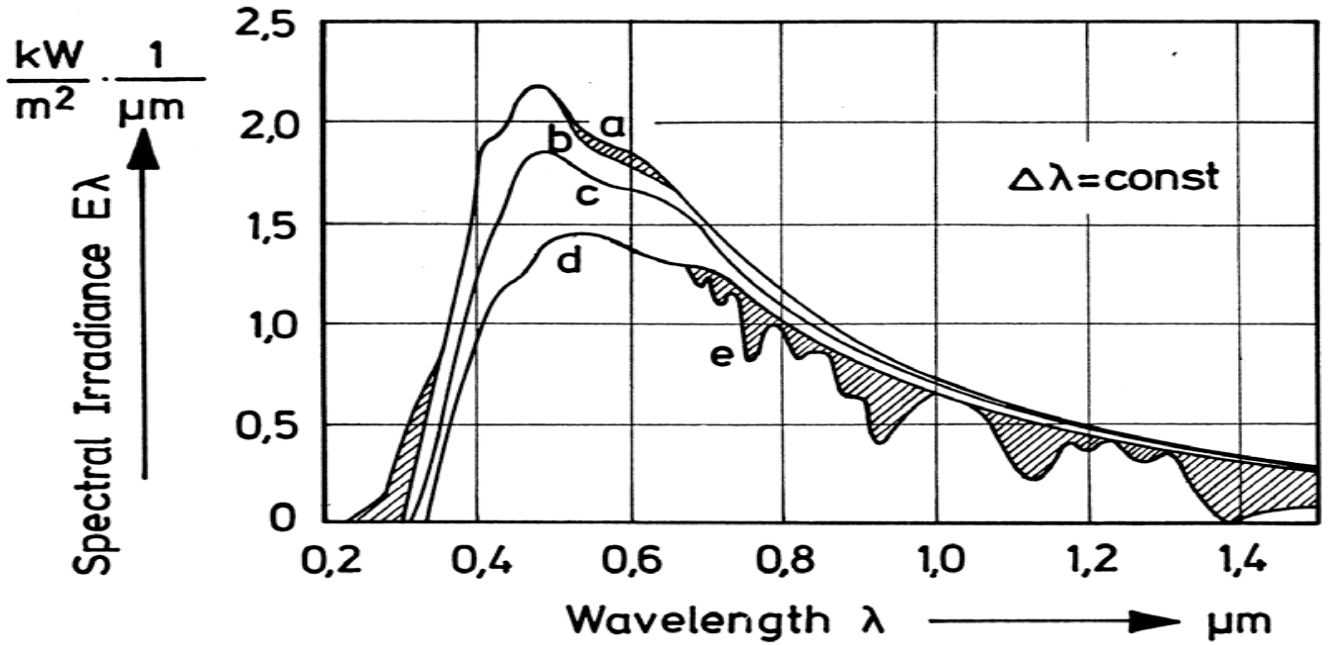
- **Ozonschicht** (O_3) in der Stratosphäre filtert Strahlung unter 300nm heraus.

- **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 < λ). Streuquerschnitt proportional zu λ^{-4}
  $\rightarrow$ Blaue Strahlung wird stärker herausgestreut als rote

- **Mie-Streuung** an Staubteilchen und Verunreinigungen der Luft (Aerosolen) mit Durchmesser > λ - 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

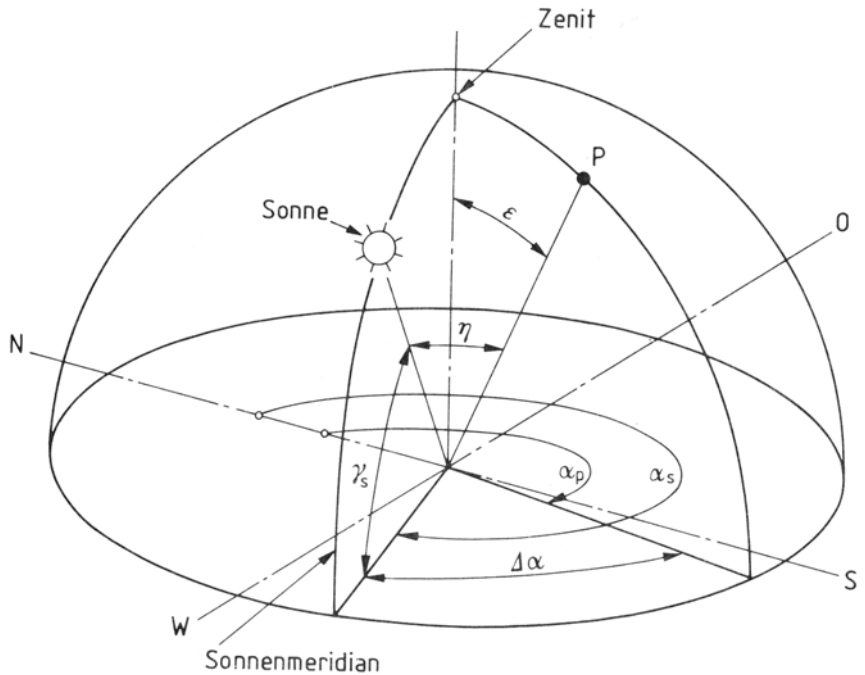
γ_S Sonnenhöhe

α_S Sonnenazimut

Wintersonnenwende am 21. Dezember:
Sonnenstand senkrecht über 23,5° südlicher Breite

Sommersonnenwende am 21. Juni
Sonnenstand senkrecht über 23,5° nördlicher Breite

Karlsruhe auf 49° nördlicher Breite
$49° + 23{,}5° = 72{,}5° < 90° - \gamma_s < 49° - 23{,}5° = 25{,}5°$



Winkel zur Berechnung der Sonneneinstrahlung

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° bzw. die Sonnenhöhe 41°.

Air Mass und horizontale Bestrahlungsstärke

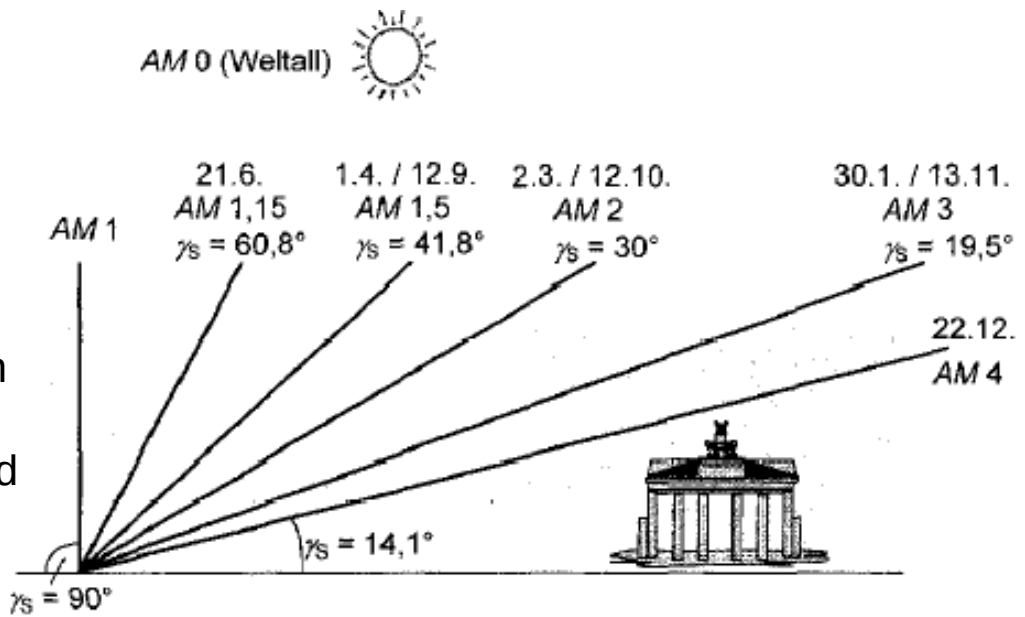
Maß der Gesamtextinktion ist der Linke-Trübungsfaktor T_L:

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

δ_R = mittlere optische Dicke der reinen, trockenen Rayleigh-Atmosphäre
p/p_o = Luftdruckkorrektur

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

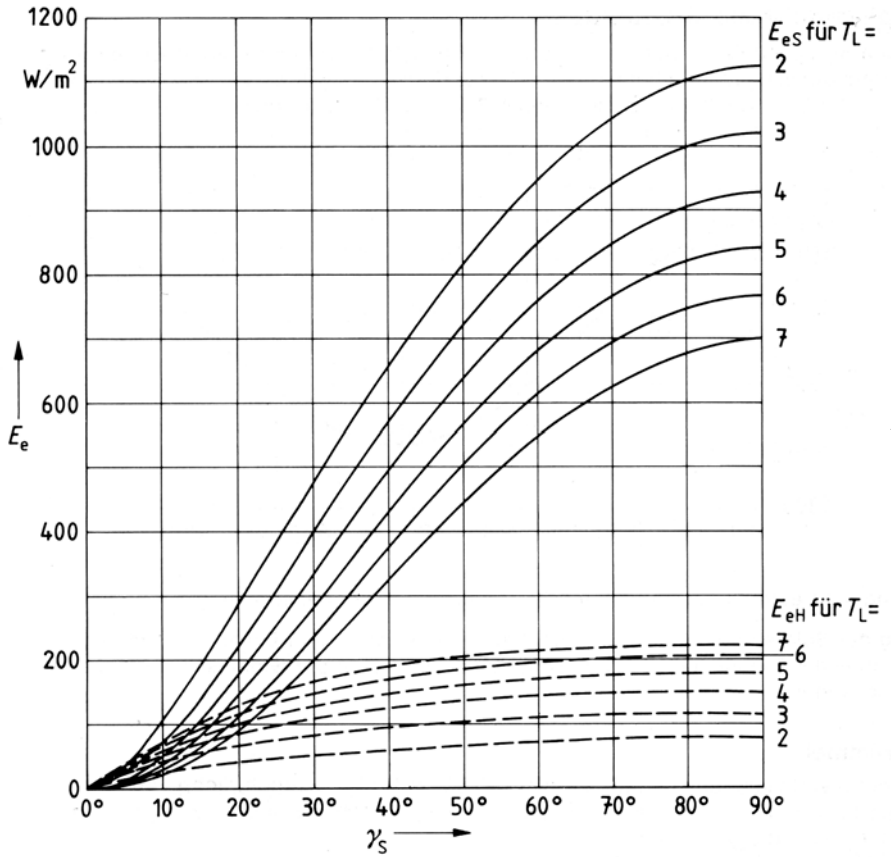
AM-Werte für Berlin an verschiedenen Tagen bei Sonnenhöchststand



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 Trübungsfaktoren (nach Linke)

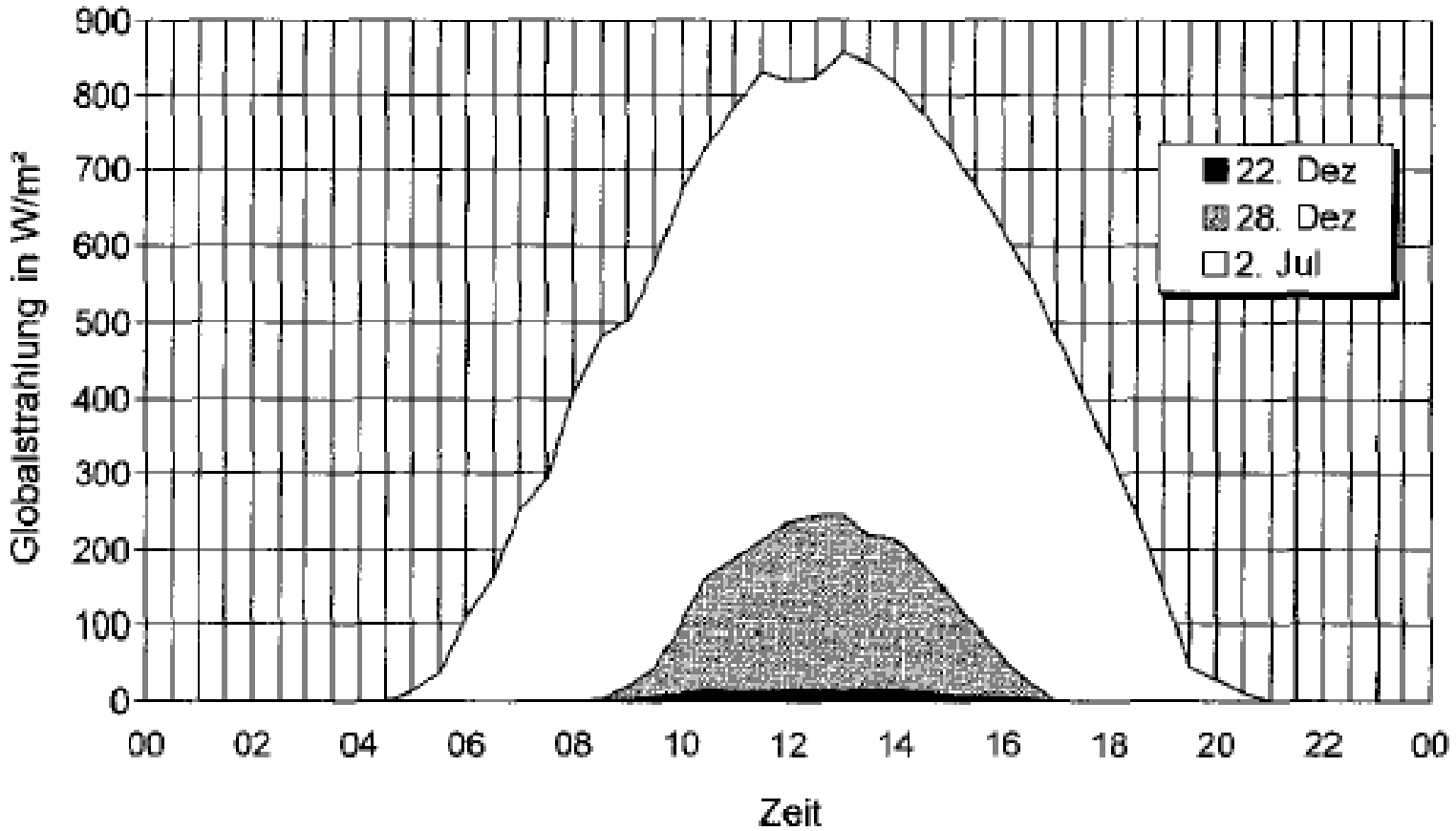
Bedingt durch die Erdrotation mit 1 U/Sterntag und elliptische Bahnbewegung der Erde um die Sonne mit einer mittleren Geschwindigkeit von 29,79 km/s ändert sich der Sonnenstand mit der Jahreszeit, der Tageszeit und der geographischen Breite.

Reduktionseinflüsse in Abhängigkeit der Sonnenhöhe

γ_S	AM	Absorption	Rayleigh-Streuung	Mie-Streuung	Gesamt-schwächung
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 %

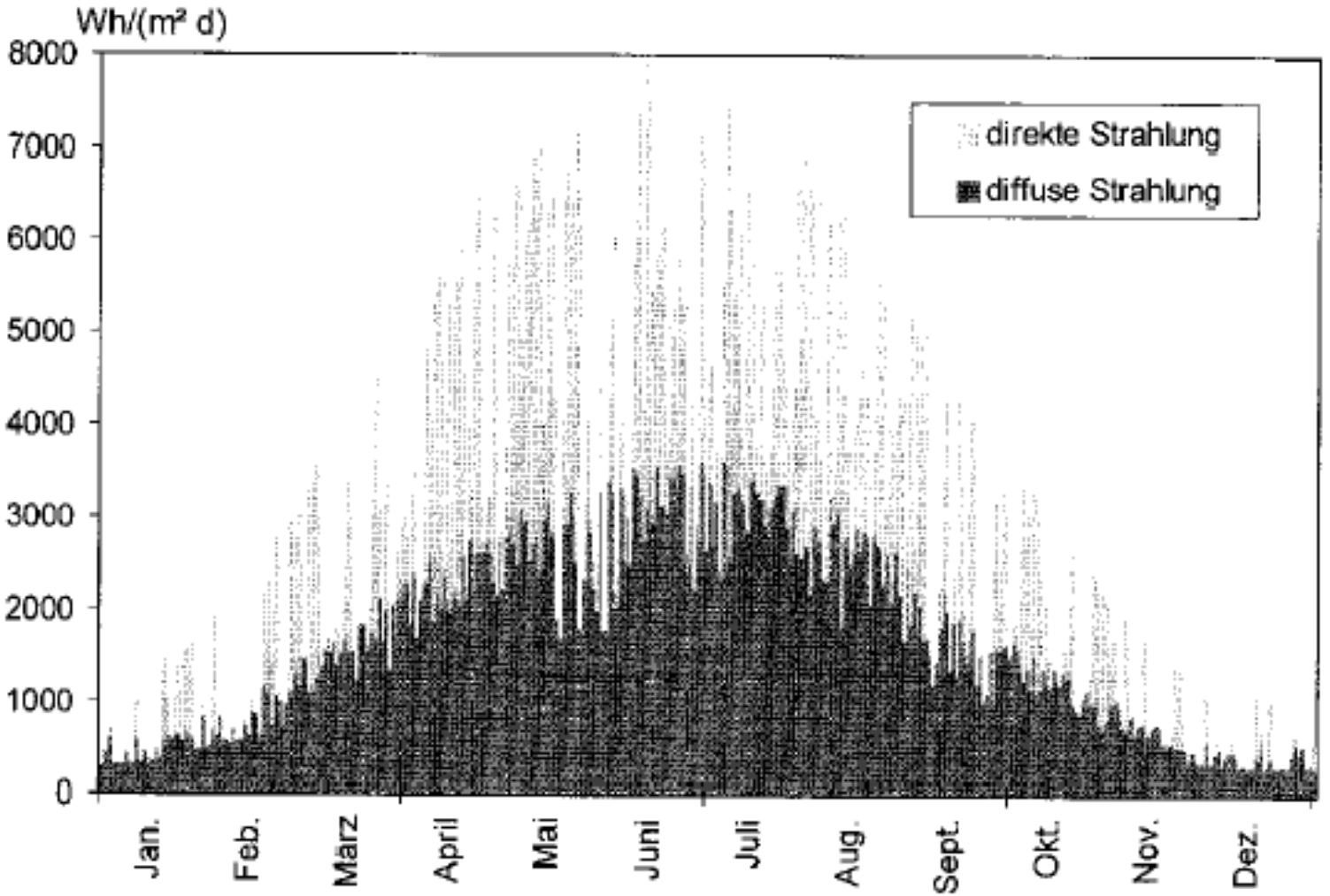
Hinzu kommen Reduktionen infolge von Witterungseinflüssen wie starke Bewölkung, Schneefall oder Regen.

Tagesgänge der Globalstrahung



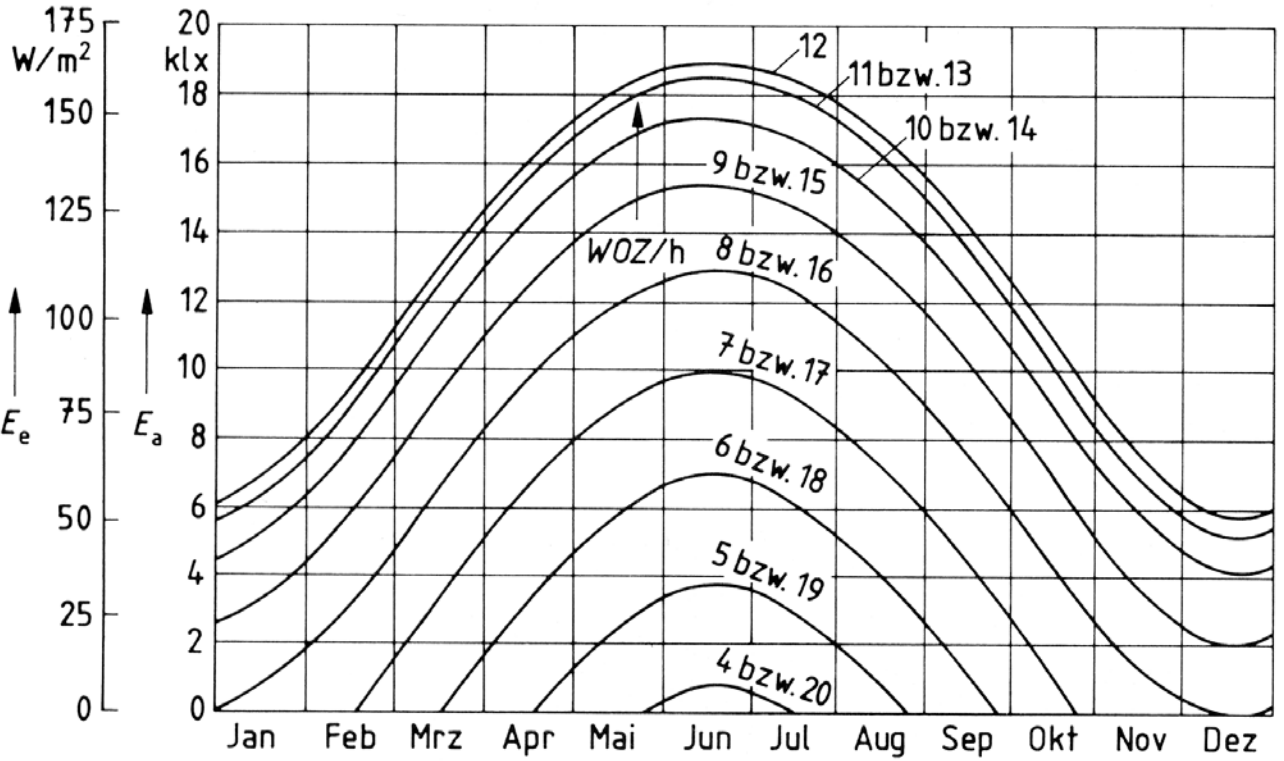
Karlsruhe am 2.7., einem wolkenlosen Sommertag, am 22.12., einem stark bedecktem Wintertag, und am 28.12.1991, einem wolkenlosen Wintertag

Tagessummen von Direkt- und Diffusstrahlung



Typischer Verlauf für Berlin. Beachte die starke Variabilität!

Monatsgänge der Globalstrahlung



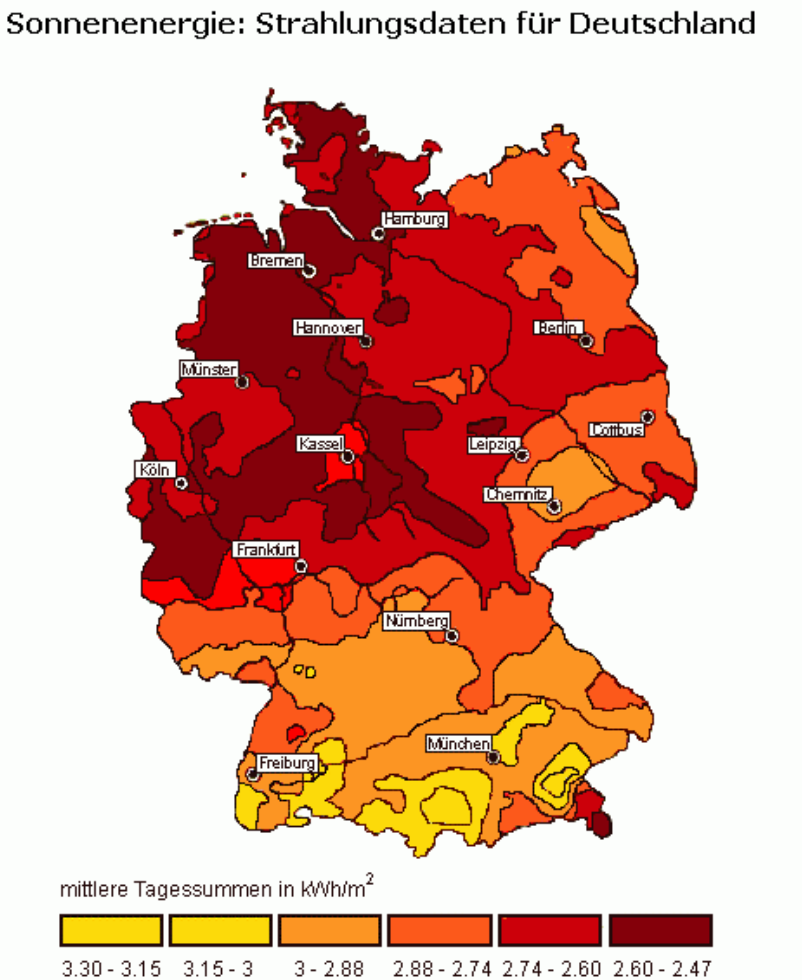
Horizontale Beleuchtungsstärke E_v und horizontale Bestrahlungsstärke E bei bedecktem Himmel für 51° nördlicher Breite in Abhängigkeit von Jahres und Tageszeit

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

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

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

Tagesbestrahlungen in 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^2a).

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

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

Erde: Mittel 230 W/m^2.
D: Sommereinstrahlung =5*Wintereinstrahlung

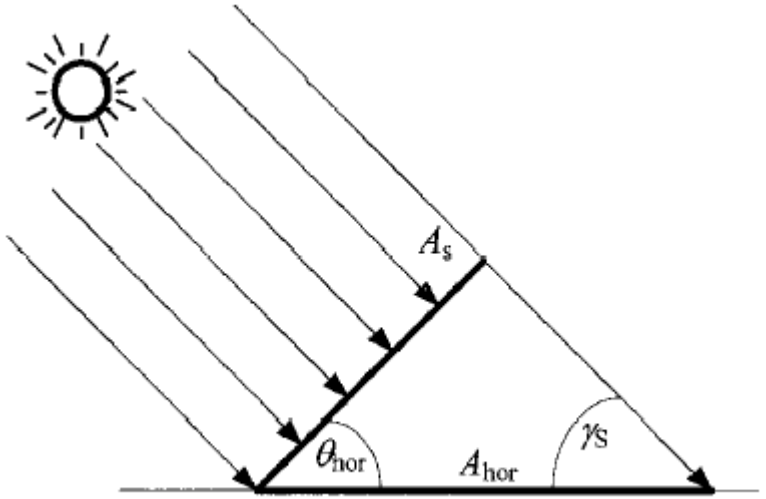
Durchschnittliche Sonnenstunden pro Jahr (direkter Sonnenstrahlung mit mindestens 0,2 kW/m^2)
Deutschland 1300 – 1900 h.

Tagessummen für deutsche Orte

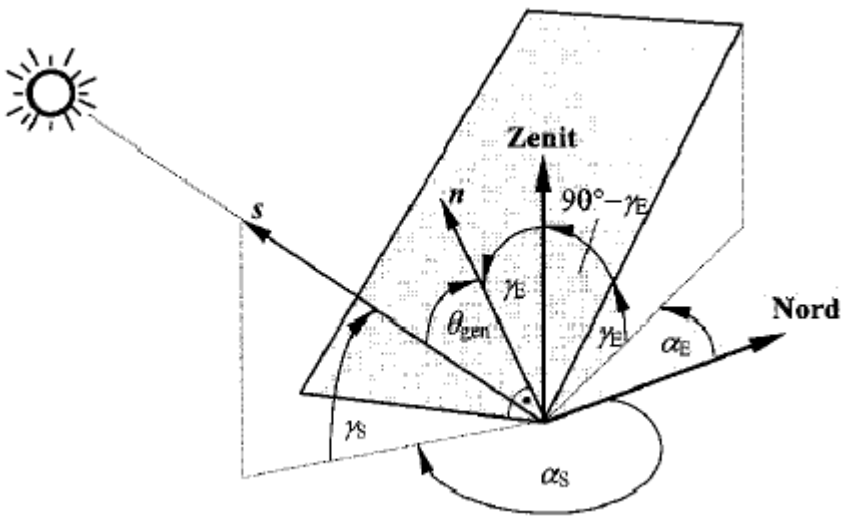
Tagessummen der Globalstrahlung für Orte in Deutschland

Ort	Durchschnittliche Globalstrahlung pro Tag (kWh/m2*d). Bezug: ebene Fläche												
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	kWh m2/a
Berlin	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
Hamburg	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
Bremen	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
Hannover	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
Göttingen	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
Braunlage	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
Dortmund	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
Essen	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
Bocholt	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
Münster	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
Osnabrück	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
Köln	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
Aachen	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
Trier	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
Lüdenscheid	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
Kahler Asten	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
Frankfurt	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
Mannheim	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
Stuttgart	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
Tübingen	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
Karlsruhe	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
Freiburg	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
München	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
Kempten	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
Ulm	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
Regensburg	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
Würzburg	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

Direkte Sonneneinstrahlung auf geneigte Ebene



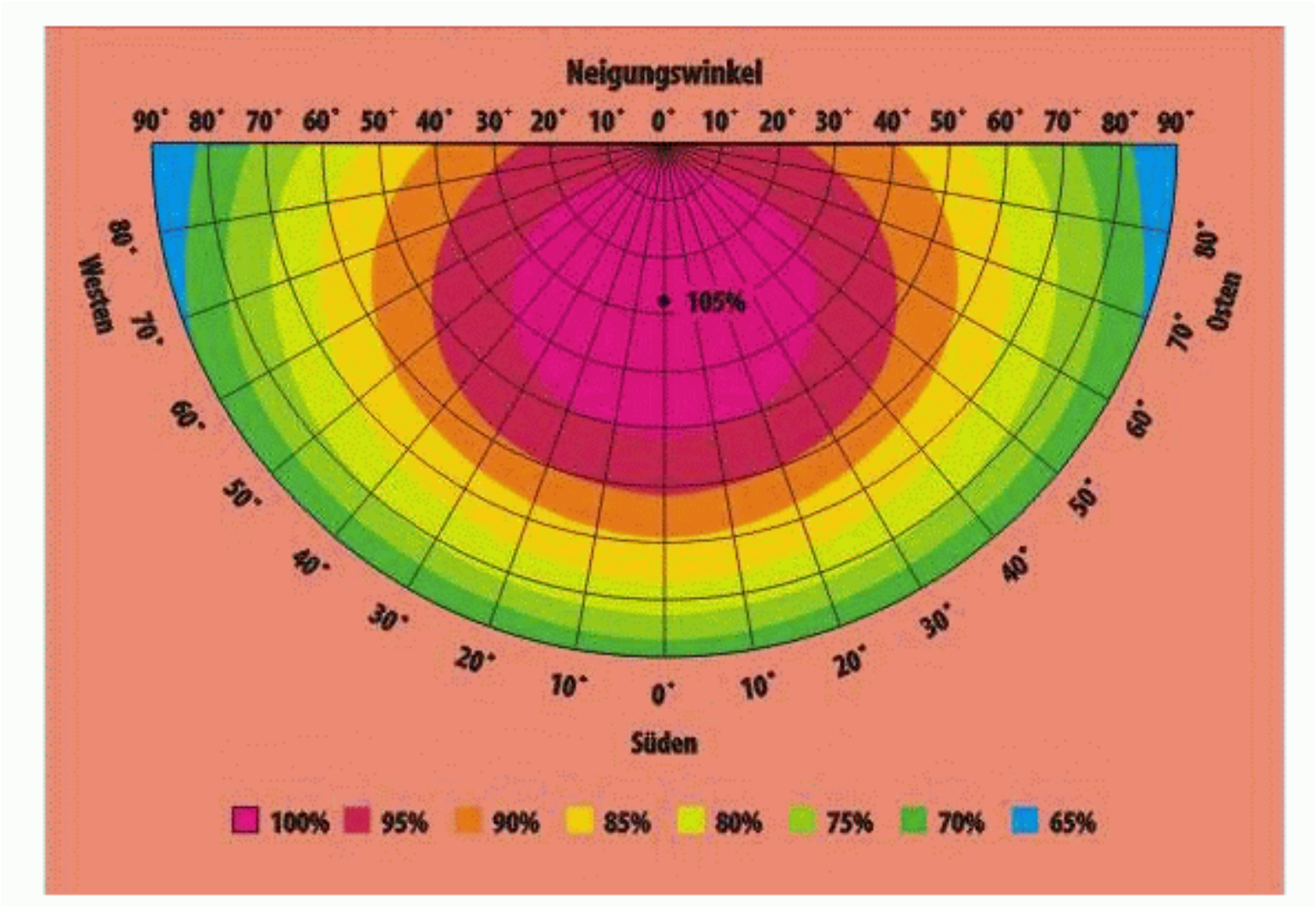
$$E_{dir,s} = \frac{E_{dir,hor}}{\sin \gamma_S} \geq E_{dir,hor}$$



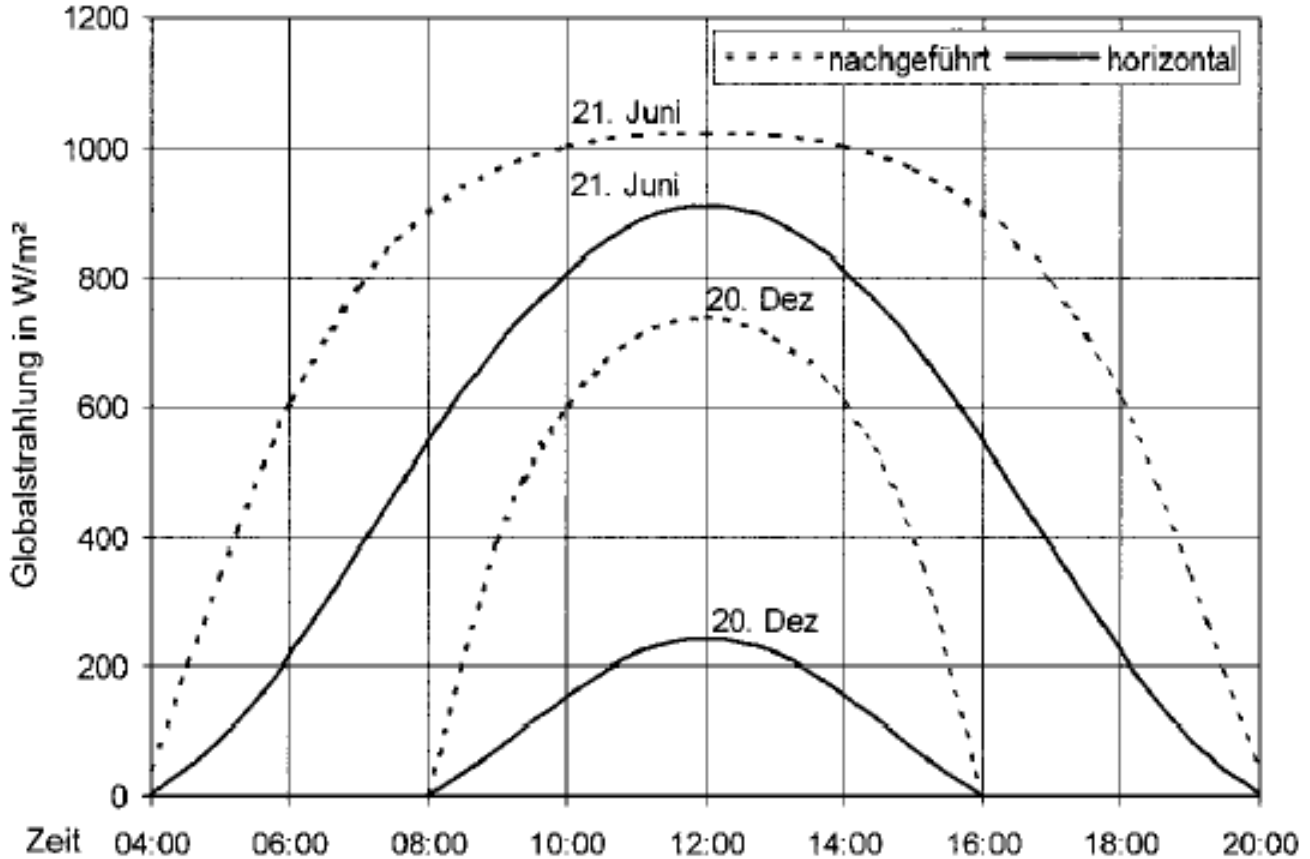
$$E_{dir,gen} = E_{dir,hor} \cdot \frac{\cos \theta_{gen}}{\sin \gamma_S}$$

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° geografische Breite