

# Solarenergie

## Stand der Technik

Umwelt-Campus Birkenfeld  
11. November 2009

Dipl.-Ing. Christian Synwoldt



# Referent

## ■ Christian Synwoldt

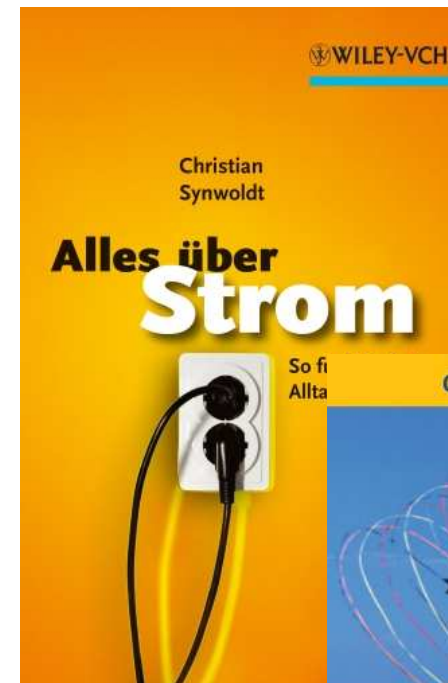
### ■ Autor

- Mehr als Sonne, Wind und Wasser
- Alles über Strom

### ■ Dozent

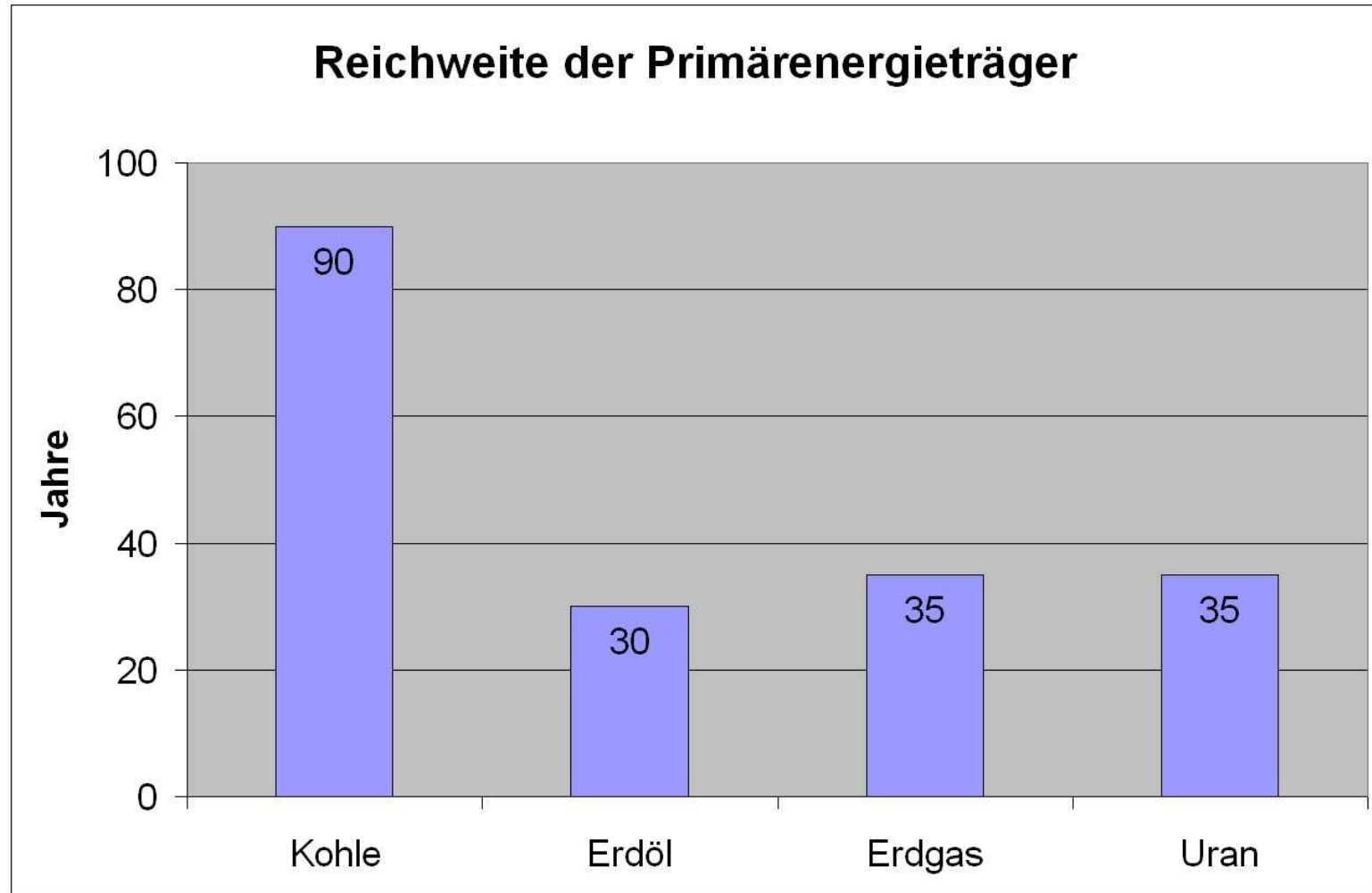
- Umweltcampus Birkenfeld, FH-Trier

### ■ Freier Berater





# Warum Solarenergie?



Quelle:  
IEA, 2004



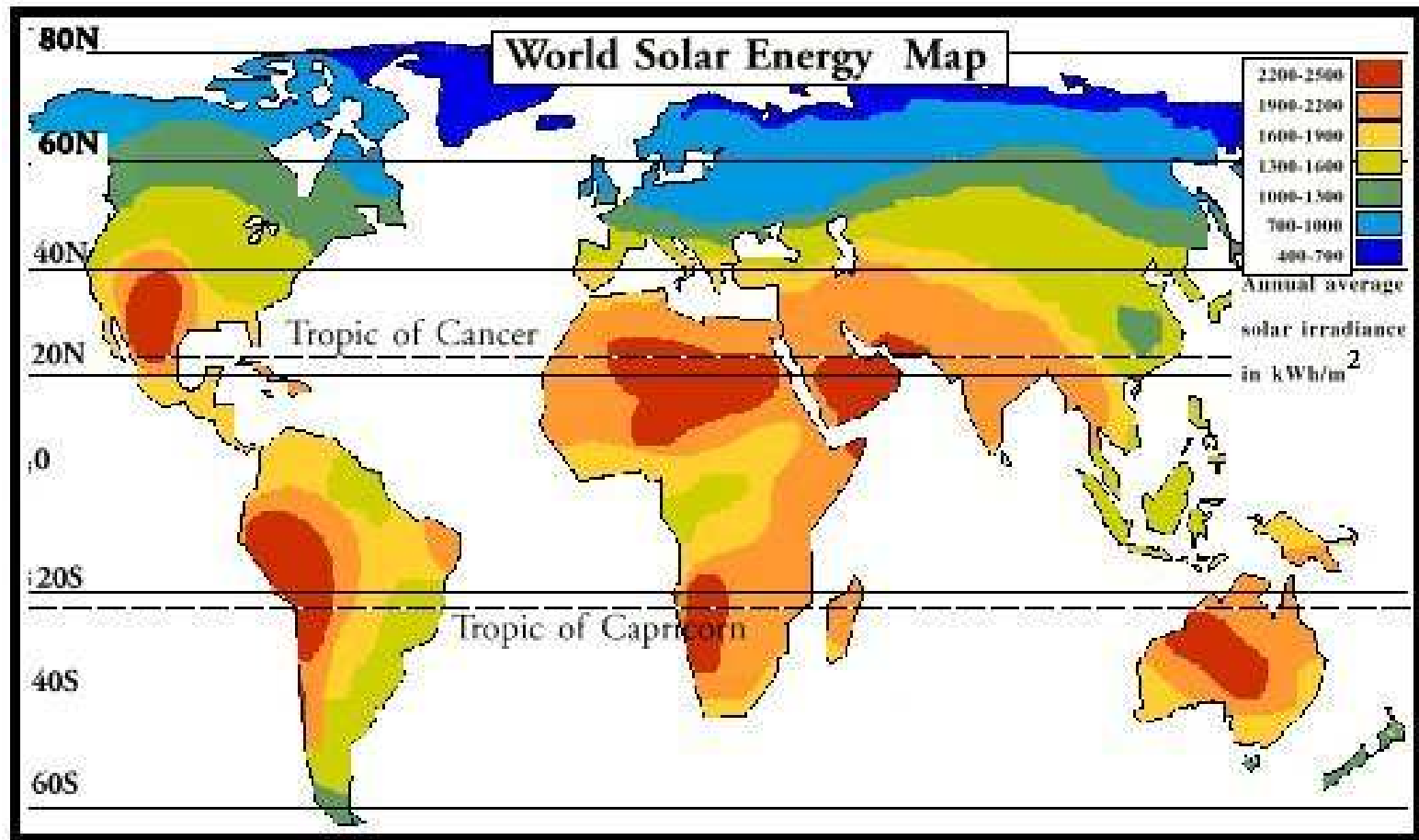
# Darum Solarenergie!

- (Längen-)Vergleich
  - Reichweite konventioneller Energieträger
    - 100 Jahre → 1 mm
  
  - mindestens solange scheint die Sonne noch
    - 4,5 Mrd. Jahre → 45.000 km





# Solare Einstrahlung

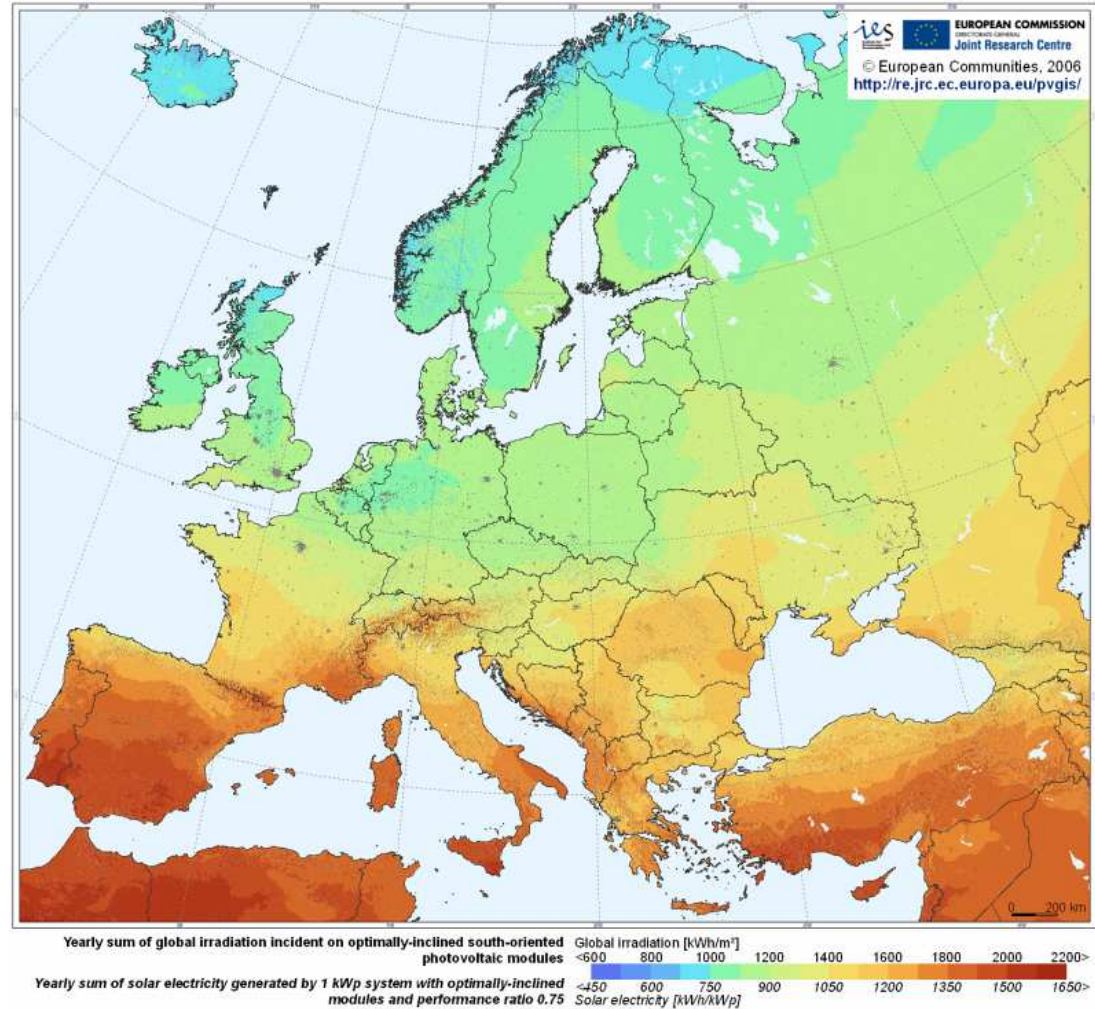


Quelle:  
ase.org.uk



# Solare Einstrahlung

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



Quelle:  
Europäische Union



# Solare Einstrahlung

Global irradiation and solar electricity potential  
Optimally-inclined photovoltaic modules

Croatia



Yearly sum of global irradiation [kWh/m<sup>2</sup>]  
1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900  
975 1050 1125 1200 1275 1350 1425

Authors: M. Šúri, T. Cebecauer, T. Huld, E. D. Dunlop  
PVGIS © European Communities, 2001-2008  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Yearly electricity generated by 1kW<sub>peak</sub> system with performance ratio 0.75 [kWh/kW<sub>peak</sub>]

0 25 50 km

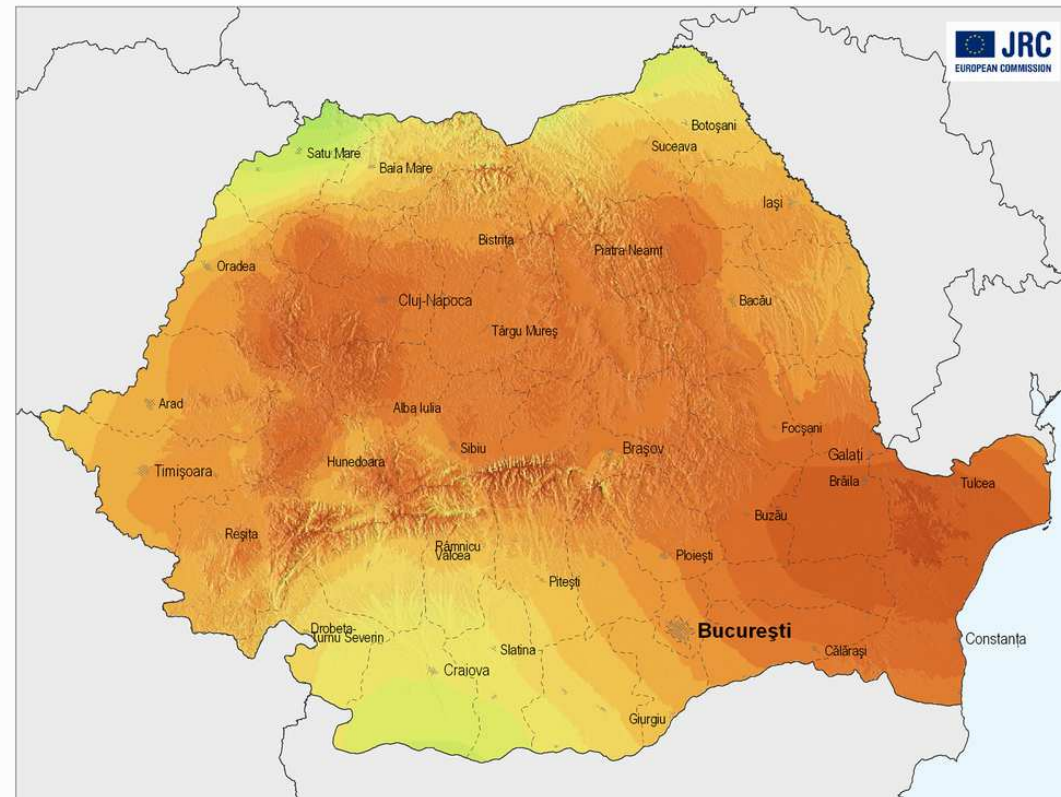
Quelle:  
Europäische Union



# Solare Einstrahlung

Global irradiation and solar electricity potential  
Optimally-inclined photovoltaic modules

Romania



Yearly sum of global irradiation [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ]  
 <1350 1400 1450 1500 1550 1600 1650  
 <1013 1050 1088 1125 1163 1200 1238  
 Yearly electricity generated by  $1\text{kW}_{\text{peak}}$  system with performance ratio 0.75 [ $\text{kWh}/\text{kW}_{\text{peak}}$ ]

Authors: M. Štírl, T. Cebecauer, T. Huld, E. D. Dunlop  
 PVGIS © European Communities, 2001-2008  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Quelle:  
Europäische Union





# Technologien

- Photovoltaik
- Solarthermie

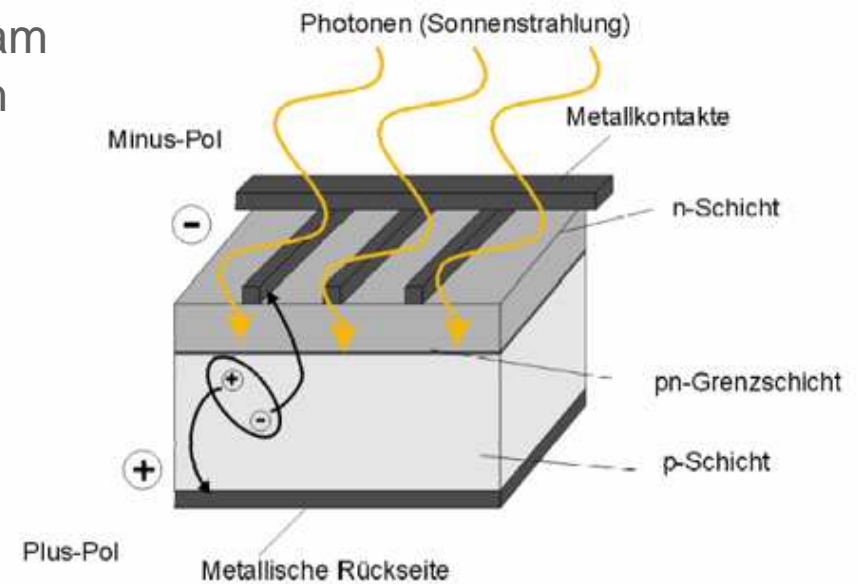


Quelle:  
ZAE-Bayern



# Technologien

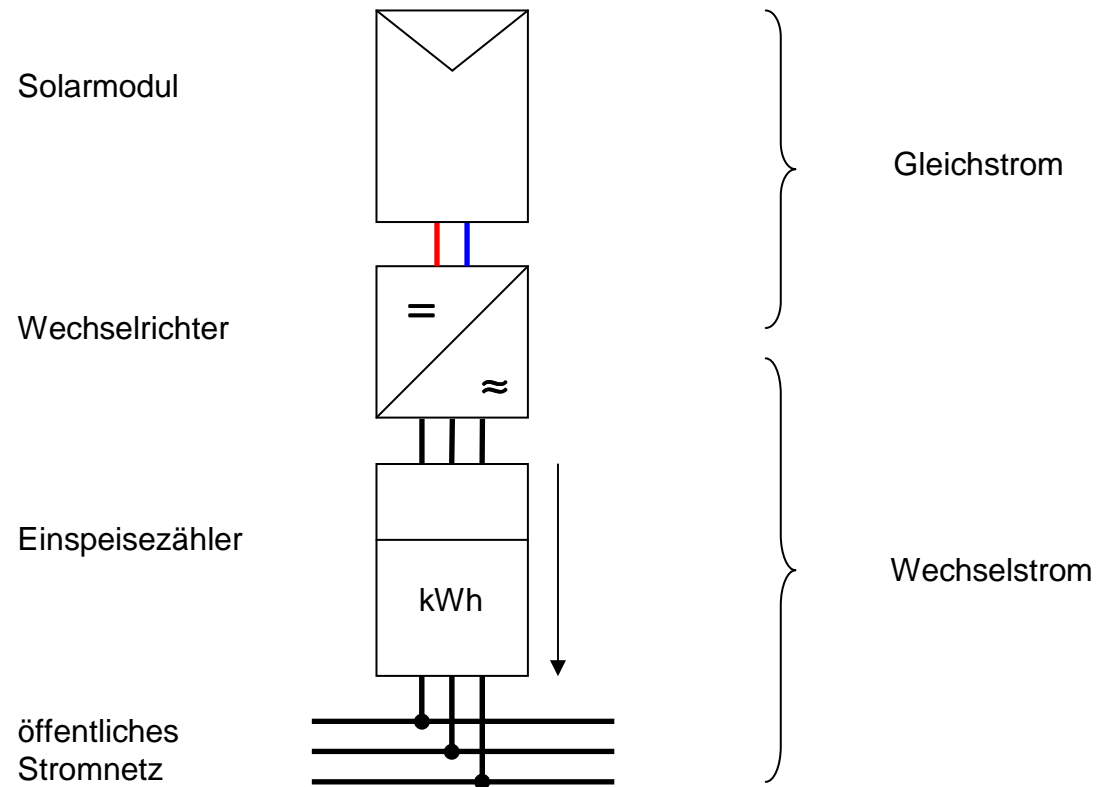
- Photovoltaik
  - innerer Photoeffekt
    - direktes Umsetzen von Strahlung in Elektrizität
    - Ladungstrennung am pn-Übergang durch Lichteinstrahlung





# Photovoltaik

## ■ Netzeinspeisung





# Photovoltaik

## ■ Solarzellen

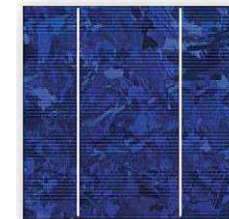
### ■ Monokristallin

- Wirkungsgrad 15-17 %



### ■ Polykristallin

- Wirkungsgrad 13-15 %



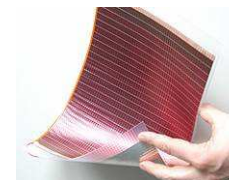
### ■ Amorphes Silizium

- Wirkungsgrad 6-8 %



### ■ Dünnschicht

- CdTe, CIS, CIGS
- Wirkungsgrad 6-14 %





# Photovoltaik

- Wechselrichter
  - Wirkungsgrad 90-96 %
  - Lebensdauer > 10 Jahre





# Photovoltaik

## ■ Kenngrößen

### ■ Spitzenleistung

- kW<sub>p</sub> (Kilowatt peak)

### ■ benötigte Dachfläche

- Schrägdach ca. 6-15 m<sup>2</sup> pro 1 kW<sub>p</sub>
- Flachdach ca. 20-50 m<sup>2</sup> pro 1 kW<sub>p</sub>

### ■ Stromertrag

- kWh (Kilowattstunden) ca. 850-900 kWh/kW<sub>p</sub> (D)

### ■ Lebensdauer

- Solarmodul ca. 25-30 Jahre



# Photovoltaik

- Kenngrößen
  - Degradation der Module
    - jährlich 0,5-1%
    - Leistungsgarantie der Hersteller: 80% nach 20 Jahren
  - Rekombination
    - kristalline Zellen ca. 0,5 %/°C
    - Dünnschicht ca. 0,2 %/°C
  - Reduzierte Leistung bei (Teil-)Abschattung
    - Standortwahl
    - Verschaltung der Strings



# Photovoltaik

## ■ Energetische Amortisation

	Deutschland 1.000 kWh/m <sup>2</sup> ·a	Südeuropa 1.700 kWh/m <sup>2</sup> ·a
■ Mono-kristallin	5,5	2,7
■ Polykristallin	4,5	2,2
■ Dünnschicht	3,7	1,7
■ Trend	1,5	1,0

(alle Angaben in Jahren)

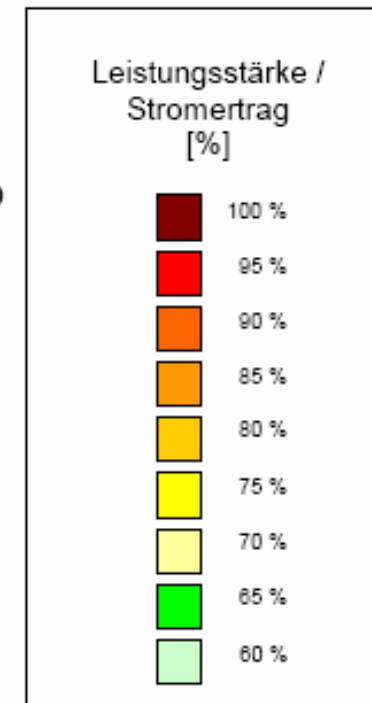
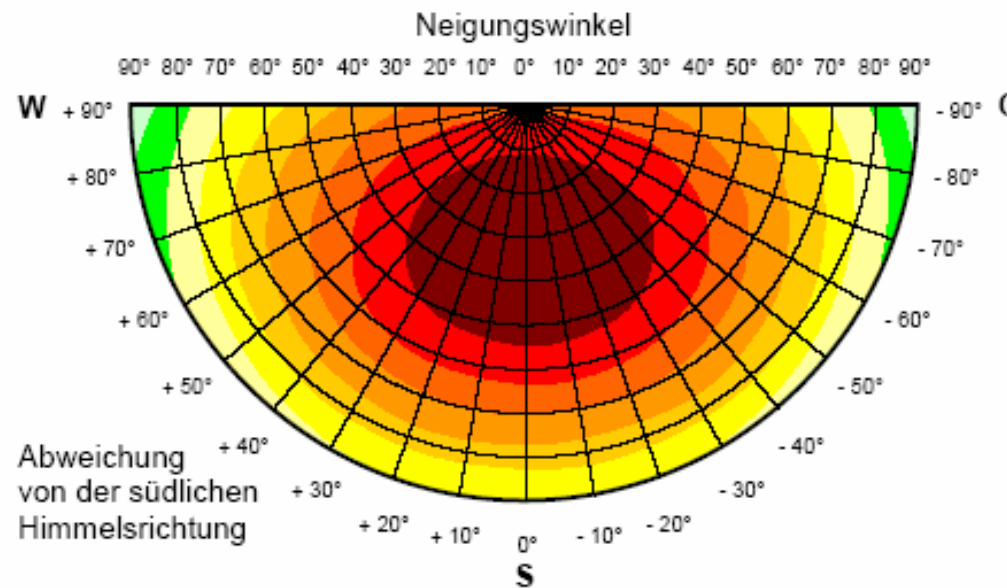
Quelle:  
E. Alsema





# Photovoltaik

- Optimale Ausrichtung der Solargeneratoren
  - Neigung 15-55° → Ganzjahresoptimum (D)
  - Ost < 50°
  - West < 50°



Quelle:  
Photon



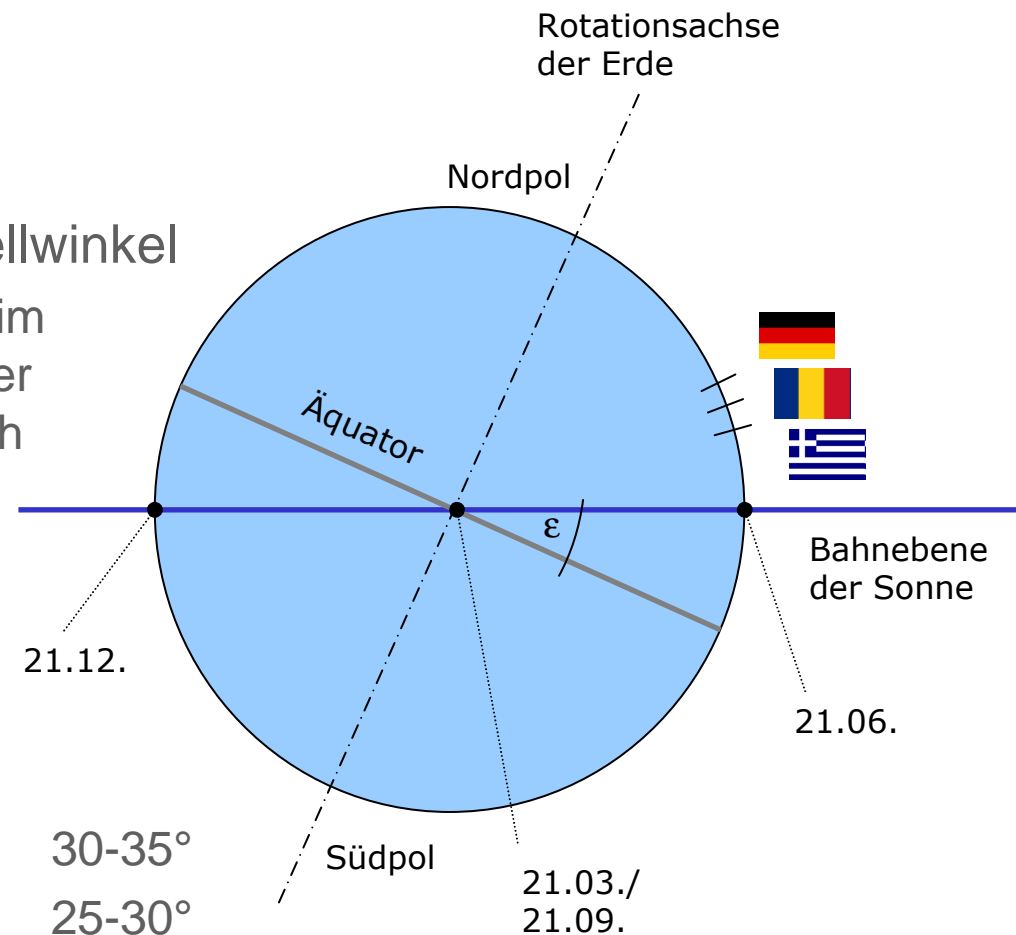
# Sonne

## ■ Ekliptik

- $\varepsilon = 23^{\circ}44'$

- optimaler Anstellwinkel

- Einstrahlung im Sommer höher  
→ maßgeblich



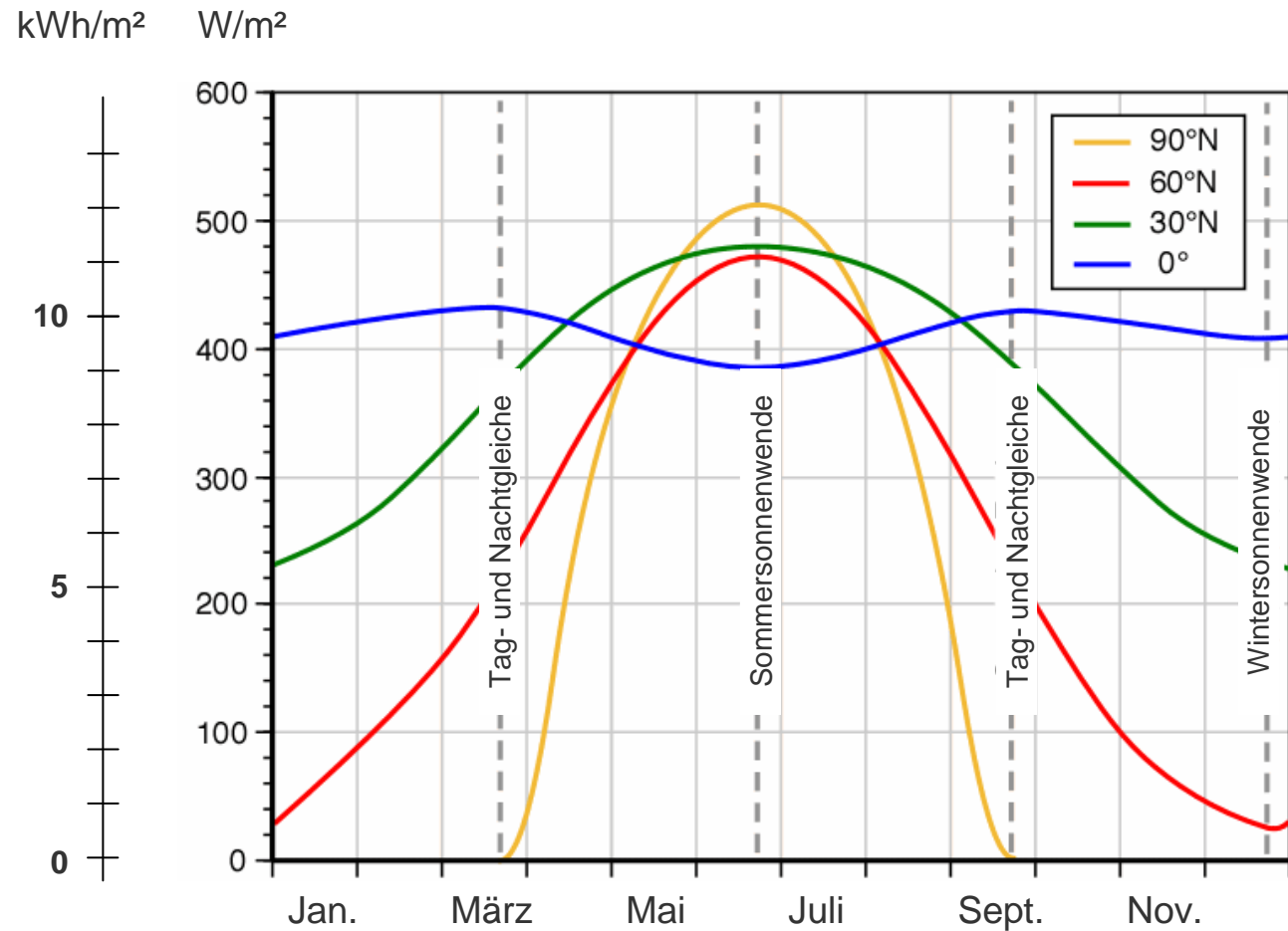
- Deutschland 30-35°
- Rumänien 25-30°
- Griechenland 20-25°



# Sonne

## Variation der Einstrahlung

jeweils Mittelwerte über 24 h, Nordhalbkugel



Quelle: physicalgeography.net



# Photovoltaik

- Flachdach



am Dach verankert



selbst tragende Montage  
(schwimmend)

Quelle:  
Energieagentur NRW



# Photovoltaik

- aufgeständert am Schrägdach



Dachhaken



Dachhaken



Befestigungs-  
konstruktion

Quelle:  
Energieagentur NRW



# Photovoltaik

- Dach-integriert



Dachsteinersatz

Quelle:  
Energieagentur NRW



# Photovoltaik

- Dach-integriert



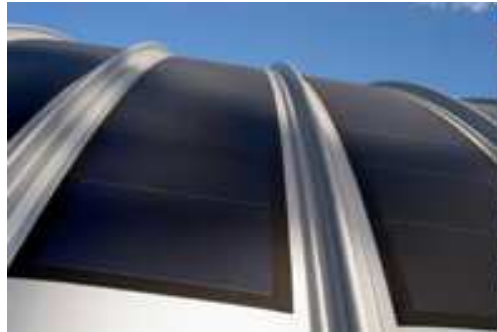
Dachsteinintegriert

Quelle:  
Energieagentur NRW



# Photovoltaik

- Dach- und Gebäude-integriert



Dachbahn



Fassaden



teil-transparent

Quelle:  
Corus, SCHOTT Solar  
AG, Vidur Solar





# Photovoltaik

- Größenordnungen
  - Gebäude-integriert
    - Einfamilienhaus
    - Industriehallen

3-25 kW<sub>p</sub>

1- 5 MW<sub>p</sub>



Quelle:  
SMA, 1 MW<sub>p</sub>



# Photovoltaik

- Größenordnungen
  - Freiflächen
    - Freiflächenanlagen 1-50 MW

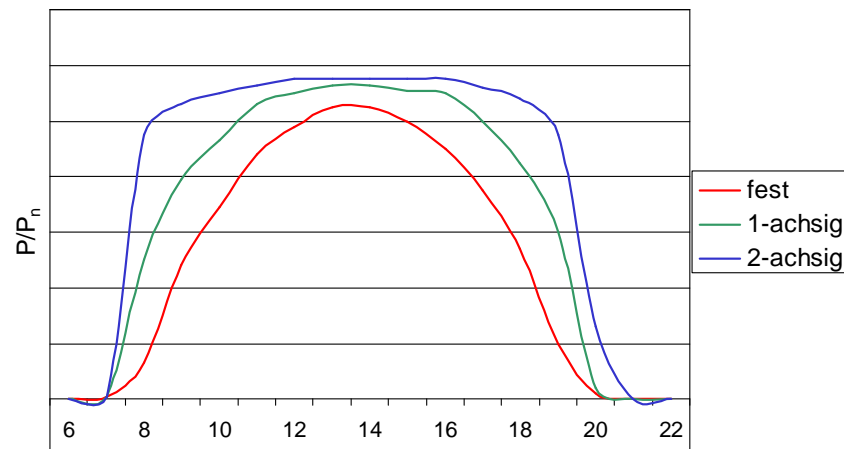


Quelle:  
ralos, juwi



# Photovoltaik

- Erhöhen des Ertrags
  - Synchronisation mit Sonnenstand
    - 1-achsig
    - 2-achsig
  - 20-45 % höhere Ausbeute
    - Direktstrahlung
    - Sommertageslänge

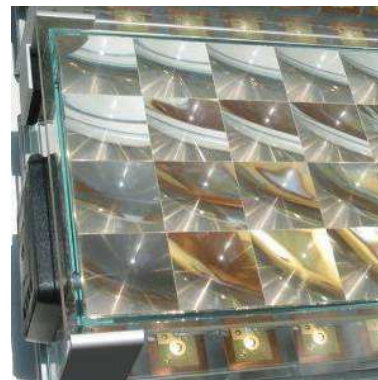
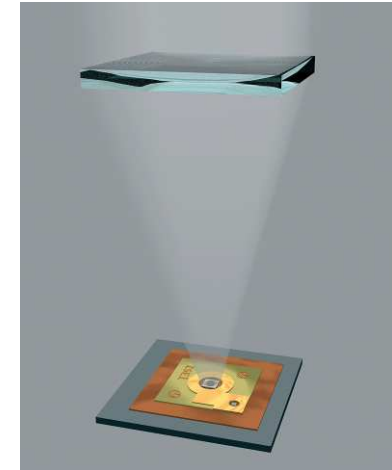


Quelle:  
pv-mover.de



# Photovoltaik

- Erhöhen des Ertrags
  - optische Konzentration
    - Fresnellinse
    - 500-fach konzentrierend
    - >35 % Wirkungsgrad
  - reduzierter Siliziumbedarf
  - Nachführung erforderlich

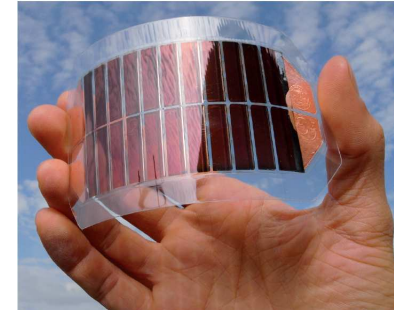


Quelle:  
Fraunhofer ISE



# Photovoltaik

- Trends
  - organische Solarzellen
  - Farbstoffsolarzellen
    - geringer Wirkungsgrad
    - geringe Stabilität
  
- einfacher Aufbau
- geringe Herstellkosten
- flexibler Einsatz



Quelle:  
Fraunhofer ISE

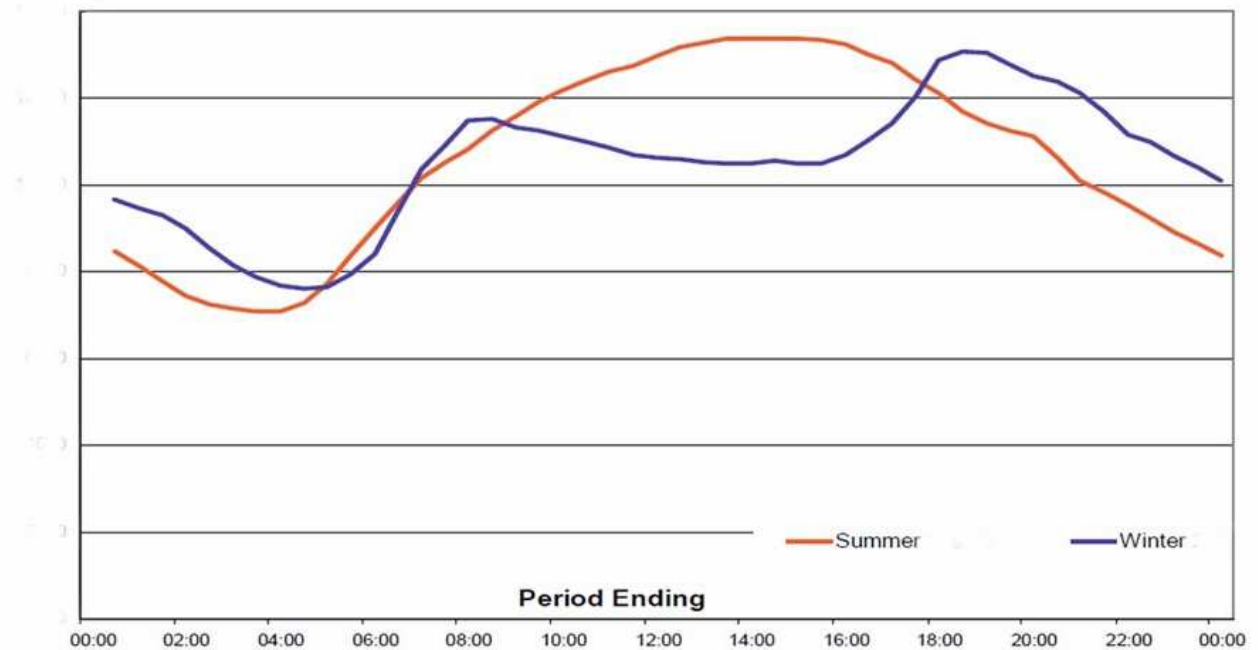


# Photovoltaik

## ■ Trends

### ■ Photovoltaik statt Netzausbau

- Netz: Dimensionierung für Spitzenlast
- Übereinstimmung von Lastprofil und Primärenergieangebot





# Solarthermie

## ■ Bedeutung

### ■ jährliche solare Einstrahlung

- Deutschland 1.000 kWh/m<sup>2</sup>
- Südeuropa 1.700 kWh/m<sup>2</sup>
- Nordafrika 2.000 kWh/m<sup>2</sup>
- Wüsten 2.500 kWh/m<sup>2</sup>

### ■ zum Vergleich

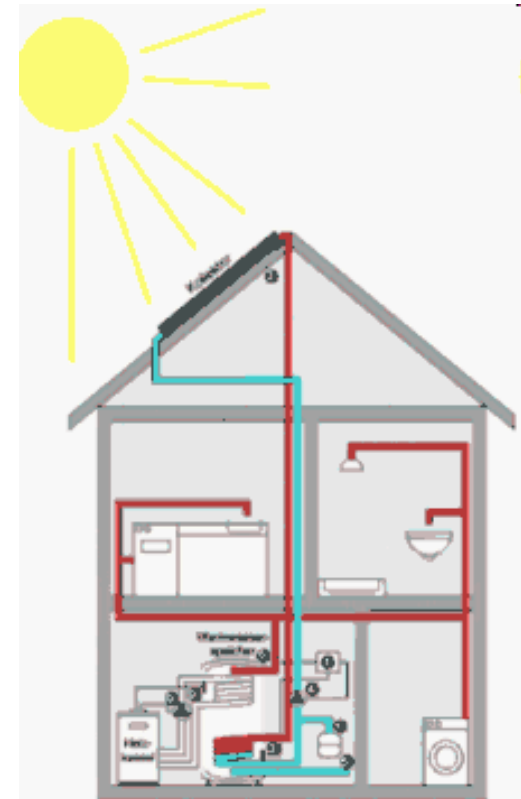
- Heizöl 10 kWh/l
- Steinkohle 8 kWh/kg
- Holz 4 kWh/kg

*Der Heizwert von 2.000 l Heizöl entspricht der jährlichen Einstrahlung auf 20 m<sup>2</sup>.*



# Solarthermie

- Wärme für ...
  - Warmwasser 60 °C
  - Heizung 30-70 °C
  
  - Prozesswärme  $\geq 60$  °C
    - Trocknen
    - Lackiererei
    - Wäscherei
    - Brauerei
  
  - Kältetechnik  $\geq 80$  °C
  
  - Elektrizitätsproduktion  $\geq 90$  °C





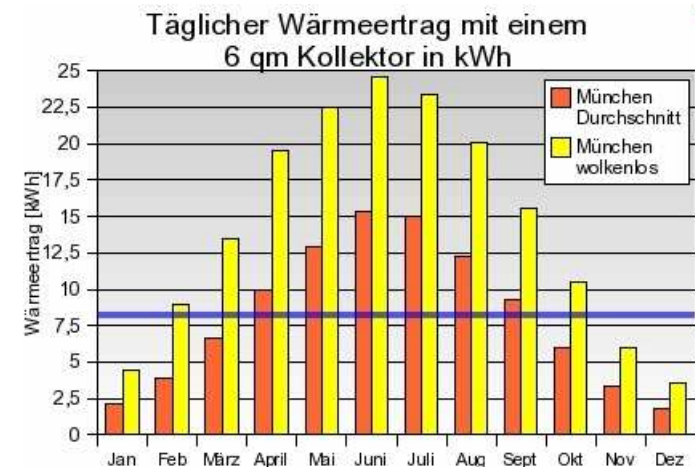


# Solarthermie

## ■ Warmwasser

- Energieeinsparung Heizöl 50-70%  
200-400 l
- Kollektorfläche 1,5 m<sup>2</sup>/Person
- Speicherkapazität 100 l/Person

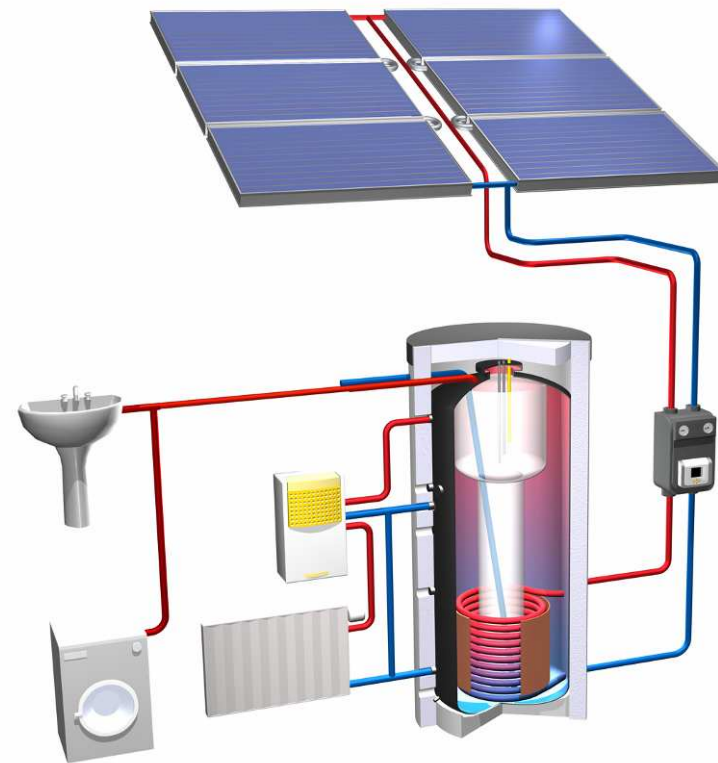
Quelle:  
energiewende-  
oberland.de





# Solarthermie

- Solarwärmeanlage mit Heizungsunterstützung



Quelle:  
wagner-solar.com



# Solarthermie

## ■ Heizungsunterstützung

- Energieeinsparung Heizöl 30-70%  
400-800 l
- Kollektorfläche > 9 m<sup>2</sup>
- Speicherkapazität > 500 l
  
- Marktanteil (D) ca. 50 %

Quelle:  
dena

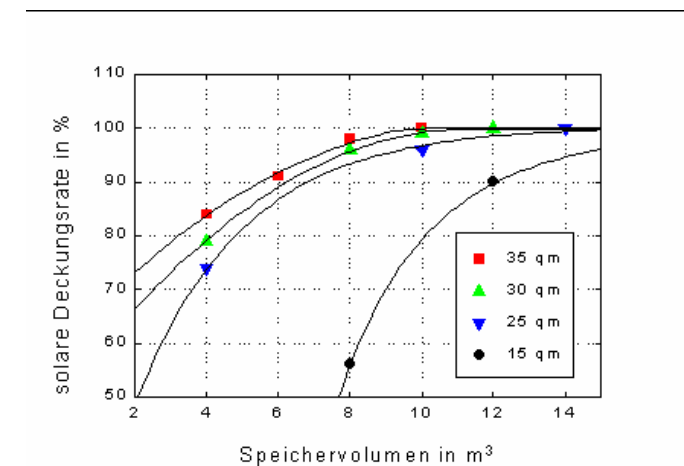


# Solarthermie

## ■ Solarheizung

- Niedrigenergiehaus 4.000 kWh/a (= 400 l Öl)
- Standort Freiburg/Br.
  
- Kollektorfläche 30-35 m<sup>2</sup>
- Speichervolumen (Sorptionspeicher) 10-12 m<sup>3</sup>

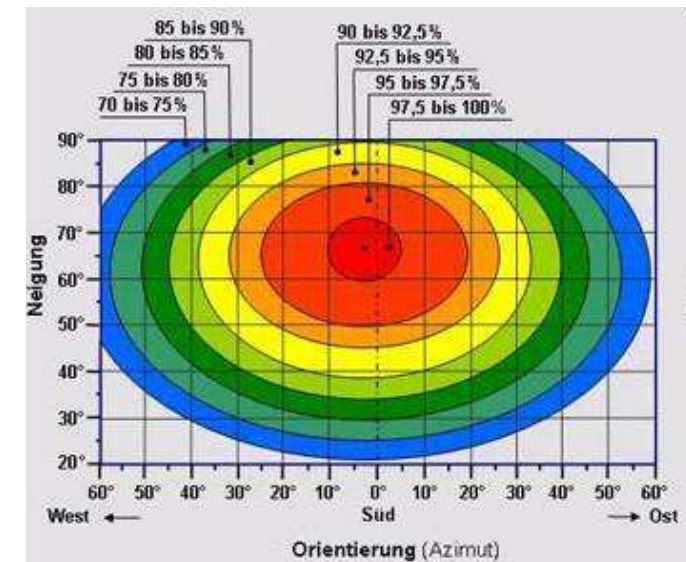
Quelle:  
Fraunhofer ISE





# Solarthermie

- Optimale Ausrichtung der Solarkollektoren (solare Heizung)
  - Neigung 45-85° → Winterbetrieb (D)!
  - Ost < 25°
  - West < 30°



Quelle:  
energieberatung-  
ostbayern.de



# Solarthermie

- Flachkollektor
  - einfacher Aufbau
    - inklusive Speicher
    - zweckmäßig bei höheren Außentemperaturen
  - unverglast
  - Wärmeverluste
  - Temperaturniveau 30-50 °C





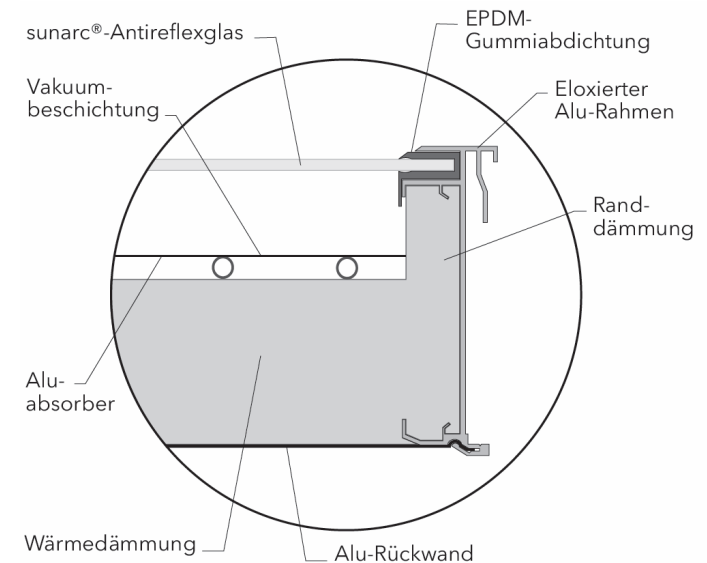
# Solarthermie

## ■ Flachkollektor

### ■ aufwändiger Aufbau

- reduzierte Wärmeverluste
- Marktanteil ca. 90 %
- Temperaturniveau 60-90 °C
- Direkt- und Diffusstrahlung

Quelle:  
dena



Quelle:  
wagner-solar.com



# Solarthermie

- Vakuum-Röhren-Kollektor
  - aufwändiger Aufbau
    - reduzierte Wärmeverluste (besonders im Winter)
    - höheres Temperaturniveau des Arbeitsmediums (bis 120 °C)





# Solarthermie

- Vakuum-Röhren-Kollektor
  - Industrielle Großanlagen
  - Aufbau
    - Ausrichtung der Längsachse in Nord-Süd-Richtung
    - Nachführen in Ost-West-Achse
  
- Konzentrator
  - Fresnellinse
  - Parabolspiegel
  
  - Direktstrahlung





# Solarthermie

- Solarturm
  - Aufbau
    - Heliostatenfeld
    - Hochtemperatur-Receiver

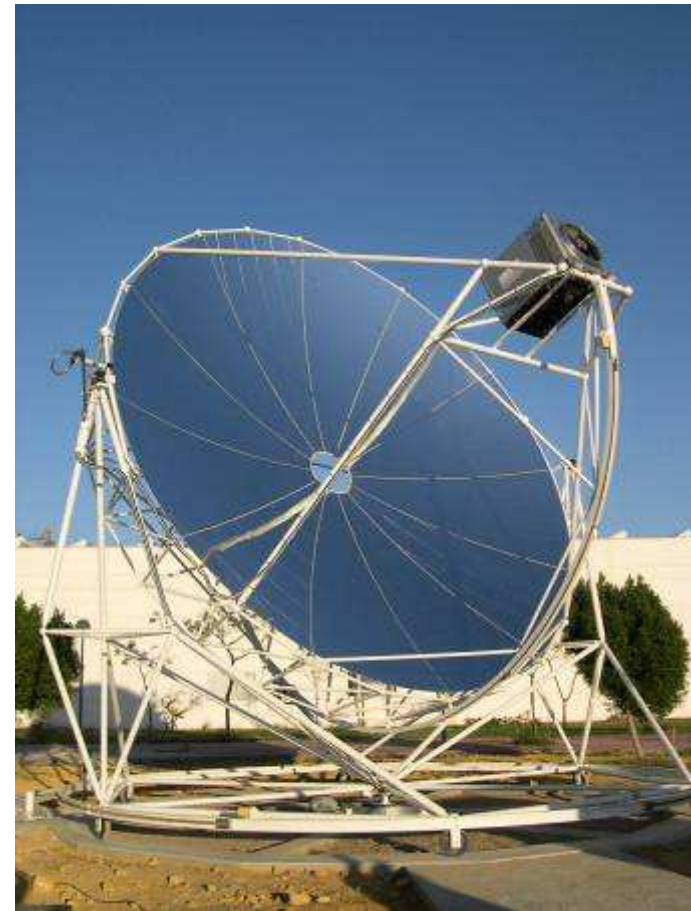


Quelle: DLR  
11 MW, Sevilla



# Solarthermie

- Dish-Sterling
  - Aufbau
    - Parabolspiegel
    - 2-achs. Nachführung
    - Sterlingmotor im Brennpunkt
  - Wirkungsgrad ca. 30 %

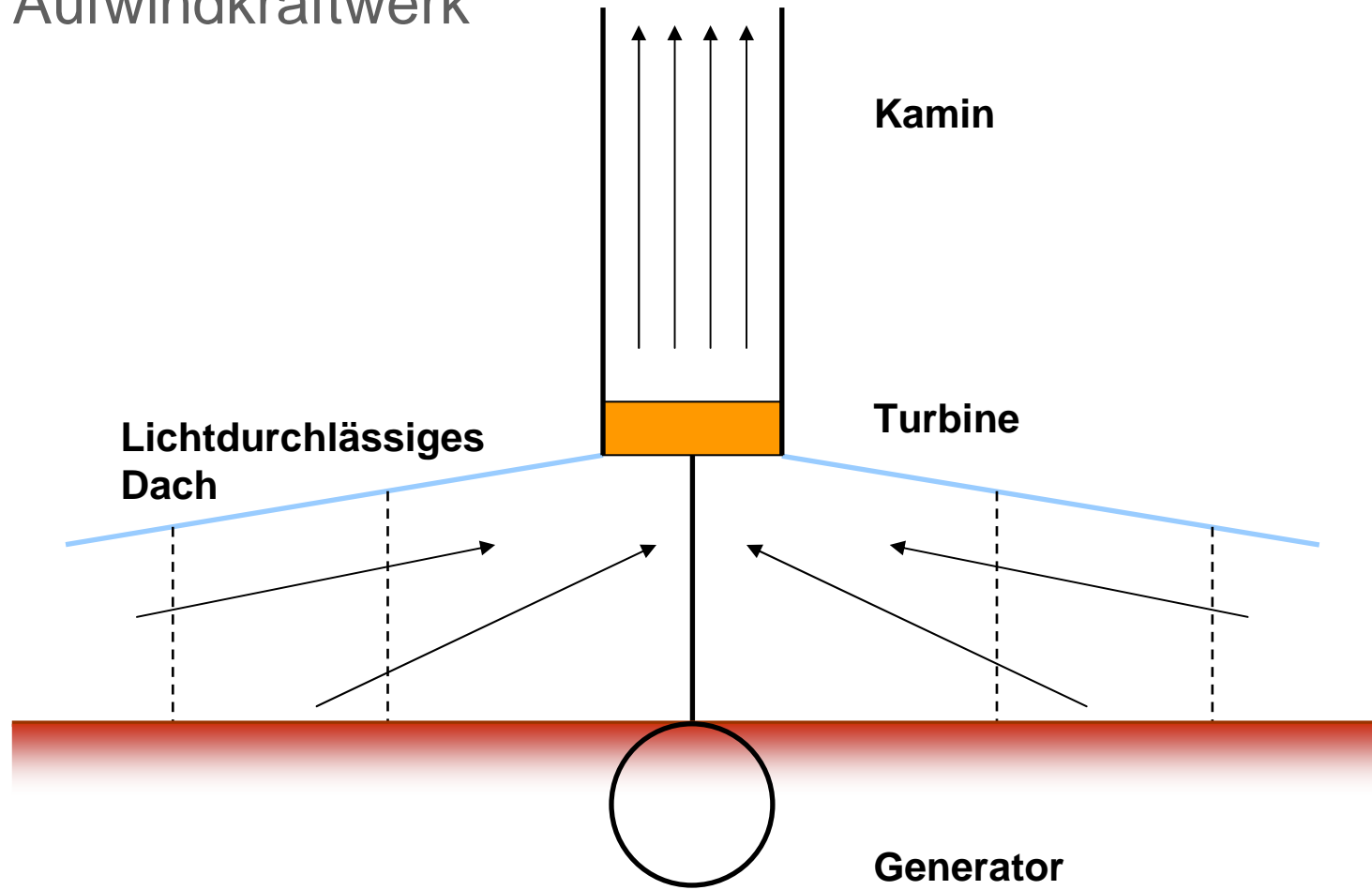


Quelle: DLR  
500 kW<sub>th</sub>



# Solarthermie

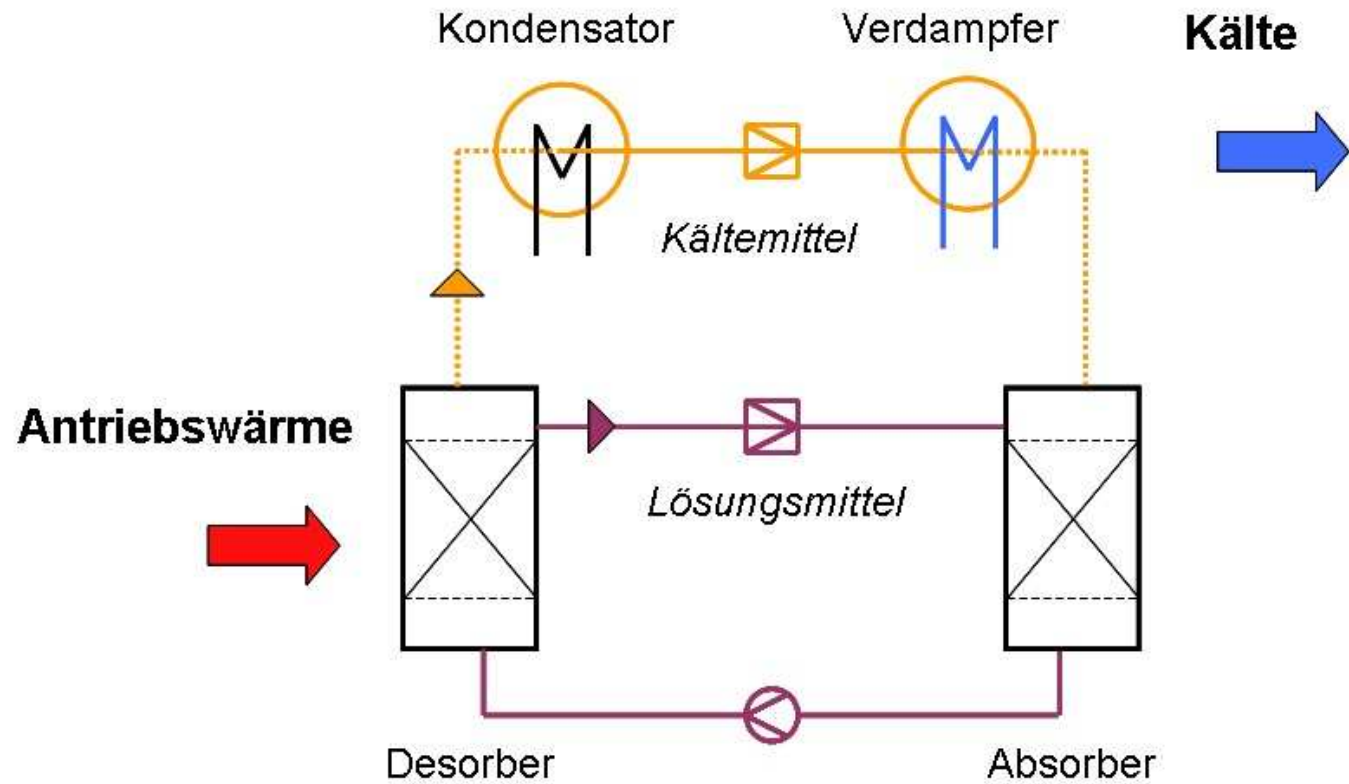
## ■ Aufwindkraftwerk





# Sorptionskühlung

- Kälteanlage mit Wärmeantrieb





# Sorptionskühlung

- Absorptionskältemaschine
  - Funktionsweise
    - Trennen von Kältemittel und Lösungsmittel durch Zufuhr von Wärme (Verdampfen des Kältemittels)
    - Abkühlen und Verflüssigen des Kältemittels durch Wärmeabgabe an Umgebung
    - weiteres Abkühlen des Kältemittels durch Entspannen des Drucks
    - Wärmeentzug aus Klimaanlage, Kühlraum, etc. über Verdampfer
    - Aufnahme des Kältemittels durch das Lösungsmittels



# Sorptionskühlung

## ■ Absorptionskältemaschine

### ■ Kennzahlen

- Leistungszahl  
→ Elektrizitätsbedarf

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{Verdampfer}}}{E_{\text{elektrisch}}}$$

Kältemaschine: EER *energy efficiency ratio*

Wärmepumpe: COP *coefficient of performance*

- Wärmemengenverhältnis  
→ Wärmebedarf

$$\zeta = \frac{Q_{\text{Verdampfer}}}{Q_{\text{Wärmezufuhr}}}$$

### ■ Typische Werte

- Kompressionskältemaschine /  
Wärmepumpe
- Sorptionskältemaschine

$$\varepsilon = 4-5$$

$$\varepsilon = 20-50$$

$$\zeta = 0,3-1,5$$



# Sorptionskühlung

## ■ Absorption

### ■ Wasser-Ammoniak

- Wasser
- Ammoniak

Lösungsmittel

Kältemittel

- Wärmeverhältnis  $\zeta$

0,65 ( $T_{\text{verdampf}} = 0^{\circ}\text{C}$ )

0,3 ( $T_{\text{verdampf}} = -50^{\circ}\text{C}$ )

- Kühltemperatur
- Arbeitstemperatur

> - 60 °C

180 °C





# Sorptionskühlung

## ■ Absorption

### ■ Lithium-Bromid

- Wasser  
bei 10 mbar:
- Lithiumbromid

Kältemittel → harmlos!  
Siedepunkt = 4 °C

Lösungsmittel

- Wärmeverhältnis  $\zeta$

0,6-0,8 (einstufig)  
1,0-1,5 (zweistufig)

- Kühltemperatur
- Arbeitstemperatur

> 5 °C

80-180 °C

- Leistungsbereich

10-5.000 kW



# Solarenergie

- Diskussion und Fragen

