

Photovoltaik



Eine grandiose Präsentation von
Oliver Boldt & Florian Grifka

Photovoltaik

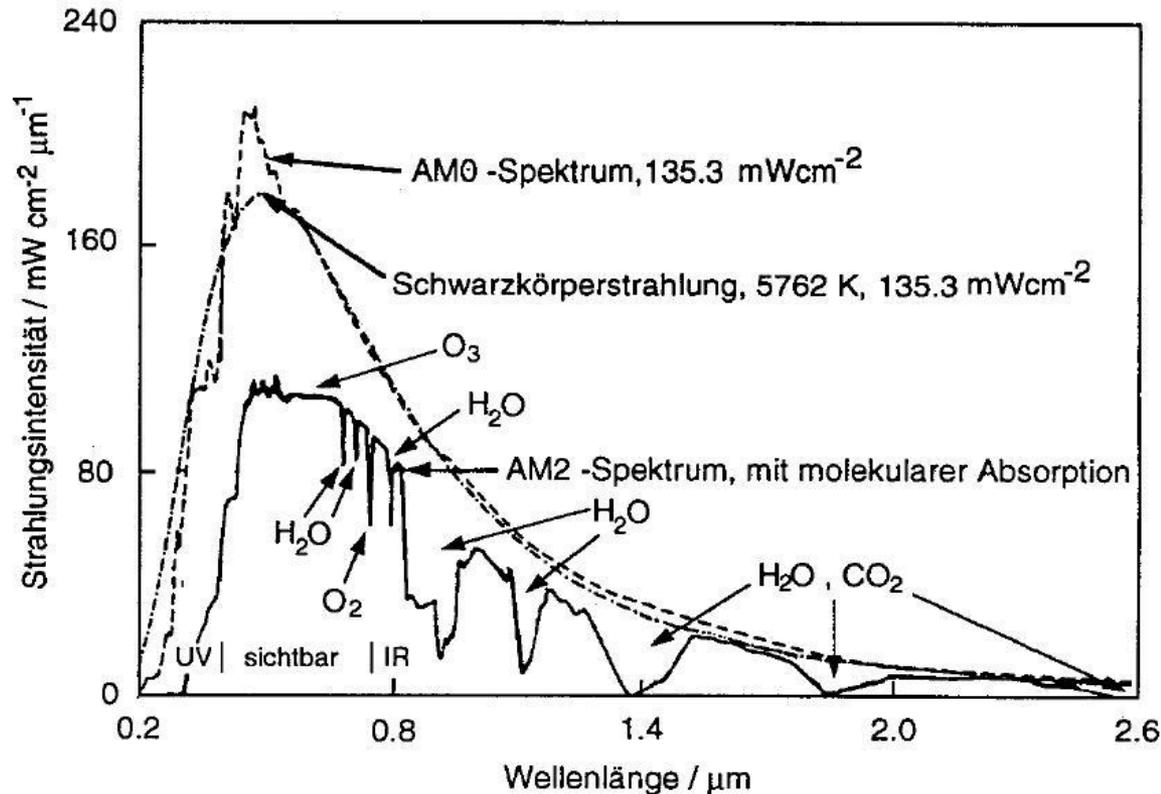
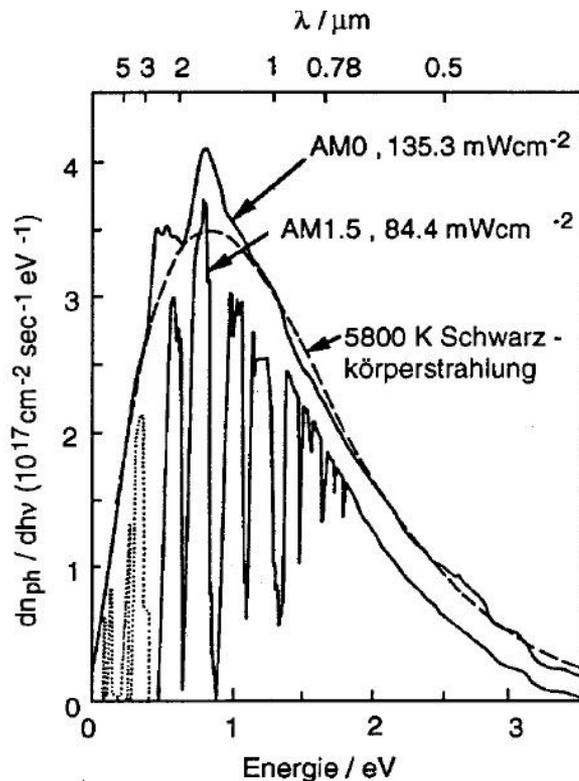
Teil I - Theorie

Das Sonnenspektrum:

Das Sonnenspektrum wird in **Air- Mass- x**-Klassen eingeteilt:

Dabei steht das „x“ für den Einfallswinkel!

- AM0: Spektrum außerhalb der Atmosphäre
- AM1: Spektrum bei senkrechtem Einfallswinkel
- AM1.5: Spektrum für die gemäßigten Regionen



Die Diode als Grundbaustein der Solarzelle:

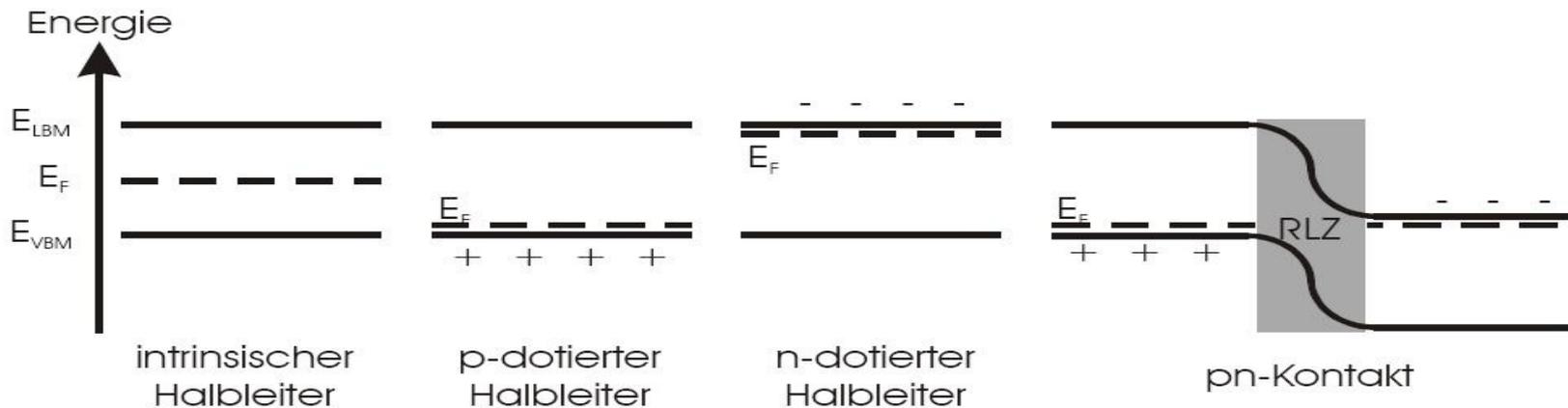
Dotierung eines Halbleiters durch „Verunreinigung“:

n-Dotierung: Fremdatome haben mehr Elektronen, als für die chemische Verbindung notwendig → Elektronenleitung

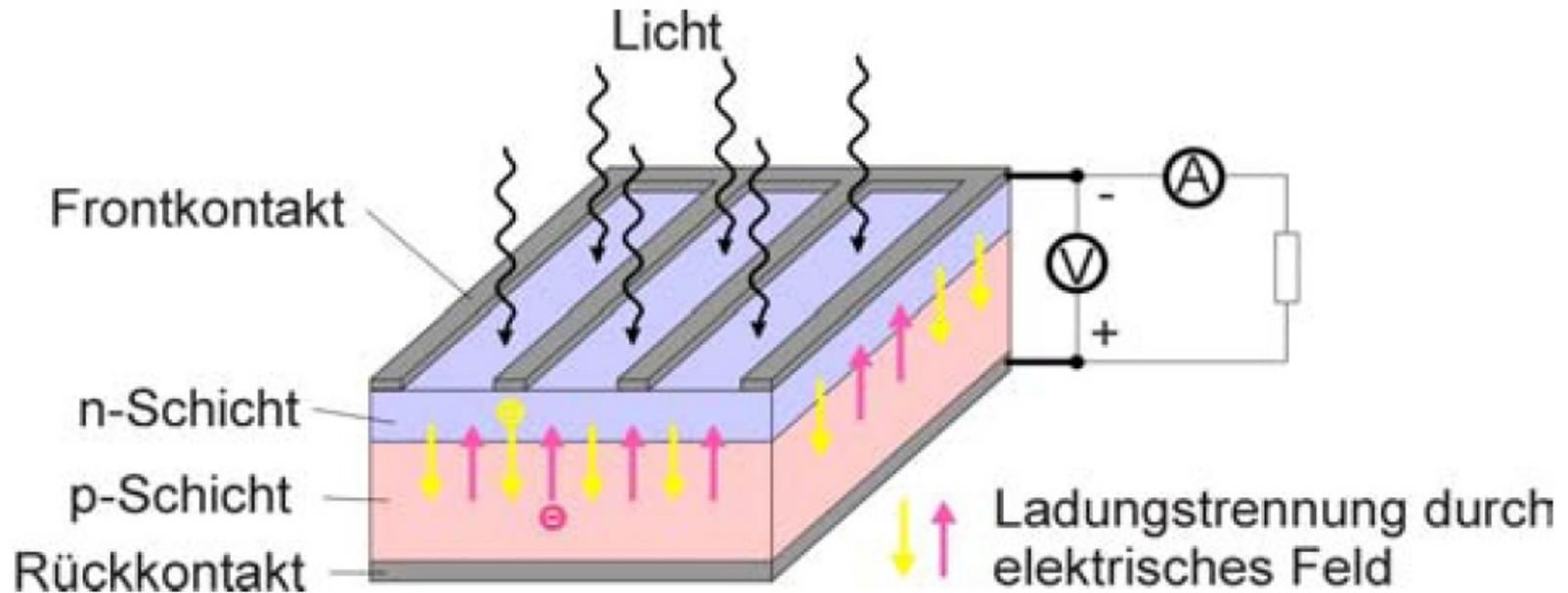
p-Dotierung: Fremdatome haben weniger Elektronen, als für die chemische Verbindung notwendig → Löcherleitung

Fermienergie: Energie des höchsten besetzten Niveaus im Grundzustand von n Elektronen!

Fermi-Verteilung:
$$f(E_e) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_e - E_F}{kT}\right) + 1}$$



Funktionsprinzip der Solarzelle:



- ➔ Durch Absorption wird ein Elektron-Loch-Paar gebildet
- ➔ Kurzgeschlossene Solarzelle
- ➔ Solarzelle mit offenen Klemmen

Funktionsprinzip der Solarzelle: Photonenabsorption

Für Solarzellen ist die Erzeugung von Elektronen und Löchern durch Absorption von Photonen der wichtigste Prozess.

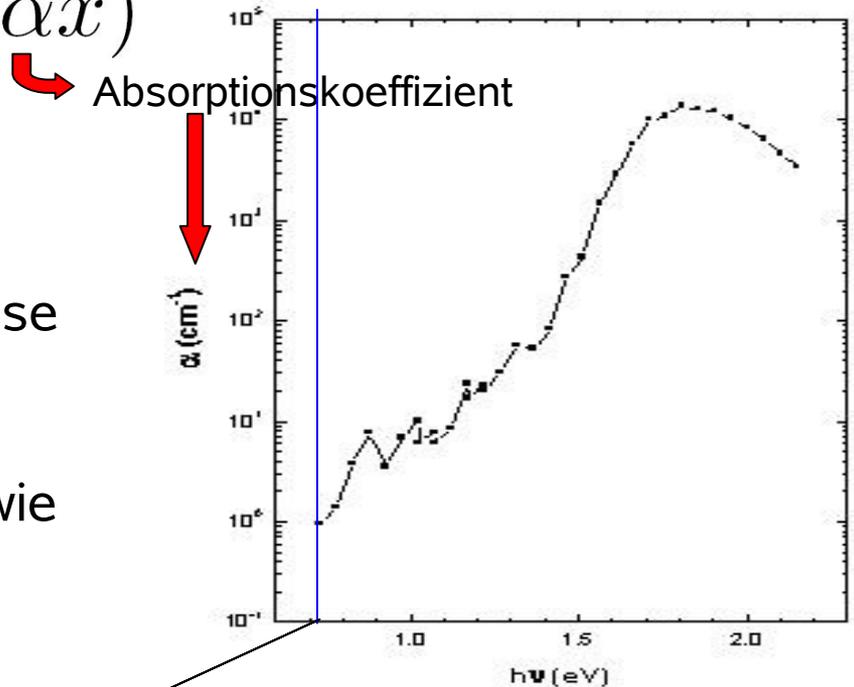
Die Lichtintensität I fällt exponentiell mit dem zurückgelegten Weg x ab:

$$I(x) = I(0) \exp(-\alpha x)$$

Absorptionskoeffizient

Der Absorptionskoeffizient ist von der Quantenausbeute abhängig. Diese ist eine materialabhängige Größe!

Die Quantenausbeute gibt also an, wie gut das Material für den Bau von Solarzellen geeignet ist!

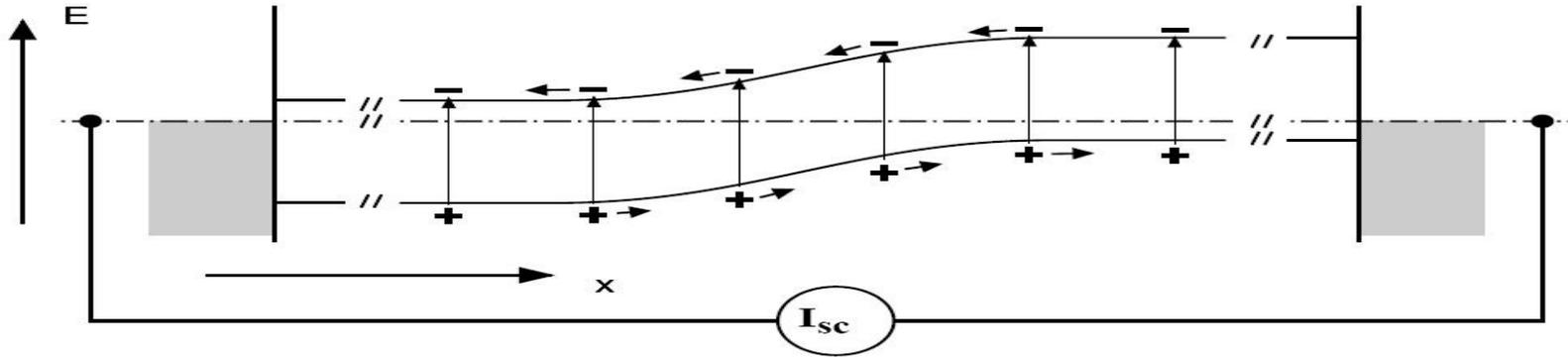


GAP-Energie

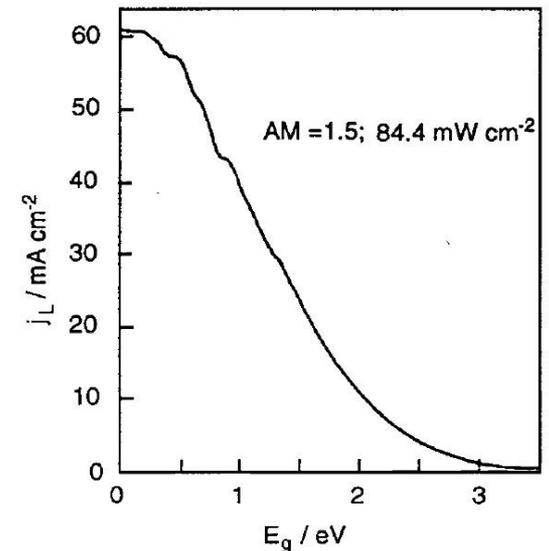
Exemplarisches Diagramm für Silizium

Funktionsprinzip der Solarzelle: Kurzgeschlossene Zelle

Der Kurzschlußstrom ist eine wesentliche Kenngröße der Solarzelle.

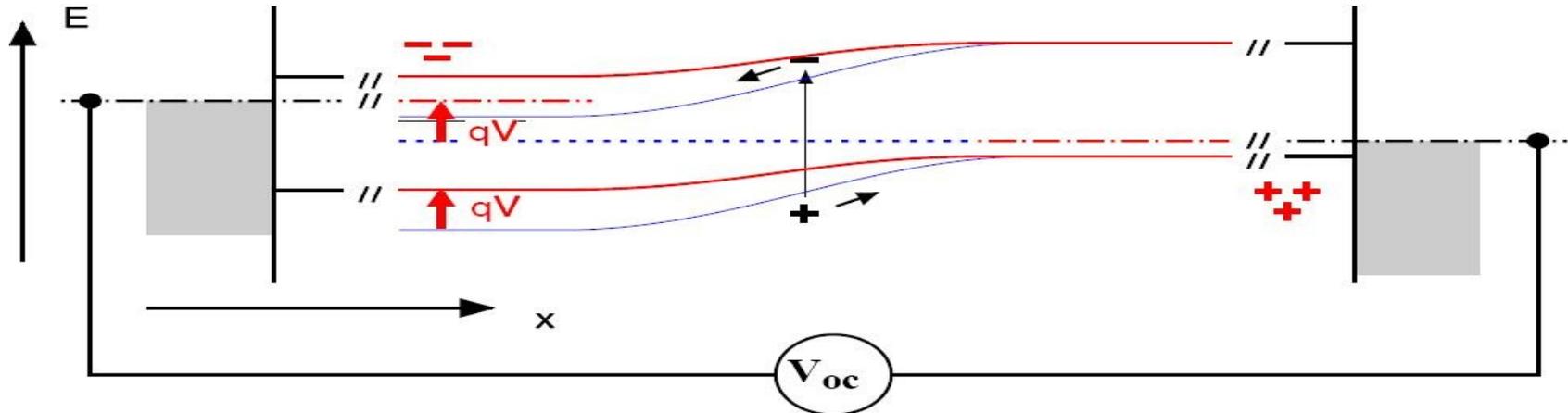


Je geringer die Bandbreite, desto mehr Photonen können Elektronen-Loch-Paare bilden!



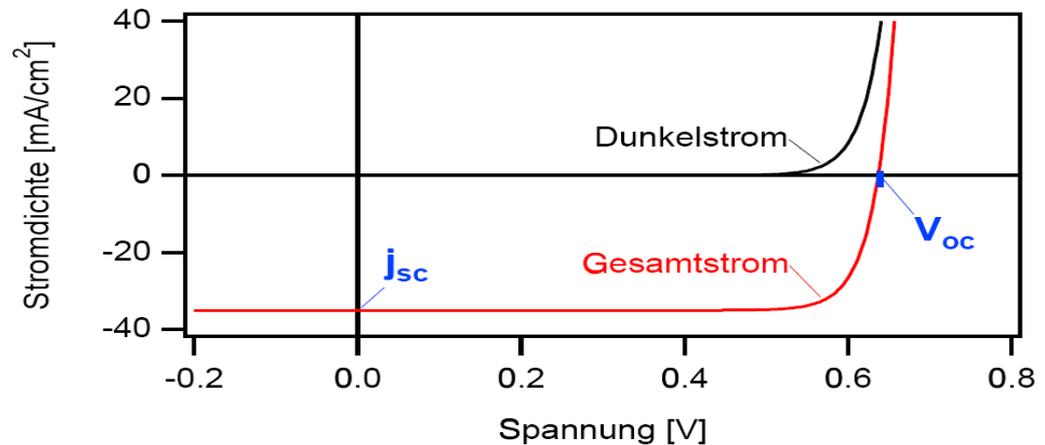
Funktionsprinzip der Solarzelle: Klemmspannung

Die Klemmspannung ist eine weitere Kenngröße der Solarzelle.



Dabei gilt: Klemmspannung \leq Bandverbiegung

Die Kennlinie
ähneln der Diodenkennlinie:



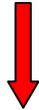
Wirkungsgrad der Solarzelle

Der Wirkungsgrad setzt sich aus drei Wirkungsgraden zusammen:

3. Carnotscher Wirkungsgrad: $\eta_{Carnot} \approx 0,47$

5. Wirkungsgrad Füllfaktor: $\eta_{Sto} \approx 0,67$

7. Wirkungsgrad weitere Prozesse: $\eta_{FF} \approx 0,89$



Stoßionisation
Umwandlung in thermische Energie

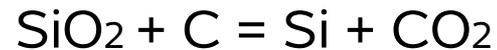
Theoretischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{MAX} = \eta_{Carnot} \cdot \eta_{Sto} \cdot \eta_{FF} \approx 0,28$$

Maximierung des Wirkungsgrads

Material	Wirkungsgrad in % Labor	Wirkungsgrad in % Produktion
Monokristallines Silizium	etwa 24	14 bis 17
Polykristallines Silizium	etwa 18	13 bis 15
Amorphes Silizium	etwa 13	5 bis 7

Quarzsand SiO_2 \longrightarrow Reduktion von Kohlenstoff \longrightarrow Silizium



Maximierung des Wirkungsgrads

Oberflächenstrukturierung:

Tandemzellen:

Verwendung von unterschiedlichen Halbleitern
übereinander angeordnet
größerer Spektralbereich

Konzentratorzellen:

Spiegel- und Linsensysteme sorgen für höhere
Lichtintensität
muss mit der Sonne mitgeführt werden
muss gekühlt werden

Photovoltaik

Teil II - Praxis

- Einleitung
- Rechtliche Grundlagen - Das EEG
- Statistiken
- Private PV-Anlage - Eine Modellrechnung
- Wettbewerbsfähigkeit
- Umwelt
- Anwendungsbeispiele
- Ausblick

Anwendung von Solarzellen - Warum & Wo?

Solarzellen sind:

- in nahezu beliebiger Größe produzierbar
- portabel
- (nahezu) ortsunabhängig
- nicht mechanisch
- ineffizient
- aufwändig in der Herstellung

und deswegen :

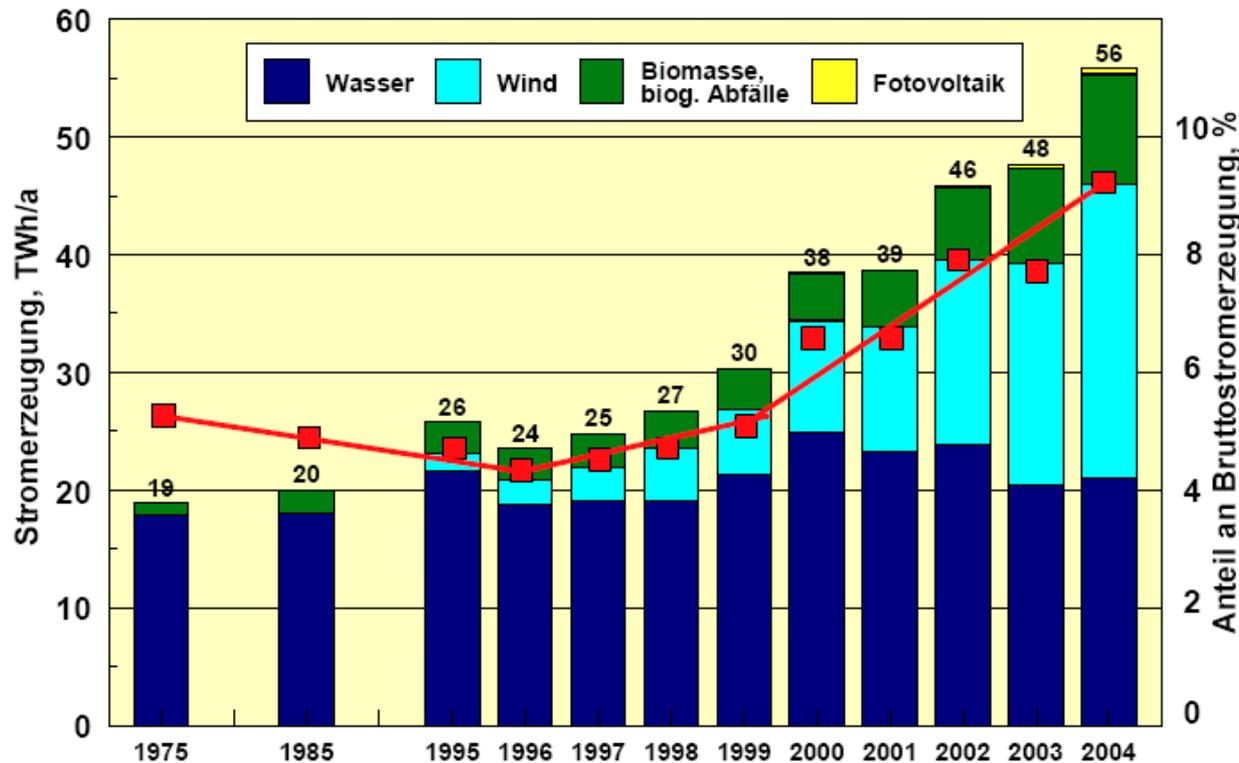
- nahezu überall verwendbar
- auch für (vor allem kleine) bewegte Objekte geeignet
- ungeeignet für Kraftwerke

Gesetzliche Grundlagen - Das EEG (1)

Erlassen 01.04.2000, erneuert 21.01.2004

Ziel: Steigerung des Anteil an der Stromerzeugung von EE auf 12,5% bis 2010, bzw. 20% bis 2020 über Subventionen

Status Quo: 9,3% (2004)



Quelle: BMU



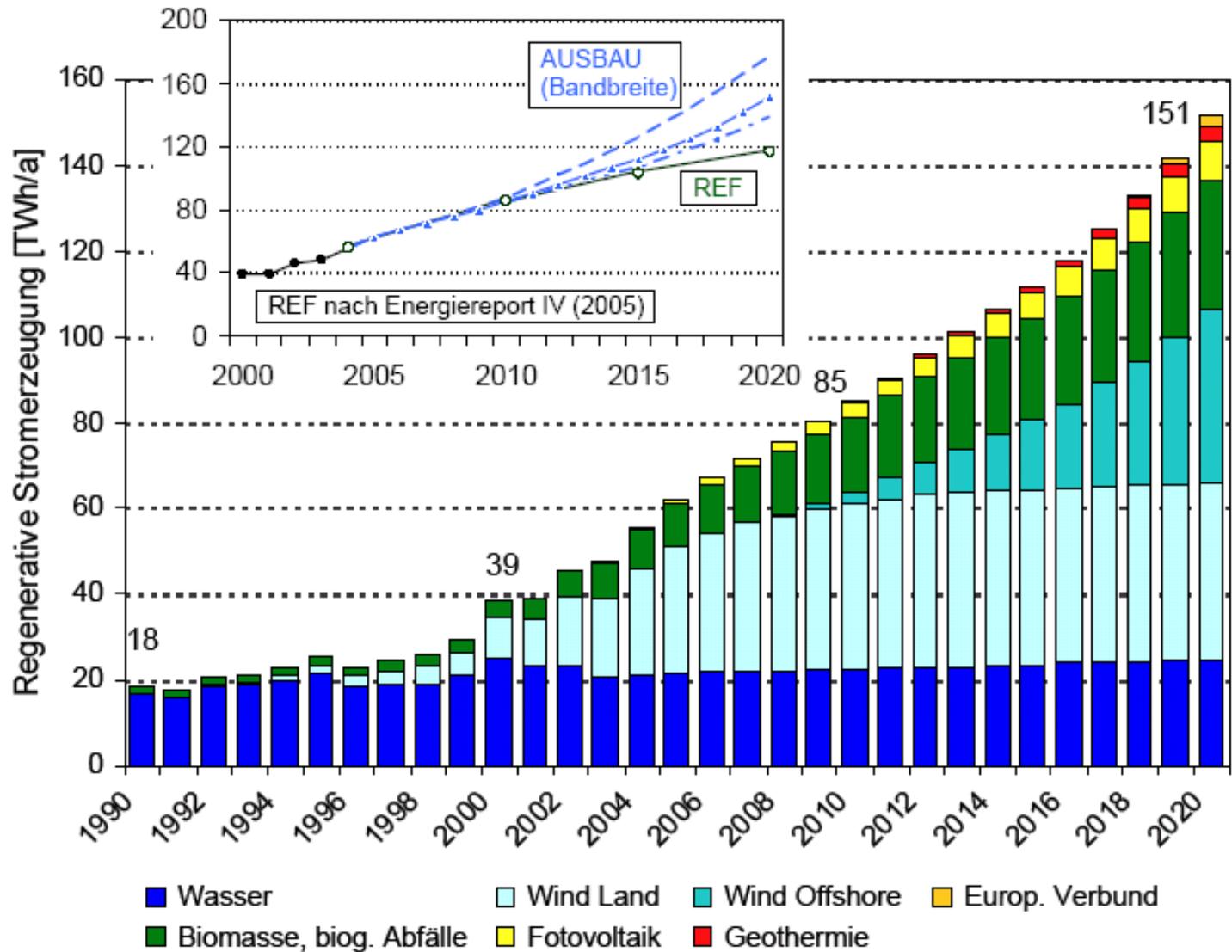
Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Erneuerbare Energien

Stromerzeugung durch Photovoltaik - Statistik

- Photovoltaikanlagen liefern 1% der gesamten Stromerzeugung durch alternative Energien (56 TWh/a), also 0,1% der gesamtdeutschen Stromproduktion
- Zuwachs 2004: 110%
- durchschnittlicher Zuwachs 1994-2004: 46%
- Genügend geeignete Dachfläche (800 km²) für ca. 85 TWh/a vorhanden (entspricht 14% des Gesamtstromverbrauchs)
- Dazu kommen Fassaden, Lärmschutzwände, etc.

Erneuerbare Energien - Prognose



Gesetzliche Grundlagen - Das EEG (2)

Garantierte Abnahmepreise für Solarstrom:

Installation	Größe	Preis pro kWh
an Gebäuden	bis 30 KW (ca. 240m ²)	57,4 ct
	30 - 100 KW	54,6 ct
	ab 100 KW	54,0 ct
frei		45,7 ct

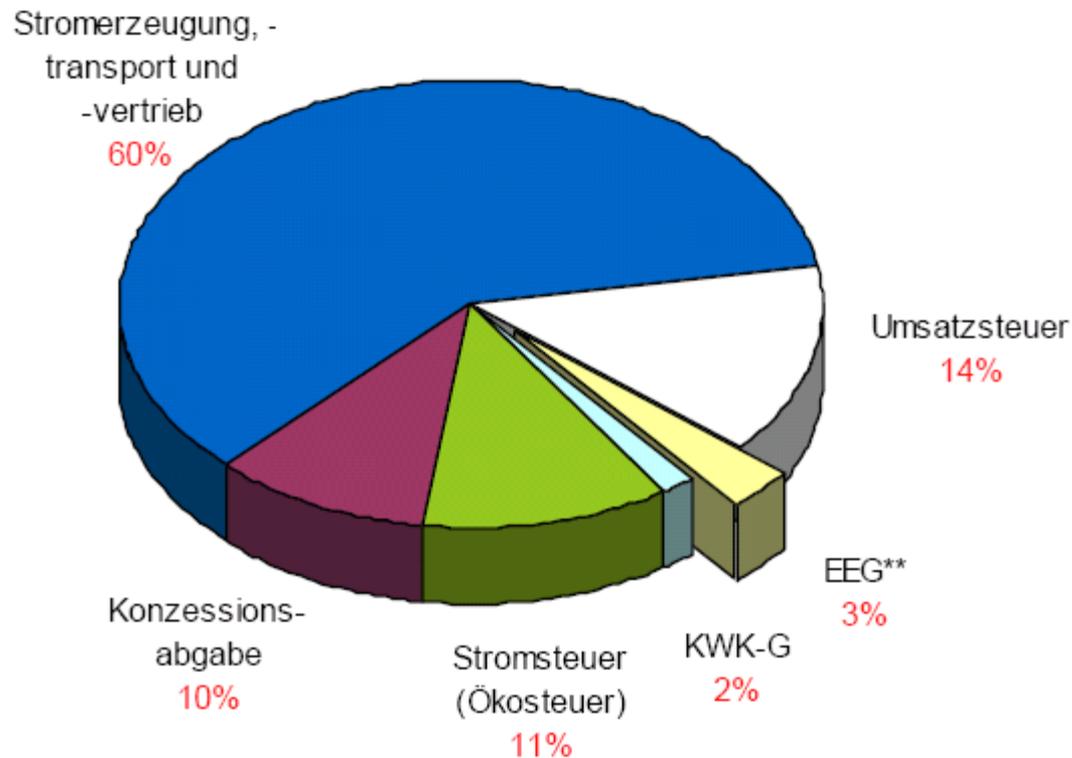
- Garantiert für 20a ab Inbetriebnahme
 - Integration der PV-Anlage in ein Gebäude: + 5 ct / kWh
 - Reduzierung der Preise pro Jahr: 5% (Gebäude), bzw. 6,5% (frei)
- ➔ garantierter Abnahmepreis bei Inbetriebnahme 2006: 51,8 ct

Vergleich: Durchschnittspreis für einen Privathaushalt in NRW (2004): ca. 17 ct / kWh

Finanzierung des EEGs

Umschlagen der Kosten auf den Strompreis, also den Endverbraucher.

**Kostenanteile 2004 für eine kWh Strom
im Haushaltsbereich (18 Cent)**



Modellrechnung : Eine private PV-Anlage (1)

Voraussetzungen:

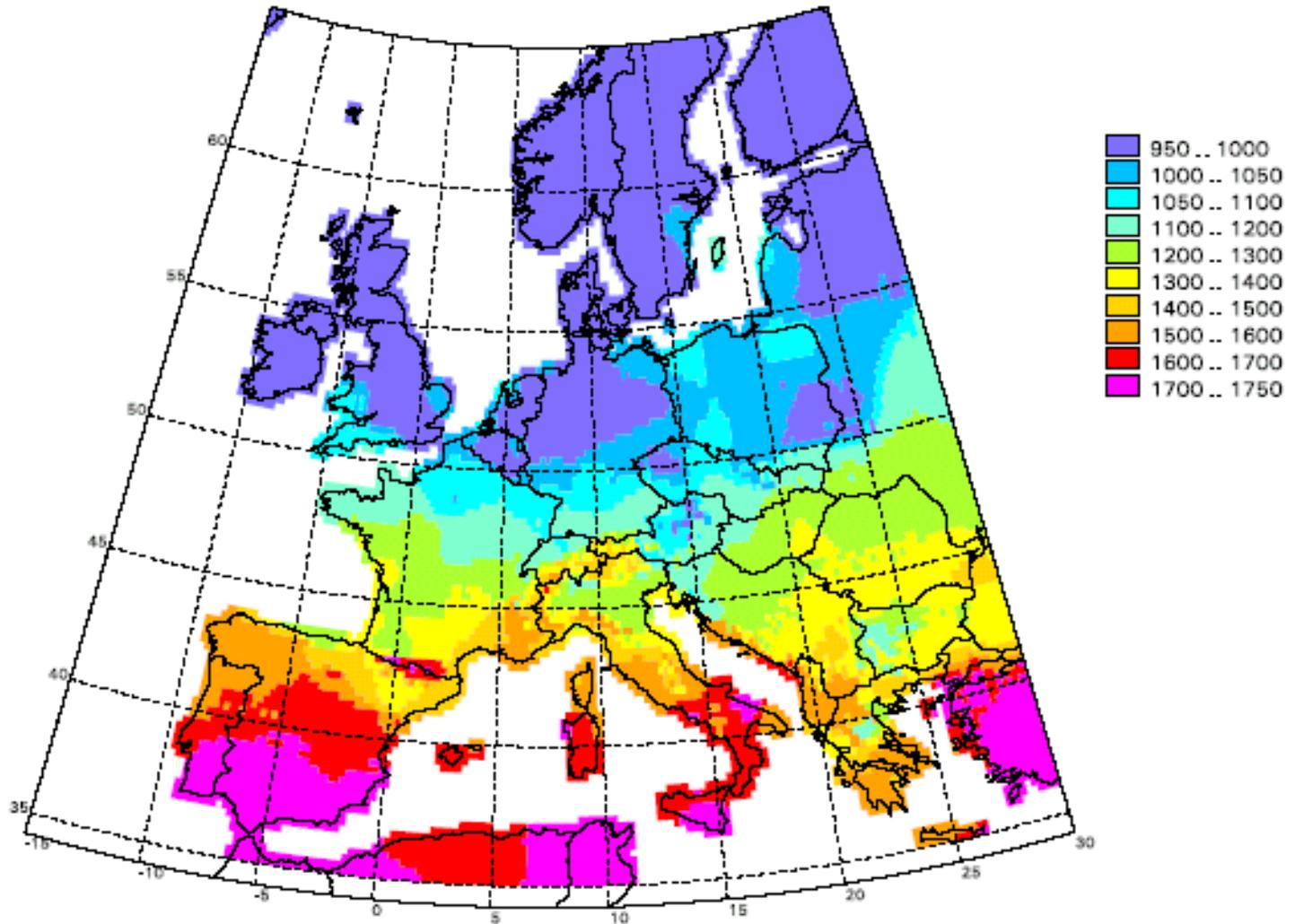
- freie, unbeschattete Dachfläche, Ausrichtung möglichst nach Süden
- Kapital: ca. 5500€-7000€ /kWp

Beispiel-Angebot für eine 5,04 kWp-Anlage:

- Nettokosten ca. 23000€, davon ca. 1800€ Montage
- Montage in 1-2 Tagen
- ca. 40m² Solarzellen
- 25 Jahre Leistungsgarantie



Solarkonstante - Verteilung Europa



Modellrechnung : Eine private PV-Anlage (2)

Ertrag:

- 4660 kWh/a erwartete Leistung (bei Bau 2006: 2415€)
- 192€ Überschuss pro Monat
- Refinanzierung nach knapp 10 Jahren
- Kapitalverzinsung nach 20 Jahren 8,05%

Modellanpassung: NRW, Ost-West-Ausrichtung, leicht verschattet

- Ertrag 2400 kWh/a (1250€)
- 95€ Überschuss pro Monat
- Refinanzierung nach über 18 Jahren
- Kapitalverzinsung nach 20 Jahren 0,42%

Wettbewerbsfähigkeit

- Photovoltaik ist nicht wettbewerbsfähig
- Preise 1990: ca. 15000€ pro kWp
- EU-Schätzung: 3200€ in 2030 (17ct pro kWh)
- Problem: Nur begrenzt Restsilizium aus Chipproduktion verfügbar
- Allerdings gibt es viele verschiedene interessante Ansätze, jedoch ist keiner annähernd ausgereift
 - ➔ Prognosen schwierig

Umwelt

- Siliziumherstellung erprobt (Mikrochips), ausgereifte Produktionsverfahren
- Geringe Mengen an toxischen Chemikalien verlassen bei der Produktion den ansonsten geschlossenen Kreislauf (v.a. Bor- und Phosphorverbindungen)
- Den Energieverbrauch bei Produktion von Solarzellen erwirtschaftet die Zelle in 3-5 Jahren zurück.
- Lebensdauer ca. 30-35 Jahre
- Recycling relativ einfach, da Silizium beständig ist und nur Glas, Lamellen, etc. ausgetauscht werden muss

Anwendungsbeispiele

- Der Klassiker ist die Sonnenkappe mit Ventilator



- Solarflugzeug „SoLong“ hielt sich bereits 48h in der Luft, knapp 44% seines Gewichts macht der Li-Ion-Akku aus

- WM schauen am Mittelmeerstrand: Solarfernseher (36cm) inklusive Solar-DVD-Spieler



Weitere Anwendungsbeispiele

- Das 33W Solar-Schiebedach von VW betreibt die Klimaanlage, wenn das Auto in der Sonne stehen gelassen wird (Kosten ca. 1500€)



- Solarschiff Heidelberg:
110 Plätze, 80 km Reichweite, max. 12 km/h
Solarleistung 5,78 kWp Solargeschw. 4-5 km/h



- Ja, dies ist ein Solargrablicht

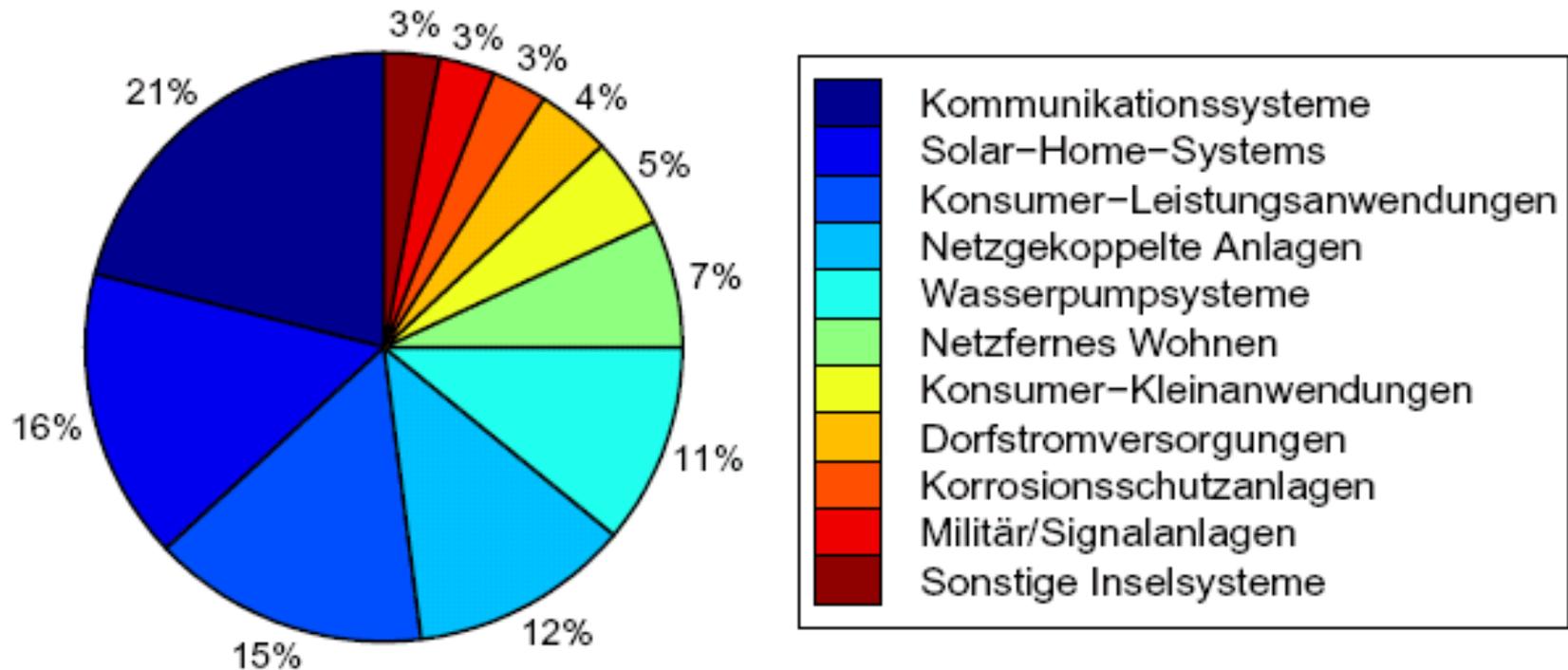
Ausblick

- „Regeneratives Wärmenutzungsgesetz“ in Planung:
In max. 2 Jahren soll für jeden Neubau Sonnenkollektoren oder Biomasseheizung Pflicht sein (laut Bundesumweltministerium).
- Entwicklung von ultradünnen Solarzellen (hier $37\mu\text{m}$) mit hohem Wirkungsgrad ($>20\%$)



- 8 MW solar- und windbetriebenes Transportschiff E/S Orcelle soll 10000 Autos befördern bei 34000t Gewicht und einer Geschwindigkeit von 15 Kn (Geplant für 2025)

Zusatz - Einsatzgebiete



Quelle: Universität Zürich (2001)