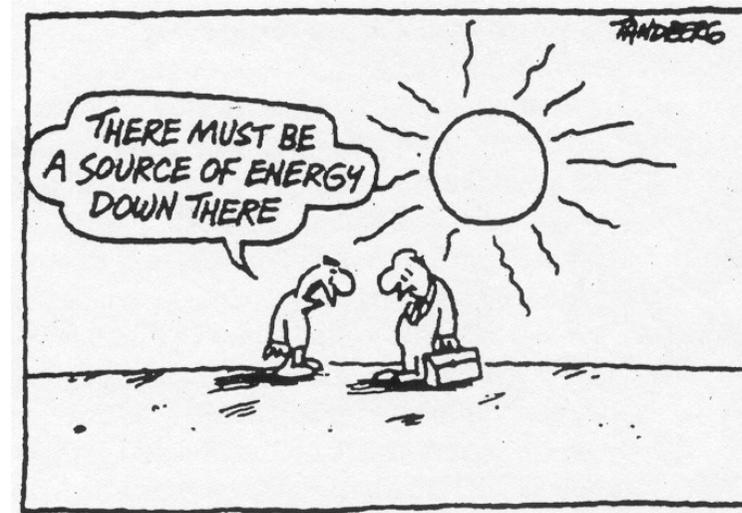


Licht und Schatten der Photovoltaik

ODER
Terrawattstrom aus Sonnenlicht,
aber was machen, wir wenn es
dunkel wird?

Prof. Dr. Klaus Lips
Fachbereich Physik, Freie Universität Berlin
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und
Energie (HZB), Institut für Nanospektroskopie



1. Motivation
2. HZB und Lise Meitner
3. Energiebetrachtungen
4. Was ist Photovoltaik?
5. Was kann Photovoltaik leisten und was kostet sie?
6. Stand der Technik
7. Neue Konzepte aus der Forschung
8. Zusammenfassung

Unsere Situation...

*“Großbritannien brauchte die Hälfte der Ressourcen dieses Planeten, um seinen Wohlstand zu erreichen. Wie viele Planeten wird Indien für die Entwicklung benötigen?”
Mahatma Gandhi*



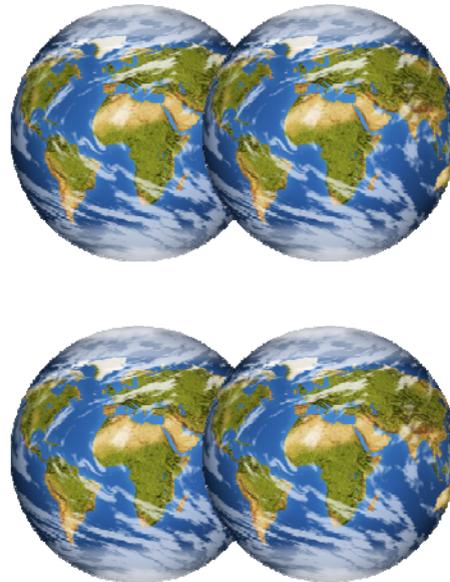
Quelle: Jupp Wolter in Sombeck u.a.: Das Bild der Welt. Göttingen: Vandenhoeck u. Ruprecht

CO₂ Emission: Wir überschreiten die Kapazität der Erde

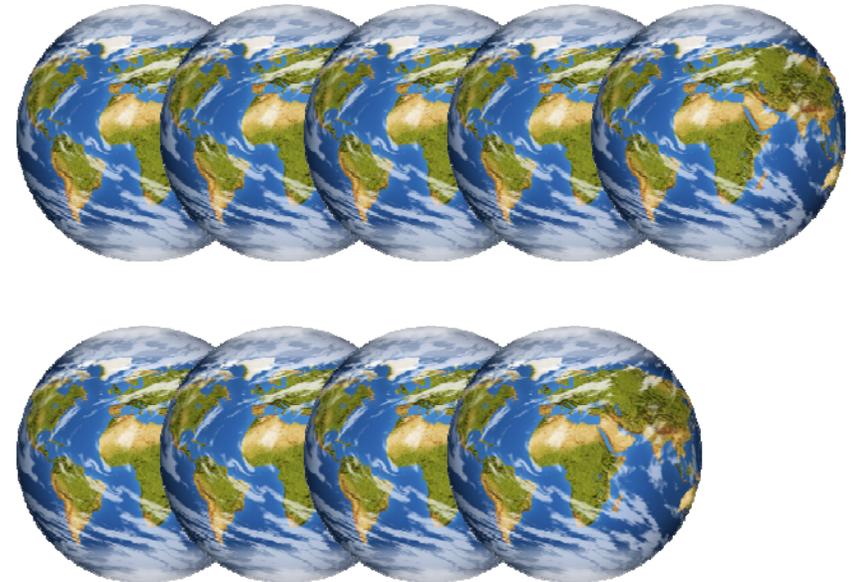
Heute
(Weltmittel)



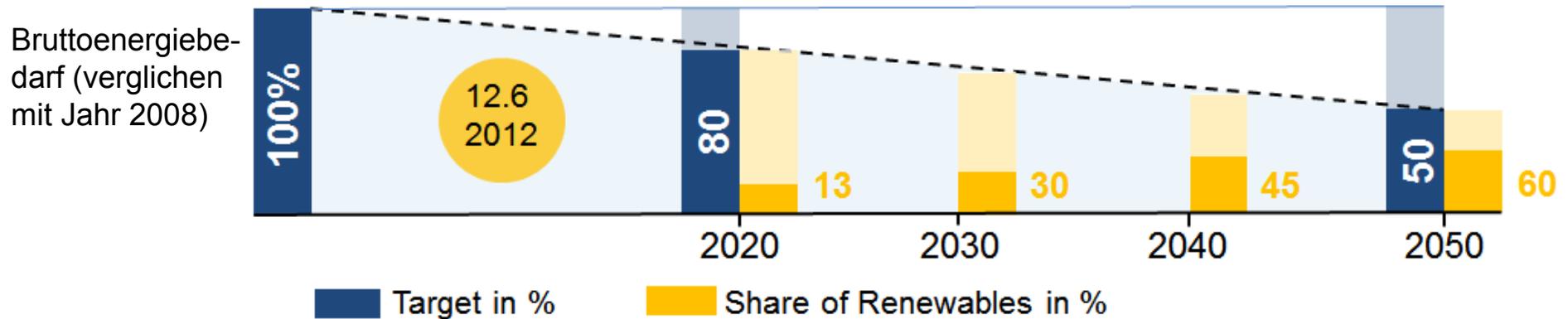
Deutschland
(als Basis für die Welt)



USA
(als Basis für die Welt)



“Großbritannien brauchte die Hälfte der Ressourcen dieses Planeten, um seinen Wohlstand zu erreichen. Wie viele Planeten wird Indien für die Entwicklung benötigen?” Mahatma Gandhi



2016: 32.3 % erneuerbare Elektrizitätsproduktion

- Verfügbarkeit
- Wirtschaftlichkeit
- Umweltschonend



- Energiekonversion Technologie
- Energiespeicherung Technologie
- Energieeffizienz Technologie

HISTORIE HAHN-MEITNER INSTITUT (HMI)

Namenspatronen - Lise Meitner und Otto Hahn
Gründung 1959 – Hahn-Meitner Institut für Kernphysik



Lise Meitner bei der Einweihung des Hahn-Meitner-Instituts am 14.3.1959 mit Willy Brandt und Otto Hahn (v.l.)

*„Das Leben muss nicht leicht sein,
wenn es nur inhaltsreich ist“* Zitat: Lise Meitner



Fusion von
Hahn-Meitner Institut (HMI) + BESSY =
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien & Energie

HMI GmbH

- 1959 gegründet in Berlin-Wannsee
- rund 800 Mitarbeiter, davon 300 Wissenschaftler
- Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft
- Finanzierung: 90 % Bund, 10 % Land Berlin
- Ab 1988 Etablierung der Solarenergieforschung
- Zwei Forschungsschwerpunkte: Solarenergieforschung und Strukturforschung (Neutronen)

BESSY GmbH

- gegründet 1981 in Berlin-Wilmersdorf (BESSY I)
- seit 1998 „großer Ring“ BESSY II in Berlin-Adlershof
- 230 Mitarbeiter, davon 100 Wissenschaftler
- Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft
- Finanzierung: 50 % Bund, 50 % Land Berlin
- Forschung mit Röntgenstrahlung in hoher Qualität

HELMHOLTZ-ZENTRUM BERLIN (HZB)

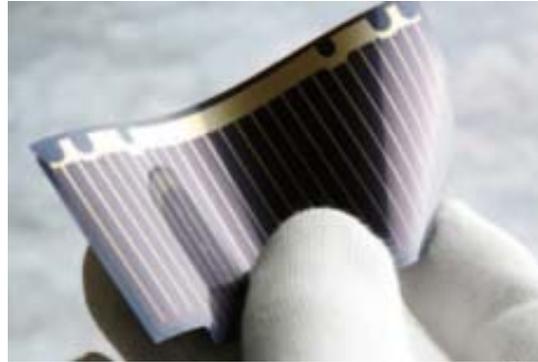
- Gründung zum 1.1.2009

Ein Zentrum – Zwei Quellen



Neutronenforschung
Berlin-Wannsee

Reaktor schließt
Ende 2019



Energieforschung: Solarzellen, (Photo)Katalyse...

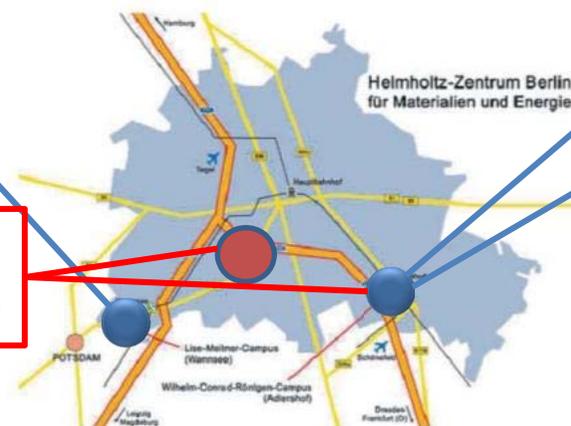


1.7 GeV, 50 beamlines

Röntgenstrahlenforschung
Berlin-Adlershof

EMIL: **E**nergy **M**aterials
In-Situ **L**ab
Inauguration 31.10.16

Freie Universität Berlin + HZB
Berlin **J**oint **E**PR **L**ab (BeJEL)



Budget: ca. 110 M€/y
Angestellte: ca. 1.100
WissenschaftlerIn: ca. 400
Nutzer: > 3000/Jahr

Körperfunktion: Leistung 100W => 2.4 kWh pro Tag (2500 kcal)

Energieaufwand für komfortables Leben: 3 kW => 68 kWh pro Tag

≈ 6 kW / Einwohner in BRD

Energie in 150 g Schokolade: 1 kWh

1 kg Kohle: 8.2 kWh

1 Liter Benzin: 12 kWh

Sonnenlicht (12Uhr)/ 1 qm : 1 kW

1 qm Sonnenlicht/Jahr: 1000-2800 kWh

Bevölkerung der Erde: > 7 x10⁹ => Leistung > 21x10⁹ kW = **21 TW** !

Heute: 16 TW

Muss
immer zur
Verfügung
stehen

Problem:

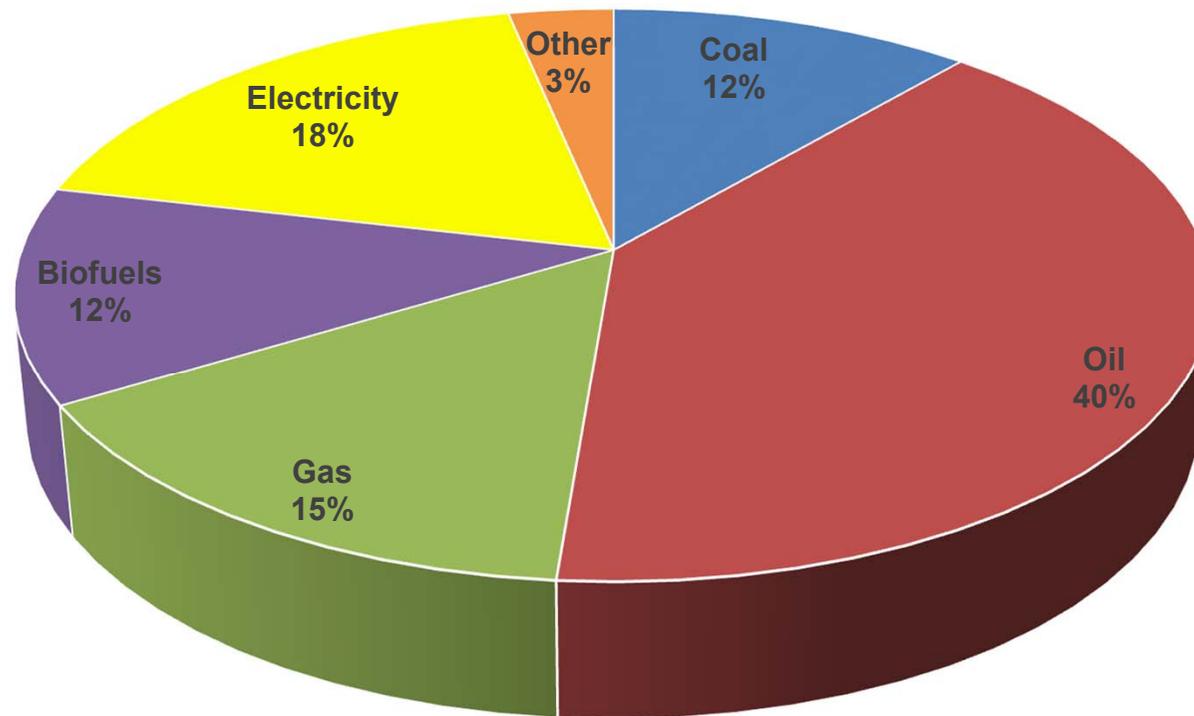
1. Limitierte Ressourcen
2. Klimawandel / Umweltverschmutzung
3. Politische Instabilität in der Welt

Eine Lösung ist die Steigerung des Anteils an Erneuerbaren:

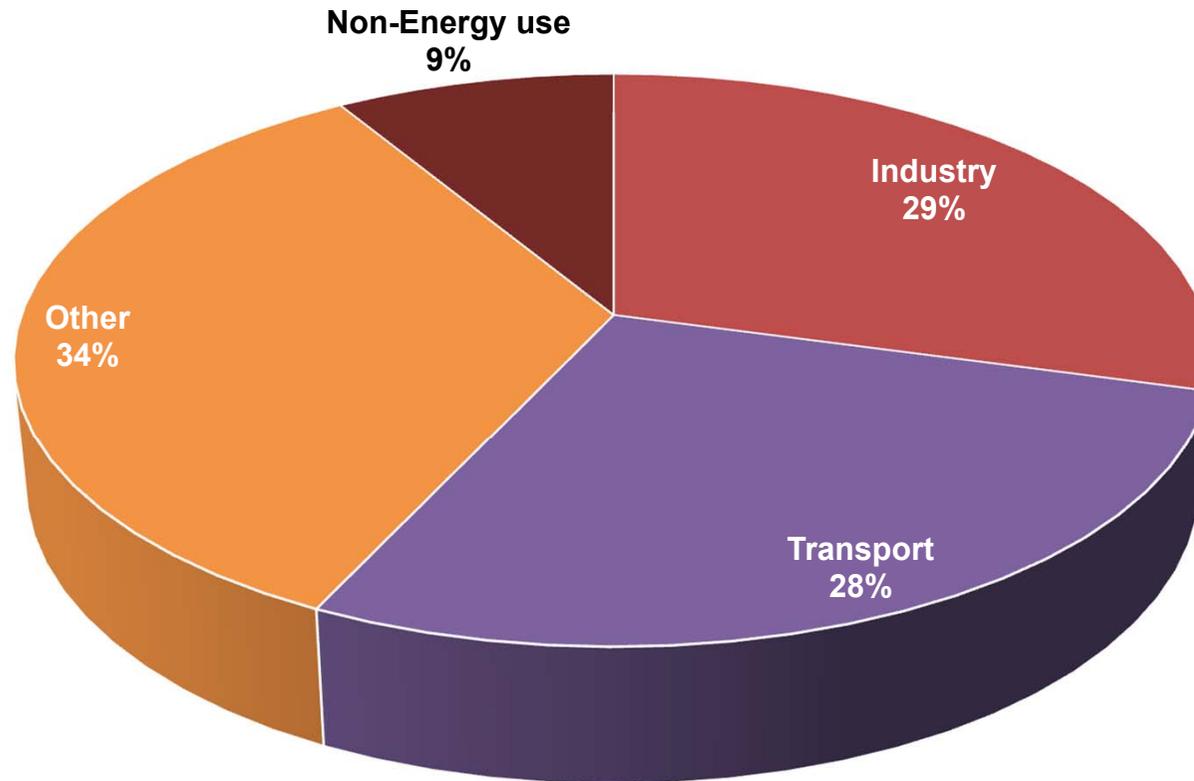
Wasser + Wind + Hitze + Biomasse + Photovoltaik + Geothermie

↑
Sonnenlicht

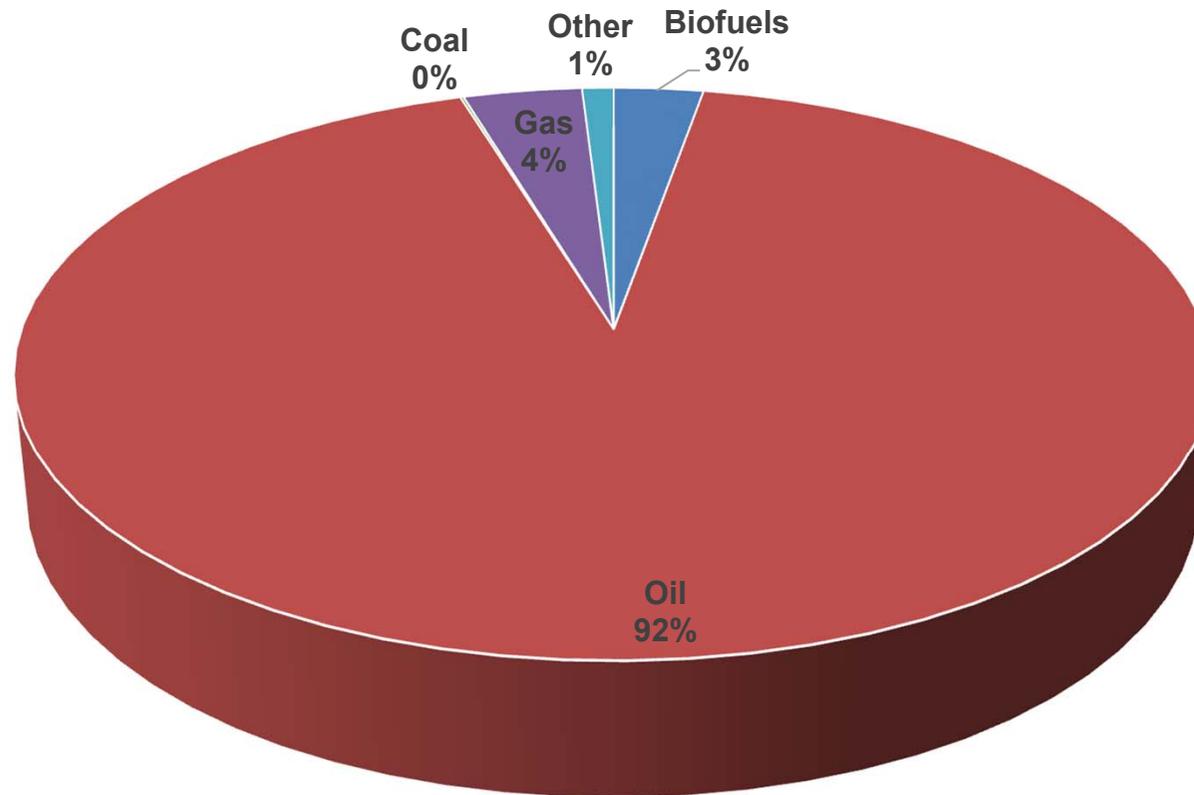
Etwa **18%** der Energie wird über **Elektrizität** genutzt



Etwa **28%** aller Energieressourcen werden für **Transport** genutzt



92% des Transports wird durch **Öl** getrieben.



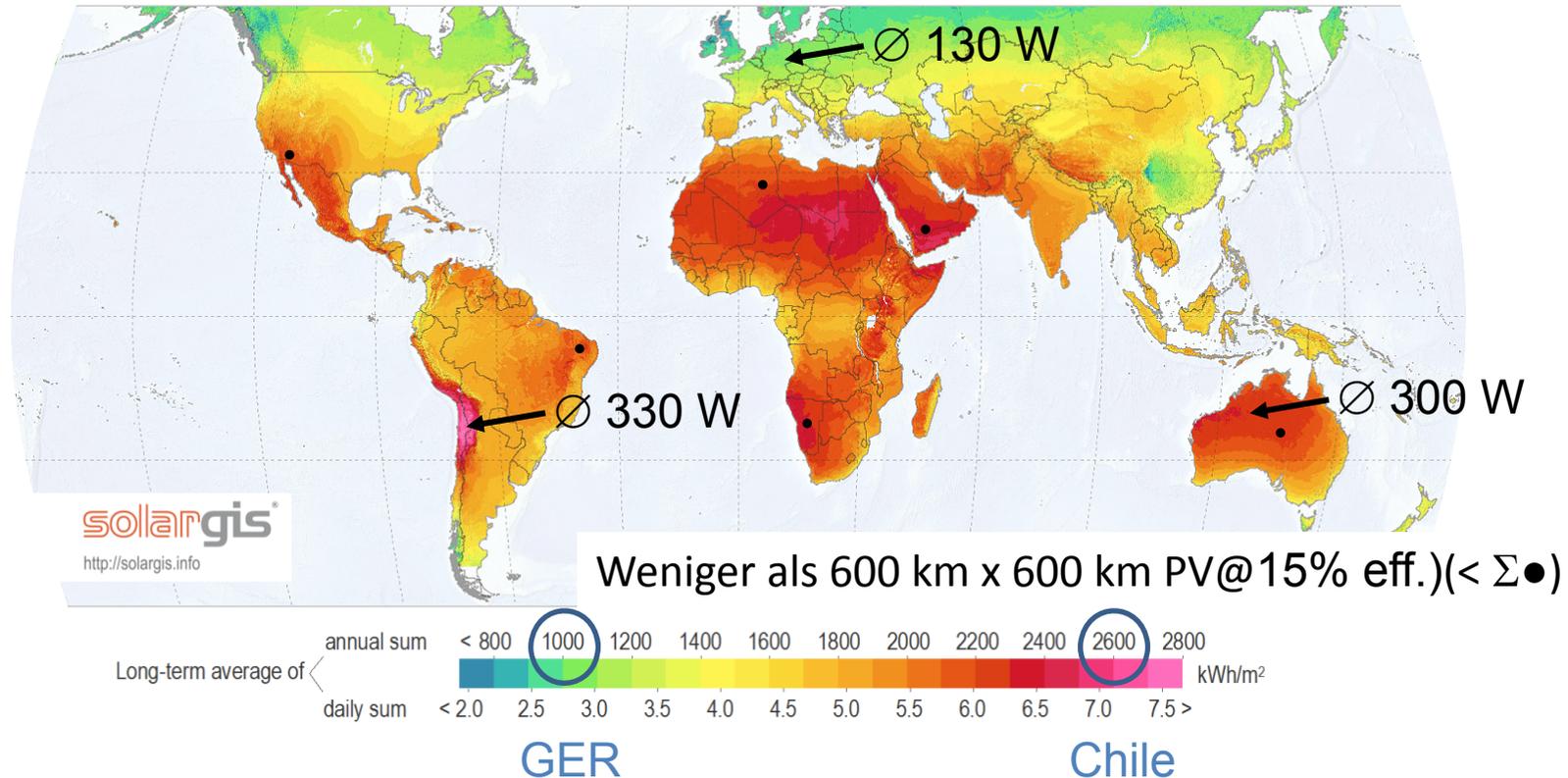
- *Niedertemperaturhitze* **Solarthermie**, -kollektoren
- *Hochtemperaturhitze* \Rightarrow *Elektrizität, Hitze speichern, Brennstoffe*
Concentrating Solar Power (CSP) Solartürme
Thermochemische Brennstoffherzeugung
- *Elektrizität*
Solarzellen, PhotoVoltaik (PV)
- *Solare Brennstoffe, Power-to-Gas*
Elektrochemische Brennstoffherzeugung, künstliche Photosynthese
Wasserspaltung, (Photo)Katalyse
- *Wind* \Rightarrow *Elektrizität* **Windkraft**
- *Biomasse* \Rightarrow *Elektrizität, Wärme*
- *Regen* \Rightarrow *Elektrizität* **Wasserkraft**



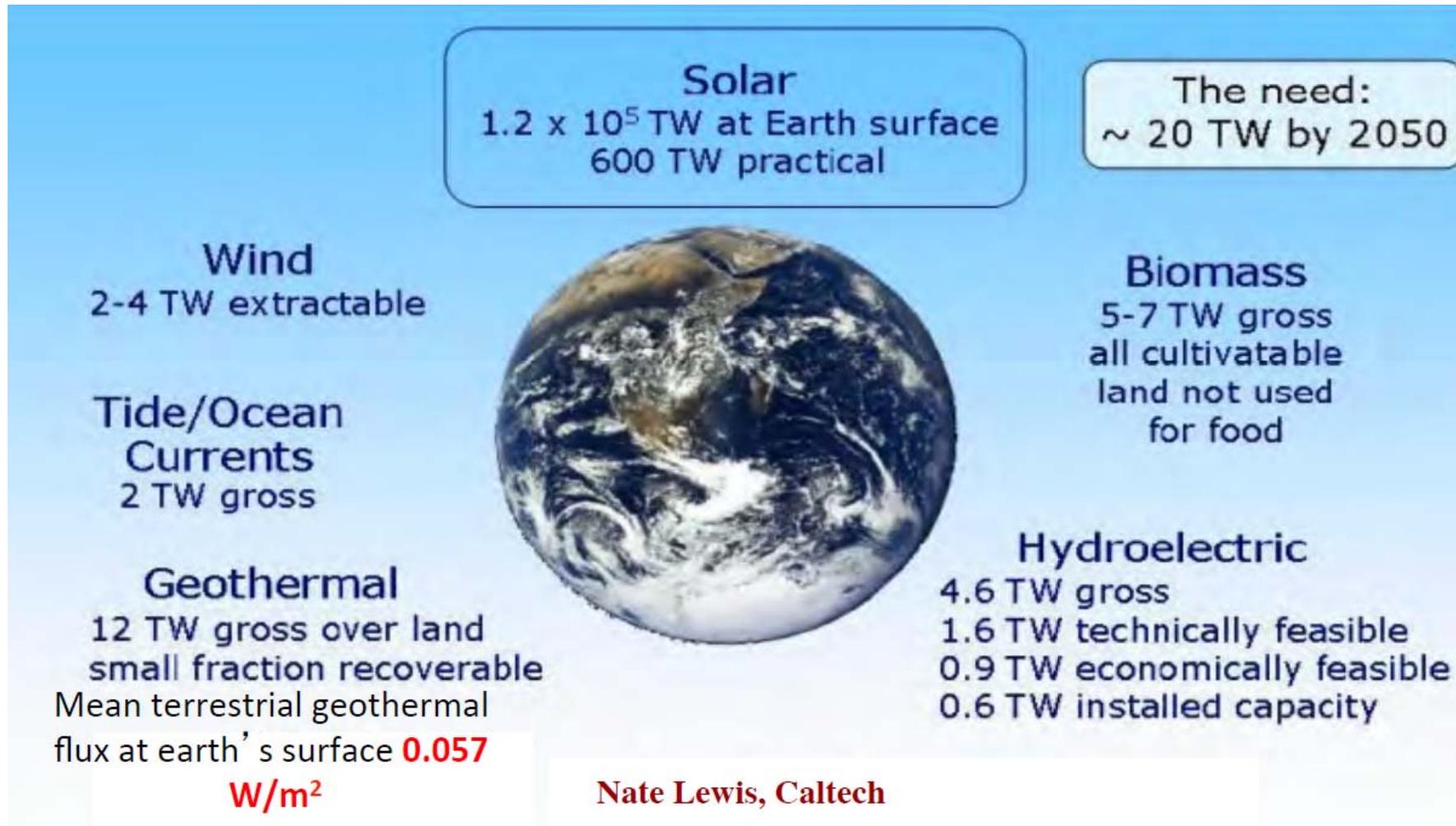
Potential der PV: yes we can...

GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION

GeoModel
SOLAR

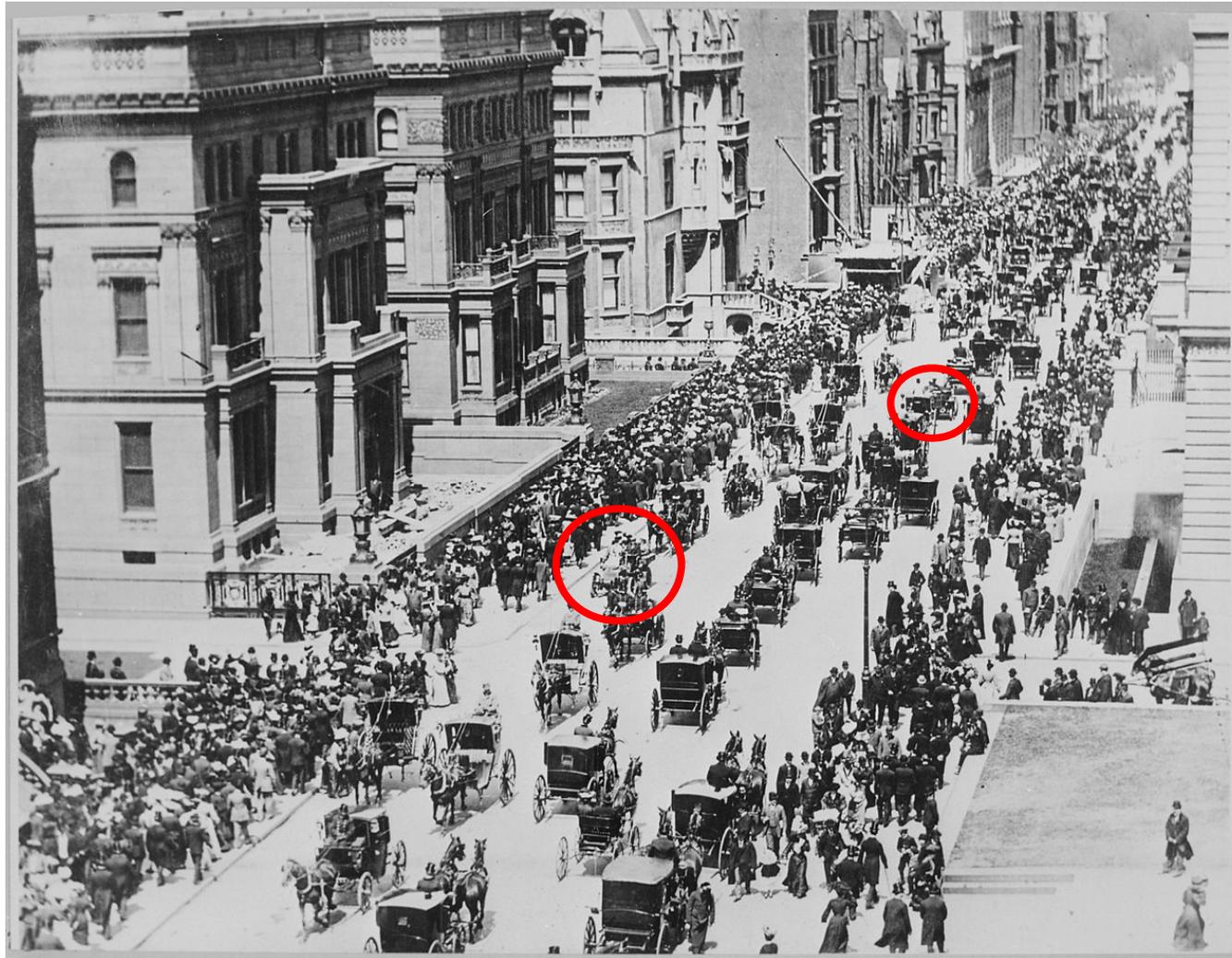


- Sonne liefert in 30 min alle Energie, die die Menschheit pro Jahr benötigt
- Durchschnittliche Sonnenleistung 130 W/m² in Deutschland, 180 W/m² weltweit
- 100 m² PV-Fläche pro Mensch ausreichend
- Wachstumspotential der PV ist enorm
- Transformation der Gesellschaft notwendig => „prepare for impact“



Derzeitige weltweite Nutzung Wind und PV: **1 TW**
Es ist noch ein weiter Weg ...

New York, Fifth Avenue, Ostermontag im Jahr 1900



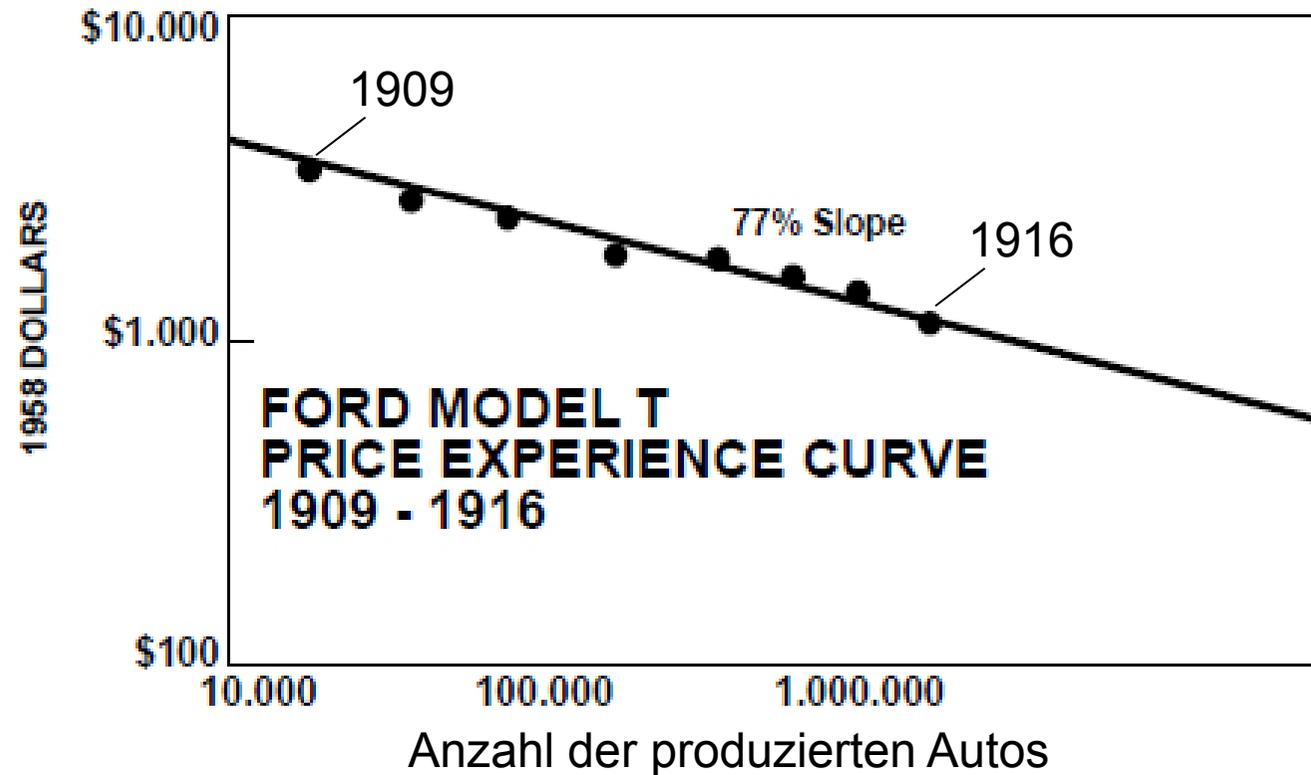
Picture: U.S. National Archives and Records Administration,
see also <http://www.businessinsider.com/5th-ave-1900-vs-1913-2011-3>; **Courtesy:** Eicke Weber.

New York, Fifth Avenue, Ostermontag im Jahr 1913



Picture: <http://www.vintag.es/2016/08/fifth-avenue-vintage-photos-of-most.html>,
see also <http://www.businessinsider.com/5th-ave-1900-vs-1913-2011-3>; **Courtesy:** Eicke Weber.

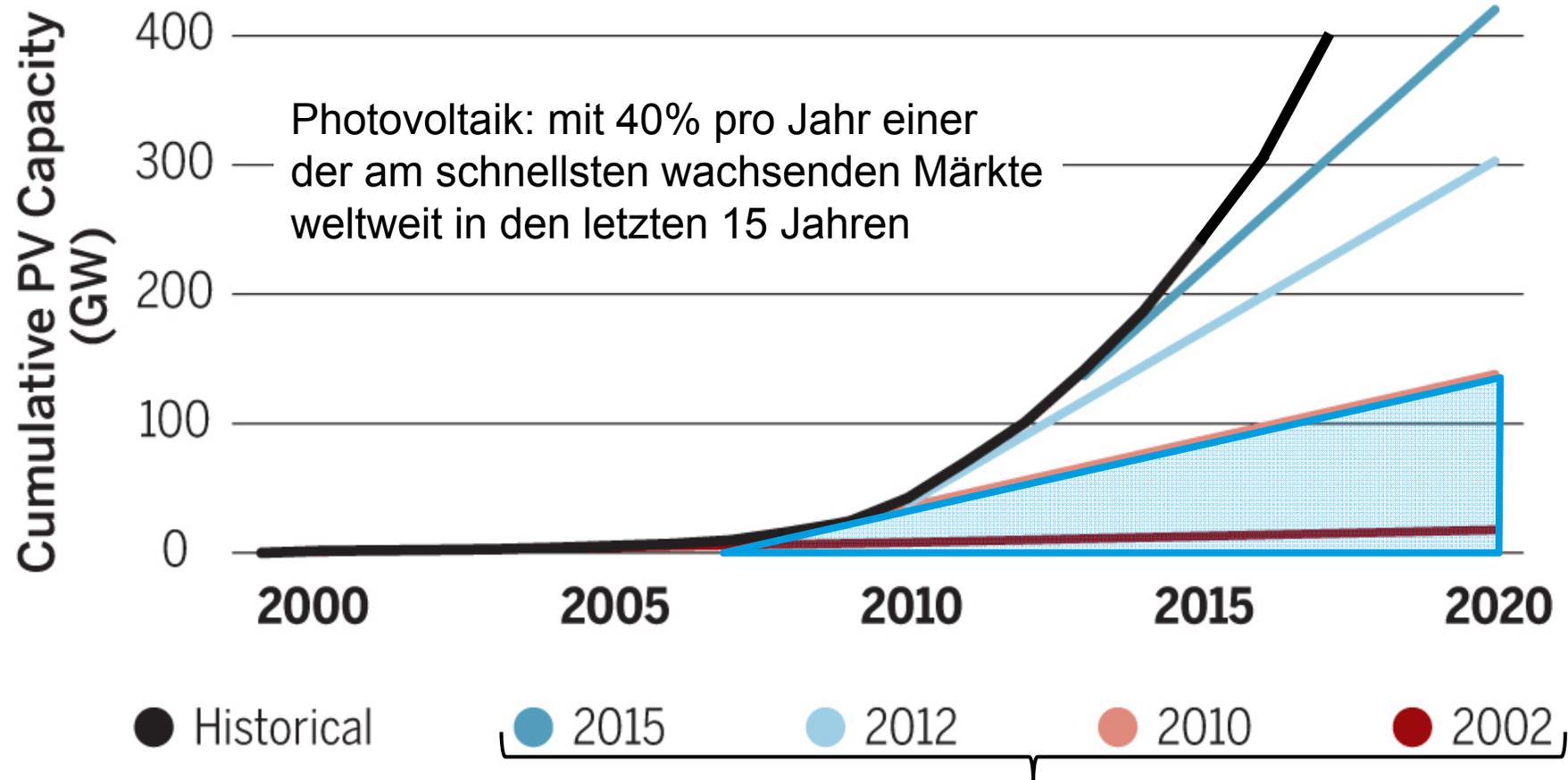
Solche **Lernkurven** sind **sehr oft** für eine **Hochtechnologie** zu finden



Vorhersagen aus der Zukunft betrachtet

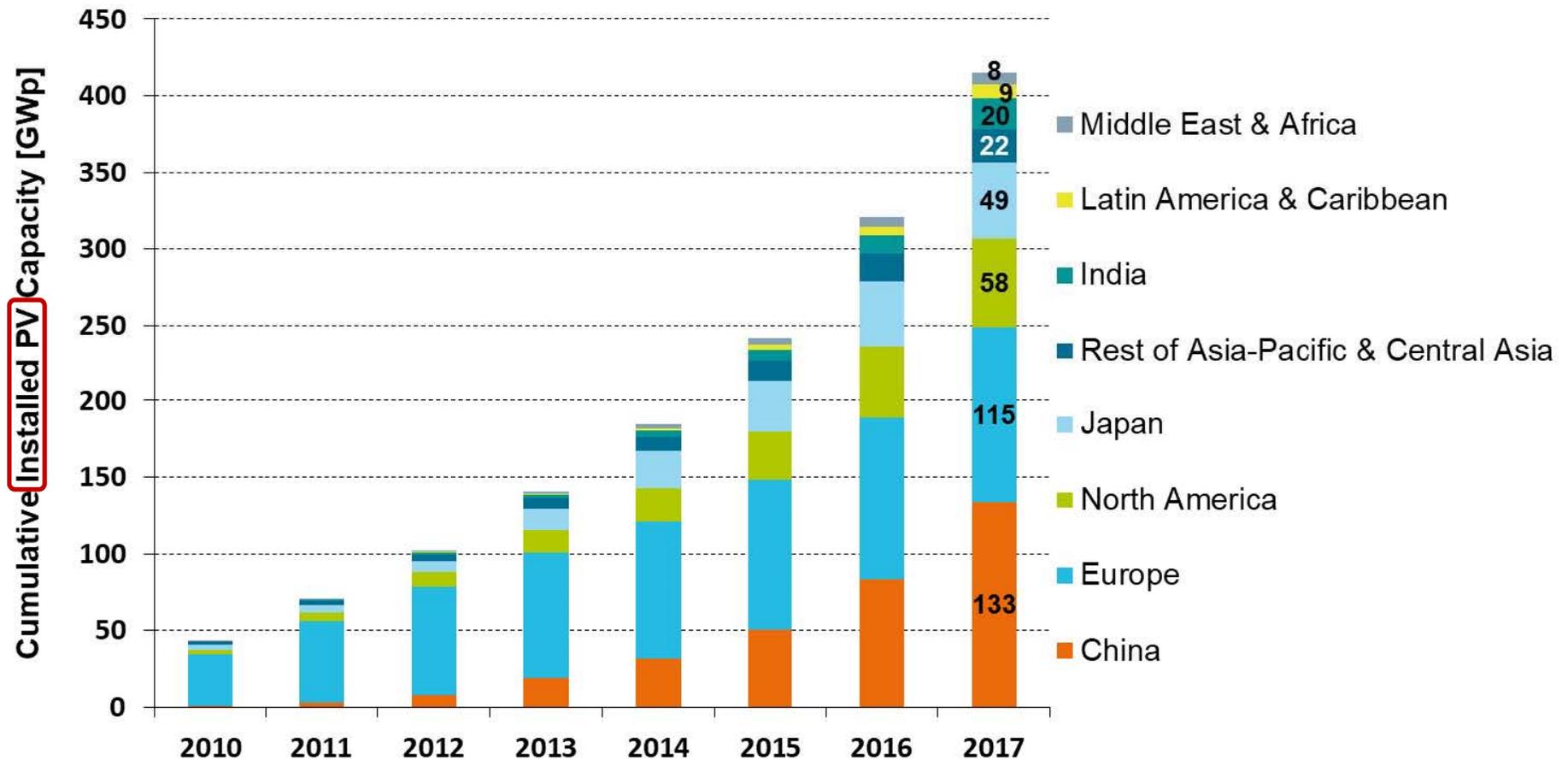
“Vorhersagen sind sehr schwierig, insbesondere wenn sie die Zukunft betreffen.”

Niels Bohr

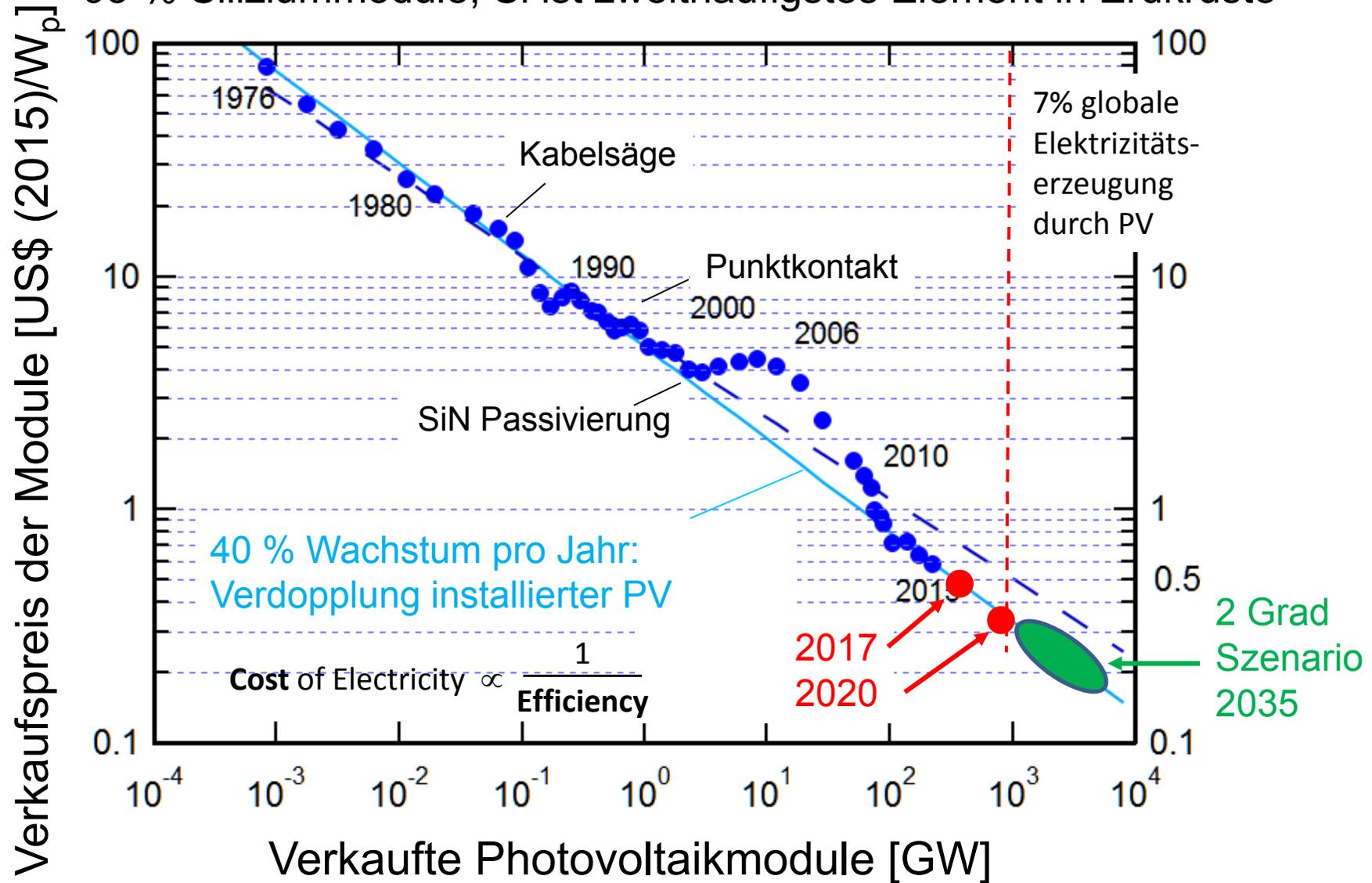


International Energy Agency (IEA): Vorhersage im Jahr

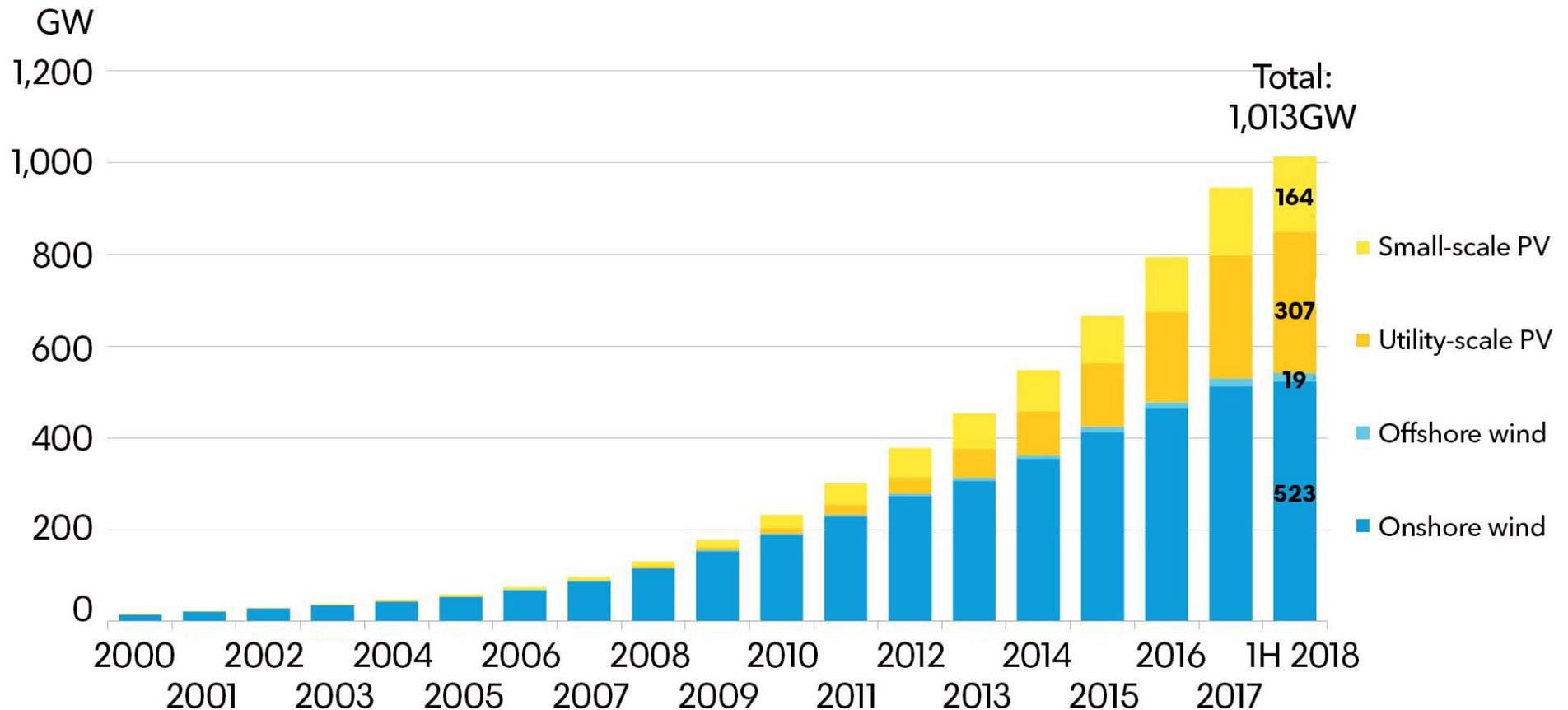
Evolution des weltweiten PV Markts



95 % Siliziummodule; Si ist zweithäufigstes Element in Erdkruste

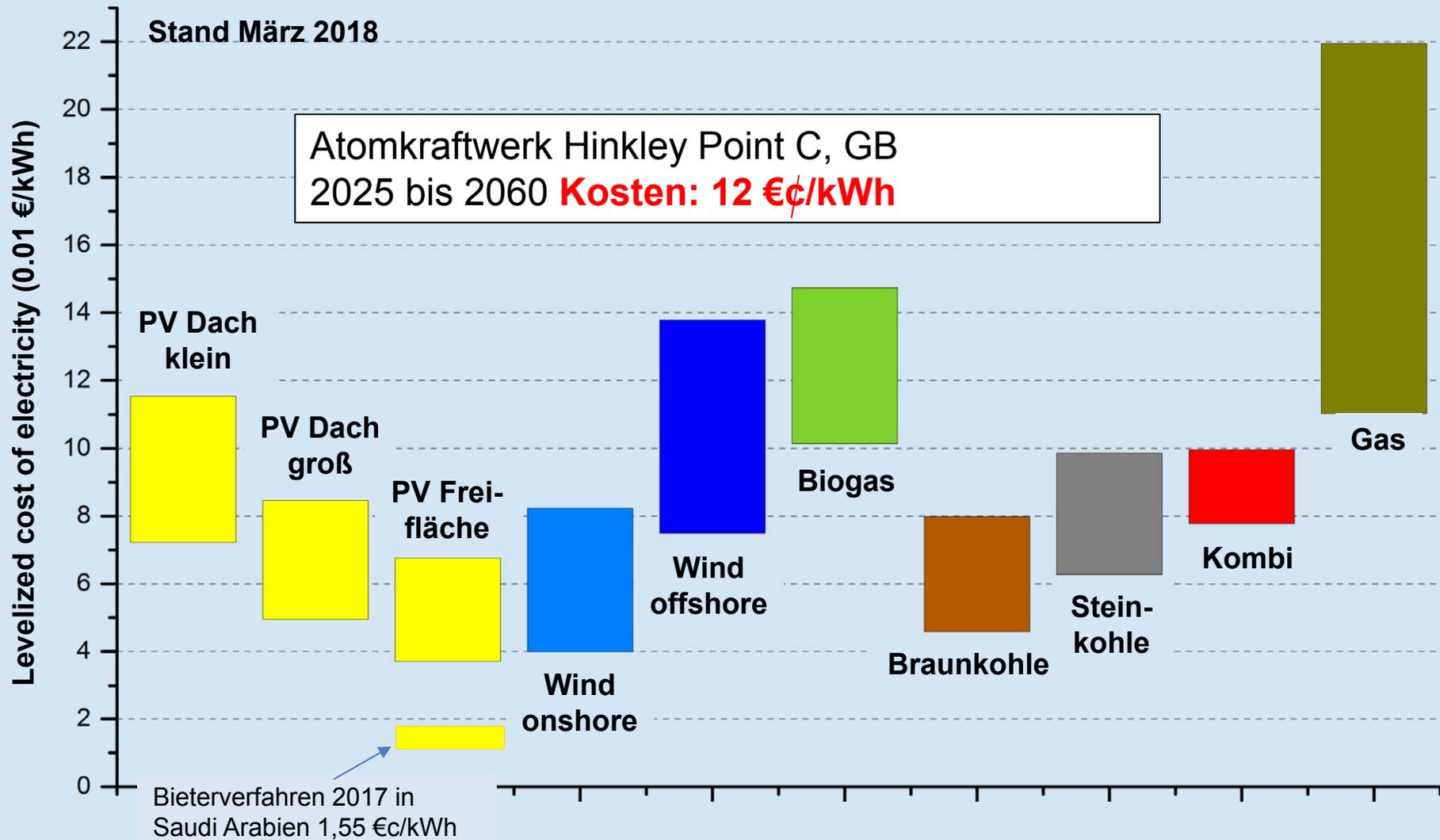


Solar und **Wind** stellen bereits über **1 TW** zur Verfügung.

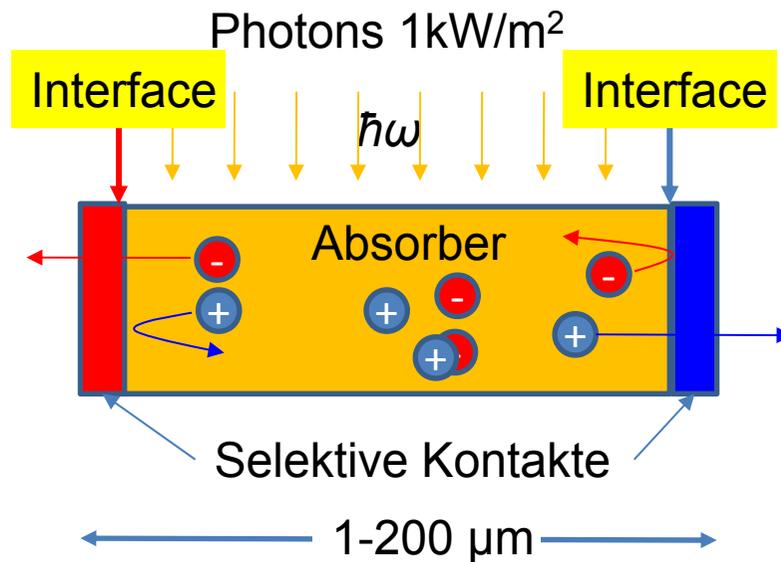


Source: Bloomberg NEF. Note: 1H 2018 figures for onshore wind are based on a conservative estimate; the true figure will be higher. BNEF typically does not publish mid-year installation numbers.

Stromgestehungskosten in Deutschland

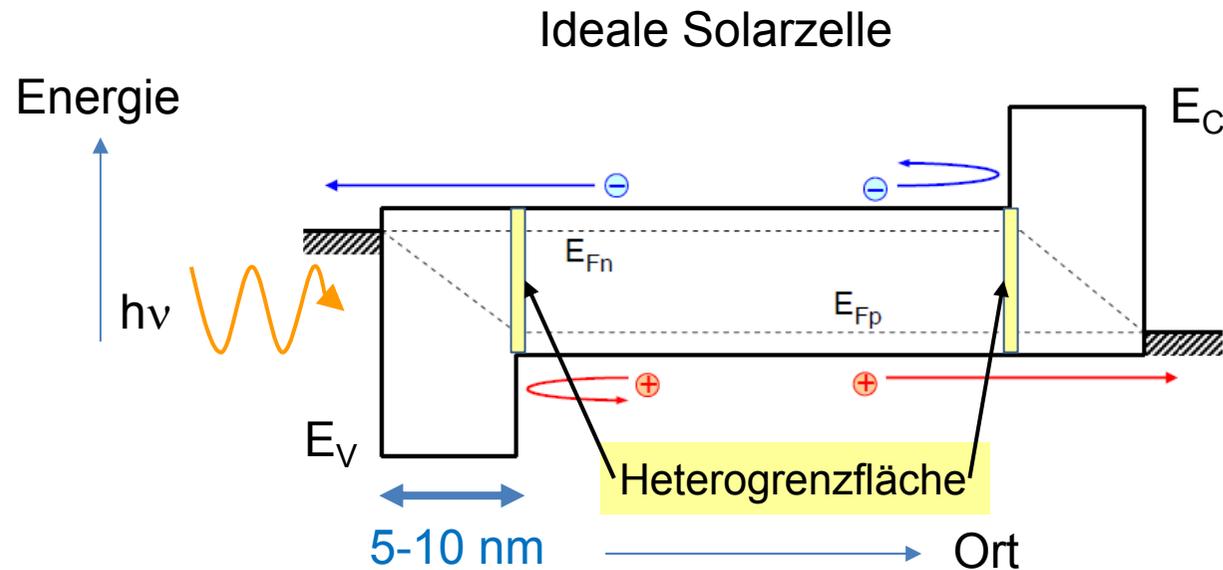


Und nun ein ganz klein wenig Physik ...



- Absorbermaterial sammelt Photonen oberhalb einer Schwellenenergie
- Gute optische Eigenschaften: möglichst alle Photonen einfangen
- Freie Ladungen schaffen es die selektiven Kontakte zu erreichen
=> Defekte an Oberfläche, Grenzfläche und im Absorber schädlich
- **Forderung:** hohe Materialqualität wird benötigt
- Derzeit beste selektive Kontakte: amorphes Silizium

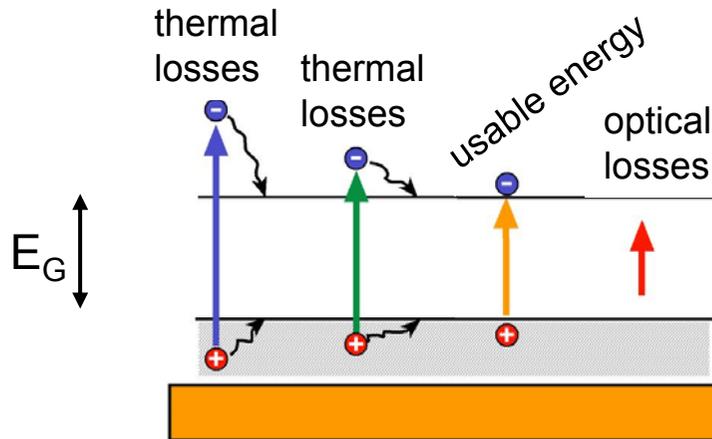
Selektive Kontakte einer Solarzelle – Rolle der Grenzflächen



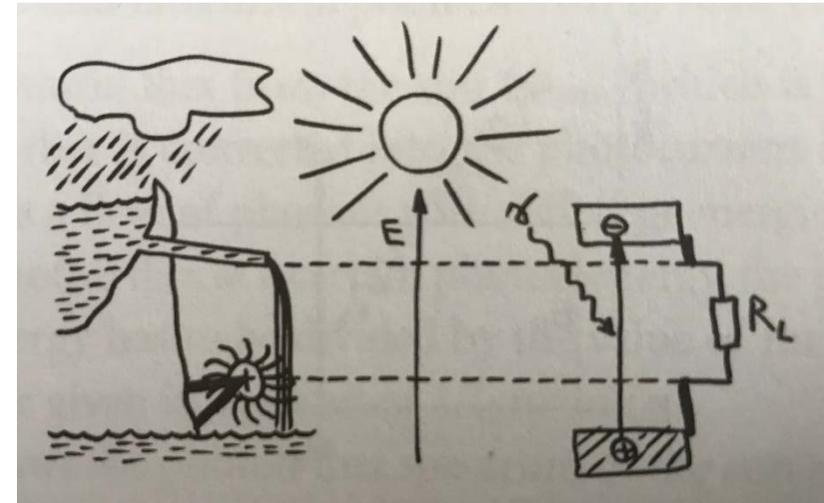
Adaptiertes Bild von Th. Dittrich (HZB)

- Absorbermaterial sammelt Photonen oberhalb einer Schwellenenergie
- Gute optische Eigenschaften: möglichst alle Photonen einfangen
- Freie Ladungen schaffen es die selektiven Kontakte zu erreichen
=> Defekte an Oberfläche, Grenzfläche und im Absorber schädlich
- **Forderung:** hohe Materialqualität wird benötigt
- Derzeit beste selektive Kontakte: amorphes Silizium

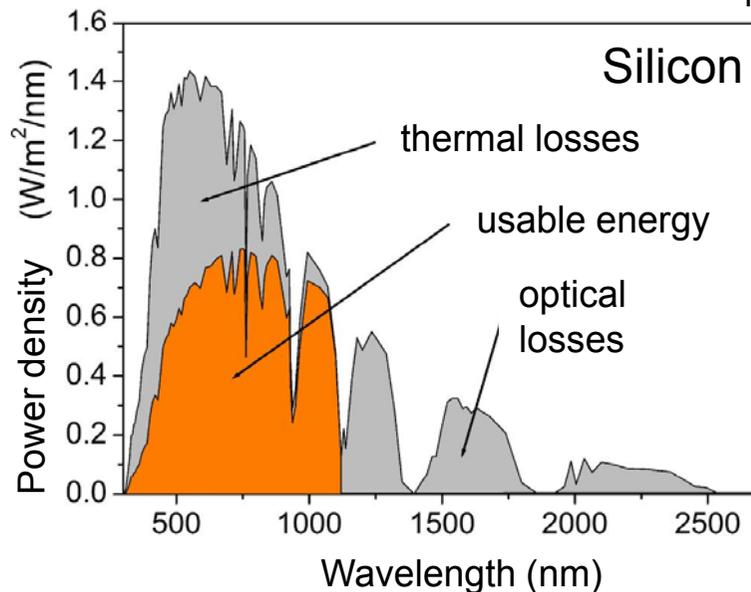
Funktionsweise einer Solarzelle



Single junction



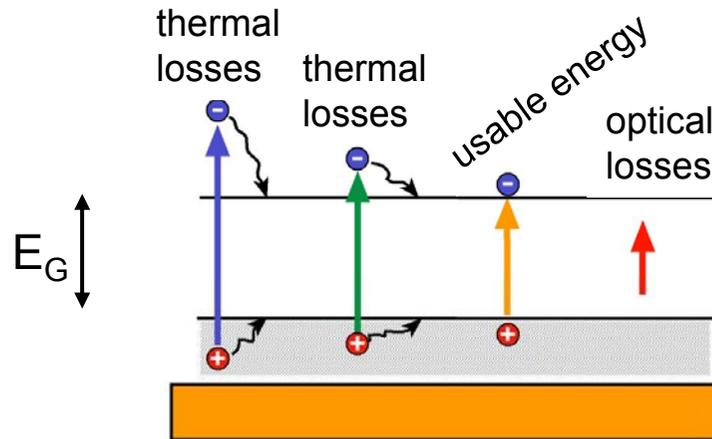
Th. Dittrich: "Materials Concepts for Solar Cells" Imperial College Press



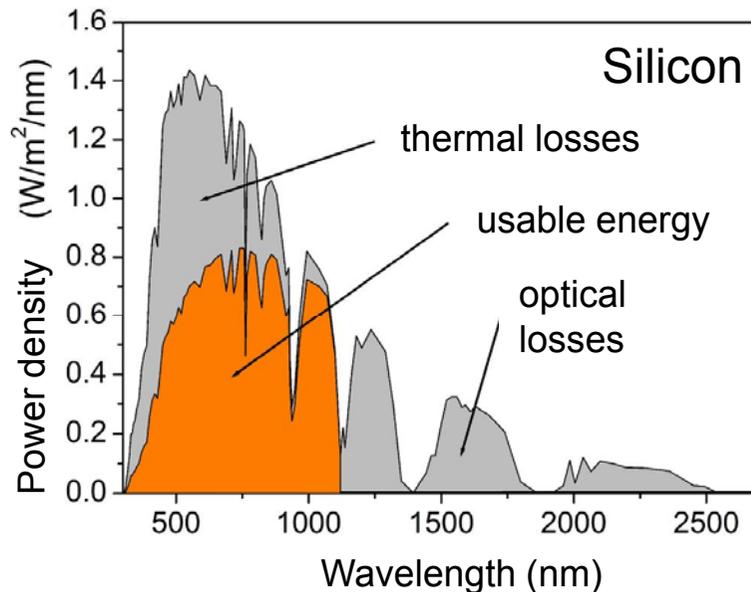
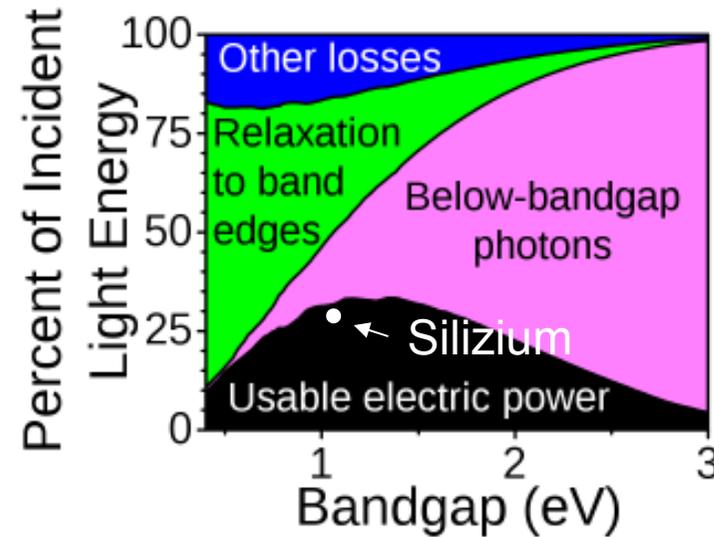
Mechanisches Analogon zur Solarzelle

Wasser muss auf eine Mindesthöhe gehoben werden, damit mechanische Arbeit verrichtet werden kann. Verluste lassen sich nicht vermeiden!

Effizienz einer einfachen Solarzelle

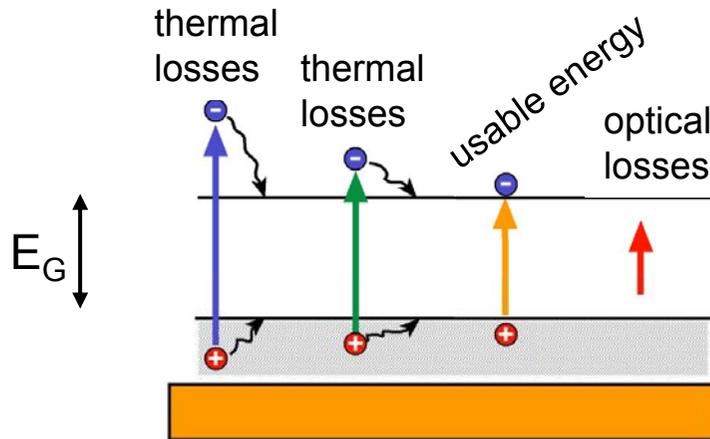


Single junction

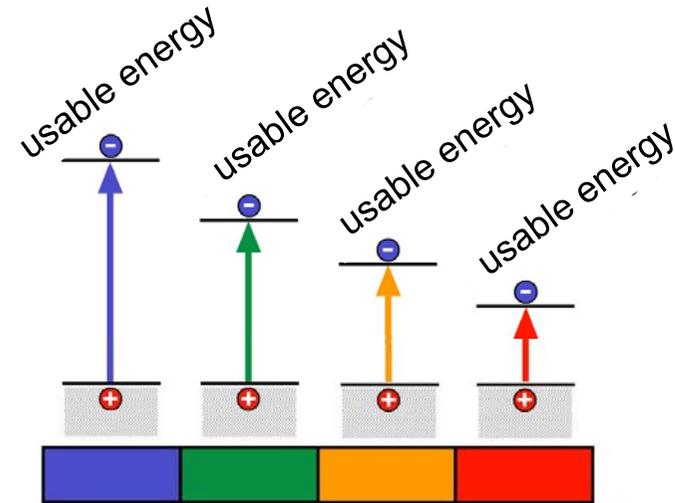


- Einfache Schwellenenergie: ca. 30% der Energie nutzbar bei einer Bandlücke von 1 - 1.4 eV
- Silizium hat 1.1 eV!

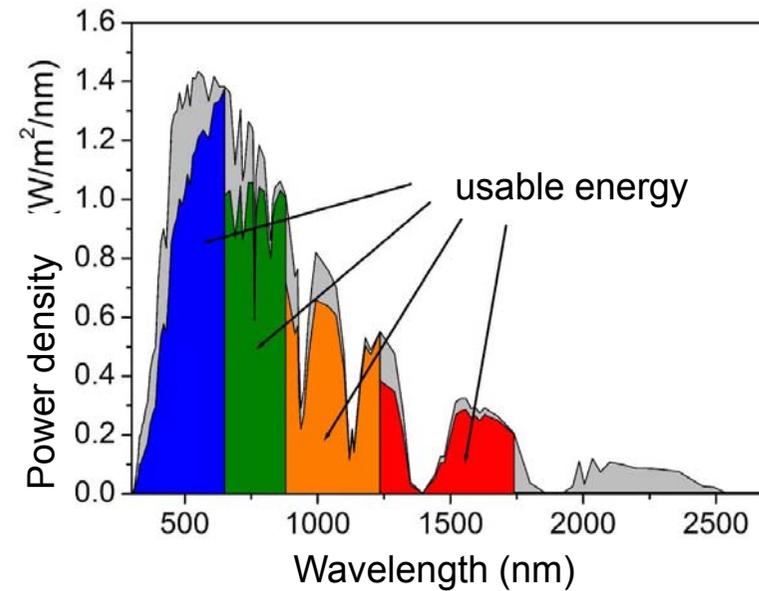
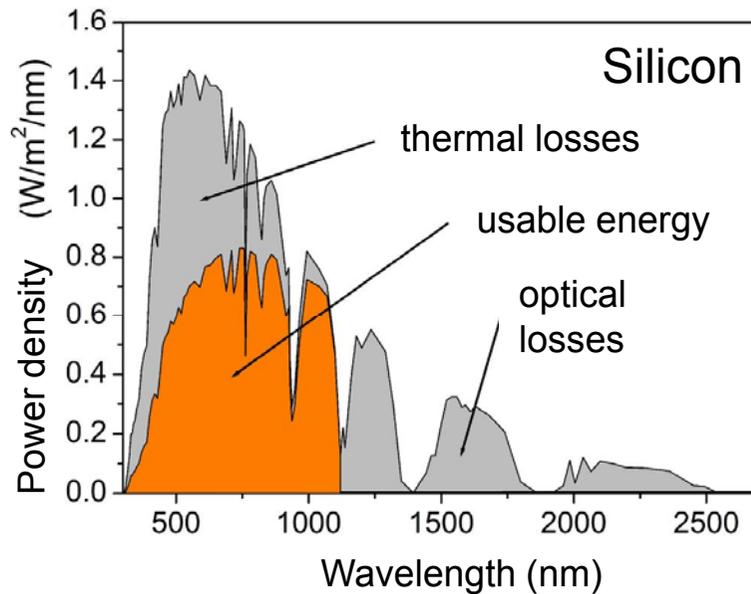
Thermodynamisches Wirkungsgradlimit



Single junction

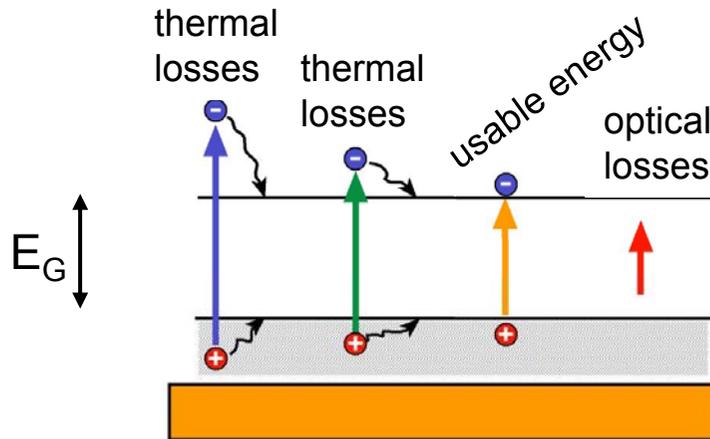


Multijunction

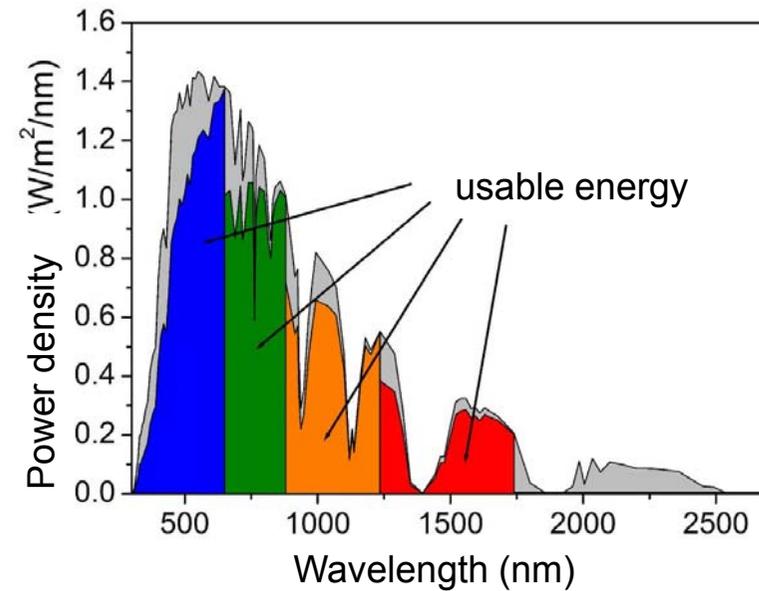
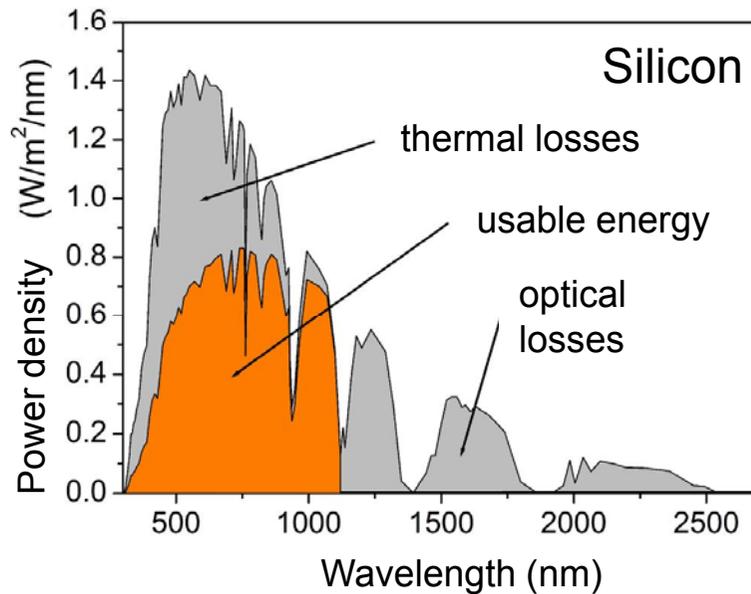
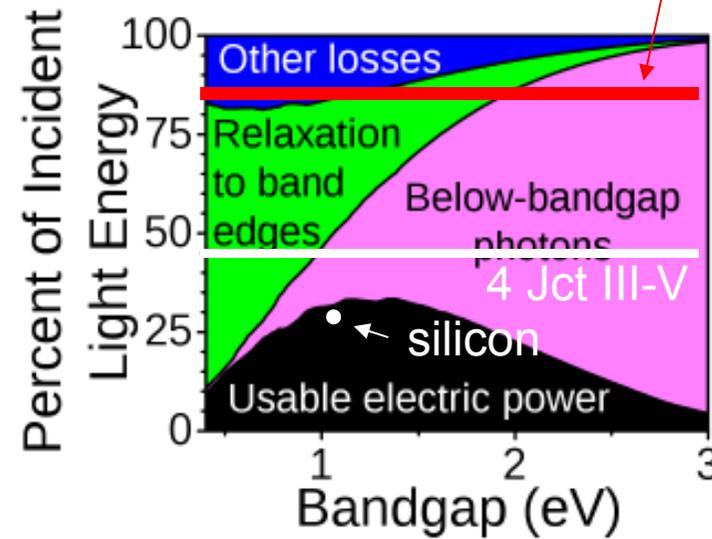


Thermodynamisches Wirkungsgradlimit

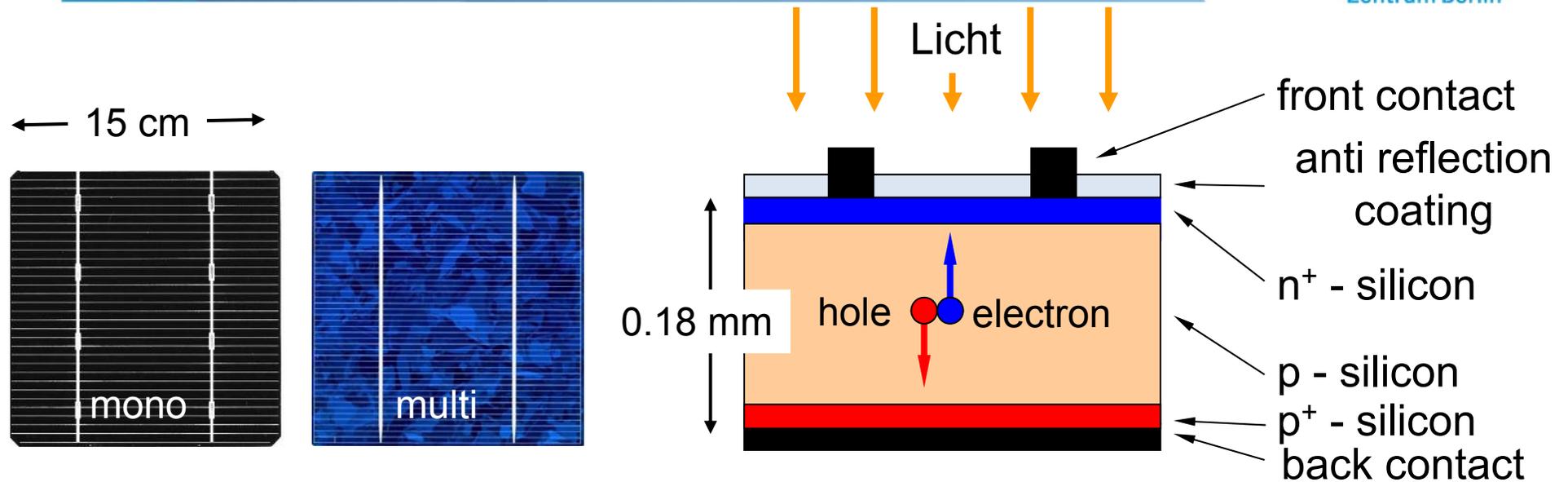
Thermodynamisches Limit: 85%



Single junction

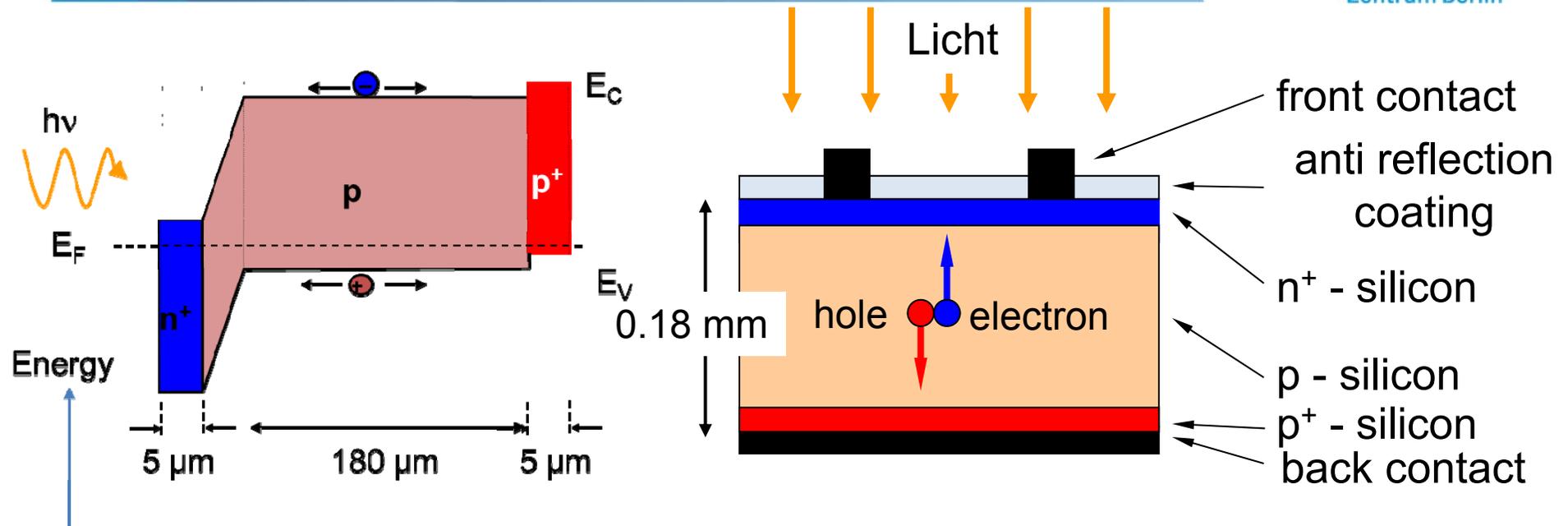


Kristalline Silizium(c-Si)solarzelle



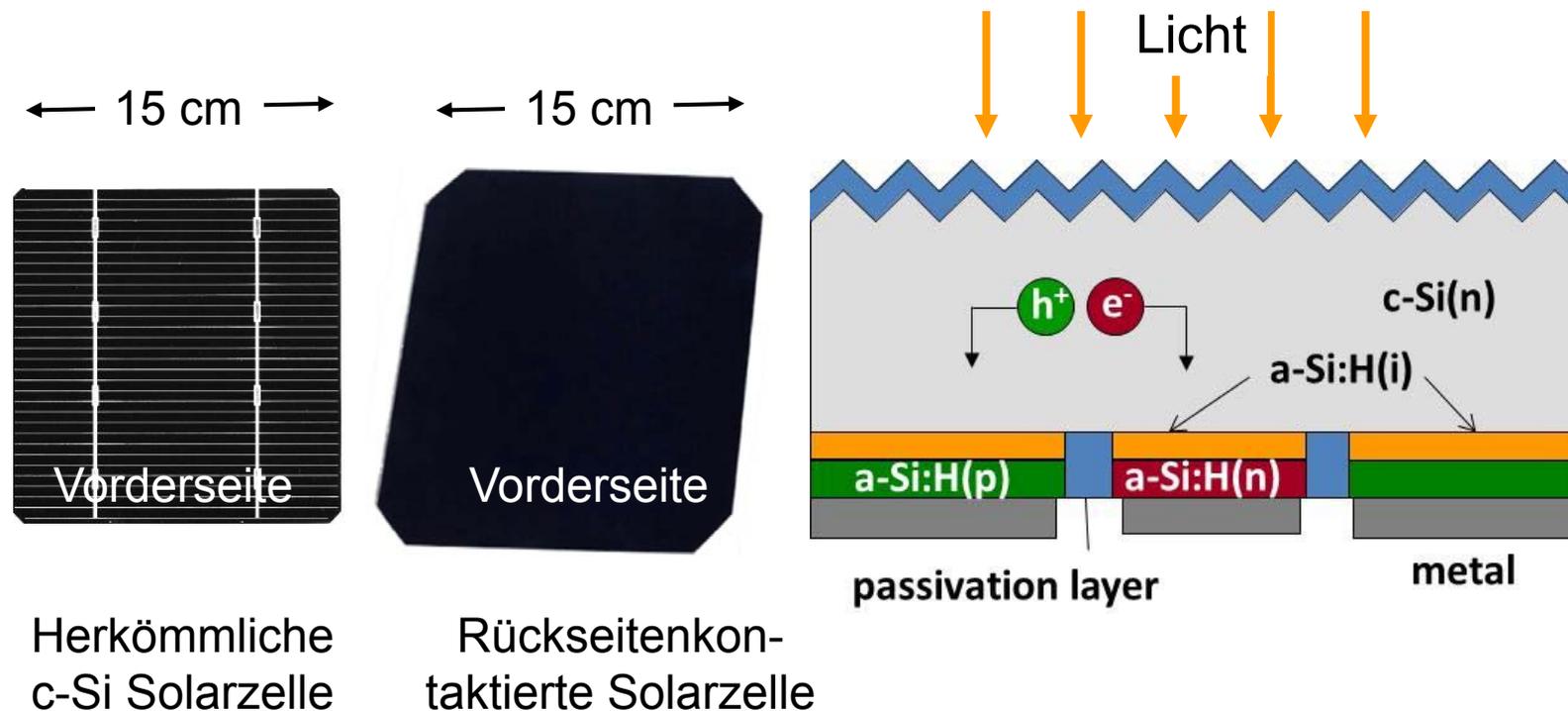
- Maximal mögliche Effizienz 29 % (“Auger limit”)
- Rekordwirkungsgrad 26 %, Modulproduktion 22 %
- Verluste in den selektiven Kontakten

Kristalline Silizium(c-Si)solarzelle



- Maximal mögliche Effizienz 29 % (“Auger limit”)
- Rekordwirkungsgrad 26 %, Modulproduktion 22 %
- Verluste in den selektiven Kontakten

a-Si / c-Si Hetero(HIT)solarzelle



Weltrekordeffizienz 26.7 %, in Modulproduktion ca. 22 % (Kaneka)

Vorteil: 10 nm ultradünner selektive Kontakt, kaum Absorptionsverluste
=> hohe Leerlaufspannung > 750 mV

Keine Abschattung durch Metallgitter auf Vorderseite => hoher Strom

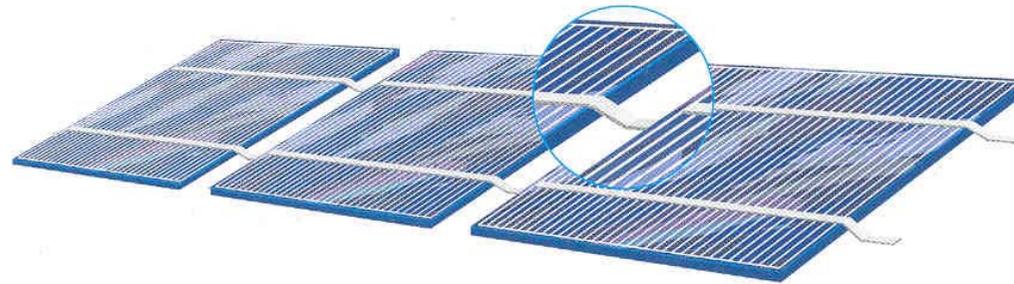
Wafer-basierte Module

$$V_{\max} / \text{cell} = 0.5 - 0.7 \text{ V}$$

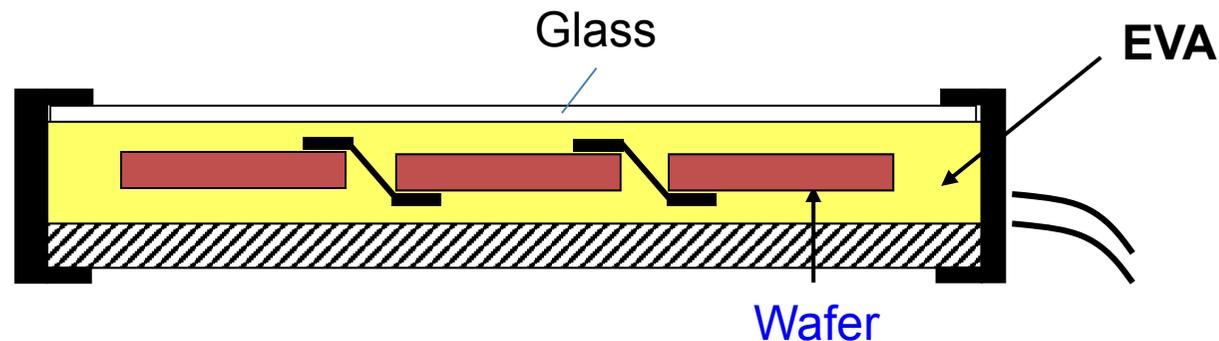
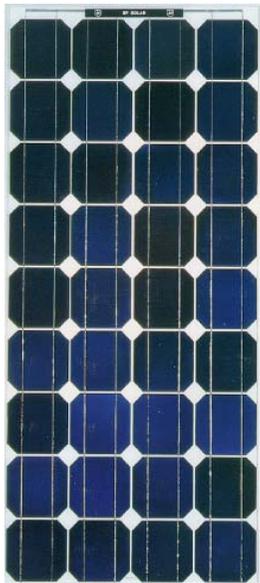
Serienverschaltung

Schlechteste Zelle

bestimmt Modulleistung



Serienverschaltung durch Löten: Spannung addiert sich
Parallelverschaltung: Strom addiert sich



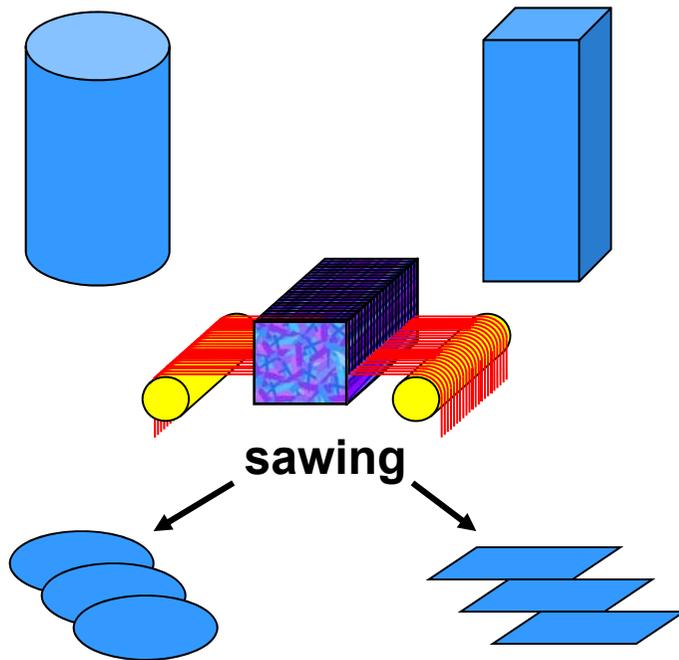
Laminierung und Verkapselung

⇒ Mechanische Stabilität, Umwelteinflüsse (bis zu 30 J. Garantie!)

Cost reduction potential: Silicon

Growth of
**single crystalline
silicon**

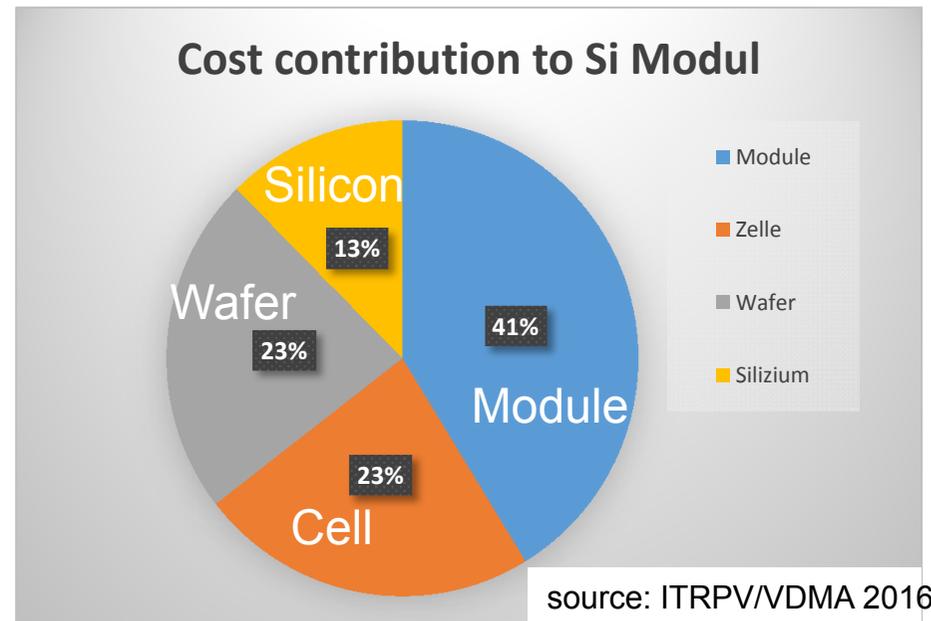
Block casting for
**multi-crystalline
Si-wafers**



S. Gall (HZB) 150-180 μm thick wafers

Cost contribution to PV system

50% module, 50% Inverter, cables etc.

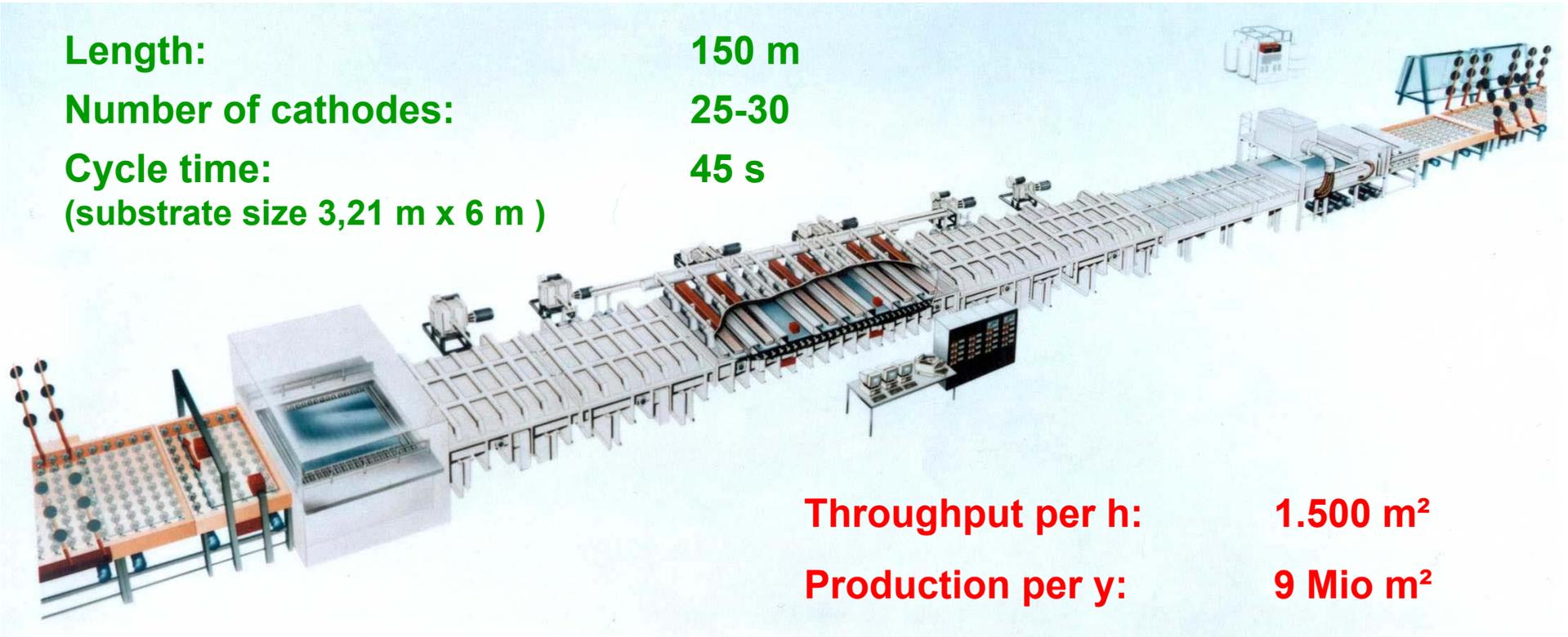


Balance of system (BOS):
half of the total PV system

- Over 30 % are Si material related costs: 40% kerf loss with wafer sawing
- \Rightarrow 2030: 20 μm thin film crystalline silicon on foreign substrates
- \Rightarrow Note: melting point of Si $T_{\text{melt}} = 1450^{\circ}\text{C}$

State-of-the-art large area coater for architectural glass

Length: 150 m
Number of cathodes: 25-30
Cycle time: 45 s
(substrate size 3,21 m x 6 m)

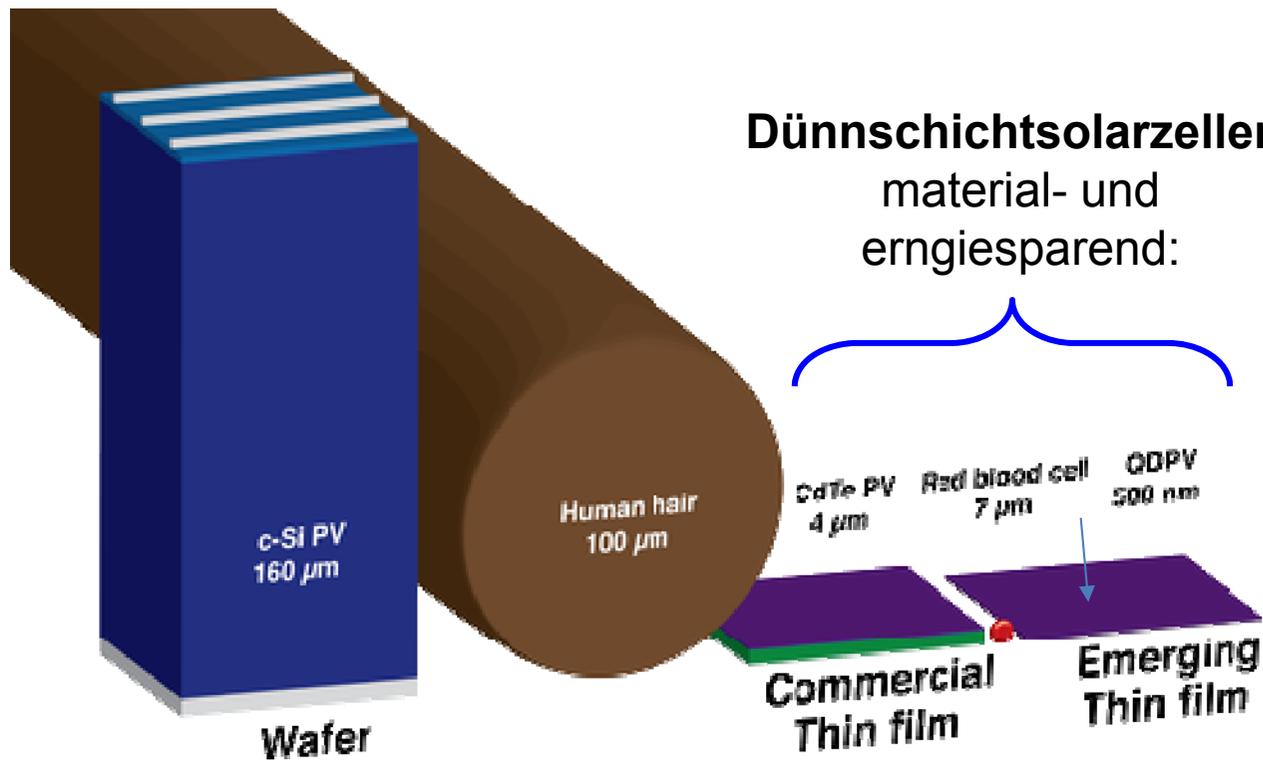


Throughput per h: 1.500 m²

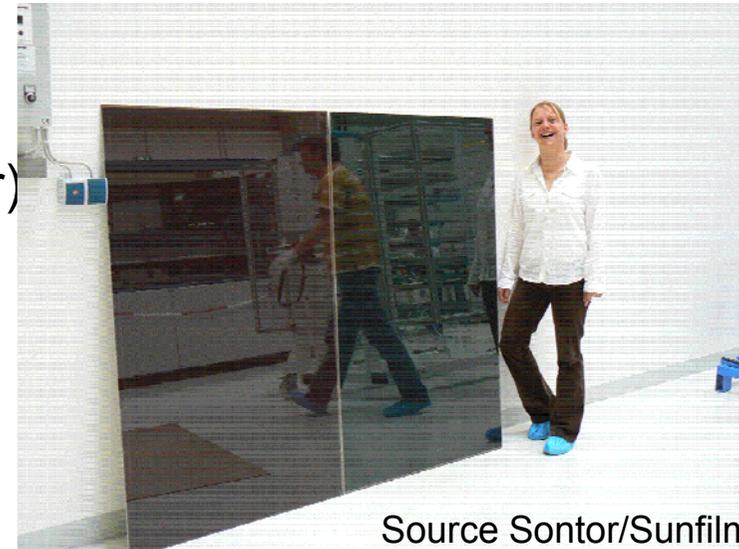
Production per y: 9 Mio m²

source: LEYBOLD Systems

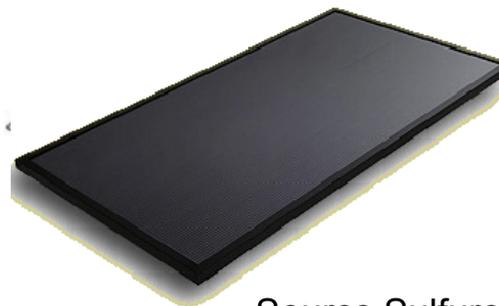
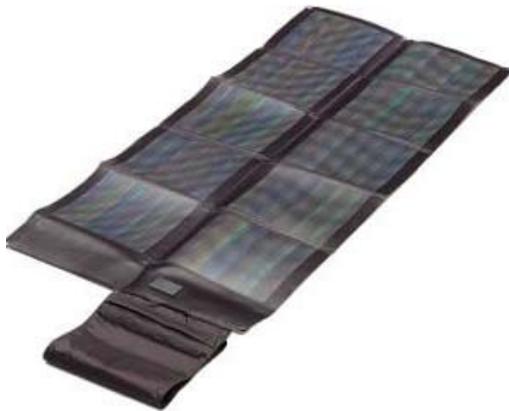
(produziert ca 1 GW/Jahr bei einer Effizienz
> 11% efficiency)



- Geringere Materialkosten (1-3 vs 200 μm)
- Hohe Produktivität (große Modulflächen)
- Monolitische Serienverschaltung
- geringe Energierückzahlzeit (< halbes Jahr)
- Neuartige Produkte (z.B. flexibel)
- Gebäudeintegration



Source Sontor/Sunfilm



Source Sulfurcell

Source: Sunload/ Global Solar Germany

Wirkungsgrad- und kostenoptimiert

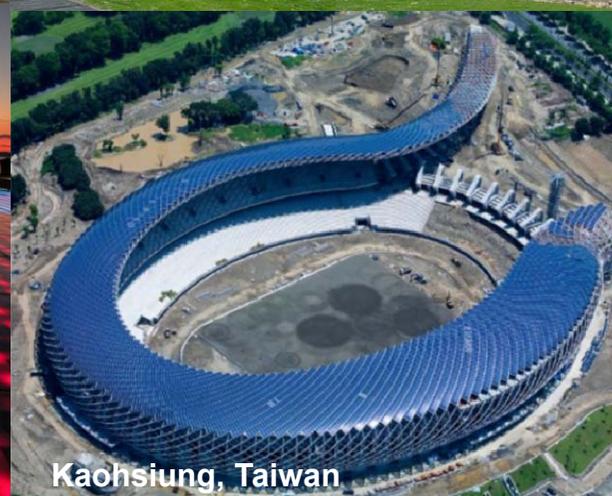


Courtesy: Wim Sinke

Design- und anwendungsoptimiert...



Designoptimiert...



Integriert in Landschaft...



A PV plant in ShanXi province, China. **Photo:** Wei Chen; **courtesy:** Hairen Tan.

Berlin hat noch viel Potential...



Photo: Klaus Jäger

Marktanteil



Flat plate: wafer-based silicon ($\approx 95\%$)

- monocrystalline
- multicrystalline

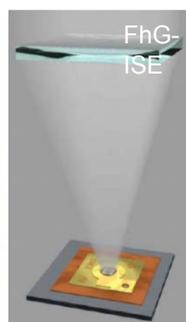
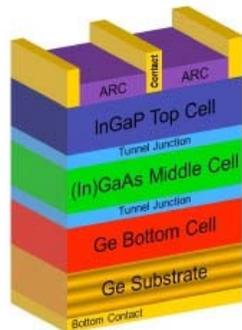
Module efficiencies 15 ~ 22%
cell record: 26.7%



Flat plate: thin films ($\approx 5\%$)

- cadmium telluride (CdTe)
- copper-indium/gallium-diselenide/sulphide (CIGS)
- amorphous and nanocrystalline silicon

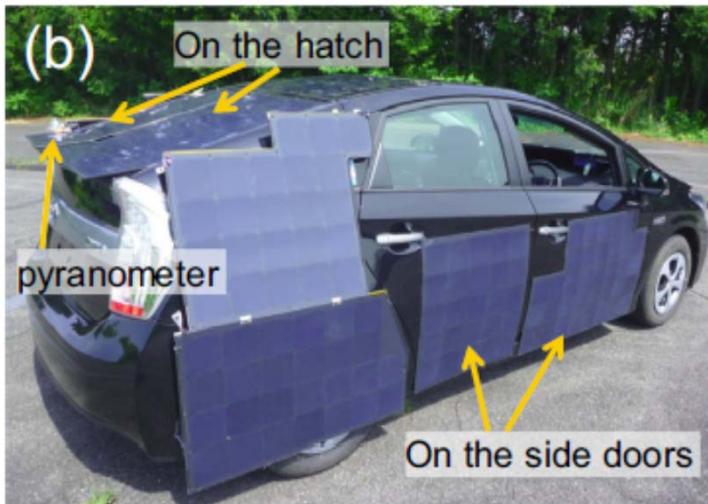
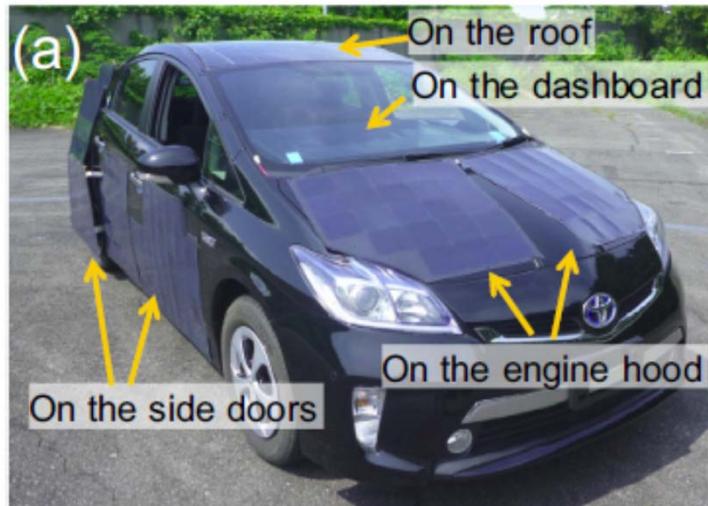
Module efficiencies 7 ~ 14%
cell record: 22.7%



Concentrator ($< 0.5\%$)

- multi-junction III-V semiconductors
- silicon

Module efficiencies 25 ~ 30%
cell record: $> 46\%$



Masuda et al., Solar Energy 146 (2017) 523–531

Marktanteil

Flat plate: wafer-based silicon ($\approx 95\%$)

- monocrystalline
- multicrystalline

Module efficiencies 15 ~ 22%

cell record: 26.7%

Flat plate: thin films ($\approx 5\%$)

- cadmium telluride (CdTe)
- copper-indium/gallium-diselenide/sulphide (CIGS)
- amorphous and nanocrystalline silicon

Module efficiencies 7 ~ 14%

cell record: 22.7%

Concentrator ($< 0.5\%$)

- multi-junction III-V semiconductors
- silicon

Module efficiencies 25 ~ 30%

cell record: $> 46\%$

- 2 m² PV Module mit $\eta > 25\%$ reichen, um die Batterien für ein E-Mobil in Deutschland für die Fahrten zur Arbeit (ca. 20 km) zu laden!

Licht und Schatten der Photovoltaik



twitter.com/lamHappyToast

Fraunhofer ISE Elektrizitätsproduktion BRD Juli 2018

ENERGY CHARTS Publishing Notes | Data Protection |

Home | Power | Energy | Emissions | Climate | Prices | Map of power plants | Information

Electricity production in Germany in July 2018

date selection

year: 2018

month: July

week:

conv. >100 MW

all sources

solar, wind

import, export

run-of-river

nuclear

lignite

lignite per unit

hard coal

oil

gas

waste

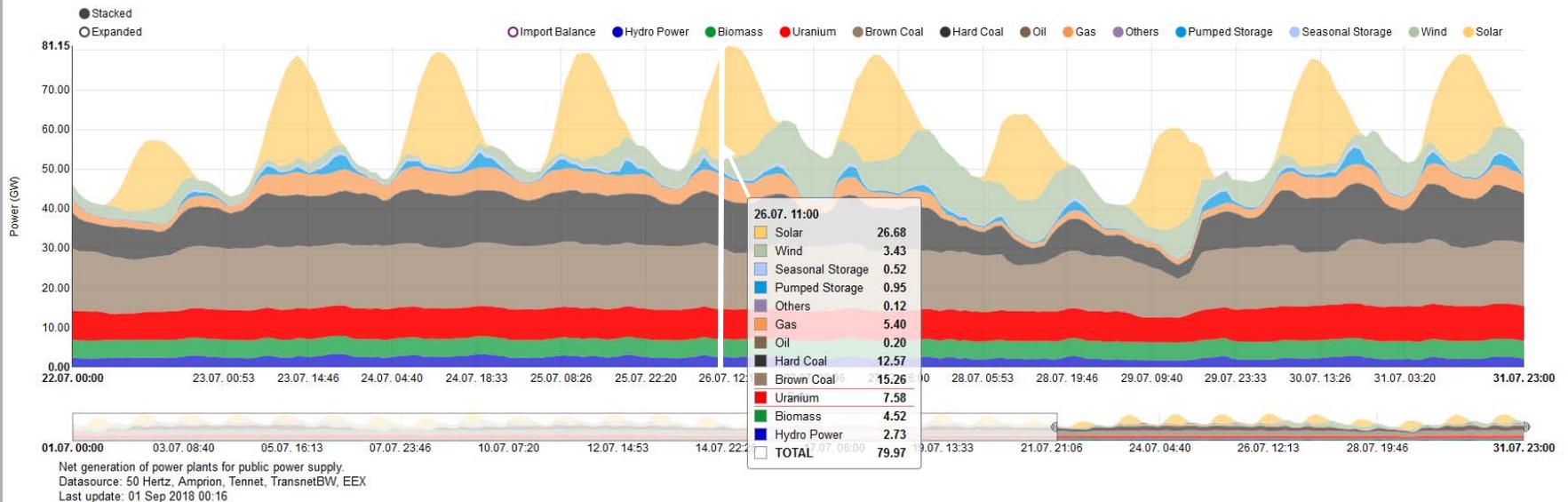
pumped storage

wind offshore

wind onshore

print

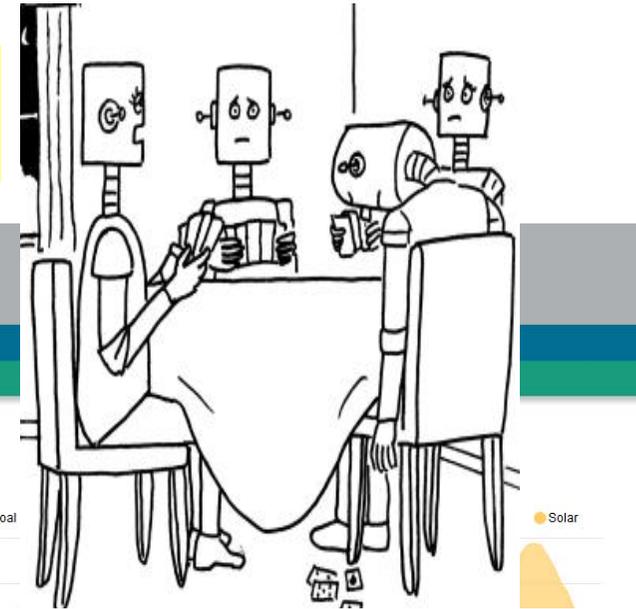
usage tips



Source: www.energy-charts.de

Licht und Schatten der Photovoltaik

Was Machen wir, wenn die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht?



Am Abend ist er immer sehr schläfrig.
Er läuft auf Solarzellen...

Fraunhofer ISE Elektrizitätsproduktion BRD Juli 2018

ENERGY CHARTS

Home Power Energy Emissions Climate Prices Map of power plants Information

Electricity production in Germany in July 2018

date selection

year: 2018

month: July

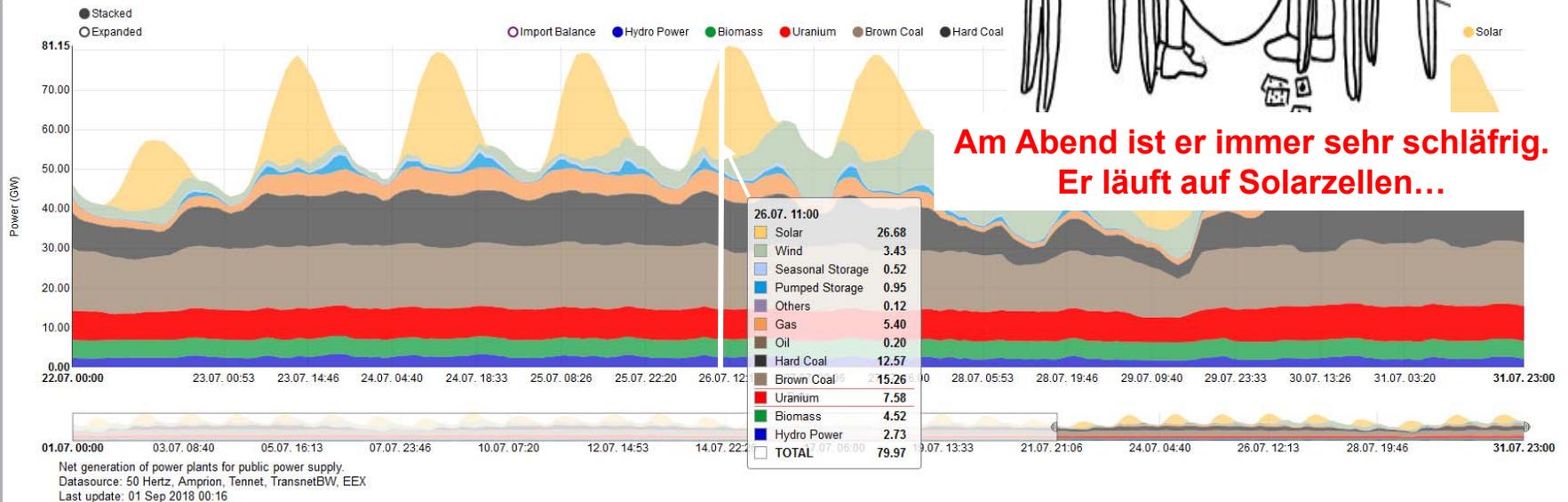
week:

conv. >100 MW
 all sources
 solar, wind
 import, export

run-of-river
 nuclear
 lignite
 lignite per unit
 hard coal
 oil
 gas
 waste
 pumped storage
 wind offshore
 wind onshore

print

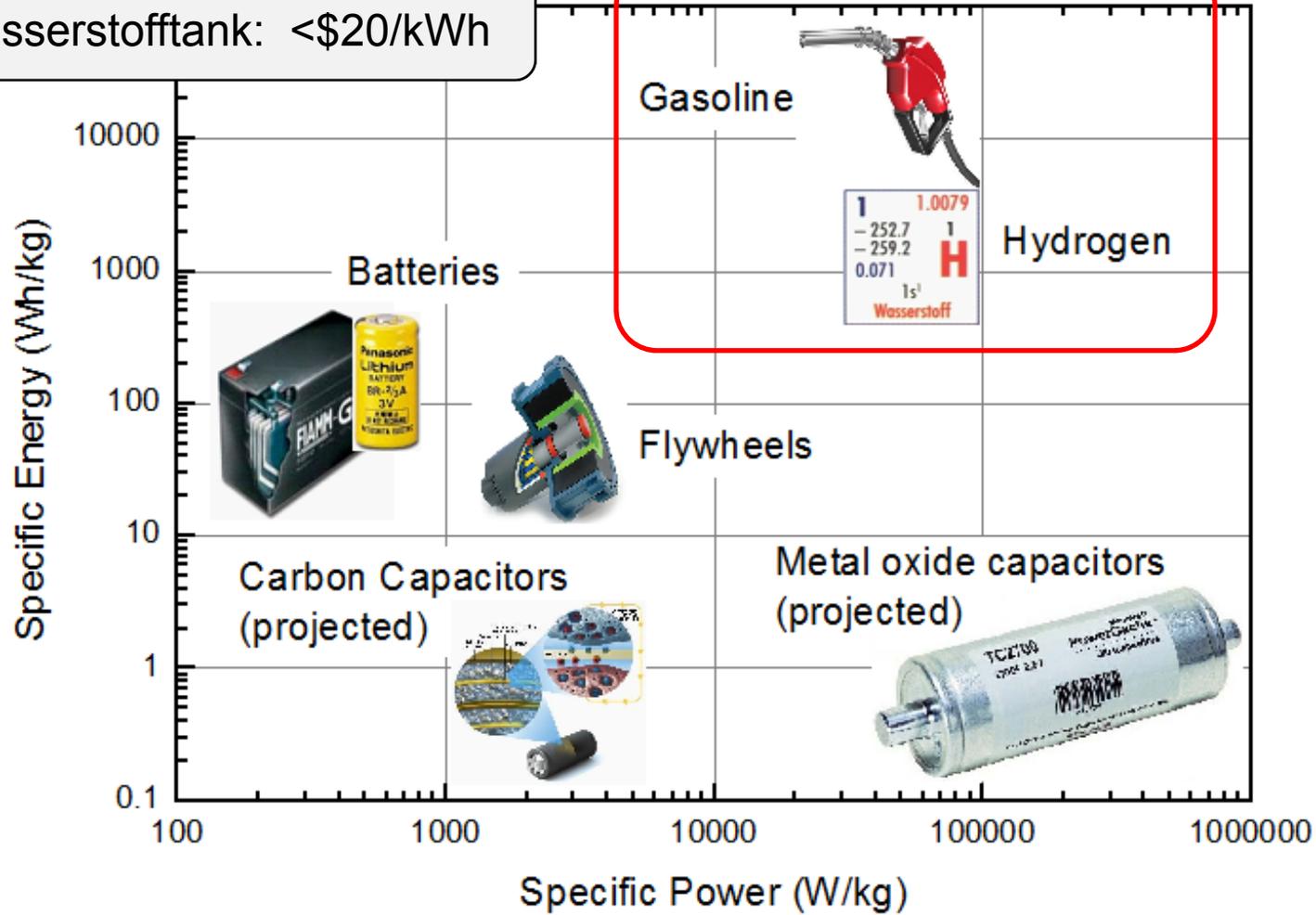
usage tips



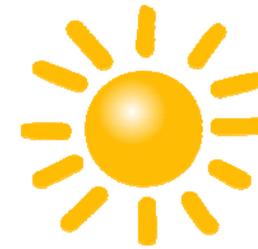
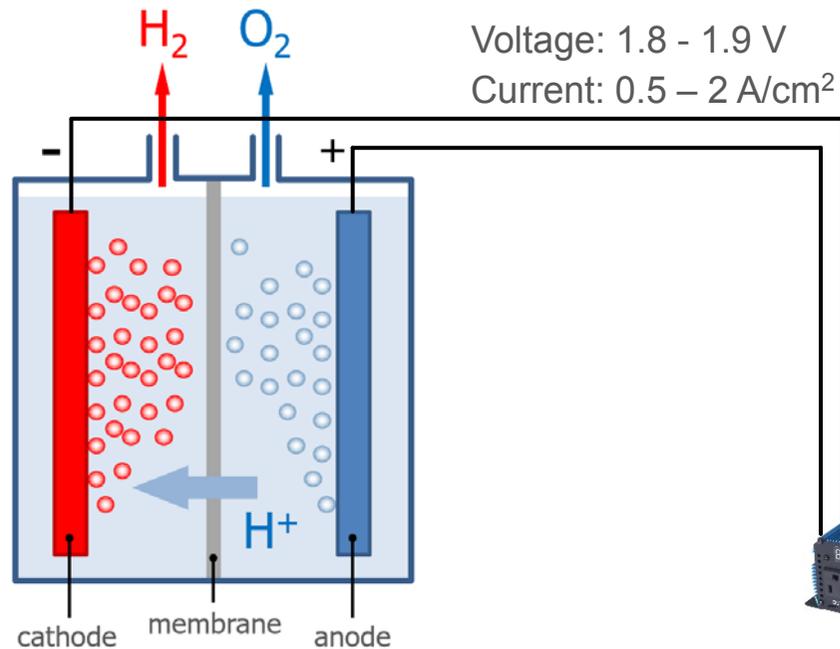
Speicherkosten:

Li-Ionen Batterie: ~\$200/kWh

Wasserstofftank: <\$20/kWh



Wasserstoffproduktion durch PV + Elektrolyse



Solar cell

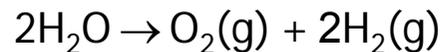
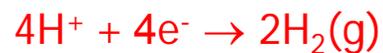


12 - 24 V



DC-DC
converter

Light is absorbed by
a semiconductor
(typically silicon)

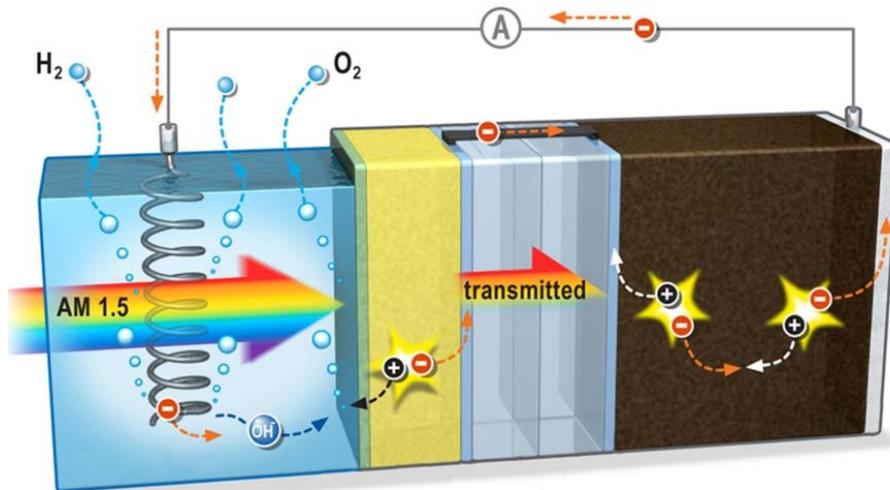


- ✓ Reife Technologie
- ✓ Jede Komponente einzeln optimierbar
- ✓ Wasserstoff lässt sich gut in bestehende Infrastruktur integrieren

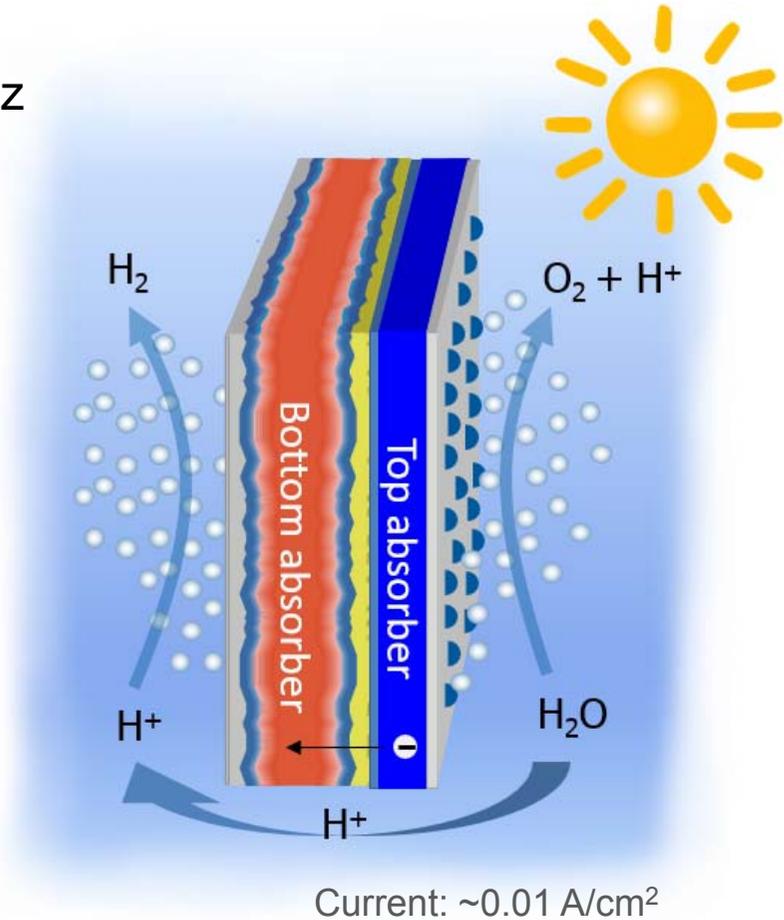
- ✗ Es braucht Wasser
- ✗ Komplexes System → hohe Kosten
- ✗ Elektroden korrodieren ohne Last, PEM-Elektrolyse benötigt Platin od. Iridium

Direkte Wasserstoffproduktion durch Licht

6 % Licht zu Wasserstoff Umwandlungseffizienz



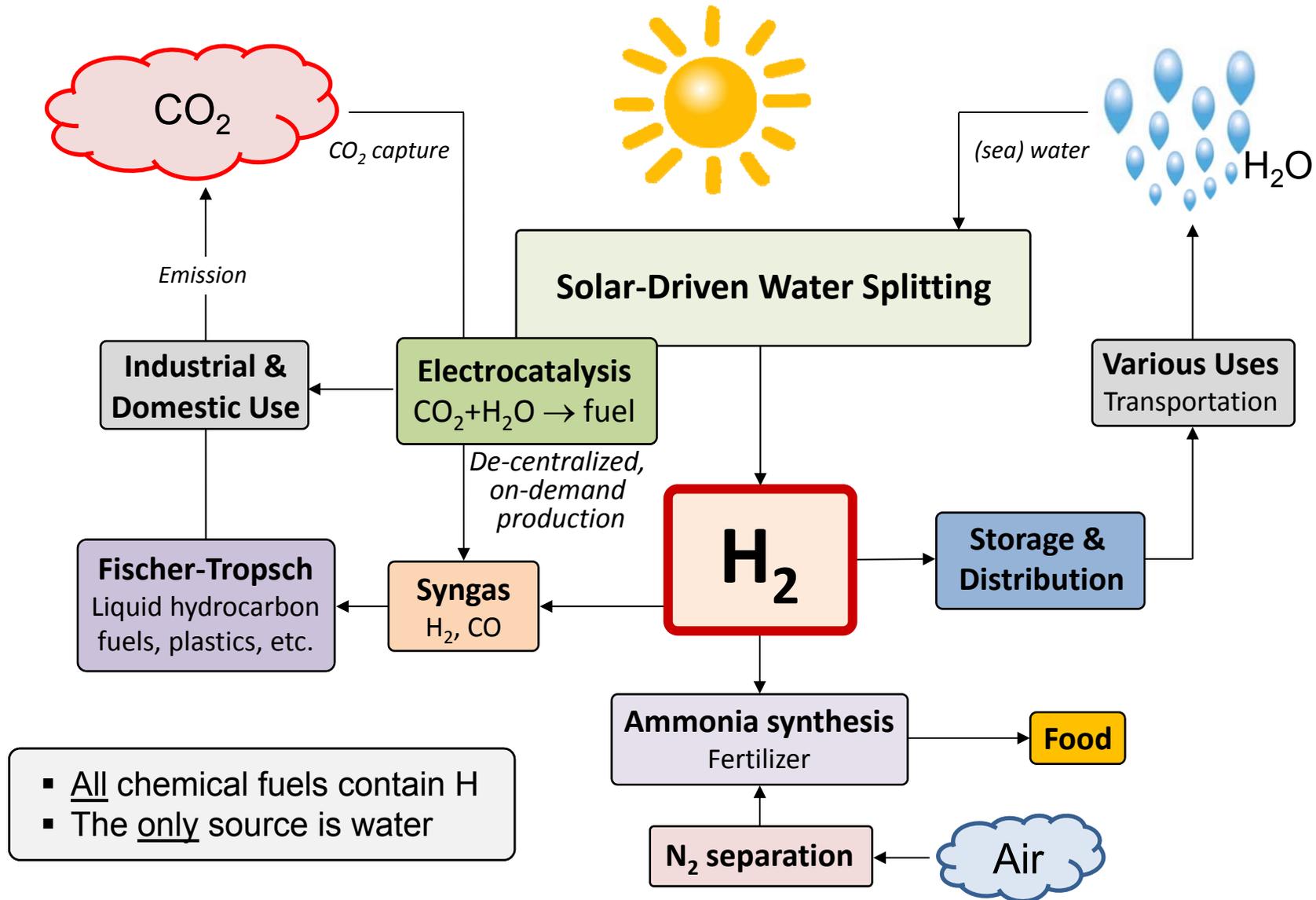
Nat. Commun. 4:2195 (2013)



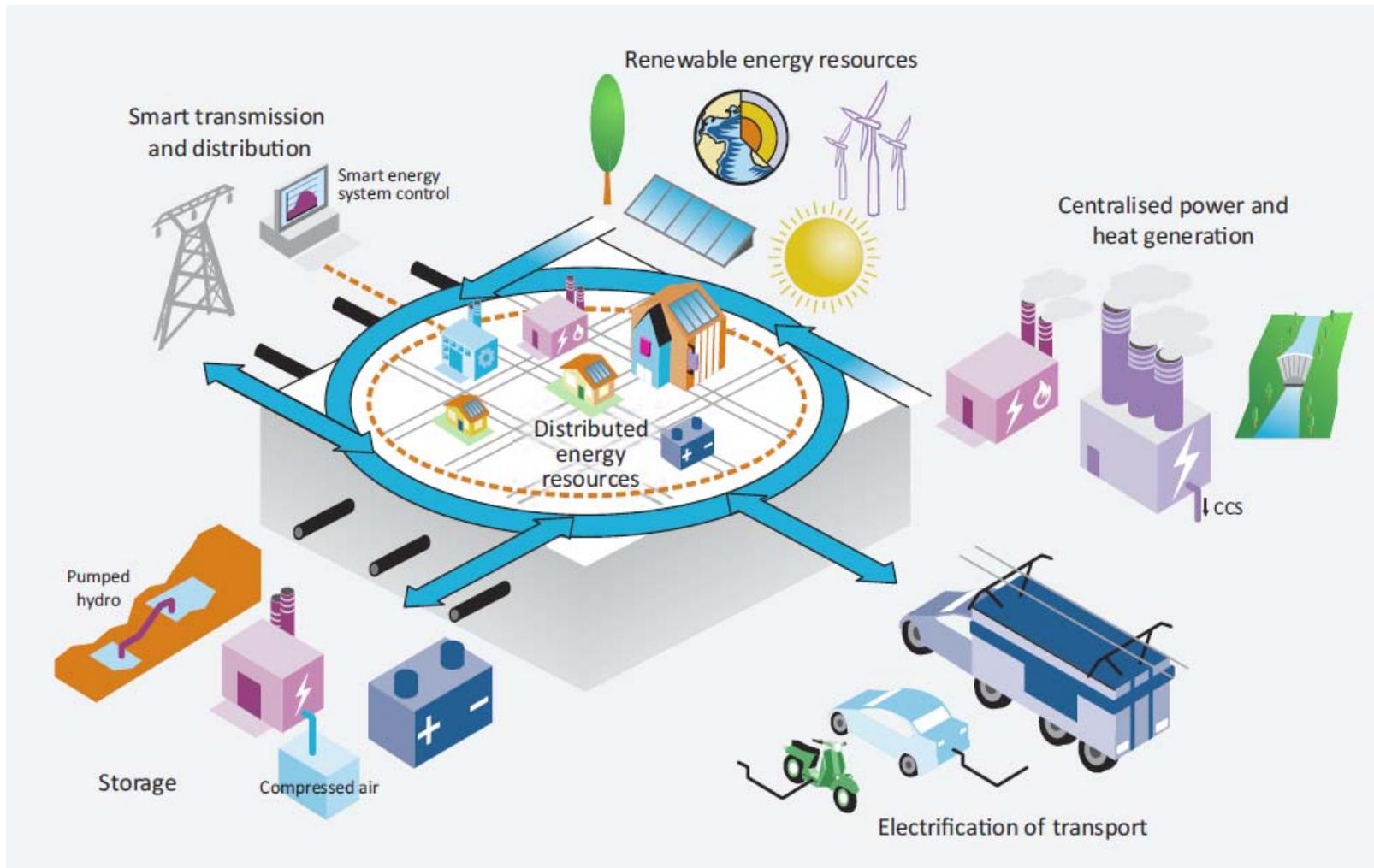
- ✓ Integration kann Kosten reduzieren
- ✓ Stromdichten ~100x kleiner als mit Elektrolyseur

- ✗ Preiswerte Katalysatoren fehlen
- ✗ Herausforderung bei der Hochskalierung

Rolle des Wasserstoffs in der Energiewirtschaft

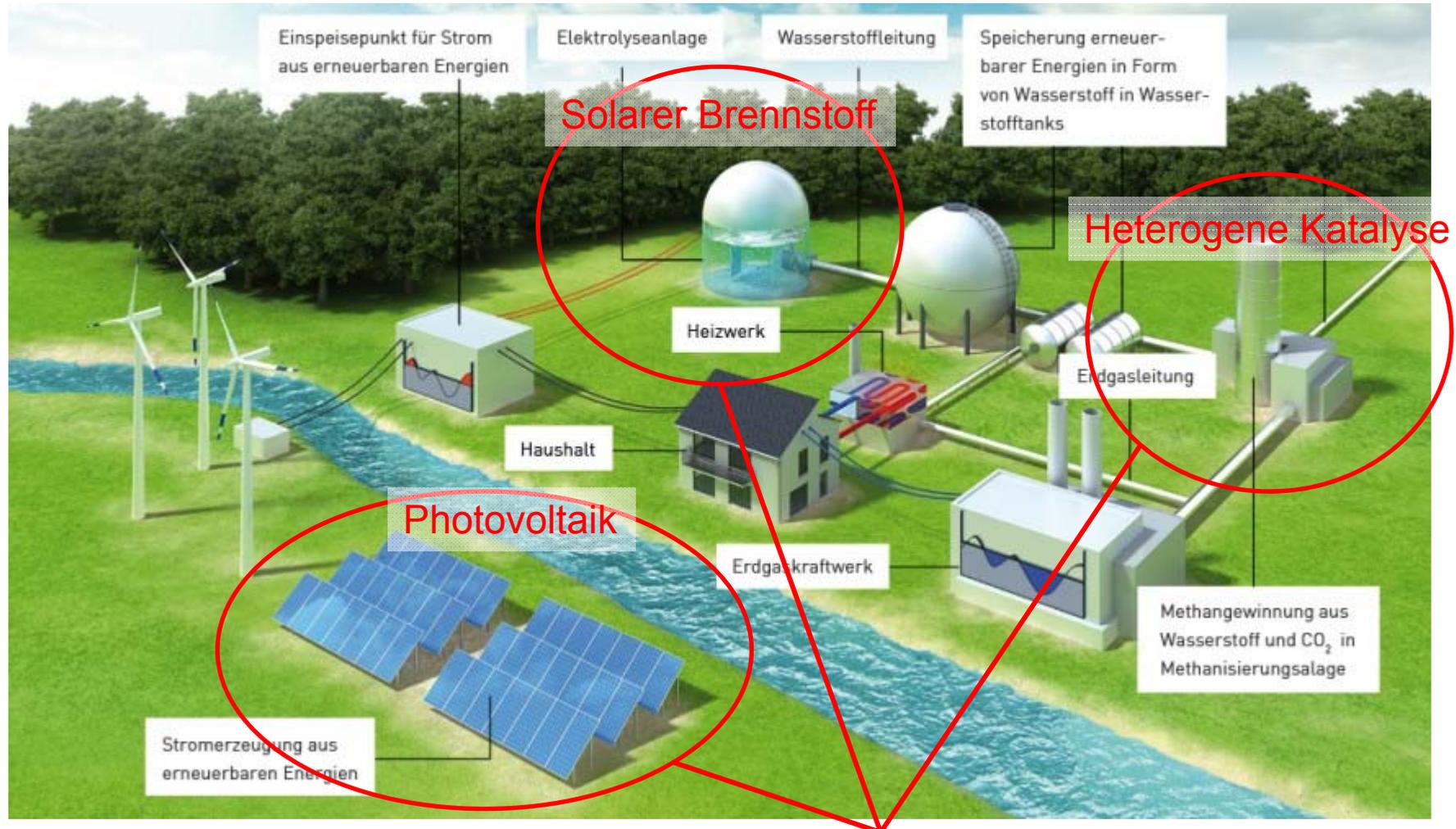


Integriertes und intelligentes Elektrizitätsnetzwerk in 2050



Source: <http://www.iea.org>

Von der Sonnenenergie zu Brennstoffen

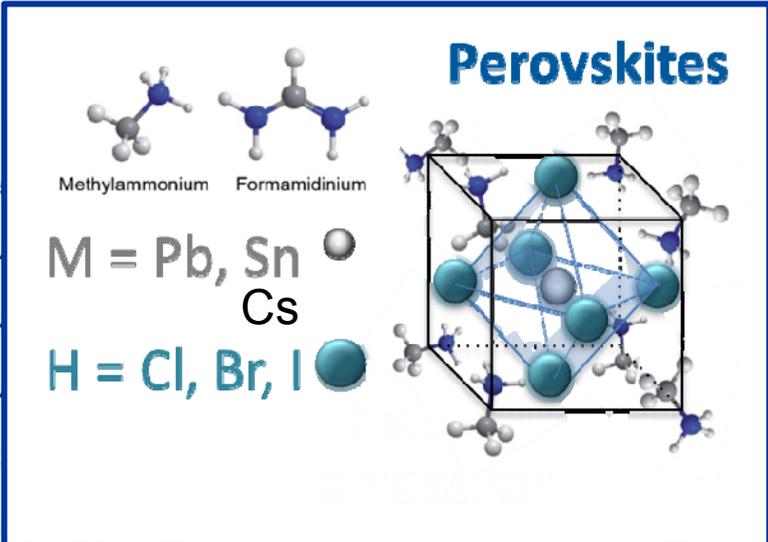


Quelle: EnBW

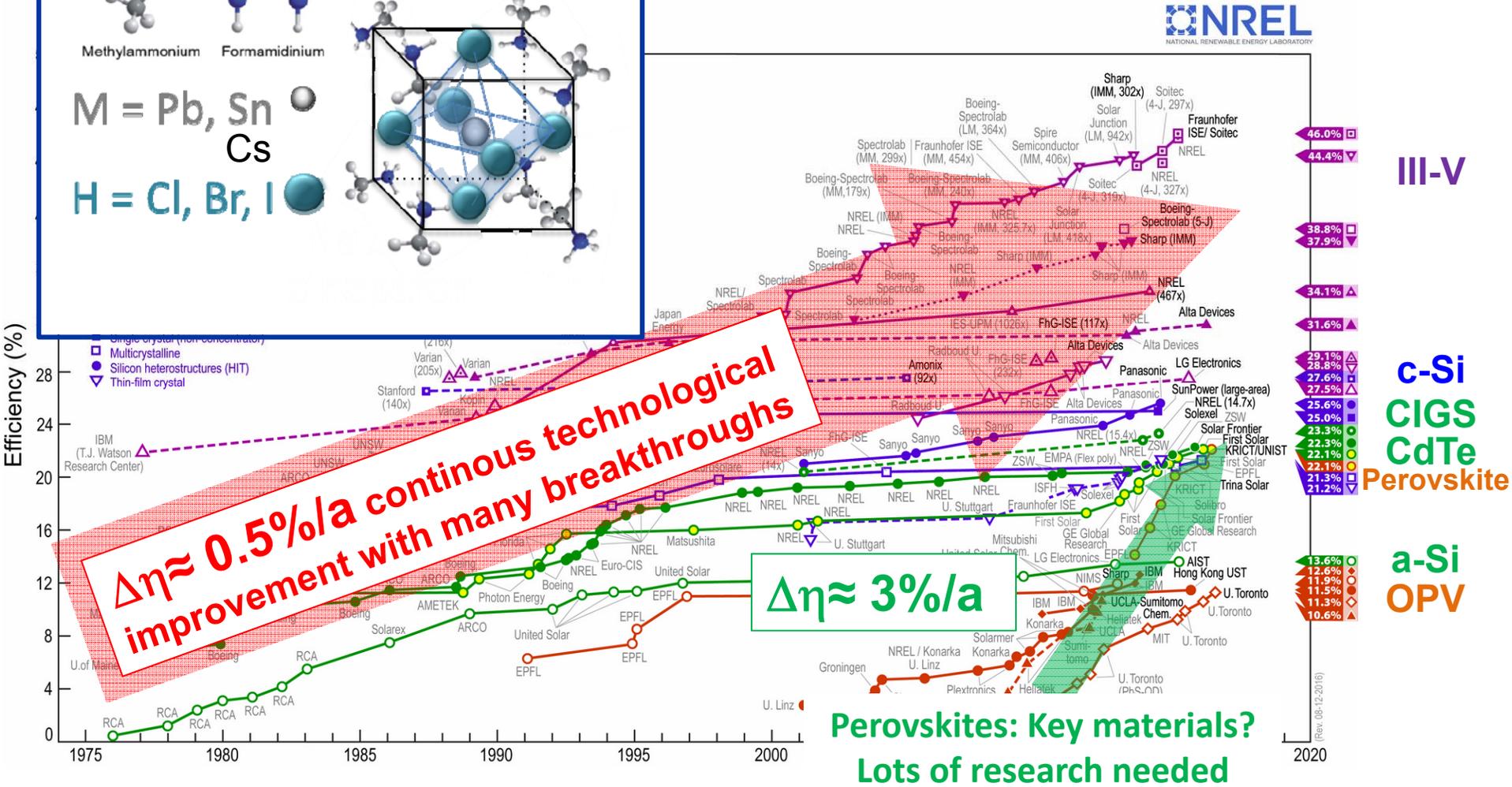
Wissenschaftliche Herausforderungen für Physik und Chemie

Noch ein ganz klein wenig Physik zum Ende

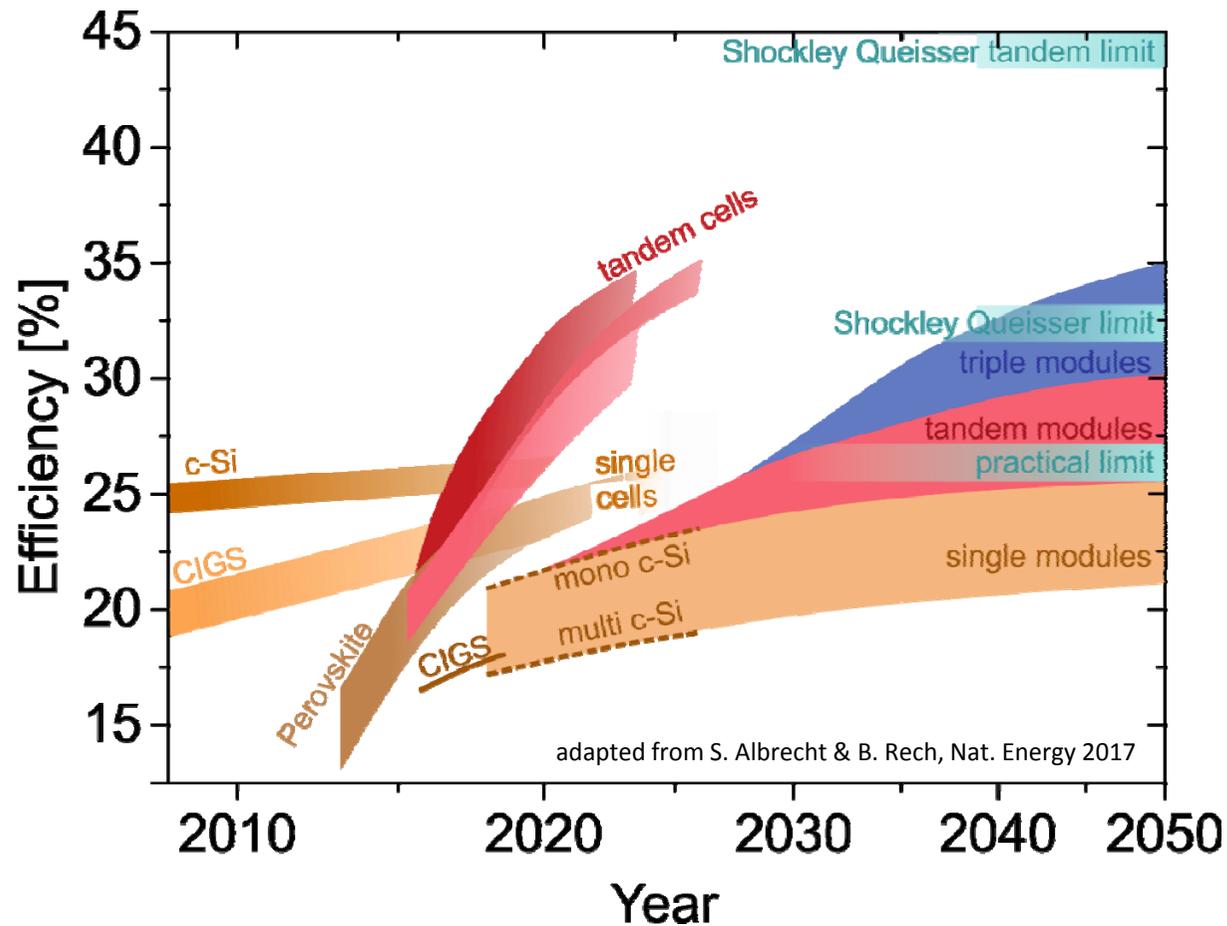
Efficiency limits of solar cells



Photovoltaic cell efficiencies

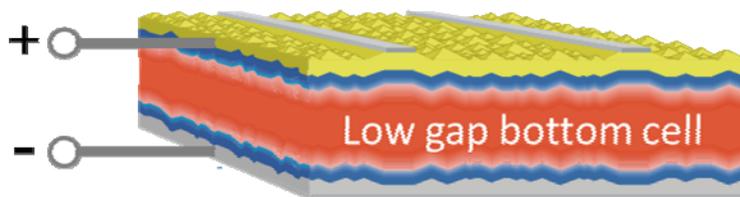
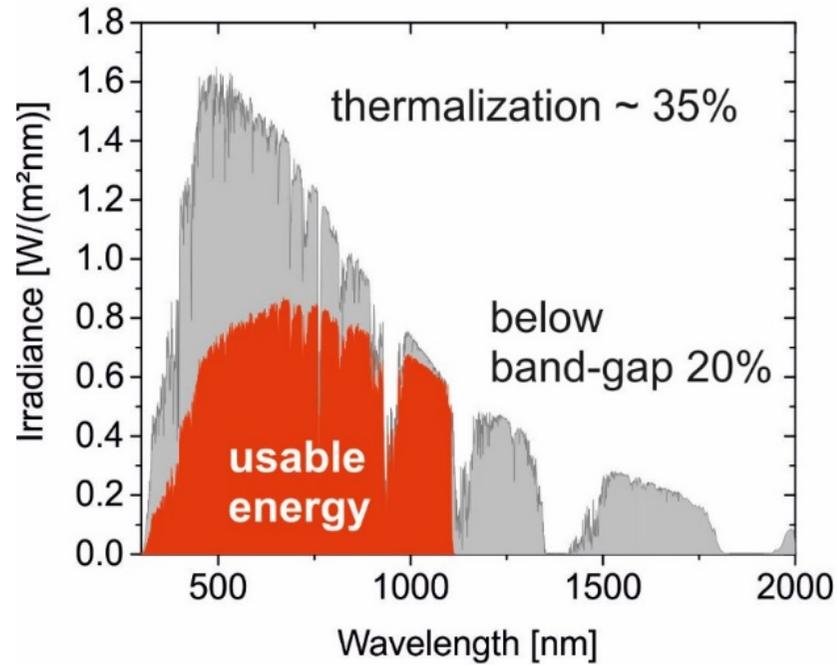


Source: http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency_chart.jpg

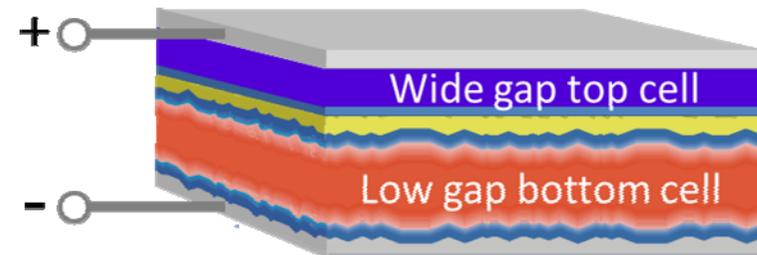
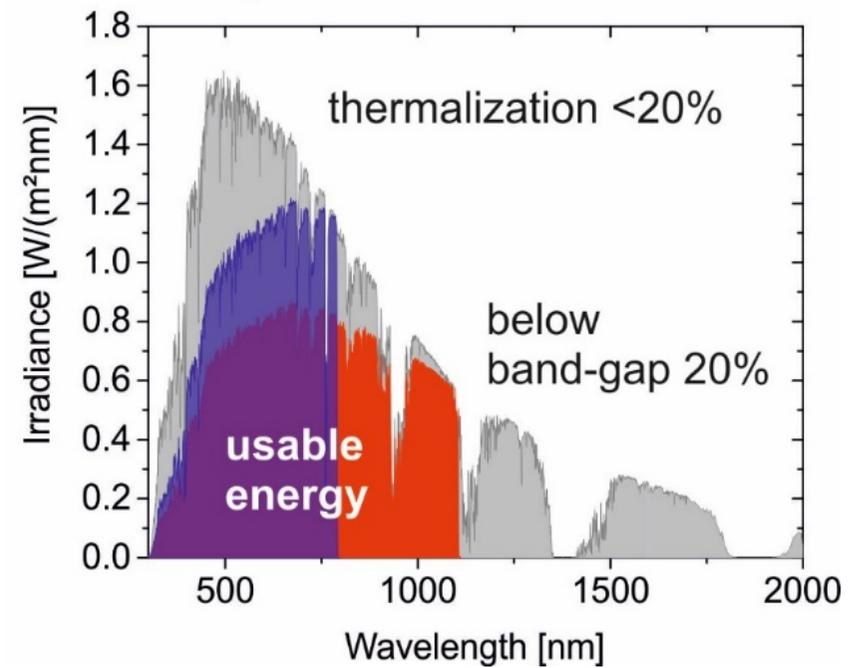


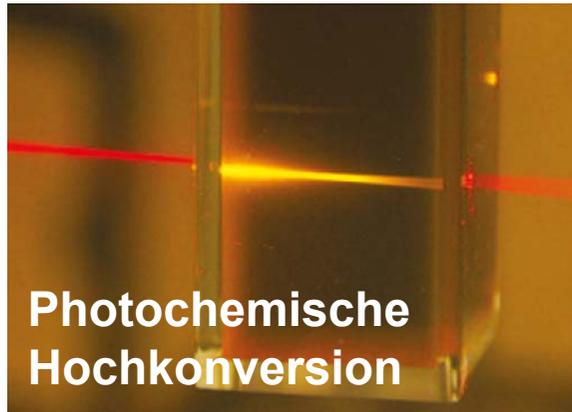
- Photovoltaic technology still has plenty of room for efficiency improvement
- Multi-junction PV can provide efficiencies surpassing today's limits

Single junction



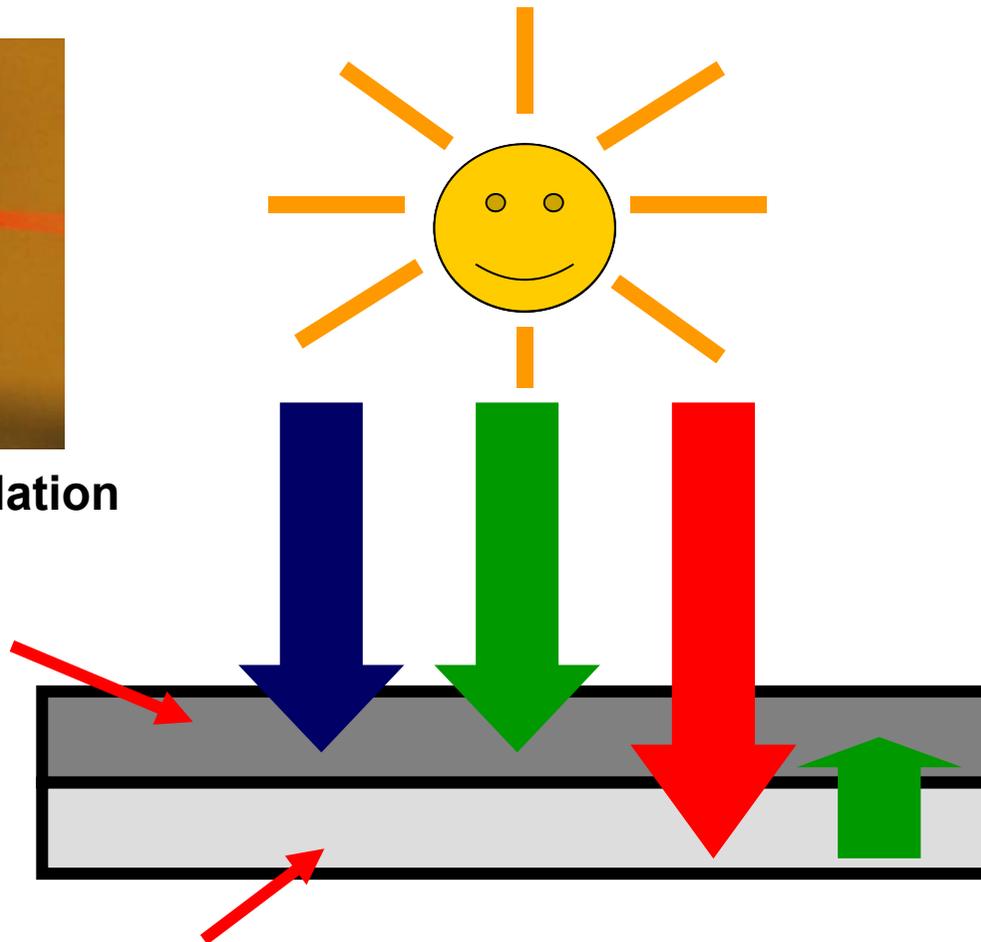
Multi-junction





TTA: triplet-triplet annihilation

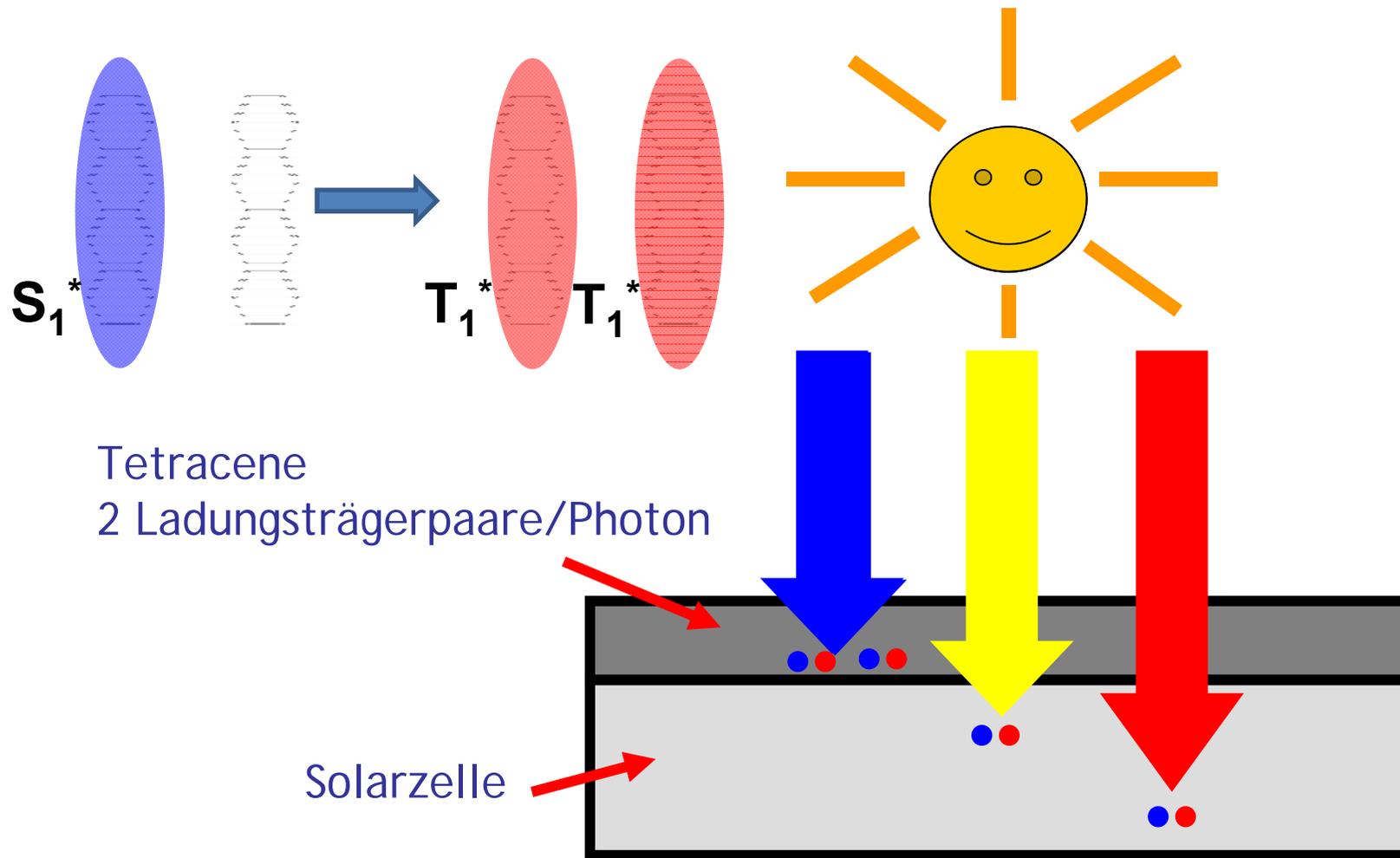
Solarzelle



Hochkonverter

Machbarkeitsstudien...

Aus Eins mach Zwei: Singlet fission



Machbarkeitsstudie

Vorteil

- ❑ Wird günstigste Form der elektrischen Energieerzeugung
- ❑ 600 km x 600 km PV-Fläche (Eff. 15%) stillen Weltenergiehunger
- ❑ Leichte Integration in bestehende Infrastruktur (Netz)
- ❑ Gebäudeintegration möglich
- ❑ Energierückzahlzeit < 1 Jahr, > 25 Jahre Garantie
 - => 25 x Energieernte
 - => CO₂ neutrale Stromproduktion
- ❑ Schneller Aufbau: 2 GW PV-Kraftwerk innerhalb eines Monats!
1 GW Atomreaktor oder Kohlekraftwerk: 10-15 Jahre Aufbau!
- ❑ Recyclebar

Herausforderung

- ❑ Flukturierende Leistung: Speichertechnologie nötig
 - => **power to gas (Wasserstoff, Methan,...)**
 - => **Batterietechnologie, Pumpkraftwerk, Druckluft...**
 - => **Inteligente Netze (smart grids)**

} Intensiver
Forschungs-
gegenstand



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

www.cartoonbank.com



Ich meine, dass es Zeit ist eine Technologie zu entwickeln, um einen Asteroiden abzulenken...