
DIE SOLARENERGIE ALS PFEILER UNSERER KÜNFTIGEN, NACHHALTIGEN ENERGIEVERSORGUNG



Eicke R. Weber

Leiter,
Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE und
Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg

Rudolf Jaeckel Preis der DVG
Soest, 4. September 2016

www.ise.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Forschung für die Energiewende

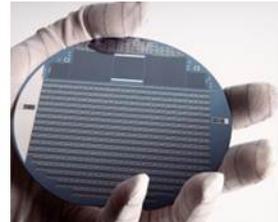
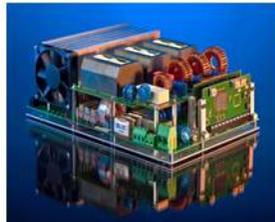
- größtes europäisches Solarforschungsinstitut
- mit ca. 1100 Mitarbeitern (inkl. Studenten)
- 15 % Grundfinanzierung
- 85 % Projektforschung, 23 % Industrie, 62 % öffentlich
- € 84 Mio. € Budget (2015, inkl. Investitionen)
- Internationale Centers in Boston, USA (CSE), Santiago, Chile (CSET)



Fraunhofer ISE

12 Forschungsthemen

Fotos © Fraunhofer ISE

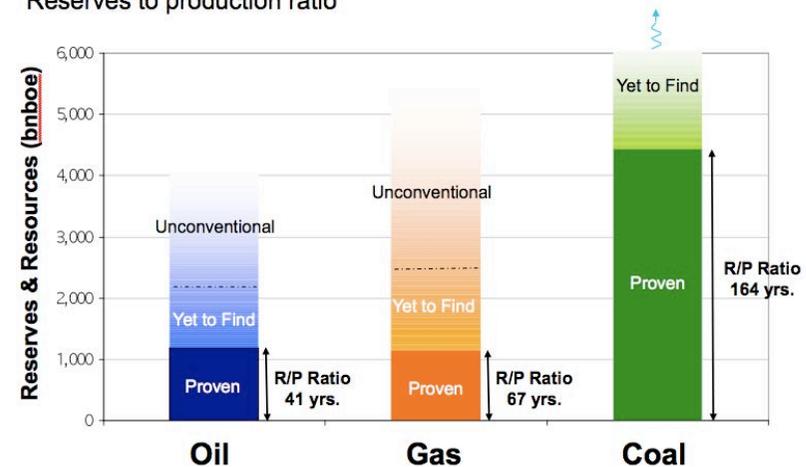


- Energieeffiziente Gebäude
- Silicium-Photovoltaik
- III-V- und Konzentrator-Photovoltaik
- Farbstoff-, Organische und Neuartige Solarzellen
- Photovoltaische Module und Kraftwerke
- Solarthermie
- Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
- Systemintegration und Netze – Strom, Wärme, Gas
- Energieeffiziente Leistungselektronik
- Emissionsfreie Mobilität
- Speichertechnologien
- Energiesystemanalyse

Eine radikale Transformation hin zu einem nachhaltigen Energiesystem basierend auf erneuerbaren Energien ist erforderlich:

- Verknappung fossiler Brennstoffe

Availability of fossil resources
Reserves to production ratio



Source: World Energy Assessment 2001, HIS, WoodMackenzie, BP Stat Review 2005, BP estimates, Graph: Koonin, BP

Fossile Brennstoffe werden knapper.

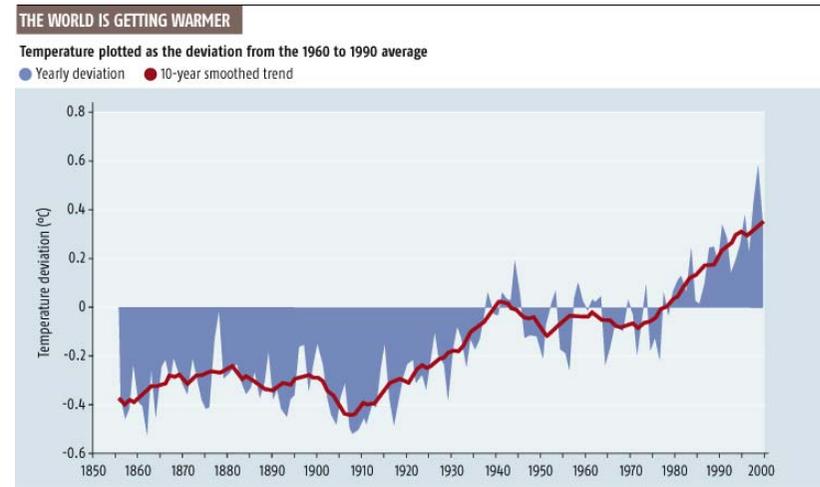
Eine radikale Transformation hin zu einem nachhaltigen Energiesystem basierend auf erneuerbaren Energien ist erforderlich:

- Verknappung fossiler Brennstoffe
- Gefahr katastrophaler Klimaveränderungen
- Risiko von Nuklearunfällen/Endlagerfrage
- Abhängigkeit von Importen aus politisch instabilen Regionen

Dazu kommen seit Kurzem:



Zunehmende wirtschaftliche Chancen der Transformation!



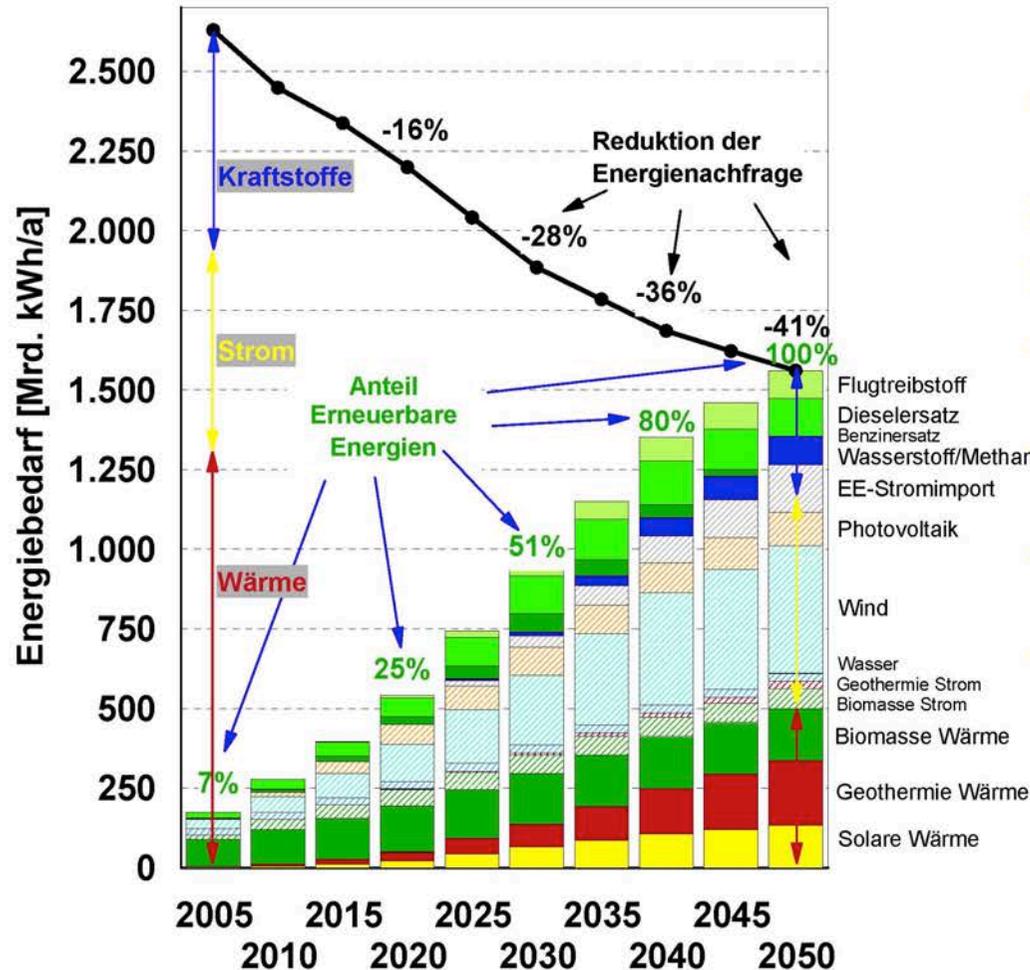
Die Welt wird wärmer.

Die Transformation des Energiesystems erfordert:



- **Verbesserte Energieeffizienz** in Gebäuden, Transport (e-Mobilität) and Produktion
- Rasche **Entwicklung der regenerativen Energien**, wie PV, ST, Wind, Hydro, Geothermie und Biomasse in Richtung auf eine Zukunft mit **100% regenerativen Energien**
- Entwicklung von **Energie Speichertechnologien**
- Ausbau des **Stromnetzes** für dezentrale Einspeisung, weiträumigen Transport und intelligenten Verbrauch (*'smart grid'*)
- **Integration** des Strom-, Gas- & Wärmenetzes

Mengengerüst einer 100%-Versorgung mit Erneuerbaren bis 2050 für Deutschland



World Energy Resources (TW/year)

SOLAR
23,000 per year

2010 World energy use 16 TWy per year



2050: 28 TW

TIDES
0.3 per year

0.3 – 2 per year
Geothermal

3 – 4 per year
HYDRO

2 – 6 per year
Biomass

3 - 11 per year
OTEC

Waves
0.2-2 per year

60-120 per year
WIND

renewable

finite

330 Total
Natural Gas

310 Total
Petroleum

Petroleum

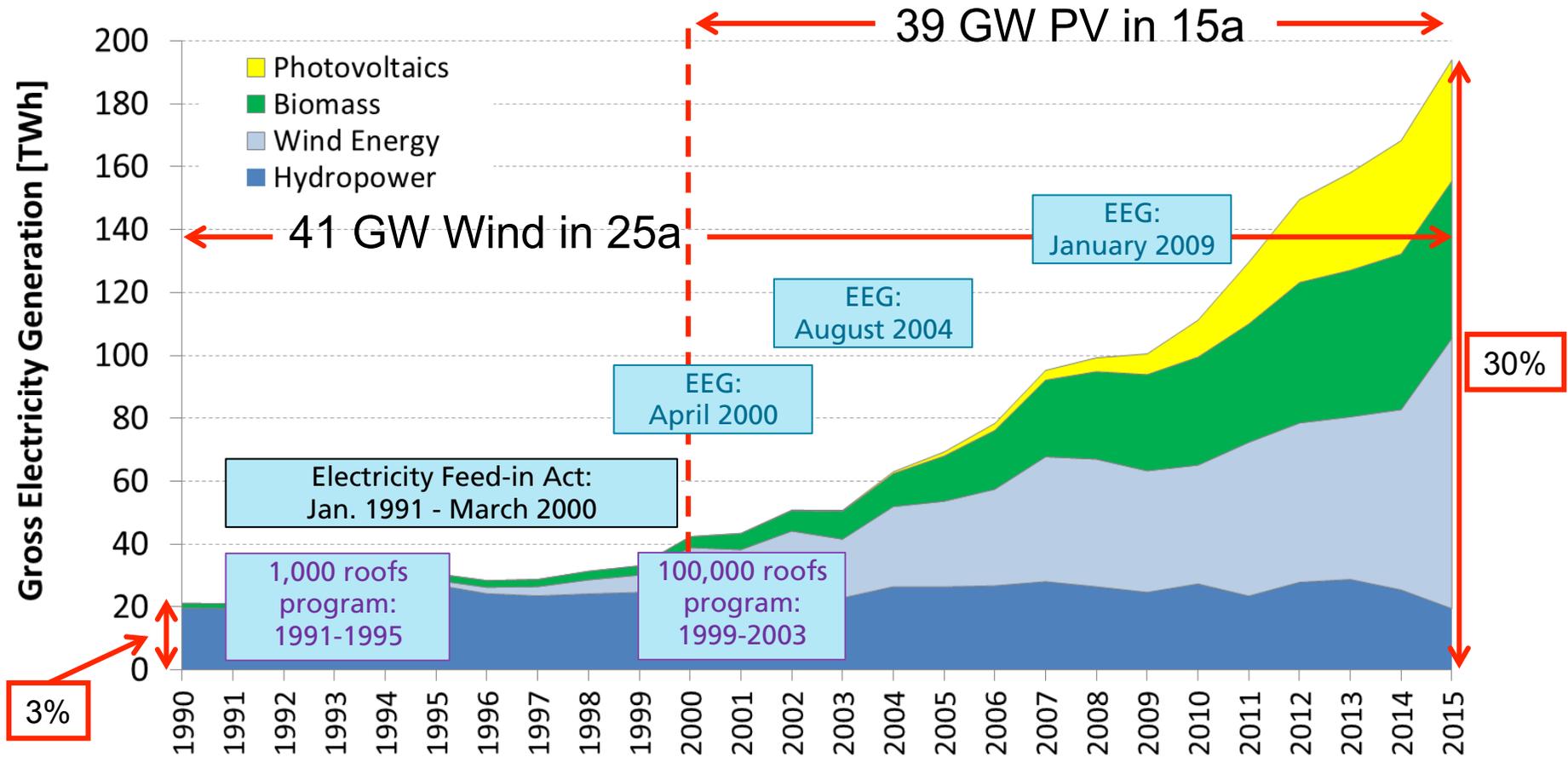
90-300 Total
Uranium

900 Total reserve
COAL

SHALE

Contribution of RES to Electricity Supply in Germany

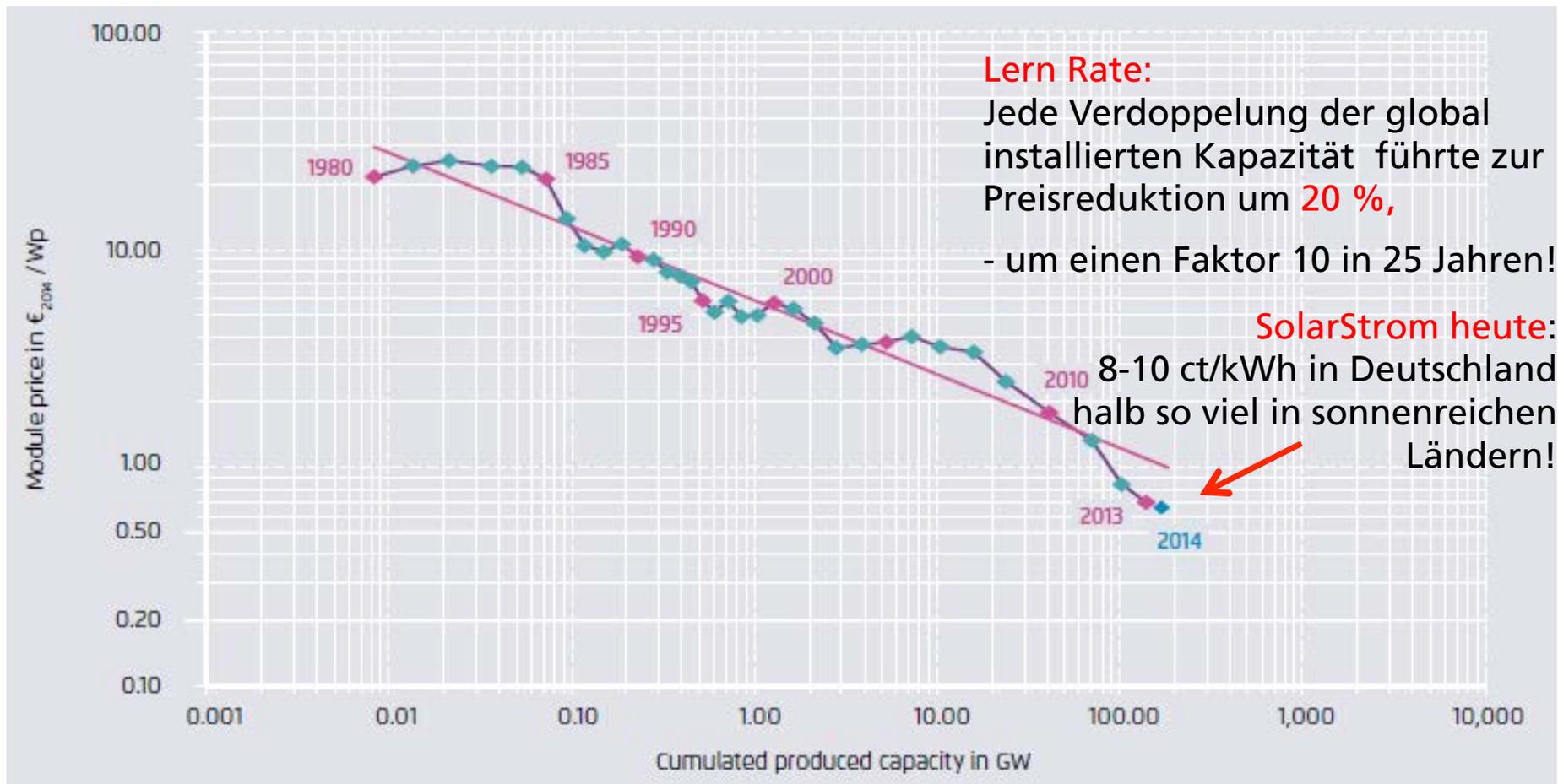
Historical Development



Data: BMWi

Lernkurve der Solarenergie (c-Si Photovoltaik)

- Getrieben von Innovationen & Marktwachstum!



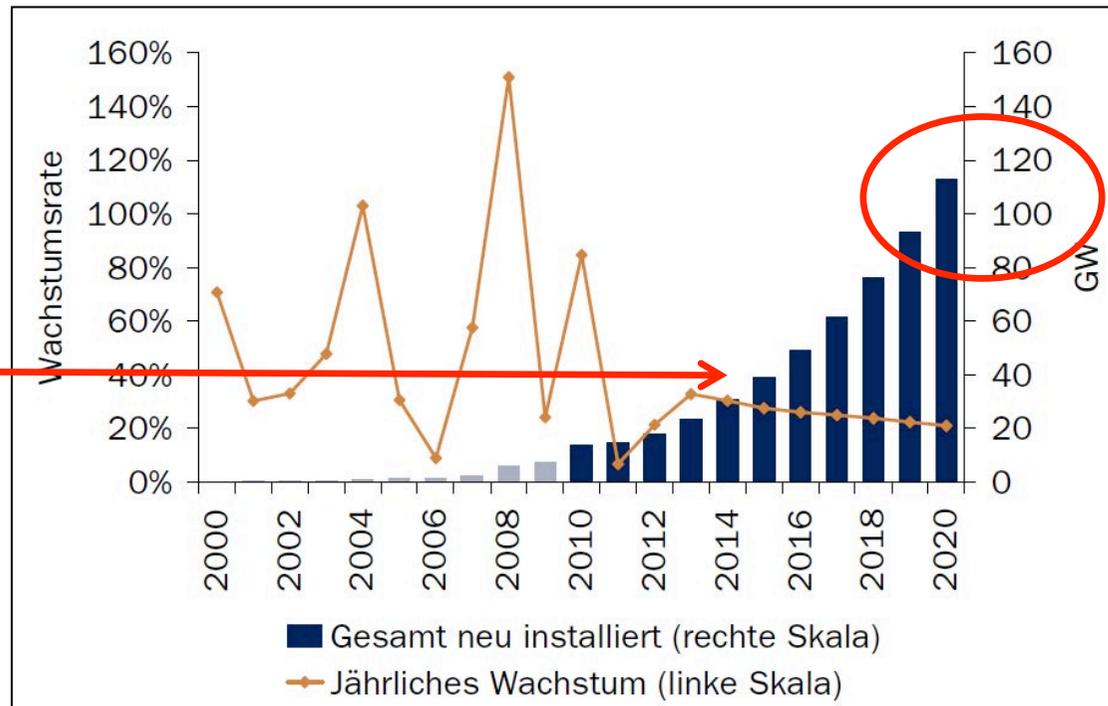
Source: Navigant Consulting; EUPD PV module prices (since 2006), Graph: ISE 2014

Ausblick Photovoltaik (PV)-Weltmarkt

Beispiel: Sarasin Bank, Nov. 2010: 110 Gigawatt 2020

- Marktausblick 2010: 40 GW/a für 2015, 110 GW/a für 2020
- jährl. Wachstumsrate: im Bereich 20-30 %

Mit ca 50 GW 2015 etwa 20% über der Vorhersage von 2010!



Quelle: Sarasin, Solar Study, Nov. 2010

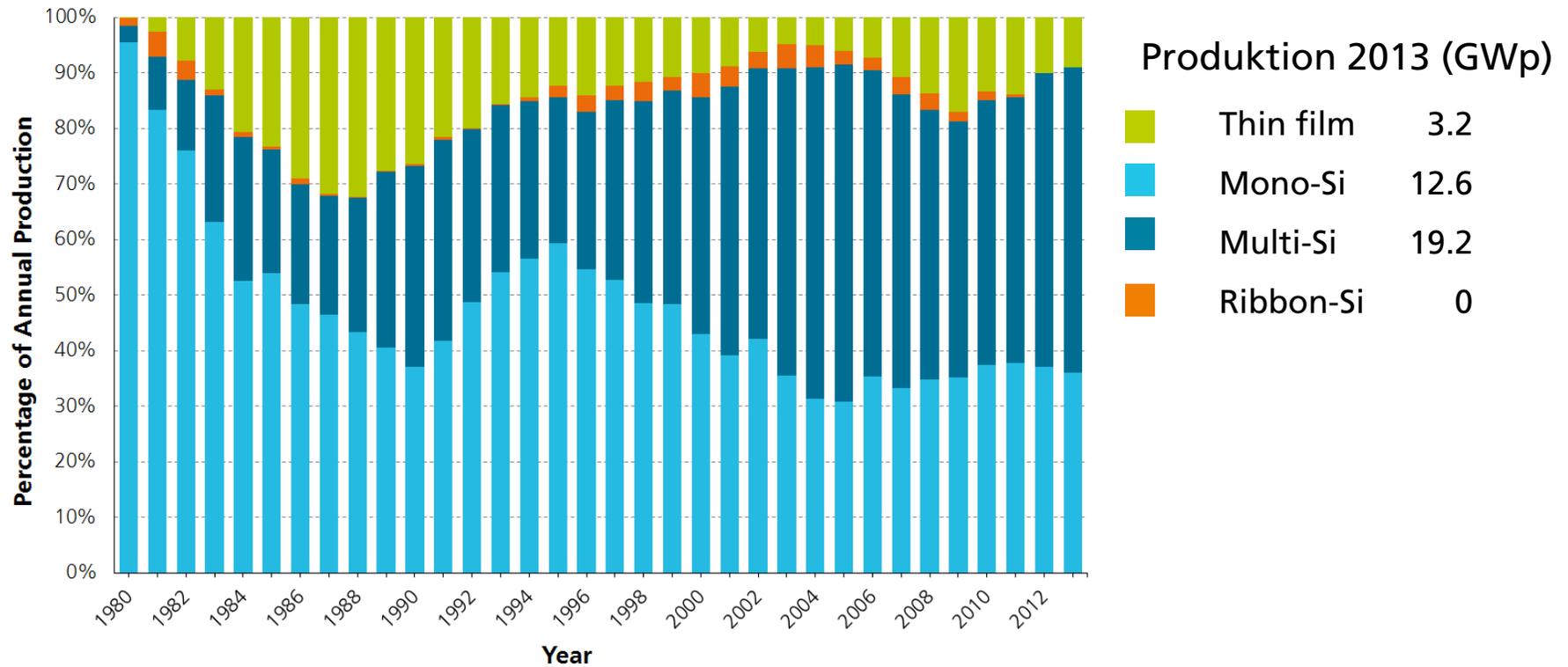
PV Stromkosten bis 2050 in verschiedenen Regionen

**PV wird den preisgünstigsten Strom herstellen,
für 2-4ct/kWh!**



Source: ISE PV cost study 2014

PV Produktions-Technologien



Data: Navigant Consulting and IHS; since 2012: estimation from different sources. Graph: PSE AG 2014

Crystalline Silicon Technology Portfolio

c-Si PV is not a commodity, but a high-tech product!

material quality

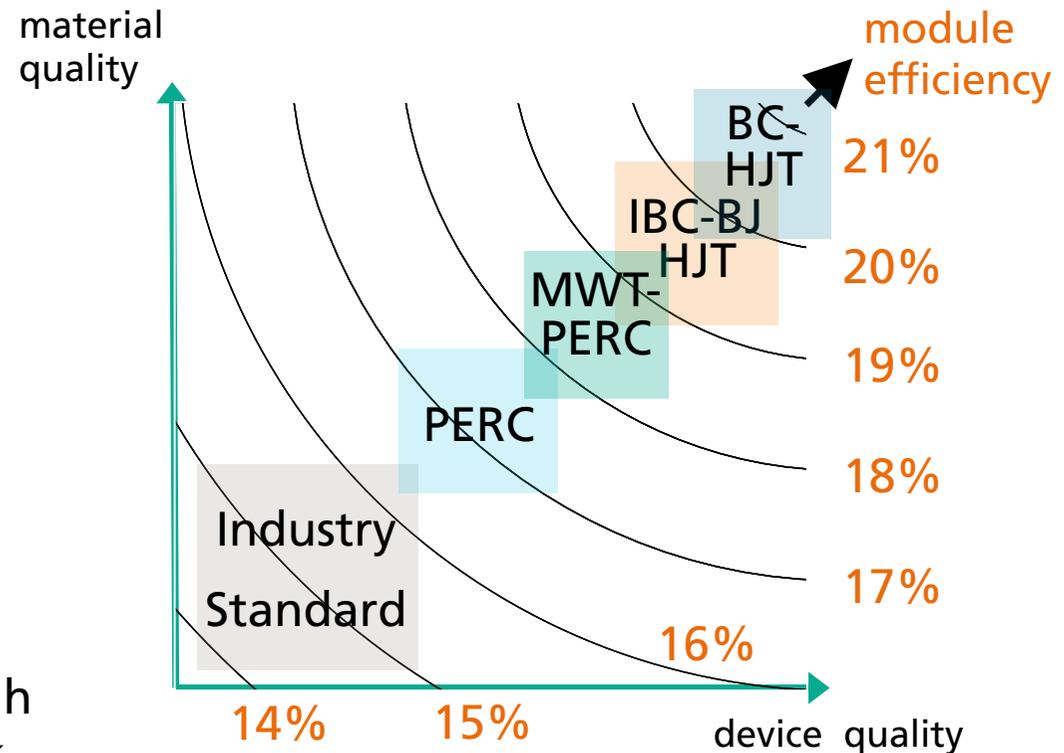
- diffusion length
- base conductivity

device quality

- passivation of surfaces
- low series resistance
- light confinement

cell structures

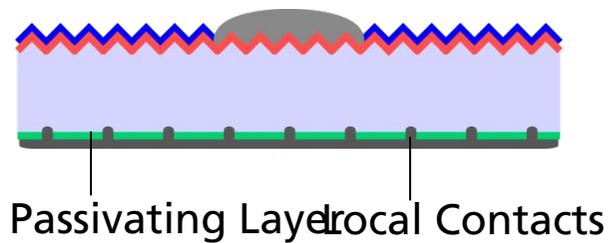
- PERC: Passivated Emitter and Rear Cell
- MWT: Metal Wrap Through
- IBC-BJ: Interdigitated Back Contact – Back Junction
- HJT: Hetero Junction Technology



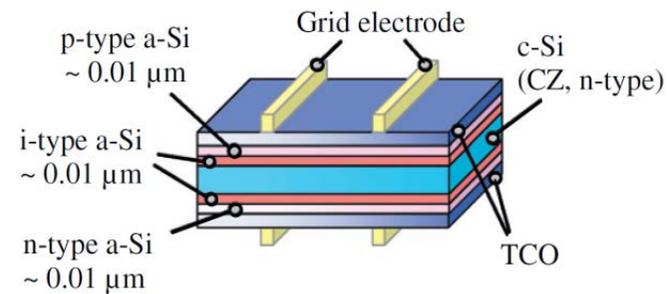
Adapted from Preu et al., EU-PVSEC 2009

Advanced Cell Technologies

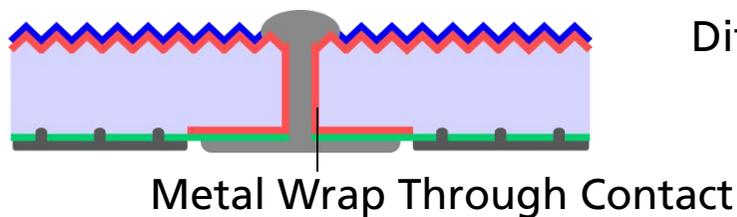
Passivated Emitter and Rear PERC¹



Heterojunction on Intrinsic layer HIT³



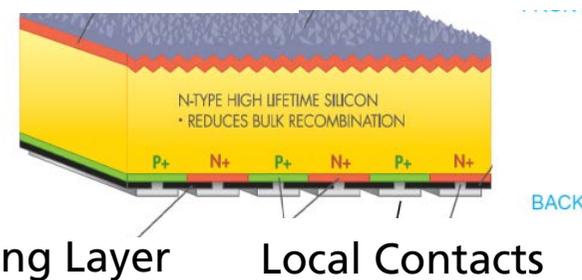
Metal Wrap-Through MWT-PERC²



Interdigitated Back Contact/Junction IBC-BJ⁴

Lightly Doped Front
Diffusion

Texture+passivation Layer



¹Blakers et al., Appl. Phys. Lett. 55, pp. 1363-5, 1989

²Dross et al., Proc. 4th WCPEC, 2006, pp. 1291-4

³Sanyo/Panasonic ⁴Sunpower

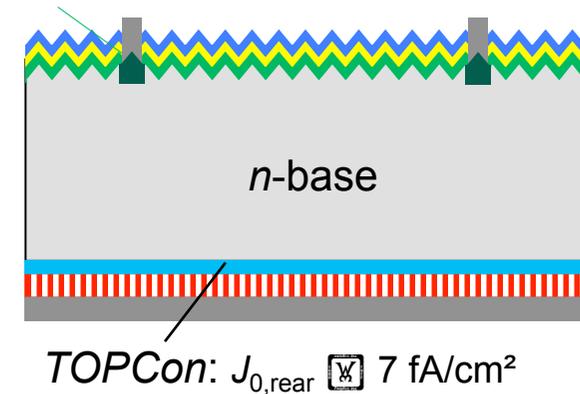
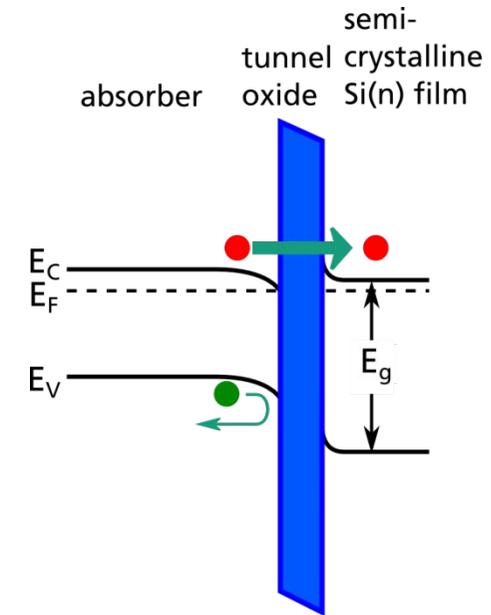
Advanced Cell Technologies

Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)

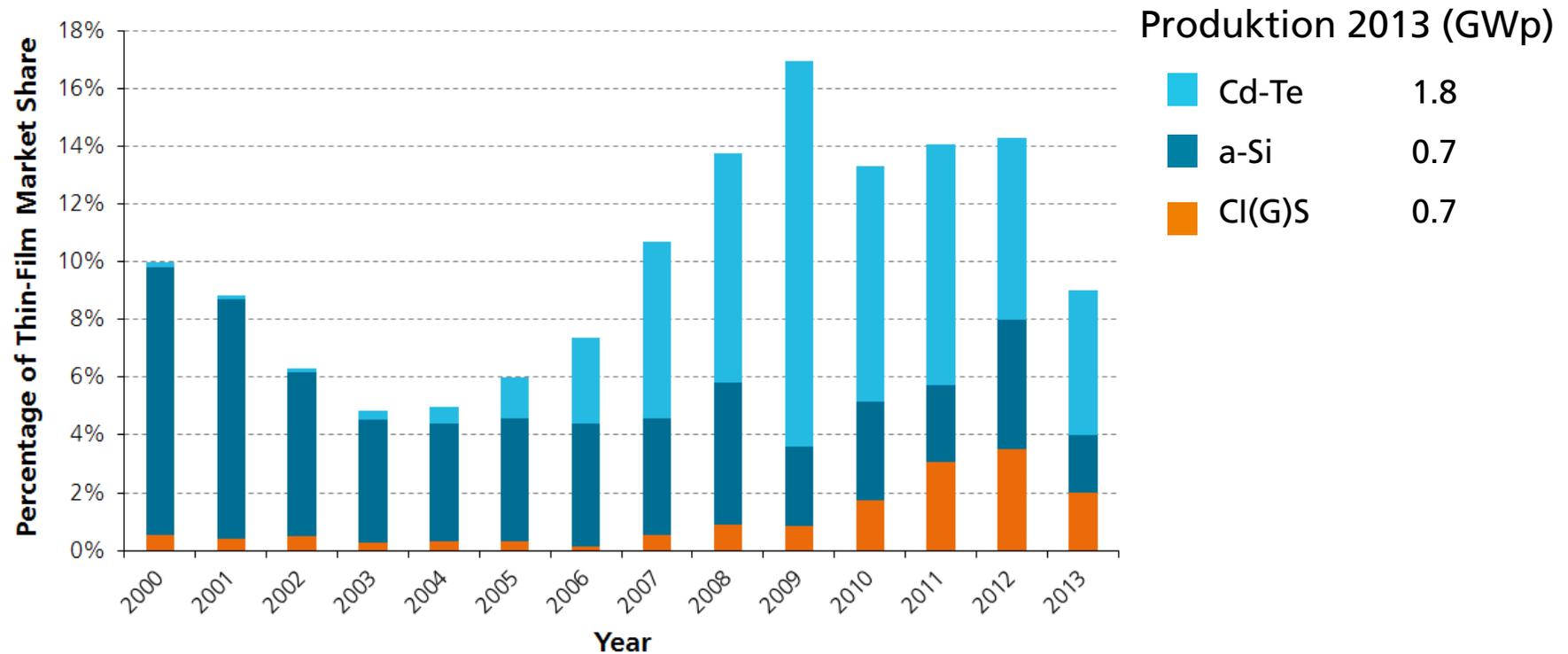
- TOPCon enables:
 - Excellent carrier-selectivity
 - High tolerance to high-temperature processes
- Very high V_{oc} and FF achieved due to
 - Excellent surface passivation
 - 1D carrier flow pattern in base

	V_{oc} [mV]	J_{sc} [mA/cm ²]	FF [%]	η [%]
Champion	719	41.5	83.4	24.9^[*]

[*]FZ-Si, *n*-type, 2x2 cm², aperture area, confirmed by Fraunhofer ISE Callab

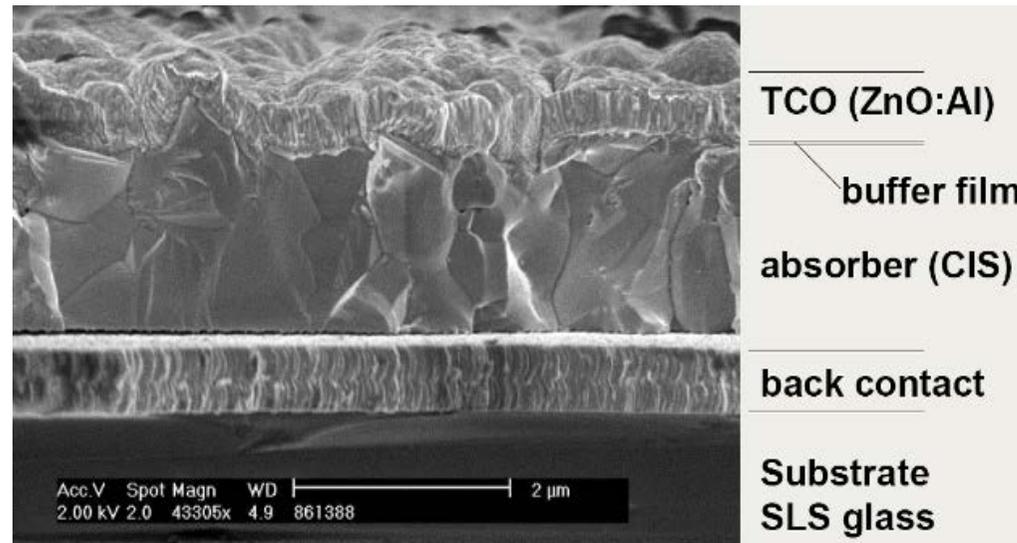
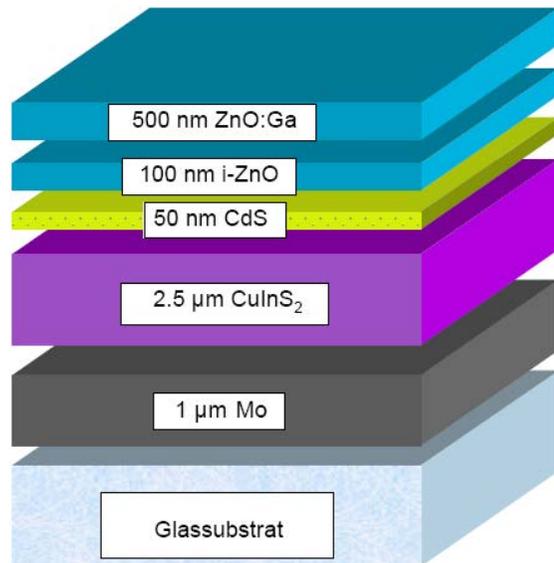


Marktanteil der PV Dünnschicht-Technologien an der weltweiten PV Produktion



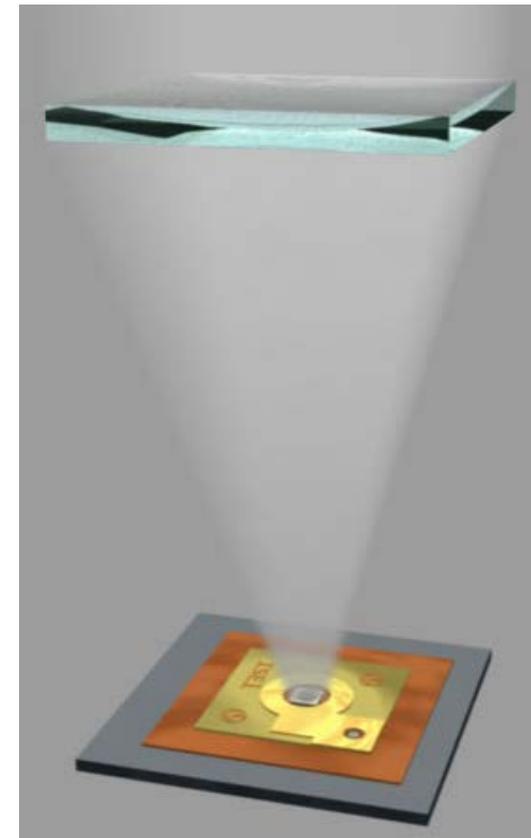
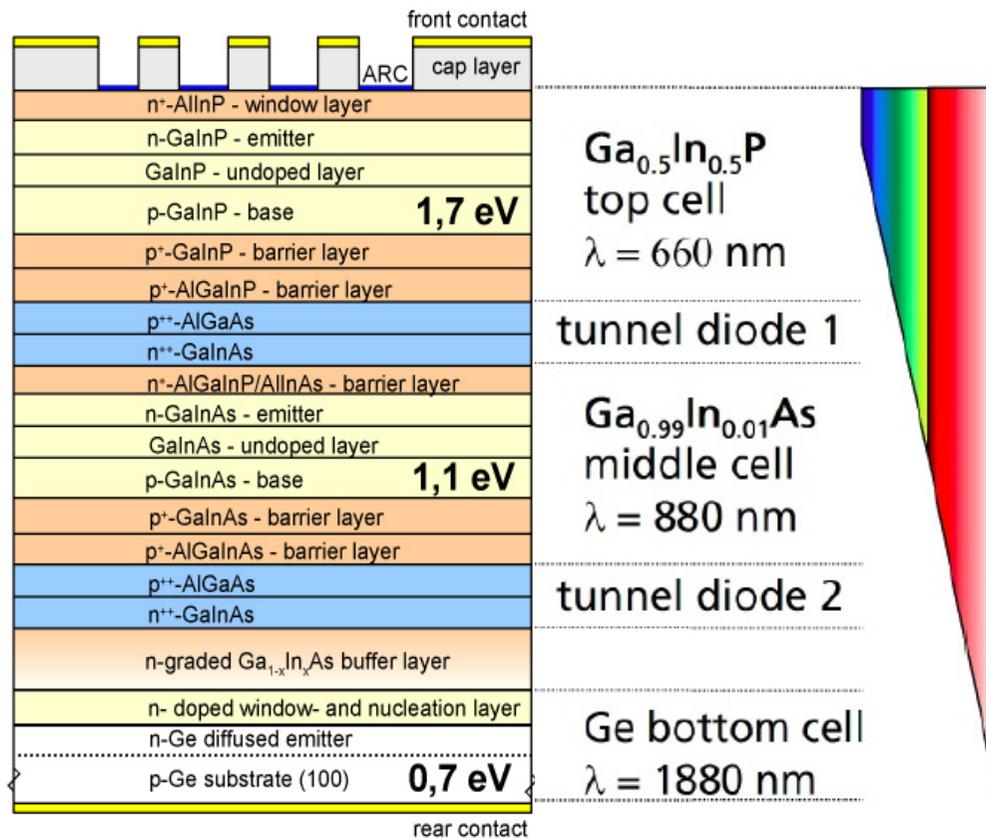
Data: Navigant Consulting; for 2012: estimation from different sources (Navigant and IHS). Graph: PSE AG 2014

Dünnschicht CIGS Solarzellenstruktur



Die Herausforderung der Dünnschicht Technologien ist: Rekord Effizienzen (über 20%!) auch in der Produktion von großflächigen Modulen kostengünstig zu realisieren!

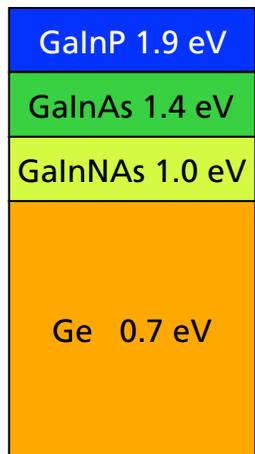
High-Efficiency III/V Based Triple-Junction Solar Cells



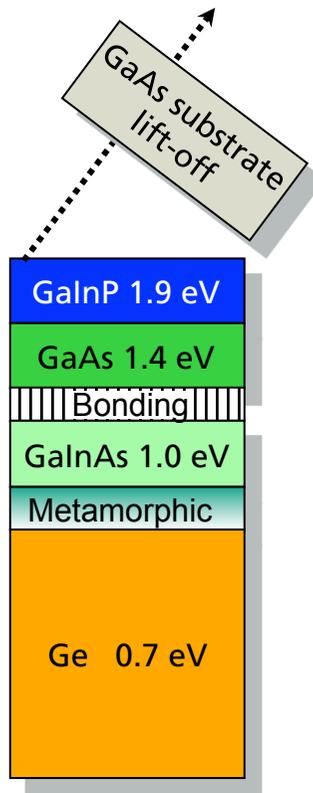
Slide: courtesy of F. Dimroth

Highest Efficiency 4J Cells

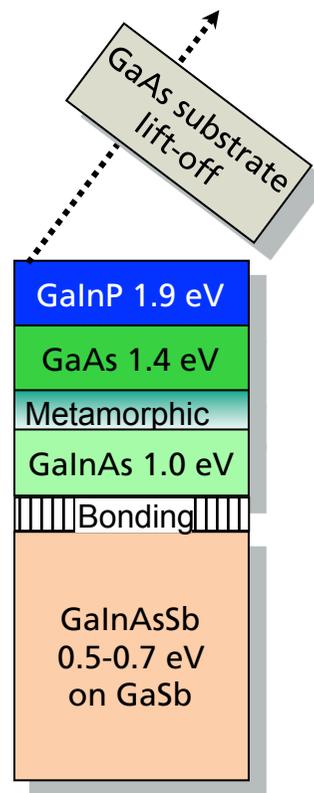
Lattice matched
4-junction on Ge



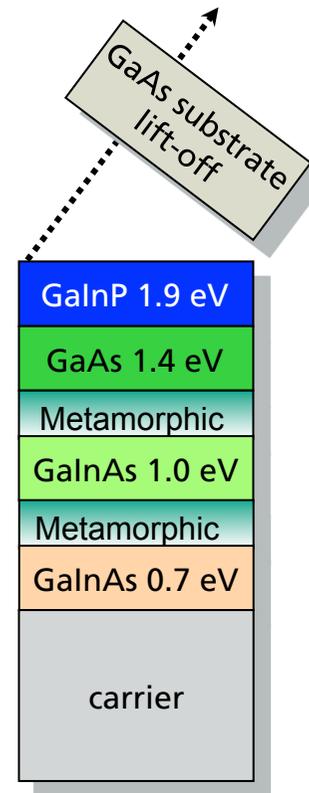
4-junction
bonded to Ge



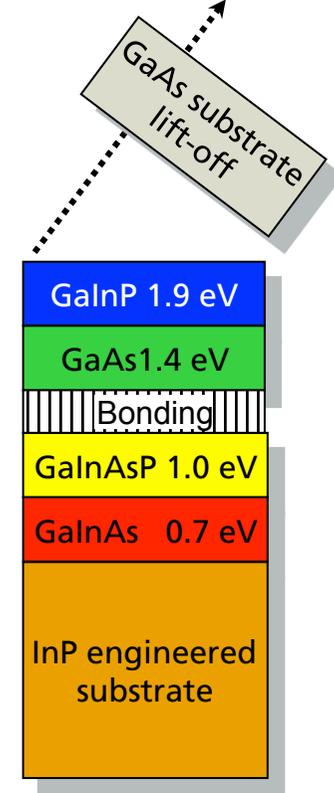
4-junction on
GaSb



Inverted
metamorphic

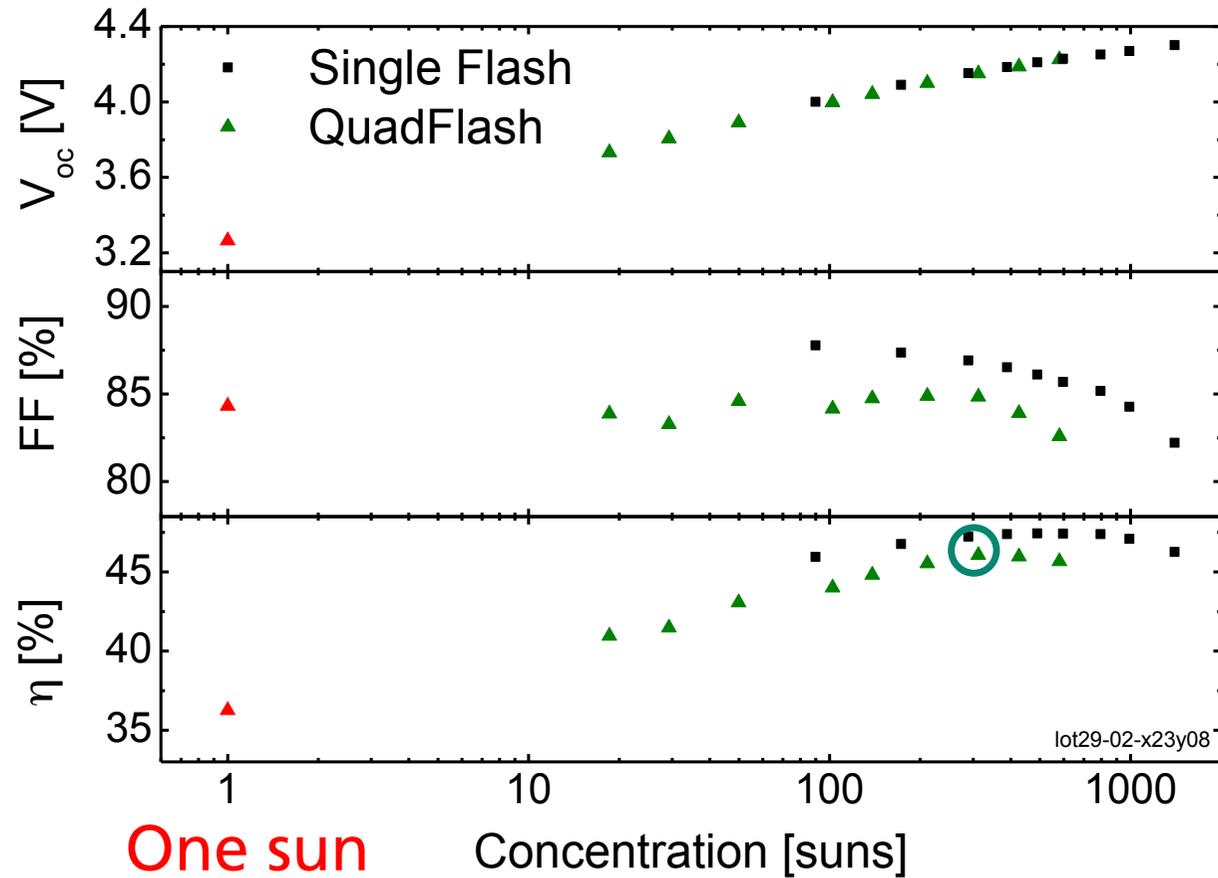
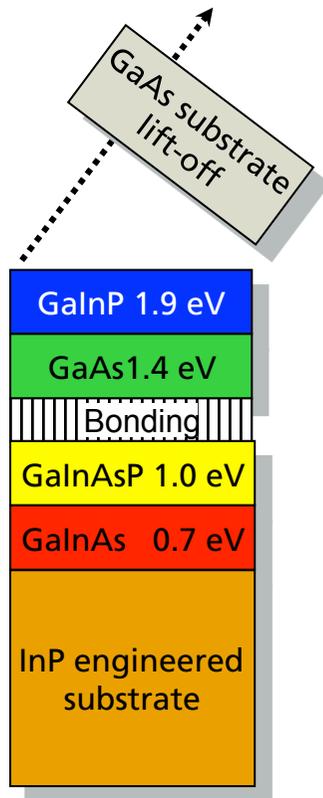


4-junction
bonded to InP

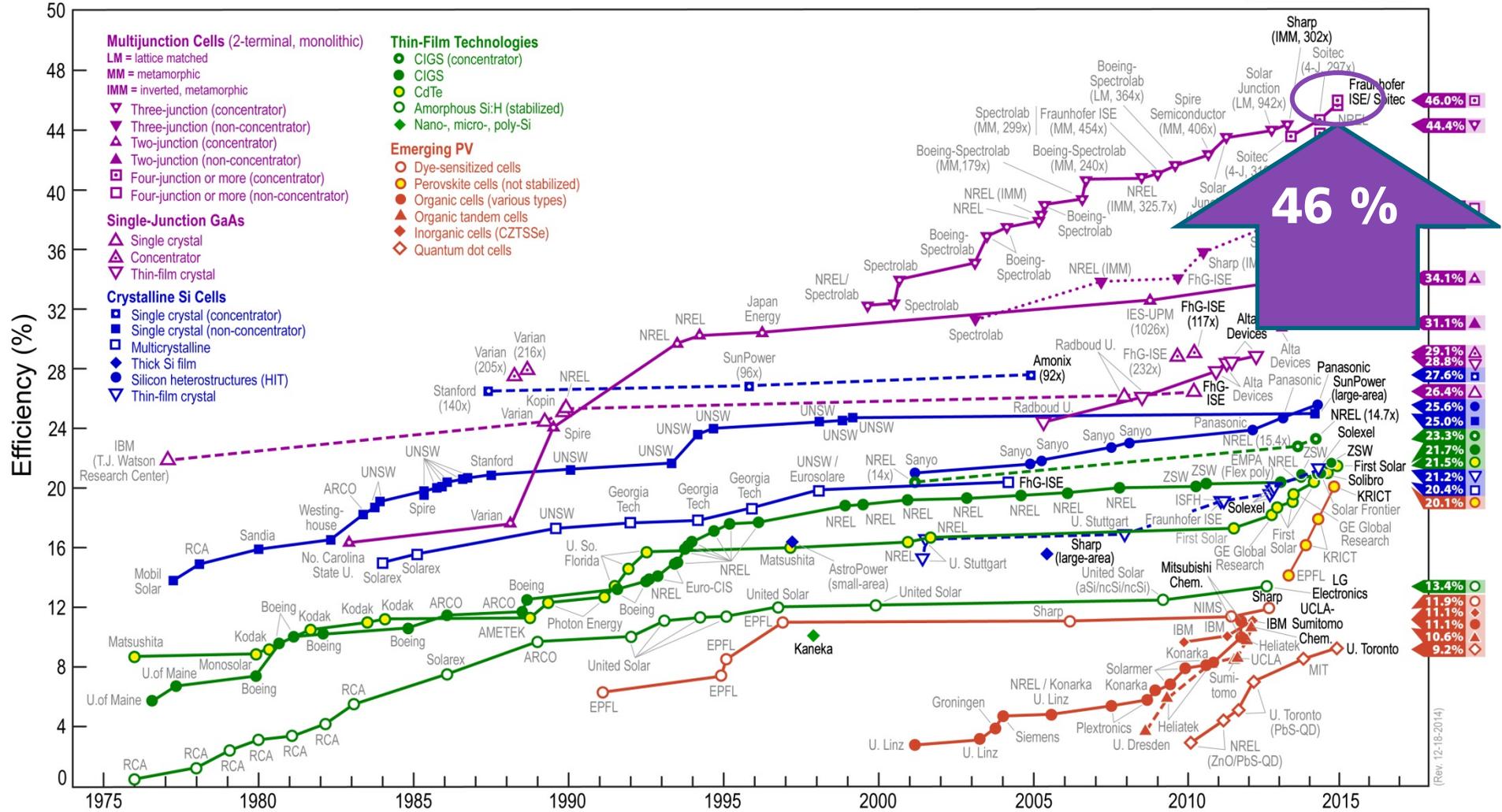


InP based 4-Junction Solar Cell Results on Engineered Substrate

QuadFlash: $\eta = 46\%$ $C = 312$



Best Research-Cell Efficiencies

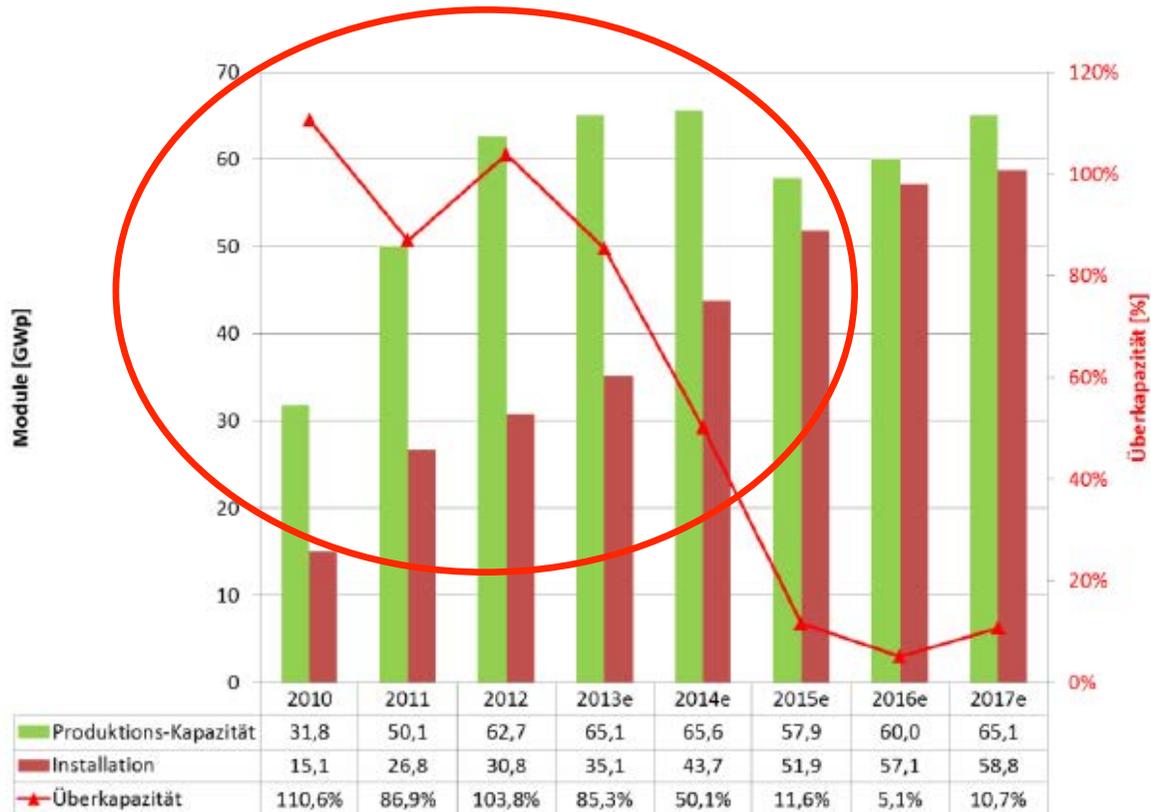


Effizienzen im Solarzellen Markt

PV Technologien in den
nächsten 10-20 Jahren

- 4 - 12 %: Organische, Farbstoff, Nanostrukturierte Zellen
- 6 - 16%: Dünnschicht Module (a-Si, mikrokristalline-Si, CIS, CIGS, CdTe)
- 16 - 20%: multikristalline-Si, einfache kristalline-Si Zellen
- 20 - 23%: Hocheffiziente kristalline-Si Zellen
- 36 – 40%: Hocheffizienz III/V Tandem Konzentrator Zellen (CPV)
mit 25 - 30% Moduleffizienz

Globaler PV-Markt 2008 - 2015: Die erste Welle der Photovoltaik!



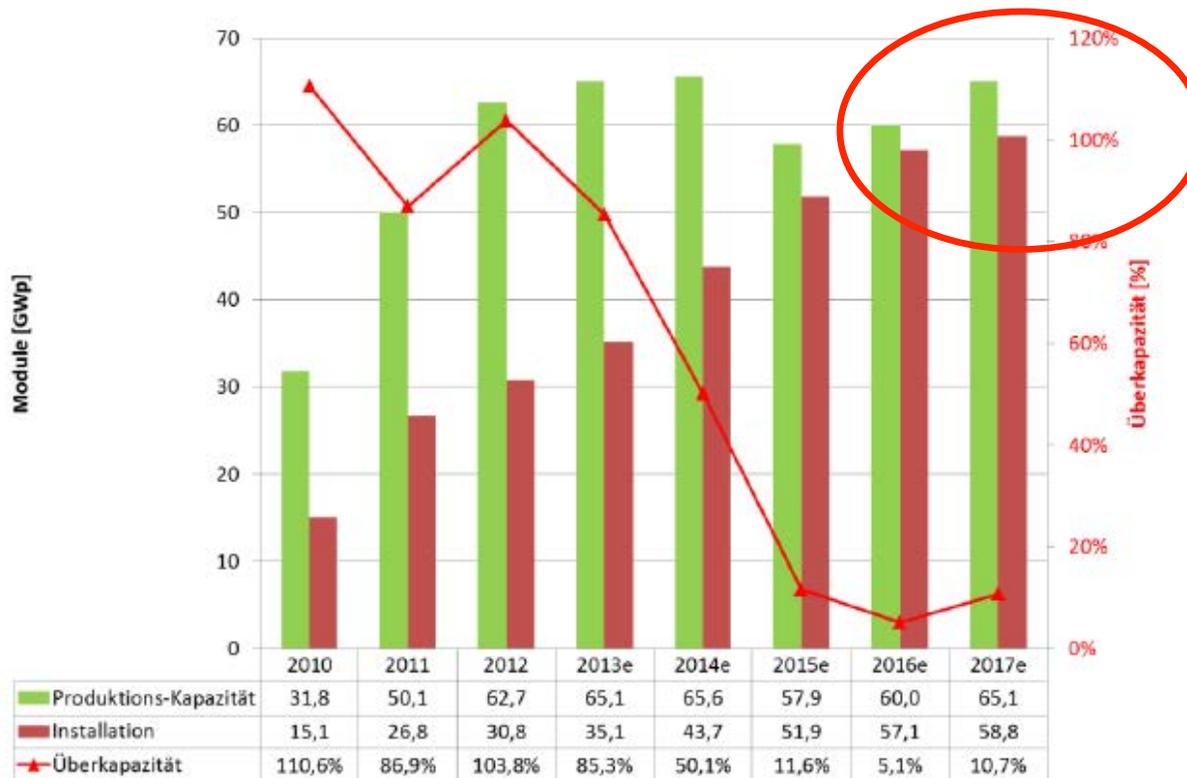
Prognose der Entwicklung von Angebot und Nachfrage im globalen PV-Markt.

Quelle: Lux Research Inc., Grafik: PSE AG

Globaler PV-Markt

Prognose bis 2017:

Wir stehen am Beginn der zweiten Welle der PV!



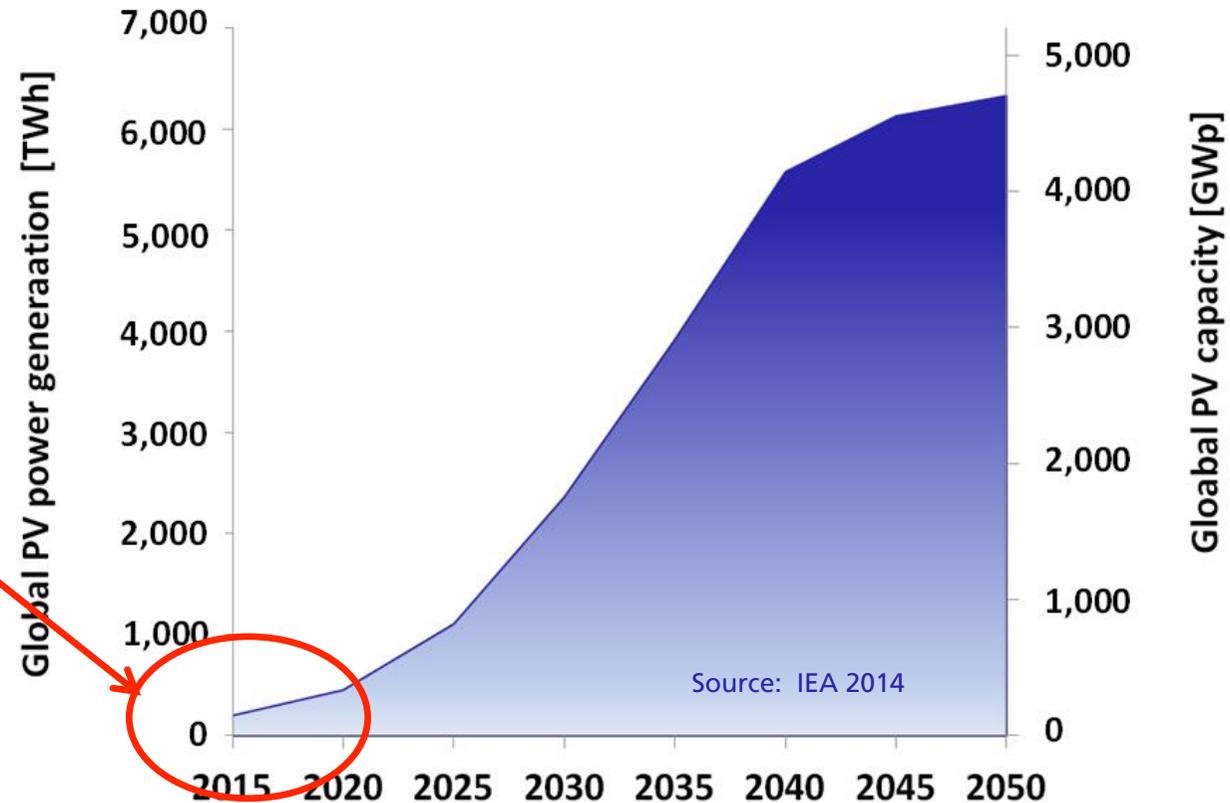
Prognose der Entwicklung von Angebot und Nachfrage im globalen PV-Markt.

Quelle: Lux Research Inc., Grafik: PSE AG

PV Markt Wachstum (IEA 2014)

- Die rasche Implementierung der globalen PV wird angetrieben durch die Verfügbarkeit von preiswerter, sauberer und verteilt bereit gestellter Energie
- Mehr als 4.000 GW_p an solarer PV werden bis 2050 installiert werden

Wir sind noch ganz am Anfang der globalen Wachstumskurve!!



Regenerative Energien Modell REMoD-D: Ansatz Strukturoptimierung

Exogene Vorgaben

CO₂-Emissionen →
verfügbare Menge
fossiler Energieträger

Weitere externe
Randbedingungen (z.B.
verfügbare Biomasse, ...)

Optimierer
Optimierung
Gesamtsystem
(Minimierung
jährliche
Gesamtkosten)



Ergebnisse

Installierte Leistung
aller Komponenten

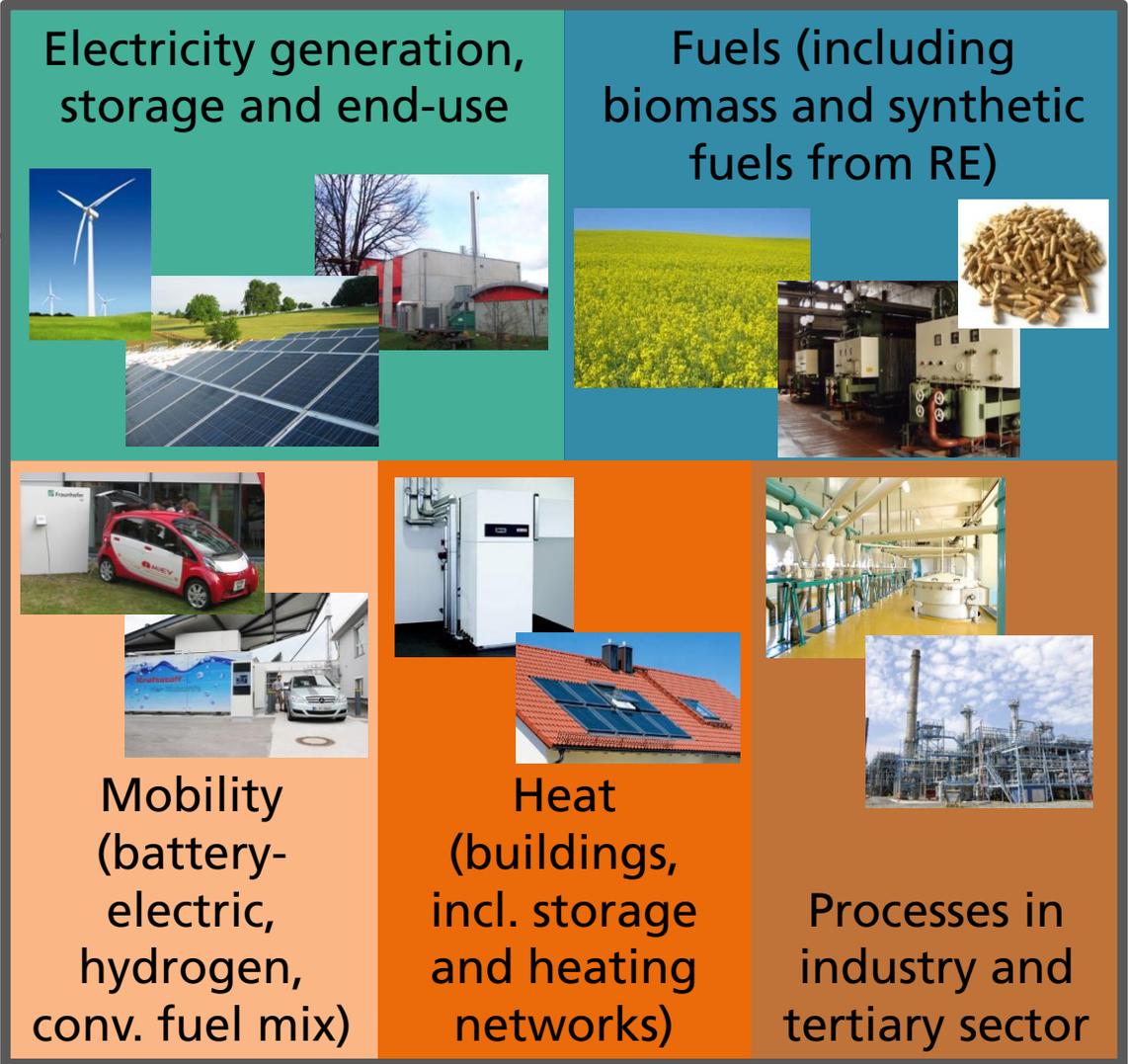
Größe Speicher

Umfang
energetische
Sanierung Gebäude

Wärmeversorgungs-
techniken Gebäude-
sektor (Wärme-
netze, dezentral)

Optimization of Germany's future energy system based on hourly modeling

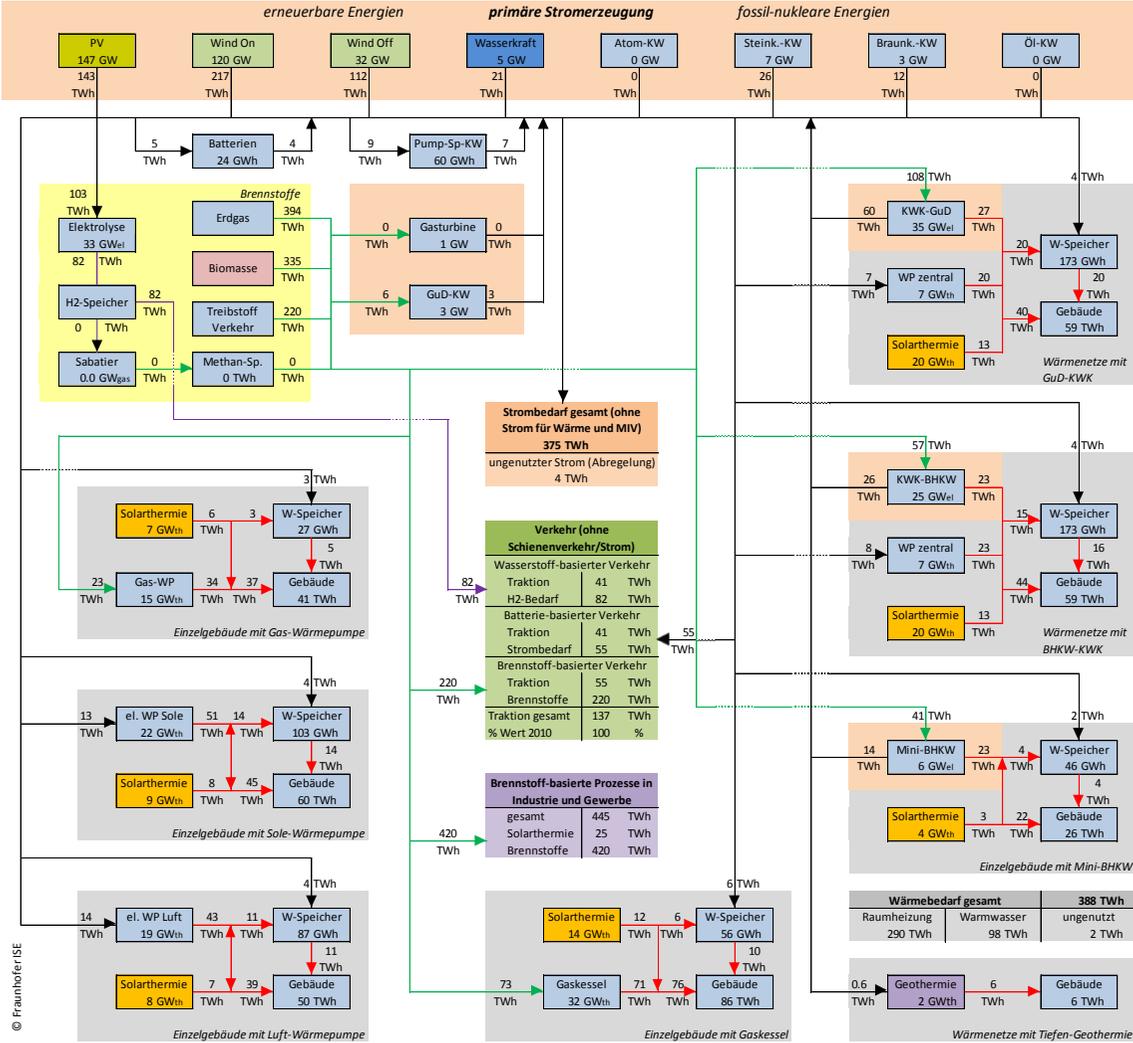
Comprehensive analysis of the overall system



REMod-D
Renewable Energy Model – Deutschland

Slide courtesy Hans-Martin Henning 2014

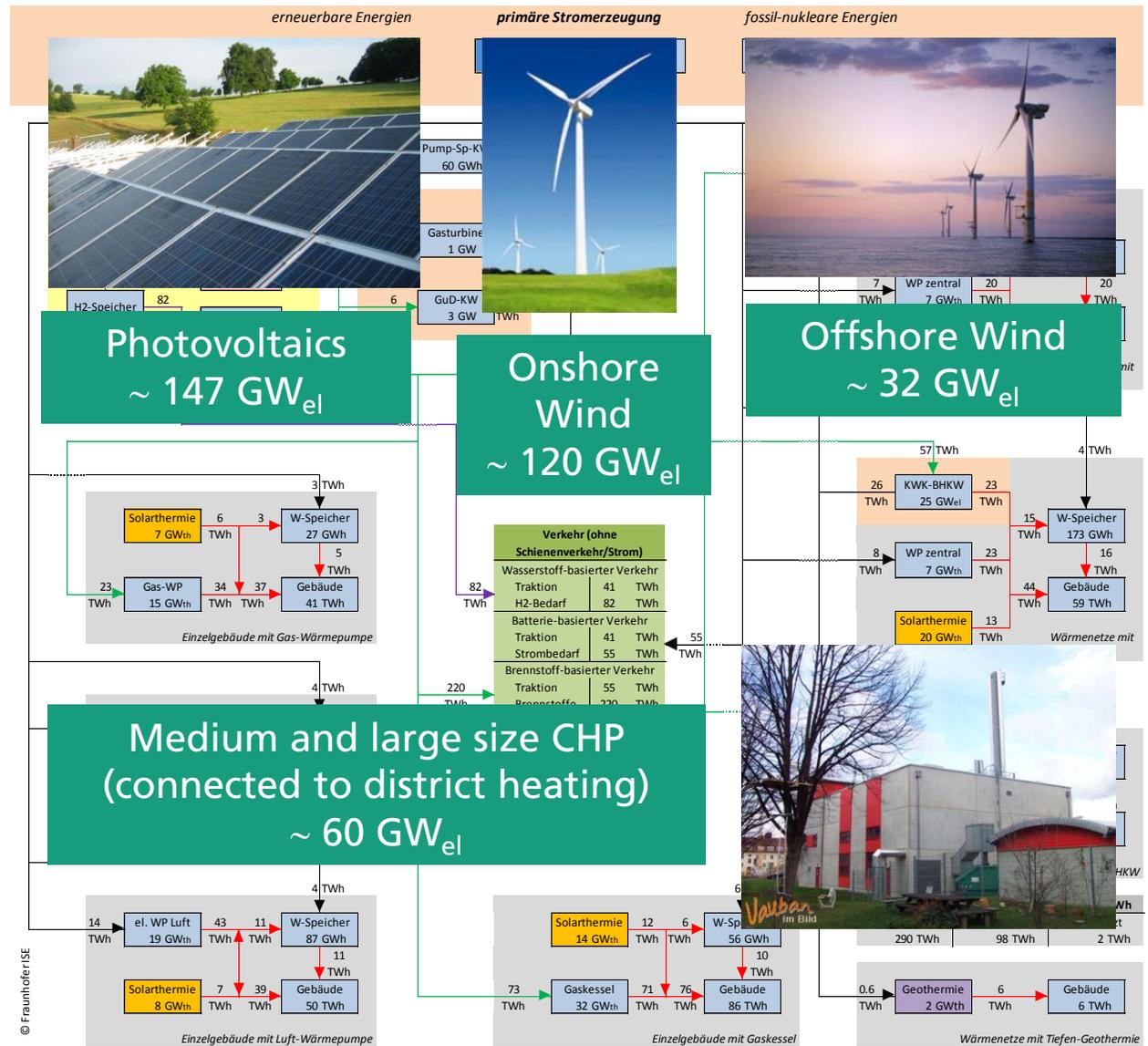
Optimization of Germany's future energy system based on hourly modeling



REMod-D
Renewable Energy Model – Deutschland

Slide courtesy Hans-Martin Henning 2014

Electricity generation



Slide courtesy Hans-Martin Henning 2014

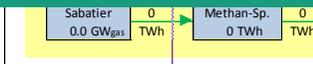
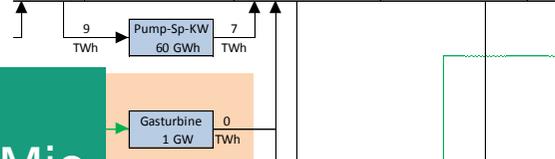
Storage



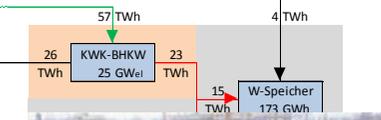
Stationary batteries
Total ~24 GWh (e.g. 8 Mio units with 3 kWh each)



Pumped storage power plants
42 units with a total of 60 GWh



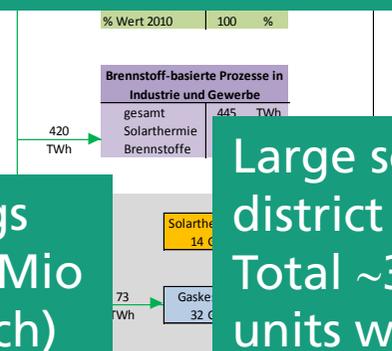
Electrolysers with total capacity of 33 GW_{el} (needed for mobility)



Large scale heat storage in district heating systems
Total ~350 GWh (e.g. 150 units with 50.000 m³ each)



Heat buffers in buildings
Total ~320 GWh (e.g. 7 Mio units with 800 Litres each)

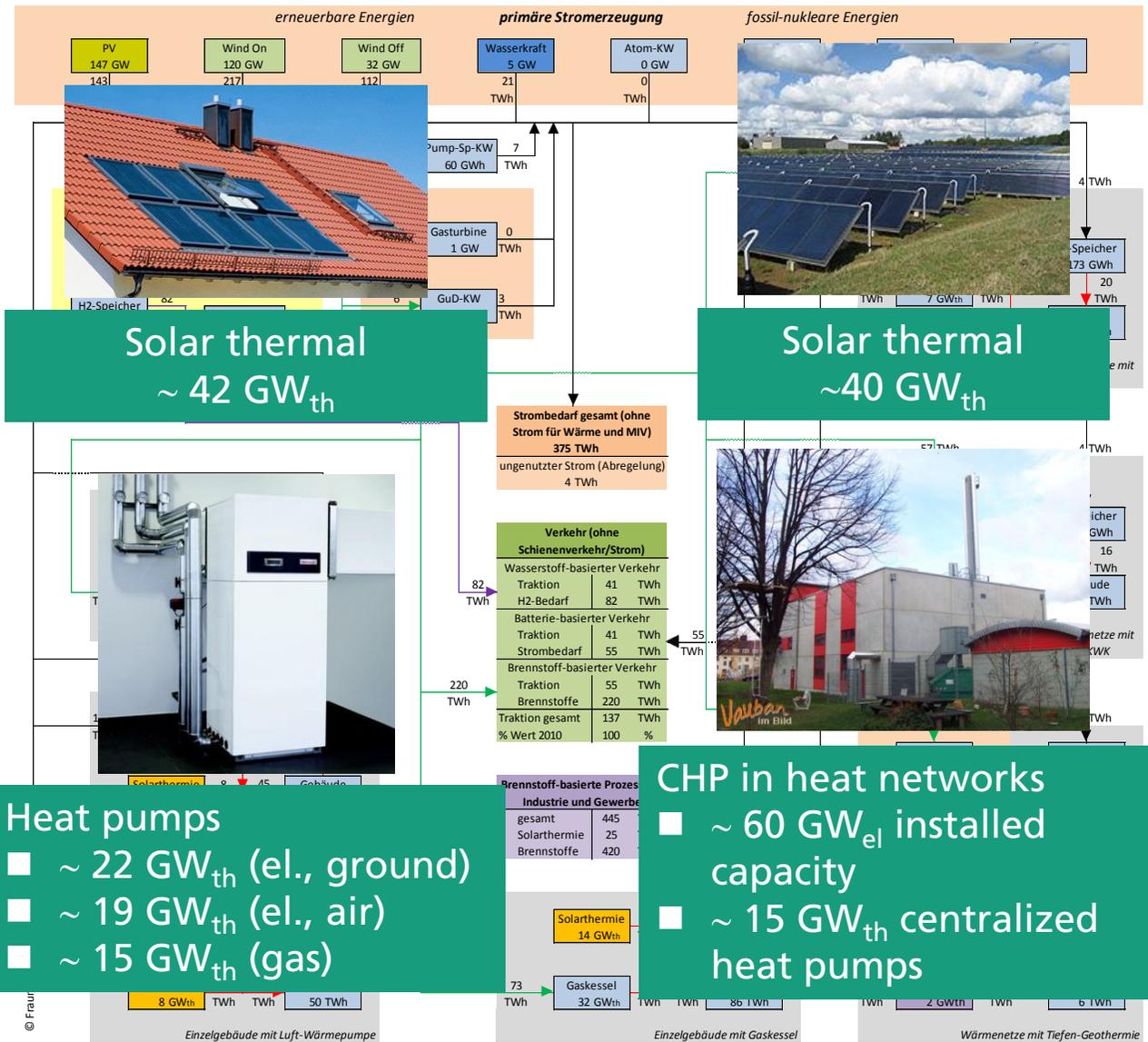


Slide courtesy Hans-Martin Henning 2014

Heat

decentralized

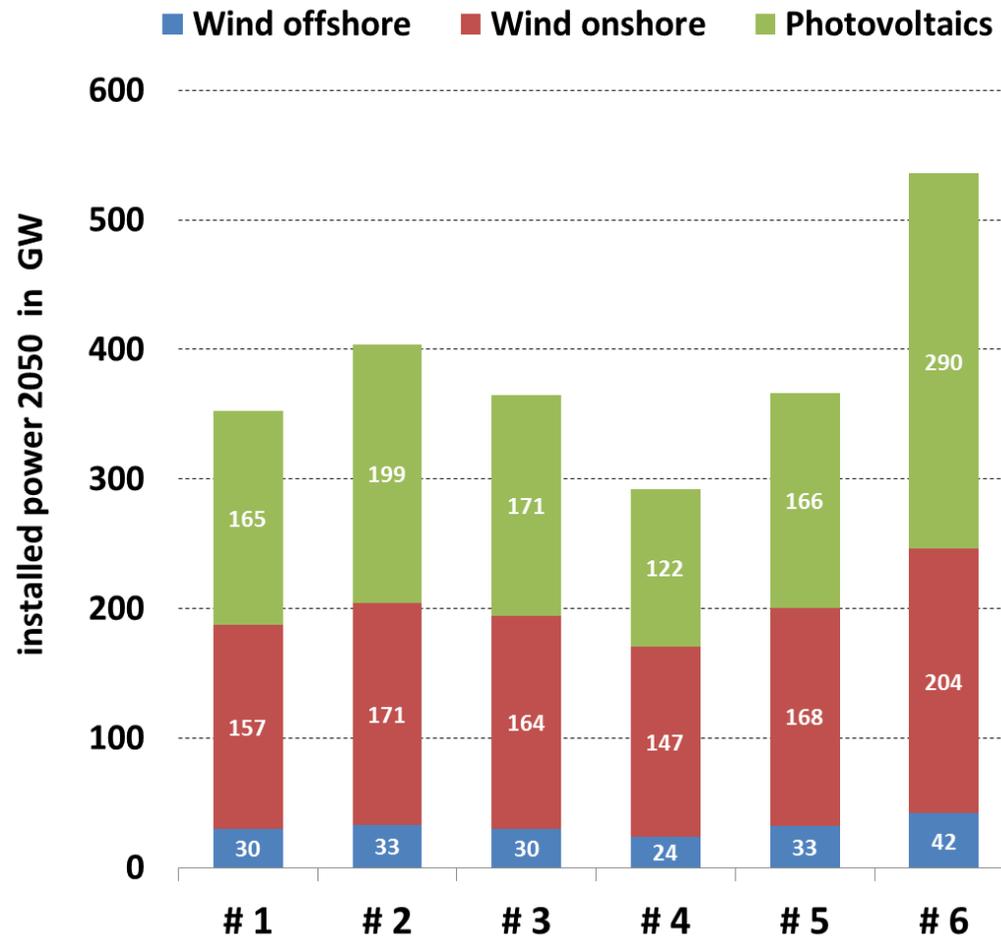
centralized



Slide courtesy Hans-Martin Henning 2015

Scenario results

Wind and solar PV in 2050



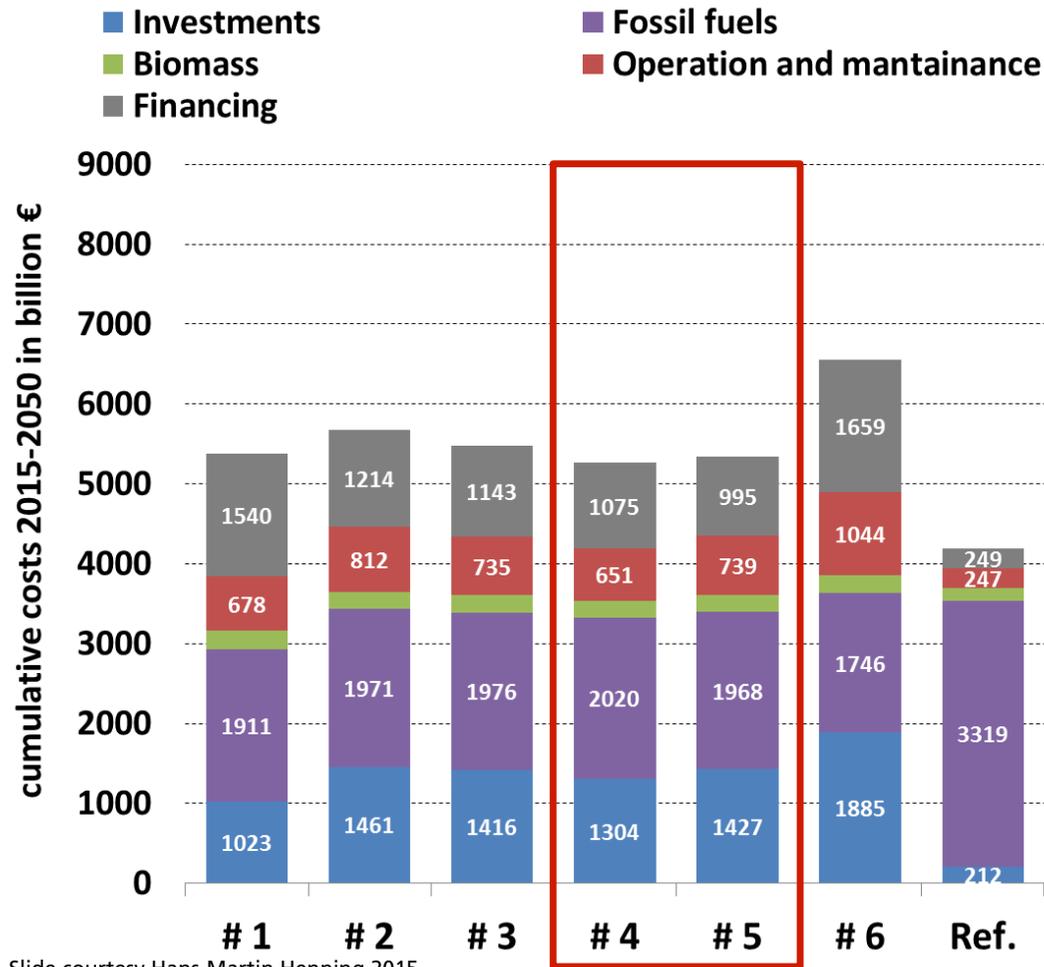
- #1 -80 % CO₂, low rate building energy retrofit, electric vehicles dominant, coal until 2050
- #2 -80 % CO₂, low rate building energy retrofit, mix of vehicles, coal until 2050
- #3 -80 % CO₂, high rate building energy retrofit, mix of vehicles, coal until 2050
- #4 -80 % CO₂, high rate building energy retrofit, mix of vehicles, coal until 2040
- #5 -85 % CO₂, high rate building energy retrofit, mix of vehicles, coal until 2040
- #6 -90 % CO₂, high rate building energy retrofit, mix of vehicles, coal until 2040

Slide courtesy Hans-Martin Henning 2015

Scenario results

Cumulative total cost

- No penalty on CO₂ emissions
- Stable fossil fuel prices

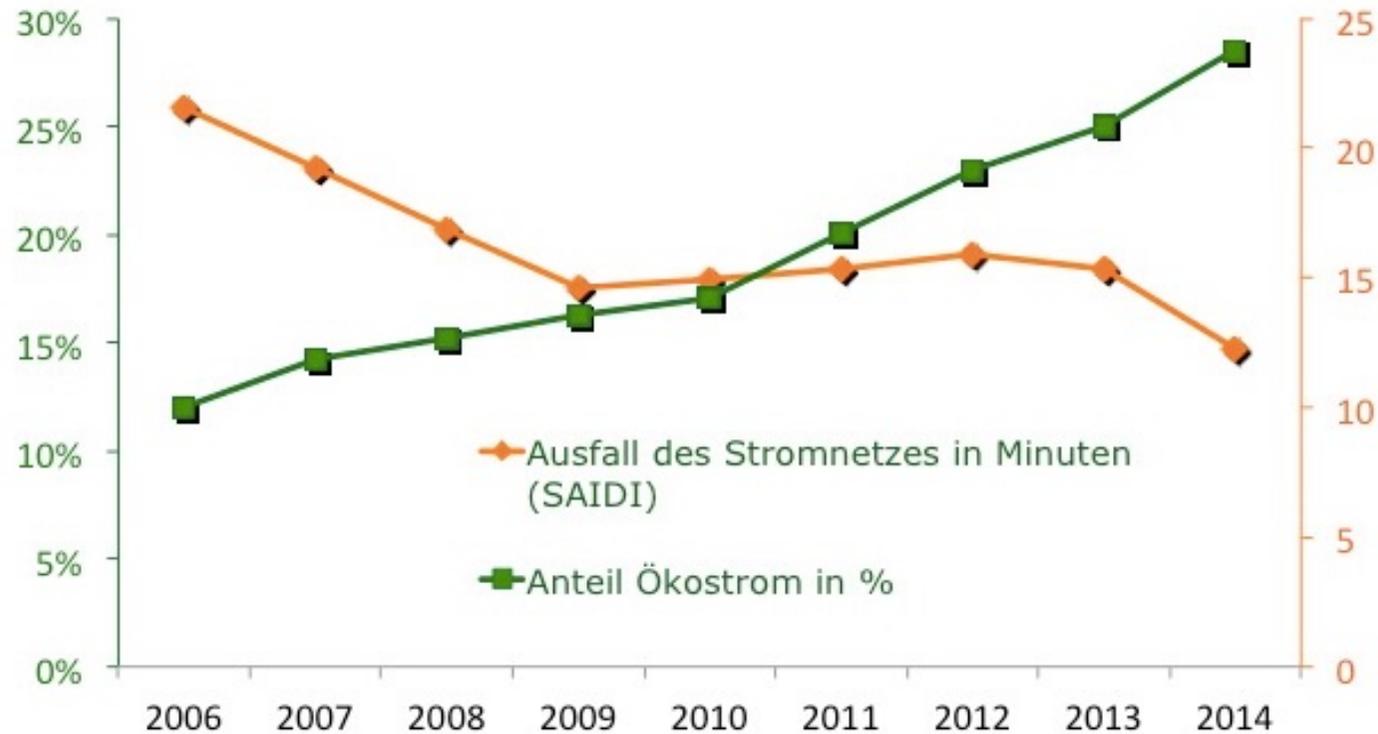


Cumulative cost of scenarios # 4 und # 5 approx. 1100 bn € higher than reference for the total time 2014

- #4 -80 % CO₂, high rate building energy retrofit, mix of vehicles, coal until 2040
- #5 -85 % CO₂, high rate building energy retrofit, mix of vehicles, coal until 2040
- Ref today's system; no change

Slide courtesy Hans-Martin Henning 2015

Zur Frage der Netzstabilität: Ökostromausbau festigt Netzstabilität in Deutschland!



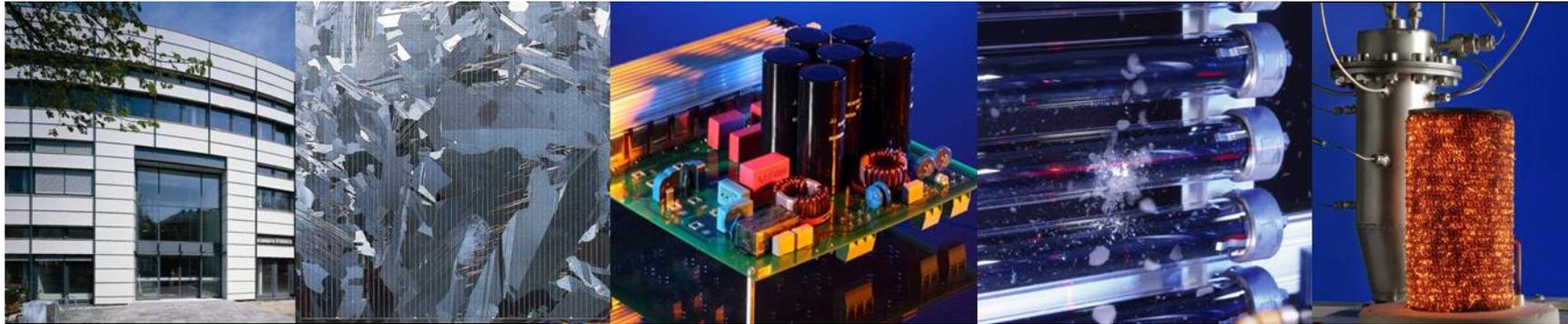
Quelle: Bundesnetzagentur (2015); http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/Versorgungsqualitaet/Versorgungsqualitaet-node.html; BMU, BEE, bdew

Hans-Josef Fell – MdB (1998-2013)
Präsident der Energy Watch Group

Die Solarenergie als Pfeiler unserer künftigen, nachhaltigen Energieversorgung

- Solarenergie zusammen mit der Windenergie sind die zentralen Pfeiler der Energiewende, der Transformation unseres Energiesystem hin zu effizienter Nutzung von mehr und mehr erneuerbaren Energien.
- Mit weiter steigenden Einspeisungen erneuerbarer Energie wird eine Optimierung des gesamten Energiesystems immer wichtiger.
- Dazu gehören besonders auch Speicher (Batterie-Kosten sinken rasch!) sowie ein smart grid, mit Anreizen zum Lastmanagement.
- Bisher zeigen sich keine technischen show-stopper; weitere Forschung und Entwicklung wird erlauben Effizienzen zu erhöhen und Kosten weiter zu senken: Die Energiewende wird sich für teilnehmende Volkswirtschaften sehr positiv auswirken!
- **Wenn wir die forschungs- und industriepolitischen Weichen heute richtig stellen haben wir *vielleicht noch* eine Chance, unsere ausgezeichnete Stellung im internationalen Wettbewerb zur globalen Energiewende zu weiterem Wachstum dieses *Zukunftsmarktes* zu nutzen!**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Eicke R. Weber mit
Hans-Martin Henning, Bruno Burger, Thomas Schlegl, Gerhard Stryi-Hipp.....

www.ise.fraunhofer.de
eicke.weber@ise.fraunhofer.de