



Applied Solar Expertise

Der wichtige Beitrag der Photovoltaik für eine schnelle 100% Erneuerbare Energieversorgung in Deutschland und weltweit

IGHA

Hanau, 13. Mai 2014

Dr. Winfried Hoffmann – ASE



Applied Solar Expertise

Dr. Winfried Hoffmann

Mitglied des Aufsichtsrates der SMA Solar Technology AG

Vorsitzender des Aufsichtsrates der Solarfabrik AG

Mitglied des Aufsichtsrates bei ISFH und Helmholtz Center

Mitglied im Kuratorium bei FhG-ISE, ZSW und NEXT Institut

Präsident EPIA (European Photovoltaic Industry Association)
...für eine lange Zeit zwischen 1997 und 2014

- Studium der Physik und Promotion in Biophysik
- 1979 NUKEM F&E Photovoltaik
- 1988 NUKEM Geschäftsbereich PV und neue Materialien
- 1985 Vorstand BSW Solar (Bundesverband SolarWirtschaft)
- 1994 GF ASE – Angewandte SolarEnergie GmbH (50%/50% JV DASA/NUKEM)
- 1996 → 100% NUKEM → RWE Solutions AG (ASE → „RWE Solar“)
- 1997 Vorstand EPIA (European PV Industry Association)
- 2002 GF RWE SCHOTT Solar GmbH (50% SCHOTT AG/RWE Solutions AG)
- 2005 SCHOTT Solar GmbH
- 2007 GF Applied Materials GmbH&Co KG
- 2011 Eigene Beratungs-Firma ASE – Angewandte SolarExpertise
- Vorlesungen in Konstanz, Freiburg und Hannover

Häufig verwendete Begriffe in der Energiewirtschaft



- **Primärenergie (PE)**

Gas, Öl, Kohle, Uran



wird umgewandelt (mit Verlusten) in ...

- **Sekundärenergie (SE)**

Bsp. Rohöl → Raffinerie → Heizöl, Benzin ...

Bsp. PE → Kraftwerk → Strom, Prozesswärme...



...die dann mit weiteren Verlusten zur eigentlichen

- **Nutz-/Endenergie**

umgewandelt wird

Bsp. Benzin → Ottomotor → Nutzlast von A nach B

Bsp. Strom → Glühbirne → Licht (Lumen)

Häufig verwendete Maßeinheiten in der Energiewirtschaft

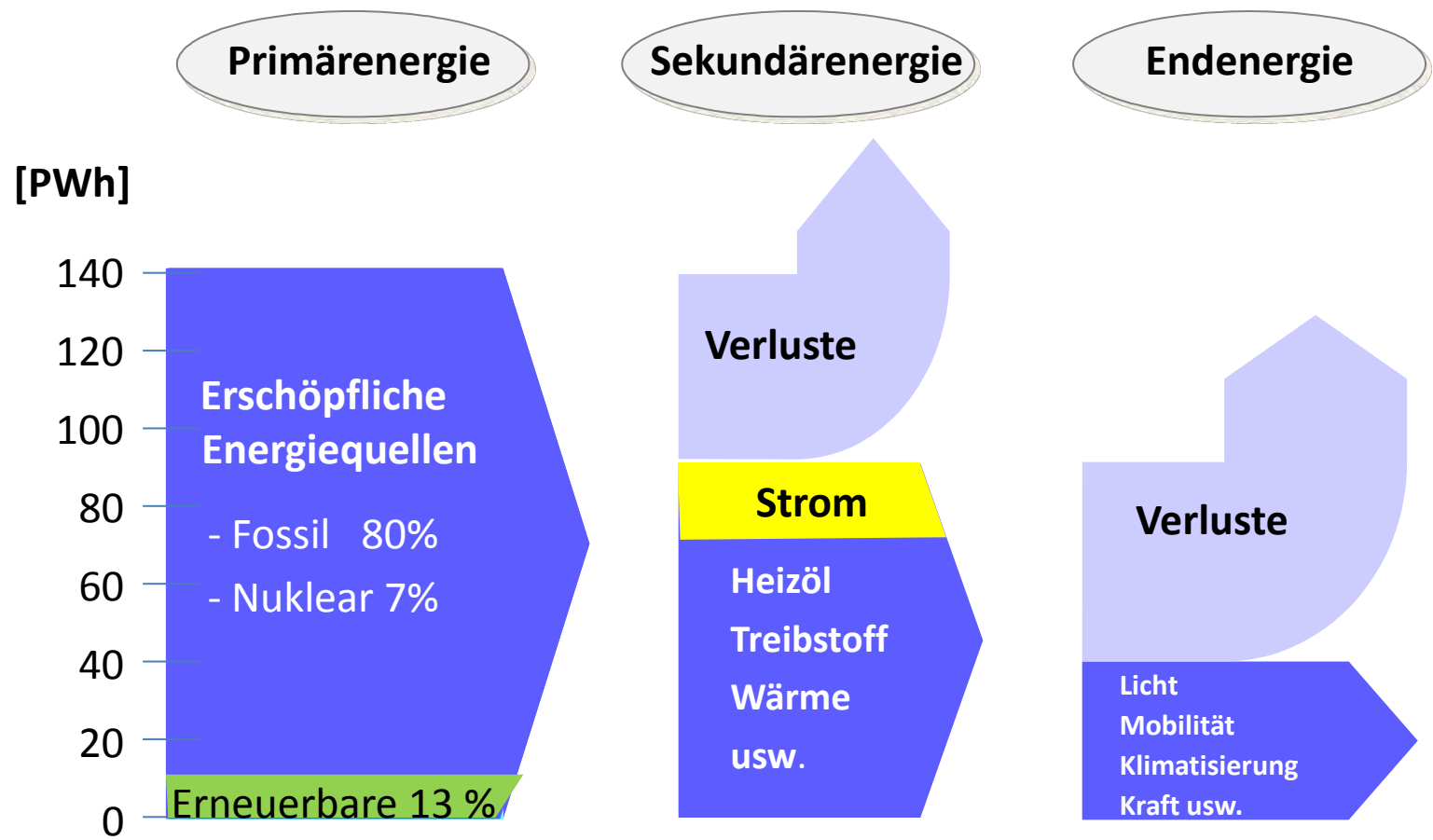


Beispiel	Leistung	x Zeitdauer	= Energie
Glühbirne	100 W	10h	1 kWh
(O)LED	5 W	10h	0,05 kWh
Ottomotor(1PKW)	100 kW	10h	1 MWh (1.000 kWh)
<i>Stromverbrauch</i>			
1 Fam Haushalt	~ 500 W	8760h (1Jahr)	~ 4 – 5.000 kWh
Deutschland			600 TWh (600 Mrd kWh)
Europa			3.000 TWh = 3 PWh
Weltweit			20.000 TWh = 20 PWh
<i>Primärenergie weltweit</i>			<i>~ 140.000 TWh = 140 PWh</i>

P(eta) = 1.000 T(era); T = 1.000 G(iga); G = 1.000 M(ega); M = 1.000 k(ilo))

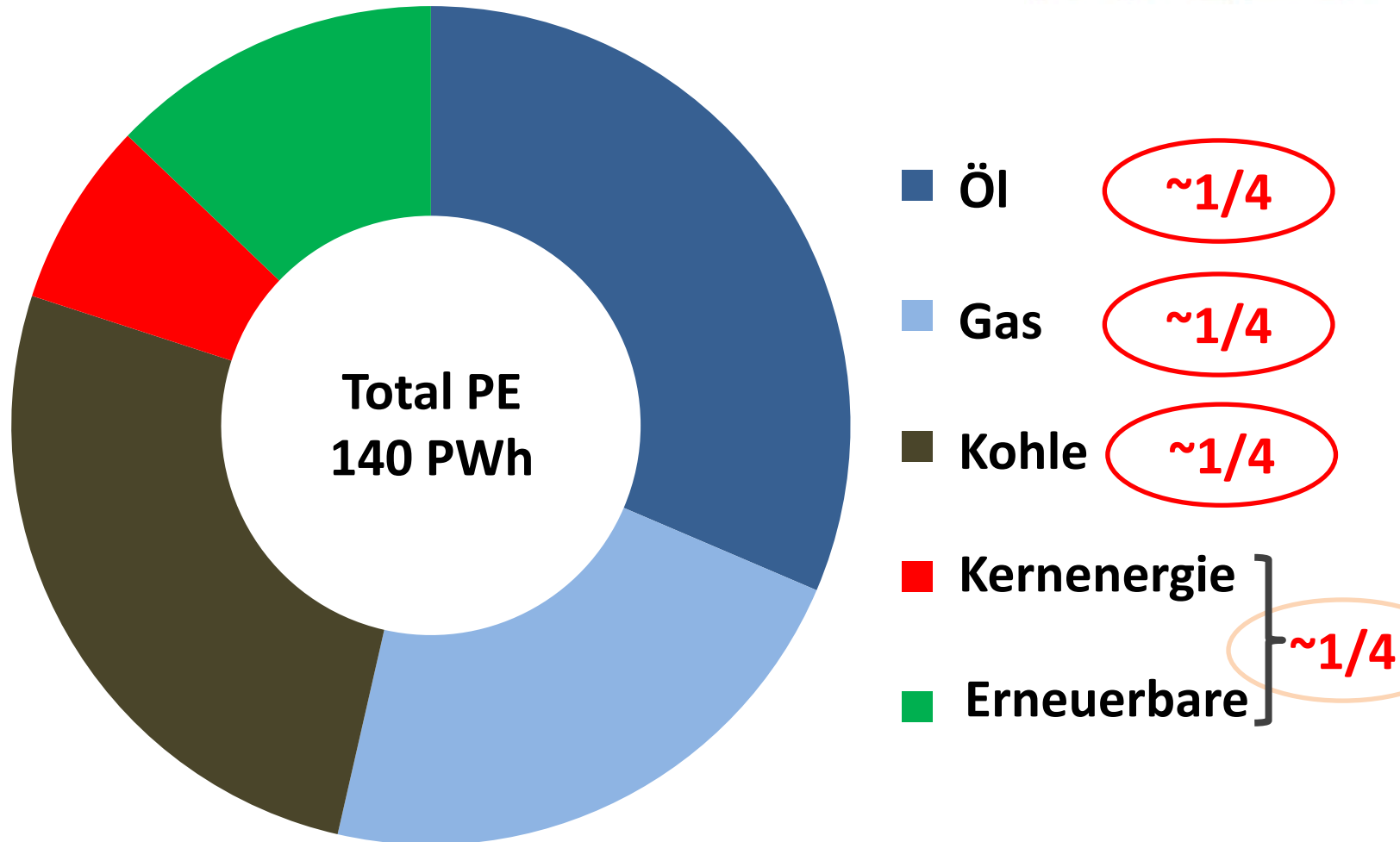
Primär-, Sekundär- und Endenergie heute

(PE:SE:EndE = 3,5 : 2,3 : 1 ~ 3:2:1)



Source: IEA, eigene Daten

Primärenergieträger 2010

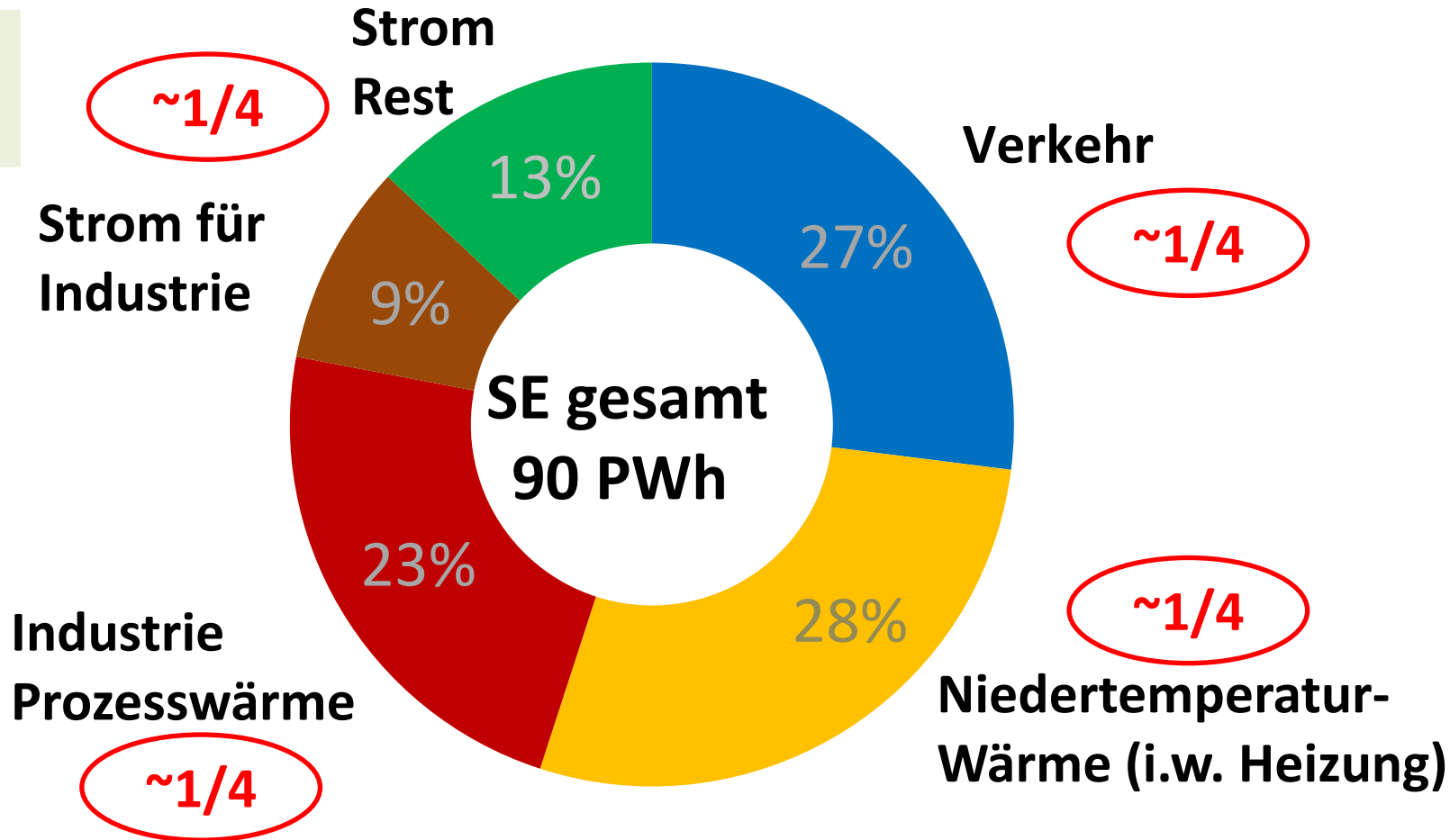


Source: IEA

Verbrauch der SE in den Energie-Sektoren



Strom
~23%



Source: IEA

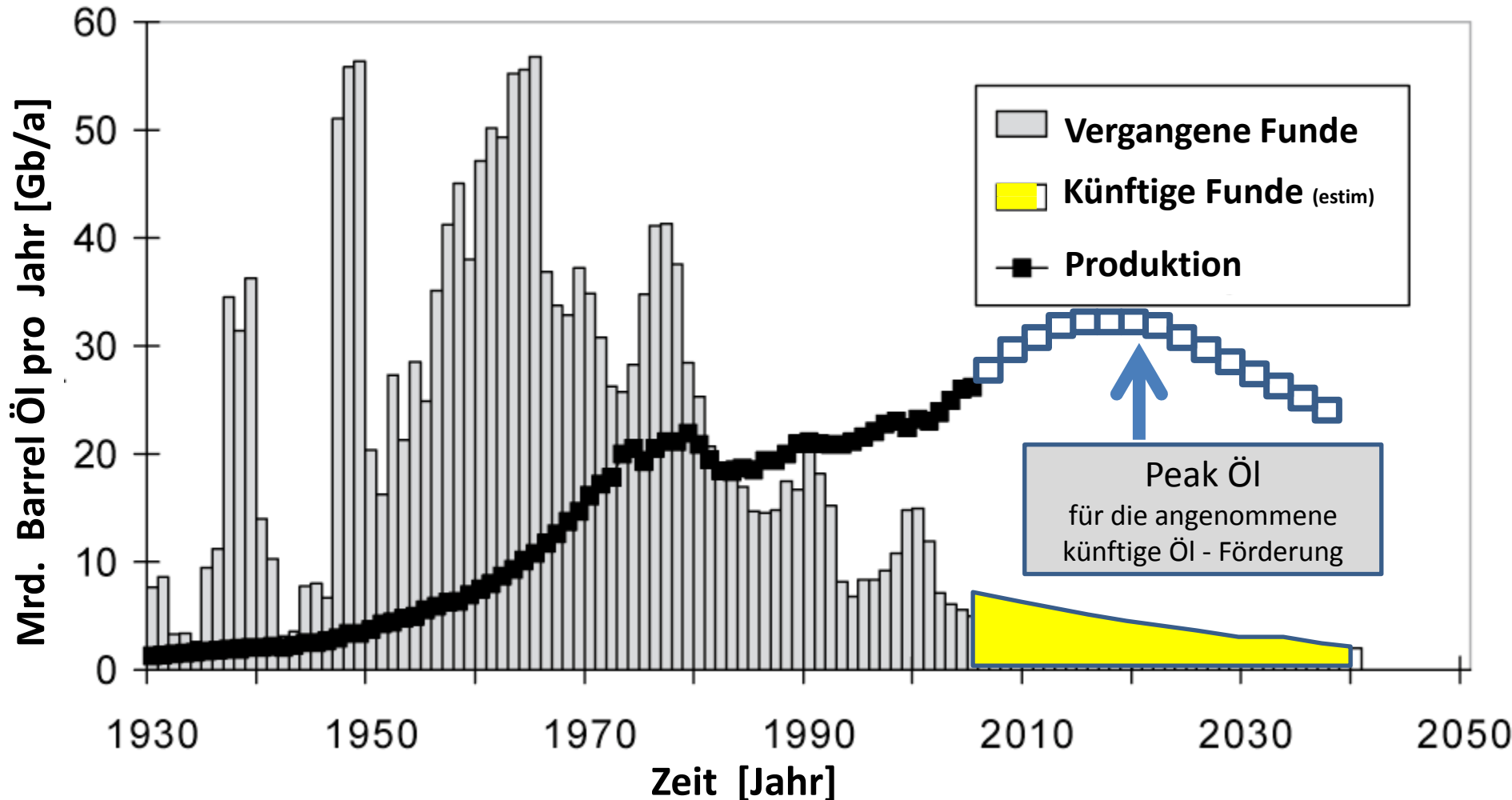
Reserven, Ressourcen und unkonventionelle Möglichkeiten für erschöpfliche Energieträger (heutiger PE Verbrauch 140 PWh pro Jahr)



Angaben in PWh	Reserven	Ressourcen	Unkonventionelle Möglichkeiten
Öl	2.800 (= 20 a)	19.900	26.900
Gas	13.600	18.100	168.800
Kohle	5.900	132.200	138.100
Uran	700	3.200	731.900
Gesamt	23.000 (= 165 a)	173.400 (= 1.240 a)	1.065.700 (= 7.600 a)

Source: WBGU 2011

„Peak“ – Öl aus konventionellen Reserven (ähnlich für Gas und Kohle)



Die Zukunft der erschöpflichen Energieträger



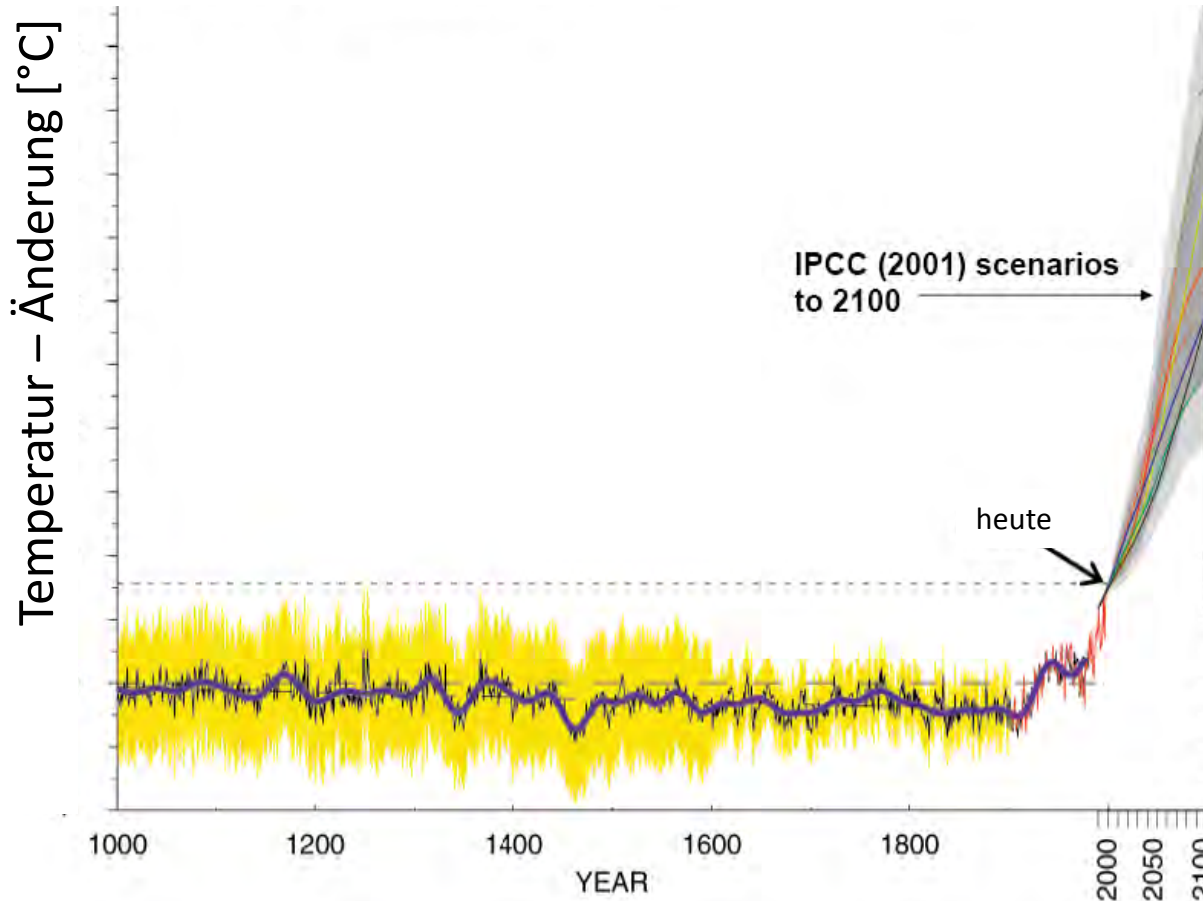
- Abhängig vom jeweiligen Preislevel (z.B. ~100 \$/ Barrel Öl) gibt es für ALLE erschöpflichen Energieträger „Peak – Zeiten“
- Wenn eine bestimmte „Peak – Zeit“ für eine spezifische erschöpfliche Energieart überschritten wird, gibt es einen Preisanstieg hierfür – dies ist wichtig, wenn von Reserven zu Ressourcen oder gar zu den unkonventionellen Lagerstätten gegangen wird
- Das Steinzeitalter wurde nicht wegen des Mangels an Steinen beendet, sondern weil bessere Materialien für die jeweilige Anwendungen gefunden wurden – sehr ähnlich werden erschöpfliche Energieträger immer teurer und zunehmend von Erneuerbaren Energien ersetzt, die kostengünstiger sind UND eine bessere Umweltbilanz aufweisen

Source: Eigene Überlegungen

Projektionen der Temperaturerhöhung



1000 Jahre Historie der Erdtemperatur ... und 100 Jahre Vorhersagen



IPCC und >90% der Wissenschaft korrelieren die T-Erhöpfung mit anthropogenem CO₂ (u.a. THG)

Die Presse und – vornehmlich von Ölkonzernen - finanzierte Think-Tanks versuchen, diese Korrelation zu verneinen und mit anderen Ereignissen in Verbindung zu bringen

Die Fakten sind ...

Source: D. E. Carlson, 2008

Die meisten Modellrechnungen zeigen eine Bandbreite von 2 – 5°C.

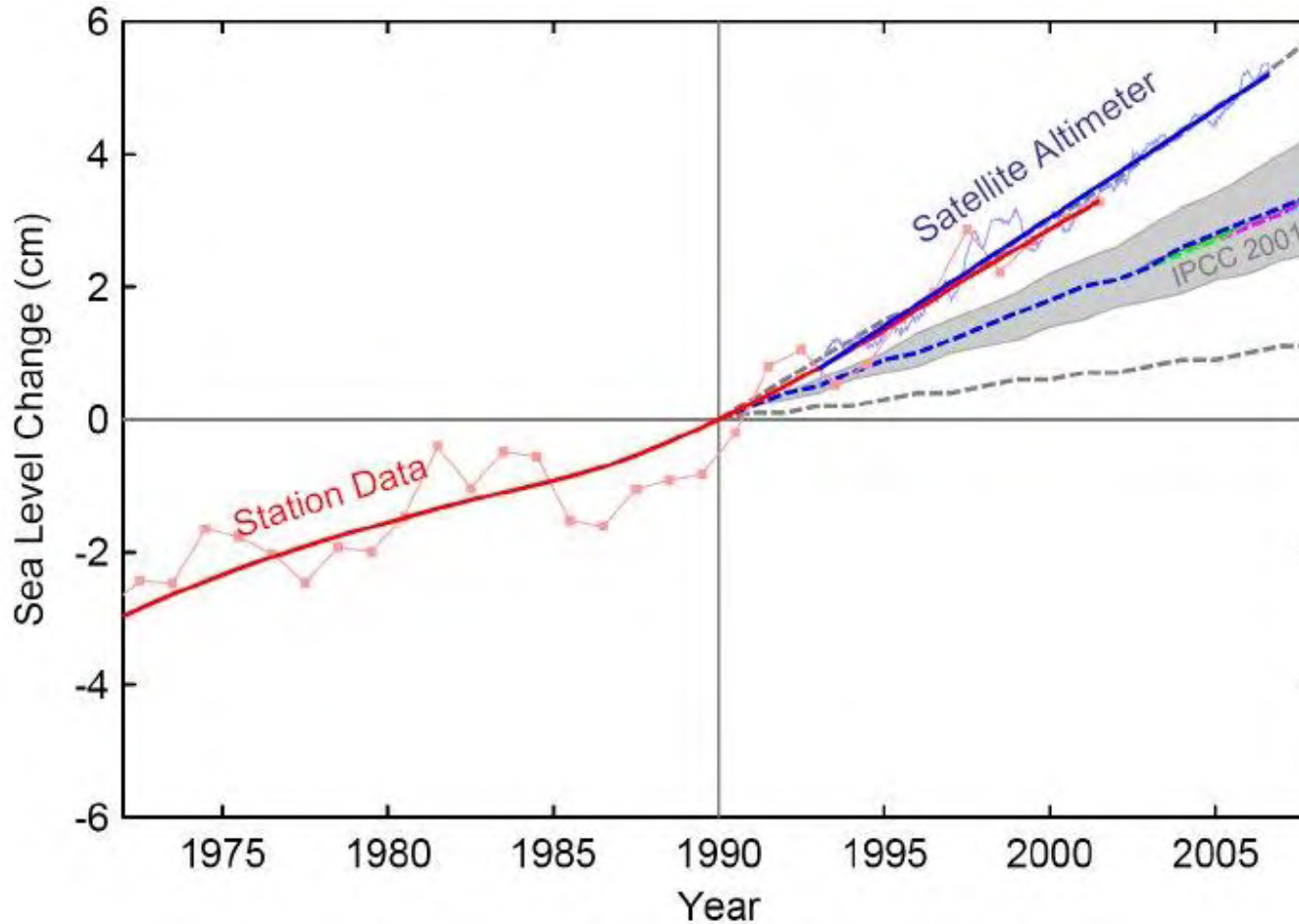
Weltweites Abschmelzen der Gletscher



Die beiden Photos
des Muir-Gletschers
im Alaska National-
park wurden 1941
und 2004 aufge-
nommen und zeigen,
dass das Meiste des
610 m dicken
Gletschers
verschwunden ist

Ref.: D. E. Carlson, 2008

Erhöhung des Meeresspiegels (seit 1973)



Source: D:E: Carlson, 2008

Sehr wahrscheinliche Entwicklung der Treibhausgase und ihr Einfluss auf das Klima



- ✓ **+~2°C** T-erhöhung wären möglich, wenn weltweit schnell die fossilen Energieträger durch Erneuerbare ersetzt werden würden und sich dadurch der CO₂ Ausstoß drastisch reduzieren würde (alle anderen Parameter konstant)
- ✓ **+~4°C** sind beim derzeitigen Trend sehr wahrscheinlich
- ✓ **+?5, 6, 7?°C** ist unglücklicherweise zu erwarten, wenn die anderen Treibhausgas-Emissionen hinzu addiert werden
- ✓ Solch eine schnelle und hohe T-Erhöhung wurde zuletzt vor Millionen von Jahren beobachtet

Source: Rahmstorf & Schellnhuber(2012), eigene Überlegungen

Sehr wahrscheinliche Entwicklung der THG und ihr Einfluss auf das Klima



Was bereits heute beobachtet wird und mit zunehmender Intensität in der Zukunft:

- ✓ nicht mehr, aber heftigere Tornados, Taifune und Hurrikane
- ✓ weltweites Abschmelzen der Gletscher (→ Dürre im Sommer und Überschwemmung im Frühjahr/Herbst)
- ✓ Erhöhung des Meeresspiegels ~m bis 2100 und deutlich mehr danach
- ✓ heftige Änderungen des lokalen Klimas durch Änderungen von Meeresströmungen
- ✓ Versauerung der Meere (→ Auslöschung der Korallenriffe)
- ✓ Auslöschung vieler Pflanzen- und Tierarten

ref.: Rahmstorf & Schellnhuber, eigene Recherchen

... einer der Ignoranten des Klimawandels



... wenn's nicht so traurig wär ...

Vermeintliche Lösung des Problems fossiler Energien: „CSS“



Zauberwort „**CSS**“ = „**Carbon Sequestration and Storage**“

Abtrennung von CO₂ aus dem Abgas und Speicherung „für immer“

Wenn KEINE Lösung „für immer“ gefunden wird, ist es **unverantwortlich, fossile Energieträger in der Zukunft zu verbrennen!**

WENN eine technische Lösung entwickelt wird, wird diese nach allen bisherigen Erkenntnissen eine drastische Kostenerhöhung bewirken (→ **>10€ct/kWh**)

AUCH Gaskraftwerke („shale Gas“) – obgleich nur halb so viel CO₂ wie Kohle-KWe – sind dann aus Gründen der Erderwärmung **nicht mehr erlaubt!**

❖ Druck- und Siedewasserreaktoren

- # deutliches Restrisiko (nicht nur äußere Einw., sondern auch Terroranschläge)
- # nicht gelöste Entsorgung
- # sehr endliche Uranreserven (ohne WAA)
- # mit **11 €ct/kWh für 35 Jahre (plus Inflationsausgleich)** viel zu teuer (GB/F-LOI)

❖ Hochtemperaturreaktor

- # in kleinen Einheiten „inhärent sicher“ möglich → dann noch teurer!
- # Einsatz von Thorium möglich
- # Entsorgung s.o.

❖ Schneller Brüter

- # Plutoniumwirtschaft (Gefahr der Proliferation)
- # erhöhtes Risiko im Betrieb

❖ Kernfusion

- # ...+30 Jahre..., Machbarkeit und wenn ja, dann nur sehr groß, Kosten?

Source: Generelle und eigene Überlegungen

Strompreisentwicklung (~2020er) unterschiedlicher Technologien



Kategorie	Technologie	LCOE in heutiger Währung [\$ct/kWh]
Traditionell	Saubere Kohle mit CCS	>~10
	Kernspaltung	>~10

Source: Diverse Presseerklärungen

Strompreisentwicklung (~2020er) unterschiedlicher Technologien

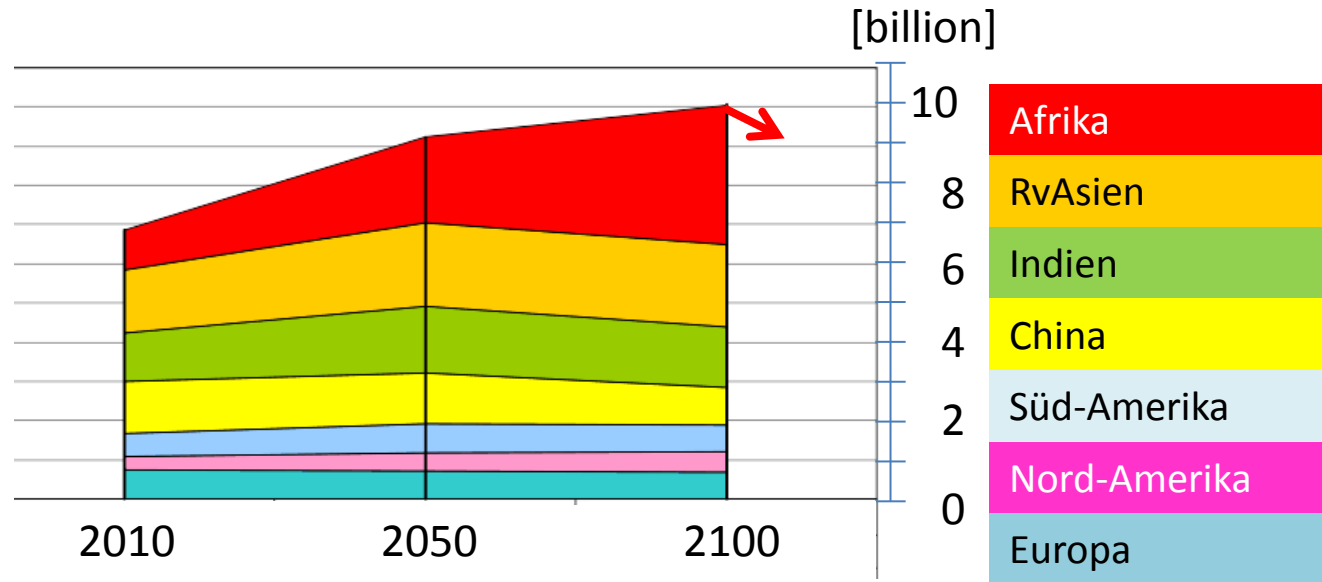


Kategorie	Technologie	LCOE in heutiger Währung [\$ct/kWh]
Traditionell	Saubere Kohle mit CCS	>~10
	Kernspaltung	>~10
Photovoltaik	Südliche Regionen (~2 kWh/W _{PV})	3 – 4
	Nördliche Regionen (~1 kWh/W _{PV})	6 – 8
Wind	On-shore (~2 kWh/W _{wind})	3 – 4
	Off-shore (~4 kWh/W _{wind})	4 – 5
Speicherung	klein (~kWh+)	6 – 8
	mittelgroß (~MWh)	<5

Situation heute (vereinfacht):

- $\frac{1}{4}$ der Weltbevölkerung ($\sim 1,5$ Mrd) verbrauchen $\frac{3}{4}$ der Primärenergie (~ 105 PWh)
→ heutige Ungerechtigkeit: $\frac{1}{4}$ der PE für $\frac{3}{4}$ der Menschheit!
- Der Lebensstandard in der „industrialisierten Welt“ bedeutet heute ~ 70 PWh pro 1 Mrd Menschen („HQ=High Quality“)
- Eine analoge Betrachtung ergibt für die SE ~ 45 PWh pro 1 Mrd Menschen für die HQ Situation

Entwicklung der globalen Bevölkerung bis 2100



**„Gleichgewicht“ wird erwartet im Bereich
~9 -10 Milliarden Menschen**

Ref.: UN projection 05/2011 (medium scenario)

Primärenergie-Verbrauch in der Zukunft



Situation heute:

- Der Lebensstandard in der „industrialisierten Welt“ (=HQ: High Quality) bedeutet heute ~70 PWh (45 SE) pro 1 Mrd Menschen

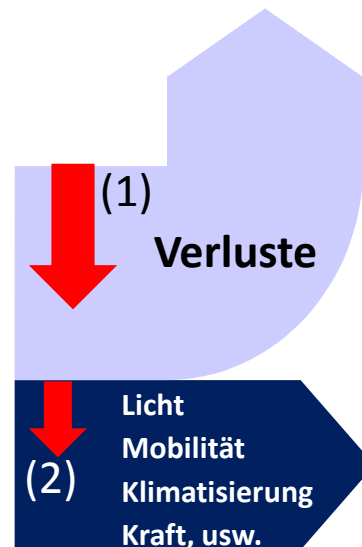
Situation in der Zukunft:

- Wenn am Ende dieses Jahrhunderts die Weltbevölkerung ~10 Mrd Menschen betragen wird und ALLE den gleichen HQ Lebensstandard haben sollen → 700 PWh PE (450 PWh SE) würden benötigt werden (... mit heutiger Energieeffizienz) →

Deutliche Erniedrigung mit neuen Technologien in jedem Fall notwendig! ...für den 100% EE-Pfad geht es dann schneller!!

Erniedrigung der Endenergie

Endenergie

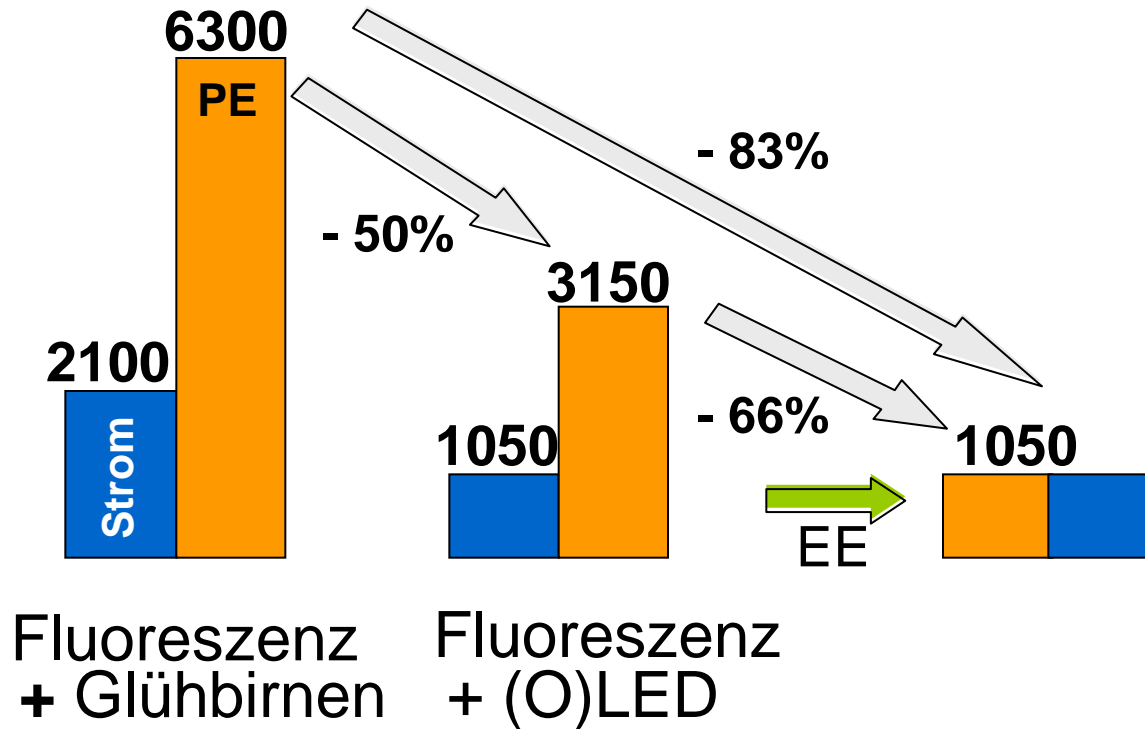


1. **Energieeffiziente Geräte**
(z.B. (O)LED, E-Fahrzeuge)
2. **Einsparung von Endenergie**
(z.B. Isolierung von Häusern, intelligente Mobilität in künftigen „smart-cities“ u.v.m.)

Source: Eigene Abschätzung

Energieeinsparungen durch intelligente Technologien

Elektrizitätsbedarf und eingesetzte Primärenergie (in TWh) mit gleicher Beleuchtungsstärke (global)



Source: SPIE Strassbourg, April 2006 & W. Hoffmann personal estimates

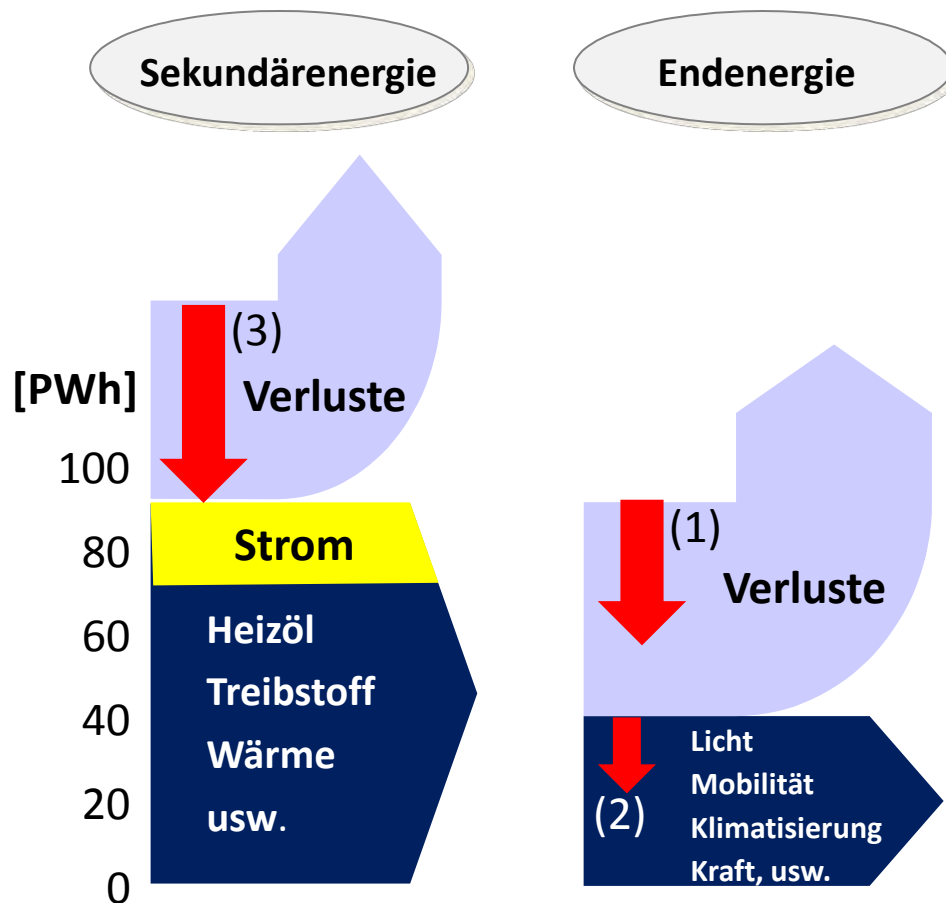
Halbierung der Energie für Transport - falls Energie aus EE



	Diesel Motor	Elektrofahrzeug
Effizienz	$\eta_{\text{Diesel} \rightarrow \text{Bewegung}} \sim 30\%$	$\eta_{\text{El. Motor}} \sim 90\%$ $\eta_{\text{Batterie Lithium-Ion}} \sim 90\%$ $\eta_{\text{El. Motor} \rightarrow \text{Bewegung}} \sim 70\%$
Gesamt Effizienz	$\eta_{\text{Total}} \sim 30\%$	$\eta_{\text{Total}} \sim 57\% = \sim 60\%$
Fahrzeug von A nach B	100 Einheiten PE (Rohöl)	Falls Strom aus EE: ~ 50 Einheiten PE = SE_{Strom} Falls Strom aus herk. Strom-Mix: $\sim 100 \dots 150$ Einheiten PE

Source: Eigene Recherchen

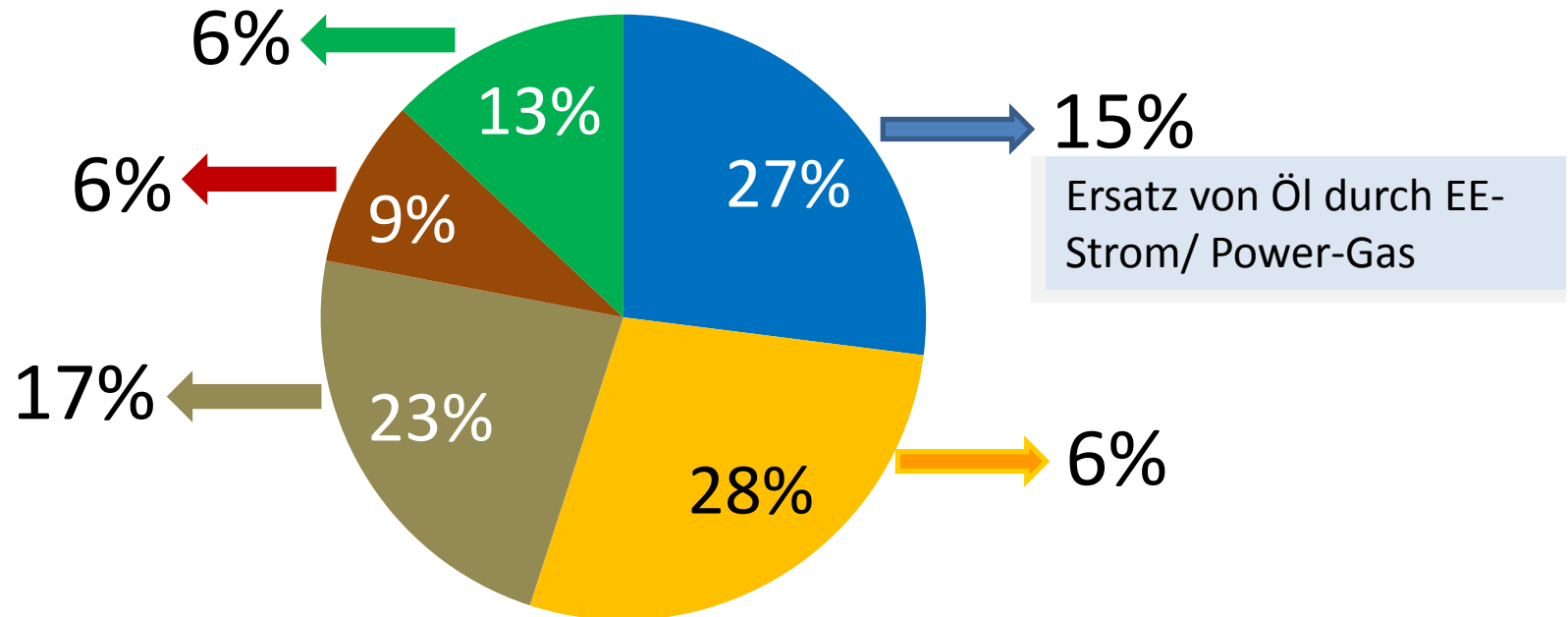
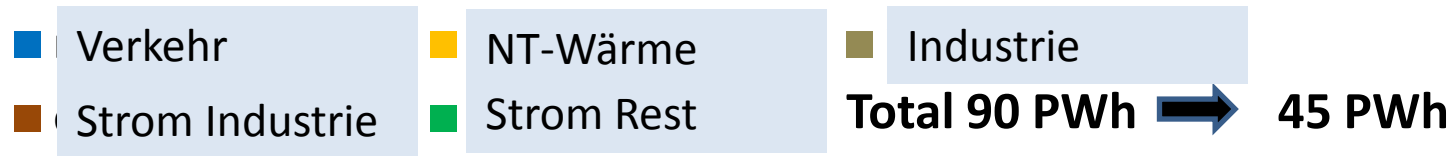
Erniedrigung der Endenergie & Einsatz Erneuerbarer Energien



Source: Eigene Abschätzung

1. Energieeffiziente Geräte (z.B. (O)LED, E-Fahrzeuge)
2. Einsparung von Endenergie (z.B. Isolierung von Häusern)
3. Einsatz Erneuerbarer Energien (Umwandlungsverluste werden nicht berücksichtigt: PE = SE)

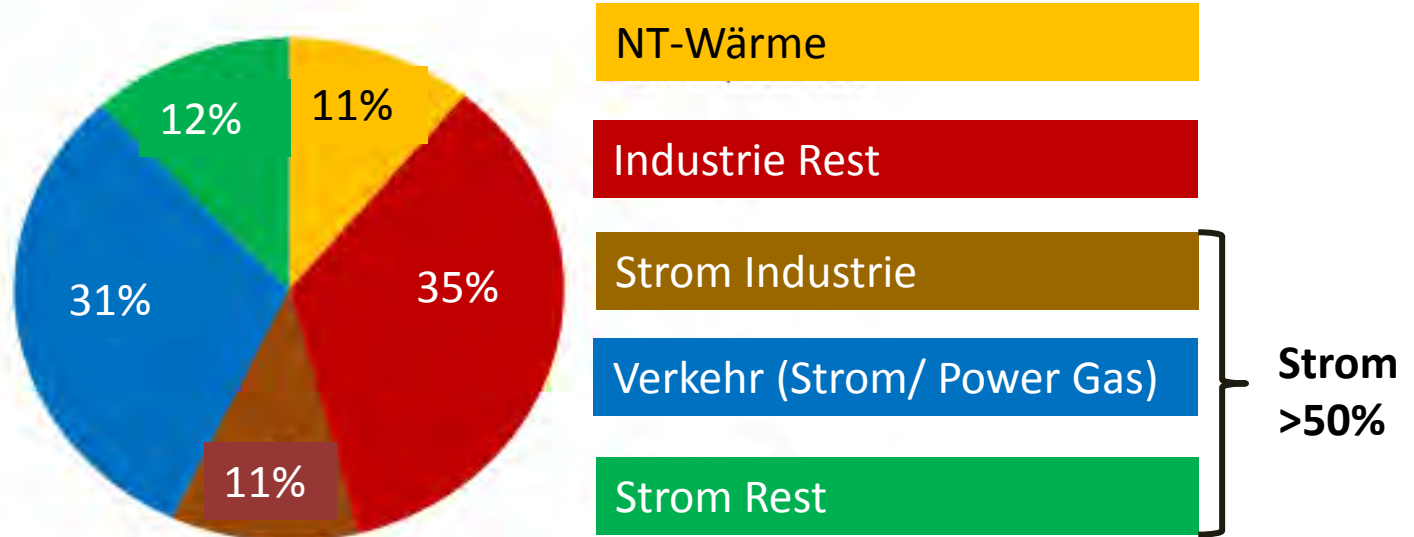
Einfluss von „milden“ Effizienzmaßnahmen auf die heutige SE



Source: Eigene Überlegungen

Heutige SE mit „milden“ Effizienzmaßnahmen

Heutige SE ~ 90 PWh (davon Strom nur 23%) →
45 PWh mit „milden“ Effizienzmaßnahmen



Je intelligenter, sparsamer und mit mehr Erneuerbaren die nötige Sekundär-
energie bereit gestellt wird, desto **höher** ist der relative Stromanteil!

Source: Eigene Überlegungen

Effizienzsteigerung erniedrigt SE unter Beibehaltung der gleichen Lebensqualität



- Die beschriebenen „milden“ Effizienzmaßnahmen resultieren in einem Effizienz-Faktor 2
- von Weizsäcker et al. haben mit vielen Beispielen eine Verdoppelung dieses Faktors auf 4 gezeigt
- Die gleichen Autoren zeigten in einer jüngeren Studie, dass sogar ein Faktor 5 möglich ist (→ die heutige SE wäre dann nur noch 18 PWh!)
- Meine **spätere Betrachtung** benutzt konservativ einen **Faktor 3!**

Source: Eigene Überlegungen, von Weizsäcker et al.

Zukünftiger Sekundär-Energiebedarf (= PE bei Einsatz von 100% EE)



Wdh.: bei „gerechter“ Energieverteilung und ohne Effizienzmaßnahmen wären **450 PWh** SE für 10 Mrd Menschen nötig

Bei „milder“ Effizienzsteigerung (**Faktor 2**):
SE nur noch die Hälfte → **225 PWh**

Bei „moderater“ Effizienzsteigerung (**Faktor 3**):
SE nur noch ein Drittel → **150 PWh**

Bei „massiver“ Effizienzsteigerung (**Faktor 5**, von Weizsäcker et al.):
SE nur noch ein Fünftel → **90 PWh**

Source: Eigene Überlegungen (Faktor 2 und 3), von Weizsäcker et al (Faktor 5)

Die wichtigsten EE-Technologien der Zukunft



- (1) Wind als der heute größte EE-träger nach der Wasserkraft (für Strom)
- (2) Konzentrierende solarthermische und PV Kraftwerke für zentrale Stromproduktion an Orten mit hoher Direkteinstrahlung
- (3) PV Solar Strom für dezentrale Stromerzeugung netzgekoppelt und netzfern überall
- (4) Solarwärme für Kälte und (mittlere Prozess)wärme

Source: W. Hoffmann

GROWIAN – GRO(ße) WI(nd)AN(lage)



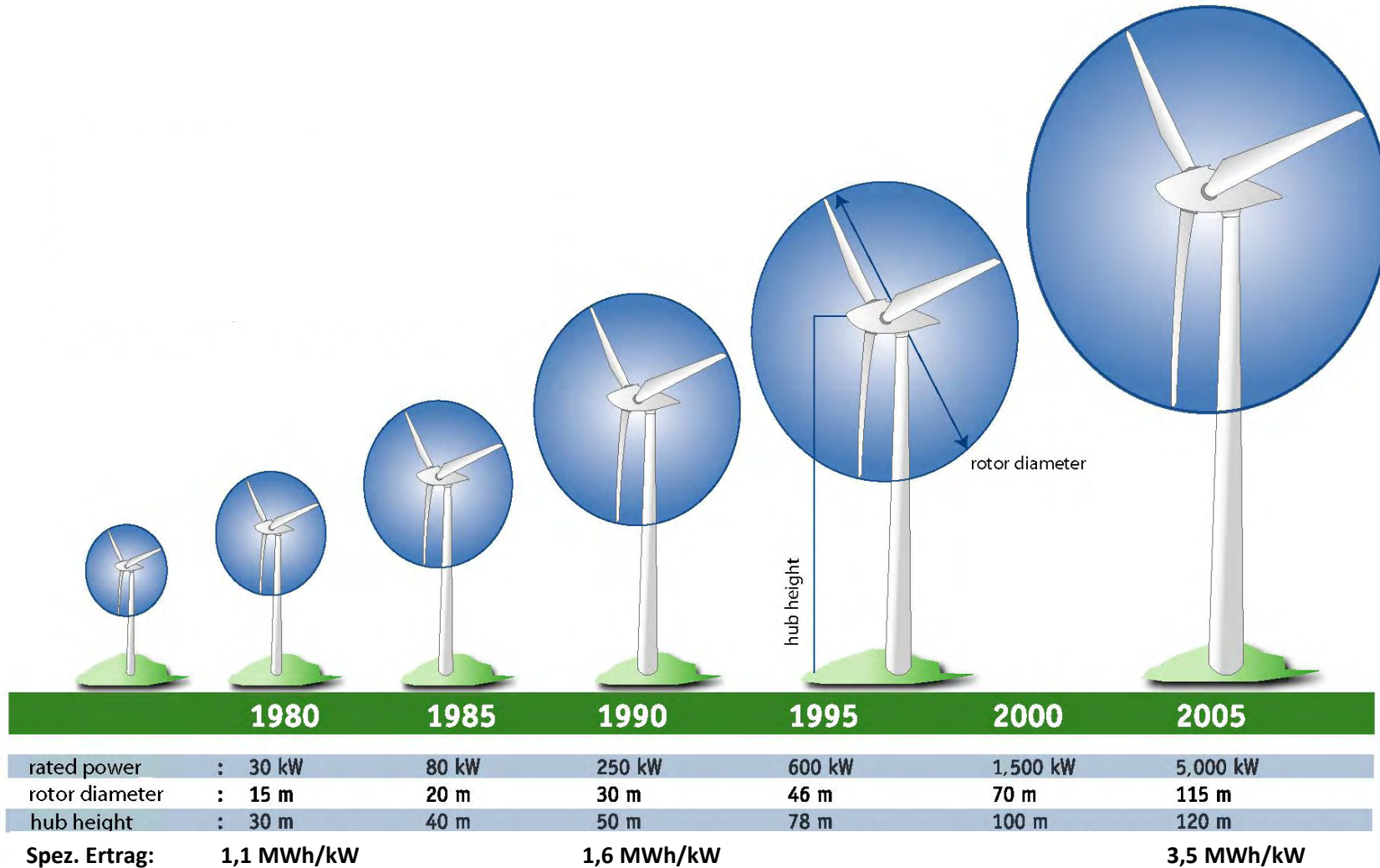
Effektive Leistung	3 MW
Technologische Basis	30kW
Installation	1980
Abbau	1987

Skalierungs-Faktor x100
Erfahrungs- Faktor < x10

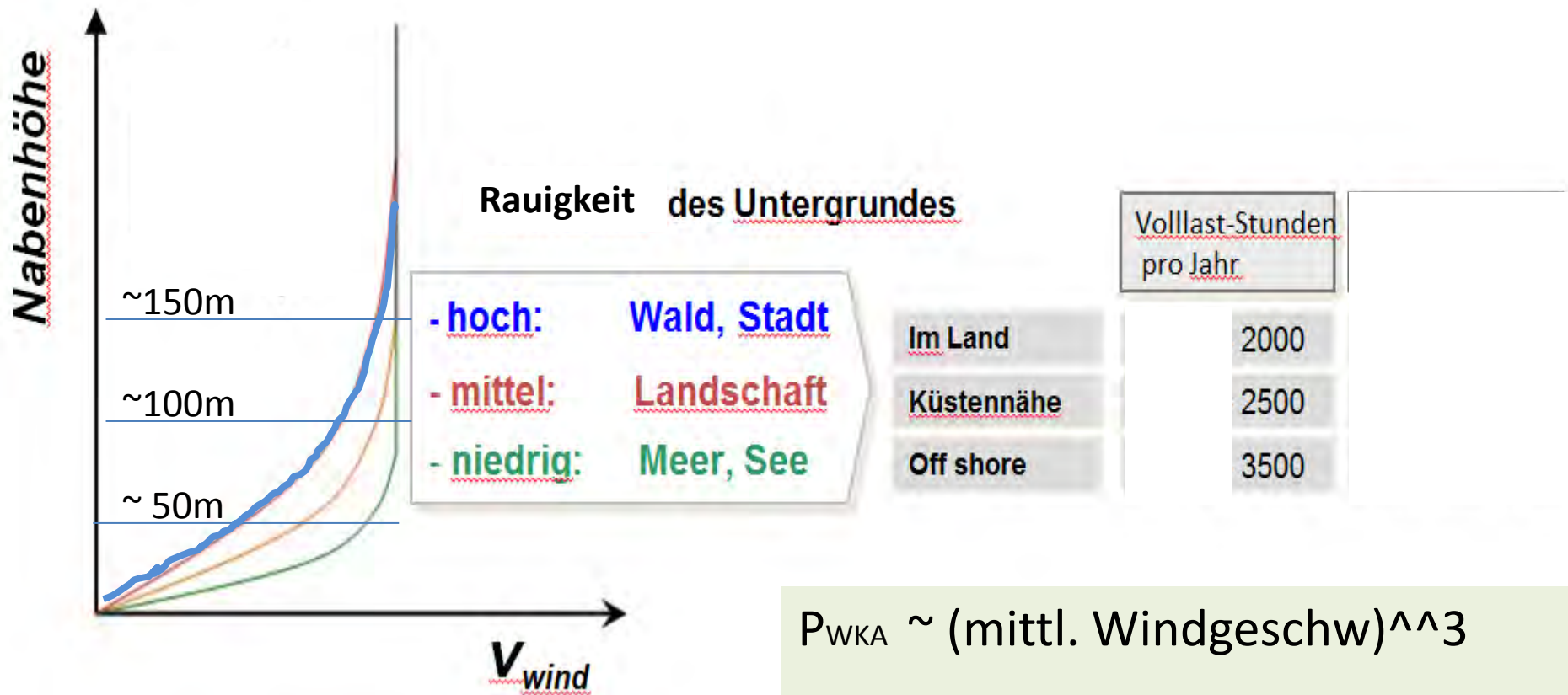


Ineffizienter Technologie “Push”

Windenergie in Deutschland – effizienter „Marktsog“ (durch EEG)



Örtliche Abhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit



$$P_{WKA} \sim (\text{mittl. Windgeschw})^{^3}$$
$$P_{WKA} \sim (\text{Rotordurchmesser})^{^2}$$

Source: EWEA, BWE

5MW Wind Converter



Source: REpower Systems AG

Parallele
Entwicklung
einer adäquaten
Infrastruktur!

- Aufbau on- und off-shore
- Rotortransport (on-shore)
- Wertschöpfungskette
Produktion

TOP 10 countries with wind installations (2012)



Country	Cumulative end 2012 (in GW)	Share in % (Ranking in 2012)	Installations (in GW) in 2012	Share in % (Ranking in 2012)
China	75.3	27 (1)	13.2	30 (1)
USA	60.0	21 (2)	13.1	29 (2)
Germany	31.3	11 (3)	2.4	5 (3)
Spain	22.8	8 (4)	1.1	3 (7)
India	18.4	7 (5)	2.3	5 (4)
Italy	8.1	3 (7)	1.3	3 (6)
France	7.6	3 (8)	-	-
Great Britain	8.4	3 (6)	1.9	4 (5)
Canada	6.2	2 (9)	0.9	2 (9)
Portugal	4.5	2 (10)	-	-
Brazil	-	-	1.1	2 (8)
Romania	-	-	0.9	2 (10)
RoW	39.9	14	6.4	15

Wasserkraft (TOP 10 Länder und Einzelprojekte)



Land	Jährliche Stromproduktion [TWh]	% des Landes-Stromverbrauchs	10 größte Staudämme	Im jeweiligen Land	Installierte Leistung [GW]
China	694	22	Three Gorges Dam	China	23
Brasilien	430	86	Itaipu	Brazil/Paraguay	14
Kanada	377	61	Guri	Venezuela	10
USA	328	6	Tucurui	Brasilien	8
Russland	165	18	Grand Coulee	USA	7
Indien	132	16	Sayano Shushenskaya	Russland	6
Norwegen	122	98	Krasno- yarskaya	Russland	6
Japan	85	7	Robert- Bourassa	Kanada	6
Venezuela	84	69	Churchill Falls	Kanada	5
Schweden	67	44	Longtan Dam	China	5
Andere	1,014	-	Andere		760
Gesamt	3,498	~17 (global)	Gesamt		~850

Wachstum der Wasserkraft: Historie und Zukunft



- In der Vergangenheit wuchs die Wasserkraft \sim linear von 0.9 PWh in 1965 auf 3.5 PWh in 2011 (das entspricht \sim 0.5 PWh alle 10 Jahre)
- Mit der Annahme, dass künftig das gleiche Wachstum beibehalten wird, würde es \sim 100 Jahre dauern, bis das ökonomische Potential von 8 PWh erreicht ist

Bioenergie (~2005)



Kategorien für Bioenergie (~2005)



Kategorie	% der gesamten Bioenergie	Energie [TWh]
Traditionell (Feuerholz für Kochen & Heizen)	86.0	11,954
Moderne Biowärme	7.5	1,043
Biopower (entspricht ca. 45 GW)	4.3	598
Biokraftstoff		
# Bioethanol	1.8	250
# Biodiesel	0.4	56
Gesamt	100.0	13,900

- ... ein wichtiger Beitrag zu den Erneuerbaren: Biomasse
- Kann lokal produziert werden, um Biogas und/oder Biokraftstoff herzustellen
- Kann einfach in die existierende Gas/Kraftstoff-Infrastruktur integriert werden
- Gut geeignet für Spitzenlast-Kraftwerke und als Kraftstoff für Autos, LKW's, Schiffe und Flugzeuge
- **ABER:** Neben dem wichtigen Beitrag in der kurz- und mittelfristigen Zukunft ist Biomasse nicht geeignet, um Strom und Kraftstoff in sehr großer Quantität herzustellen; Grund ist die Konkurrenz von Biomasse der 1. Generation (z.B. Palmöl, Mais) als Nahrungsmittel oder Energie-/Kraftstoffproduktion. Nur die 2. Generation Bioenergie (Abfall und Lingo-Cellulose) sollte weiter verfolgt werden

Stromproduktion mit PV ist 20- bis 60-mal effizienter als mit Biomasse



Der Anbau von Mais in Deutschland ergibt mit nachfolgender Umwandlung in Biogas ~ 16 MWh/ha ($=10^{14}$ m²). Selbst in den besten Klimazonen und Nutzung der am schnellsten wachsenden Pflanzen kann dies maximal vervierfacht werden (~ 64 MWh/ha oder ~ 25 MWh/ha Strom bei 40% Wirkungsgrad)

Auf der gleichen Fläche in Deutschland kann mit einer PV Freiflächenanlage ~ 500 - 800 MWh/ha erzielt werden – das ist die 20 bis 30-fache Strommenge! ... und in südlichen Regionen die doppelte Strommenge, also 40 bis 60-fach bessere Effizienz und das ohne Düngemittel, Pestizide und Bewässerung!

Zusätzlich kann unter den Modulen auch Gemüse etc wachsen, falls die Module nur etwas höher montiert werden – alternativ können unter den Modulen Schafe grasen

Die gleichen qualitativen Argumente gelten auch für Windenergieanlagen

Source: Eigene Überlegungen, Weichgrebe (Uni Hannover)

Effizienz noch deutlich höher für E-Autos mit PV Strom im Vergleich zu Biodiesel



Wdh.: Der maximale Energieertrag ist 64 MWh/ha oder 64 kWh/(10m²);
Mit einem **Verbrennungsmotor**, der 5l/100 km verbraucht, lassen sich damit
~**140 km fahren** (5l = ~ 45 kWh)

Auf einem Teil eines Hausdaches lassen sich mit 10 m² PV in Deutschland 1.000 bis 1.500 kWh produzieren (Modul-eta 10 – 15%);
Mit einem 4-Personen **e-Auto**, das ~15 kWh/100 km verbraucht, lassen sich damit 6.700 – 10.000 km fahren – **50 bis 70 mal so viel**

In südlichen Regionen mit doppelt so viel Solarstrahlung lassen sich damit 13.400 bis 20.000 km fahren – **100 bis 140 mal so viel** im Vergleich zum Biodiesel und gleicher Anbaufläche für den notwendigen Biosprit

Für viele Standard-Anwendungen ist eine Jahresleistung von 15.000 bis 20.000 km ausreichend!

Source: Eigene Überlegungen, Weichgrebe (Uni Hannover)

Photovoltaik – Strom direkt aus Sonnenenergie



PV – die genialste Art, Strom zu produzieren

Ein Halbleiter-Bauelement wandelt

- ❖ Ohne bewegte Teile – geräuschlos
- ❖ Ohne Emissionen

das überall vorhandene Sonnenlicht direkt in Strom um

ABER: Bis vor wenigen Jahren als die mit Abstand teuerste Technologie zur Stromproduktion charakterisiert

PV - Portfolio verschiedener Kundennutzen



netzgekoppelt



€/kWh

netzfern



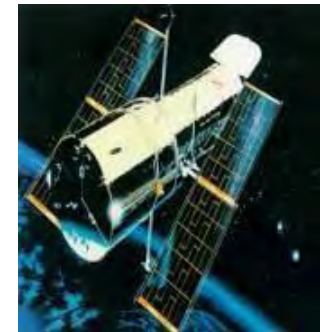
€/h Licht

Konsumgüter



W/m²

high efficiency



g/W



€/m² / Ästhetik



€/W



Flexibilität

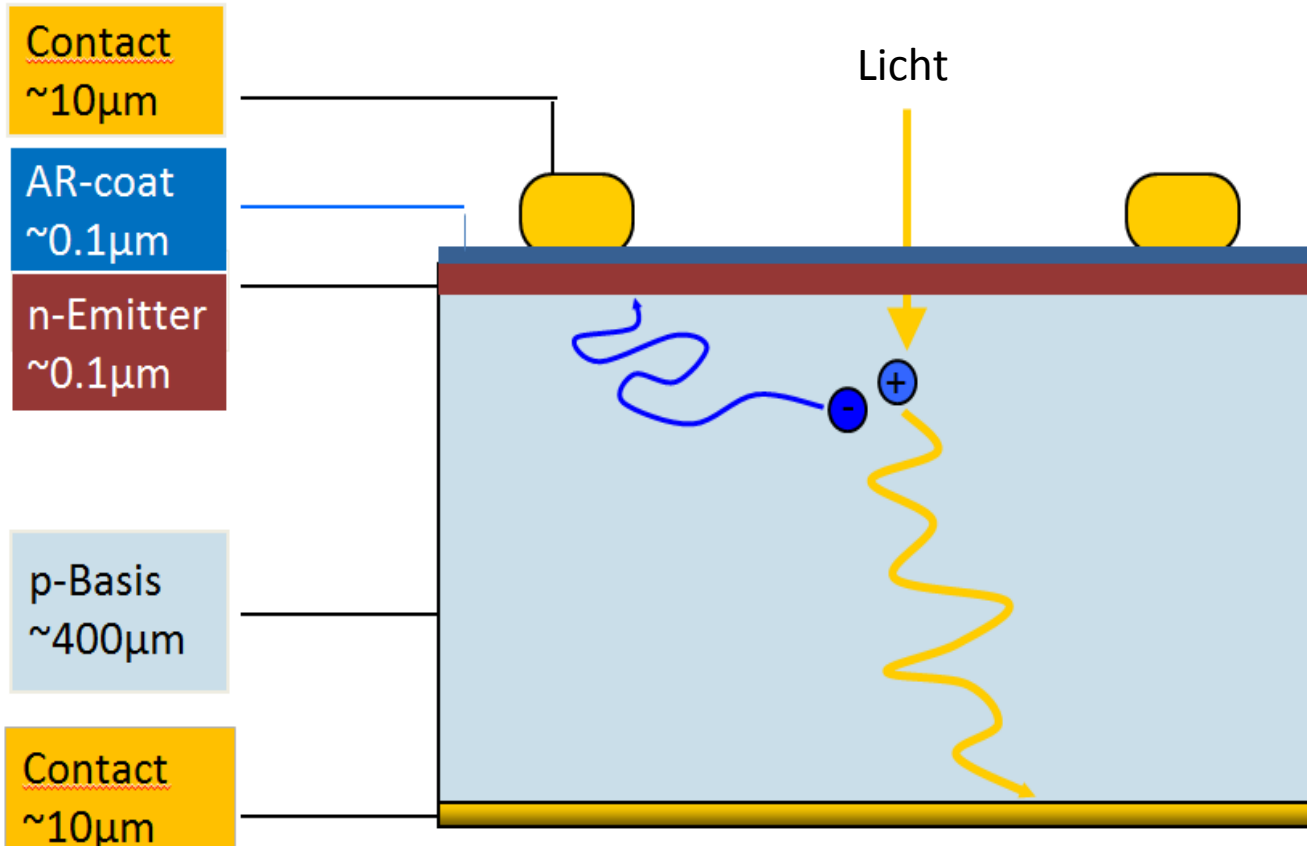


W/mm²

Source: Fraunhofer ISE

Source: Own data

Frühe Standard c-Si Solar - Zelle



1980s:
Ti-Pd-Ag aufgedampfte Kontakte

1990s:
Ag-siebgedruckte Front- und Al-siebgedruckte Rückkontakte

Source: Winfried Hoffmann

1980er

- ~10 MW jährlicher Zubau in 1980 (danach 17% mittleres Wachstum p.a.)
- ... nach den 1960/70er Jahren, als PV Standard für die Stromversorgung von Satelliten wurde, hielt PV Einzug in netzferne und Konsumer-Anwendungen

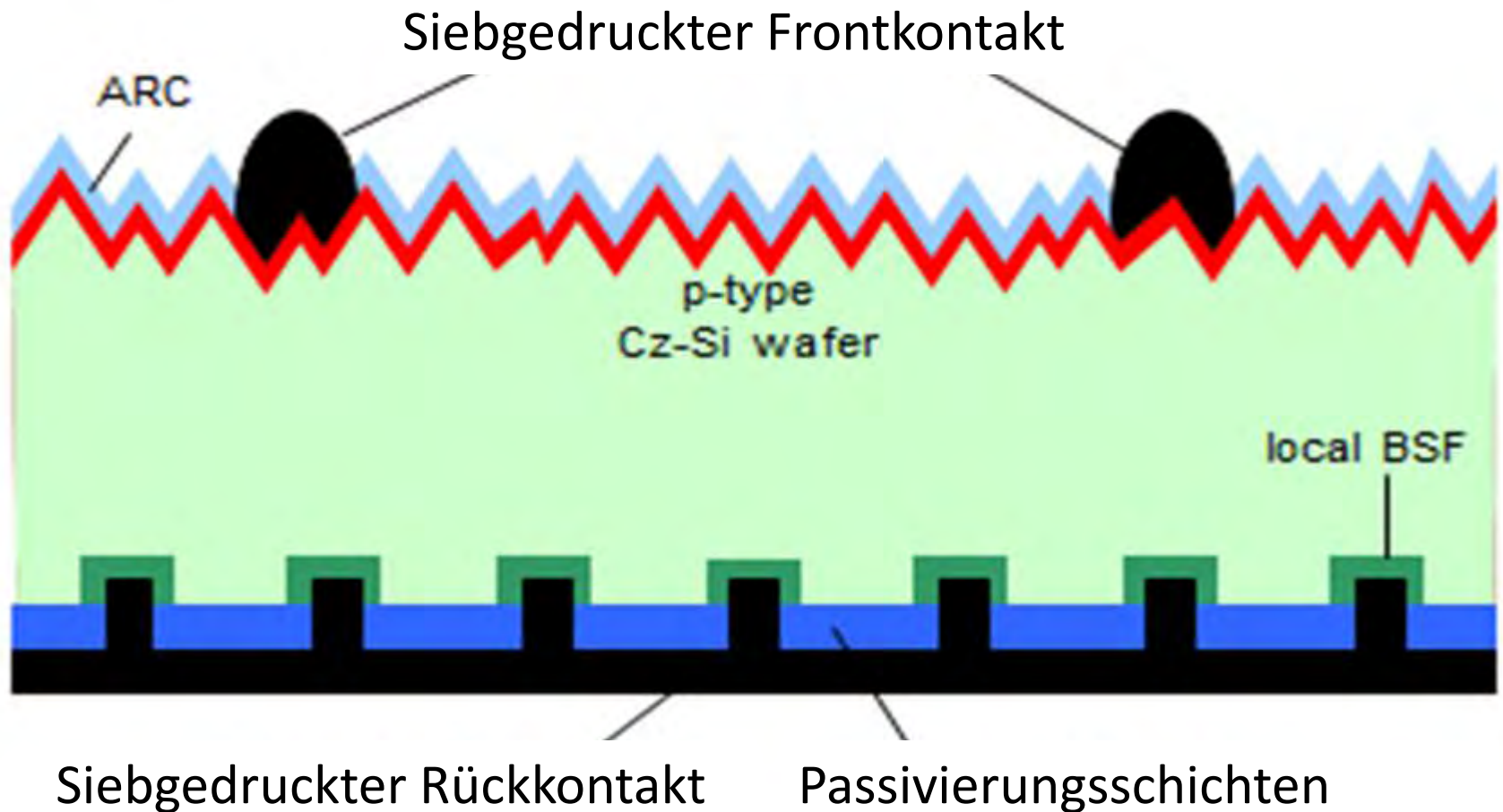
1990er

- ~50 MW (Wachstum 20% p.a.)
- 1991 DE StrEG & 1.000 Dächer (Einspeisegesetz & Vorrang Einspeisung EE)
- Japan's 70,000 Dächer, Deutschland's 100,000 Dächer & Stadtwerke Initiativen

2000er

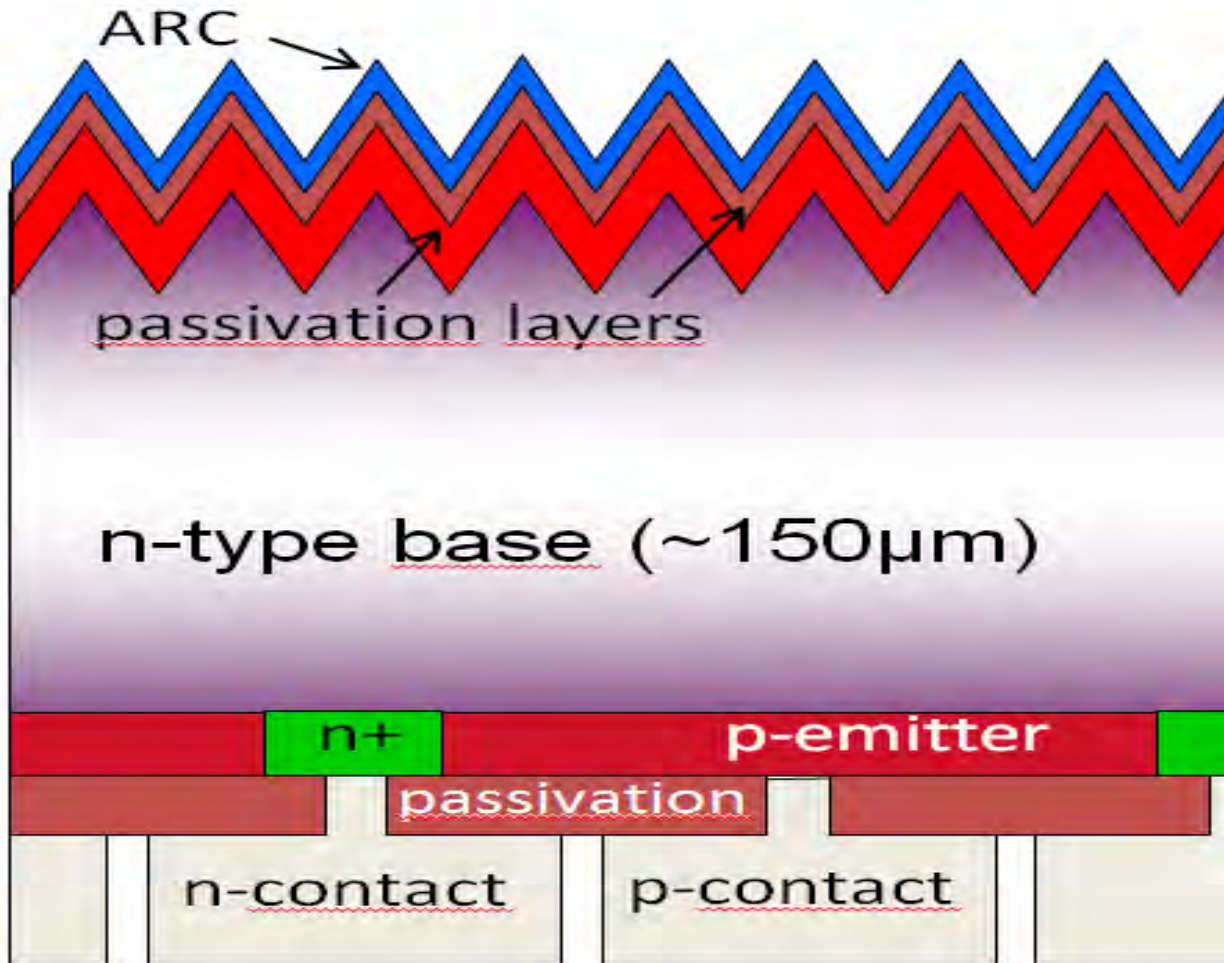
- ~300 MW (Wachstum 52% p.a.)
- 2000 DE EEG & viele FIT's in EU ... PPA's , FTC's & REPS's (i.w. USA)
- Dekade mit dem größten Wachstum ... Produkt- & Material-Engpässe

Siebgedruckte Solarzelle mit >20% Eff auf Standard 156 mm Cz-Wafern



Source: Metz u.a. (2013)

Rückkontakt-Solarzellen mit >23% Eff

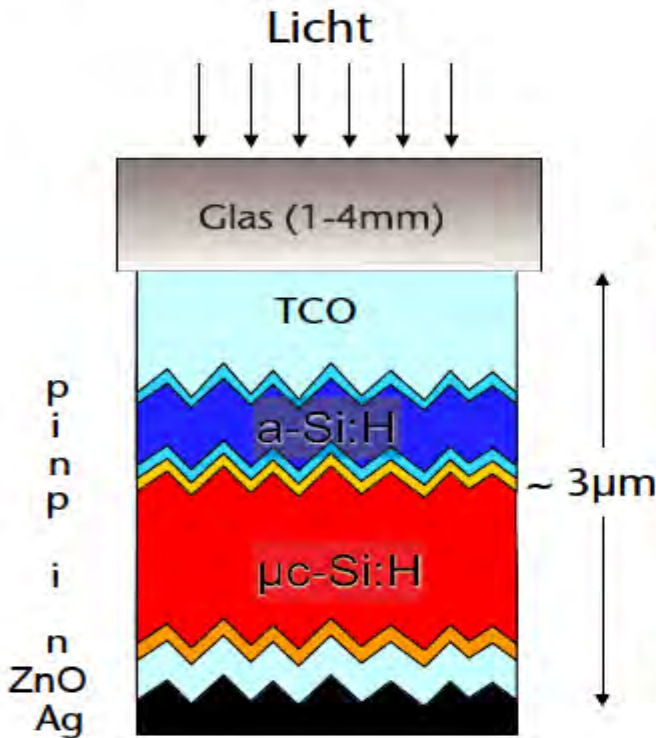


Sun Power
Technologie –
verhältnismäßig
teuer

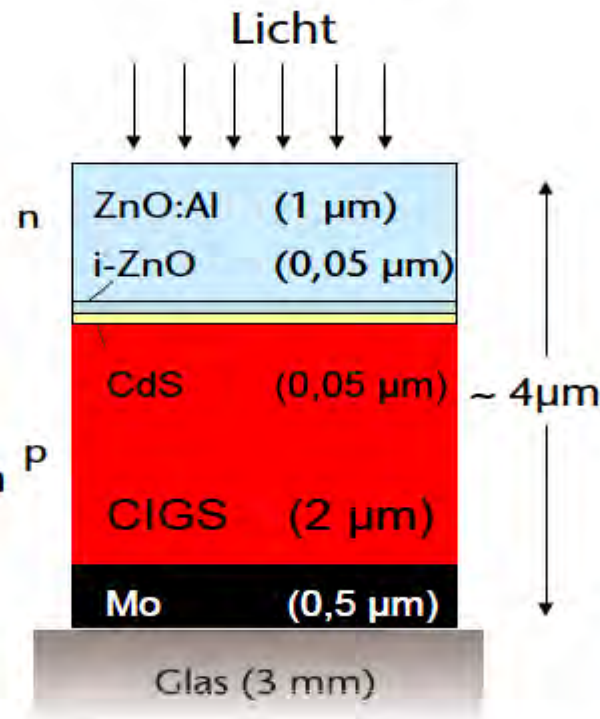
Neue
Möglichkeiten –
Ionen Implanter
(Maschinen noch
zu teuer)

Dünnschicht-Solarzellen

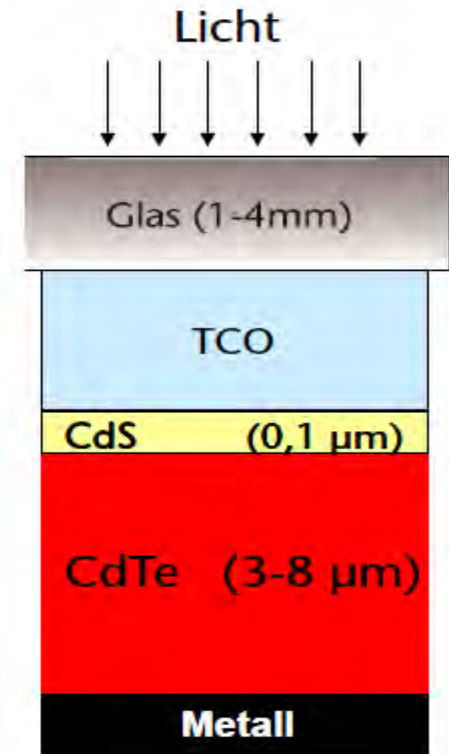
a-Si/ μ c-Si Tandemzelle
(„Micromorph“)



CIGS-Solarzellen:
 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_{1-y}\text{S}_y$



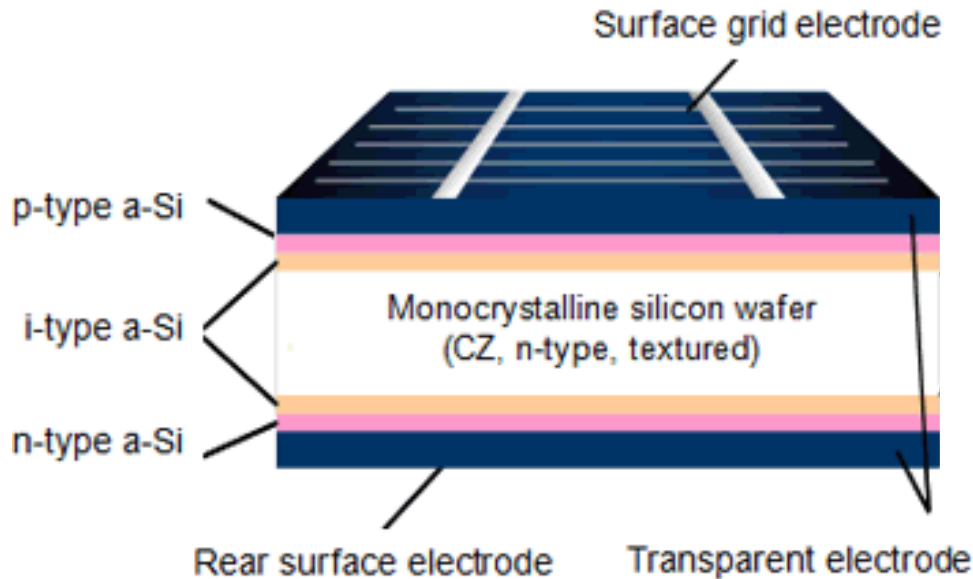
CdTe-Solarzellen:
CdTe



„Honeymoon“-Solarzelle (HJT) – Verheiraten der DS- und c-Si Technologie



Kürzlicher Weltrekord mit Laborzelle: 25,6% auf $\sim 100 \text{ cm}^2$

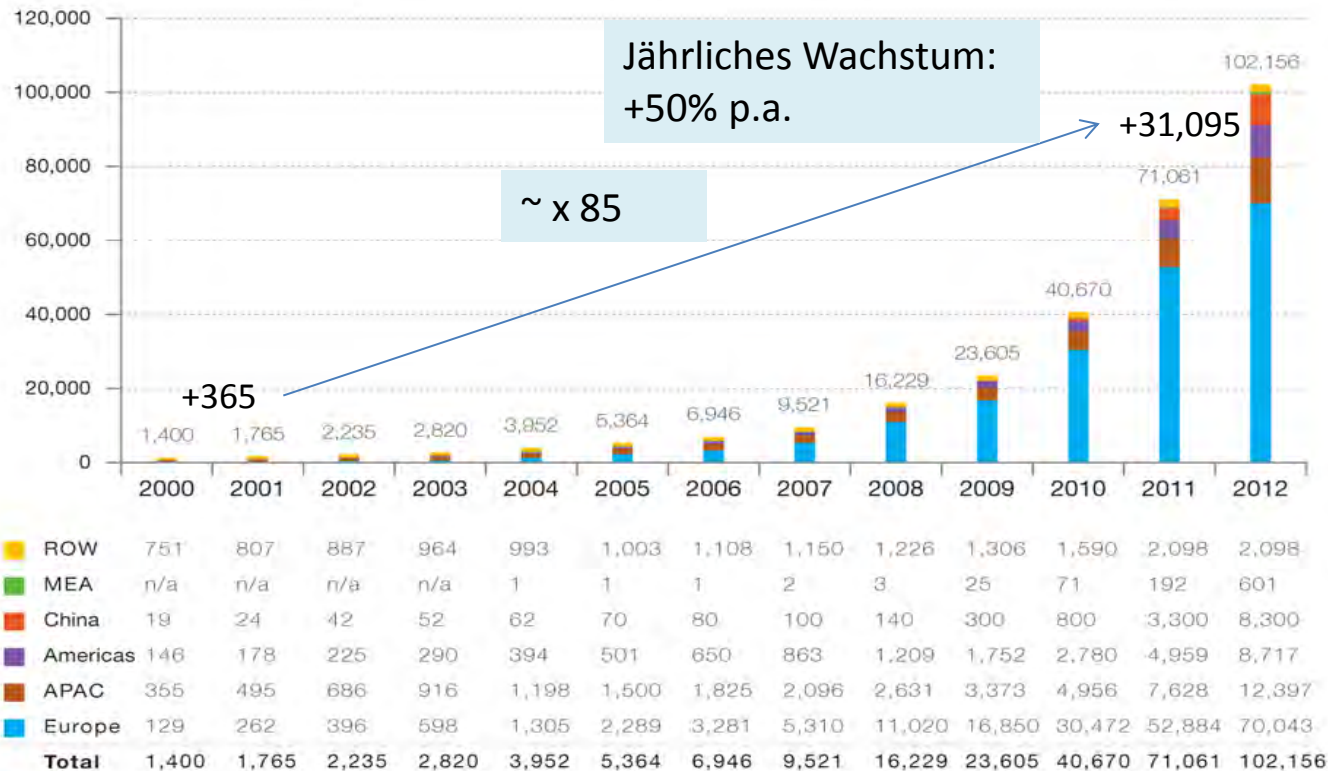


Source: Panasonic

Der globale PV-Markt (kumuliert) passierte die 100-GW in 2012



Evolution of global PV cumulative installed capacity 2000-2012 (MW)



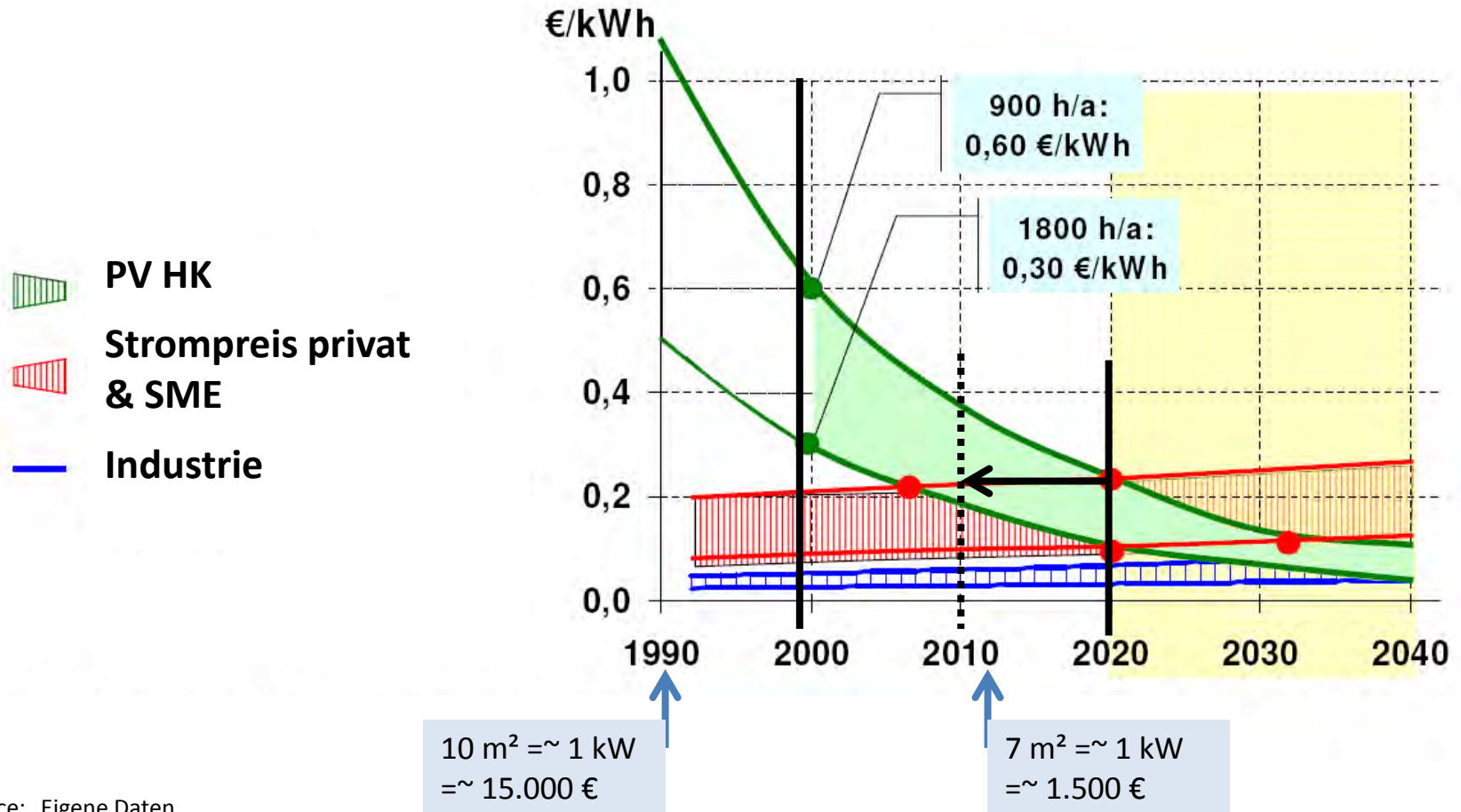
ROW: Rest of the World. MEA: Middle East and Africa. APAC: Asia Pacific.

Source: EPIA, "Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017", 2013

100 GW(peak) PV
Leistung
= ~
85 GW Leistung
= ~
65 full size 1.3 GW
Nuklear-Reaktoren

100 GW (peak) PV
x
1.3 kWh/W(peak)
= ~
130 TWh p.a.
electricity = ~
13 f.s. 1.3 GW
Nuklear-Reaktoren

„Grid parity“: PV HK = Strompreis



Source: Eigene Daten

„Einfache“ und „professionelle“ Berechnung der LCOE



LCOE := Levelized Cost of Electricity

enthält alle Kosten von der Investition, Installation, Betrieb, Stilllegung und Entsorgung/ Recycling („Annuität“)

„einfach“:

Invest 1,5 \$/W, Produktion 25 Jahre, Ertrag (Saudi-Arabien) 1.800 kWh/kW [D 1.000]

→ $1.500 \text{ \$}/(\text{kW} \times 25\text{a} \times 1.800 \text{ kWh/kW}) \times 100 \text{ \$ct}/\text{\$} = 3,3 \text{ \$ct/kWh}$

→ Vereinfachend für die Finanzierung über 25 Jahre Faktor 2,5:

LCOE = 8,3 \$ct/kWh [für D = 11,1 €ct/kWh @ 1,35 \$/€]

„professionell“:

zusätzliche Annahmen: Verzinsung 8%, IWR 1% p.a., alle 10 Jahre WR-Ersatz,
Degradation 0,5% p.a.

LCOE = 9,4 \$ct/kWh [D = 12,5 €ct/kWh @ 1,35 \$/€]

2010s

- ~20 GW (20% pa)
- EEG in Japan, Markt Unterstützung in China, Indien etc
- PV-Diesel fuel save → PV + Speicher (+Diesel back up)

...einige Highlights für die laufende Dekade:

- ... Zunahme der Länder mit „Grid Parity“
- Konsolidierung der PV Industrie: nach Jahren von Unterversorgung & starkem Marktwachstum resultierte dies in den Aufbau von 100% Überkapazität
- Eigenverbrauch auf lokalem Level (Haushalt, MFH und KMU's/ Büros) unterstützt von zunehmend wirtschaftlicher Speicherung
- Neue Marktmodelle für die Integration von zunehmenden variablen EE (Solar&Wind) unterstützt vom „Smart Grid“
- PV zunehmend die „Lösung mit niedrigsten Kosten“

Vogelperspektive auf die größte (2013: 290 MW AC) PV Anlage Agua Caliente in Arizona (2014 ~400 MW)



Fläche $\sim 2 \times 3 \text{ km}^2$
@ 13% eta and FF 50%

Source: First Solar

EEG: Kostentreiber oder ~bremse?



EEG Umlage (=Vergütung – Börsenpreis) trägt seit 2000 mittelfristig zu moderater Preiserhöhung bei

2013 mit 5,3 ct/kWh → Mehrbelastung \emptyset – Haushalt (3.500 kWh) 15€/Monat

135 TWh wurden im \emptyset mit 18 ct /kWh vergütet, Wälzungssumme ~22 Mrd € in 2013

Betrachtet man die gesamte Wälzungssumme bis 2030 als Investition der Volkswirtschaft und errechnet mit dem Mehrwert (i.w. das Preis-hedging) einer EE-kWh den Barwert über den gesamten Zeitraum ergibt sich ein positiver Wert → langfristig „rechnet“ sich die Investition

Spätestens ab den 20er Jahren ist im Vergleich zu herkömmlichen Technologien eine kostengünstigere Stromproduktion mit EE möglich

Zusammengefasst: Das EEG trägt vorübergehend zu einer Erhöhung der Strompreise bei, ist aber über den gesamten Zeitraum betrachtet kostensenkend!

Solarthermie – solar erzeugte Wärme



Flachkollektor



Röhrenkollektor

Niedertemperatur-Kollektoren für
Warmwasser, Heizung und Kühlung
und niedrige Prozesswärme

CSP (Concentrated
Solar Power) für
Strom und
Prozesswärme



Parabolic troughs



Dish



Power tower

Erstes Parabolrinnen-Kraftwerk

Ägypten in 1914



Kollektorenfeld und KW-Block von
Shuman in Meadi, Nähe Kairo (1914)
5 Reihen a 62 m, Dampfturbine 120 HP

(technisches Archiv des Deutschen Museums)

Stand und Aussichten Solarthermie für NT und CSP



NT-Kollektoren: großes Anwendungspotential weltweit

- ❖ kurzfristig Warmwasser und Heizungsunterstützung
- ❖ mittelfristig Kühlung und mittlere Prozesswärme ($< \sim 200^{\circ}\text{C}$)

CSP – Parabolrinnen

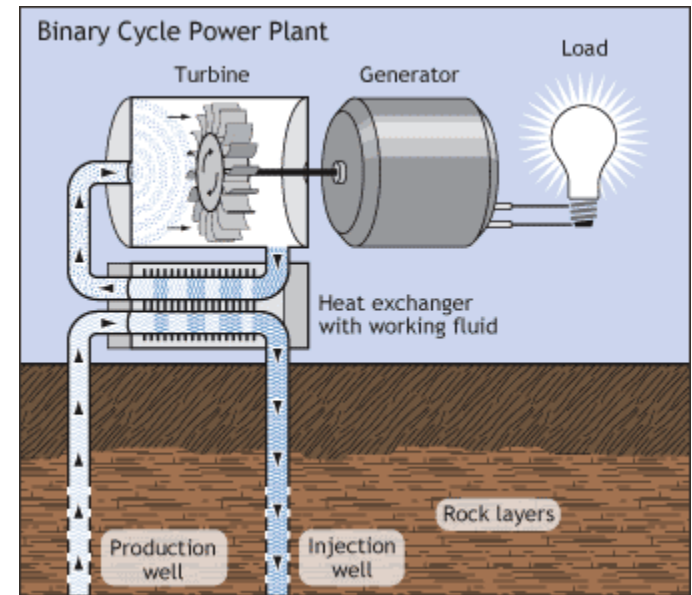
- ❖ Heutige Strom-Produktionskosten ($\sim 15 \text{€ct/kWh}$) limitiert wegen des verwendeten Thermoöls ($< 400^{\circ}\text{C}$) \rightarrow wegen Carnot niedriger Wirkungsgrad; kostengünstige Wärmespeicherung in Salzschnmelzen für spätere Stromprod.
- ❖ Ersatz Thermoöl mit Salzschnmelzen $\rightarrow > 500^{\circ}\text{C} \rightarrow$ niedrigere Kosten

Solar-Dish und Power-Tower

- ❖ Erreichen wesentlich höhere Temperaturen
- ❖ Sind derzeit im Pilotmaßstab, erste Großprojekte

Beide Anwendungen – NT und CSP – haben große Zukunft!

Geothermische Energie



- 99% der Erde ist heißer als 1000°C, aber schwer zu erreichen
- Hohe Kosten für die Bohrung
- Niedrige T-Differenz in Turbinen (200°C → 50°C)
- Hauptvorteil: Grundlastfähigkeit

Volllast-Stunden
Pro Jahr

7000 – 8000

Verfügbarkeit
Volllast

80% - 90%

Einlass - Temperatur [°C]	150	200	300	400	500	600
Carnot Eta $(T_h - T_l) / T_h$ [%]	30	37	48	56	61	66

Gezeiten- und Wellenenergie

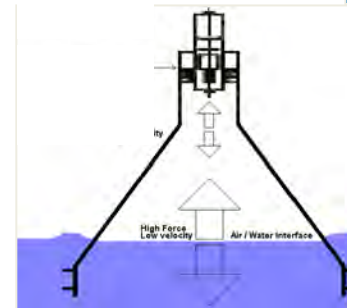
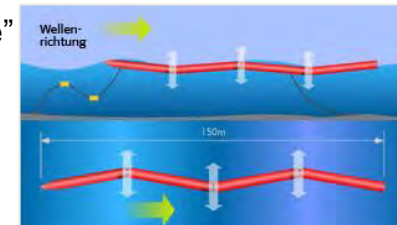
Gezeiten - Energie



Kombination mit "normalen Windrädern"(!?)
(...Erhöhung der Volllast-Stunden und
Reduktion der BOS-Kosten)

Wellen - Energie

"See - Schlange"



Pneumatische Kammer

Volllast-Stunden
pro Jahr

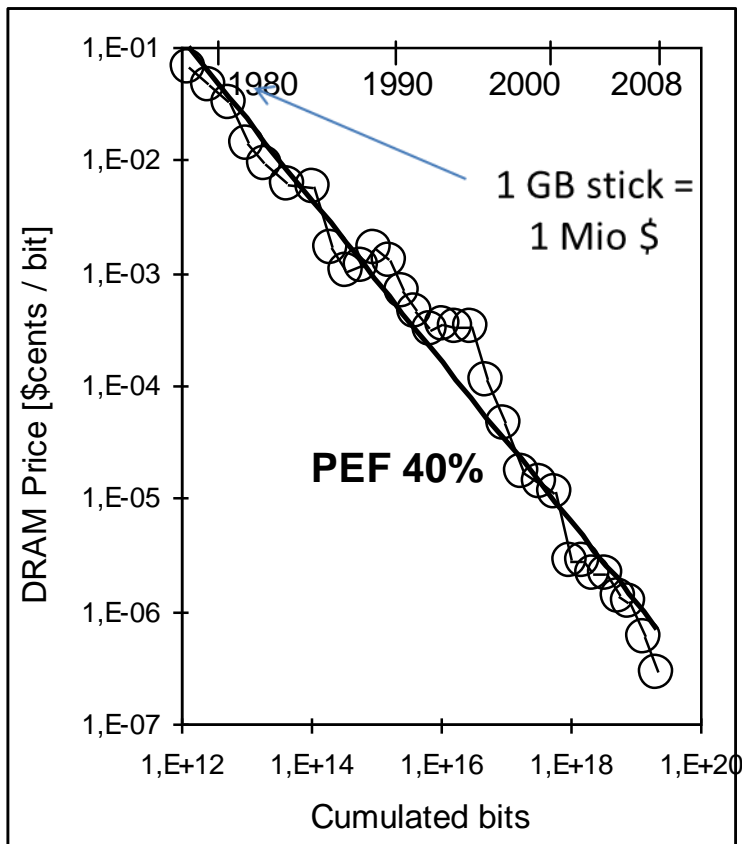
2200 - 4000

Verfügbarkeit
Volllast

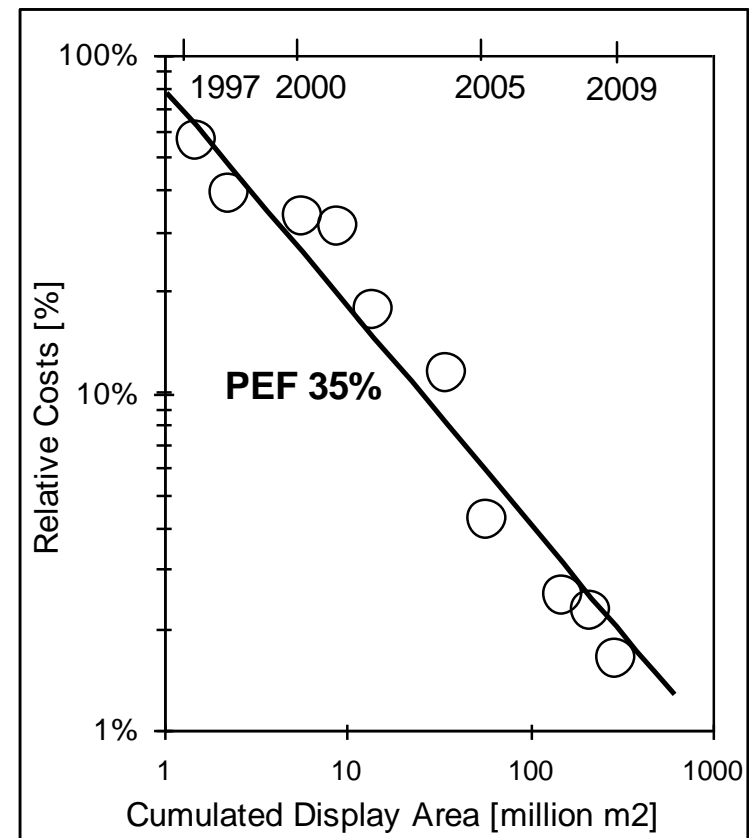
25% - 45%

Preis - Erfahrungs - Kurven

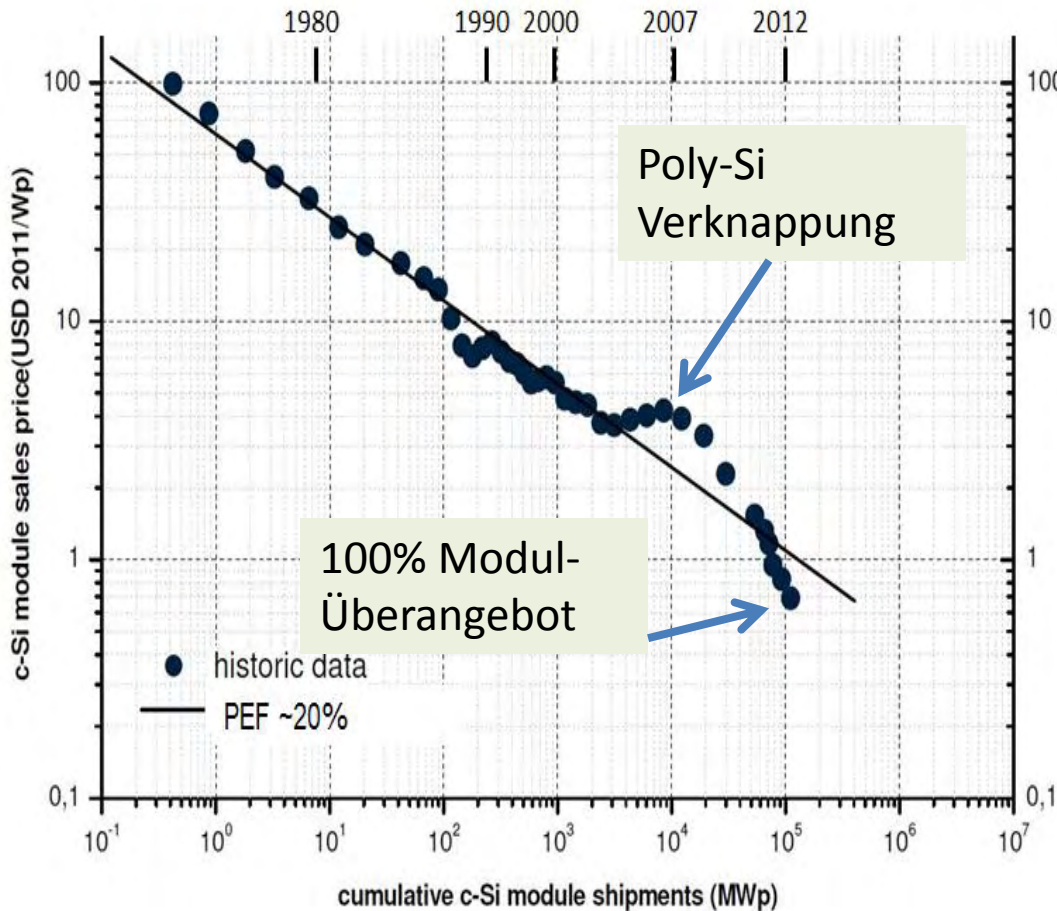
Halbleiter (DRAM)



Flach - Bildschirme



Photovoltaik: Preis-Erfahrungskurve



Spezifische Material-Kosten:

- Wafer Dicke 700 → 150 μ m
- Kerf Verlust 500 → 100 μ m
→ Gewicht 28 → 6 g/dm(2)
- Poly Si 60 → 20 \$/kg
→ Mat. Kosten 1.68 → 0.12 \$/dm(2)
- Effizienz 8 → 20%
→ spec. Kosten 2,10 → 0.06 \$/W

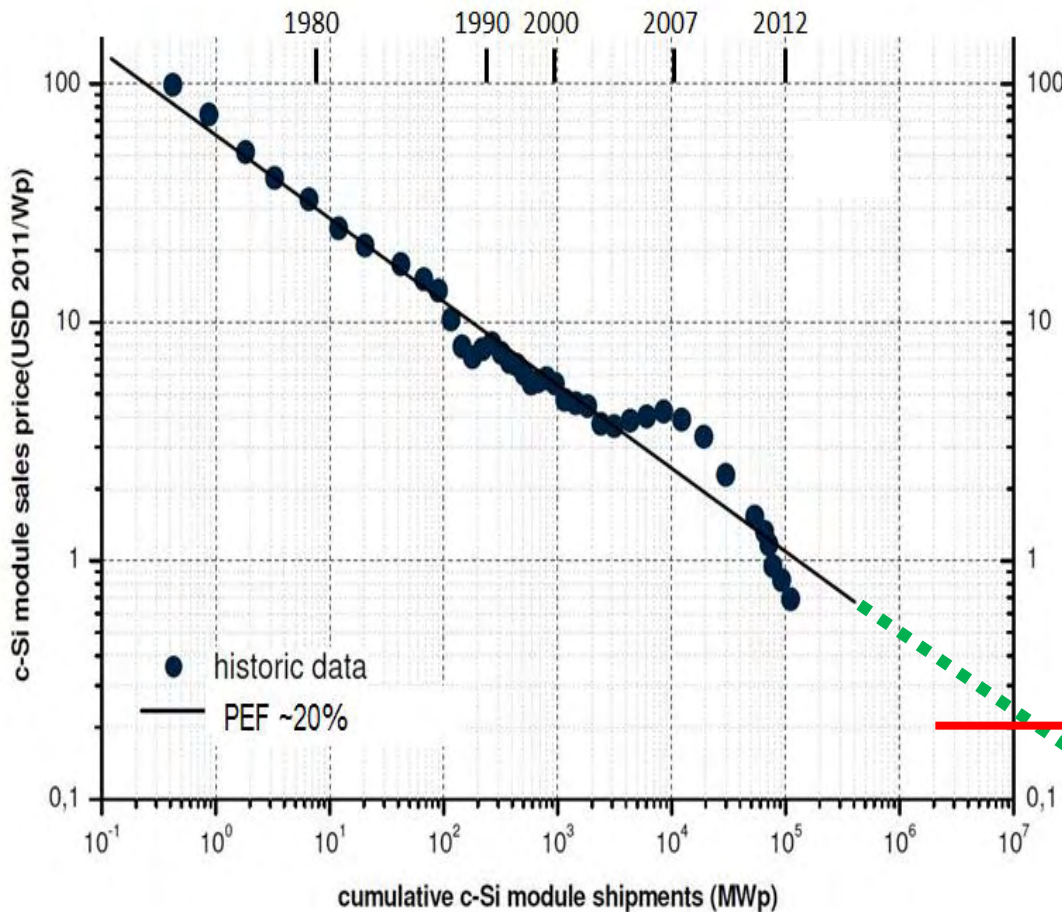
Reduction Factor 35!

Economy of scale & industrielle Fertigung

- Produktionslinie 1 MW → 200 MW
- Automation & hohe Ausbeute
- Produktionsprozesse mit niedrigen spezifischen Kosten

Source: ITRPV 2013

Photovoltaik: Preis-Erfahrungskurve

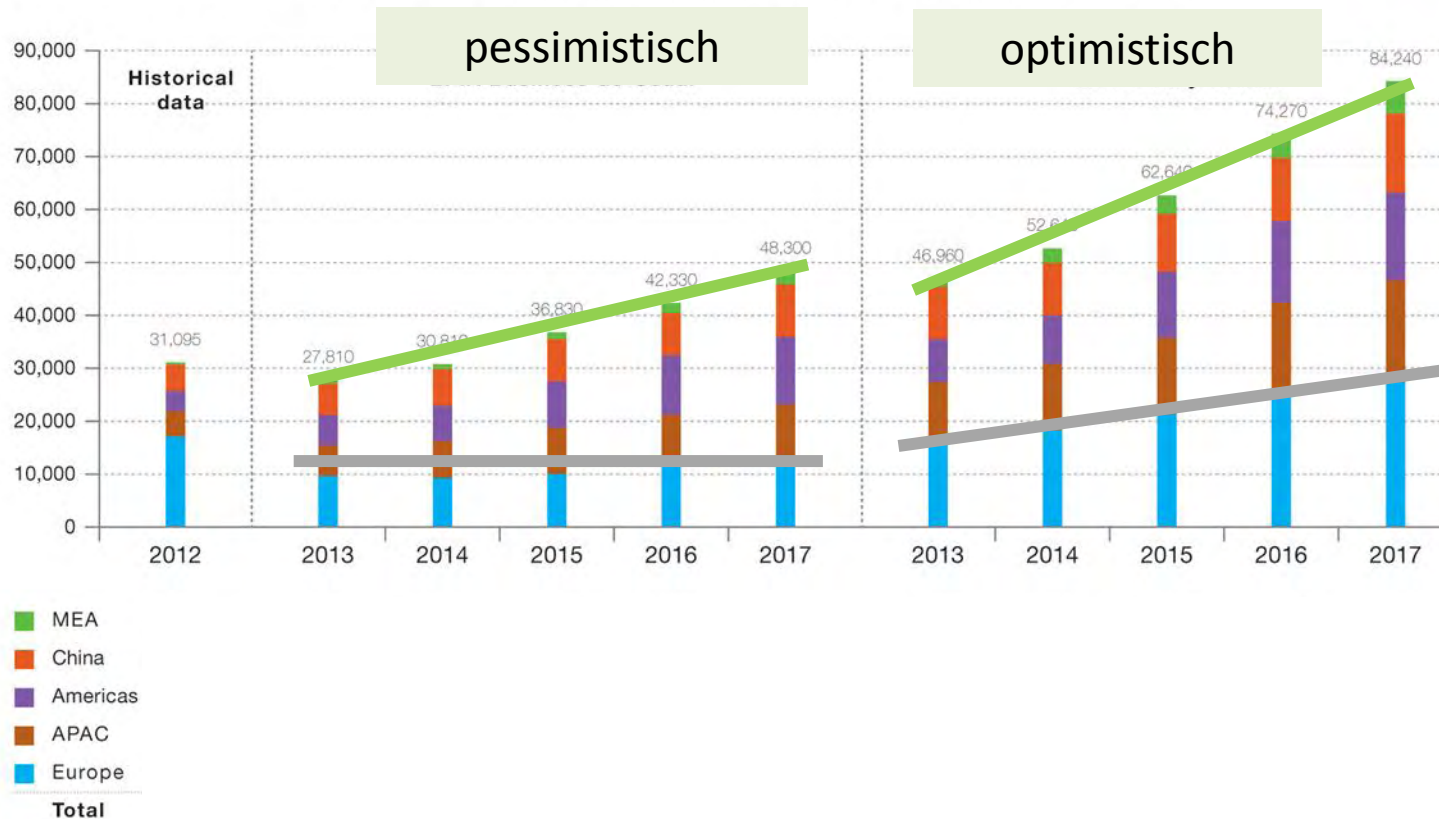


Source: ITRPV 2013

„Grenzkosten c-Si Module“

- **Wafer**
200x200mm², 80/70µm,
12\$/kg, eta 25% \$ct/W 2
andere Mat. \$ct/W 2
- **Zelle** \$ct/W 2
- **Modul**
Do-Glas a 1,4 mm \$ct/W 4
Verschalt&Verkaps \$ct/W 3
Kabel, b-rail etc \$ct/W 3
- **OPEX (~80%)** \$ct/W 16
- **Rest (~20%)** \$ct/W 4
- **Gesamt** \$ct/W 20

Globale 5-Jahres Vorschau: Regionale Jahresinstallationen (2013)



Source: EPIA, "Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017", 2013

Wesentliche Treiber für künftiges Wachstum: nicht mehr länger Europa, aber ...



- China (Regierungsziele: 35GW in 2015, 50-75 in 2020)
- US (Renewable Portfolio Standards)
- Indien (PV-Diesel Hybrid Systeme - ~10 GW Diesel Gensets jedes Jahr)
- Japan
- Süd- Afrika
- Süd- Amerika
- Mittlerer Osten (PV Strom kostengünstiger als Verbrennen von Öl zu 4,5\$/barrel anstatt Verkauf zu 100\$)
- Australien (dezentrale Systeme)
- ... Kampf der Armut mit pico-, SHS- und Dorfstromversorgung...

Source: EPIA, own estimates

2020s

- ~120 GW (14% pa)
- Dekade der Transformation von nuklear & fossil → RE
- PV & Speicherung voll wettbewerbsfähig

2030s

- ~450 GW (8% pa)
- Viele Kommunen demonstrieren 100% Autarkie
- Energieeffizienz & EE werden zum globalen Standard

2040s

- 990 GW (4% pa)
- Mehr und mehr Länder demonstrieren Überlegenheit der EE
- Portfolio der EE & Speicherung von kWh bis TWh

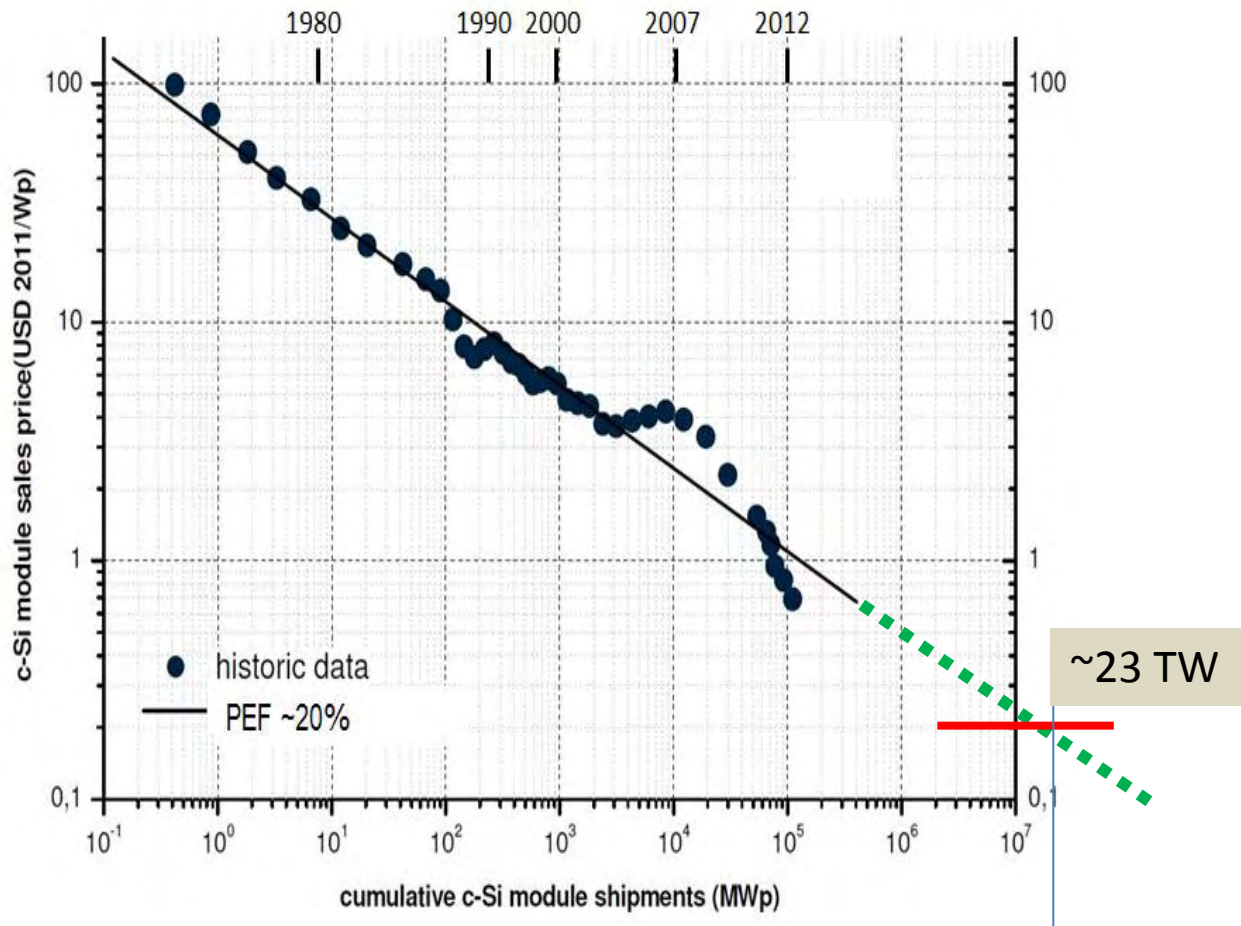
... wie realistisch ist ein 20%-Anteil von PV für den künftigen SE-Bedarf mit 100% EE?



	V 1	
<u>Decade</u>	% <u>growth</u>	
1990 - 2000	20	
2000 - 2010	50	
2010 - 2020	20	
2020 - 2030	14	
2030 - 2040	8	
2040 - 2050	4	
<u>cumulative PV power in 2050 [TW]</u>	23	
<u>Annually produced energy [PWh] in 2050 at 1.3 kWh/W (average)</u>	30	

Source: Winfried Hoffmann, own data

Photovoltaik: Preis-Erfahrungskurve



Source: ITRPV 2013

Potentielle Preisentwicklung für kleine c-Si PV Systeme („faire Preise“)



Jahr	Modul-effizienz	Preisreduktion mit PEF		Preisreduktion mit Effizienz-faktor	Summe
		Module [\$ /W]	Inverter [\$ /W]		
	[%]			BoS & Installation [\$ /W]	[\$ /W]
2010	15	1.5	0.2	0.8	2.5
2020	20	0.6	0.1	0.6	1.3
2030	25	0.35	0.05	0.5	0.9

Source: Own data

Potentielle Entwicklung des globalen PV Industrie-Umsatzes



Jahr	Markt [GW/Jahr]	Module [Mrd \$]	Inverter [Mrd \$]	BoS&Inst [Mrd \$]	Total [Mrd \$]
2020	120	72	12	72	156
2030	450	161	23	230	410

2040 beträgt der Umsatz mit dem angenommenen Wachstum ~800 Mrd \$ und in 2050 ~1,100 Mrd \$, vergleichbar zur Automobilindustrie (der in Deutschland 2011 ~450 Mrd \$ war, weltweit ~3-4 mal so groß)

Source: Own data

2050s

- ~1,500 GW (kein weiteres Wachstum) mehr
- PV ist kostengünstigste Technologie zur Stromerzeugung
- Globale Entwicklung zu 100% EE

...einige Höhepunkte:

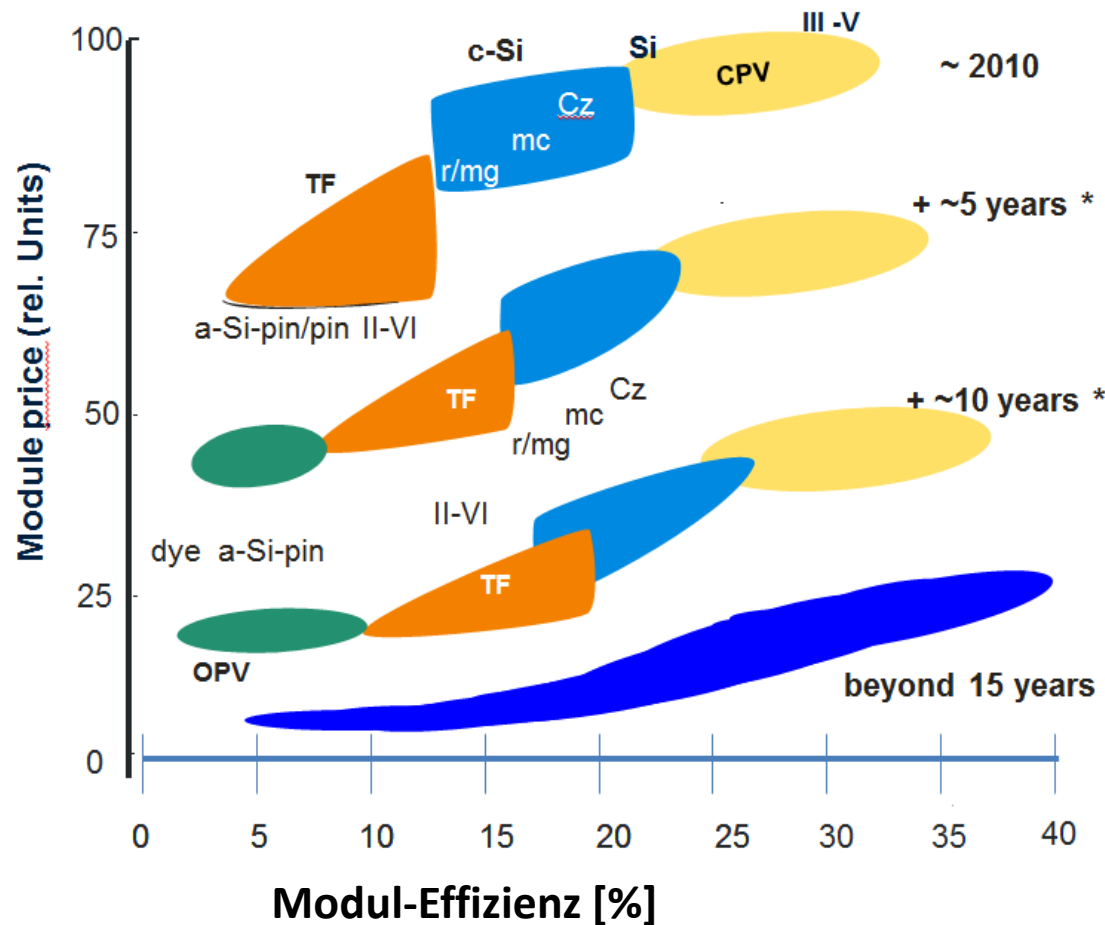
- Die kumulative PV-Installation in 2050 ist ~23 TW, die ~30 PWh Strom produziert
- Globaler Umsatz ist > 1 trillion (10^{12})€, vergleichbar zur heutigen globalen Automobilindustrie

Entwicklung der verschiedenen PV Technologien



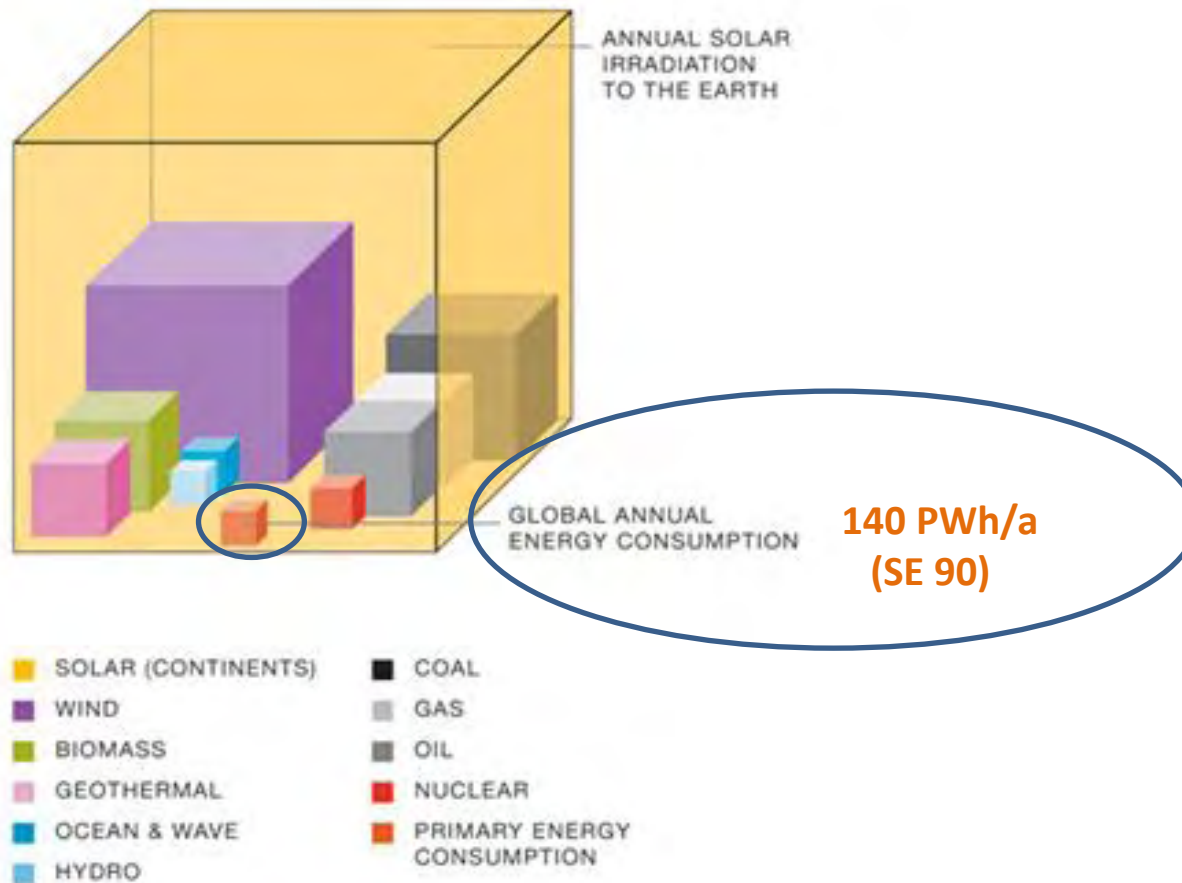
- r ribbon
- mg metallurgical grade Silicon
- mc multicrystalline
- Cz Czochralski
- CPV concentrated PV
- OPV organic PV
- TF Thin-Film

@ - 7 % price decrease per year



Source: Own considerations (04-2014)

Potential Erneuerbarer Energien pro Jahr und Vergleich mit Erschöpflichen Energien & heutigem jährlichen PE-Verbrauch



Source: EPIA, DLR (cube data), WBGU (technical and sustainable potentials), own data (future SE)

Potential Erneuerbarer Energien pro Jahr und Vergleich mit Erschöpflichen & heutigem jährlichen PE-Verbrauch

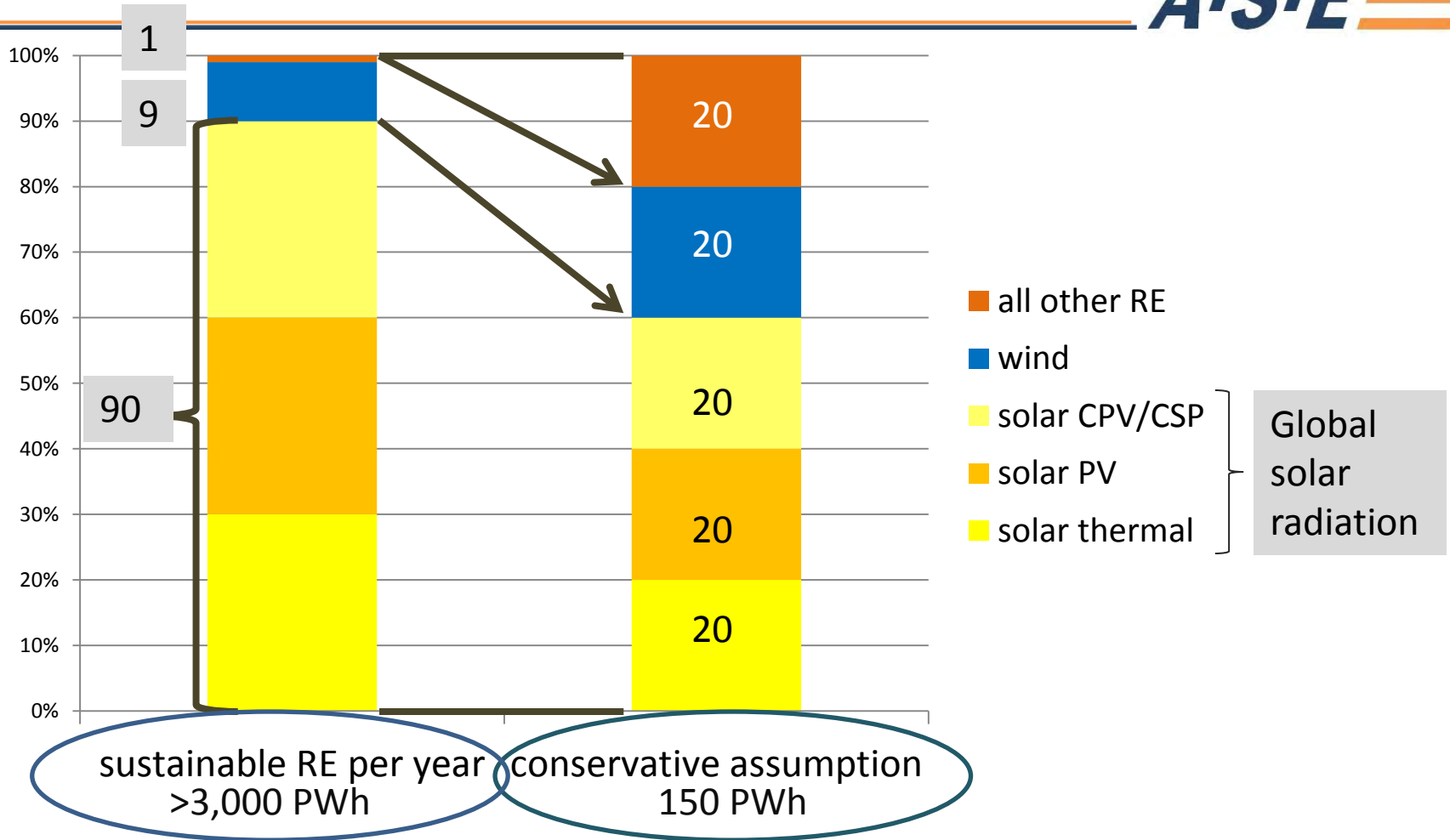


	Technisches Potential [PWh/year]		Nachhaltiges Potential [PWh/year]	
Biomasse	224	} ~0,6%	28.0	} ~1%
Geother	202		6.2	
Hydro	45		3.4	
Solar	78,400	~98,8%	2,800.0	~90%
Wind	476	~0,6%	280 .0	~9%
total	79,347	~100%	3,117.6	~100%

**Nachhaltiges Potential
= ~ 20 x SE of future
(~ = 150 PWh)**

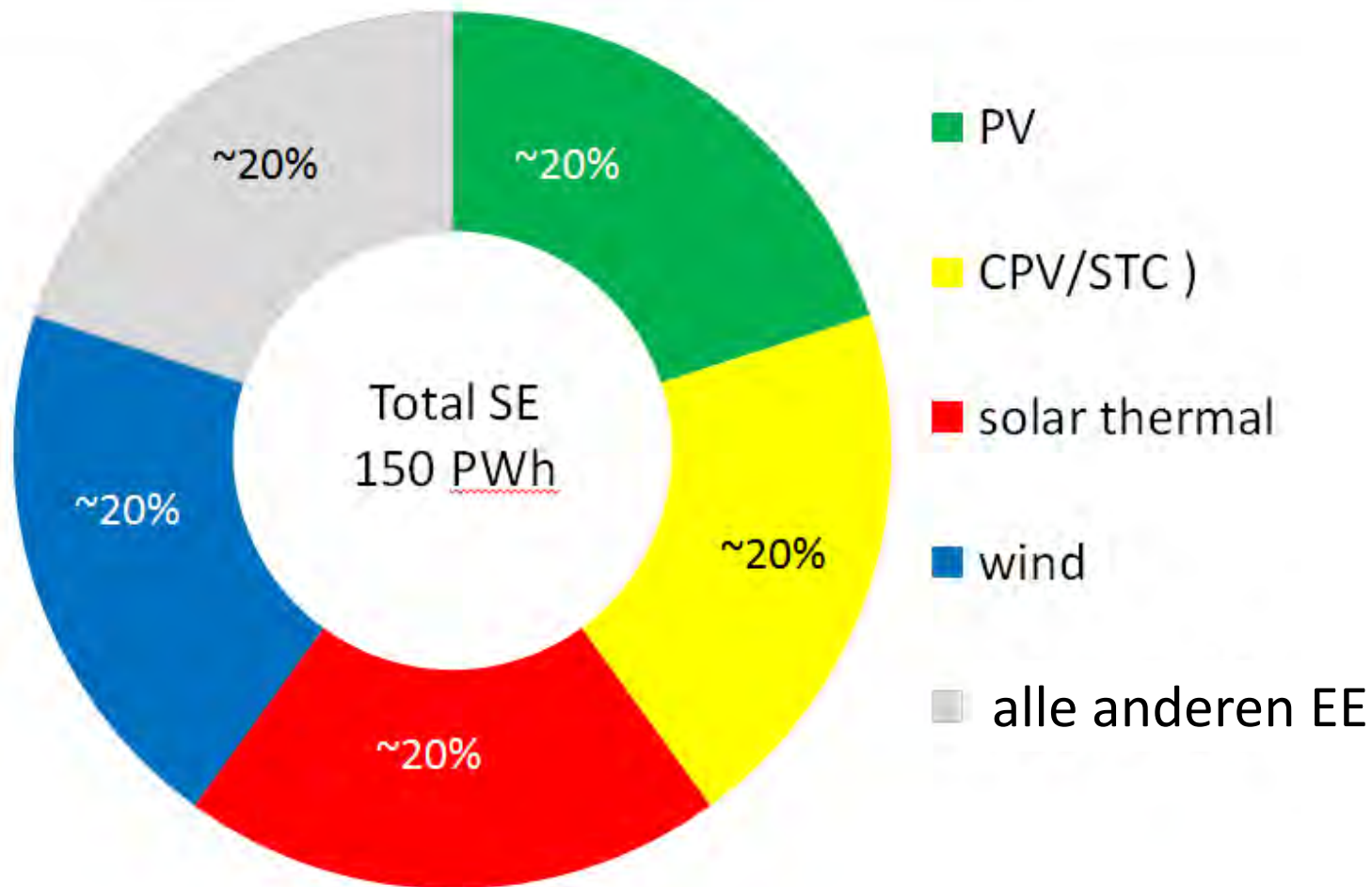
Source: EPIA, DLR (cube data), WBGU (technical and sustainable potentials), own data (future SE)

Jährliches nachhaltiges Potential für EE und konservative Annahmen



Source: WBGU, 2011 (left column); Winfried Hoffmann, own estimates (right column)

Sekundär- Energie in 2050+ in vereinfachter Darstellung



Technologie	Sekundär - Energie
Photovoltaik (hauptsächlich dezentral, teilweise zentral)	Strom
CPV/CSP (zentral)	Strom (Prozesswärme)
Solarthermie (niedrige bis mittlere Temperatur)	(Prozess)Wärme
Wind (on- und off-shore)	Strom
Alle anderen (Hydro, Geothermie, Biomasse, Wellen- und Gezeitenenergie)	Strom (Prozesswärme)

Source: Eigene Recherchen

Benötigte Wachstumsraten (CAGR) für die wichtigsten EE



	~ 2010 +/-	
	GW	TWh
Photovoltaics	~100	~120
CPV/CSP	~ 1	~ 2
Solar thermal	~190	~130
Wind	~280	~600
Bioenergy	-	~14,000
Hydro	~850	~3,500
Geothermal, wave&tidal, etc	-	~ 5
Total	1,421	18,357

Source: Eigene Berechnungen

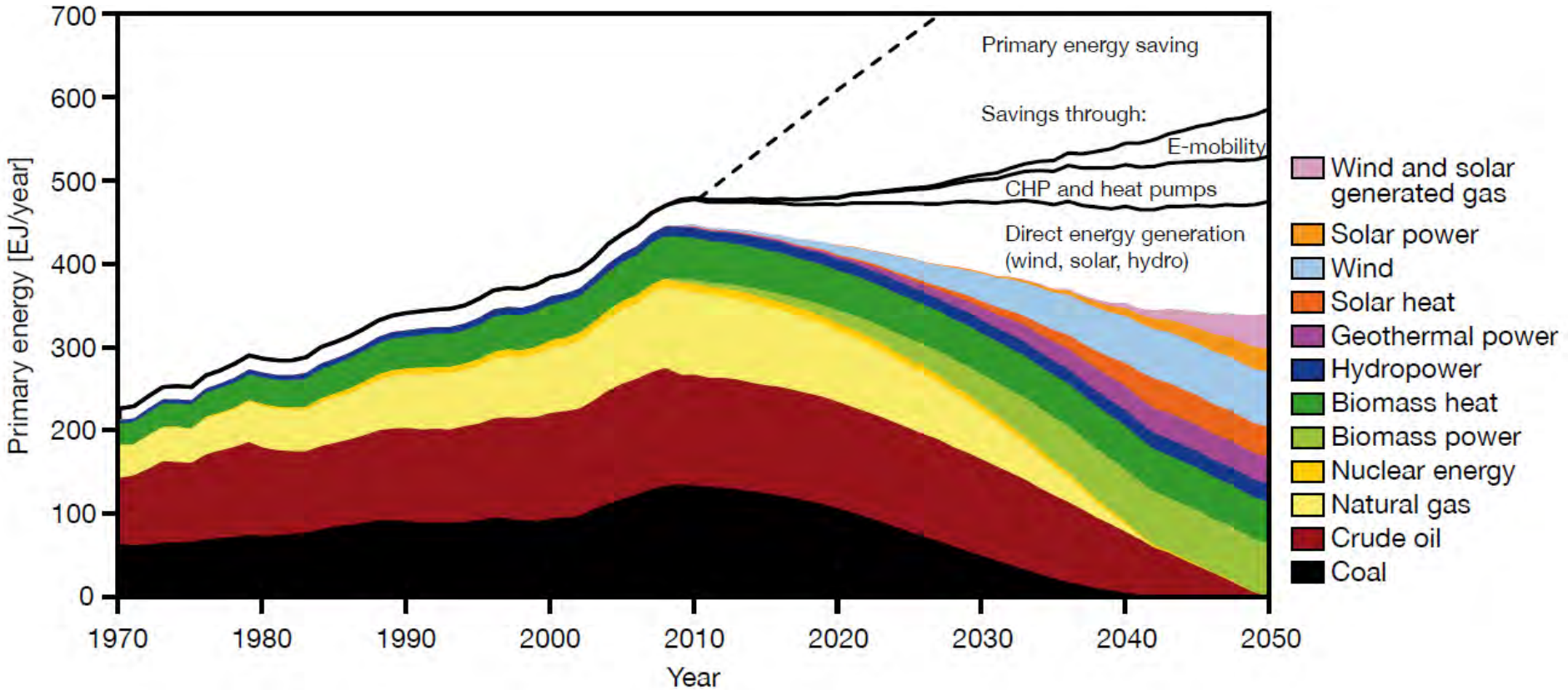
Jährlich benötigte Wachstumsraten (CAGR) für die wichtigsten EE



	~ 2010 +/-		~ 2050 +				
	GW	TWh	TWh	TWh	GW	CAGR [%] p.a.	
Photovoltaics	~100	~120		~30,000	~23,000	+ 14.8	
CPV/CSP	~ 1	~ 2		~30,000	~17,000	+ 27.2	
Solar thermal	~190	~130		~30,000	~44,000	+ 14.5	
Wind	~280	~600		~30,000	~10,000	+ 10.3	
Bioenergy	-	~14,000	↓ ~10,000	} ~30,000		substitute	
Hydro	~850	~3,500	↑ ~8,000			-	+ 2.1
Geothermal, wave&tidal, etc	-	~ 5	↑ ~12,000				+ 21.5
Total	1,421	18,357		150,000		+ 5.4	

Source: Eigene Berechnungen

Eines der WBGU Modelle für ein globales „2°C - Szenario“

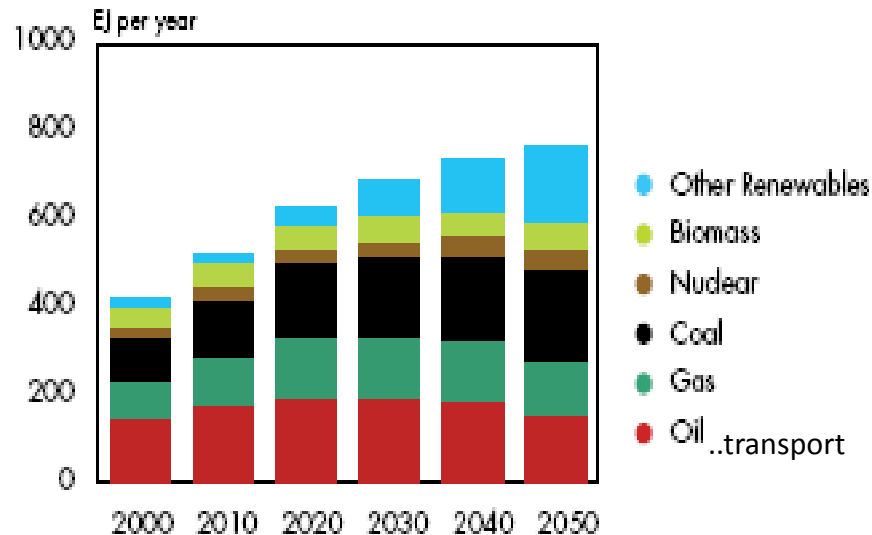


Source: WBGU (Scientific Board for Global Environmental Changes to the German parliament) 2011 Flagship report

Projektion für PE und Stromverbrauch bis 2050 a la Shell

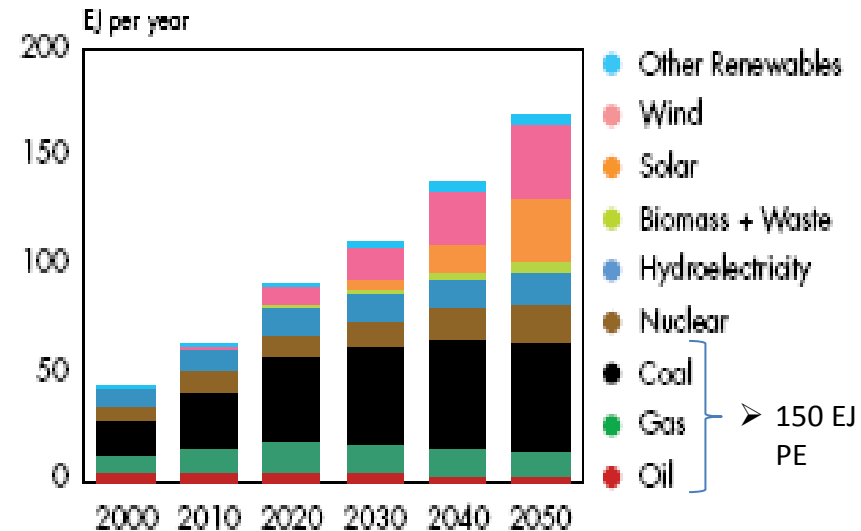


Primärenergie



400 EJ ≈ 140 PWh

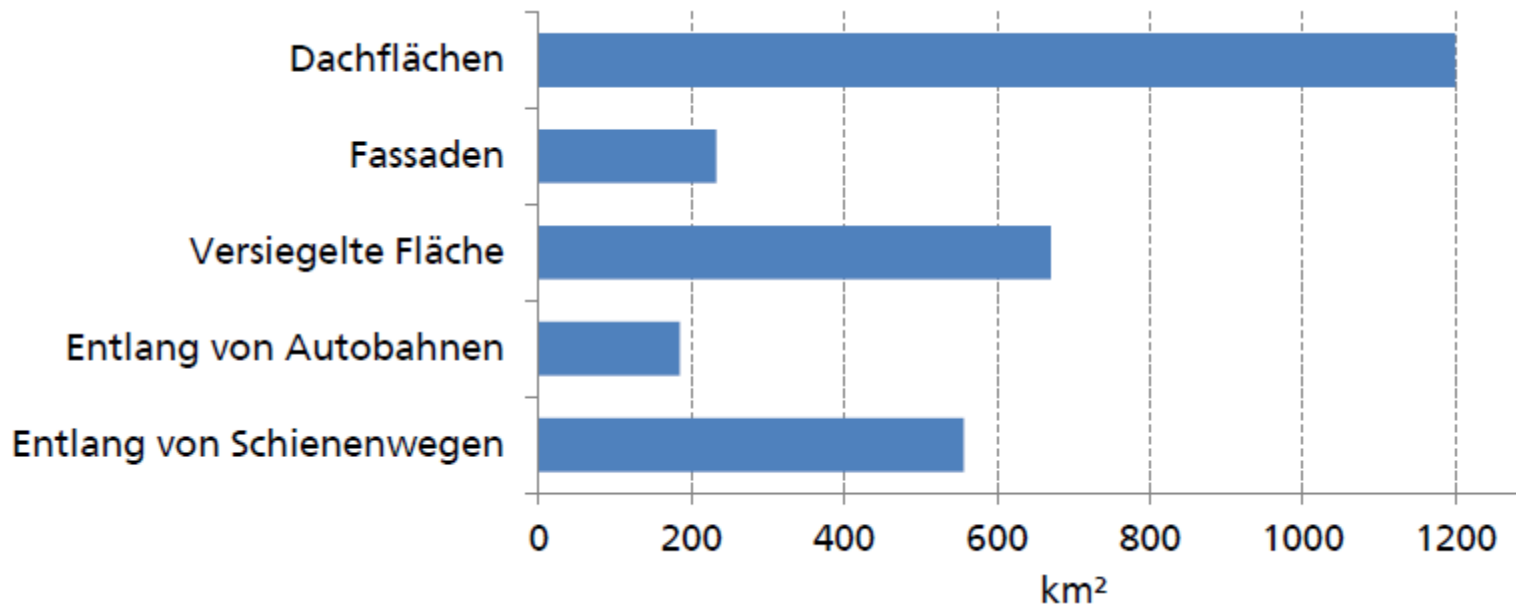
Stromverbrauch



PE (strom) ~ 250 EJ
~1/3 PE (total)

Source: Shell

Flächenpotential für PV Anlagen in Deutschland

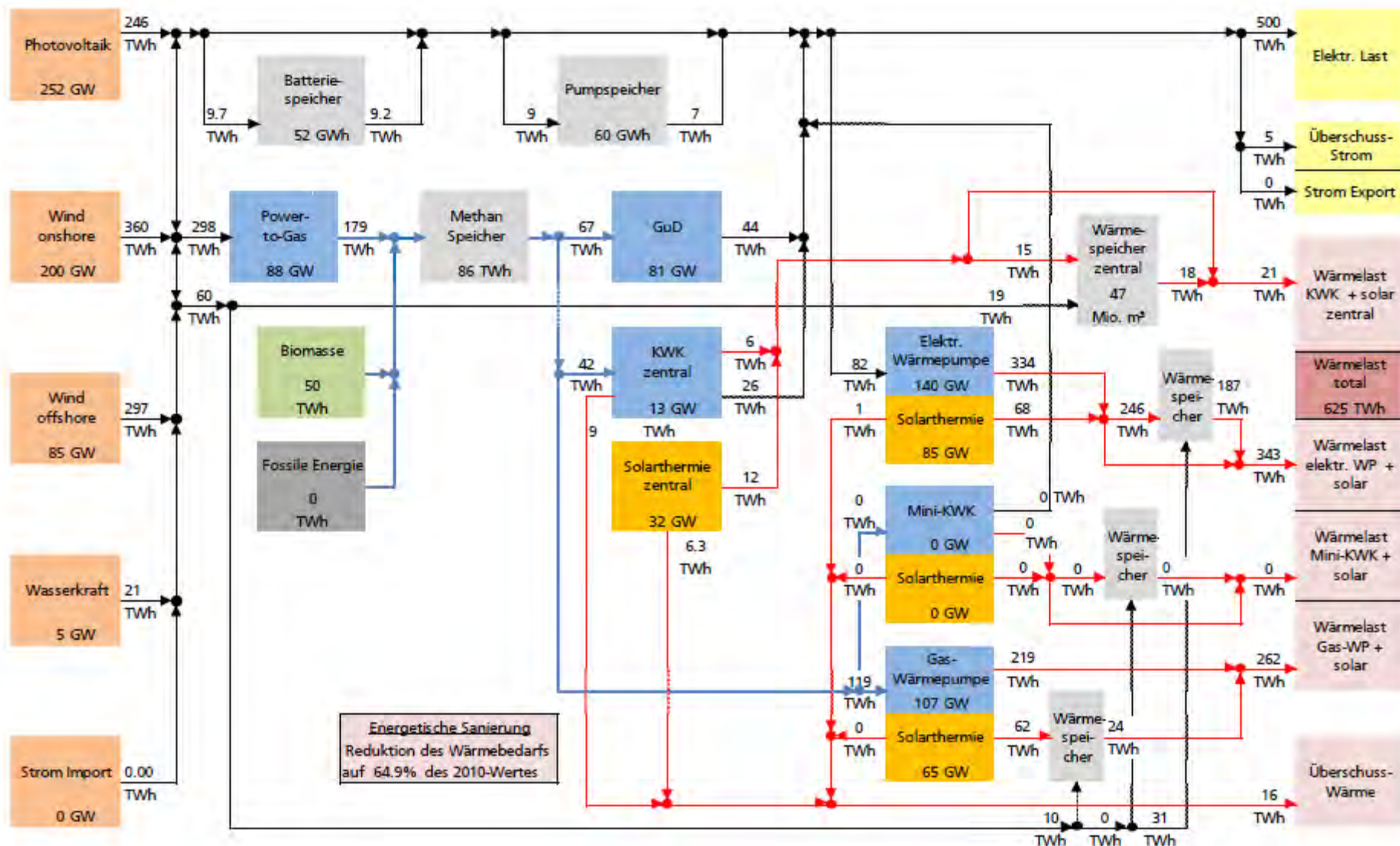


Insgesamt ergeben sich 2845 km², damit können ca. 400 GW PV Anlagen installiert werden (damit lassen sich ~400 TWh Strom pro Jahr erzeugen; Verluste durch Speicherung verringern die nutzbare Strommenge)

Source: FhG-IWES und -ISE

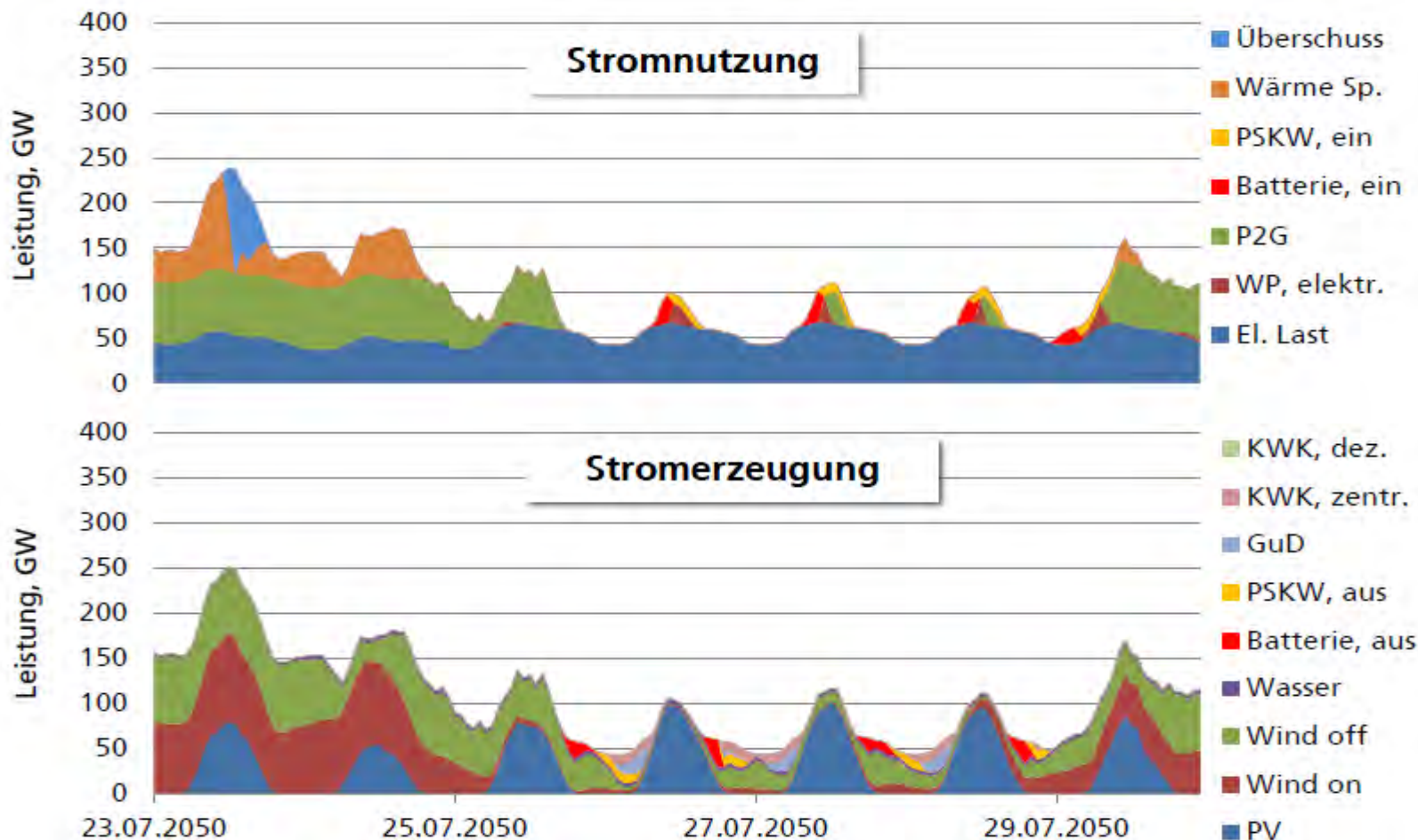
Eine von vielen Varianten für 100% Strom- und Wärmeversorgung in D

(Henning & Palzer, FhG-ISE, 2013)



Stromnutzung und -erzeugung in einer Sommerwoche (2050)

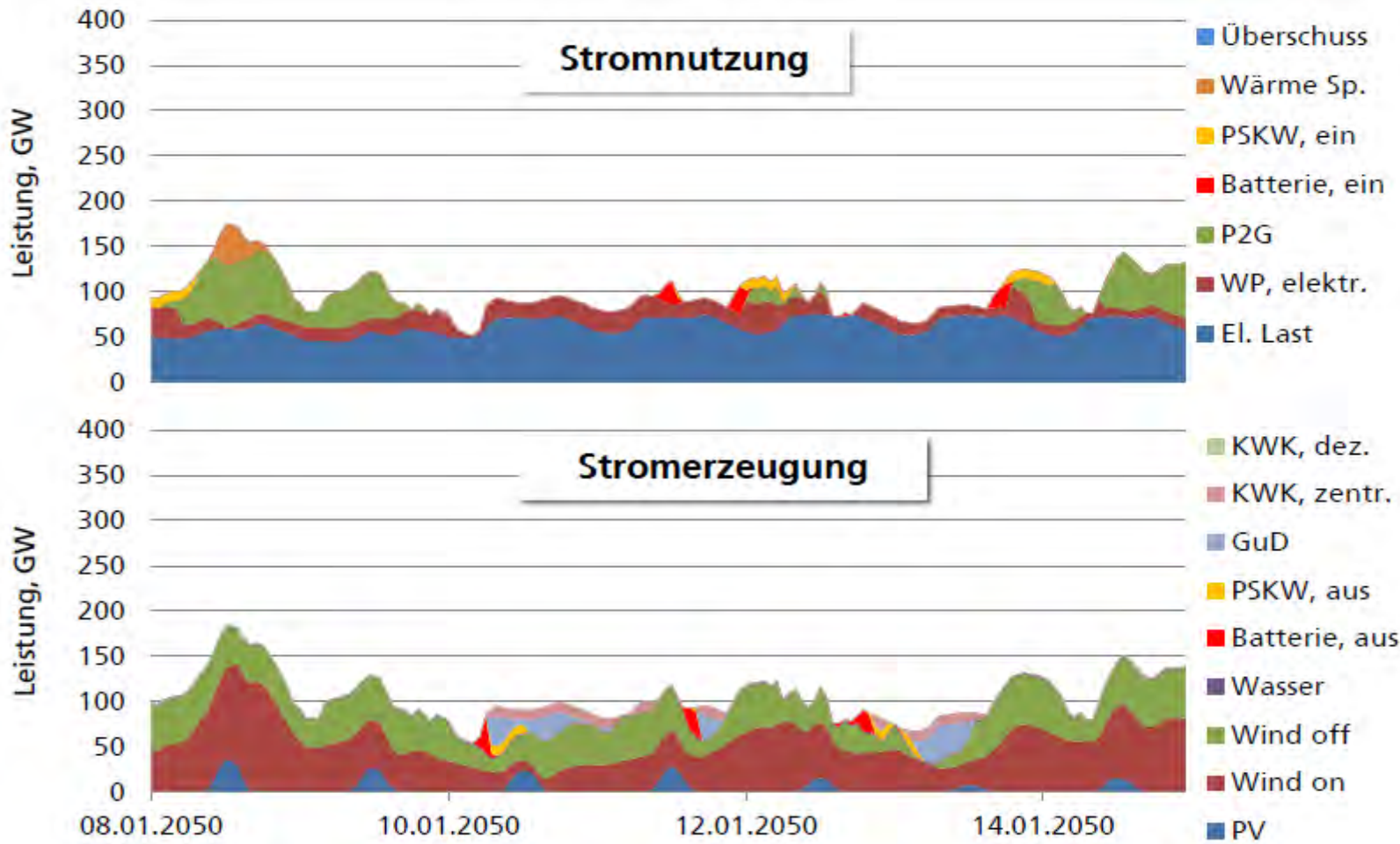
(Henning & Palzer, FhG-ISE, 2013)



(PSKW=Pumpspeicherkraftwerk; P2G=Power-to-Gas; WP=Wärmepumpe; KWK=Kraft-Wärme-

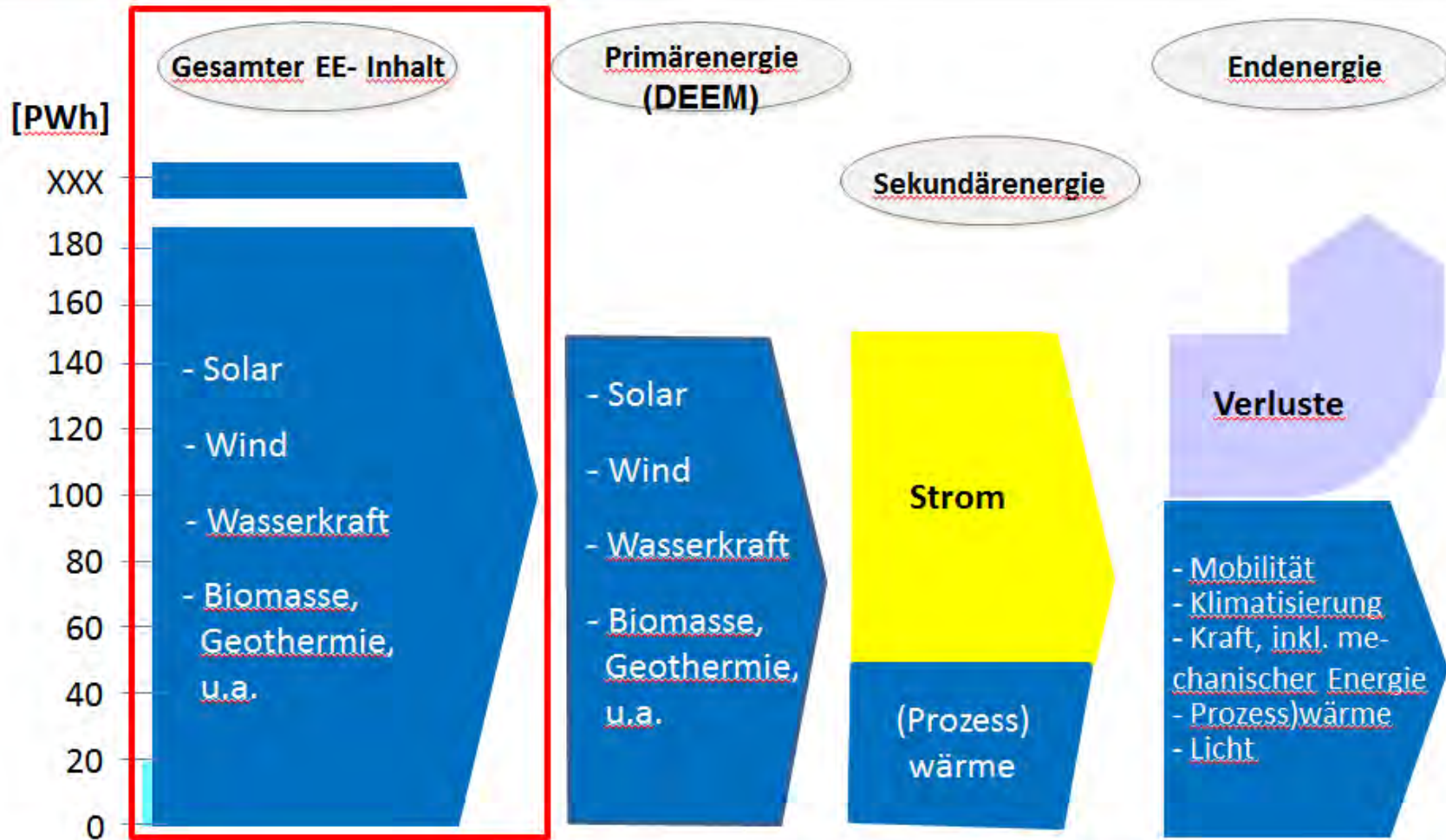
Stromnutzung und -erzeugung in einer Winterwoche (2050)

(Henning & Palzer, FhG-ISE, 2013)



(PSKW=Pumpspeicherkraftwerk; P2G=Power-to-Gas; WP=Wärmepumpe; KWK=Kraft-Wärme-

Zukünftige 100% EE-Versorgung (2050+); PE:SE:EndE = 1,5 : 1,5 : 1



Das 100% EE Puzzle



Realistische und industriell gezeigte Wachstumsraten für EE	Schneller Übergang zu EE kostet deutlich weniger als BAU	Preis Erfahrungskurven für EE ähnlich wie für Halbleiter & FPD
Portfolio aller EE inklusive Speicherung löst die Variabilität	100% EE für alle benötigten SE weltweit in 2050+	Energie Effizienz: mit EE bessere Lebensqualität bei deutlich weniger SE
Umsatz weltweit für die PV alleine vergleichbar zur Automobilindustrie	Fossile Energien haben Probleme mit CCS: keine Zukunft oder zu teuer	Nuklearenergie keine Zukunft wegen Kosten, Sicherheit und Abfall



Applied Solar Expertise

... und für alle, die mehr lesen wollen:

- Physik Journal, February 2014, W. Hoffmann „Perspektiven der Photovoltaik“
- Book by Wiley to be published spring 2014, W. Hoffmann „The Economic Competitiveness of Renewable Energy – Pathways to 100% Global Coverage“
(ISBN: 978-1-118-23790-8)

... noch mehr Lesenswertes ...



J. Randers, *2052. A Global Forecast for the Next Forty Years*, Chelsea Green Publishing, White River Junction/Vermont, USA, ISBN 978-3-86581-398-5 (2012)

E.U. von Weizsäcker, A.B. Lovins and L.H. Lovins, *Factor Four: Doubling Wealth – Halving Resource Use: The New Report to the Club of Rome*, Earthscan, London (1998)

E.U. von Weizsäcker, K. Hargroves and M. Smith (2009), *Factor Five. Transforming the Global Economy through 80% Improvements in Resource Productivity*, Earthscan, London

S. Rahmstorf and H.J. Schellnhuber, *Der Klimawandel*, C.H.Beck, ISBN 978-3-406-63385-0 (2012)

Advisory Board to the German Government on Global Change (WBGU), Flagship Report 2011, *World in Transition: A social Contract for Sustainability*, ISBN 978-3-936 191-37-0 (2011)

D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers and W.W. Behrens III , *The Limits to Growth*, ISBN 0-87663-165-0 (1972)



Angewandte Solar-Expertise

Applied Solar Expertise

.... Ein altes chinesisches Sprichwort sagt:

*„wenn der Wind des Wandels weht,
Bauen die Einen Schutzmauern,
Die Anderen Windmühlen“*