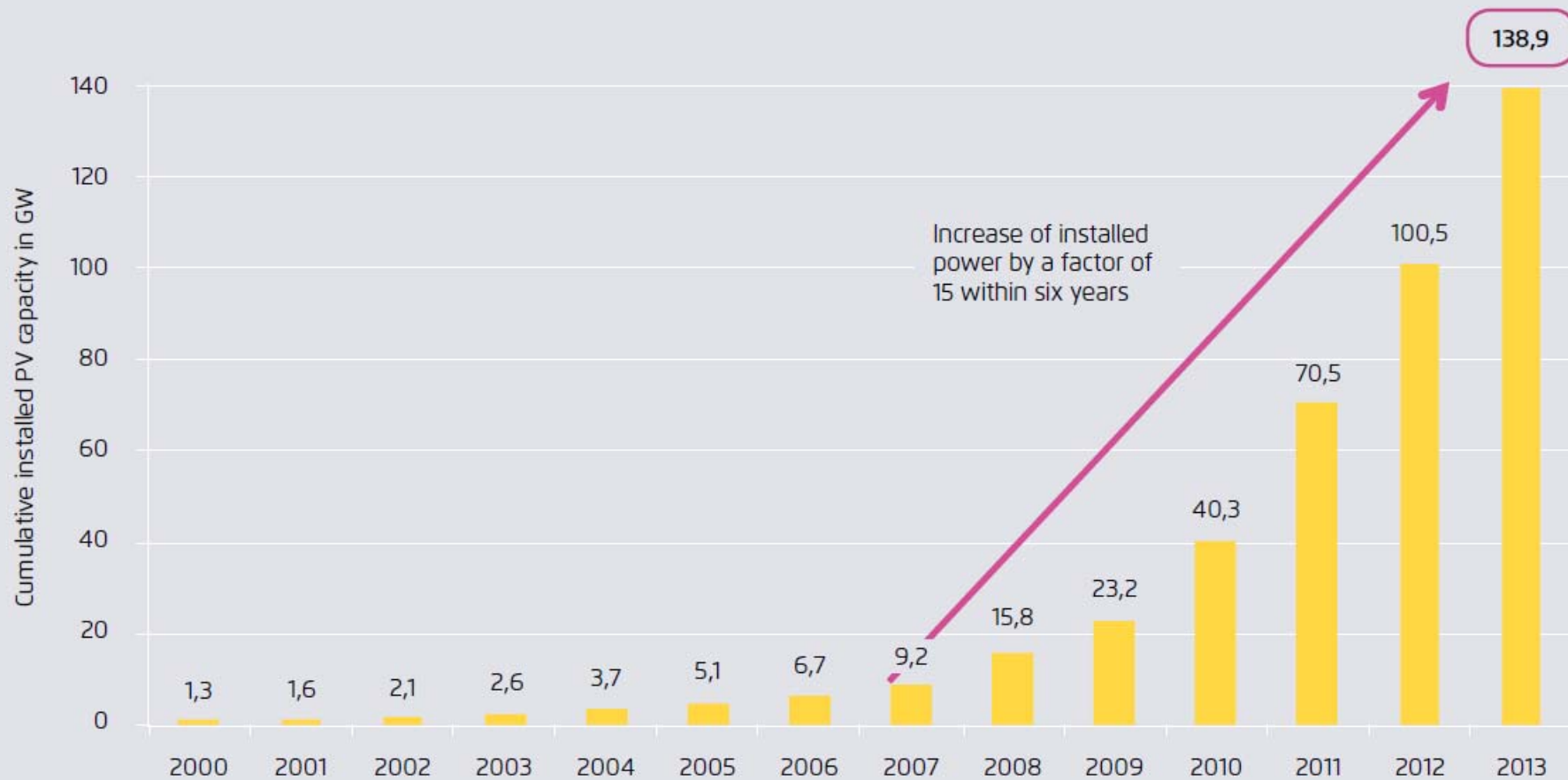


Photovoltaik - Produktionstechnik und Technologie im Wandel der Zeit

Energie- und Umweltapéro 3.3.2015

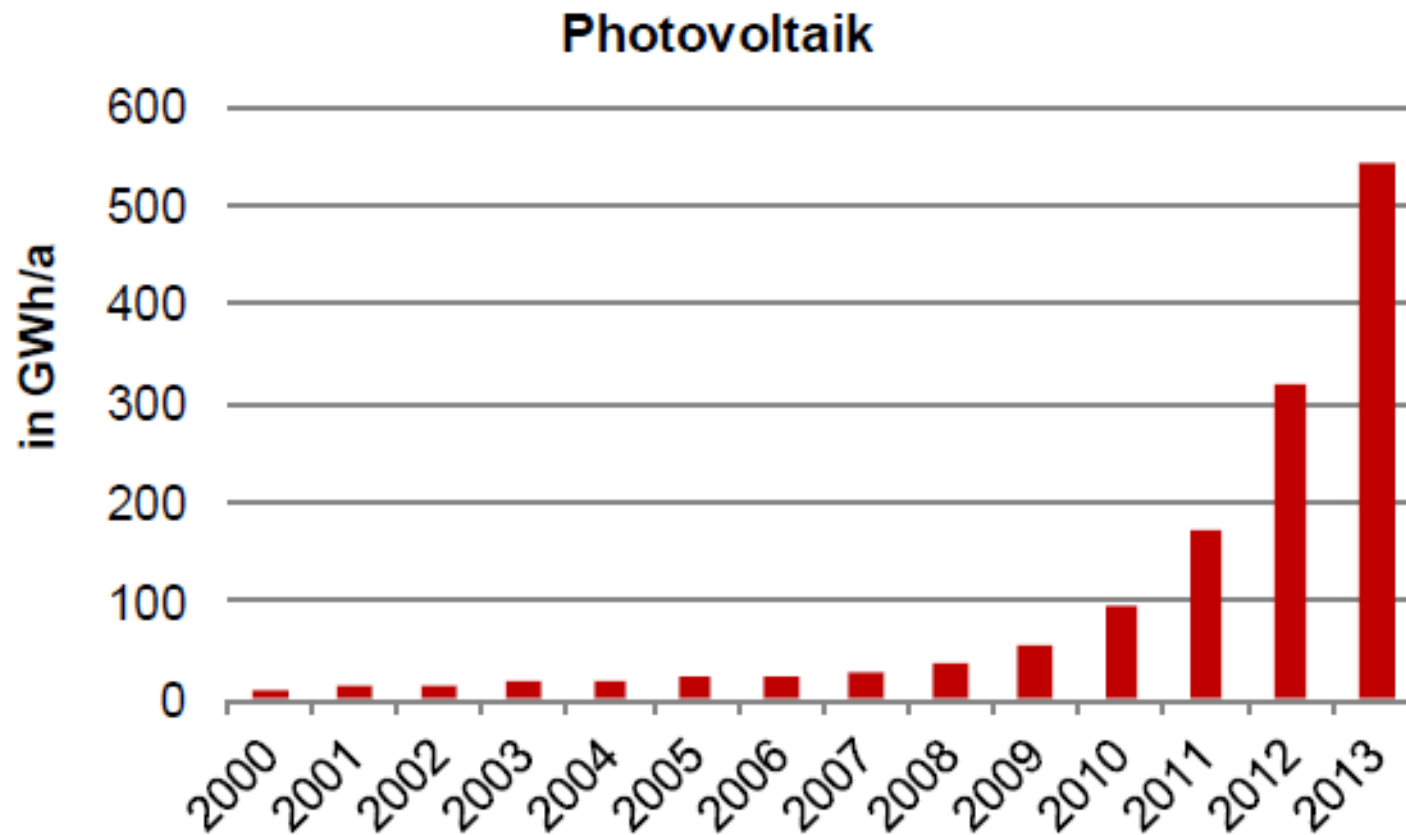
Dr. Hartmut Nussbaumer

Marktentwicklung der Photovoltaik



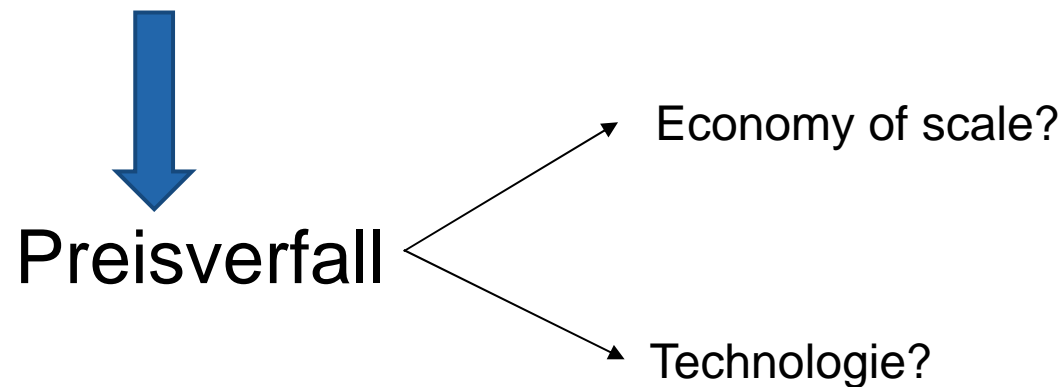
Quelle: Fraunhofer ISE, Agora Studie 2015

Marktentwicklung Photovoltaik in CH



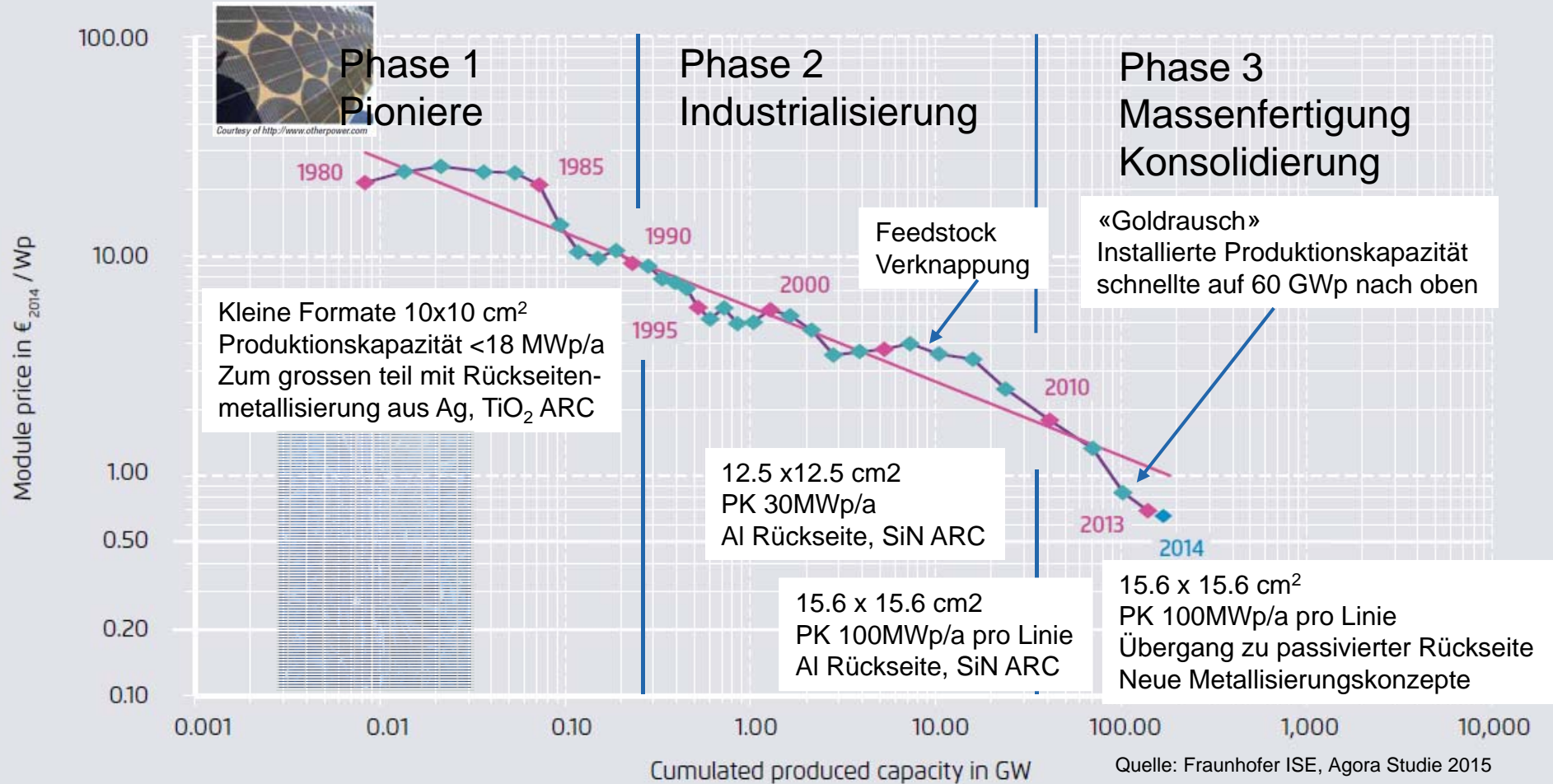
Quelle: Gesamtenergiestatistik 2013, BFE

Wie kam es zu diesem rasanten Wachstum?
Staatliche Marktanzreizprogramme



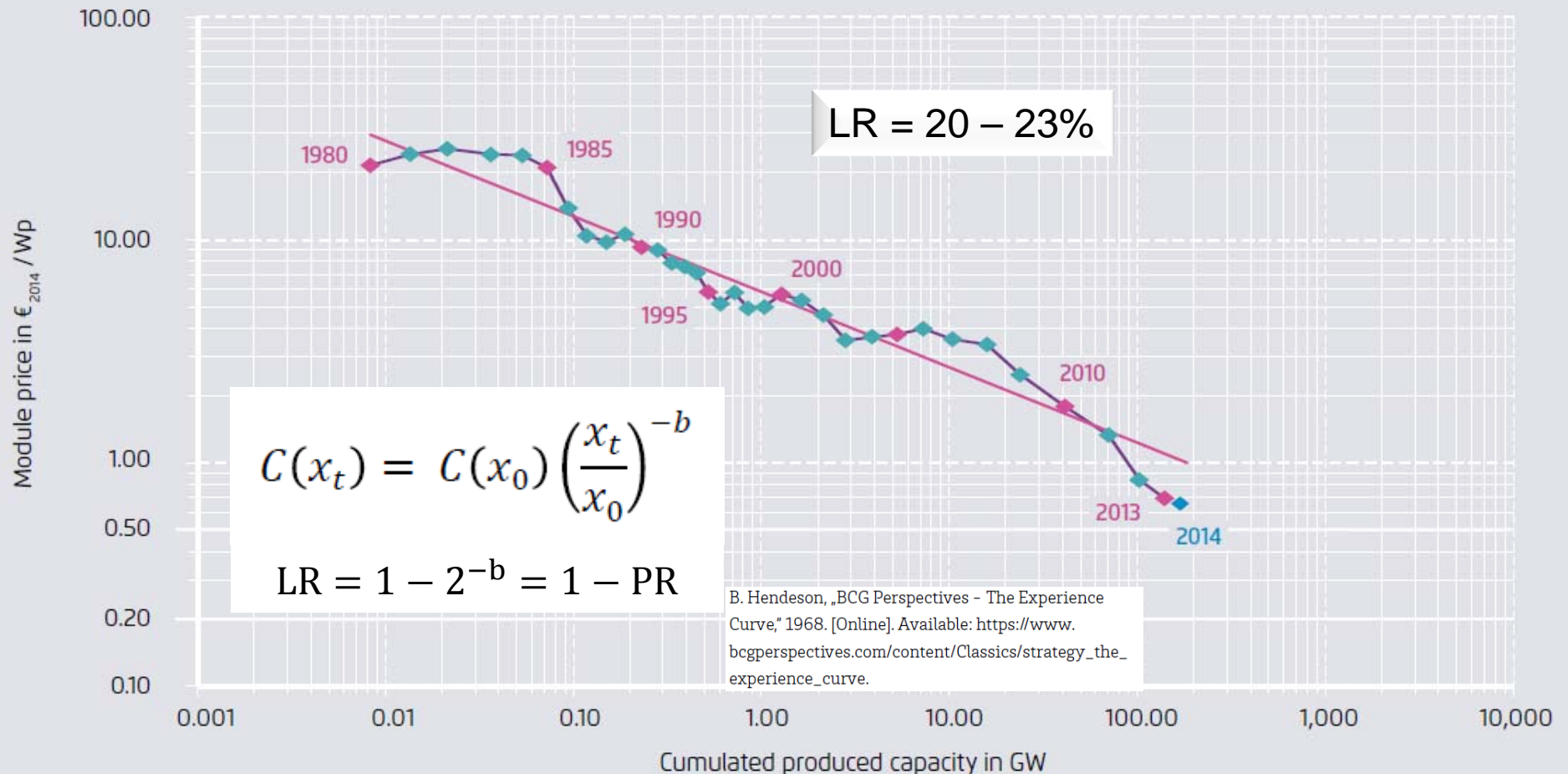
Wie sieht die zukünftige Entwicklung der Photovoltaik aus?

Kostenentwicklung Modulpreise C-Si



← PV Systempreis dominiert durch die PV Modulkosten →

Kostenentwicklung Modulpreise C-Si

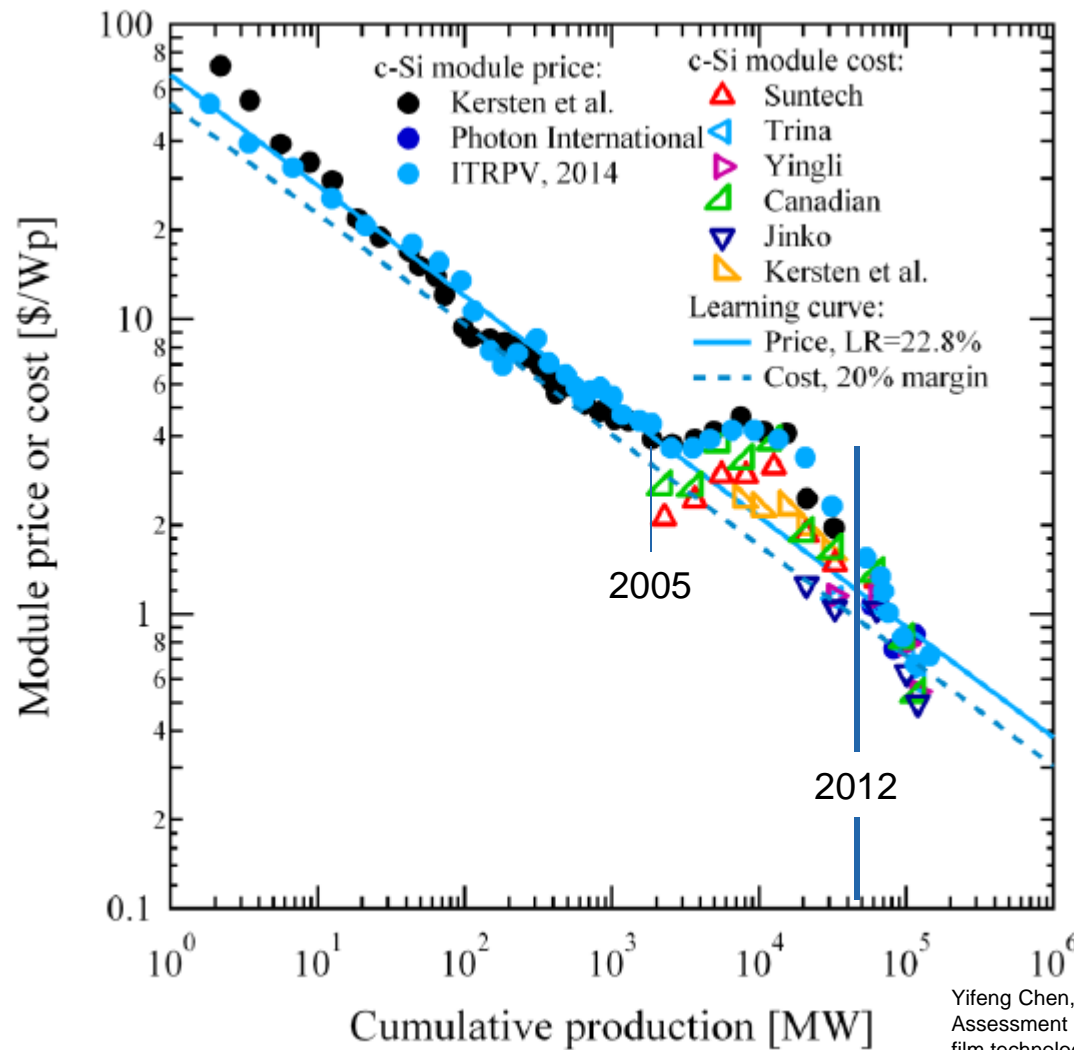


x = Produktionsmenge

C = Kosten, PR = Progress Rate, LR = Learning Rate

Quelle: Fraunhofer ISE, Agora Studie 2015

Kostenentwicklung Modulpreise C-Si

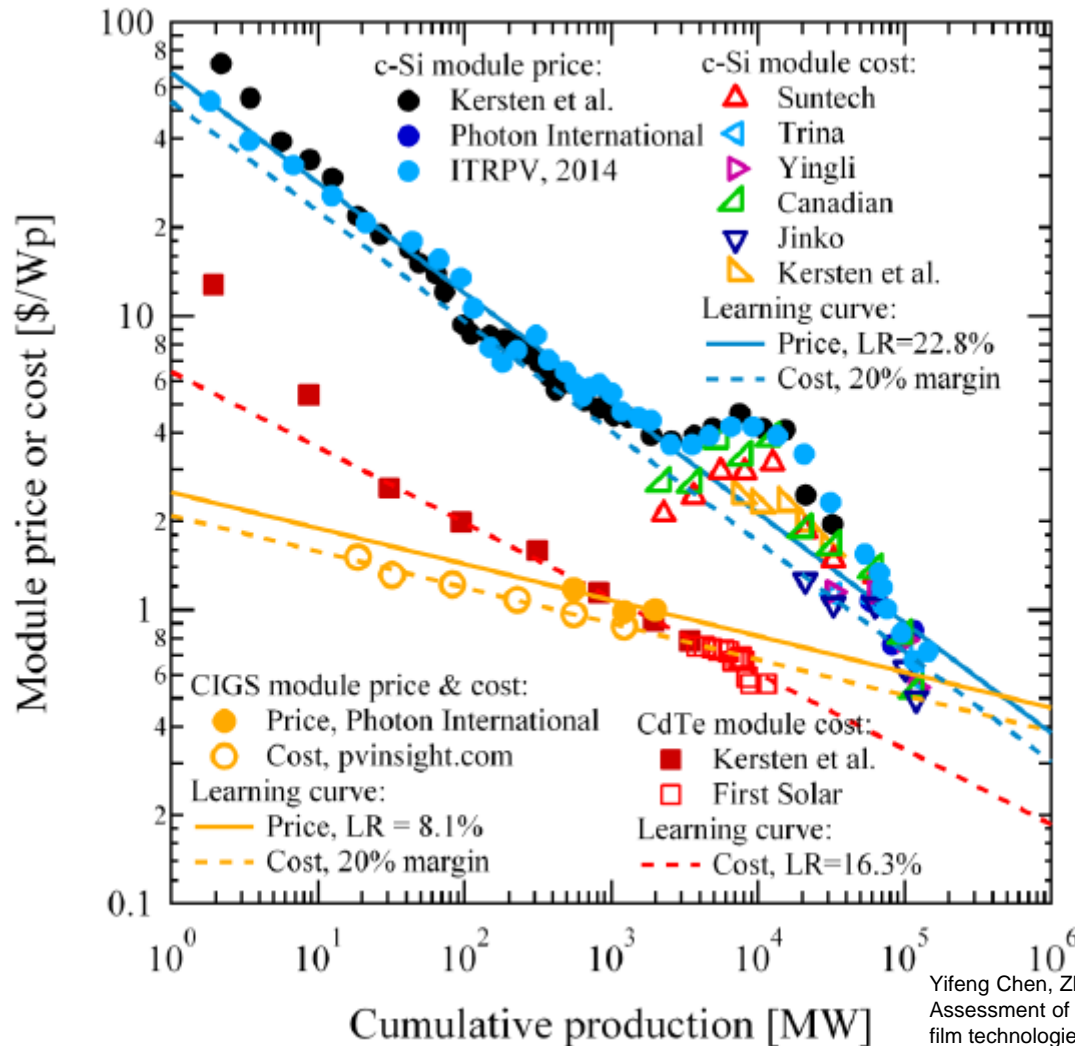


Verschiedene Tier 1 Hersteller
zeigen alle gleiche Preisverläufe

Ab 2012 verkaufen die Produzenten
unter Herstellungskosten
=> Konsolidierung des Marktes

Yifeng Chen, Zhen Zhang, Zhiqiang Feng and Pierre J. Verlinden
Assessment of module efficiency and manufacturing cost for industrial crystalline silicon and thin
film technologies State Key Laboratory of PV Science and Technology, Trina Solar, China
Contact: Yifeng Chen, yifeng.chen01@trinasolar.com
Nov 26th, 2014

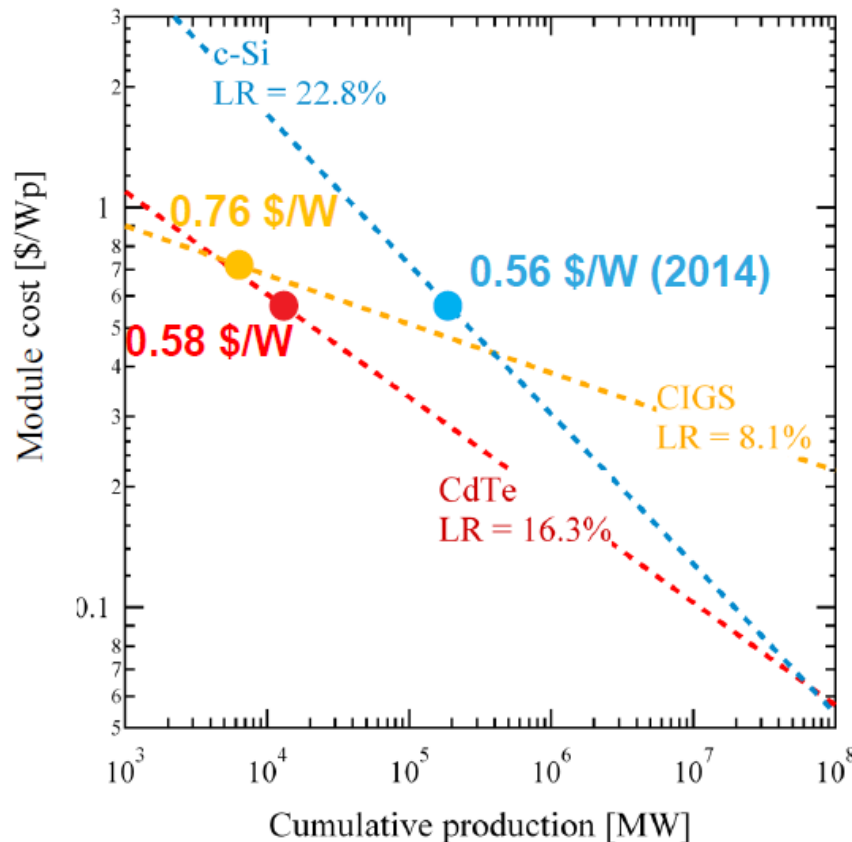
Kostenentwicklung C-Si im Vergleich zu CdTe und CIGS



LR von C-Si 22.8%
LR von Cd Te 16.8%
LR von CIGS 8.1%

Yifeng Chen, Zhen Zhang, Zhiqiang Feng and Pierre J. Verlinden
Assessment of module efficiency and manufacturing cost for industrial crystalline silicon and thin film technologies State Key Laboratory of PV Science and Technology, Trina Solar, China
Contact: Yifeng Chen, yifeng.chen01@trinasolar.com
Nov 26th, 2014

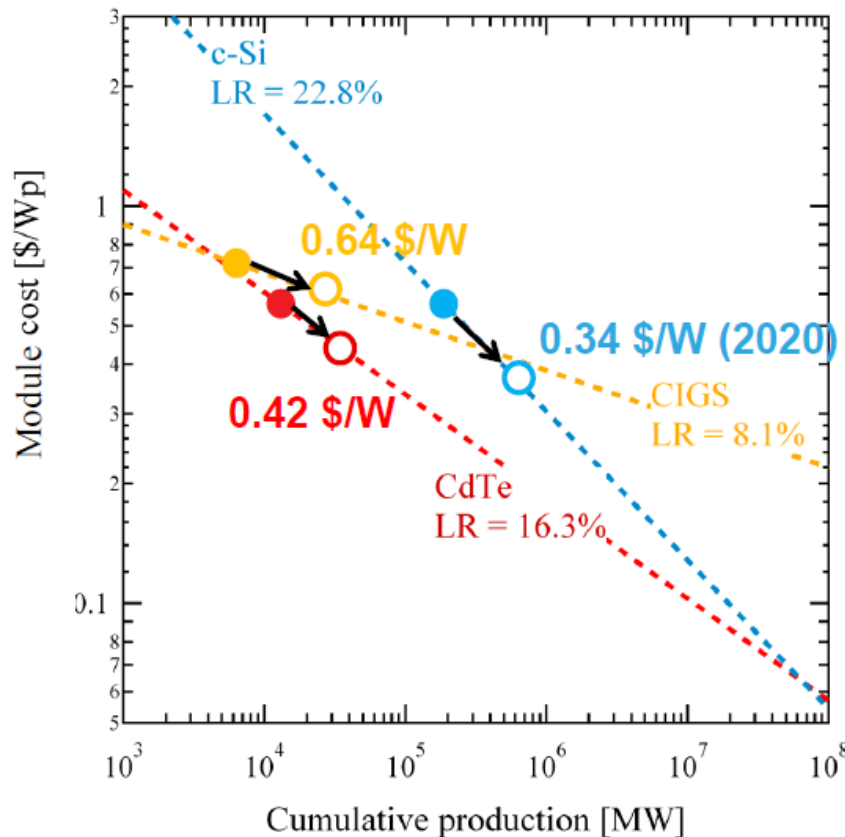
Kostenentwicklung PV Module Alle Technologien



- Die Herstellungskosten der unterschiedlichen Technologien sind in vergleichbarer Höhe
- Die LR von C-Si ist mit knapp 23% am höchsten

Yifeng Chen, Zhen Zhang, Zhiqiang Feng and Pierre J. Verlinden
Assessment of module efficiency and manufacturing cost for industrial crystalline silicon and thin film technologies State Key Laboratory of PV Science and Technology, Trina Solar, China
Contact: Yifeng Chen, yifeng.chen01@trinasolar.com
Nov 26th, 2014

Kostenentwicklung PV Module Alle Technologien



- Bei einem jährlich angenommenen Wachstum von 20% werden im Jahr 2020 die Kosten bei 0.34\$/Wp für c-Si, 0.64 \$/Wp für CIGS und 0.42 \$/Wp bei CdTe liegen

Yifeng Chen, Zhen Zhang, Zhiqiang Feng and Pierre J. Verlinden
Assessment of module efficiency and manufacturing cost for industrial crystalline silicon and thin film technologies State Key Laboratory of PV Science and Technology, Trina Solar, China
Contact: Yifeng Chen, yifeng.chen01@trinasolar.com
Nov 26th, 2014

Produktionstechnologie in den 90igern Phase 1

- Solarzellenherstellung auf Spezialequipment aus der Halbleiterindustrie
- Keine Standardisierung
 - Wafer
 - Maschinen
- Zellenformat 10 x 10 cm²
- Geringer Automatisierungsgrad
- Wirkungsgrade monokristallines Silizium im Bereich von 15-17%
- Wirkungsgrade multikristallines Silizium im Bereich von 12-14%

Quelle: centrotherm

Produktionstechnologie ab 2000

Phase 2

- Beginn der Massenfertigung
- Übergang zu grösseren Formaten 12.5 x 12.5 cm² und 15.6 x 15.6 cm²
- Automatisierung
- SiN als ARC wird Standard
- Vollflächige Aluminium Rückseite Standard
- Standardisierung Wafer
- Modulfertigung wird teilw. automatisiert
- Wirkungsgrade Multi 15% (16% 2010, Mono 17% (18% 2010)
- Rohsilizium im Wesentlichen Abfall aus der HL Industrie

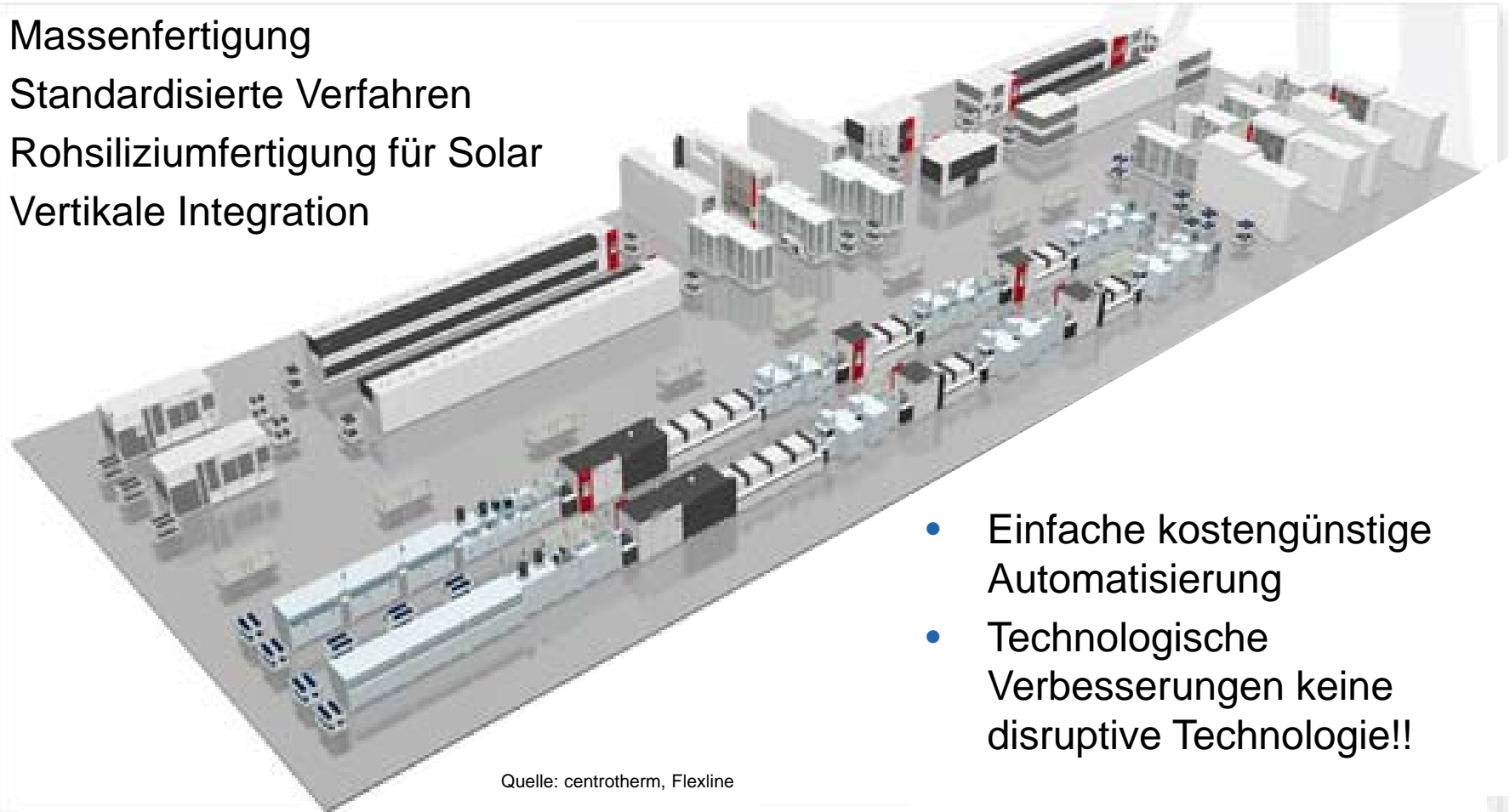


Quelle: Jonas & Redmann

Produktionstechnologie heute

Phase 3 Massenfertigung

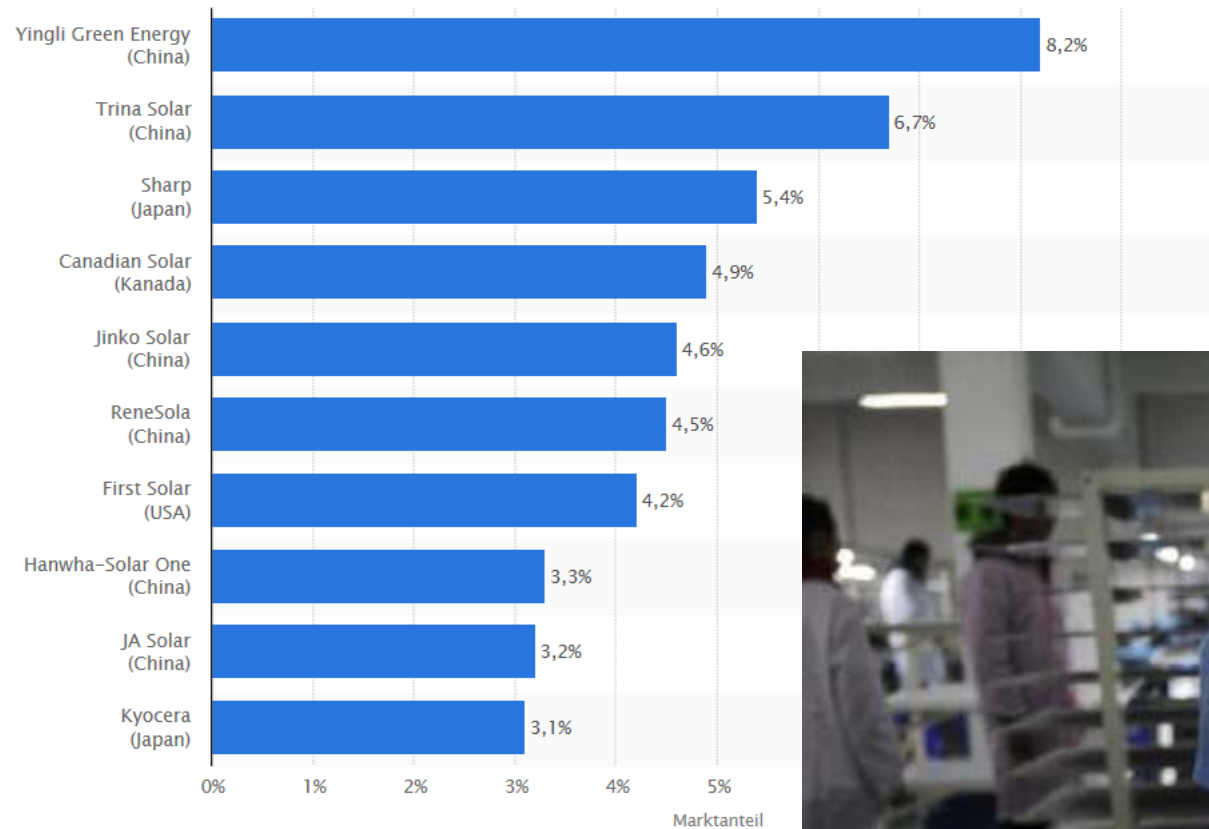
- Massenfertigung
- Standardisierte Verfahren
- Rohsiliziumfertigung für Solar
- Vertikale Integration



Quelle: centrotherm, Flexline

- Einfache kostengünstige Automatisierung
- Technologische Verbesserungen keine disruptive Technologie!!

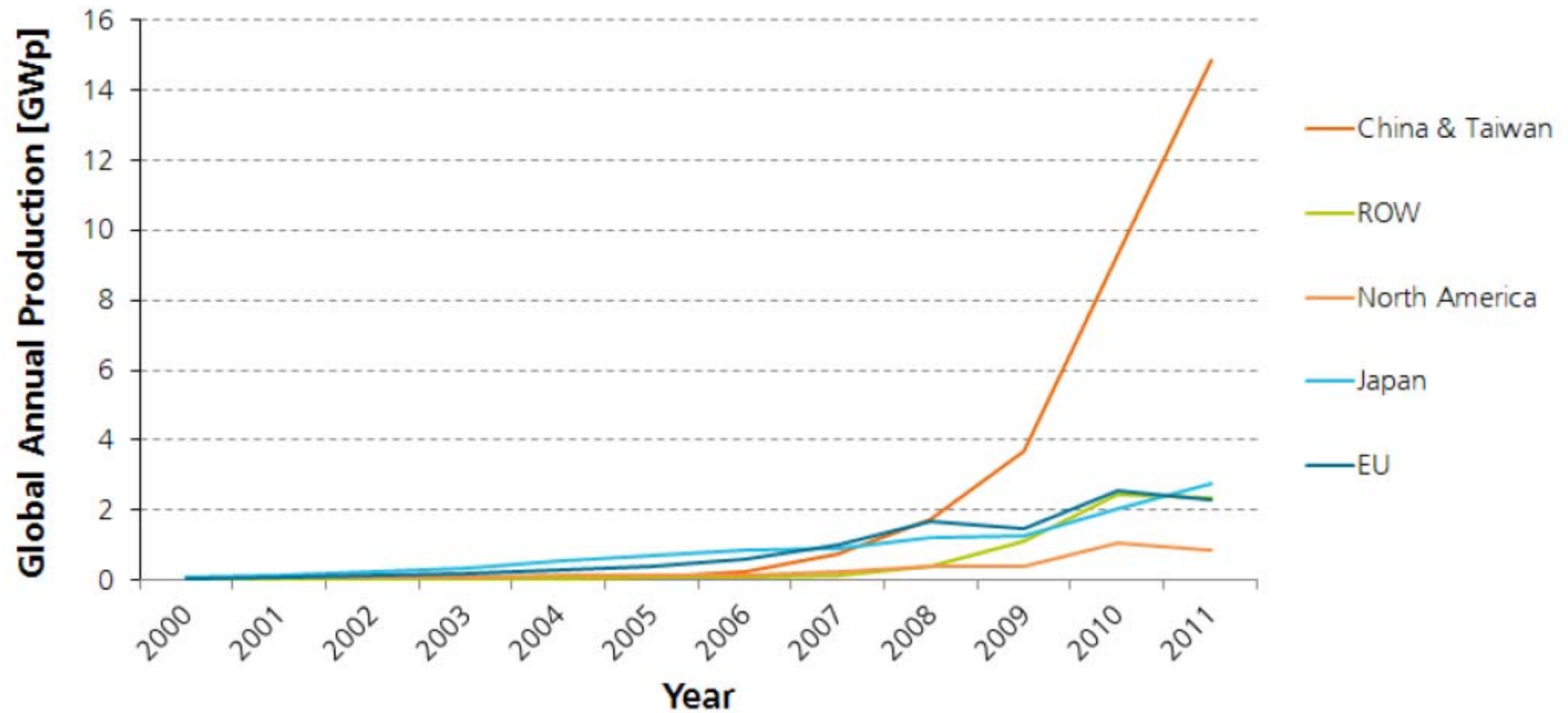
Phase 3 Produktion in Fernost



Quelle Statista



Verteilung Produktion weltweit



Data: Navigant Consulting Graph: PSE AG 2012

Was führte zu dem Preisverfall der PV Module?

C-Si

- Kontinuierliche Verbesserung (nur 2 wesentliche Änderungen in der Fertigungstechnologie seit 1990!)
- **Economy of Scale**
- Nächste Technologieänderungen in der Umsetzung
- Nächste Hürde: Ag – Verknappung?

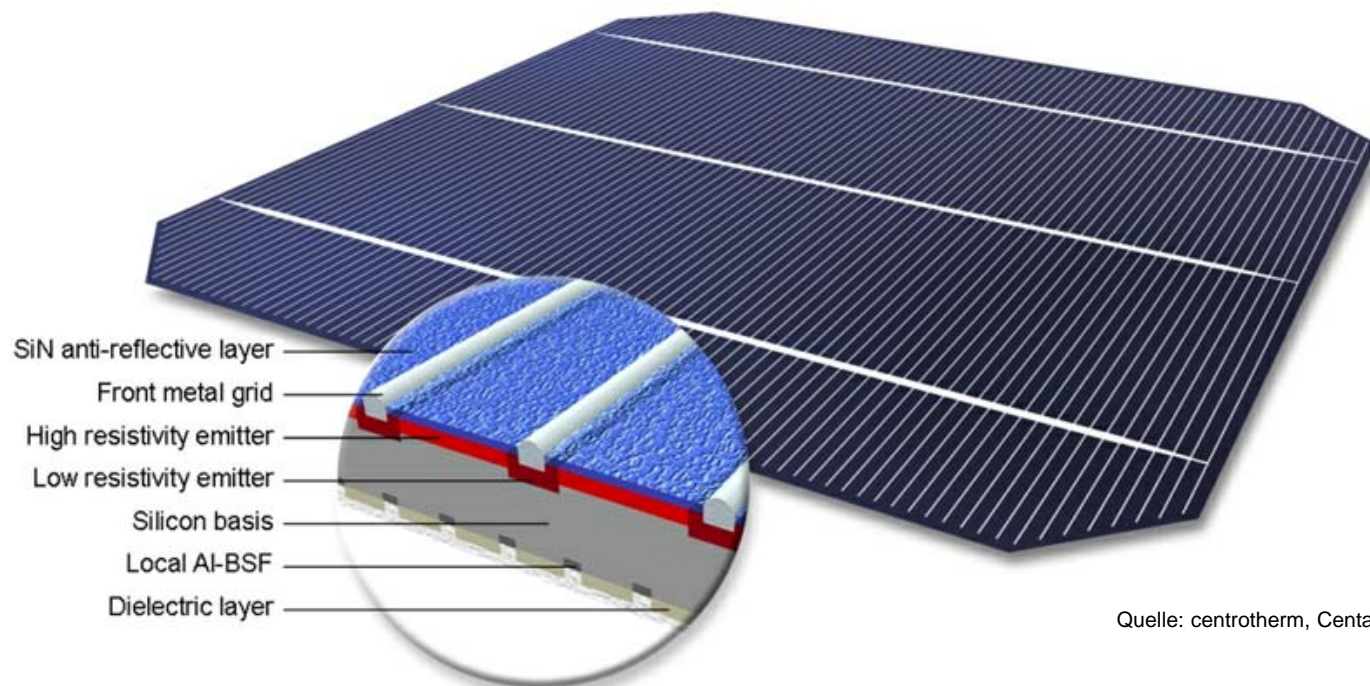
Dünnschichttechnologien

- a/ μ -cr-Si schaffte die notwendigen Wirkungsgrade nicht
- CIGS hat Potential zeigt aber bisher eine zu kleine LR, Lösung für Terawatt- Produktion schwierig wegen möglicher Indiumverknappung
- CdTe : auf lange Sicht Problem mit Cd?

Wirkungsgradsteigerung C-Si

Aktuelle Trends

- Passivierung der Rückseite (PERC Technologie)
- n-Typ Solarzellen
- Bifaciale Solarzellen und Module



Quelle: centrotherm, Centaurus

Solarzellen aus Perowskit

19.12.2013

Ein innovatives Material verspricht effiziente Solarzellen zum Schnäppchenpreis. Fotovoltaikforscher sprechen bereits von einem Durchbruch.

Boris Hänßler

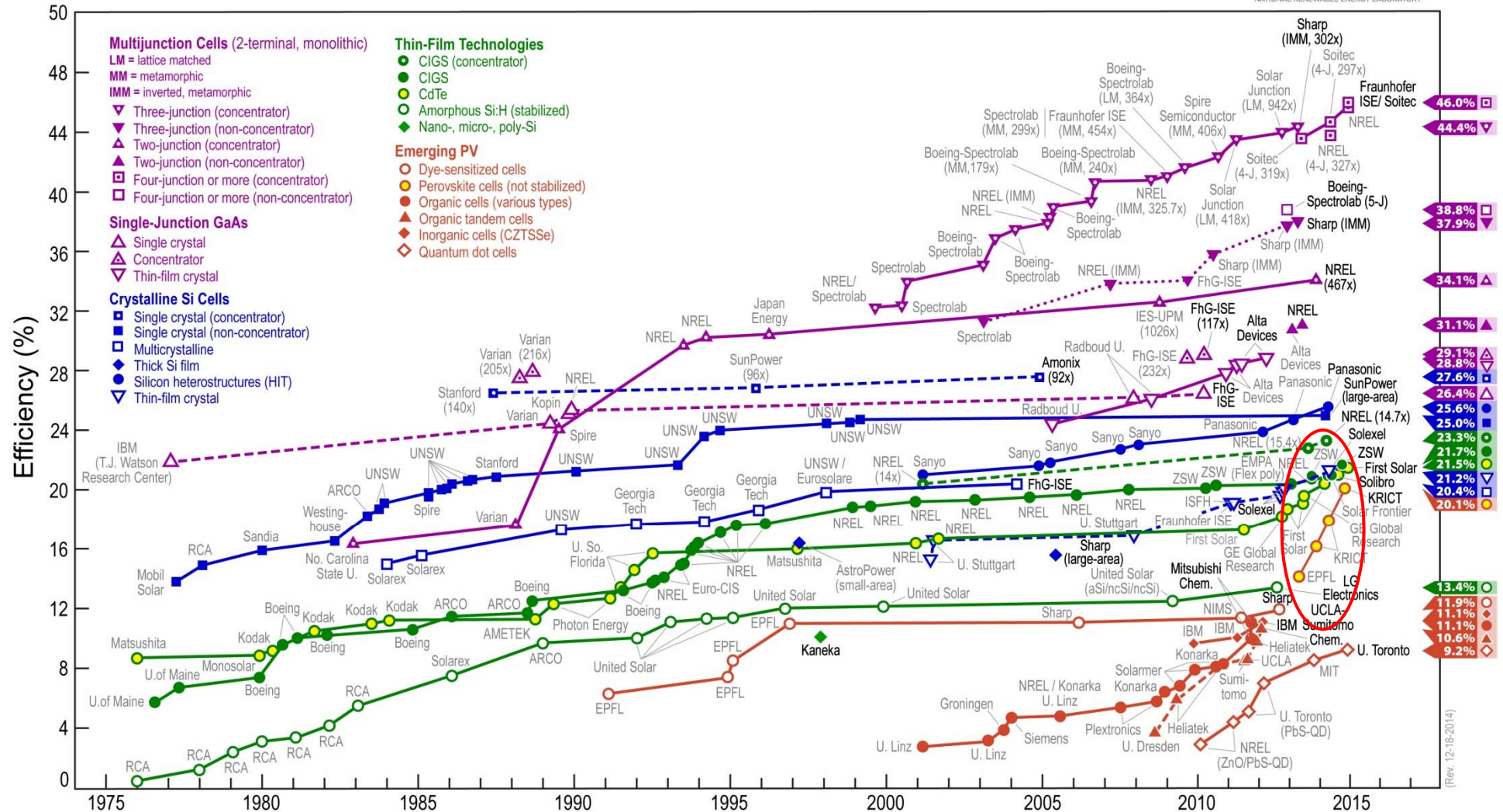


© Boshu Zhang, Wong Choon Lim Glenn & Mingzhen Liu, University of Oxford

<http://www.spektrum.de/news/solarzellen-aus-perowskit/1218435>

Wirkungsgradentwicklung im Labor

Best Research-Cell Efficiencies



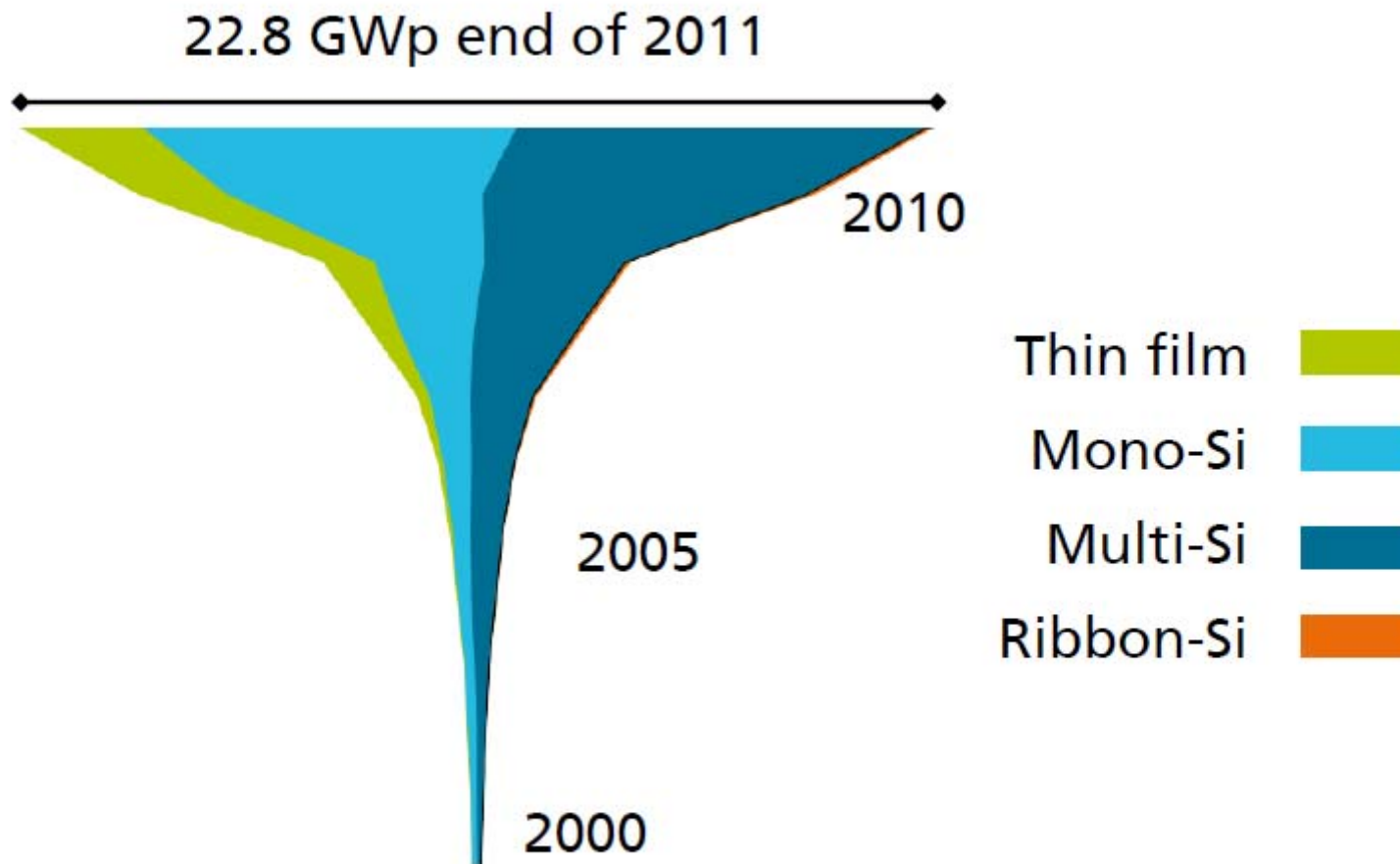
Anteil der unterschiedlichen Technologien

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



School of
Engineering

IEFE Institut für Energiesysteme
und Fluid-Engineering



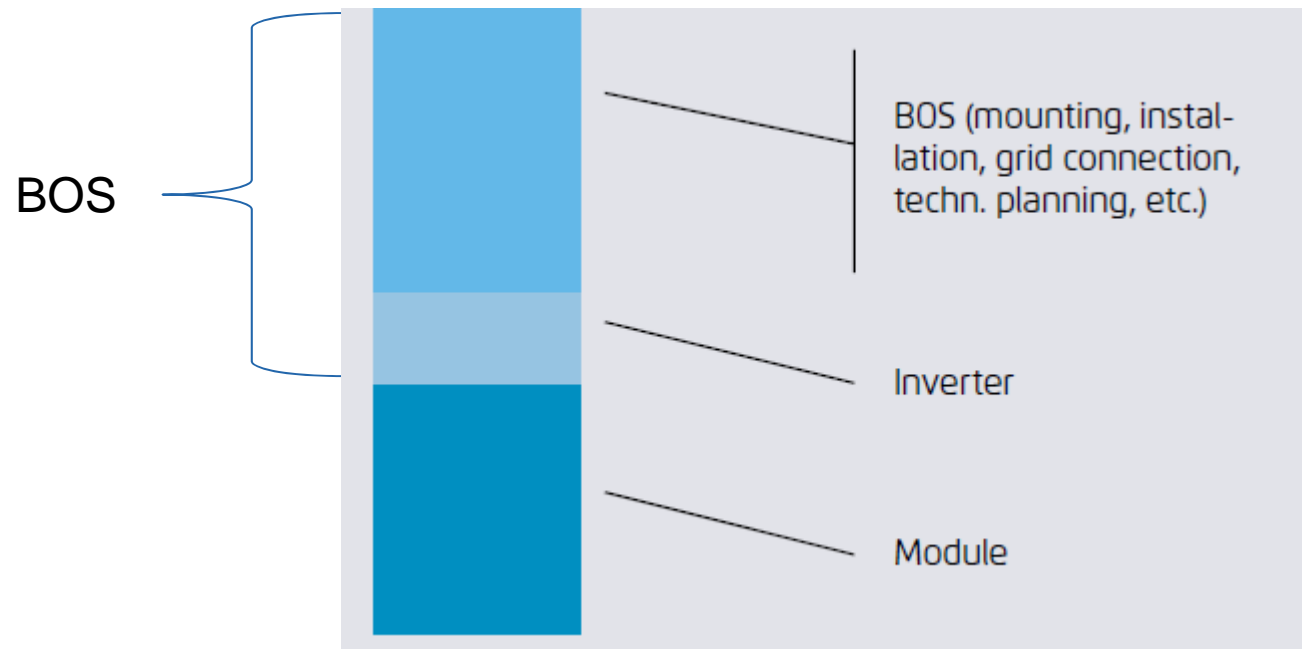
Wie sieht die Zukunft der PV aus?

Subjektiv

- PV Module auf Basis von kristallinen Silizium Solarzellen werden den Markt weiter dominieren
- Zukünftig mehr Module mit bifacialen und n-Typ Solarzellen
- Moderate Technologieänderungen zur Wirkungsgradsteigerung C-Si
- Übergang zu Glas/Glas Modulen, wegen Langlebigkeit, möglicher Bifacialität
- Verringerung der Kosten für die Unterkonstruktion durch verbessertes Moduldesign
- CIGS und CdTe werden weiter existieren, insbesondere im Bereich der Gebäudeintegration CIGS
- Organische und Perowskite Solarzellen werden noch einige Jahre bis zur Markteinführung benötigen

Wie wird sich der Preis für PV Strom entwickeln?

Kostenverteilung eines PV Systems

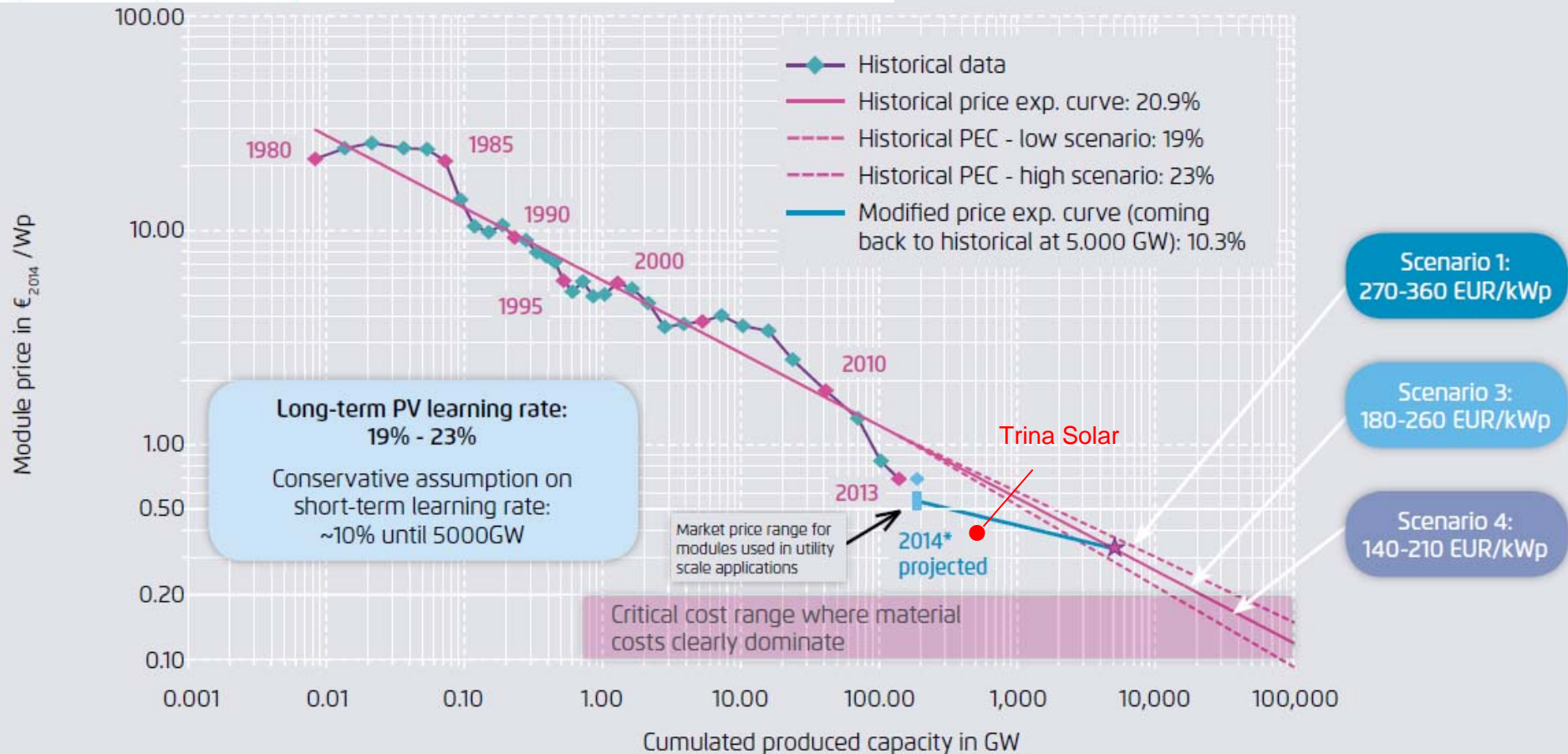


Agora Energiewende | Current and Future Cost of Photovoltaics

Quelle: Fraunhofer ISE, Agora Studie 2015

Kostenentwicklung PV Module C-Si

Agora Energiewende | Current and Future Cost of Photovoltaics

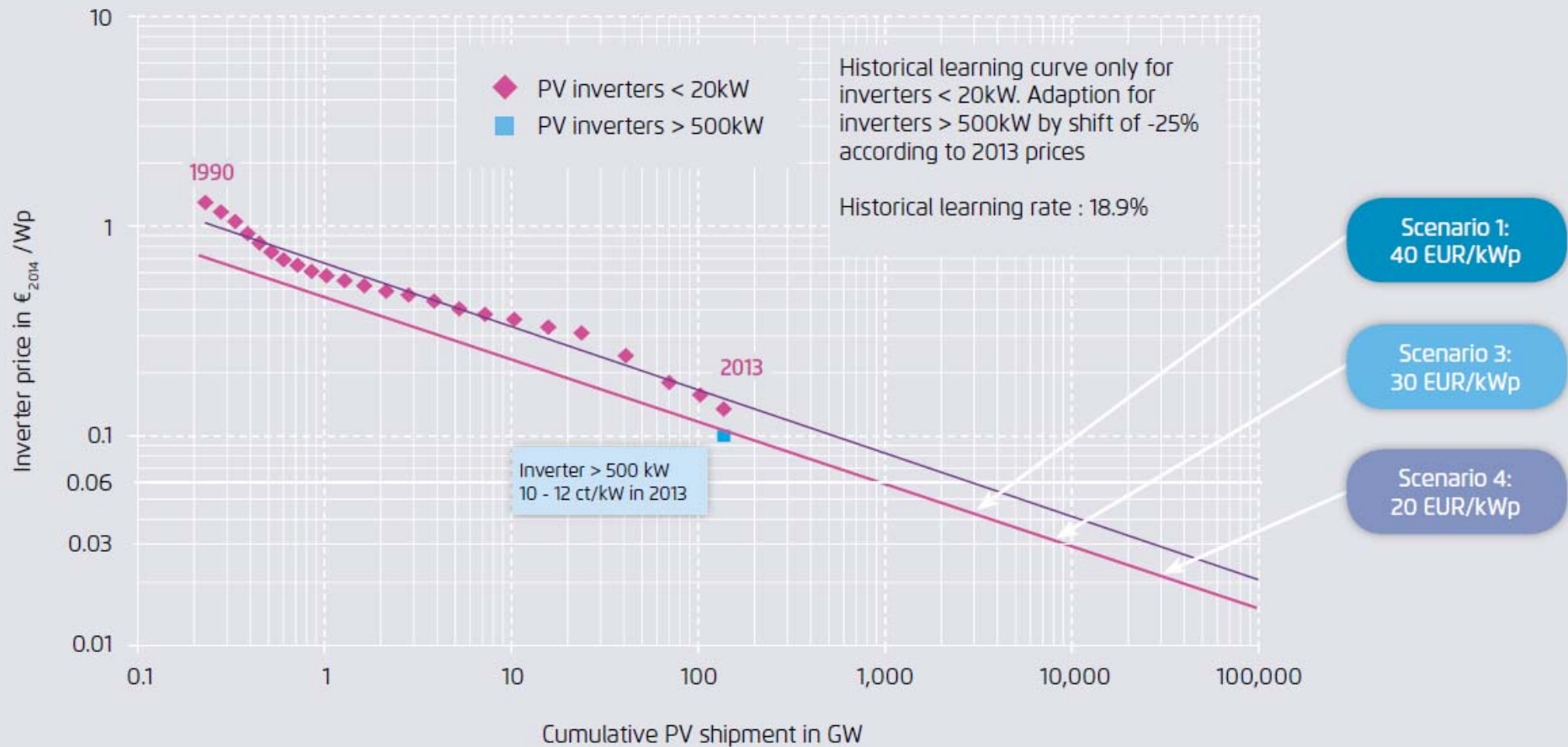


Fraunhofer ISE, own illustration

Quelle: Fraunhofer ISE, Agora Studie 2015

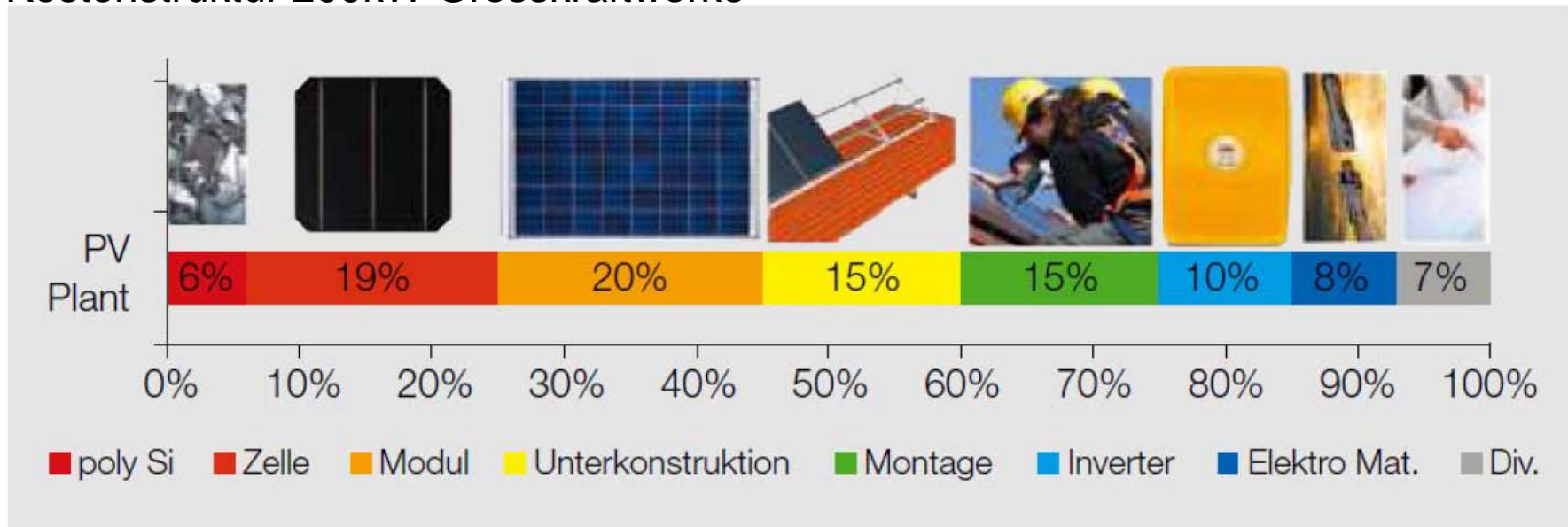
STUDY | Current and Future Cost of Photovoltaics

Kostenentwicklung Inverter



Heutige Kostenstruktur PV Systeme

Kostenstruktur 200kW Grosskraftwerke



Quelle: F. Baumgartner

Nur noch 45% der Kosten entfallen heute auf das PV Modul
=> Wirkungsgrad wird wichtiger

Einfluss des Wirkungsgrades auf die Kostenverteilung

Modul-wirkungsgrad	Kostenanteil Solarmodul	Kostenanteil Montage(Material +Arbeit)	Restkosten, BOS Balance of Systems
20%	51% (0.68€/Wp)	24%	25%
16%	45% (0.60€/Wp)	30%	25%
12%	35% (0.47€/Wp)	40%	25%
8%	15% (0.20€/Wp)	60%	25%

Wirkungsgrad	Modul	Unterkonstruktion und Montage	BOS		
18%	Fr. 0.40	Fr. 0.30	Fr. 0.30	Fr. 1.00	pro Wp
	40%	30%	30%		
21%	Fr. 0.40	Fr. 0.26	Fr. 0.26	Fr. 0.91	pro Wp
	44%	28%	28%		

Quelle: F. Baumgartner, EKZ Energieexperten Infoportal www.energie-experten.ch, April 2014

- Durch den Einsatz von PV Modulen mit höherem Wirkungsgrad bei gleichen Kosten pro Wp , sinken die Kosten des Systems in Euro/Wp
- Technologien mit niedrigem Wirkungsgrad haben vergleichsweise kaum eine Chance, weil der Kostenanteil für die Unterkonstruktion und Montage sehr stark ansteigt

Was heisst dies insgesamt für die PV Industrie

- Die Kosten für die Module und Inverter werden weiter stark fallen
- Der Anteil der Wertschöpfung im Bereich der Projektierung, Unterkonstruktion und Montage wird immer grösser => Wertschöpfung in den Ländern welche PV einsetzen wird grösser!
- Kostengünstige PV Integration auf und im Gebäude, Module mit hoher Lebensdauer, PV als Teil des Gebäudes, Energie - management und –speicherung sind neben der Wirkungsgradsteigerung die Entwicklungsthemen der Zukunft

Stromgestehungskosten PV Schweiz heute und 2050?

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}}$$

LCOE Stromgestehungskosten in Euro/kWh

I_0 Investitionsausgaben in Euro

A_t Jährliche Gesamtkosten in Euro im Jahr t

$M_{t,el}$ Produzierte Strommenge im jeweiligen Jahr in kWh

i realer kalkulatorischer Zinssatz in %

n wirtschaftliche Nutzungsdauer in Jahren

t Jahr der Nutzungsperiode (1, 2, ...n)

Stromgestehungskosten PV Schweiz heute und 2050?

Gesamtkosten PV Anlage: 2 SFr*4200= 8400 SFr

Jahresproduktion: 4.2kW * 1000h = 4200 kWh

Produktion Lebensdauer 20 Jahre: 84000 kWh

Investitionskosten/Produktion: 0.10 SFr

Finanzierungs- und Betriebskosten von 6% respektive 2% ergeben sich aus der Faust-Formel:

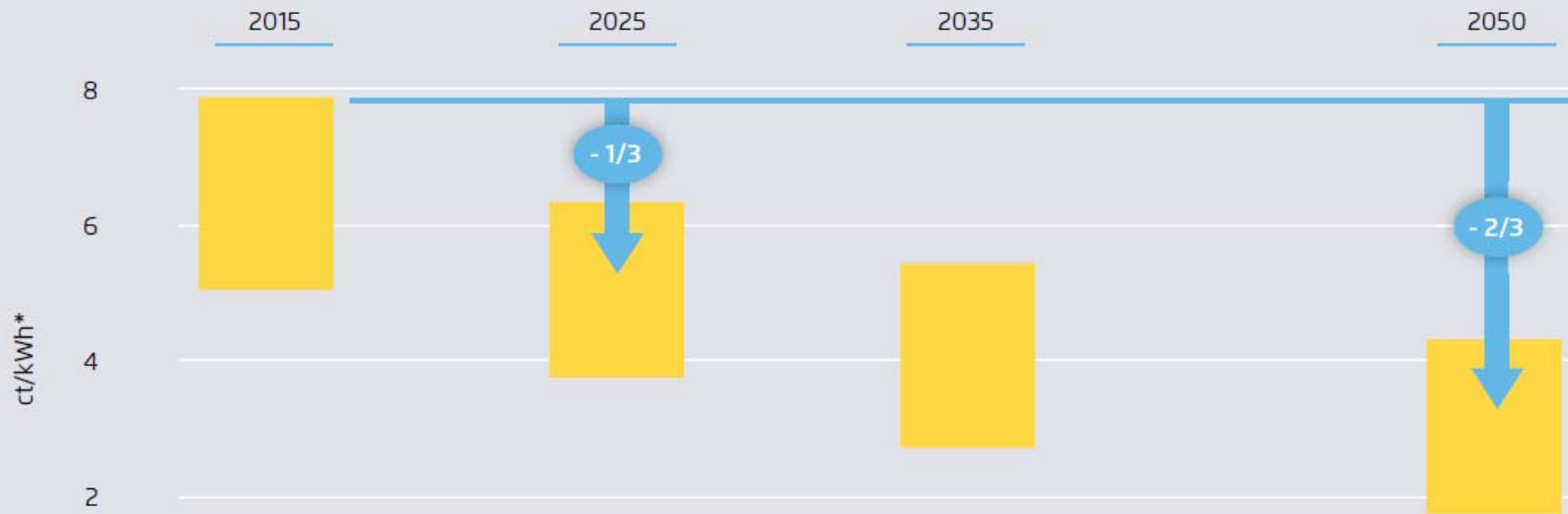
$$n \cdot (m + (i \cdot (1 + i)^n / ((1 + i)^n - 1)))$$

mit n = Anzahl der Jahre =20, m = Betriebskosten = 2% SFr, i = Zinssatz = 6% ein Faktor für diese Kosten in Höhe von 2.14 bezogen auf die Investitionskosten

Damit belaufen sich die Gesamtkosten auf 2.14 *8.400 = 18.000 SFr über die 20 jährige Laufzeit.

Hieraus ergeben sich in diesem Beispiel Stromgestehungskosten von **0.21 SFr pro kWh** (0.10 SFr mal Kostenfaktor 2.14)

Stromgestehungskosten PV heute und 2050?



PV Grosskraftwerke, Süd-Deutschland und Spanien

* Real values in EUR 2014; bandwidth represent different scenarios of market, technology and cost development, as well as power plant location between south of Germany (1190 kWh/kWp/y) and south of Spain (1680 kWh/kWp/y); assuming 5% (real) weighted average cost of capital.

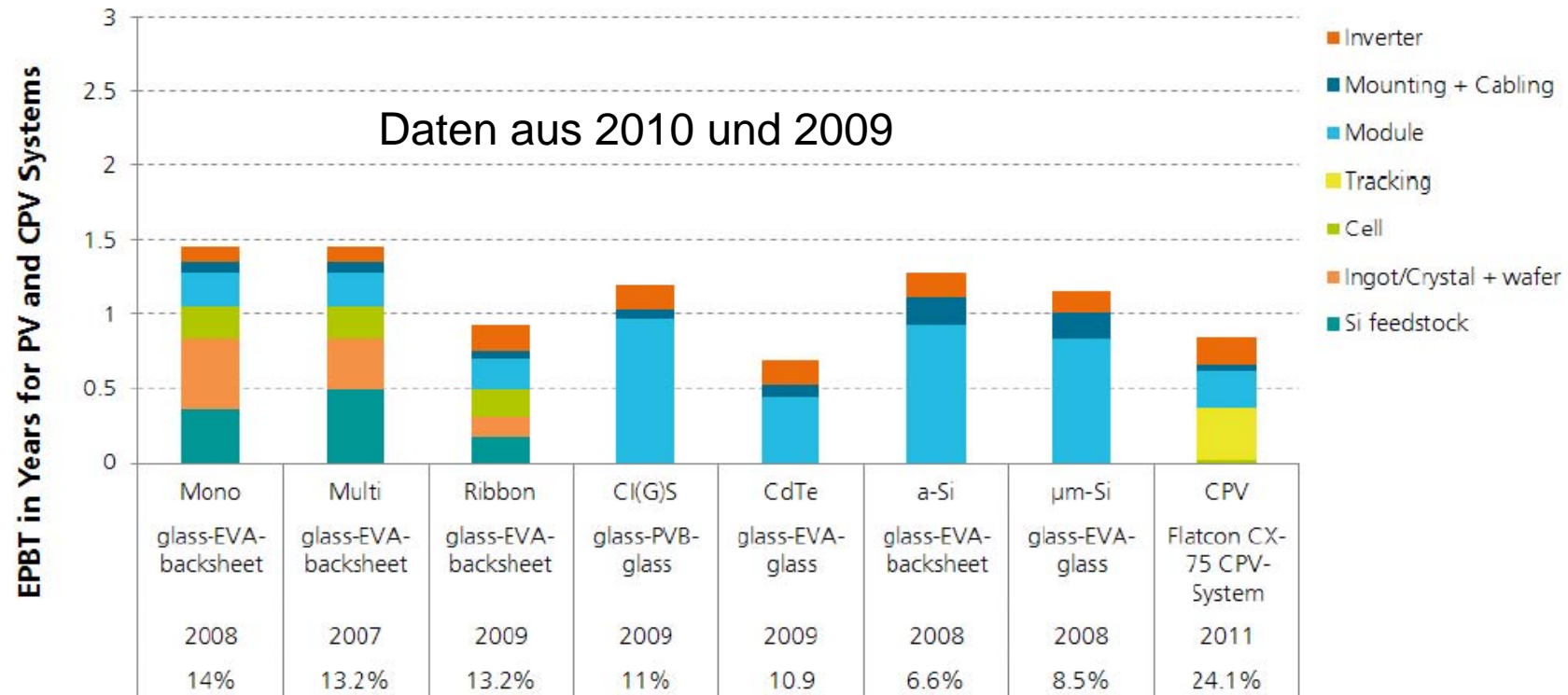
Quelle: Fraunhofer ISE, Agora Studie 2015

Stromgestehungskosten PV Schweiz heute und 2050?

Anlagengrösse kWp	4.2	4.2	4.2	1000
Jahresenergieproduktion pro kWp	1190	1190	1190	1190
Jahresenergieproduktion kWh	4998	4998	4998	1190000
Investitionskosten in CHF pro kWp	2	2	1	0.6
Investitionskosten in CHF	9996	9996	4998	714000
Anzahl Jahre	20	30	20	20
Betriebskosten relativ	2%	2%	2%	2%
Zinssatz	5%	5%	5%	5%
Faktor	2.00	2.55	2.00	2.00
Kosten pro kWh	Fr. 0.20	Fr. 0.17	Fr. 0.10	Fr. 0.06

Energy Pay-Back Time for PV and CPV Systems

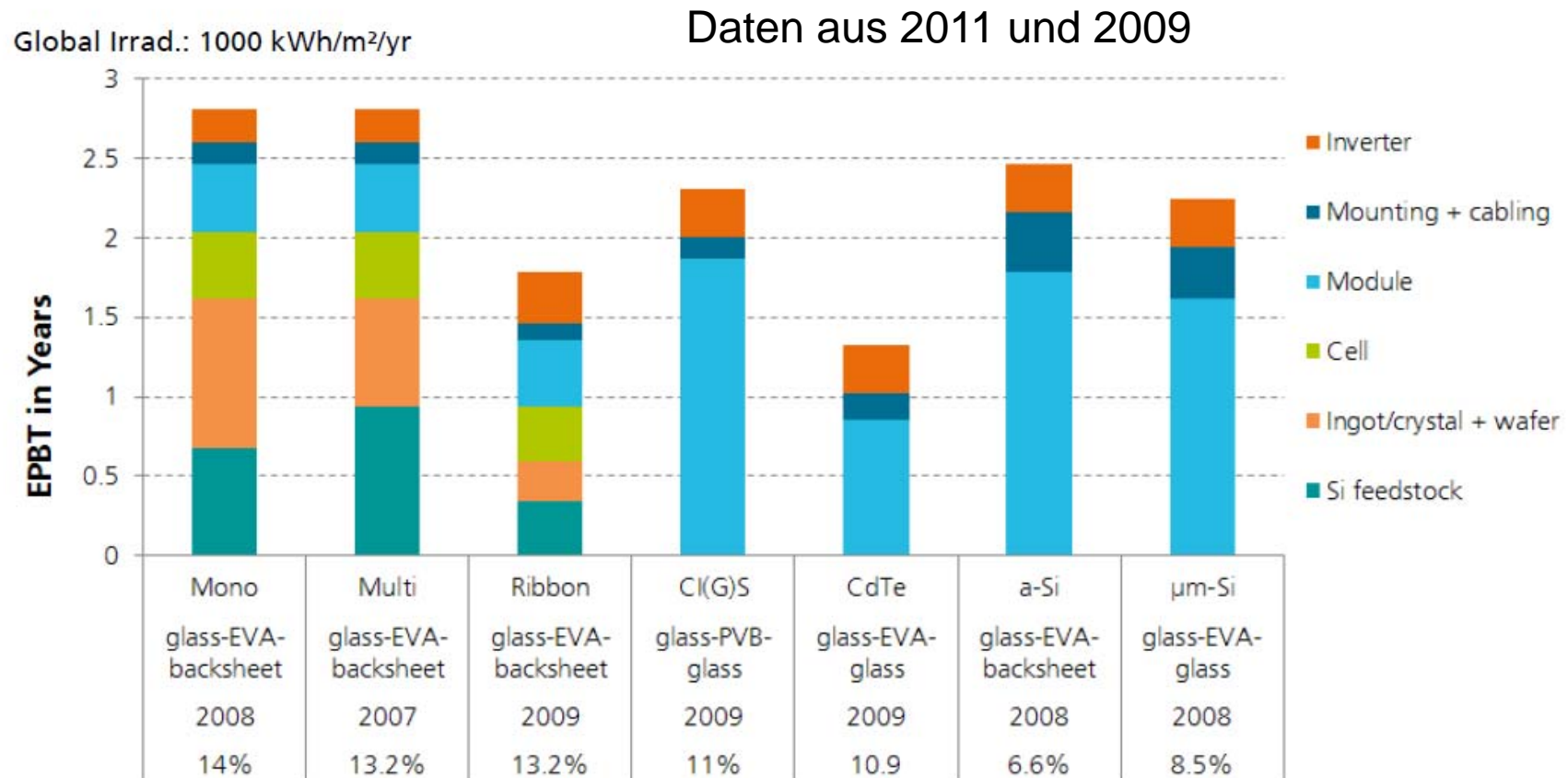
Global Irrad.: 1925 kWh/m²/yr, Direct Normal Irrad.: 1794 kWh/m²/yr



Data: Mono- and multi- Silicon data: ISE 2011; CPV data: "Environmental Sustainability of Concentrator PV Systems: Preliminary LCA Results of the Apollon Project" 5th World Conference on PV Energy Conversion. Valencia, Spain, 6-10 September 2010; all other data: Wild-Scholten (ECN), Sustainability Dec. 2009., Graph: PSE AG 2012

Nach ca. 1-2 Jahren haben sich die PV Systeme energetisch amortisiert.

Energy Pay-Back Time for PV and CPV Systems



Data: ISE 2011 (for mono, multi); de Wild-Scholten (ECN), Sustainability Dec. 2009, Graph: PSE AG 2012

Nach ca. 1-2 Jahren haben sich die PV Systeme energetisch amortisiert.

- Die Photovoltaik hat das Potential eine wesentliche Technologie zur Erzeugung von erneuerbarer Energie zu werden!
- Wir brauchen nicht zu warten- die Technologie ist vorhanden!
- Disruptive Innovationen sind nicht notwendig und sind eher unwahrscheinlich
- Lösungen für die kostengünstige Energiespeicherung müssen ausgebaut werden

- Packen wir`s an!