
STROMGESTEHUNGSKOSTEN ERNEUERBARE ENERGIEN



Dr. Thomas Schlegl

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

Landshuter Energiegespräche,
Hochschule Landshut

Landshut, 9. Dezember 2013

www.ise.fraunhofer.de

AGENDA

- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
- Hintergrund zu Stromgestehungskosten
- Eingangsparameter
- Stromgestehungskosten 2013 in Deutschland
- Stromgestehungskosten in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung
- Zusammenfassung

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Institutsleiter:
Prof. Eicke R. Weber

Mitarbeiter: 1300

2012 Budget: 77,0 Mio. EUR

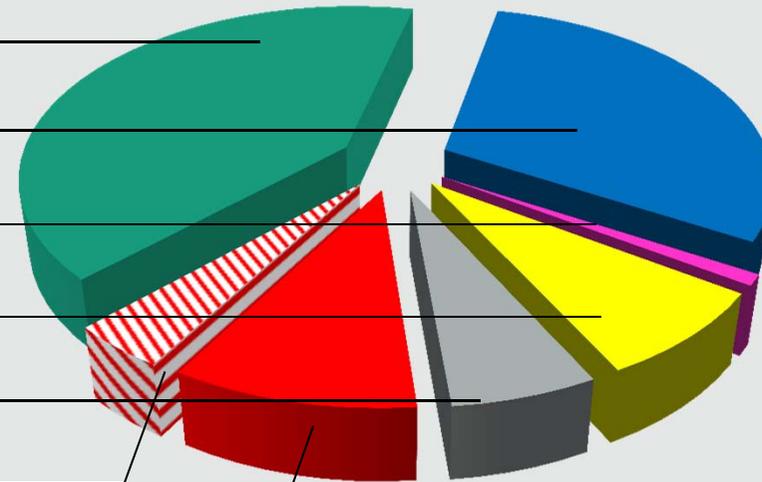
Gegründet: 1981



Ertragsstruktur Betriebshaushalt 2012

Betriebshaushalt: 66,8 Mio Euro
Investitionshaushalt**: 10,2 Mio Euro
Gesamt: 77,0 Mio Euro

| | |
|-------------------------|------|
| Industrie | 41 % |
| Bund | 30 % |
| Land BaWü/NRW | 1 % |
| EU | 8 % |
| Sonstige | 6 % |
| FhG-Sonderprogramme | 4 % |
| Regelgrundfinanzierung* | 10 % |



* davon 90 % Bund und 10 % Land BaWü
** ohne Bauinvestitionen und Konjunkturprogramme

Stand: März 2013

Geschäftsfelder am Fraunhofer ISE

- Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik
- Angewandte Optik und funktionale Oberflächen
- Solarthermie
- Silicium-Photovoltaik
- Photovoltaische Module und Systeme
- Alternative Photovoltaik-Technologien
- Regenerative Stromversorgung
- Wasserstofftechnologie



STROMGESTEHUNGSKOSTEN – EINFÜHRUNG

Untersuchungsansatz der Studie

»Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien«

November 2013



- Marktanalyse von Photovoltaik (PV), Windenergieanlagen (WEA) und Biogasanlagen in Deutschland
- Darstellung der Stromgestehungskosten
 - technologiespezifisch
 - für verschiedene Anlagentypen und Standortbedingungen
 - auf Basis marktüblicher Finanzierungskosten und Risikoaufschläge
- Sensitivitätsanalysen von Technologie- und Finanzparameter
- Prognose bis 2030

Quelle: C. Kost, T. Schlegl et al, Fraunhofer ISE, 2013: www.ise.fraunhofer.de/de/daten-zu-erneuerbaren-energien

Untersuchungsansatz der Studie »Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien« November 2013



- Neue konventionelle Kraftwerken als Vergleichsbasis
 - Braunkohle-,
 - Steinkohle-,
 - Gas-und-Dampfkraftwerke

- Analyse für sonnenreichen Standort von
 - Photovoltaik (PV)
 - solarthermischen Kraftwerken (CSP)
 - konzentrierender Photovoltaik (CPV)

Quelle: C. Kost, T. Schlegl et al, Fraunhofer ISE, 2013: www.ise.fraunhofer.de/de/daten-zu-erneuerbaren-energien

Bestimmung von Stromgestehungskosten

Levelized Cost of Electricity (LCOE)

- Vergleichsgröße auf Basis von Kosten und Stromertrag
- Vergleich von verschiedenen Technologien
- Keine Aussage über Wertigkeit des Stroms
- Nicht direkt gleichzusetzen mit Höhe von Einspeisevergütungen
- Kein cash-flow-Modell hinterlegt
- Konkrete projektspezifische Standortbedingungen entscheidend

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

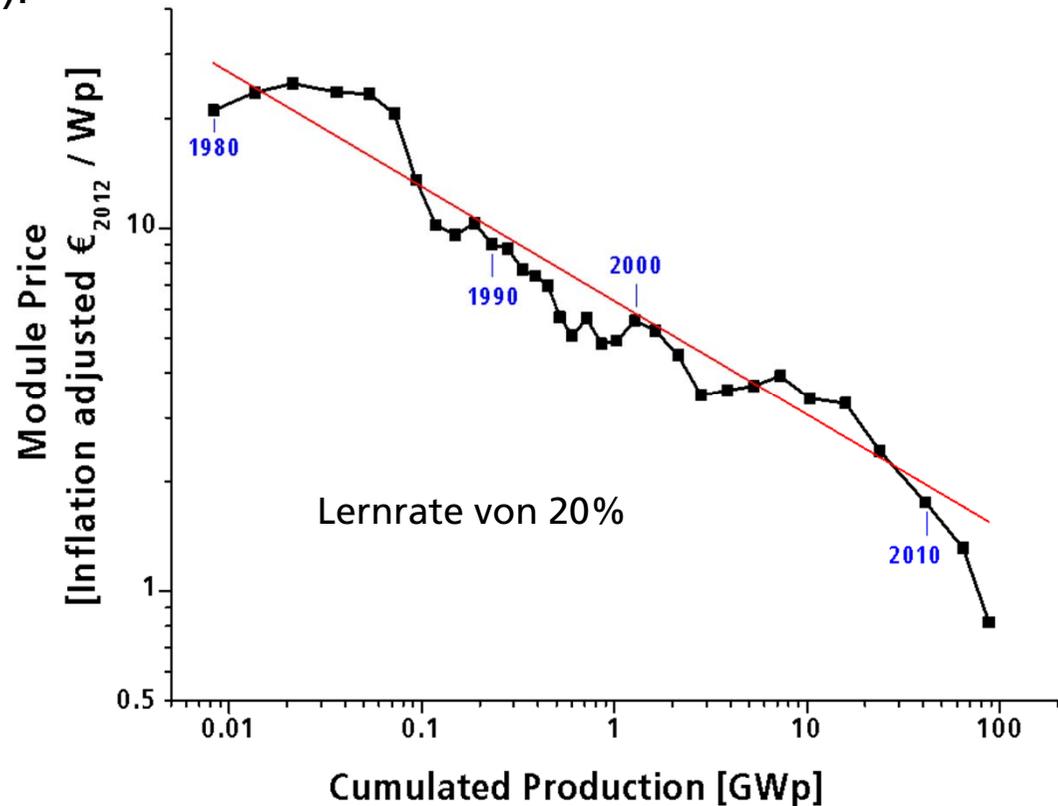
| | |
|----------|--|
| LCOE | Stromgestehungskosten in Euro/kWh |
| I_0 | Investitionsausgaben in Euro |
| A_t | Jährliche Gesamtkosten in Euro im Jahr t |
| M_{el} | Produzierte Strommenge im jeweiligen Jahr in kWh |
| i | realer kalkulatorischer Zinssatz in % |
| n | wirtschaftliche Nutzungsdauer in Jahren |
| t | Jahr der Nutzungsperiode (1, 2, ...n) |

Preiserfahrungskurve oder »Lernkurve«

Beispiel: Photovoltaik auf Basis von kristallinem Silicium

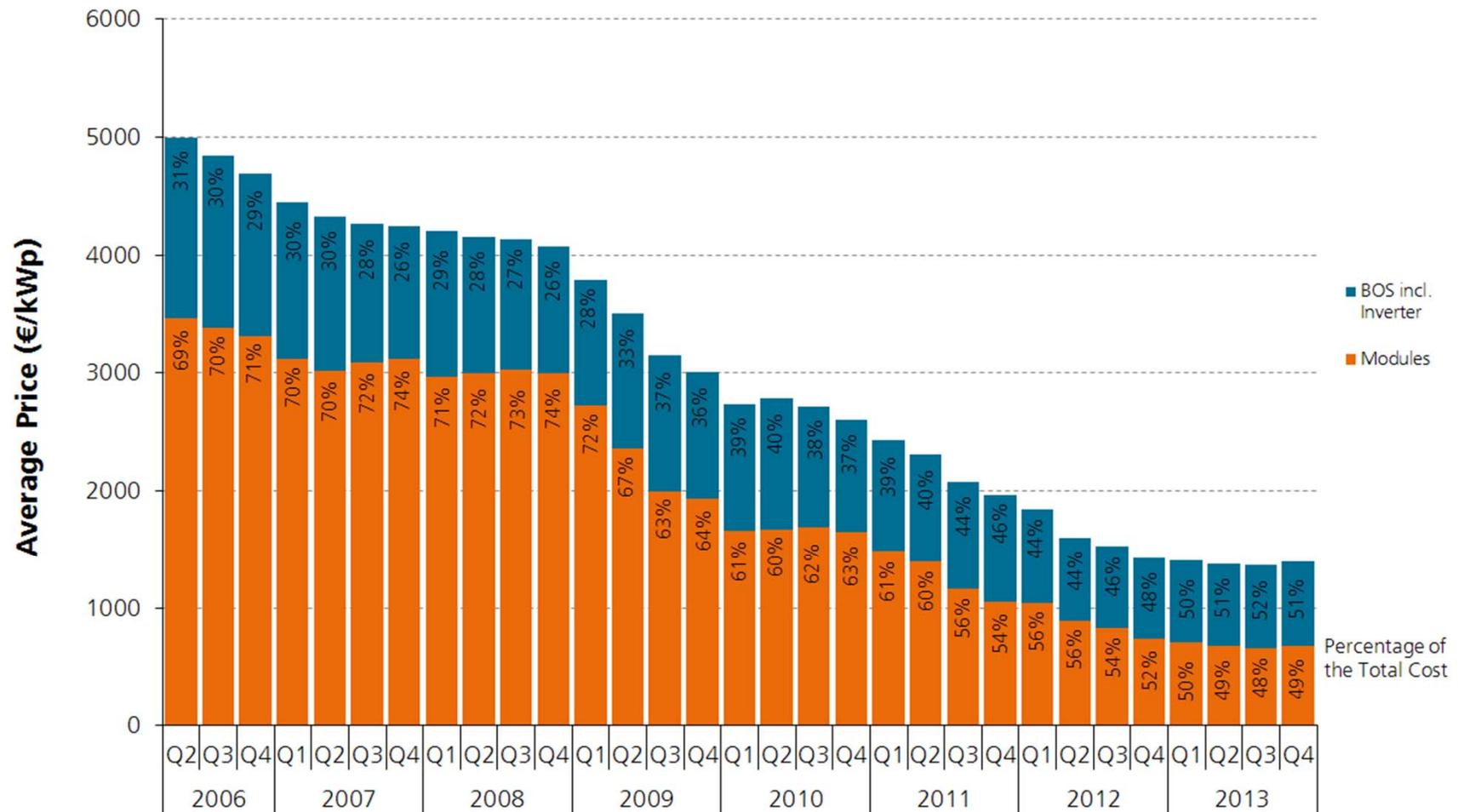
Bestimmende Faktoren (allgemein):

- Skaleneffekte
- Neue Produktionsmethoden
- Technologische Fortschritte
- Billigere, weniger Materialien
- Rationalisierung von Vertrieb und Verwaltung
- Niedrigere Installationskosten, einfachere Montagesysteme
- Vereinfachte Genehmigungsverfahren
- ...



Source: Navigant Consulting; EuPD Module price (since 2006), Design: PSE AG 2012

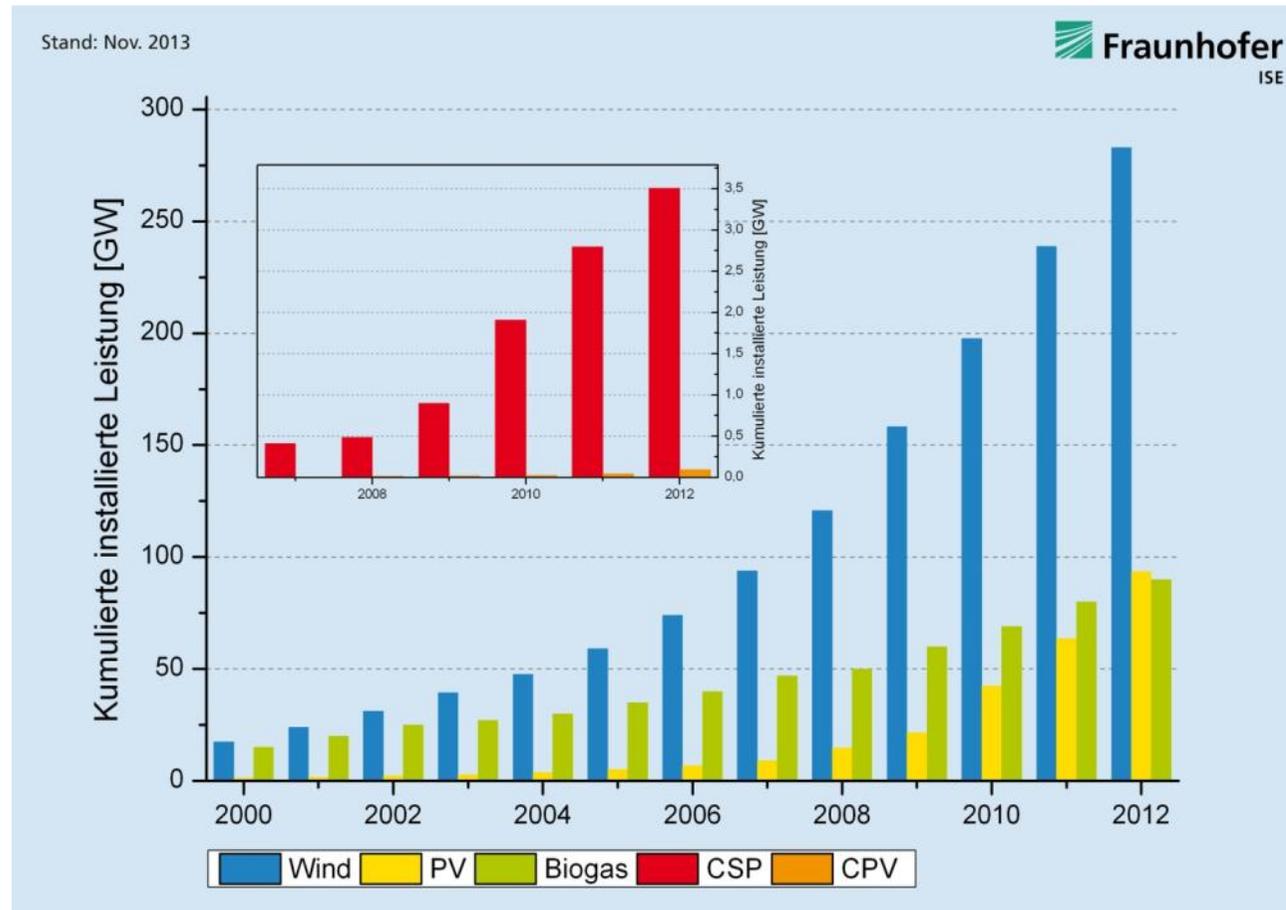
Preisentwicklung von PV-Dachanlagen in Deutschland 10kWp - 100kWp



Data: BSW-Solar, Graph: PSE AG 2012

Historische Marktentwicklung von erneuerbaren Energien

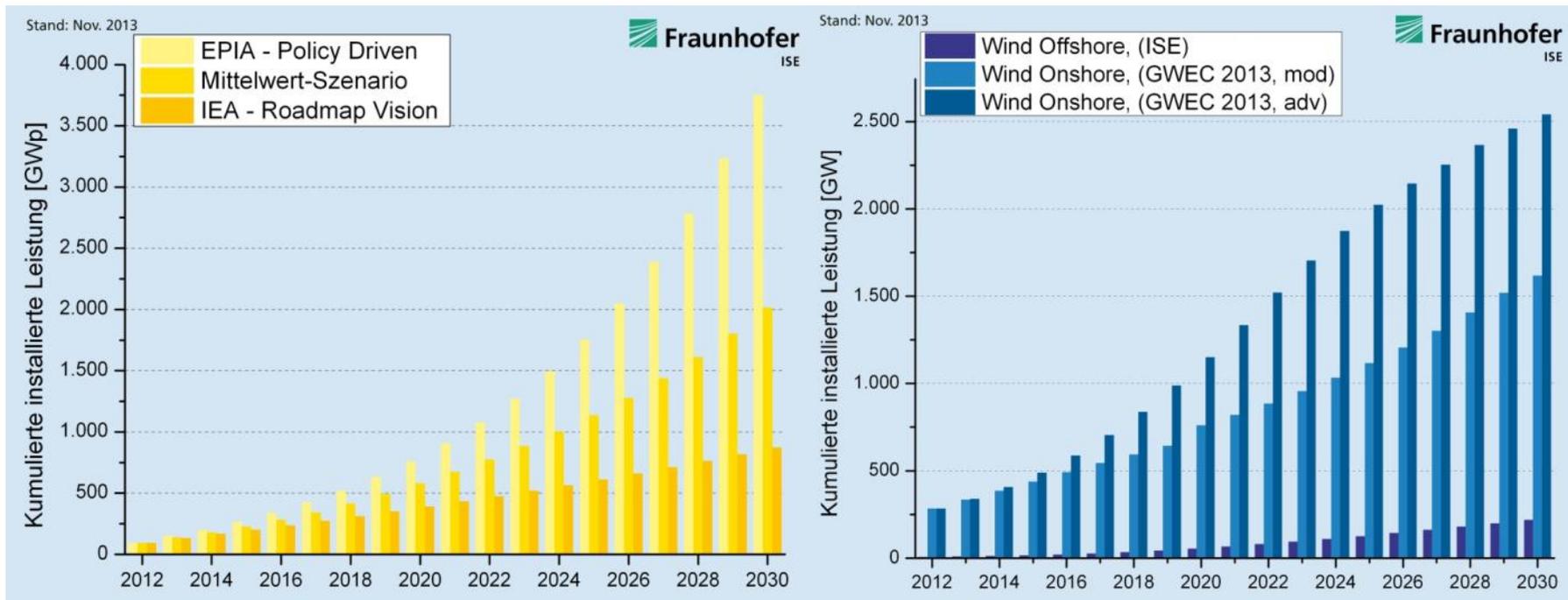
Global kumulierte installierte Kapazität



Source: Fraunhofer ISE, GWEC 2013, Sarasin 2011, EPIA 2013.

Entwicklung der kumulierten Leistung für PV und WEA

Marktprognosen bis 2030



STROMGESTEHUNGSKOSTEN ERNEUERBARE ENERGIE – ZUGRUNDE GELEGTE DATEN

Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien

Betrachtete Anlagengrößen

■ Photovoltaikanlagen – kristallines Silicium:

- Dachinstallierte Kleinanlagen (bis 10 kWp)
- Dachinstallierte Großanlagen (bis 1000 kWp)
- Freiflächenanlagen (größer 1000 kWp)

■ Windenergieanlagen (WEA)

- Onshore (2 - 3 MW): Stark- und Schwachwindanlagen
- Offshore (3 - 5 MW)

■ Biogasanlagen

- (> 500kW) mit Substrat (Silomais, Schweinegülle etc.).

Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien

Betrachtete Anlagengrößen

■ Konventionelle Kraftwerke

- Braunkohlekraftwerke (1000 MW)
- Steinkohlekraftwerke (800 MW)
- Gas-und Dampfkraftwerke (GuD-Kraftwerke, 500 MW)

■ Konzentrierende Photovoltaik (CPV)

- Nachgeführte konzentrierende Photovoltaik (> 1 MWp)

■ Solarthermische Großkraftwerke

- Parabolrinnenkraftwerke (100 MW) mit und ohne Wärmespeicher
- Kraftwerke mit Fresnel-Technologie (100 MW)
- Turmkraftwerke (100 MW) mit Wärmespeicher

Investitionskosten

| [Euro/kW] | PV klein | PV groß | PV Fläche | Wind onshore | Wind offshore | Bio- gas | CPV | CSP- Parabol ohne Speicher | CSP- Parabol mit 8h- Speicher | CSP- Fresnel ohne Speicher | CSP- Turm mit 8h- Speicher | Braun- kohle | Stein- kohle | GuD |
|----------------------------|-------------|------------|--------------|-----------------|------------------|-------------|------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|------|
| Investment 2013 niedrig | 1300 | 1000 | 1000 | 1000 | 3400 | 3000 | 1400 | 2800 | 5200 | 2500 | 6000 | 1250 | 1100 | 550 |
| Investment 2013 hoch | 1800 | 1700 | 1400 | 1800 | 4500 | 5000 | 2200 | 4900 | 6600 | 3300 | 7000 | 1800 | 1600 | 1100 |

- Untersuchung realer Kraftwerksprojekte
- Endkundenpreise
- Spannweite reflektiert reale Marktdaten

Finanzierungs- und Betriebskosten Deutschland

| | PV Klein | PV Groß | PV Frei | Wind On- shore | Wind Off- shore | Braun- kohle | Stein- kohle | GuD | Bio- masse |
|--|-------------|------------|------------|----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-------|---------------|
| Lebensdauer [in Jahre] | 25 | 25 | 25 | 20 | 20 | 40 | 40 | 30 | 20 |
| Eigenkapital-Anteil | 20% | 20% | 20% | 30% | 40% | 40% | 40% | 40% | 30% |
| Fremdkapital-Anteil | 80% | 80% | 80% | 70% | 60% | 60% | 60% | 60% | 70% |
| Eigenkapital-Rendite | 6,0% | 8,0% | 8,0% | 9,0% | 14,0% | 14,0% | 14,0% | 14,0% | 9,0% |
| Fremdkapital-Zins | 4,0% | 4,0% | 4,0% | 5,0% | 6,0% | 6,0% | 6,0% | 6,0% | 5,0% |
| WACC _{nom} (Weighted Average Cost of Capital) | 4,4% | 4,8% | 4,8% | 5,9% | 9,8% (8,8%)* | 9,0% | 9,0% | 9,0% | 6,2% |
| WACC _{real} | 2,4% | 2,8% | 2,8% | 3,8% | 7,7% (6,7%)* | 6,9% | 6,9% | 6,9% | 4,1% |
| Jährliche var. Betriebskosten [in Euro/kWh] | | | | 0,018 | 0,035 | | | | |
| Jährliche fixe Betriebskosten [in Euro/kW] | 35 | 35 | 35 | | | 36 | 32 | 22 | 175 |
| Jährliche Degression Stromoutput | 0,2% | 0,2% | 0,2% | 0,0% | 0,0% | | | | |
| CO ₂ -Emission [in kg/kWh] | | | | | | 0,36 | 0,34 | 0,20 | |
| Berücksichtigung Brennstoffkosten | | | | | | x | x | x | x |

■ Diskontierungsfaktor (WACC) stark abhängig von Investor und Land

*absinkende Finanzierungskosten bis zum Jahr 2030 für Technologien mit geringer Marktdurchdringung im Jahr 2013

Jahreserträge an typischen Standorten

| PV-Anlage (Standardmodule) | Einstrahlung auf PV-Module bei optimalem Neigungswinkel | Stromerzeugung pro 1 kWp |
|---|---|--------------------------|
| Deutschland Norden (Globalstrahlung 1000 kWh/(m ² a)) | 1150 kWh/(m ² a) | 1000 kWh/a |
| Deutschland Mitte und Osten (Globalstrahlung 1050 kWh/(m ² a)) | 1210 kWh/(m ² a) | 1040 kWh/a |
| Deutschland Süden (Globalstrahlung 1200 kWh/(m ² a)) | 1380 kWh/(m ² a) | 1190 kWh/a |
| Südfrankreich (Globalstrahlung 1450 kWh/(m ² a)) | 1670 kWh/(m ² a) | 1380 kWh/a |
| Südspanien (Globalstrahlung 1800 kWh/(m ² a)) | 2070 kWh/(m ² a) | 1680 kWh/a |
| MENA (Globalstrahlung 2000 kWh/(m ² a)) | 2300 kWh/(m ² a) | 1790 kWh/a |

| Windenergieanlage (2 - 5 MW) | Wind-Volllaststunden | Stromerzeugung pro 1 kW |
|---|----------------------|-------------------------|
| Onshore: Binnenland Deutschland (Windgeschwindigkeit 5,3 m/s; 130m Nabenhöhe) | 1300 h/a | 1300 kWh/a |
| Onshore: Küstennahe und windreiche Standorte Deutschland (Windgeschwindigkeit 6,3 m/s; 80m Nabenhöhe) | 2000 h/a | 2000 kWh/a |
| Onshore: Atlantikküste UK (Windgeschwindigkeit 7,7 m/s; 80m Nabenhöhe) | 2700 h/a | 2700 kWh/a |
| Offshore: geringe Entfernung von Küste (Windgeschwindigkeit 7,9 m/s; 80m Nabenhöhe) | 2800 h/a | 2800 kWh/a |
| Offshore: mittlere Entfernung von Küste (Windgeschwindigkeit 8,7 m/s) | 3200 h/a | 3200 kWh/a |
| Offshore: höhere Entfernung von Küste (Windgeschwindigkeit 9,5 m/s) | 3600 h/a | 3600 kWh/a |
| Offshore: sehr gute Standorte (Windgeschwindigkeit 10,3 m/s) | 4000 h/a | 4000 kWh/a |

■ Annahmen für sehr unterschiedliche Standorte

Annahmen zu konventionellen Kraftwerke I

Entwicklung von Volllaststunden

| Entwicklung der Volllaststunden von konventionellen Kraftwerken | Braunkohle | Steinkohle | GuD |
|---|------------|------------|------|
| Volllaststunden 2013 mittel | 7100 | 6000 | 3500 |
| Volllaststunden 2013 niedrig | 6600 | 5500 | 3000 |
| Volllaststunden 2013 hoch | 7600 | 6500 | 4000 |
| Volllaststunden 2020 mittel | 6800 | 5700 | 3500 |
| Volllaststunden 2020 niedrig | 6300 | 5200 | 3000 |
| Volllaststunden 2020 hoch | 7300 | 6200 | 4000 |
| Volllaststunden 2030 mittel | 5800 | 4800 | 3100 |
| Volllaststunden 2030 niedrig | 5300 | 4300 | 2600 |
| Volllaststunden 2030 hoch | 6300 | 5300 | 3600 |
| Volllaststunden 2040 mittel | 4900 | 4100 | 2900 |
| Volllaststunden 2040 niedrig | 4400 | 3600 | 2400 |
| Volllaststunden 2040 hoch | 5400 | 4600 | 3400 |
| Volllaststunden 2050 mittel | 4300 | 3600 | 2600 |
| Volllaststunden 2050 niedrig | 3800 | 3100 | 2100 |
| Volllaststunden 2050 hoch | 4800 | 4100 | 3100 |

Annahmen zu konventionellen Kraftwerke II

Brennstoffpreise, Wirkungsgrad, CO₂-Zertifikate

| Wirkungsgradentwicklung bei Großkraftwerken | 2013 | 2020 | 2030 |
|--|-------|-------|-------|
| Braunkohle | 45,0% | 46,5% | 48,5% |
| Steinkohle | 46,0% | 50,0% | 51,0% |
| GuD | 60,0% | 61,0% | 62,0% |
| Biomasse | 40,0% | 40,0% | 40,0% |

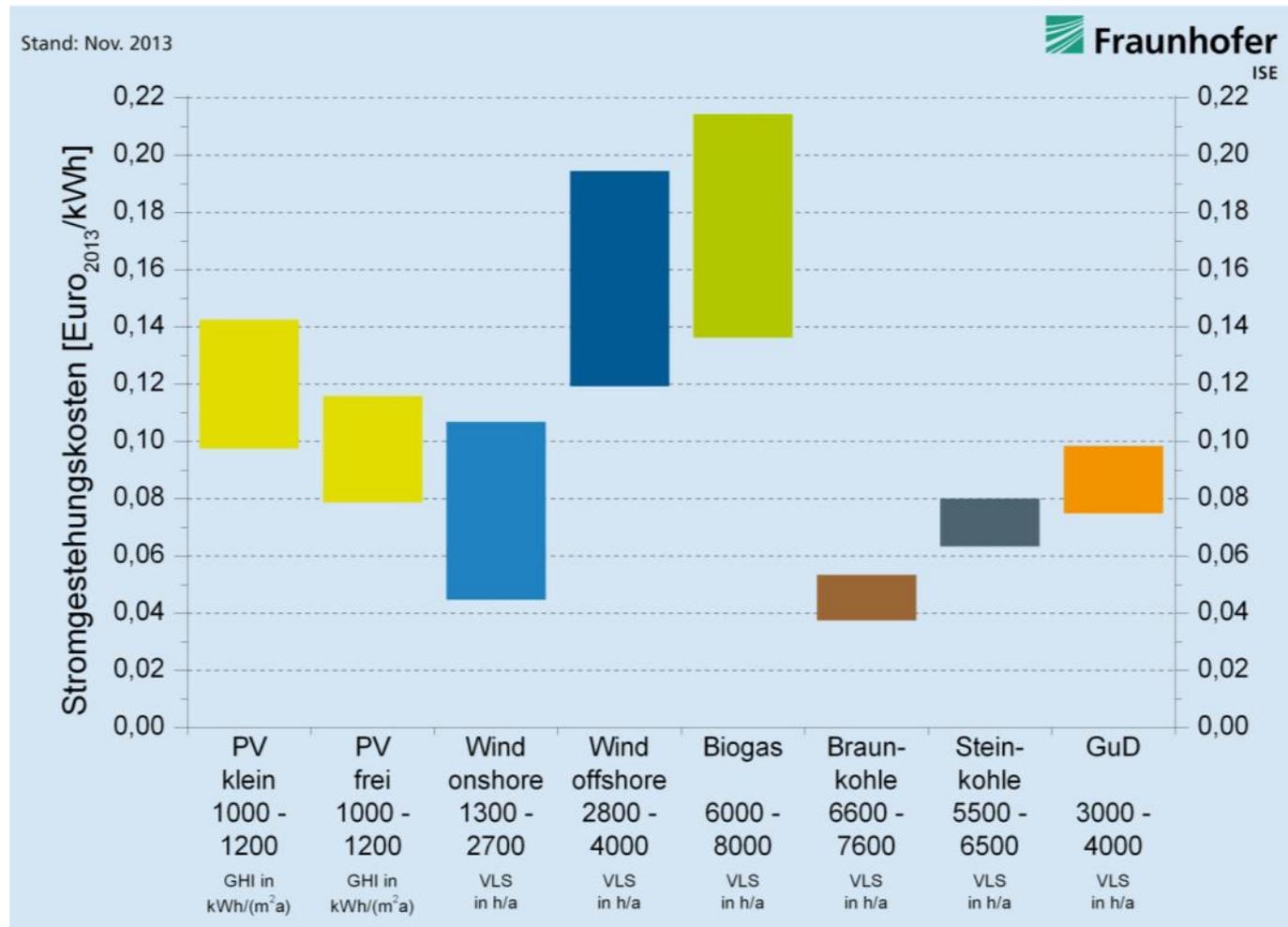
| Brennstoffpreise [Euro ₂₀₁₃ /kWh] | 2013 | 2020 | | 2030 | | 2040 | 2050 |
|---|--------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | | unterer | oberer | unterer | oberer | | |
| Braunkohle | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0016 |
| Steinkohle | 0,0114 | 0,0103 | 0,0114 | 0,0112 | 0,0175 | 0,0188 | 0,0200 |
| Erdgas | 0,0287 | 0,0276 | 0,0320 | 0,0287 | 0,0363 | 0,0398 | 0,0470 |
| Substrat für Biomasse | 0,0300 | 0,0250 | 0,0400 | 0,0250 | 0,0400 | 0,0400 | 0,0400 |

| CO ₂ -Zertifikatspreis [Euro ₂₀₁₃ /tCO ₂] | 2013 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|--|------|------|------|------|------|
| unterer Wert (eigene Berechnung) | 5,3 | 17 | 28 | 35 | 40 |
| oberer Wert (Prognos) | 5,3 | 21,7 | 42 | 50,7 | 55 |
| mittlerer Wert | 5,3 | 19,3 | 35 | 42,9 | 47,5 |

STROMGESTEHUNGSKOSTEN IN DEUTSCHLAND – ERGEBNISSE

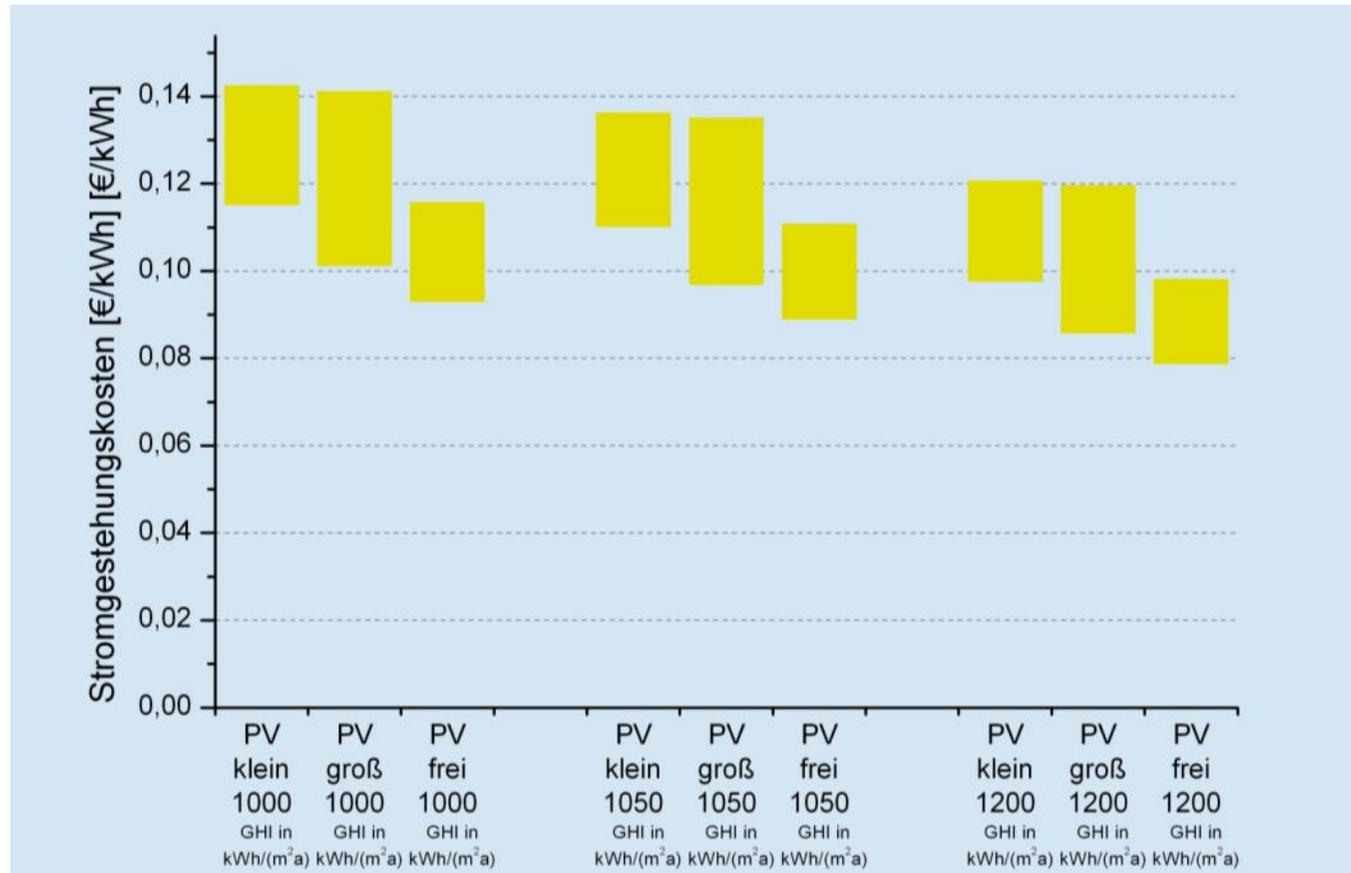
Stromgestehungskosten 2013

Deutschland



Stromgestehungskosten Photovoltaik 2013

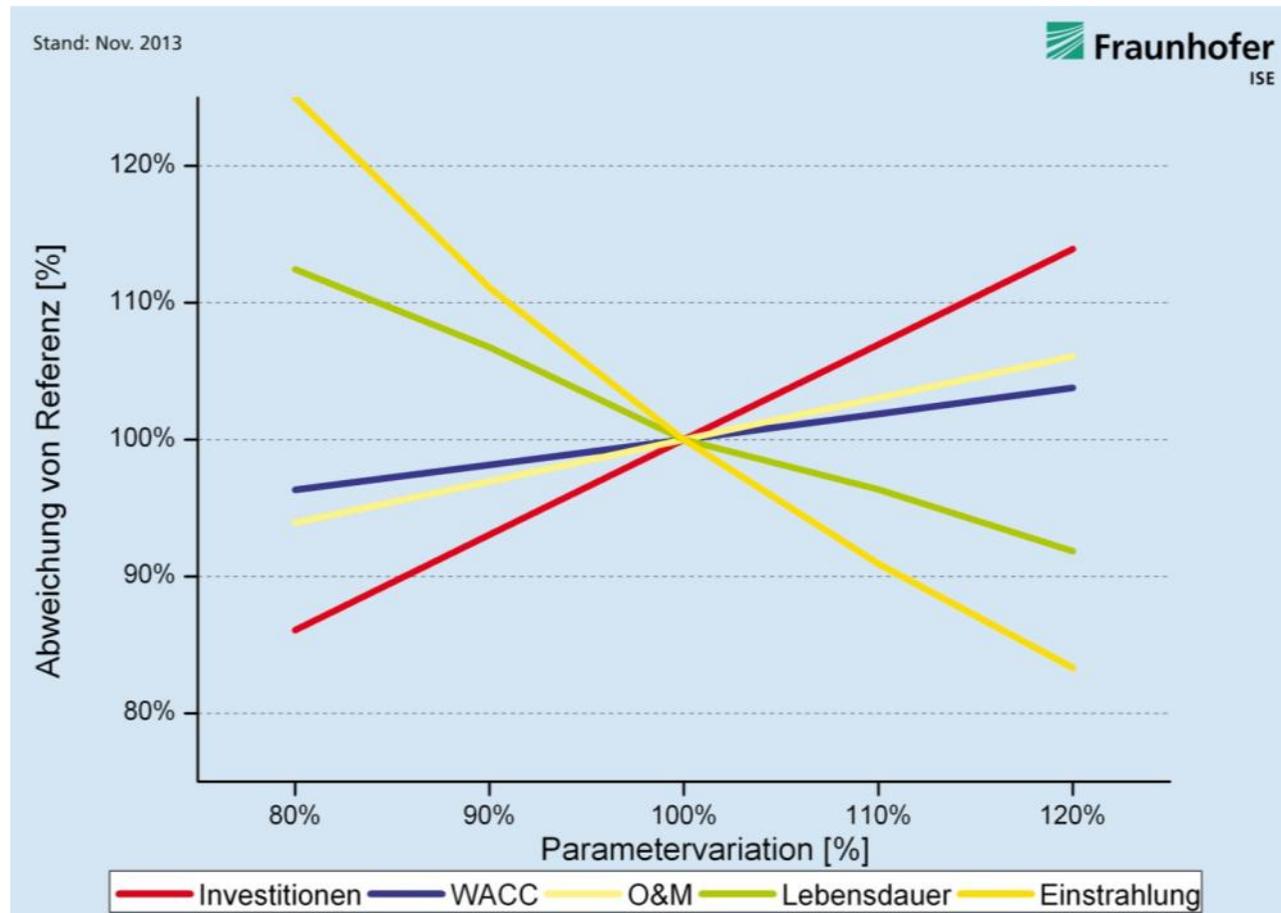
Deutschland



- Freiflächenanlagen mit geringem Vorteil gegenüber großen Dachanlagen

Sensitivitätsanalyse

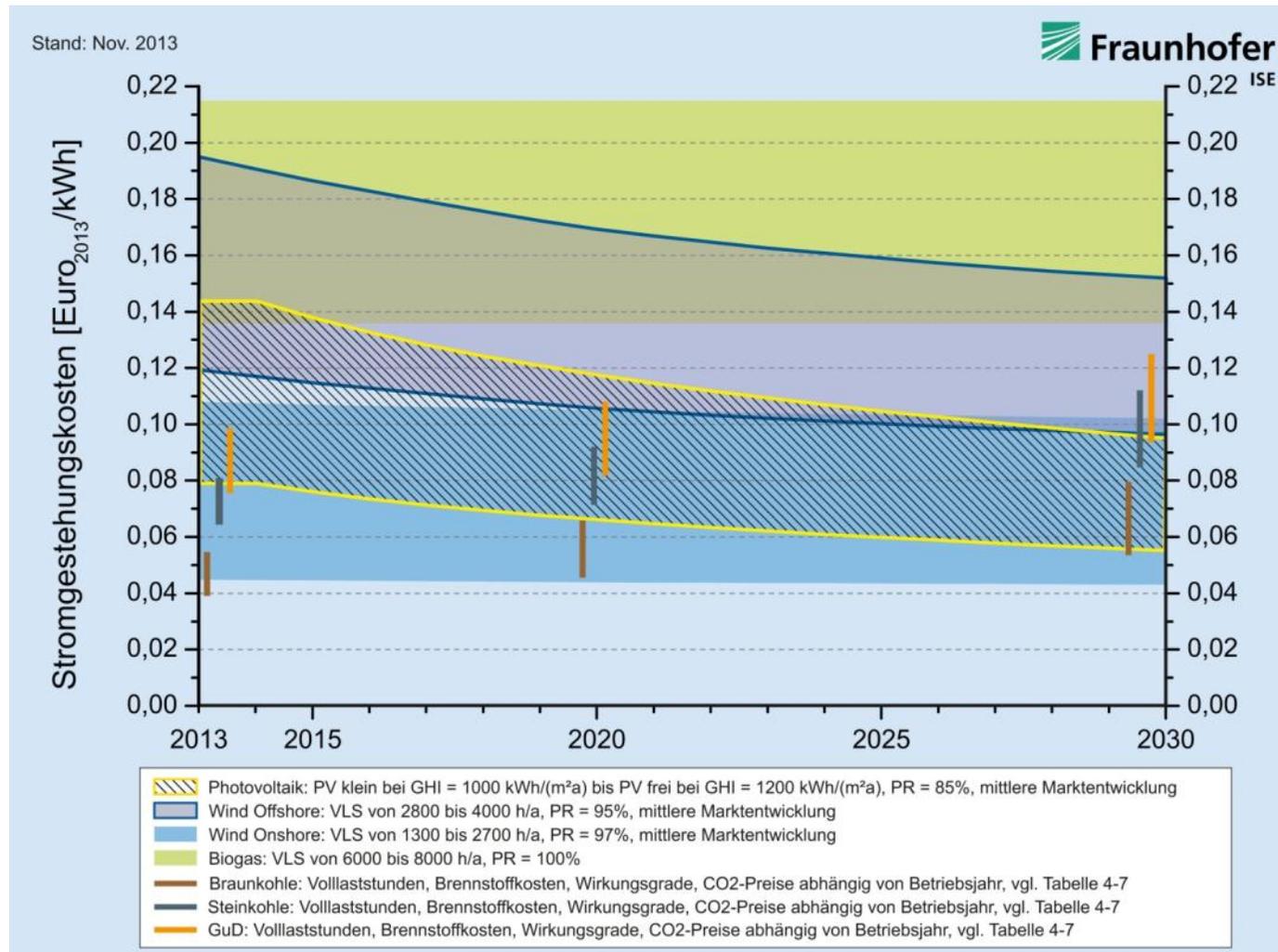
Beispiel Photovoltaik



Dominierende Faktoren:

- Einstrahlung
- Investition
- Effizienz
- **WACC !**

Entwicklung Stromgestehungskosten Deutschland



STROMGESTEHUNGSKOSTEN IN LÄNDERN MIT HOHER SONNENEINSTRahlung

Finanzierungs- und Betriebskosten

Regionen mit hoher Einstrahlung

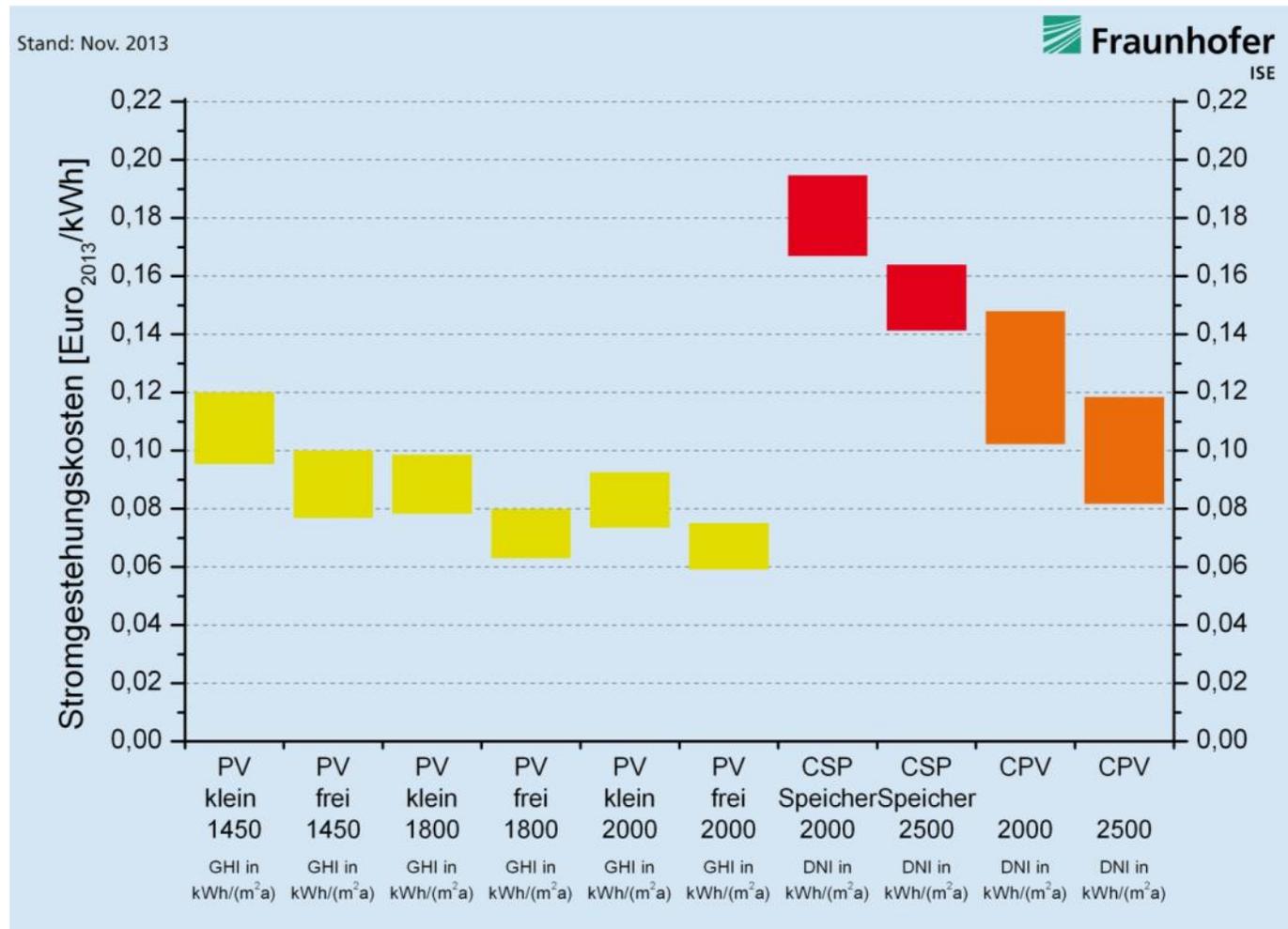
| | PV Klein | PV Groß/ Frei | CSP | CPV |
|---|-------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| Lebensdauer [in Jahre] | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Eigenkapital-Anteil | 20% | 20% | 30% | 30% |
| Fremdkapital-Anteil | 80% | 80% | 70% | 70% |
| Eigenkapital-Rendite | 8,0% | 10,0% | 13,5% | 13,5% |
| Fremdkapital-Zins | 6,0% | 6,0% | 7,0% | 7,0% |
| WACC _{nom} (Weighted Average Cost of Capital) | 6,4% | 6,8% | 9,7% (8,8%)* | 9,7% (8,2%)* |
| WACC _{real} | 4,7% | 4,7% | 7,5% (6,7%)* | 7,5% (6,1%)* |
| Jährliche var. Betriebskosten [in Euro/kWh] | | | 0,028 | |
| Jährliche fixe Betriebskosten [in Euro/kW] | 35 | 35 | | 35 |
| Jährliche Degression Stromoutput | 0,2% | 0,2% | 0,2% | 0,2% |

- Fiktiver Standort
- Keine dezidierte Marktanalyse, deutsche Investitionskosten angenommen
- Oftmals höhere Risiken in Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung
- Höheren Finanzierungskosten in Realität zu beobachten
- Kein Markt so reif wie Deutschland

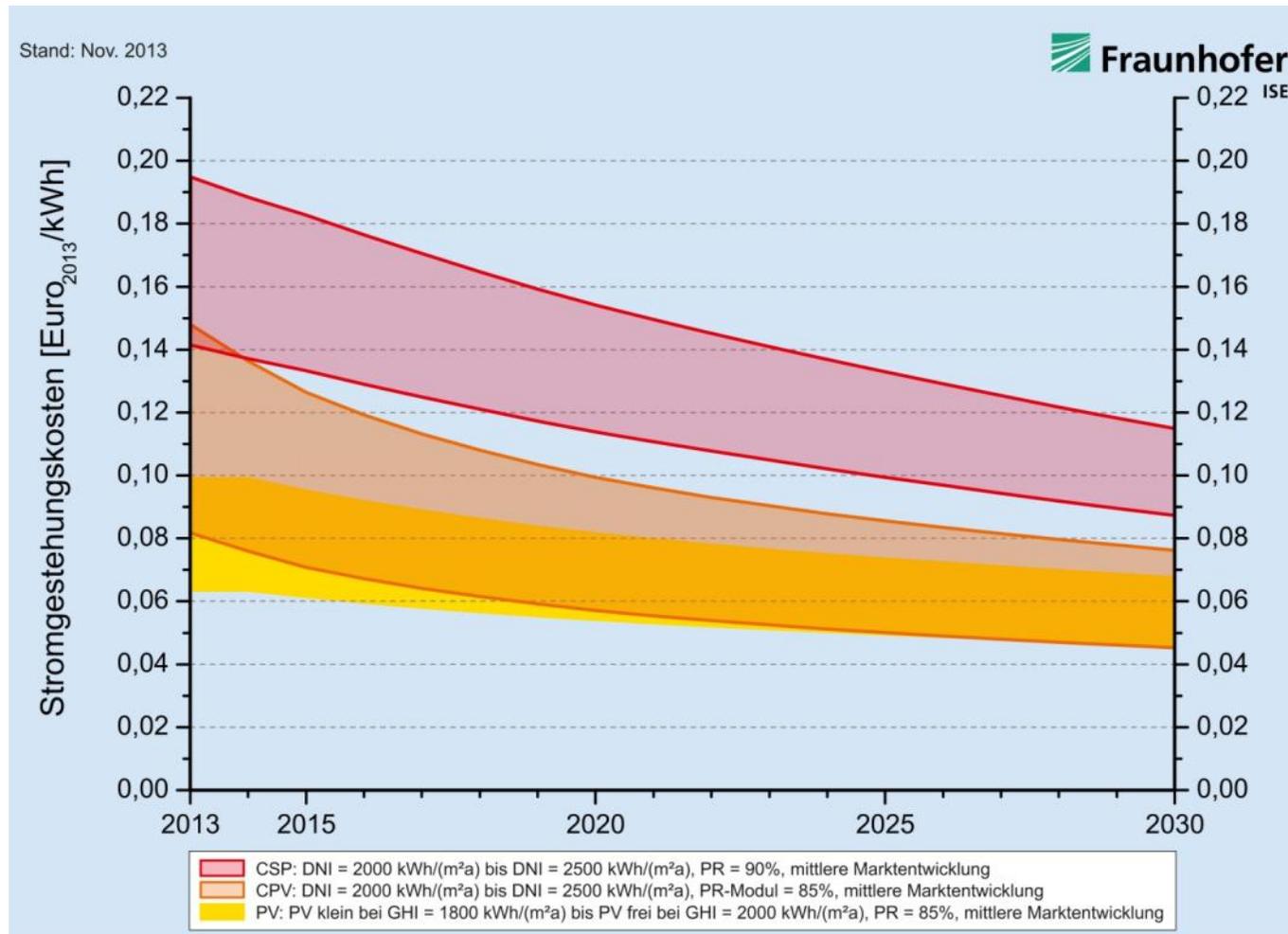
*absinkende Finanzierungskosten bis zum Jahr 2030 für Technologien mit geringer Marktdurchdringung im Jahr 2013

Solare Stromgestehungskosten

Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung



Entwicklung der solaren Stromgestehungskosten Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung



Zusammenfassung

Aktueller Stand Deutschland

- Erheblicher Einfluss der Finanzierungskosten auf Stromgestehungskosten
- Breite Spannweite reflektiert reale Marktsituation
- Stromgestehungskosten von PV haben Anschluss an andere Technologien erreicht und liegen deutlich unterhalb des Endkundenstrompreises
- PV kann für weiteren Anstieg der EEG-Umlage nicht verantwortlich sein
- An sehr guten Onshore-Windstandorten produzieren WEA Strom zu geringeren Kosten als neue Steinkohle- oder GuD-Kraftwerke
- Kosten für Biomasse und Offshore-WEA sind am höchsten, berücksichtigen aber nicht Wärmeauskopplung bzw. Vorteil hoher Volllaststunden
- Braunkohle profitiert am stärksten von niedrigen CO₂-Zertifikatspreisen
- Gaskraftwerke mit Vorteil hoher Flexibilität

Zusammenfassung

Prognose Deutschland

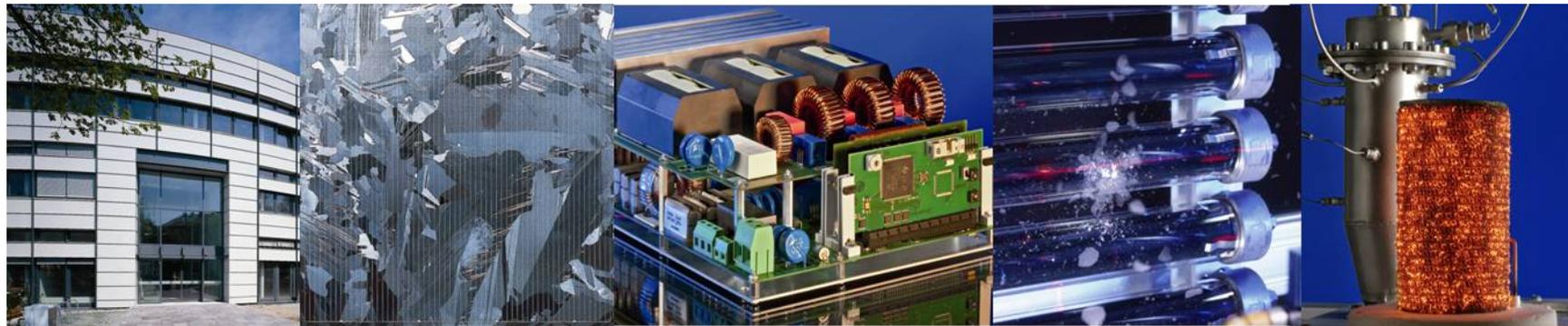
- Stromgestehungskosten von PV und WEA werden weiter sinken, die der konventionellen Kraftwerke deutlich steigen
- PV kann die durchschnittlichen Stromgestehungskosten aller fossiler Kraftwerke bis zum Jahr 2030 deutlich unterbieten
- Onshore-WEA werden an windreichen Standorten spätestens im Jahr 2020 mit Braunkohlekraftwerken gleichziehen
- Offshore-WEA haben verglichen mit Onshore-WEA noch ein starkes Kostenreduktionspotenzial
- Keine Lernraten für Biogas erkennbar

Zusammenfassung

Regionen mit hoher Solareinstrahlung

- Hoher Einfluss der Finanzierungskosten kann Vorteil der hohen Sonneneinstrahlung kompensiert
 - »Solarenergiemärkte« teils noch in Frühphase, aber mit wachsender Dynamik
 - PV langfristig billigste Technologie zur Stromerzeugung
 - CSP bis zum Jahr 2030 mit Kosten von Steinkohlekraftwerken
 - CSP wird günstiger als Gaskraftwerke, auch ohne Berücksichtigung von Opportunitätskosten
-
- Technische und ökonomische Integration des PV-Stroms essentiell

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Dr. Thomas Schlegl

thomas.schlegl@ise.fraunhofer.de

www.ise.fraunhofer.de

www.ise.fraunhofer.de/de/daten-zu-erneuerbaren-energien