

# AKTUELLE FORSCHUNGSTHEMEN PHOTOVOLTAIK - MODULE UND KRAFTWERKE

40 JAHRE  
FRAUNHOFER ISE  
#CreatingTheEnergyFuture



Harry Wirth

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Web-Forum Photovoltaik 2021

Online, 7.9.2021

[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

# Fraunhofer ISE

## Forschen für die Energiewende

### **Institutsleiter:**

Prof. Dr. Hans-Martin Henning  
Prof. Dr. Andreas Bett

**Mitarbeitende:** rund 1250

**Budget 2020:** 104,8 Mio. EUR

**Gegründet:** 1981



Foto: © Fraunhofer ISE / Guido Kirsch

# Fraunhofer ISE

## Geschäftsfelder

### ENERGIETECHNOLOGIEN UND -SYSTEME

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

Energieeffiziente Gebäude

Solarthermische Kraftwerke und  
Industrieprozesse

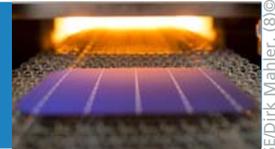
Wasserstofftechnologien und  
Elektrische Energiespeicher

Leistungselektronik, Netze und  
Intelligente Systeme

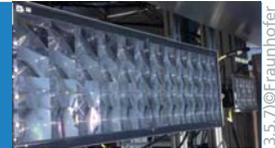
### PHOTOVOLTAIK

Dr. Andreas Bett

Silicium-Photovoltaik



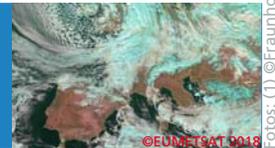
III-V- und Konzentrator-  
Photovoltaik



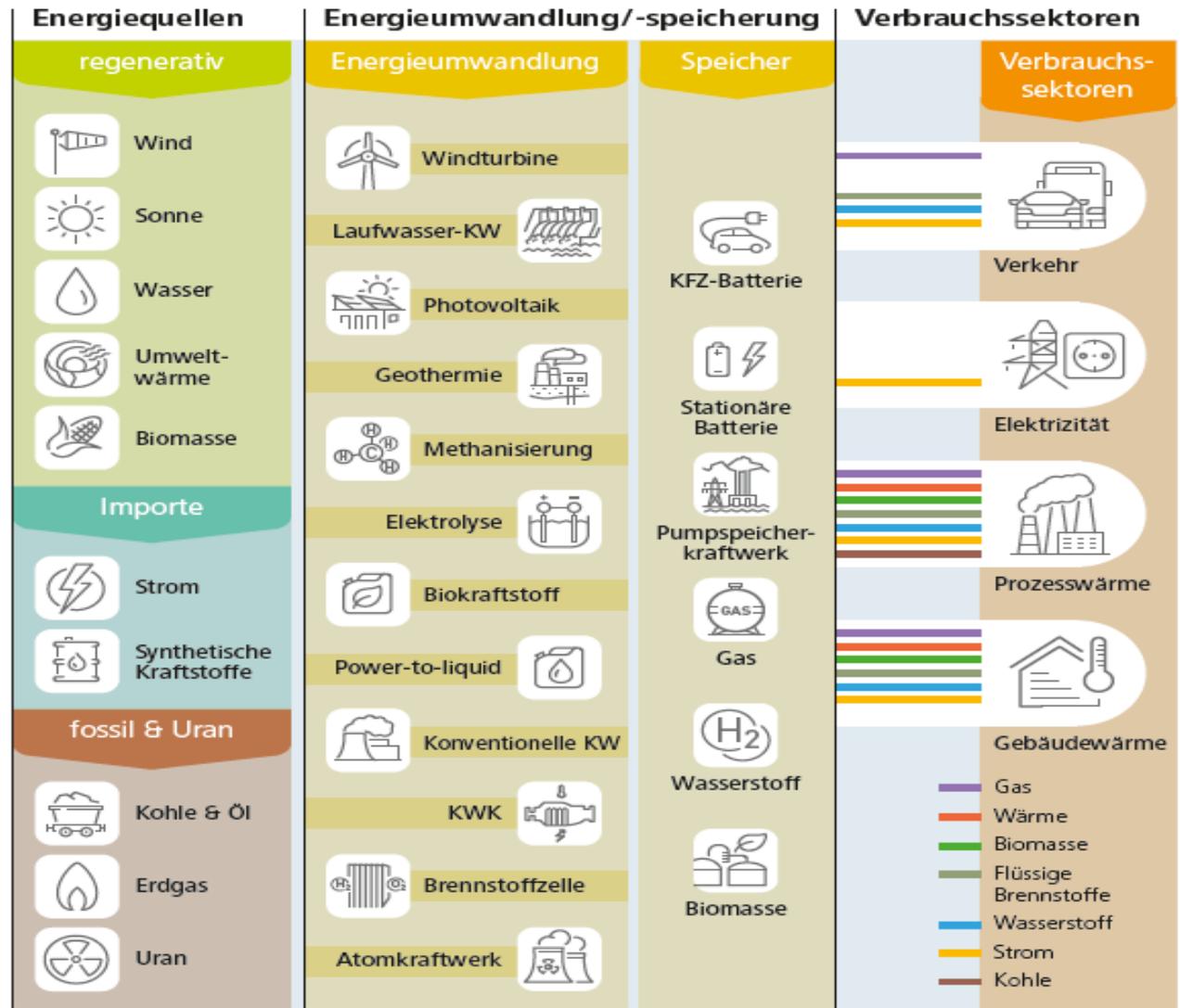
Neuartige Photovoltaik-  
Technologien



Photovoltaische Module  
und Kraftwerke



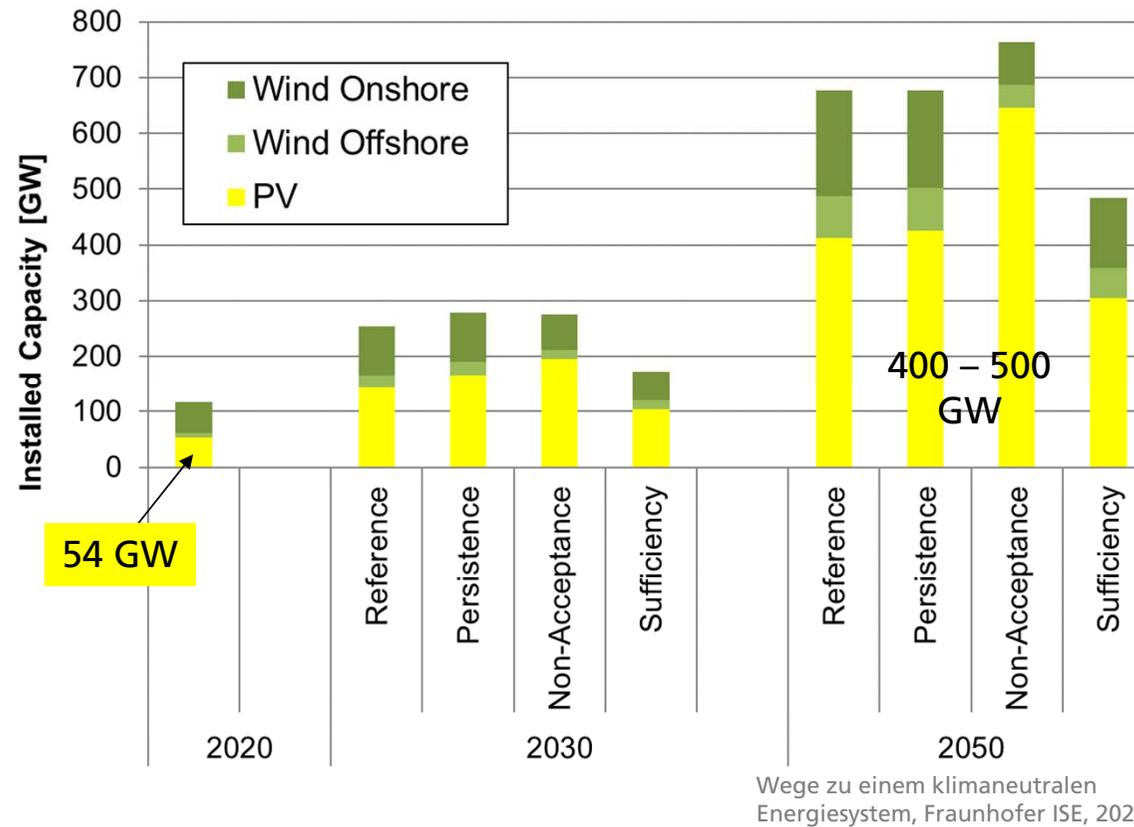
# Warum PV-Forschung? Szenarien Deutschland



Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen, Studie des Fraunhofer ISE. Februar 2020

# PV-Bedarf für die Energiewende

## Szenarien Deutschland

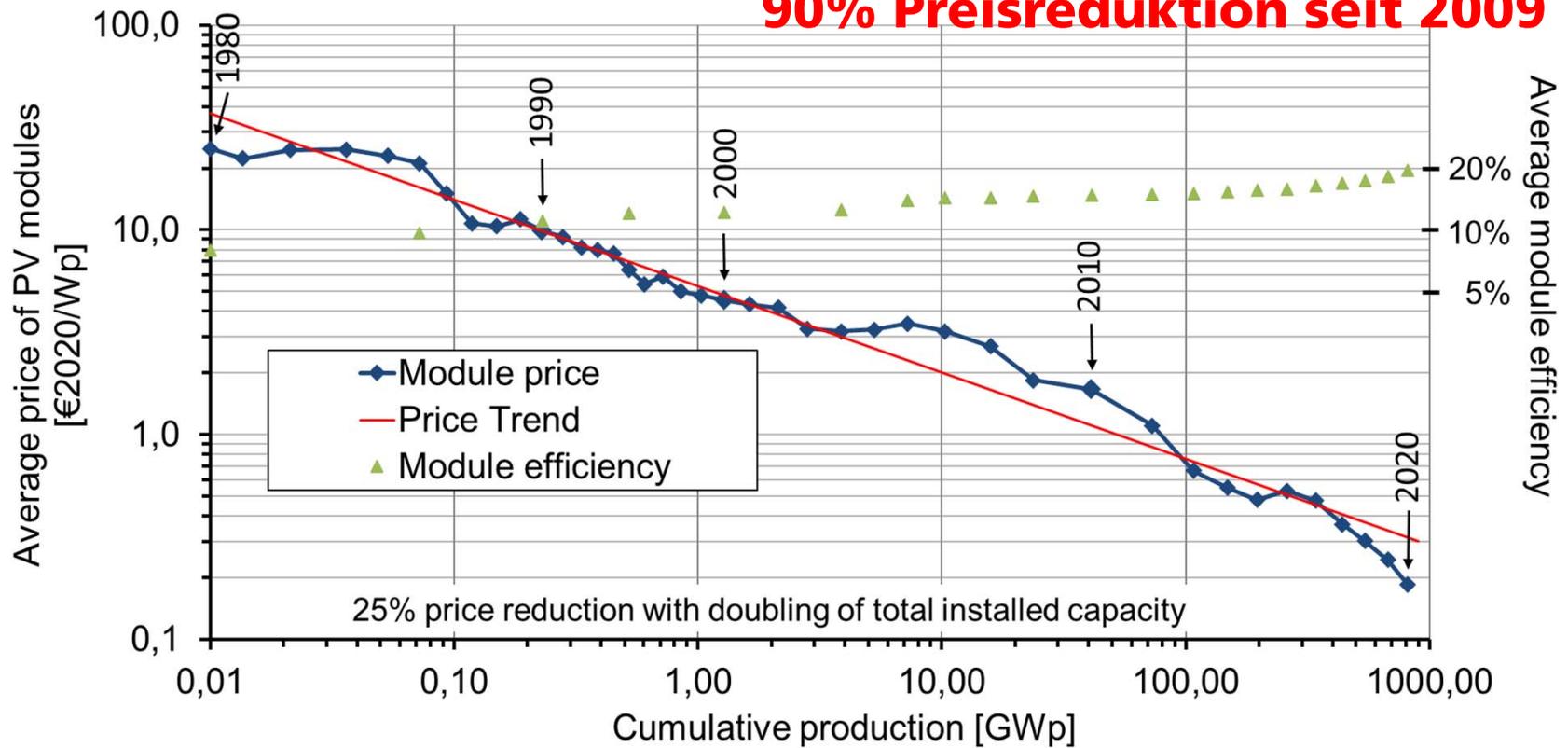


# Photovoltaik

## Preisentwicklung Module

**PV-Module:**

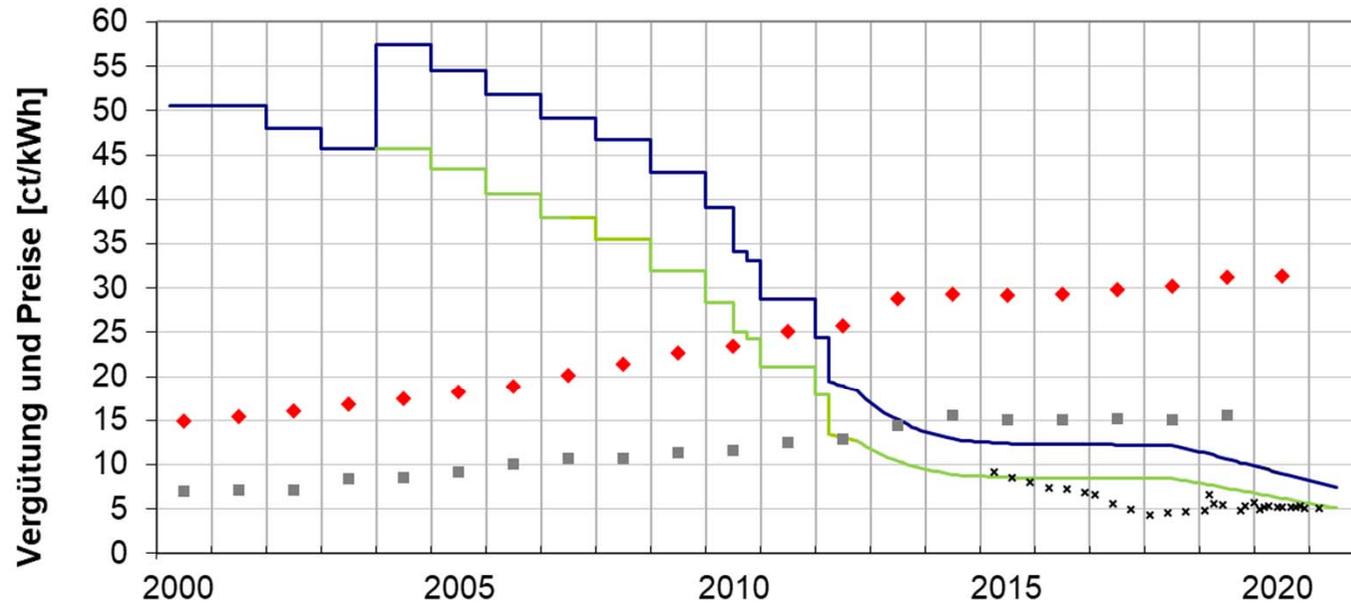
**90% Preisreduktion seit 2009**



Price data: 1980-2010 estimation from different sources: Strategies Unlimited, Navigant Consulting, EUPD, pvXchange; from 2011: IHS Markit

# Photovoltaik

## Kostenentwicklung Solarstrom: Historie



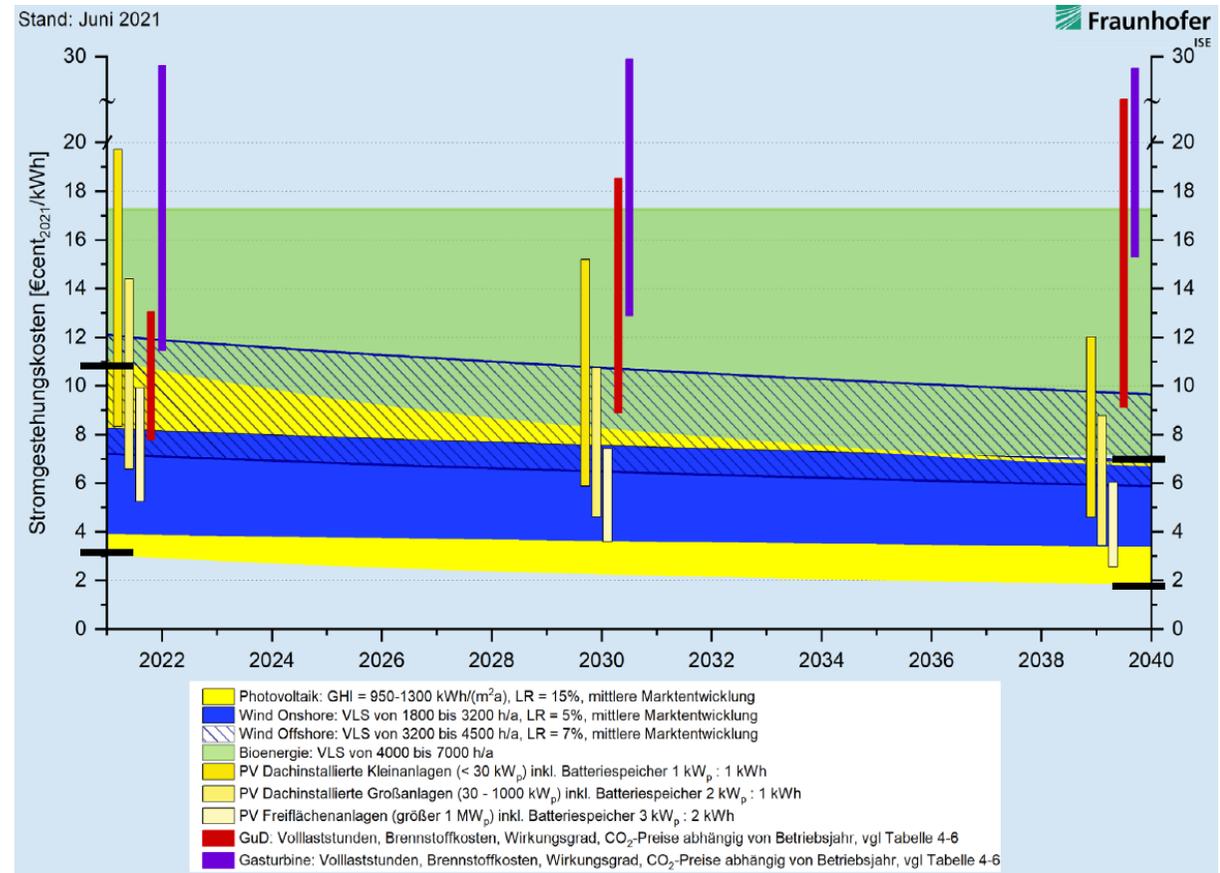
### Vergütung für PV-Strom und Strompreise

[www.pv-fakten.de](http://www.pv-fakten.de)

# Photovoltaik

## Kostenentwicklung Solarstrom: Prognose

Lernkurvenbasierte Prognose von Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien und konventioneller Kraftwerke (Neuanlage im Bezugsjahr) in Deutschland bis 2040.

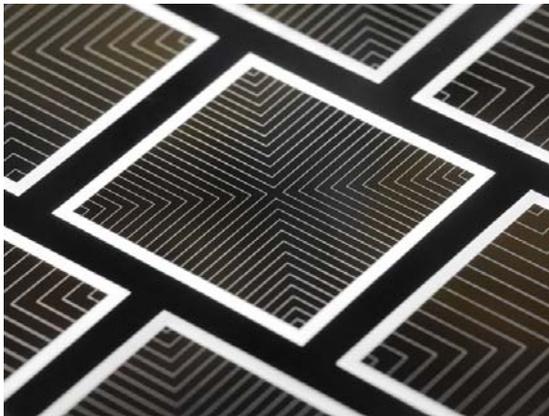


Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, Studie des Fraunhofer ISE, Juni 2021.

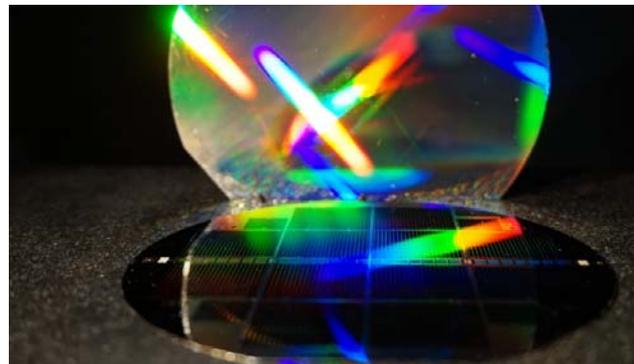
# Technologien

## Höchsteffizienz

- Maximierung der Leistungsdichte
  - Solarzelle (Passivierung, Tandemtechnologie)
  - Verbindungstechnik (Schindeln)



TOPCoRE Solarzelle, **26%** Wirkungsgrad, Weltrekord Fraunhofer ISE 04/2021 für beidseitige Kontakte.



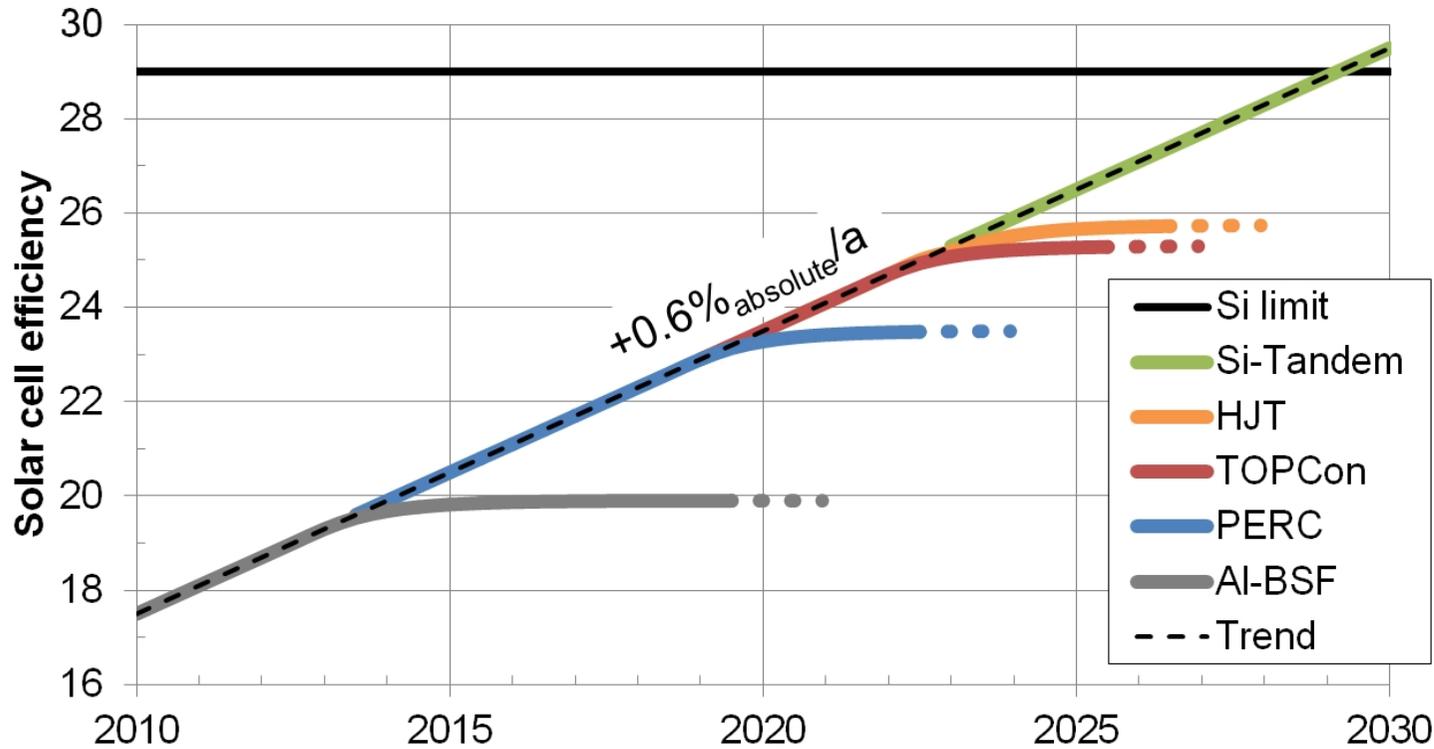
III-V//Silicium Solarzelle, **35,9%** Wirkungsgrad, Weltrekord Fraunhofer ISE 04/2021 für monolithische III-V//Si Tandemsolarzellen.



Schindelstring auf strukturierter Folie, kein CTM-Wirkungsgradverlust, Fraunhofer ISE Patent.

# Technologien

## Effizienz PV-Zellen

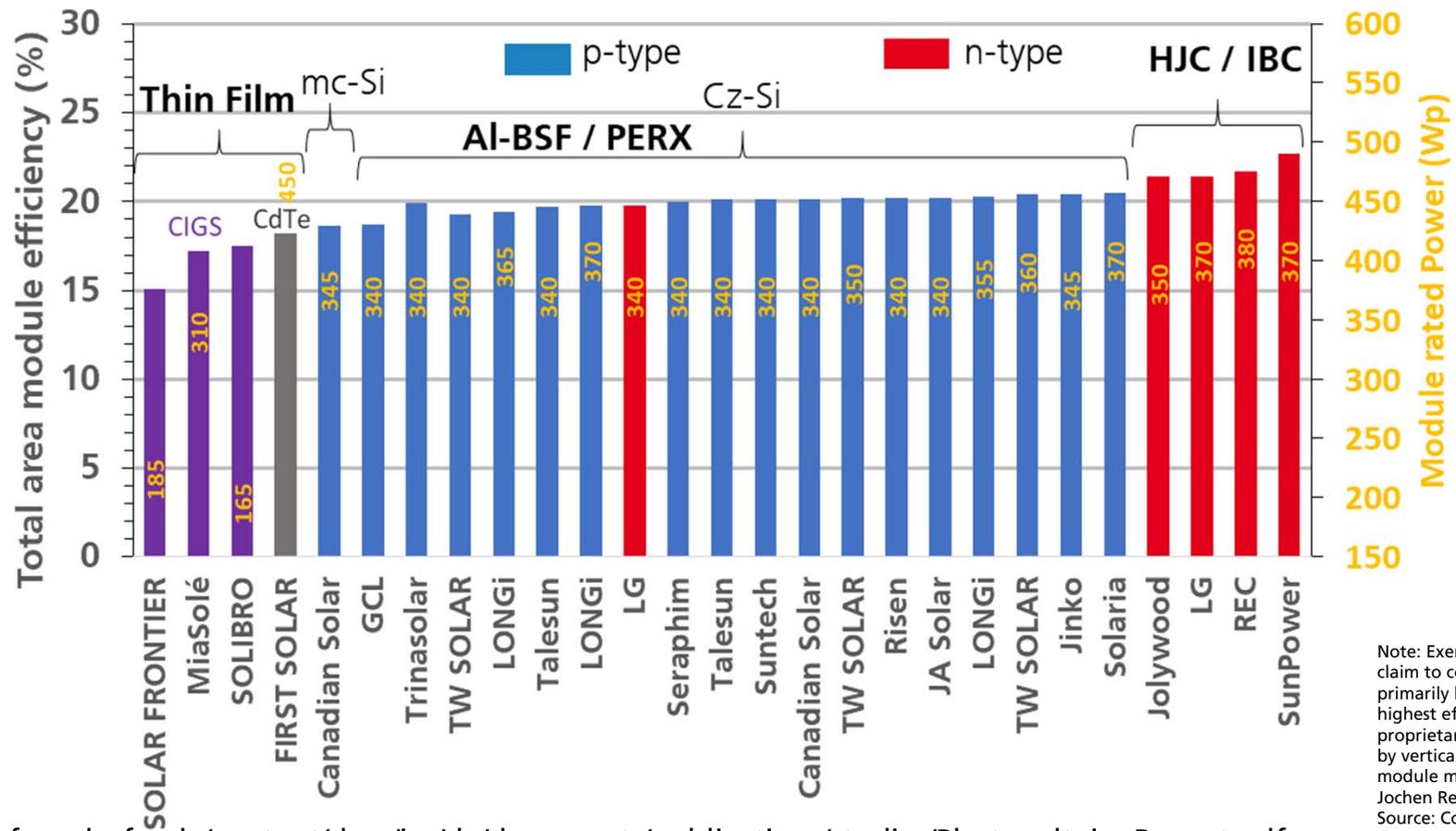


Entwicklung und Prognose der Wirkungsgrade verschiedener Solarzellenkonzepte in der industriellen Produktion

H. Wirth, PV Module Technology, de Gruyter, 2020; Hermle, M. Silicon solar cells - current production and future concepts, Vortrag auf der Jahrestagung der European Technology and Innovation Platform Photovoltaics, Brüssel, May 2017.

# Technologien

## Effizienz PV-Module



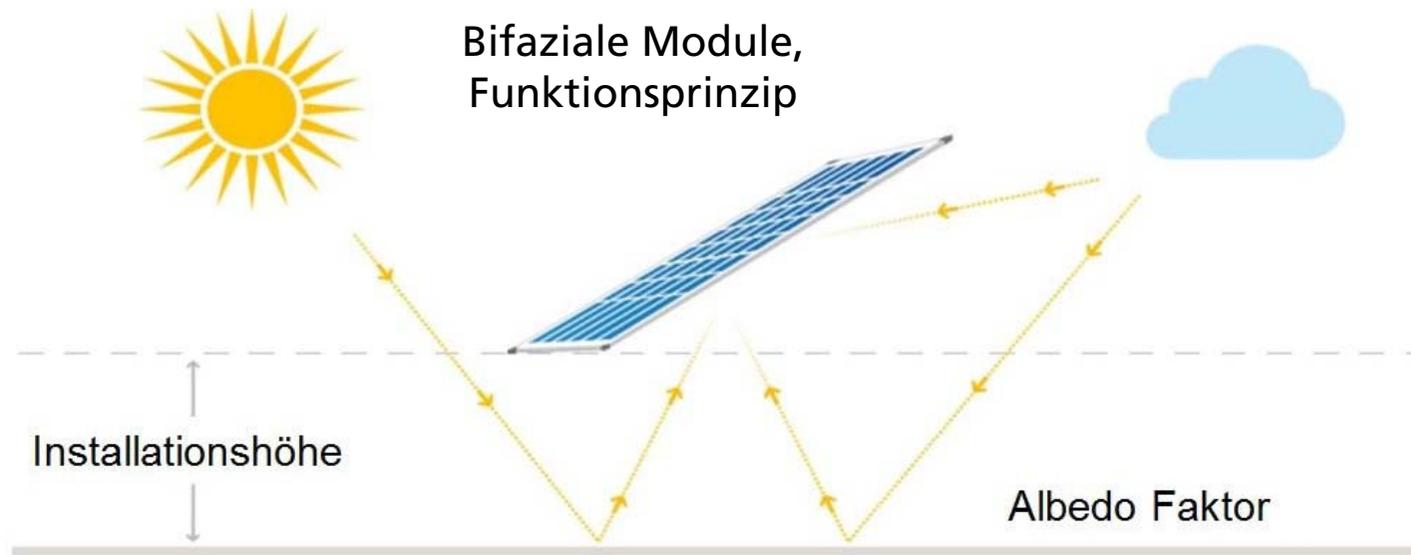
Note: Exemplary overview without claim to completeness; Selection is primarily based on modules with highest efficiency of their class and proprietary cell concepts produced by vertically integrated PV cell and module manufacturers; Graph: Jochen Rentsch, Fraunhofer ISE. Source: Company product data sheets. Last update: Nov. 2019.

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

# Technologien

## PV-Module

- hocheffiziente Solarzellen (Modul 19-22% Wirkungsgrad, 350-600 Watt)
- dünne Glas-Glas-Module, Glasbeschichtung, Zellverbindung
- bifaziale PV-Module (Potenzial Mehrertrag 5-15%)



# Technologien

## PV-Module

- hocheffiziente Solarzellen (Modul 19-22% Wirkungsgrad, 350-600 Watt)
- dünne Glas-Glas-Module, Glasbeschichtung, Zellverbindung
- bifaziale PV-Module (Potenzial Mehrertrag 5-15%)



Bifaziale Monitoringanlage, Fraunhofer ISE

# Technologien

## Morpho-Color®

- Ziel: farbige und effiziente InPV
- 3D photonische Struktur, bionisch inspiriert von Morpho-Schmetterling
- Oberflächenstrukturierung und –beschichtung, entwickelt am Fraunhofer ISE
- hohe Farbsättigung, beliebige Spektralfarben
- winkelunabhängig stabiler Farbeindruck
- PV Leistungsminderung durch Morpho-Color® nur ca. 7 % relativ



Modul	$P_{mpp}$ [W]	$I_{sc}$ [A]
Referenz	156	<b>5.74</b>
Rot	146.7	<b>5.33</b>
Blau	146.5	<b>5.36</b>
Grün	146.4	<b>5.37</b>

# Technologien

## PV-Wechselrichter

- Mikro-WR (< 1,2 kVA, Wirkungsgrad < 96,5%)
  - Multi-mpp Tracking, „Smart“ (Monitoring, WLAN)
  - Verlängerte Lebensdauer durch robuste Elektronik, Verzicht auf bewegliche Teile
- String-Wechselrichter (< 10 kVA, Wirkungsgrad < 98%)
  - Trafolos, erhöhte Taktfrequenzen (SiC-Halbleiter)
  - Kompakte Bauweise
- String-Wechselrichter (< 250 kVA, Wirkungsgrad < 99%)
  - Multi-mpp Tracking, DC-Spannung 1500 V
- Zentral-WR (250 – 6000 kVA, Wirkungsgrad < 99%)
  - Hybride Kühlung (Heat-Pipe und Lüfter)



Prüfung eines Solarwechselrichters mit 2,5 Megawatt Leistung im TestLab Power Electronics des Fraunhofer ISE.

# Was bedeutet "Integrierte Photovoltaik"?



# Synergiepotenziale der Integration

- Flächeneffizienz, Verbrauchsnähe, Akzeptanz
- Materialeffizienz (Hülle, Unterkonstruktion)
- Klimaresilienz
- Lokale Wertschöpfung PV



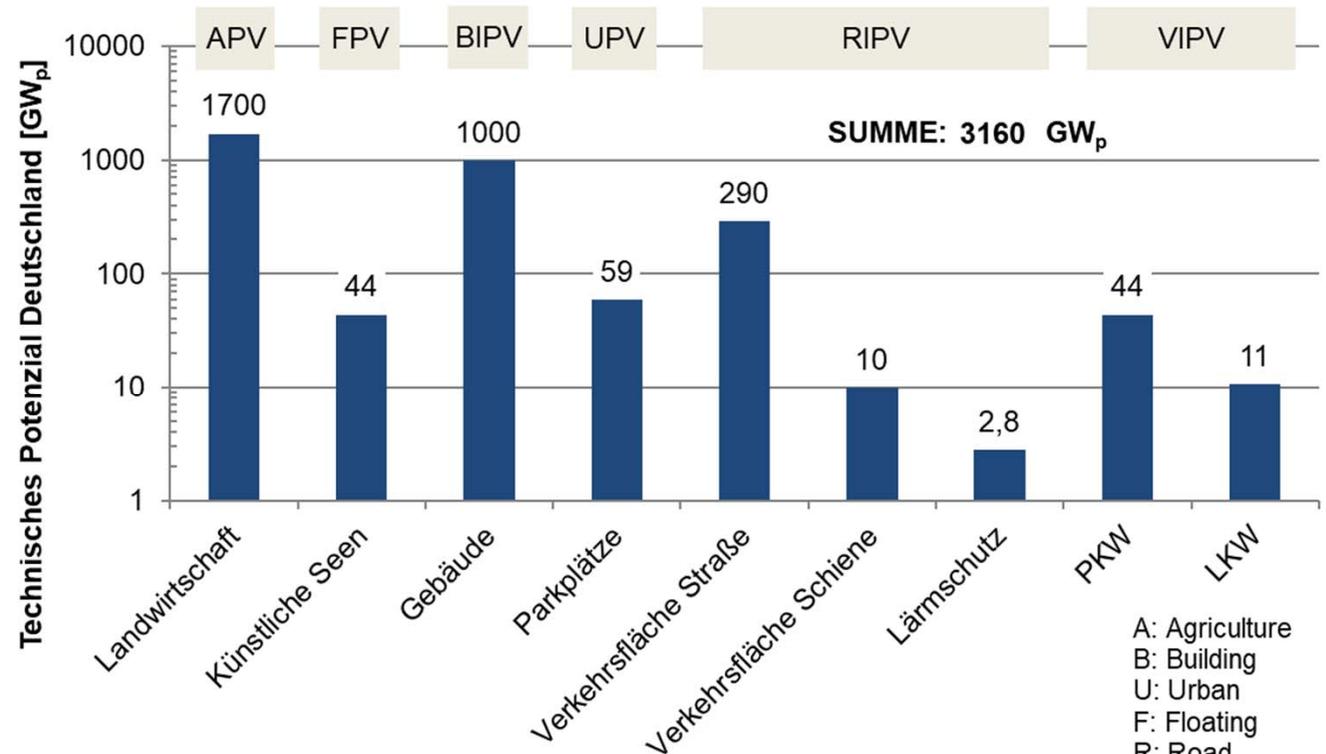
# Potenziale auf Flächenbasis

## Grobe Abschätzung

Theoretisches Potenzial:  
physikalische  
Gesetzmäßigkeiten

**Technisches Potenzial:**  
+ grundlegende technische  
Restriktionen

Wirtschaftlich-praktisches,  
erschließbares Potenzial:  
+ Rechtsrahmen, Kosten,  
Infrastruktur, Akzeptanz,  
Ökologie, Konkurrenz, ...



Annahme: Modulwirkungsgrad 20%

A: Agriculture  
B: Building  
U: Urban  
F: Floating  
R: Road  
V: Vehicle

Wirth H, Eggers J-B, Trommsdorff M, Neuhaus H, Heinrich M, Wieland S, Schill C. Potenziale der Integrierten Photovoltaik in Deutschland. 36. PV-Symposium, ISBN 978-3-948176-14-3, 2021.

# Agri-Photovoltaik (APV)

## Doppelte Ernte auf dem Acker

- Projekt "APV-RESOLA" in Heggelbach im Bodenseekreis
- Fläche ca. 1/3 ha, Durchfahrtshöhe 5m, Flächenverlust Landwirtschaft ca. 8%
- Ergebnisse
  - Methode für Einstrahlungsanalyse und Lichtmanagement
  - Ertrags- und Qualitätsgewinn für schatten-tolerante Kulturpflanzen
  - APV-Ernte 2018: Winterweizen +2,7%, Kartoffel + 11%, Strom 1.284 kWh/kWp
  - Landnutzungsrate +80..90%



APV Versuchsanlage mit 194 kWp bifaziale PV-Module

# Agri-Photovoltaik (APV)

## Doppelte Ernte im Obstbau

- Ziele
  - Steigerung der Resilienz im Obstbau
  - ressourceneffiziente Landnutzung
  - Errichtung einer Forschungsanlage
- F&E-Themen
  - Lichtmanagement, Anlagendesign, Wirtschaftlichkeit, pflanzenbauliche Parameter, Landschaftsästhetik
- Laufendes Projekt: „APV-Obstbau“, Partner:



Hagelschutznetze im Obstbau werden durch eine Agri-PV-Anlage überflüssig (© BayWa r.e.)

# Schwimmende Photovoltaik (FPV)

## Projekt PV2float: Strom vom gefluteten Braunkohletagebau

- Entwicklung schwimmender PV-Kraftwerke
  - Kostenreduktion
  - Integration in die Raumplanung
  - nachhaltige Umsetzung im Megawatt-Maßstab
- Aufbau von Pilotanlagen in der Lausitz
- Analyse der Wirtschaftlichkeit, Ökologie, Potenziale und Akzeptanz der Technologie in Deutschland
- Laufendes Projekt „PV2float“, Partner:



Visualisierung FPV auf Braunkohlesee  
(© Greenpeace Energy)

**RWE LEAG**

**VoltaSolar**  
voelt altijd beter

**VDE RENEWABLES**

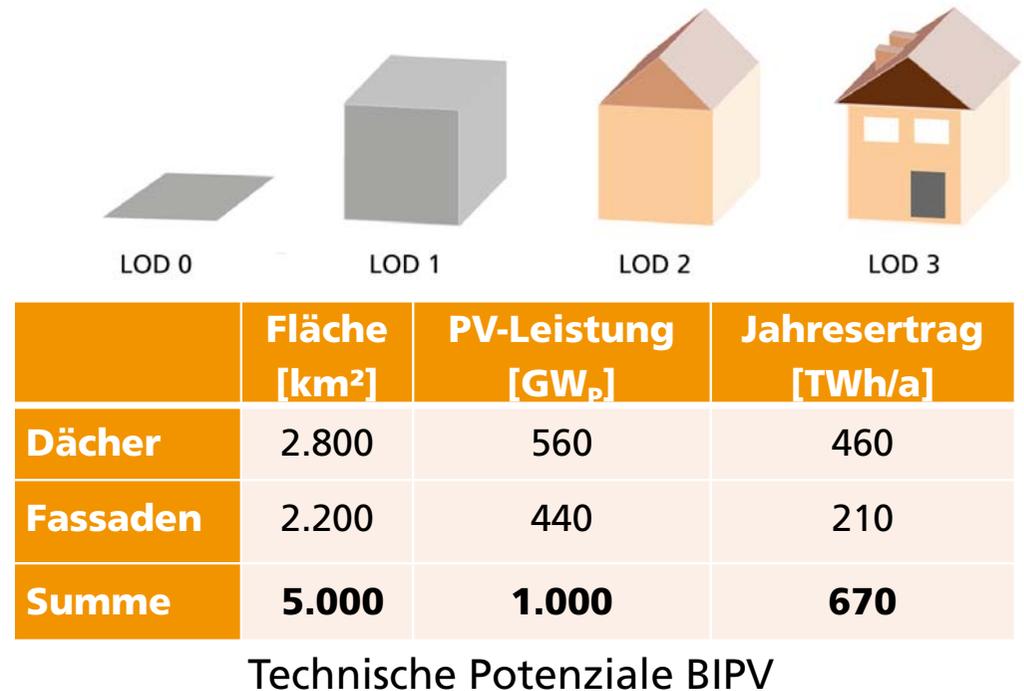


**Heckert Solar**  
Die Energiekompetenz

# Bauwerkintegrierte PV (BIPV)

## Potenzialanalyse

- deutschlandweiter Gebäudedatensatz im Detailgrad LOD1
- Bruttofläche Dach 6.101 km<sup>2</sup>, Fassade 12.416 km<sup>2</sup>
- Ausschlüsse und Abschläge (73%) für
  - geringe Einstrahlung < ca. 500 kWh/(m<sup>2</sup>a)
  - kleine Flächenabschnitte (< 7m<sup>2</sup>)
  - Fassadenausschnitte (30%), Verschattung, Dachaufbauten
  - ungünstige Modulformate
- technisches Potenzial: **1000 GW<sub>p</sub>**



Eggers J-B, Behnisch M, Eisenlohr J, Poglitsch H, Phung W F, Münzinger M, Ferrara C, Kuhn T E. PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland, 35. PV-Symposium, 2020, ISBN 978-3-948176-09-9.

# Bauwerkintegrierte PV (BIPV)

## Projektbeispiele vom Fraunhofer ISE Campus



„Traditionelle“ Ansicht



Unsichtbare Schaltkreise, blendfreie Oberfläche



Künstlerisches Design

# Bauwerkintegrierte PV (BIPV)

## Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
  - Steildach: Platten für Schindelmontage
  - Flachdach: Folie
- Kaltfassade, bspw. vorgehängte, hinterlüftete Fassade (VHF)



Gebäudeintegrierte PV (BIPV, ISE-Labor)

# Bauwerkintegrierte PV (BIPV)

## Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
  - Steildach: Platten für Schindelmontage
  - Flachdach: Folie
- Kaltfassade, bspw. vorgehängte, hinterlüftete Fassade (VHF)
- Wärmedämmverbundsystem (WDVS)
- Isolierglas

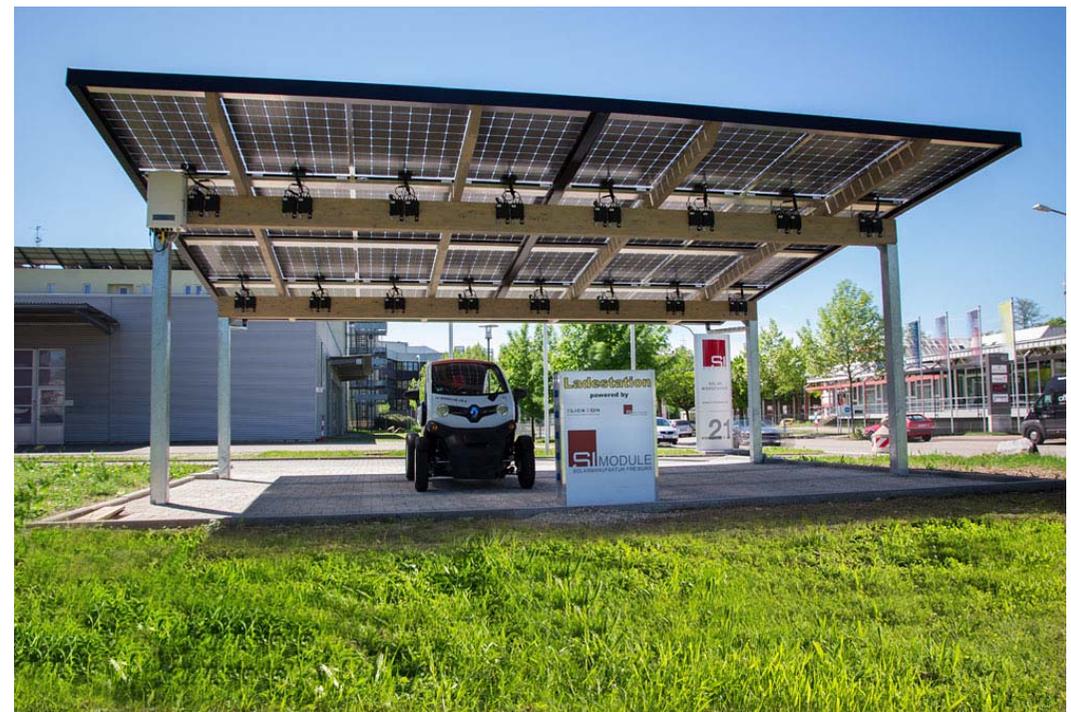


Gebäudeintegrierte PV (BIPV, ISE)

# Bauwerkintegrierte PV (BIPV)

## Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
  - Steildach: Platten für Schindelmontage
  - Flachdach: Folie
- Kaltfassade, bspw. vorgehängte, hinterlüftete Fassade (VHF)
- Wärmedämmverbundsystem (WDVS)
- Isolierglas
- Einfachverglasung



Carport (SI Module)

# PV in Verkehrswegen (RIPV)

## PV-Lärmschutz

- Ziel: Entwicklung von wandintegrierten PV-Elementen für den Lärmschutz, auch Nachrüstung
- F&E-Themen
  - Materialien und Prozesse für schalldurchlässige, robuste Leichtbaumodule
  - Materialien und Modelle für optimierte bifaziale Module
  - Prüfung, Erprobung und Monitoring
  - Kostenanalyse, Geschäftsmodelle und rechtliche Rahmenbedingungen
- Laufendes Projekt „PVwins“, Partner:



Semitransparente PV-Lärmschutzwand (© R. Kohlhauer GmbH)



Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim



Eisenbahn-Bundesamt

# PV in Verkehrswegen (RIPV)

## PV-Straßenüberdachung

### ■ Ziele

- Entwicklung eines Prototyps
- Bau und messtechnische Begleitung eines Demonstrators
- Evaluierung Stromertrag und Synergieeffekte

### ■ Laufendes Projekt „PV-Süd“, Partner:



## Freiburger Forscher wollen Strom über Straßen erzeugen



Von Jelka Louise Beule

Do, 29. April 2021 um 17:52 Uhr

Kirchzarten | 9

**BZ-Plus | Stromerzeugung über dem Verkehr: Das Freiburger Fraunhofer-Institut erforscht Straßenüberdachungen mit Photovoltaik-Anlagen. Politiker wünschen sich ein Modellprojekt über der B31 im Dreisamtal.**



So könnte eine Straßenüberdachung mit Photovoltaik-Anlagen aussehen: Die Visualisierung zeigt eine Projektidee aus der Schweiz über die dortige Autobahn A4.

Foto: LABOR3 Architektur GmbH, Bonstetten - Schweiz

# Fahrzeugintegrierte PV (VIPV)

## Potenzialanalyse

- aktuelle Zulassungszahlen 47,7 Mio. PKW und 5,6 Mio. Nutzfahrzeuge
- PV-Module in der Hülle von E-PKW und E-LKW
- Nutzung horizontaler und vertikaler Flächen (Kat. 1-3)
- Annahmen zu Nutzbarkeitsfaktoren
- technisches Potenzial ca. **55 GW<sub>p</sub>**
- Prognose E-PKW: kumulierte Zulassungen bis 2030 ca. 6 Mio. (Deloitte 2020)

Oben: gekrümmtes Autodach mit integriertem PV Modul (Schindelstrings, MorphoColor®)

Unten: Nutzfahrzeuge mit integrierten PV Leichtbau-Modulen



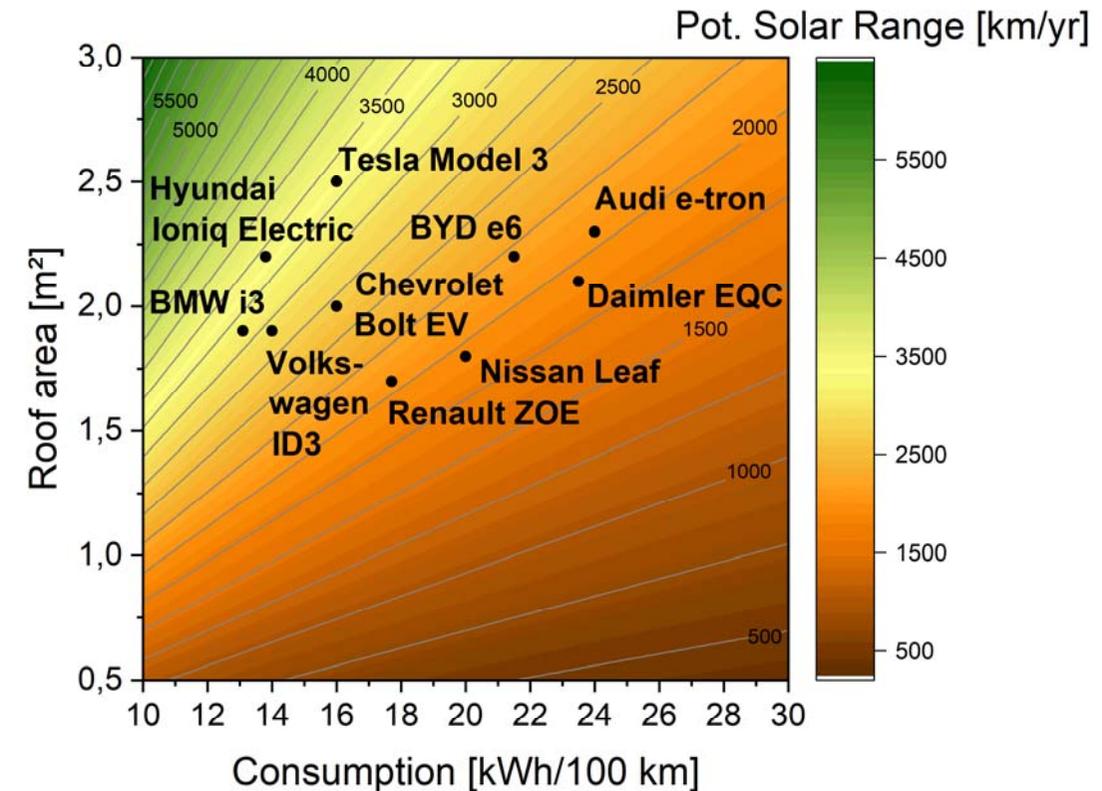
# Fahrzeugintegrierte PV (VIPV) Potenzialanalyse

## Ergebnisse E-PKW

- Größte solare Reichweite bei großer Dachfläche und geringem Verbrauch
- 1.900 – 3.400 km/Jahr solare Fahrleistung mit Panoramadach (mittlere Fahrleistung 15.000 km)
- **13-23% Verbrauchseinsparung**

## Annahmen

- keine Fehlanpassungsverluste wegen Krümmung<sup>1</sup>
- Energie wird vollständig für Antrieb genutzt
- Keine Verschattung



[1] Energy Yield Modelling of 2D and 3D Curved Photovoltaic Modules, S. Neven-du Mont et al., 37<sup>th</sup> EU PVSEC (2020)

# Fahrzeugintegrierte PV (VIPV)

## Solar-LKW

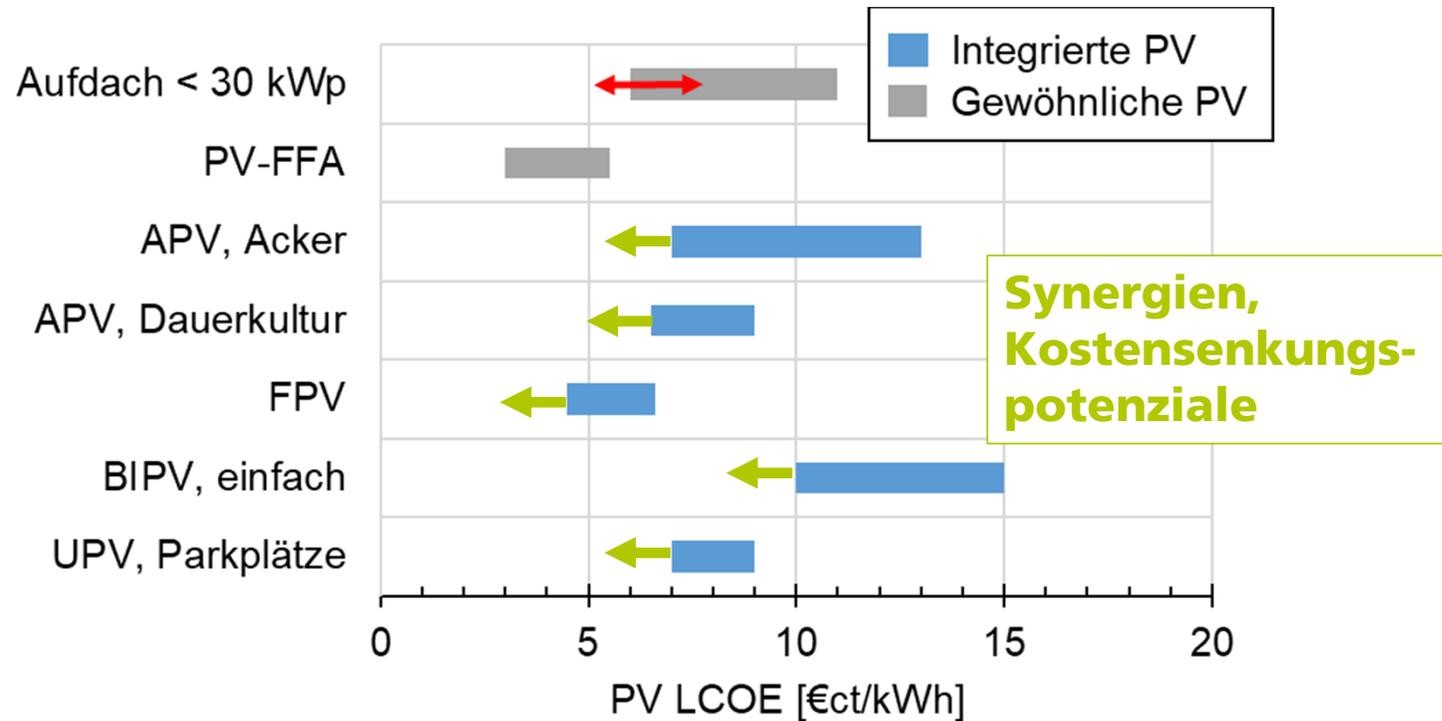
- Ziel: Fahrzeugintegrierte Photovoltaik für das On-Board-Laden von Elektro-Nutzfahrzeugen
- F&E-Themen
  - leichte und robuste PV-Modulen für die nachträgliche Aufdachmontage
  - Konzeption und Prozessentwicklung einer PV-Modulfertigungslinie
  - Leistungselektronikkomponenten
  - Energieprognosemodell
- Laufendes Projekt "Lade-PV", Partner:



PV-Module auf Nutzfahrzeugen



# Stromgestehungskosten (LCOE)

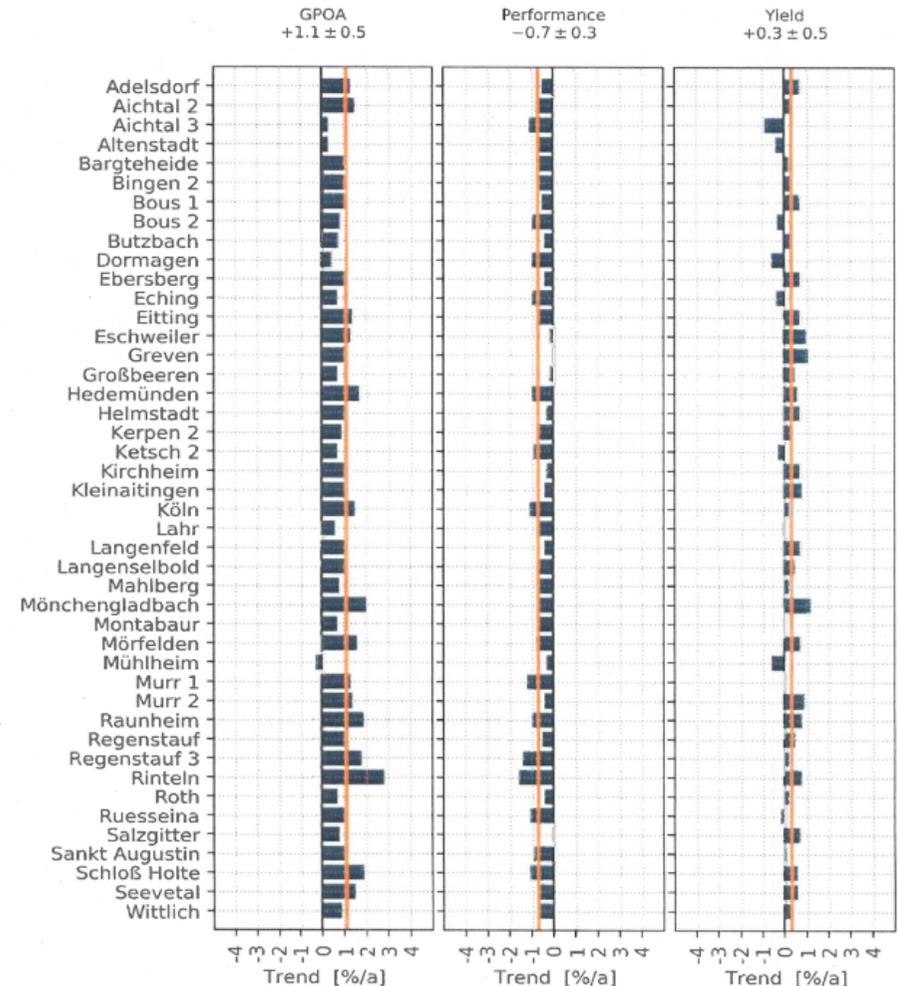


Estimated LCOE for new PV systems in Germany

Sources: Levelized Cost of Electricity- Renewable Energy Technologies, Fraunhofer ISE, 2021; AGRIVOLTAICS: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition, A Guideline for Germany, 2020; Personal communication; Estimations

# Degradation

- Datenanalyse für 44 PV-Kraftwerke (0,5-1,5 MW<sub>p</sub>) in Deutschland, mit Wartungsvertrag
- 11 Jahre Betrieb, 200.000 Module, 880 Wechselrichter
- senkrechte Linien: Mittelwert der Abweichungen über alle Anlagen und Betriebsjahre
- jährlichen Einstrahlung: +1,1%/a (Mittel)
- Performance Ratio: -0,7%/a, davon
  - Moduldegradation: -0,14%/a
  - Wechselrichterausfälle etc.: -0,56%/a
- Zunahme des Stromertrags: +0,3%/a

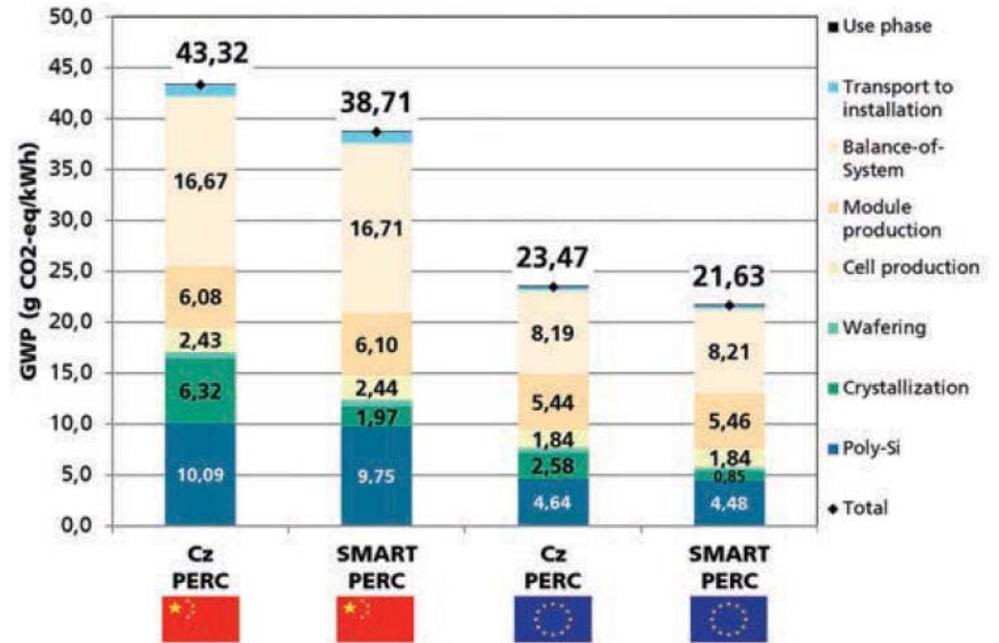


Kiefer, K. et al.: "Degradation in PV Power Plants: Theory and Practice" Proceedings of the 35th EUPVSEC, Marseille, 2019.

# Nachhaltigkeit

## CO<sub>2</sub>-Bilanz PV-Strom

- PV Kraftwerk: 15 kW<sub>p</sub> Dachanlage, PERC-Zellen
- Herstellung: China bzw. EU
- Betrieb: mittlerer europäischer Standort
- Jahressumme Einstrahlung in Modulebene (POA): 1331 kWh/m<sup>2</sup>
- Ertragsrelevante Degradation: 0,7%/a
- Spez. Stromproduktion in 30 Jahren: 29 MWh/kW<sub>p</sub>
- Ergebnis: CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro kWh AC Stromproduktion (g CO<sub>2</sub>-äq/kWh)



Global Warming Potential (GWP) für PV-Strom

Brailovsky P, Friedrich L, Nold S, Riepe S, Rentsch J. Sustainable PV manufacturing solutions for relaunching the European PV manufacturing industry, PV International ed. 46, 2021

# Nachhaltigkeit

## Energierücklaufzeit (EPBT) PV-Kraftwerk

- PV Kraftwerk: 15 kW<sub>p</sub> Dachanlage, PERC-Zellen
- Herstellung: China
- Betrieb: europäische Standorte
- Ertragsrelevante Degradation: 0,7%/a
- Ergebnis: **Energierücklaufzeit < 1,5 Jahre**

Friedrich L, Nold S, Müller A, Rentsch J, Preu R. Global Warming Potential and Energy-Payback Time Analysis of Photovoltaic Electricity by Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) Solar Modules (to be published)

Vielen Dank!

Harry Wirth

[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

[info@ise.fraunhofer.de](mailto:info@ise.fraunhofer.de)

40 JAHRE  
FRAUNHOFER ISE  
*#CreatingTheEnergyFuture*