
TECHNISCHE ENTWICKLUNG UND ANWENDUNGSFELDER DER PHOTOVOLTAIK



Agri-PV-Anlage auf dem Bio-Obsthof
Nachtwey 2023 ©Fraunhofer ISE

Dr. Harry Wirth

Tag der Solarenergie

ARGE SOLAR e.V.

Online

13.11.2023

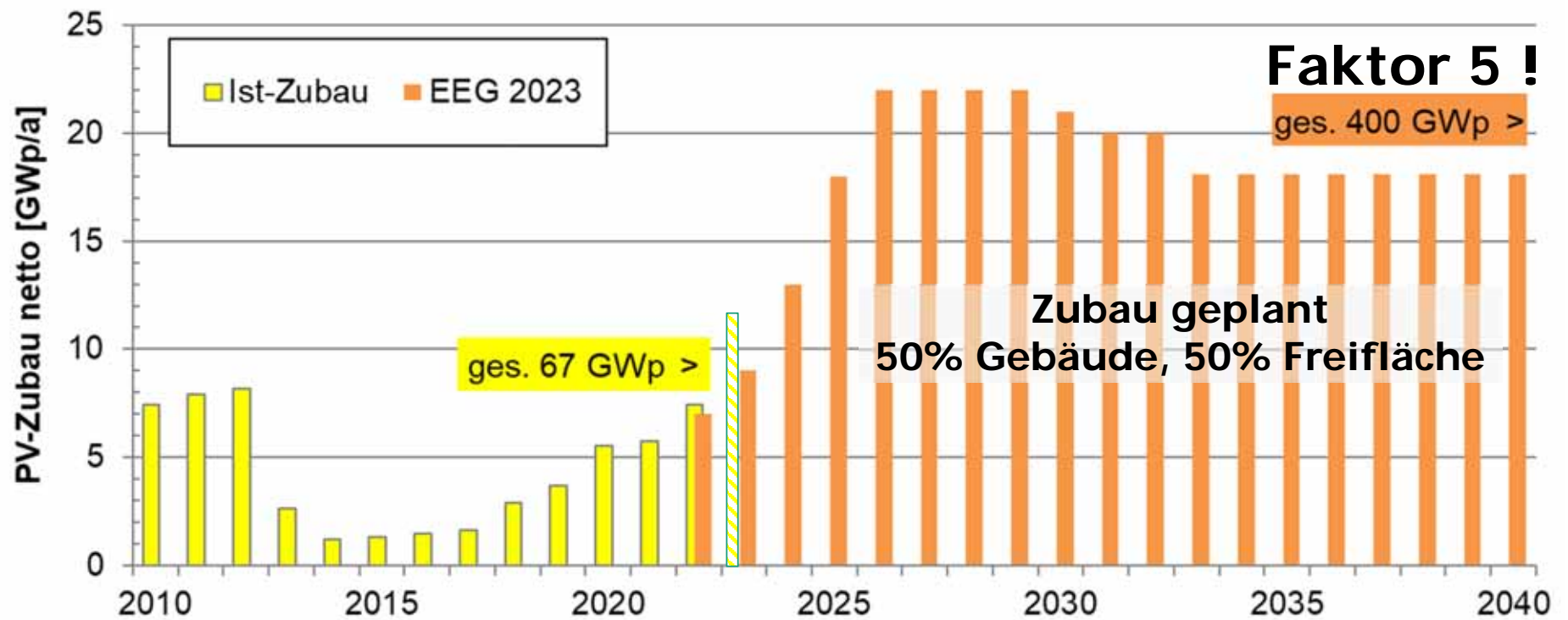
www.pv-fakten.de

ÜBERSICHT

1. Märkte
2. Technologie
3. Systeme und Integration
4. Schlussfolgerungen

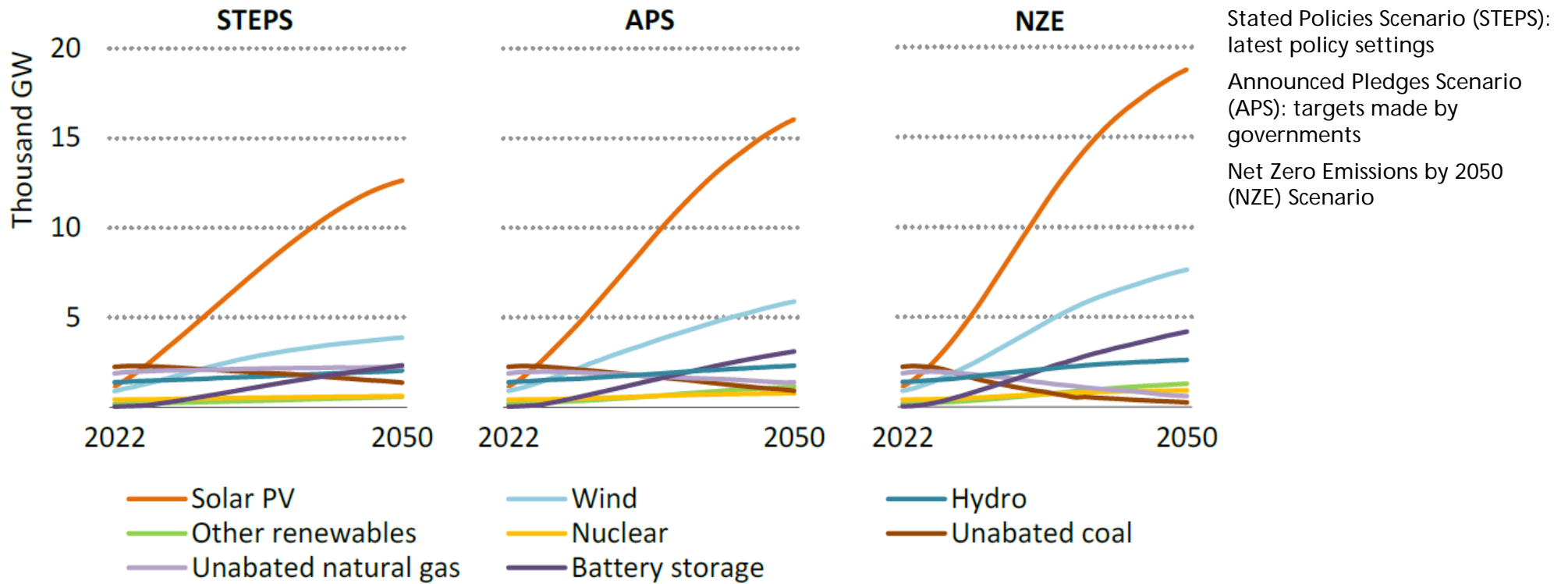
1. Märkte

Soll und Ist



Märkte

Globale Szenarien

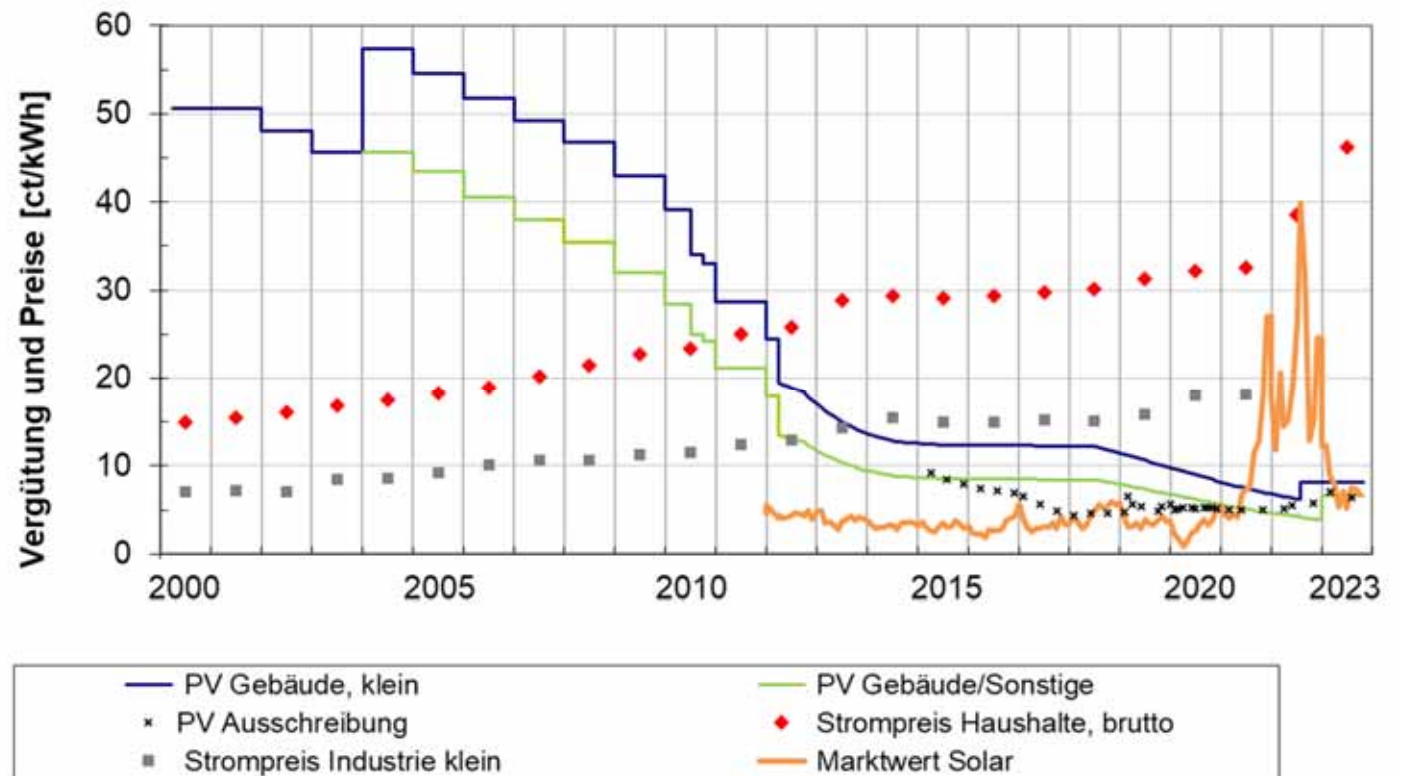


IEA. CC BY 4.0.

Märkte

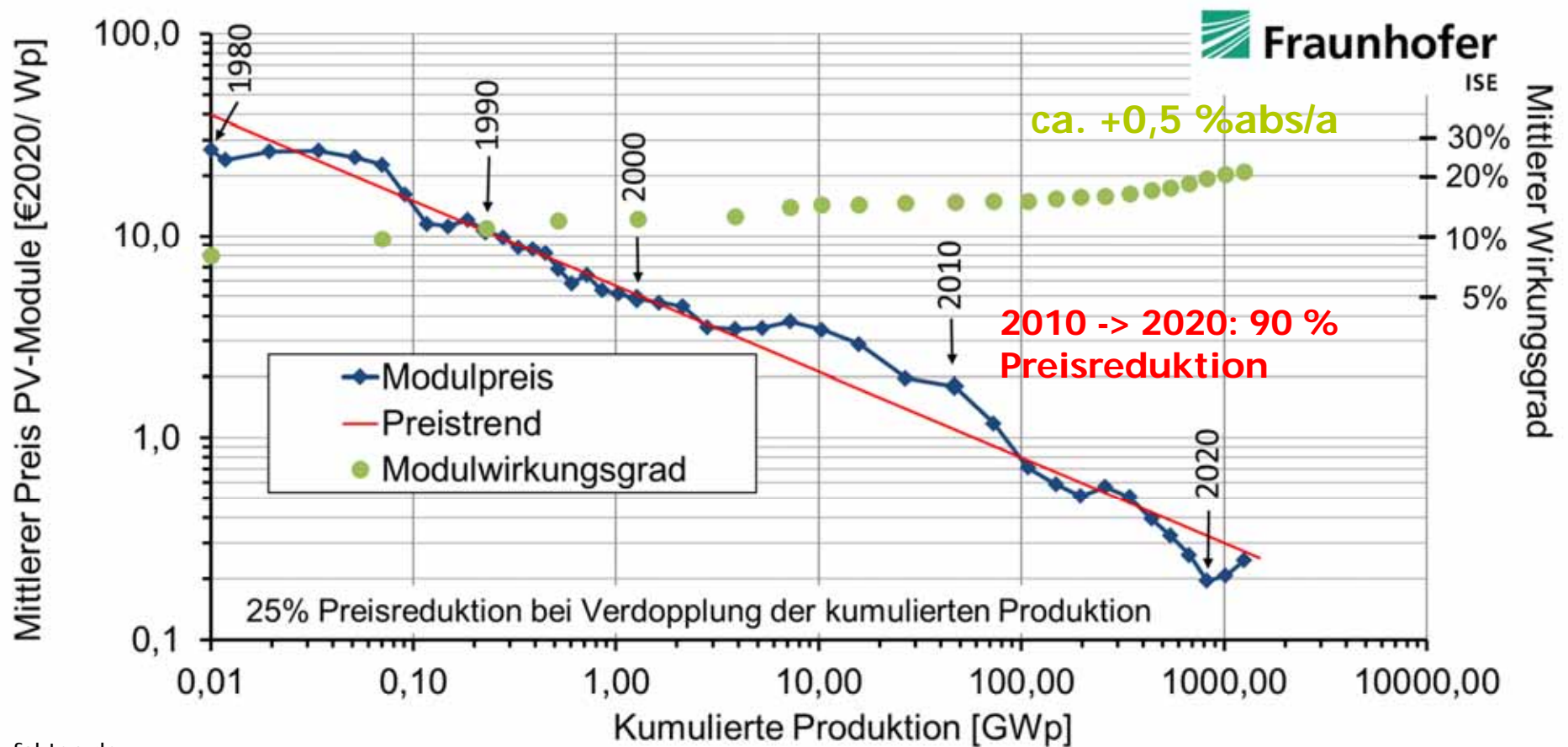
Strompreise und Vergütungen

- PV-Strom: kalkulierbare Strompreise für 25 – 30 Jahre
- Kontext Energiewende: wachsender Bedarf & Eigenverbrauch
 - E-Mobilität
 - Wärmepumpe und Klimatisierung, mit therm. Speicher
 - Stationäre Batterien



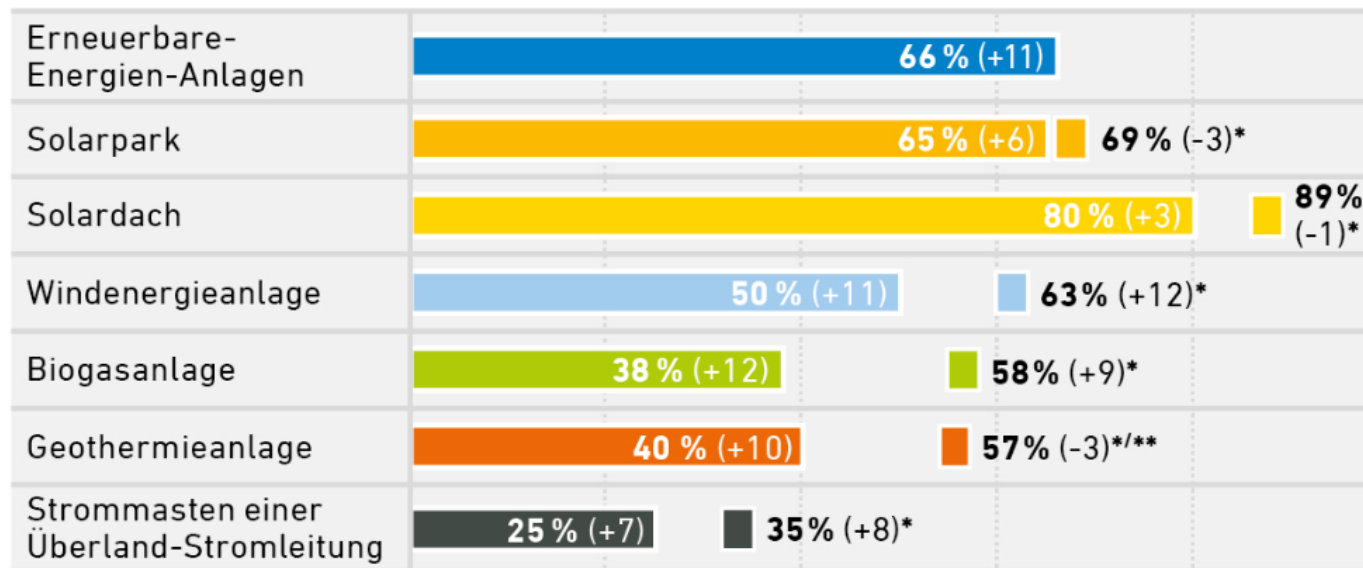
Märkte

Preisentwicklung PV-Module, Weltmarkt



Zustimmung zu Erneuerbare-Energien-Anlagen in der Umgebung des eigenen Wohnorts

Zur Stromerzeugung in der Nachbarschaft (≤ 5 km) finden eher gut bzw. sehr gut

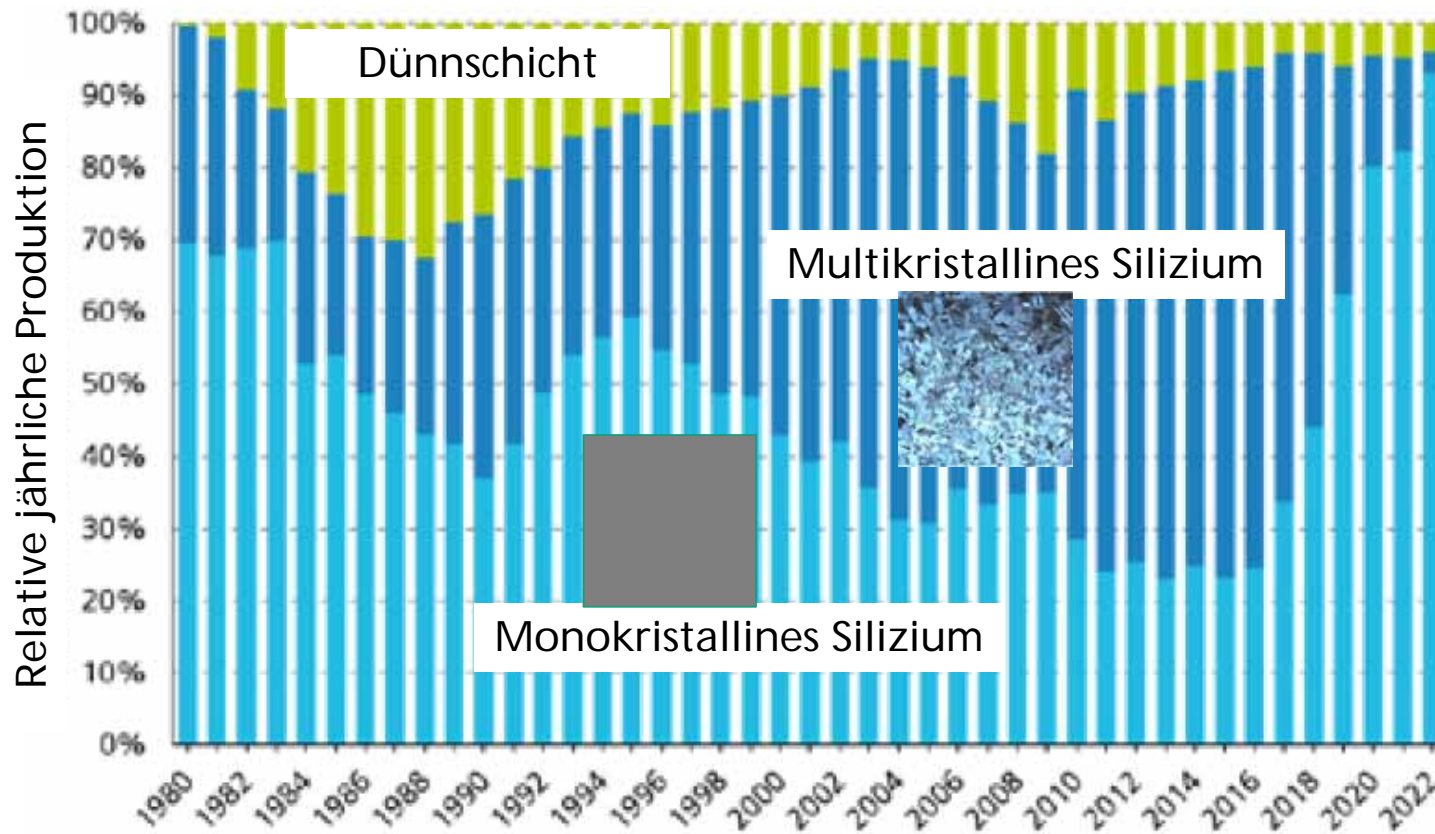


In Klammern: Veränderung gegenüber Vorjahr in Prozentpunkten.

*Befragte mit entsprechenden Anlagen in der eigenen Nachbarschaft.

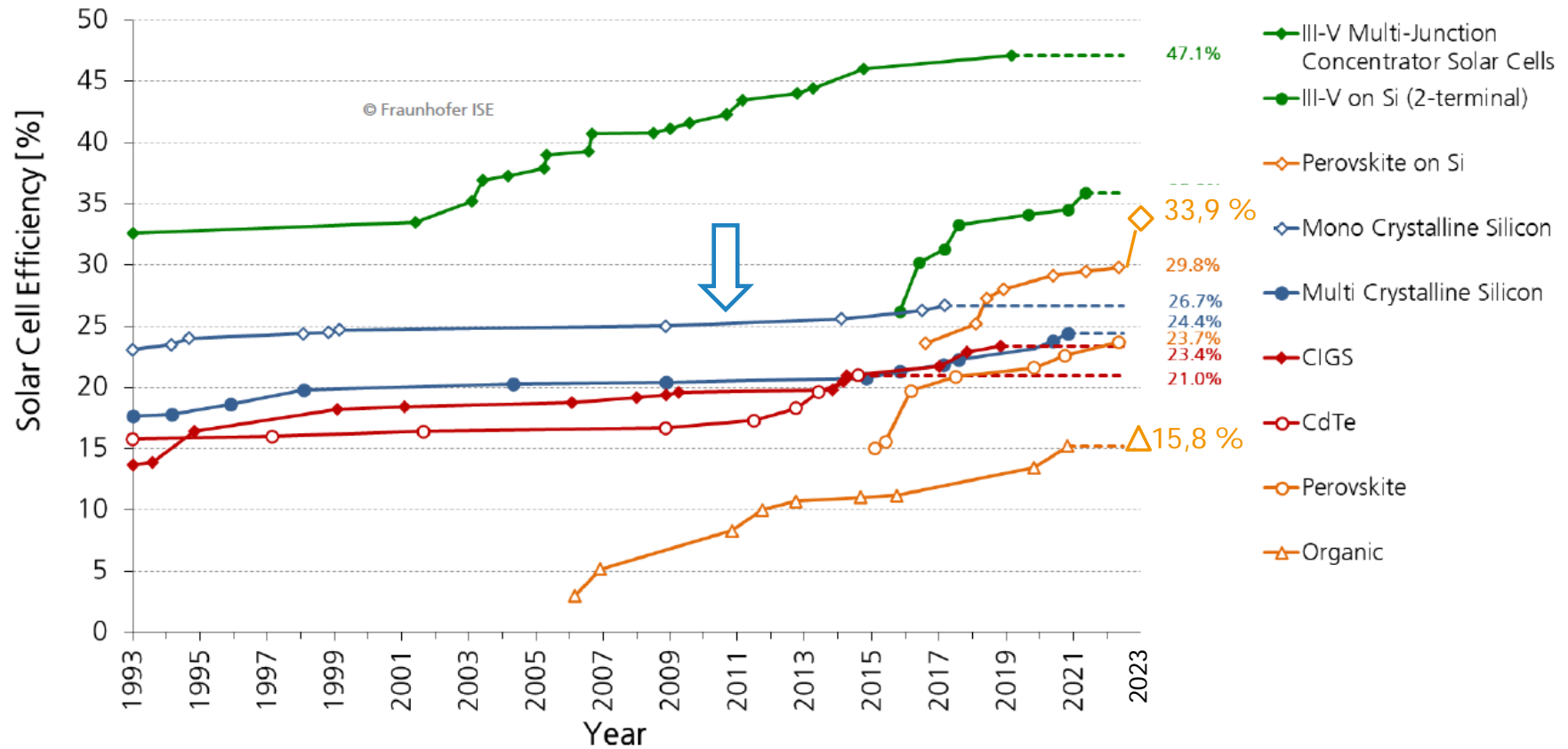
2. Technologie

Marktanteile der Solarzellen-Technologien



Technologie

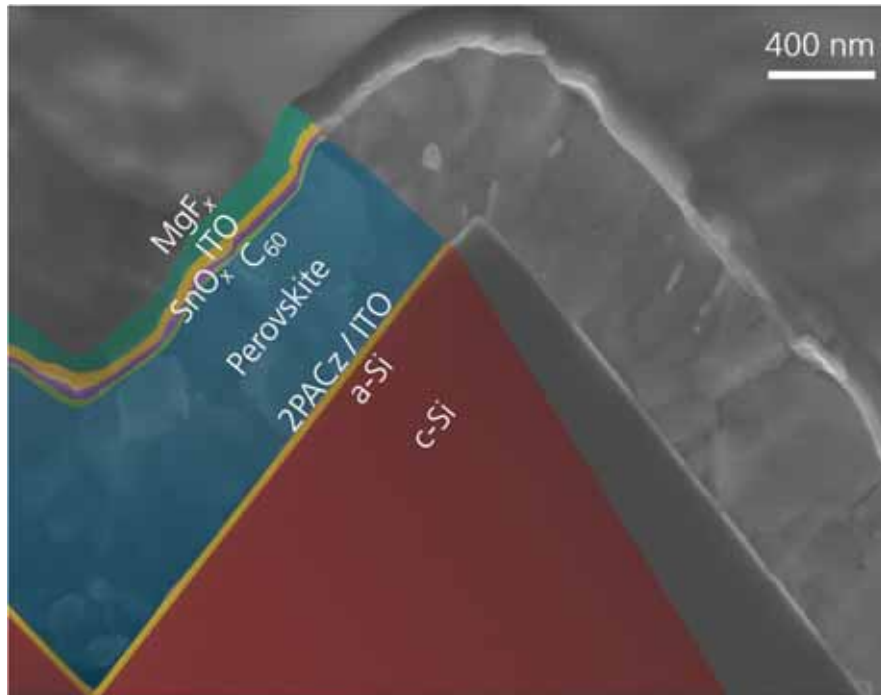
Laborwirkungsgrade der Solarzellen-Technologien



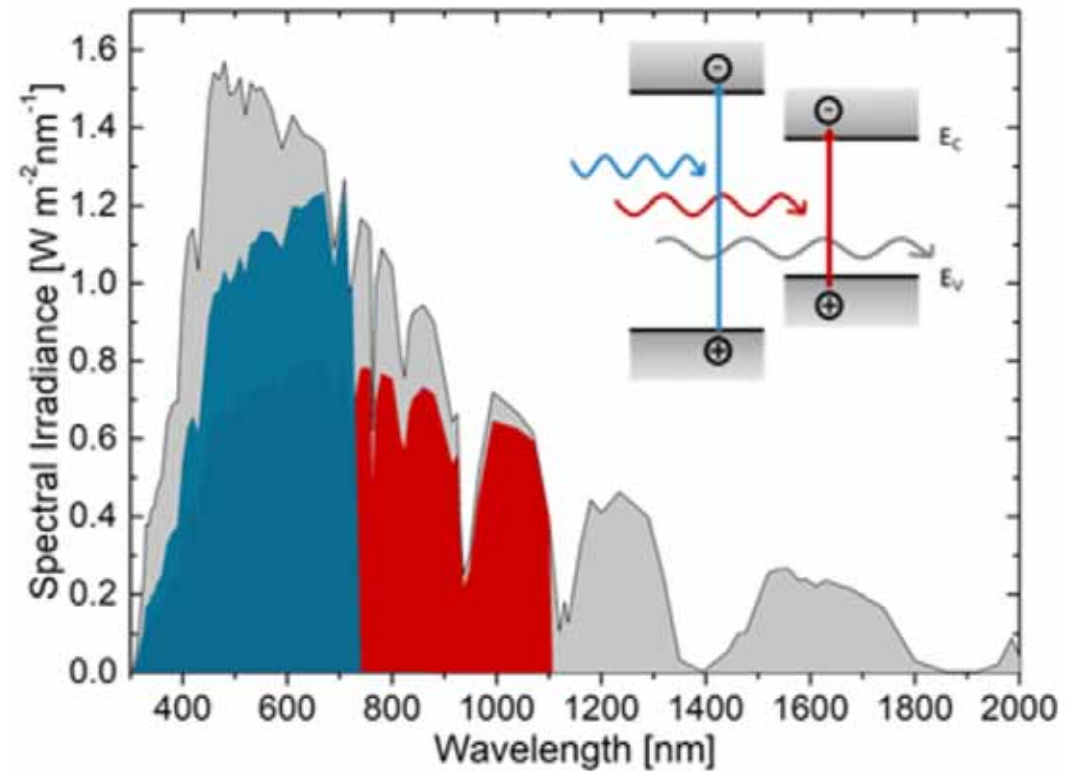
www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf

Technologie

Perowskit-Silicium Tandem Technologie



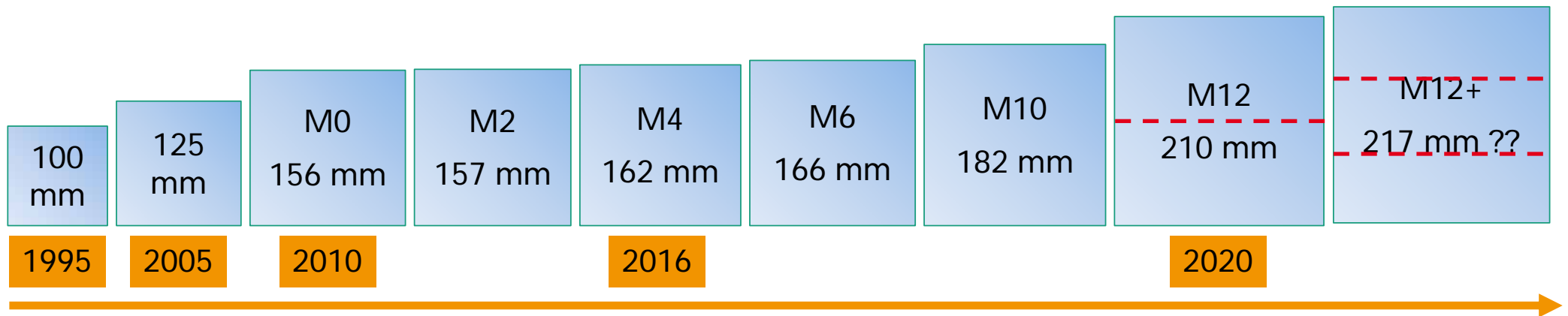
Mikroskop-Aufnahme einer Perowskit-Silicium-Tandem-solarzelle auf texturiertem Silicium © Fraunhofer ISE



Technologie

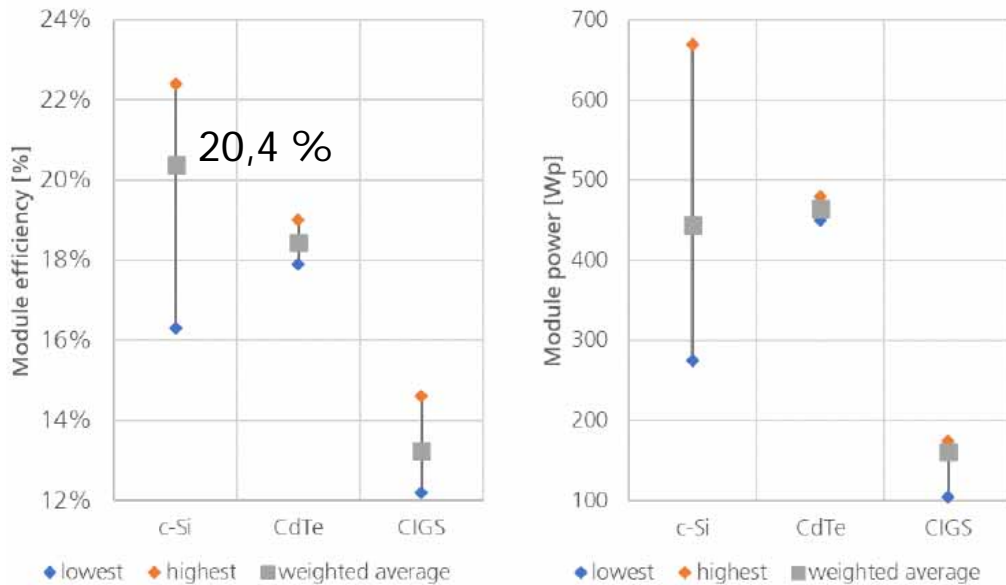
Solarzellenformate

- Dominanz der monokristallinen Technologie (> 90 %)
- steigende Zelleffizienz (Industrie ca. 24 %)
- steigende Waferformate (182 - 210 mm), geteilte Zellen

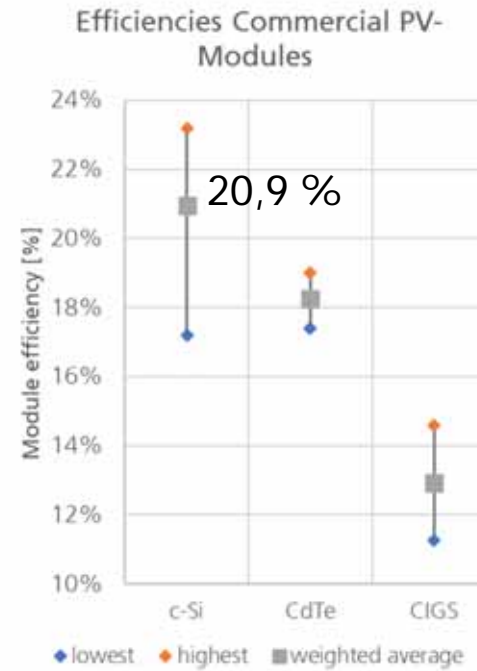


Technologie

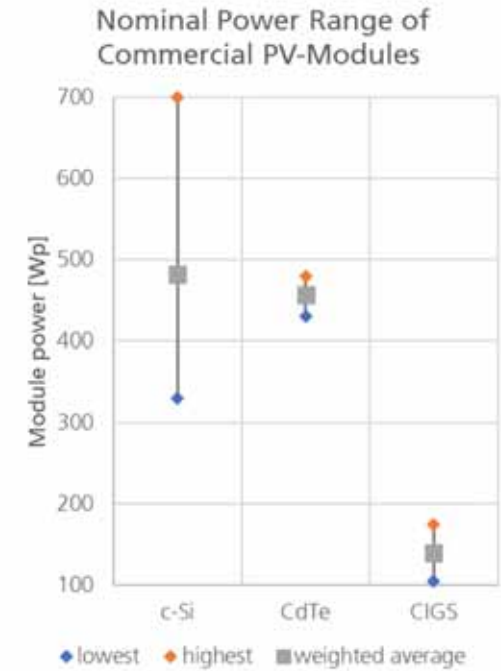
Moduleffizienz und Leistung



Q4-2021

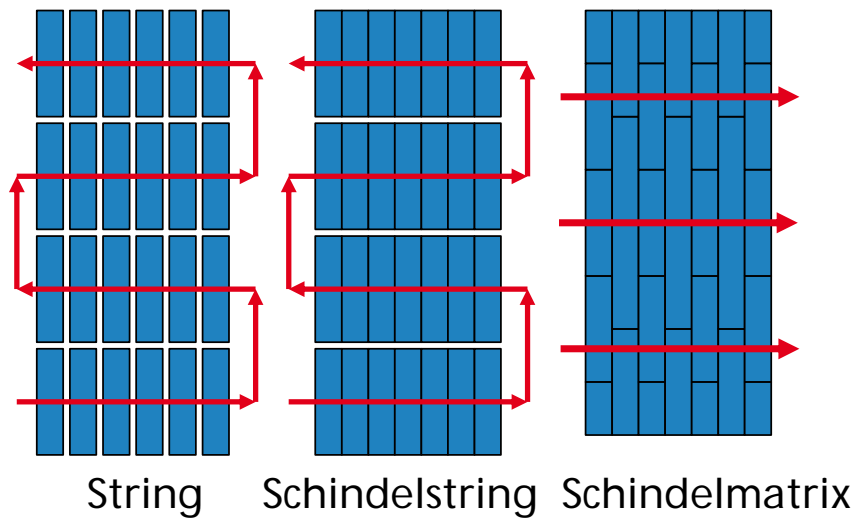


Q4-2022



Technologie PV-Module

- steigende Moduleffizienz (Industrie ca. 21 %)
- neue Zellverbindungstechnologien



© M10



Technologie

PV-Module

- steigende Moduleffizienz (Industrie ca. 21 %)
- neue Zellverbindungstechnologien
- steigende Modulformate (bis 700 Watt)
- Farbschichten



Leistungsverlust nur -4 ... -8 % rel.

Farbige Demonstrator-Module mit Morpho-Effekt (© Fraunhofer ISE)

Technologie

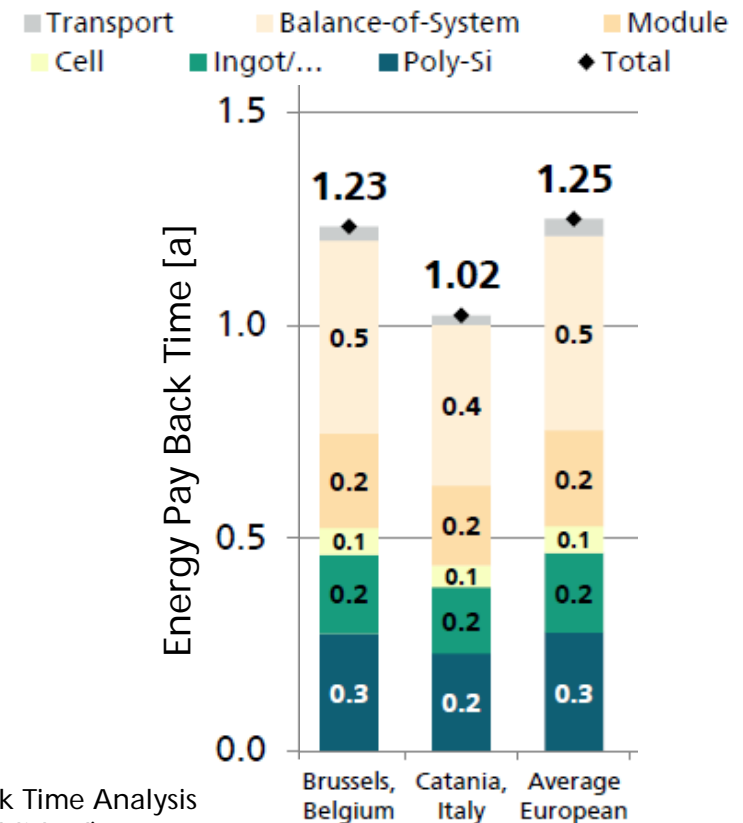
PV-Module

- steigende Moduleffizienz (Industrie ca. 21 %)
- neue Zellverbindungstechnologien
- steigende Modulformate (bis 700 Watt)
- Farbschichten
- bifaziale PV-Module (Potenzial Mehrertrag 5 - 15 %)

Technologie

Energierücklaufzeit

- PV Kraftwerk: 15 kW_p Dachanlage, PERC-Zellen
- Herstellung: China
- Betrieb: europäische Standorte
- Ertragsrelevante Degradation: 0,7%/a
- **Ergebnis: Energierücklaufzeit < 1,3 Jahre**

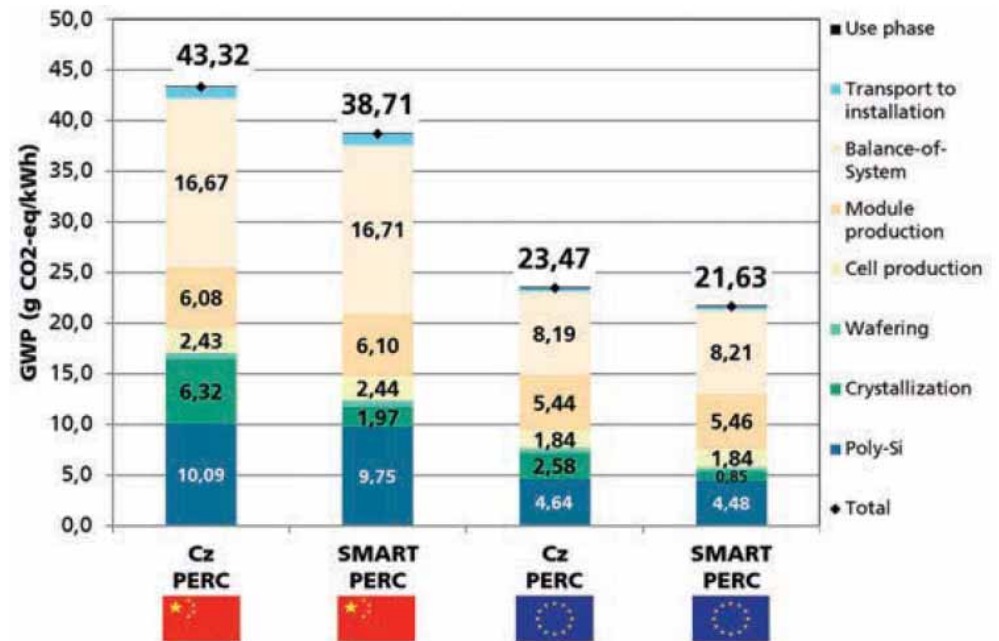


Friedrich L, Nold S, Müller A, Rentsch J, Preu R. Global Warming Potential and Energy-Payback Time Analysis of Photovoltaic Electricity by Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) Solar Modules (to be published)

Technologie

CO₂-Bilanz PV-Strom

- PV Kraftwerk: 15 kW_p Dachanlage, PERC-Zellen
- Herstellung: China bzw. EU
- Betrieb: mittlerer europäischer Standort
- Jahressumme Einstrahlung in Modulebene (POA): 1331 kWh/m²
- Ertragsrelevante Degradation: 0,7 %/a
- Spez. Stromproduktion in 30 Jahren: 29 MWh/kW_p
- **Ergebnis: THG-Bilanz heute < 50 g CO₂-äq/kWh** (CO₂-Äquivalent pro kWh AC Stromproduktion)



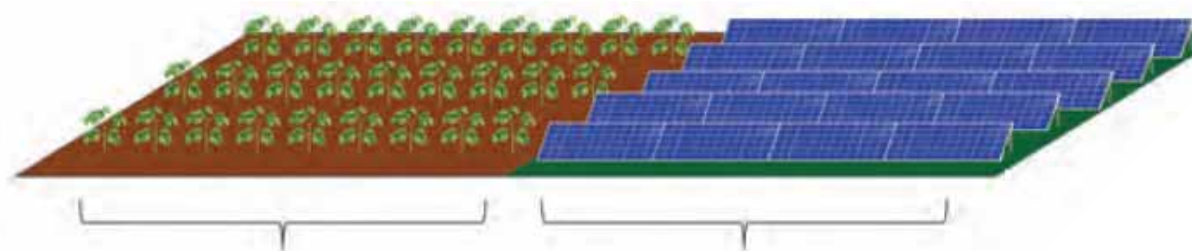
Global Warming Potential (GWP) für PV-Strom

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

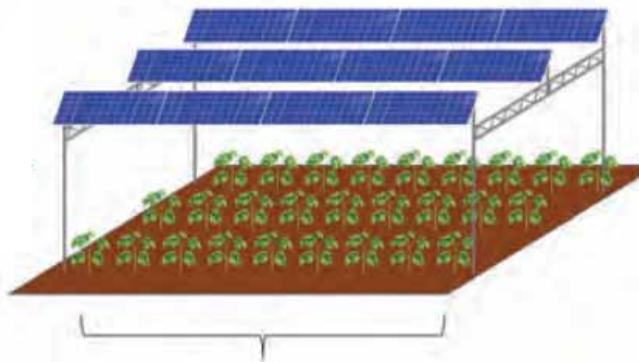
3. Systeme und Integration Integrierte Photovoltaik



Agri-Photovoltaik (Agri-PV) Prinzip



100 % Kartoffeln und 100 % Solarstrom



103 % Kartoffeln und
83 % Solarstrom → 186 % Landnutzungseffizienz



Fraunhofer
ISE

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

Agri-Photovoltaik: Chance für
Landwirtschaft und Energiewende

Ein Leitfaden für Deutschland | Stand November 2023

Agri-Photovoltaik (Agri-PV) Systembeispiele bodennah



Vertikales System Next2Sun, Dirmingen/Saarland



Nachführsystem, © BayWa r.e.

Agri-Photovoltaik (Agri-PV) Systembeispiele hochaufgeständert



APV Obstbau, Bio-Obsthof Nachtwey



APV Ackerbau, Hofgemeinschaft Heggelbach

Schwimmende Photovoltaik (FPV) Potenzialanalyse

- Braunkohle-Tagebaue ca. 47.300 ha¹
- weitere künstliche Seen > 1 ha: ca. 34.000 ha
- Ausschluss 10% Randzone
- Belegungsdichte 0,6 MW_p/ha
- **technisches Potenzial ca. 44 GW_p**



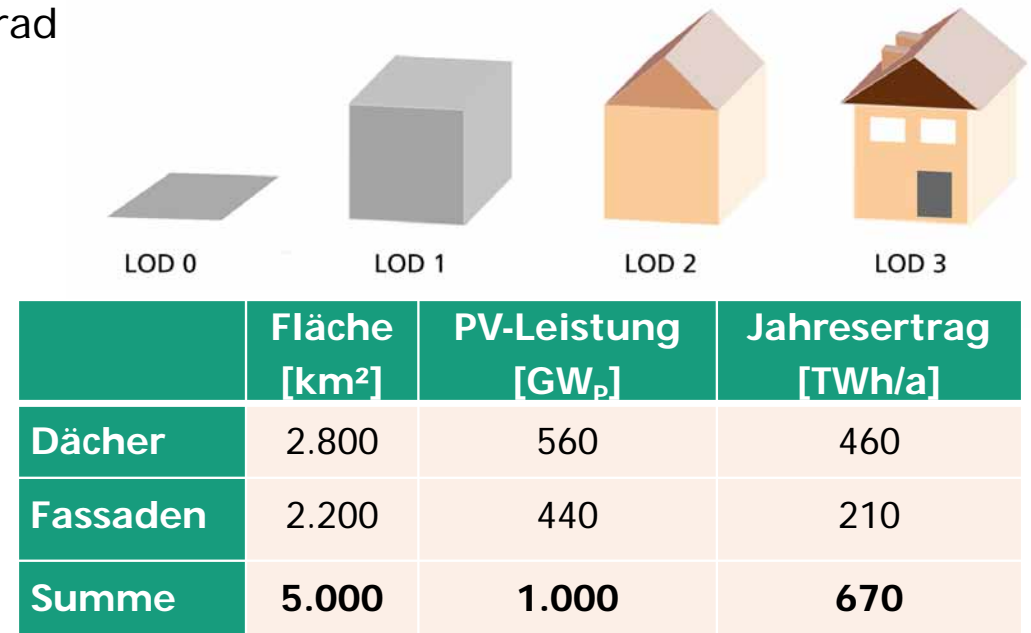
Schwimmende 750 kW PV-Anlage in Renchen auf dem Baggersee Maiwald

1 Mike Hemm; Brigitte Nixdorf; Anja Schlundt; Maria Kapfer; Hartwig Krumbek (2000): Braunkohlentagebauseen in Deutschland. Gegenwärtiger Kenntnisstand über wasserwirtschaftliche Belange von Braunkohlentagebaurestlöchern.

Systeme und Integration

Potenzielle Gebäudeintegration

- deutschlandweiter Gebäudedatensatz im Detailgrad
- Bruttofläche Dach 6.101 km², Fassade 12.416 km²
- Ausschlüsse und Abschläge (73%) für
 - geringe Einstrahlung < ca. 500 kWh/(m²a)
 - kleine Flächenabschnitte (< 7m²)
 - Fassadenausschnitte (30%)
 - Verschattung, Dachaufbauten
 - ungünstige Modulformate
- **technisches Potenzial: 1000 GW_p**

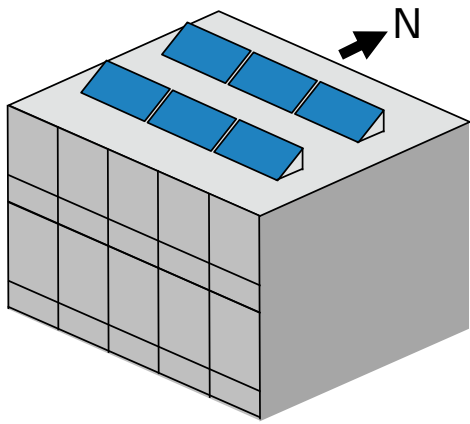


Technische Potenziale BIPV (flächenbasiert)

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.

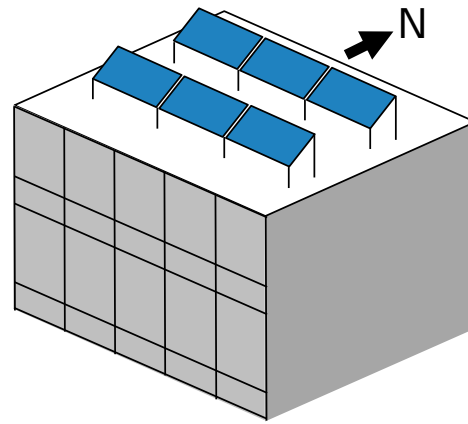
Systeme und Integration

PV Bauarten Gebäude (1)



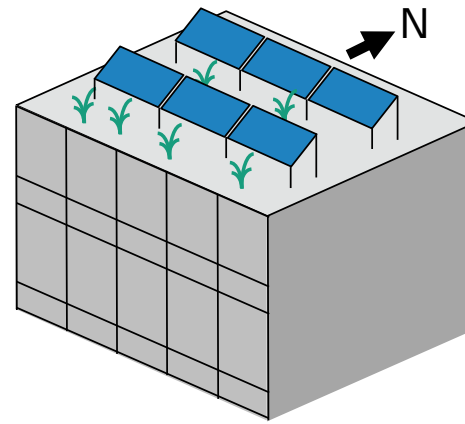
Flachdach Süd

Hoher spez. Ertrag
[kWh/(kW_p·a)]



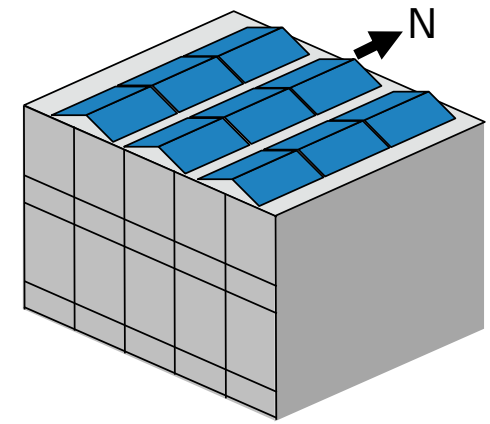
Flachdach Süd Bifazial

Höchster spez. Ertrag
[kWh/(kW_p·a)]



Flachdach Süd Gründach

Hoher spez. Ertrag
[kWh/(kW_p·a)]



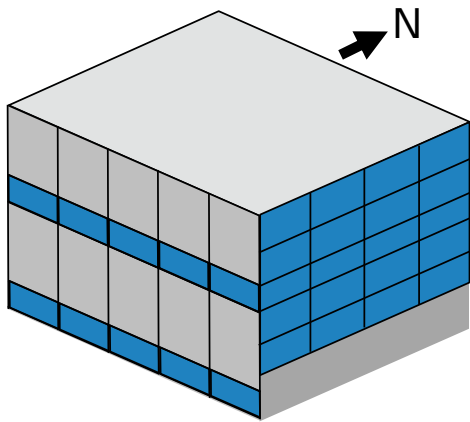
Flachdach Ost-West

Höchster Flächenertrag
[kWh/(m²·a)]

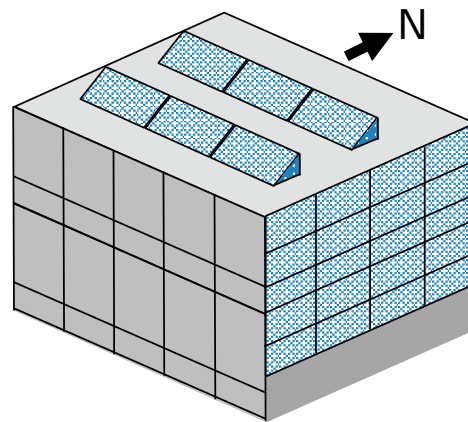
Vorteilhaftes Tagesprofil

Systeme und Integration

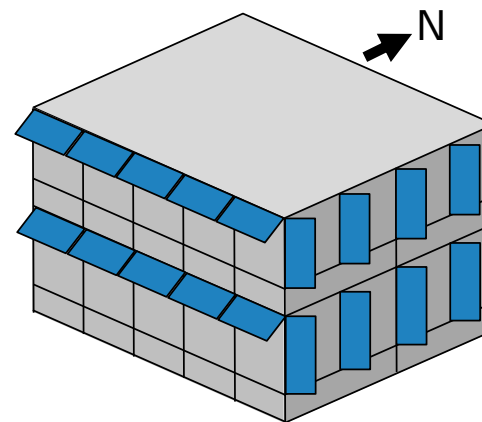
PV Bauarten Gebäude (2)



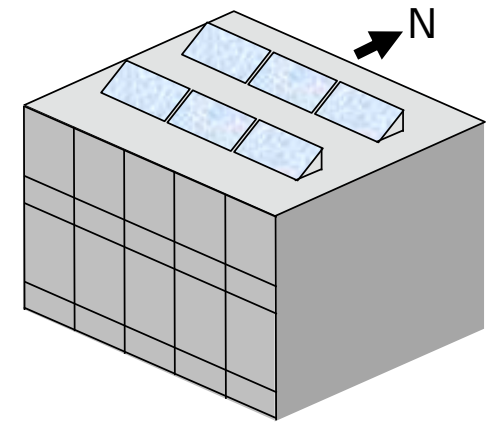
Kaltfassade (opak)
Kleinerer spez. Ertrag
[kWh/(kW_p·a)]
Vorteilhaftes Profil



Isolierglas für
Fassade/Shed-
dach/Pulldach
(teiltransparent)

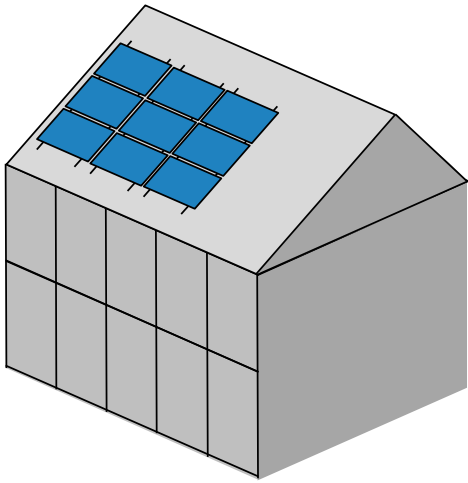


Sonnenschutzlamellen
(starr oder beweglich)

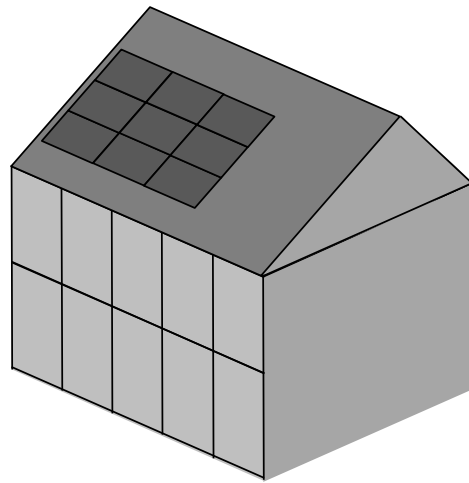


Leichtbau Module,
Unterkonstruktion

Systeme und Integration PV Bauarten Gebäude (3)



Steildach: Aufdachsystem



Steildach: Indachsystem

Systeme und Integration

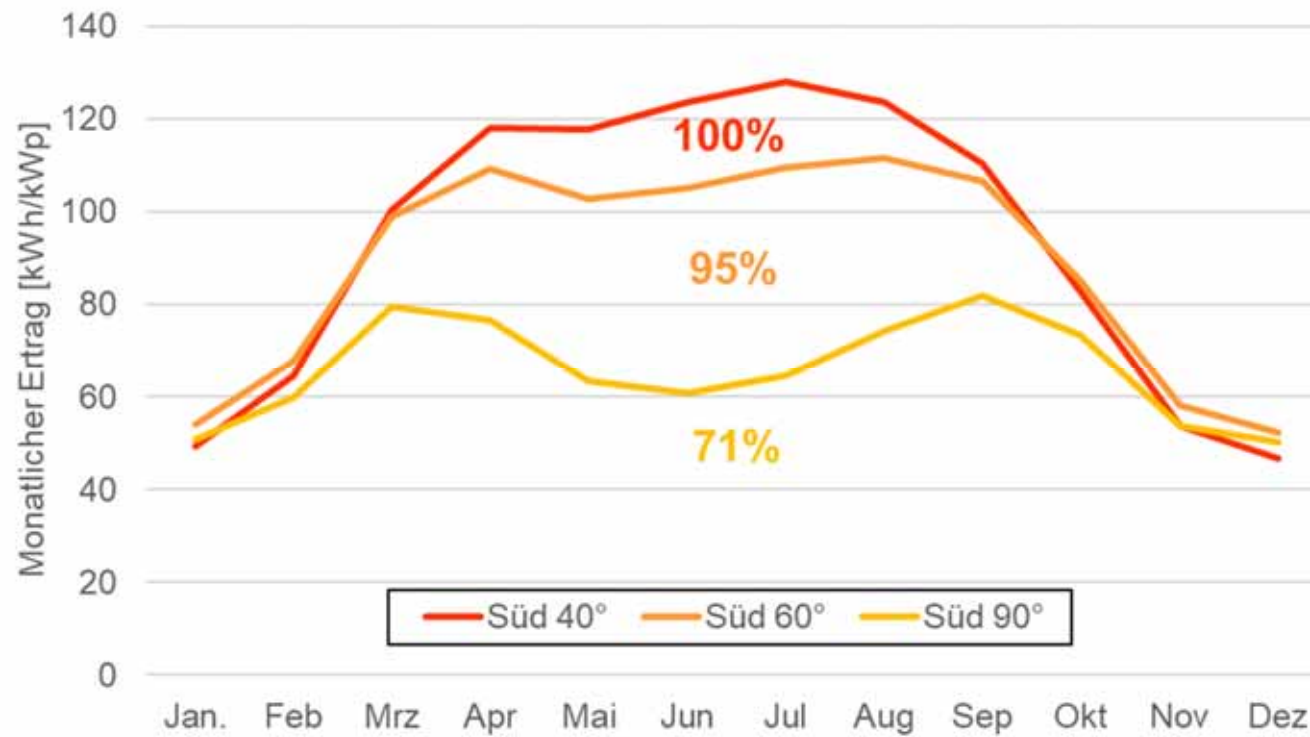
Ertragspotenzial nach Ausrichtung

		Orientierung																		
		Ost		Südost			Süd			Südwest				West		Nordwest				Nord
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
Neigung	Horiz.	0°	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%
	10°	83%	85%	87%	89%	90%	91%	91%	91%	90%	89%	87%	85%	83%	81%	79%	77%	76%	75%	75%
	20°	82%	86%	90%	92%	95%	96%	96%	96%	94%	92%	89%	85%	81%	77%	73%	70%	67%	66%	65%
	30°	81%	86%	90%	94%	97%	99%	99%	98%	96%	93%	89%	84%	79%	74%	68%	63%	59%	57%	56%
	40°	78%	84%	90%	94%	97%	100%	100%	99%	97%	93%	88%	82%	76%	69%	63%	56%	51%	48%	47%
	50°	74%	81%	87%	92%	96%	98%	99%	97%	95%	91%	85%	79%	72%	65%	57%	50%	44%	40%	39%
	60°	70%	77%	83%	88%	92%	94%	95%	94%	91%	87%	81%	75%	68%	60%	52%	45%	38%	33%	31%
	70°	64%	71%	77%	83%	86%	89%	89%	88%	85%	81%	75%	69%	62%	54%	46%	39%	32%	27%	26%
	80°	57%	64%	70%	75%	79%	81%	81%	80%	77%	73%	68%	62%	55%	48%	40%	33%	27%	23%	21%
Vert.	90°	50%	56%	62%	66%	69%	70%	71%	70%	68%	64%	60%	54%	48%	41%	34%	28%	23%	19%	17%

Ertragspotenzial relativ, unverschattet, Standort Freiburg, berechnet mit https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

Systeme und Integration

Ertragsprofil nach Ausrichtung



-> **Eigenverbrauchspotenzial beachten**

Systeme und Integration

Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
 - Steildach: Platten-/Ziegeleindeckung



Dachpaneele (© Braas GmbH)

Systeme und Integration

Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
 - Steildach: Platten-/Ziegeleindeckung

PV-Module mit MophoColor auf dem Dach eines historischen Gebäudes in Eppingen (2023)



Systeme und Integration

Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
 - Steildach: Platten-/Ziegeleindeckung
 - Flachdach: Leichtbauprodukte



Links: Leichtbaumodul mit $3,3 \text{ kg/m}^2$, rechts: Montage (© DAS Energy)

Systeme und Integration

Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
 - Steildach: Platten-/Ziegeleindeckung
 - Flachdach: Leichtbauprodukte
- Kaltfassade
 - Vorgehängte, hinterlüftete Fassade (VHF)



„StoVentec Photovoltaics Inlay“ 305 W_p,
Format 1668 x 994 mm (© sto)

Systeme und Integration

Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
 - Steildach: Platten-/Ziegeleindeckung
 - Flachdach: Leichtbauprodukte
- Kaltfassade



„Traditionelle“ Ansicht



Unsichtbare Schaltkreise, blendfrei



Künstlerisches Design

Systeme und Integration

Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
 - Steildach: Platten-/Ziegeleindeckung
 - Flachdach: Leichtbauprodukte
- Kaltfassade
 - Vorgehängte, hinterlüftete Fassade (VHF)

PV-Module (60 Stück, 250 W_p) mit MorphoColor-Schicht am ISE/ZhS



Systeme und Integration

Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
 - Steildach: Platten-/Ziegeleindeckung
 - Flachdach: Leichtbauprodukte
- Kaltfassade
- Isolierglas
 - teiltransparent
 - opak (Brüstungen)

Überkopfverglasung mit PV,
Fraunhofer ISE



Systeme und Integration

Optionen Gebäudeintegration

- Dacheindeckung
 - Steildach: Platten-/Ziegeleindeckung
 - Flachdach: Leichtbauprodukte
- Kaltfassade
- Isolierglas
 - teiltransparent
 - opak (Brüstungen)
- Sonnenschutz-Lamellen

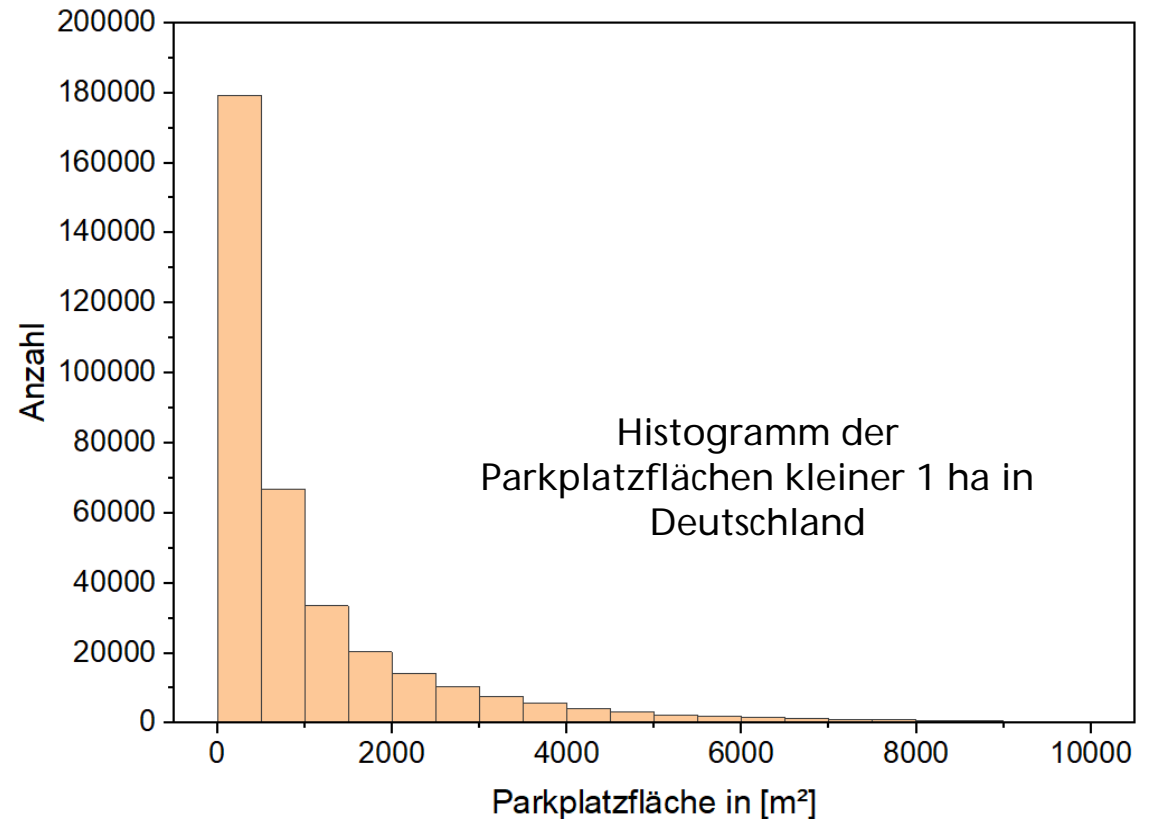
Vertikale PV-Lamellen als Verschattung,
Rathaus Freiburg, © Fraunhofer ISE



Urbane Photovoltaik (UPV) - Parkplätze

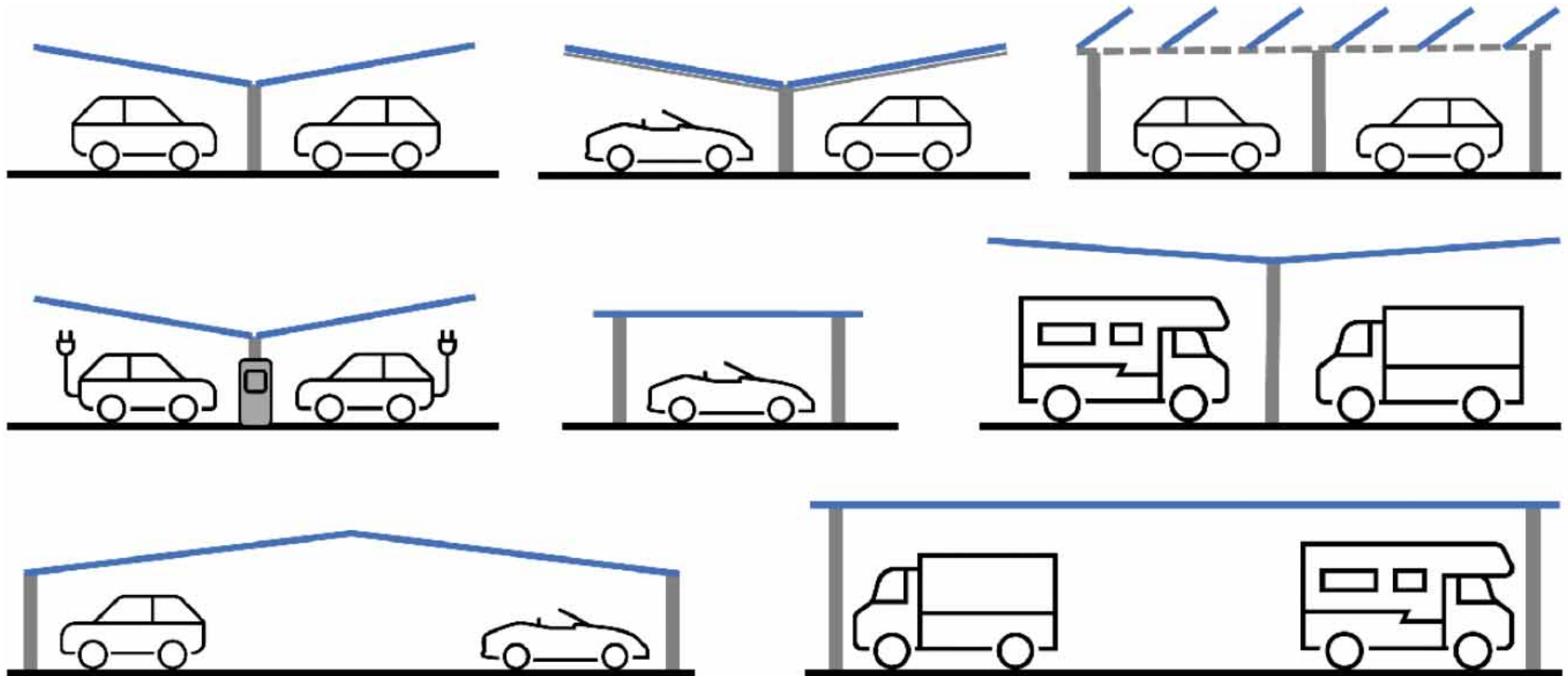
Potenzialanalyse

- Ausschluss private Stellplätze, Parkstreifen an Straßen
- ca. 360.000 Flächen bundesweit, gesamt 47.400 ha
- Ausschluss 40% Erschließungsfläche
- Belegungsdichte 2 MW/ha
- **technisches Potenzial ca. 59 GW_p**



Urbane Photovoltaik (UPV) - Parkplätze

Systeme und Integration



Photovoltaikparkplätze - Solarüberdachungen von Park- & Stellplätzen, Faktenpapier, Solar Cluster Baden-Württemberg e.V., 2022

Systeme und Integration

Solarpflichten Gebäude und/oder Parkplätze

gültig

beschlossen

im Gespräch



Baden-Württemberg



Bayern



Berlin



Schleswig-Holstein



Hessen



Bremen



Brandenburg



Sachsen-Anhalt



Thüringen



Hamburg



Niedersachsen



Rheinland-Pfalz



Nordrhein-Westfalen



Mecklenburg-Vorpommern



Sachsen



Saarland

PV in Verkehrswegen (RIPV)

Potenzialanalyse

- Verkehrsflächen belegen ca. 5% der gesamten Fläche Deutschlands
- betrachtete Flächenkategorien
 - Bundesautobahnen
 - Bundesstraßen
 - Landes- und Kreisstraßen (außerorts)
 - Gemeindestraßen (nur Geh- und Radwege)
 - Schienennetz
- betrachtete Systeme: PV-Überdachung, PV-Lärmschutz, PV-Integration in Verkehrsebene
- technisches Potenzial ca. 300 GW_p

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

PV in Verkehrswegen (RIPV)

Projekt „PV-Überdachung Radweg“

- Erster Radweg in Deutschland mit PV-Überdachung
- 912 PV-Module auf 300 m Länge, mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (ABZ)
- Nennleistung 283 kW_p
- Strom für Eigenverbrauch des Fraunhofer ISE
- Eröffnung: April 2023

PV-Dach über
Radweg, Freiburg



4. Schlussfolgerungen

1. PV wird eine tragende Säule der Stromversorgung
2. PV-Stromerzeugung auf allen geeigneten Flächen wird zum „Standard“
3. Vielfältige Möglichkeiten für die Integration von PV
4. PV ist nachhaltig und hilft bei der Absicherung von Stromkosten
5. Neben dem Jahresertrag zählt auch das Erzeugungsprofil





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr. Harry Wirth

www.pv-fakten.de

Foto: © andreas160578 Pixabay