



Strom vom eigenen Dach

PV für Privateigentümerinnen und -eigentümer

Webinar Solartage 2024, Steinfurt, 7. Mai 2024

Prof. Dr. Maurice Nuys

Photovoltaik & Energiespeicher

Fachbereich Energie • Gebäude • Umwelt



DAS BIN ICH

Physikstudium an der RWTH Aachen



Promotion an der RWTH Aachen/ Forschungszentrum Jülich GmbH

- Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
- Institut für Energie- und Klimaforschung IEK-5 – Photovoltaik

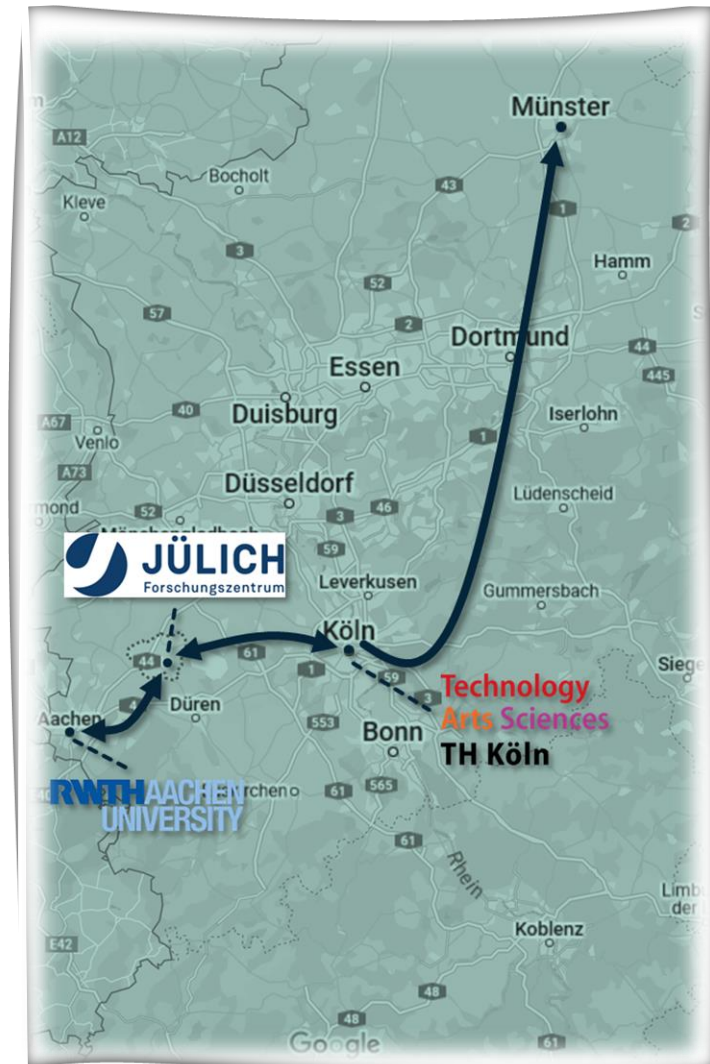


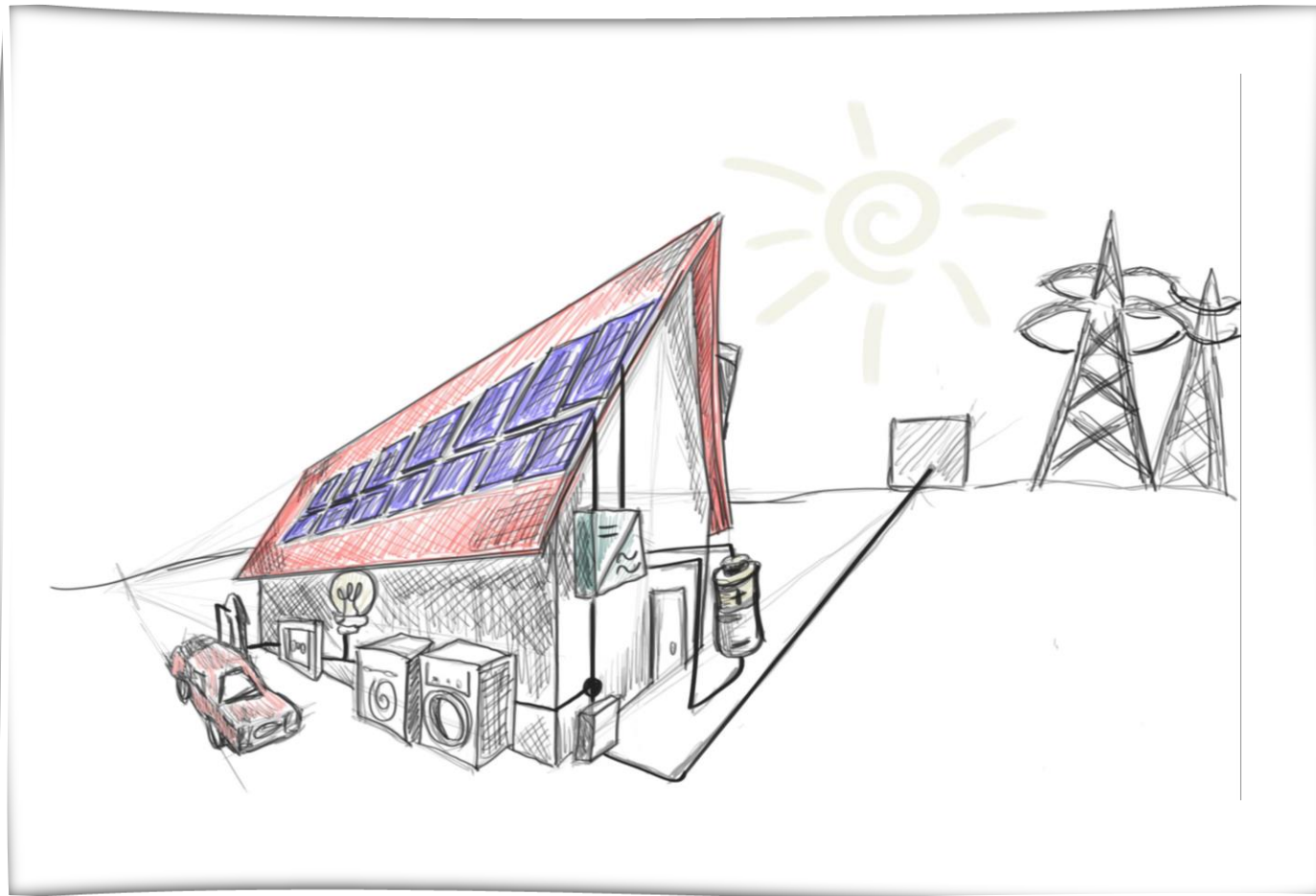
- Wissenschaftlicher Mitarbeiter IEK-5
- Geschäftsführer Graduiertenschule HITEC
- Lehrbeauftragter an der Technischen Hochschule Köln



Seit März 2024 Lehrstuhl für Photovoltaik & Energiespeicher

Fachbereich Energie • Gebäude • Umwelt, FH Münster, Technologie-Campus-Steinfurt





1. Photovoltaik-Grundlagen

Wirkungsgrad, Einstrahlung & Ertrag

2. Entwicklung & Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik

3. Eigenverbrauchsoptimierung

1. PHOTOVOLTAIK-GRUNDLAGEN - WIRKUNGSGRAD, EINSTRAHLUNG & ERTRAG

WIRKUNGSGRAD VON SOLARZELLEN

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\text{elektrische Leistung}}{\text{optische Leistung}} = \frac{P_{\text{elekt.}}}{P_{\text{opt.}}}$$

z.B. Trinasolar Vertex S 430W (TSM-NEG9R.28)

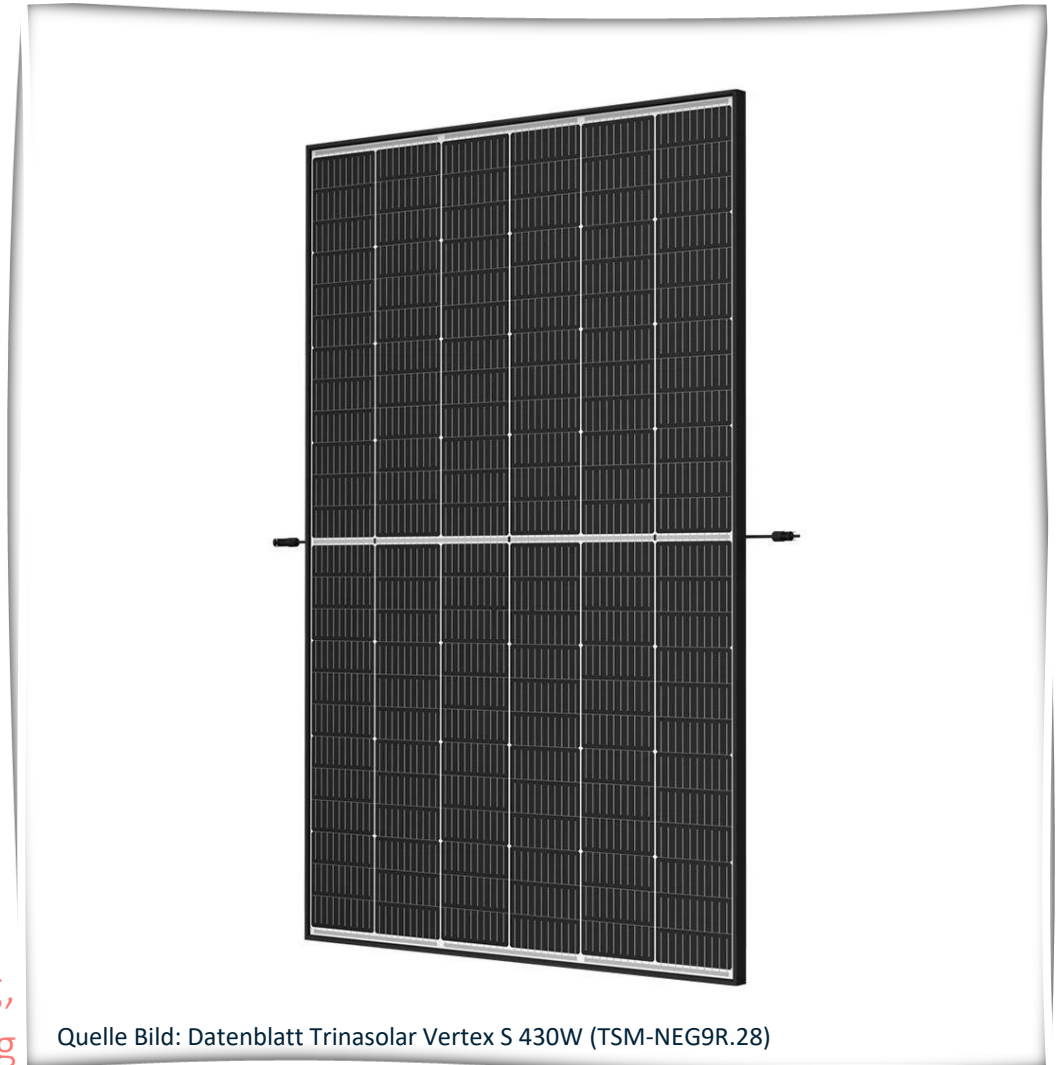
- $\eta \approx 21,5 \%$
- Abmessungen/Gewicht: $1762 \text{ mm} \cdot 1134 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm}$
(Fläche $A \approx 2 \text{ m}^2$), $21,1 \text{ kg}$

„Volle“ Sonneneinstrahlung ($1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) → maximale Leistung

$$P_{\text{elekt., Modul}} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot 21,5\% \approx 430 \text{ W}$$

Peakleistung,
Nennleistung

22 Module: $\approx 9,4 \text{ kW}$, $\approx 480 \text{ kg}$, $\approx 44 \text{ m}^2$



SONNENEINSTRahlung

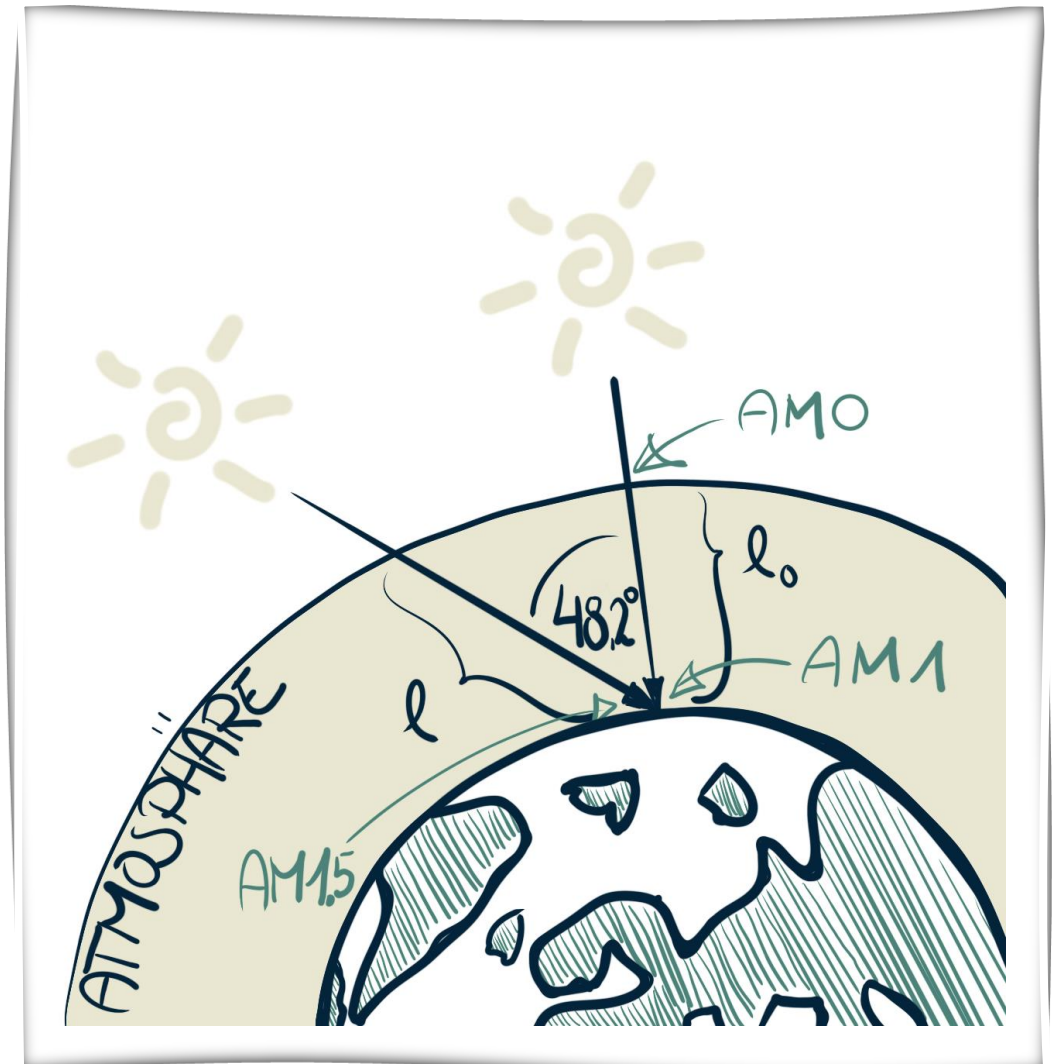
Stand der Sonne und „Ort“ auf der Erde haben erheblichen Einfluss auf die Einstrahlungsverhältnisse

- ➔ „Auftrittswinkel“
- ➔ Wolken
- ➔ Staub
- ➔ Absorption in der Atmosphäre

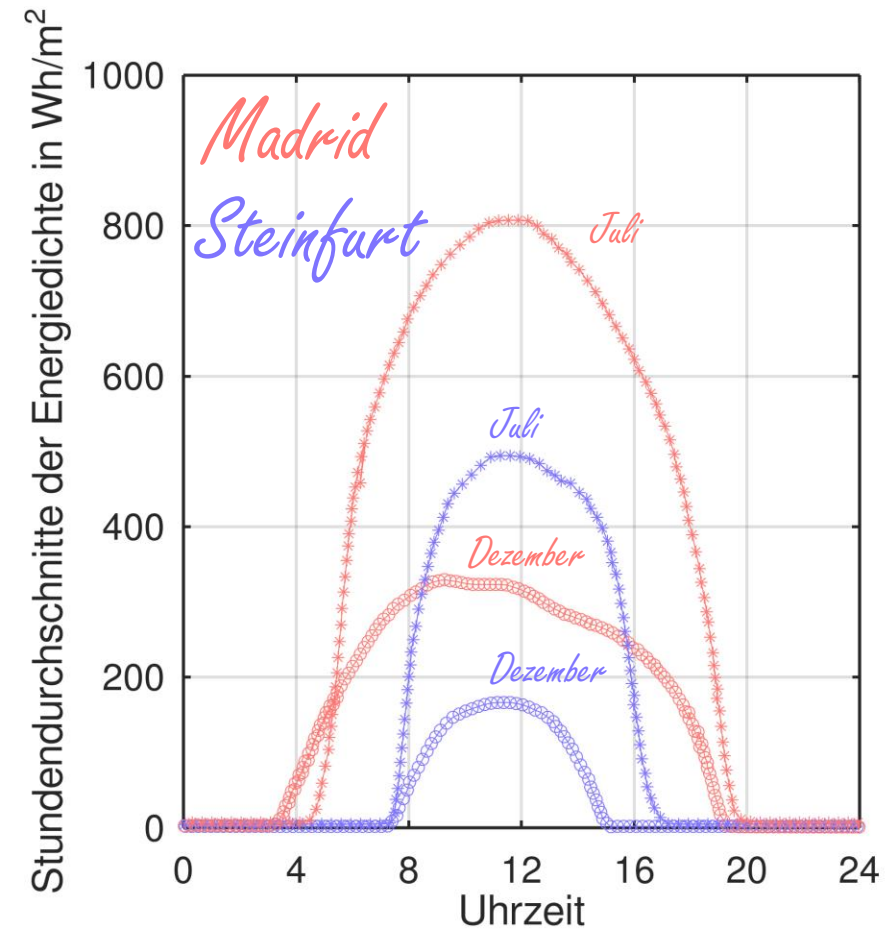
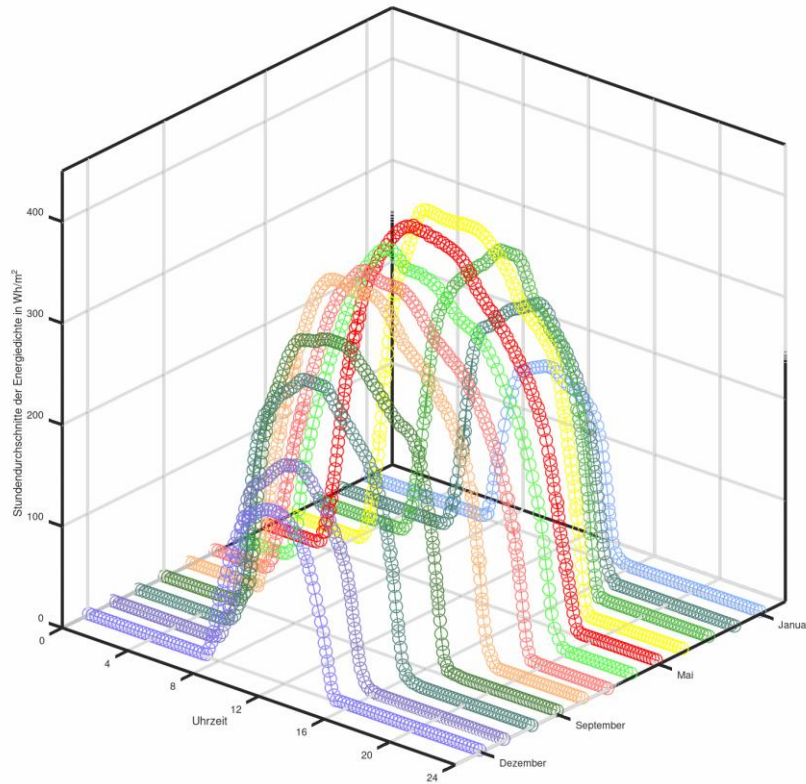
Außerhalb der Atmosphäre: $P_{opt.} = 1361 \frac{W}{m^2}$
(Solarkonstante)

Für Deutschland bei sonnigen und wolkenlosen Verhältnissen

$$AM1.5: P_{opt.} = 1000 \frac{W}{m^2}$$



EINSTRahlung IN STEINFURT Stundendurchschnittswerte der Energiedichte in $\frac{Wh}{m^2}$



ERTRAG EINER PV-ANLAGE

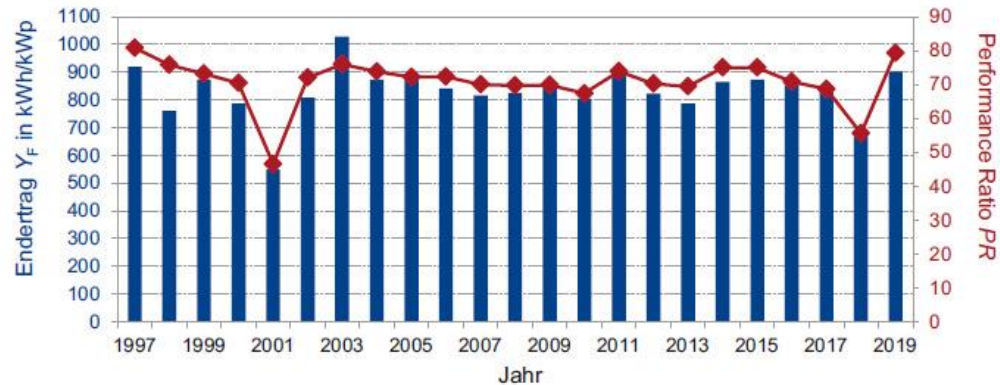


Bild 10.11 Ansicht und Betriebsergebnisse einer 2kW-Anlage am Standort Aachen: Deutlich auffallend ist der schlechte Ertrag im Jahr 2001, der durch eine durchgebrannte Sicherung verursacht wurde (Foto: M. Pankert)

Jahresdurchschnitts-Ertrag

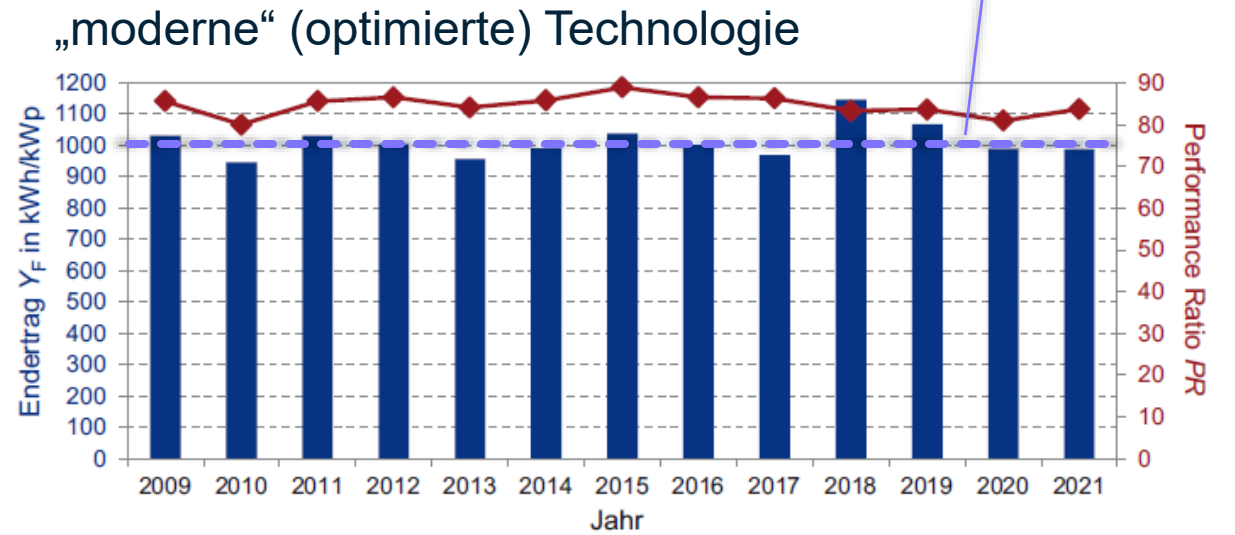


Bild 10.12 Betriebsergebnisse der Schrägdachanlage in Steinfurt: Insgesamt ergeben sich etwas höhere PR-Werte im Vergleich zu Bild 10.11. Die Anlage wurde Ende 2007 leicht optimiert, so dass sich die Performance leicht verbesserte

ERTRAG EINER PV-ANLAGE

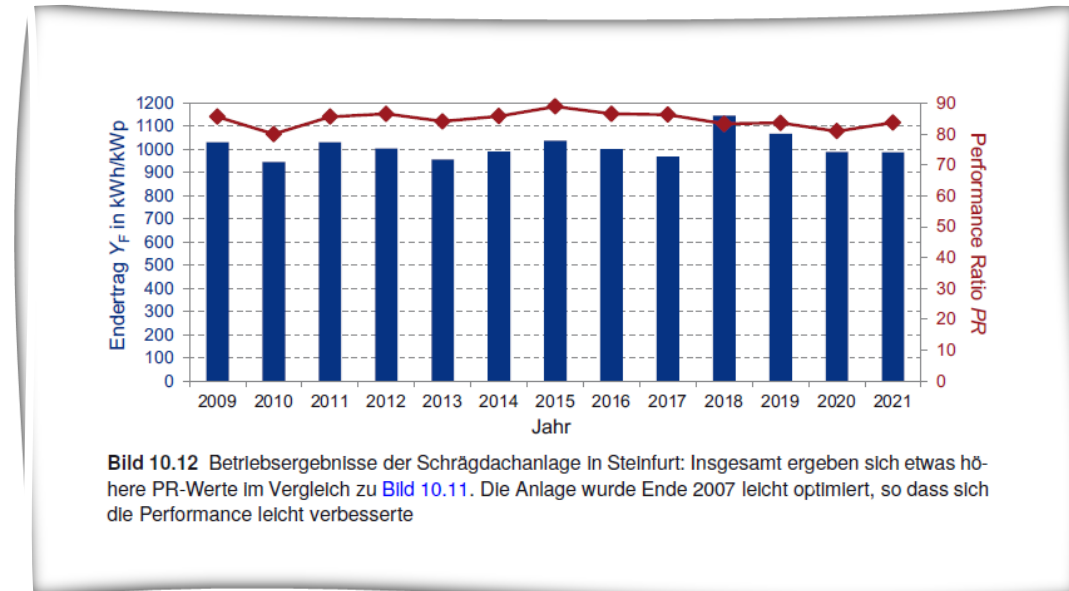
$$\text{Spezifischer Ertrag } Y = \frac{\text{produzierte Energiemenge}}{\text{Installierte Nennleistung}}$$

In unseren Breiten sind

$$900 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}_p} (= 900 \text{ h}) \text{ Volllaststunden}$$

ohne Probleme zu erreichen!

Und das bedeutet?



Eine PV-Anlage in Steinfurt mit optimaler Ausrichtung und einer Nennleistung von 9,4 kW erzeugt im Jahr:

$$\text{Ertrag} = 9,4 \text{ kW} \cdot 900 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}} = 8460 \text{ kWh}$$

RECHENINTERMEZZO

Welche Fläche müsste man in Deutschland mit PV bedecken, um den gesamten Strombedarf zu decken?

- Bruttostromverbrauch Deutschlands: 517 TWh
- Fläche Deutschland 360000 km²
- Spezifischer Jahres-Ertrag: $900 \frac{kWh}{kW_p}$
- $\eta = 20\%$

$$20\% \cdot 1 \frac{kW}{m^2} \cdot 900 \frac{kWh}{kW_p} \cdot A = 517000000000 kWh$$

$$A \approx 2872 km^2$$

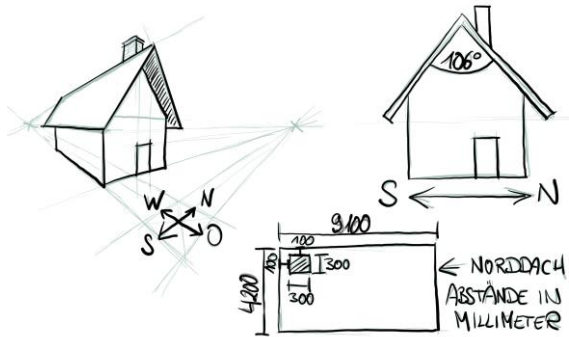
≈ 0,8% der Fläche Deutschlands müssten mit PV bedeckt werden.

Dachflächen in Deutschland ≈ 6800 km²



ERTRAGSPROGNOSEN-AUSRICHTUNG

Der Ertrag hängt natürlich (auch) von der Neigung und der Ausrichtung der PV-Anlage ab.



Ausrichtung: Nord- Neigung 30°

$$9,4 \text{ kW} \cdot 900 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}_p} \cdot 61\% \approx 5160 \text{ kWh}$$

Ausrichtung: Süd- Neigung 35°

$$9,4 \text{ kW} \cdot 900 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}_p} \cdot 100\% \approx 8500 \text{ kWh}$$

Ausrichtung: West- Neigung 25°

$$9,4 \text{ kW} \cdot 900 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}_p} \cdot 82,1\% \approx 6950 \text{ kWh}$$

Tabelle: Aus dem Buch „photovoltaik – Lehrbuch“ www.lehrbuch-photovoltaik.de

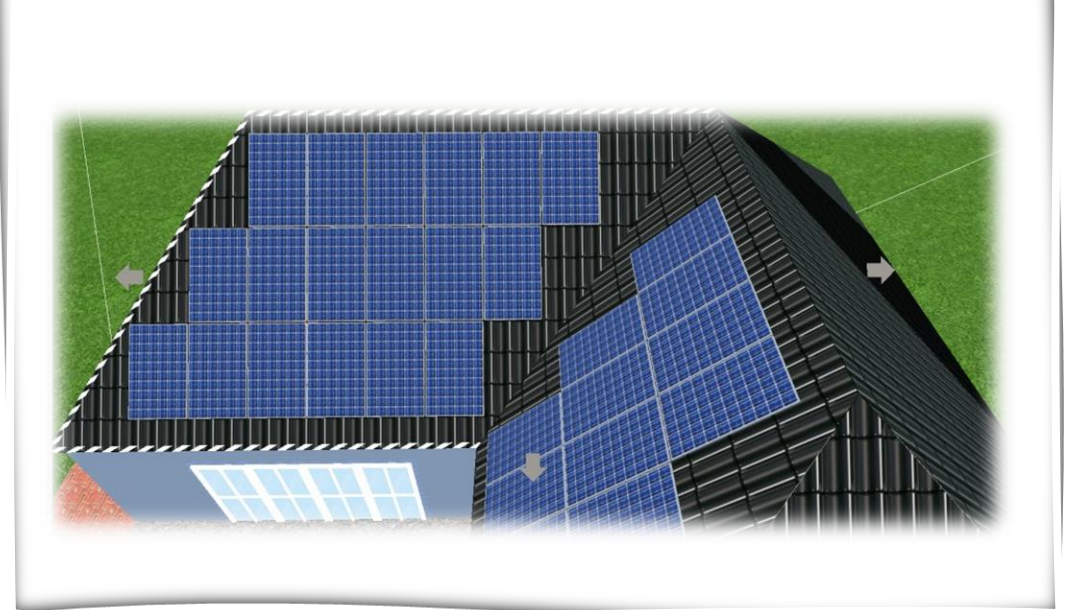
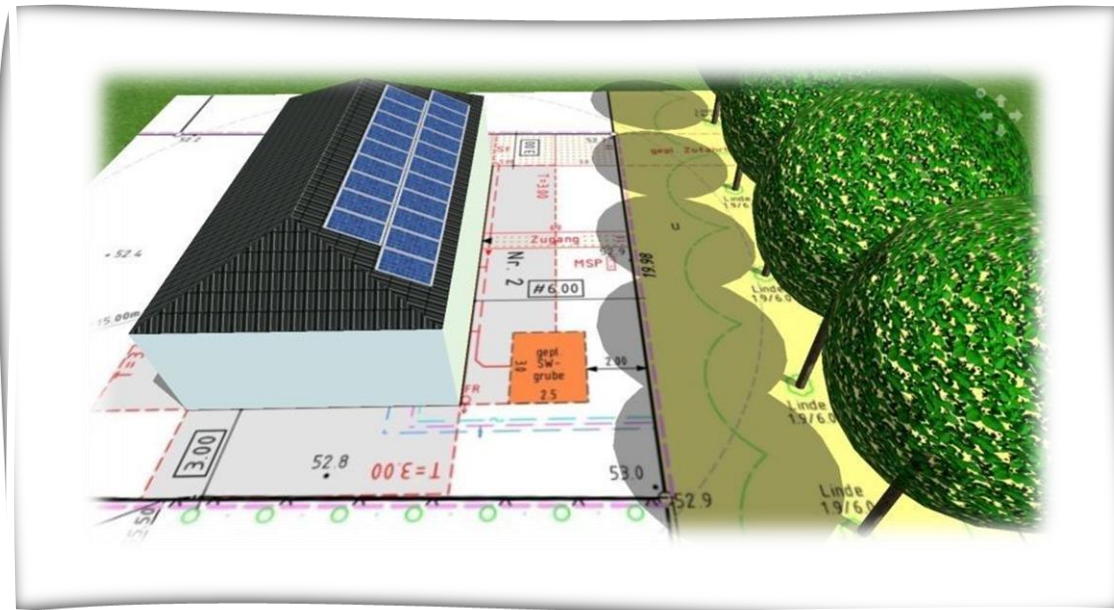
		Neigungswinkel β																				
		0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°		
Azimuth α	Südost	0°	85,2	87,3	89,5	91,8	94,2	96,8	99,6	102,5	105,5	108,6	111,8	115,1	118,5	122,0	125,7	129,5	133,4	137,4	141,5	
		5°	82,6	84,3	86,0	87,8	89,6	91,5	93,4	95,3	97,2	99,1	101,0	102,8	104,6	106,4	108,2	110,0	111,7	113,4	115,1	116,8
Süd	Südwest	0°	99,2	99,6	99,9	100,2	100,5	100,7	100,8	100,9	100,9	100,9	100,8	100,7	100,6	100,4	100,2	100,0	99,7	99,4	99,1	98,8
		5°	98,4	98,7	98,9	99,1	99,2	99,3	99,4	99,5	99,5	99,5	99,5	99,4	99,3	99,2	99,1	99,0	98,8	98,6	98,4	98,1
West	Nordwest	0°	85,7	85,0	84,2	83,4	82,6	81,8	81,0	80,2	79,4	78,6	77,8	77,0	76,2	75,4	74,6	73,8	73,0	72,2	71,4	70,6
		5°	85,1	84,5	83,9	83,3	82,7	82,1	81,5	80,9	80,3	79,7	79,1	78,5	77,9	77,3	76,7	76,1	75,5	74,9	74,3	73,7

ERTRAGSPROGNOSEN-AUSRICHTUNG

Erstellung einer PV-Anlage

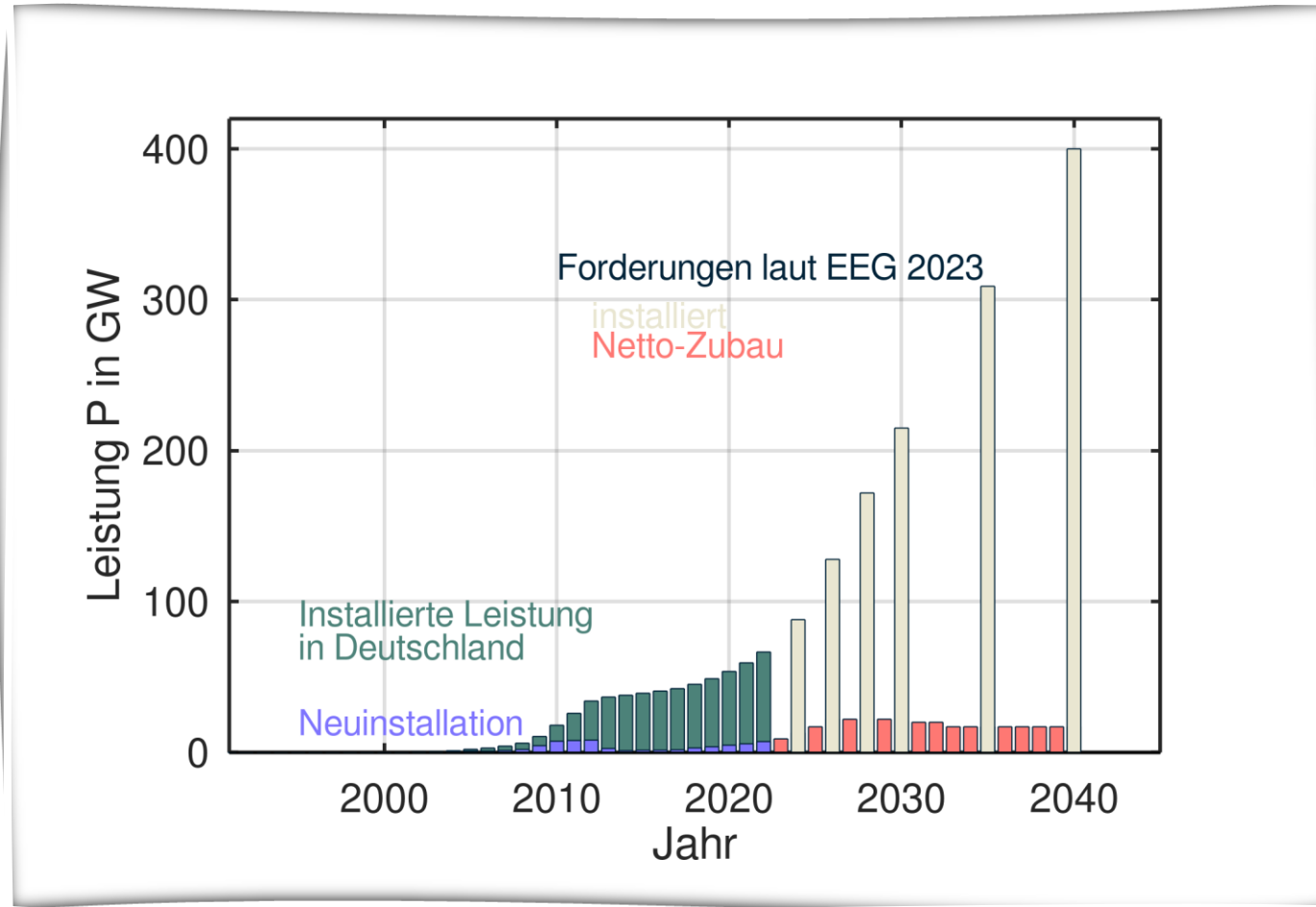
Um den Einfluss von Verschattung, lokalen Einstrahlbedingungen etc. zu berücksichtigen, werden Planungstools verwendet.

(z.B. PV*SOL, Valentin Software)



2. ENTWICKLUNG & WIRTSCHAFTLICHKEIT VON PV

DAS ERNEUERBARE ENERGIEN GESETZ (EEG)



Seit EEG2000

- Rechtlicher Rahmen für die Integration von Erneuerbare Energien-Anlagen
- Monetärer Anreiz - Einspeisevergütung

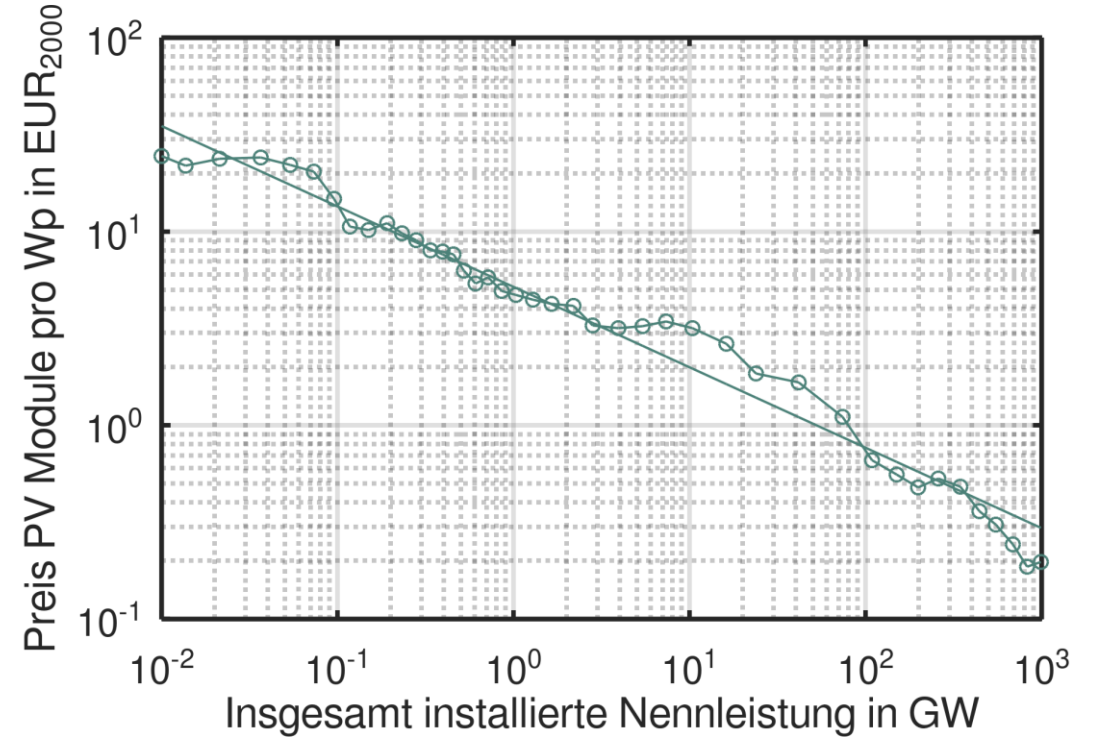
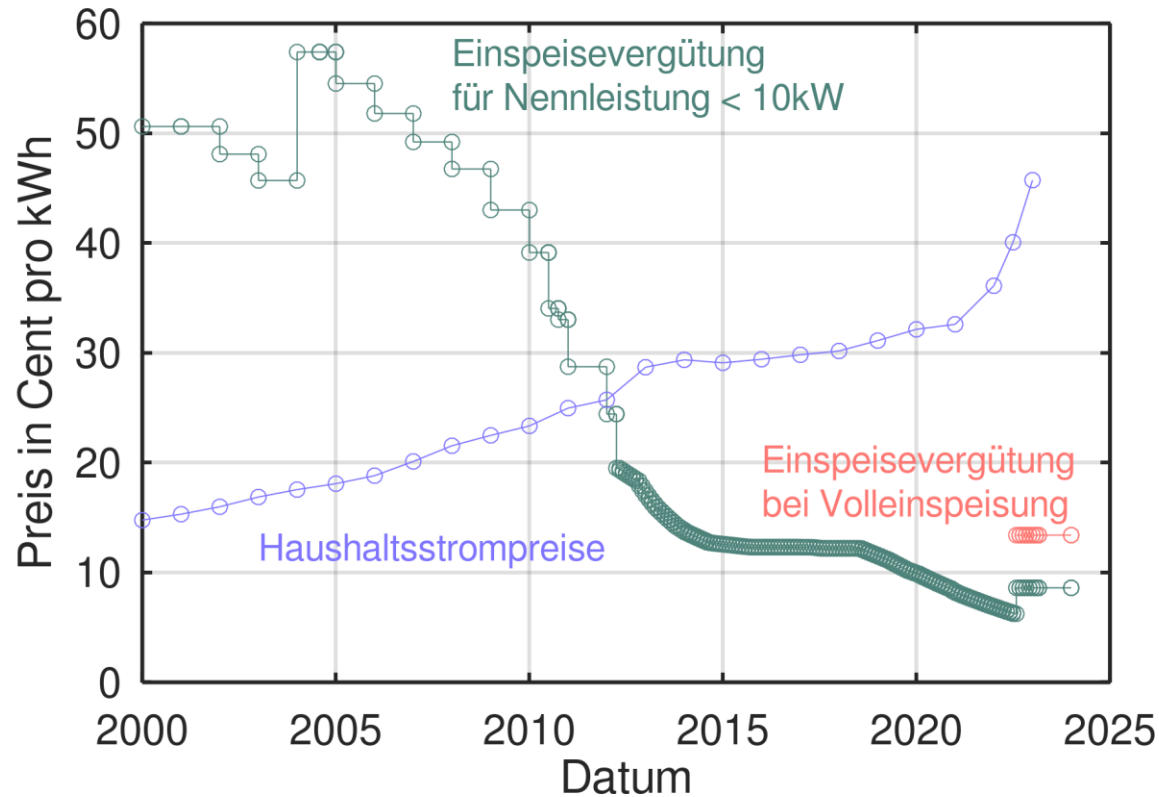


2022: 60,8 TWh PV-Strom = 11% des Strombedarfs

EEG2023

- Plan: Netto-PV-Zubau von ca. $20 \frac{GW_p}{a}$
- Ziel: > 400 GW_p im Jahr 2040
- ➔ 360 GWh bei 900 Volllaststunden

EINSPEISE & PREISENTWICKLUNG



Aktuelle Modulkosten:
20 – 30 $\frac{\text{Cent}}{\text{W}}$

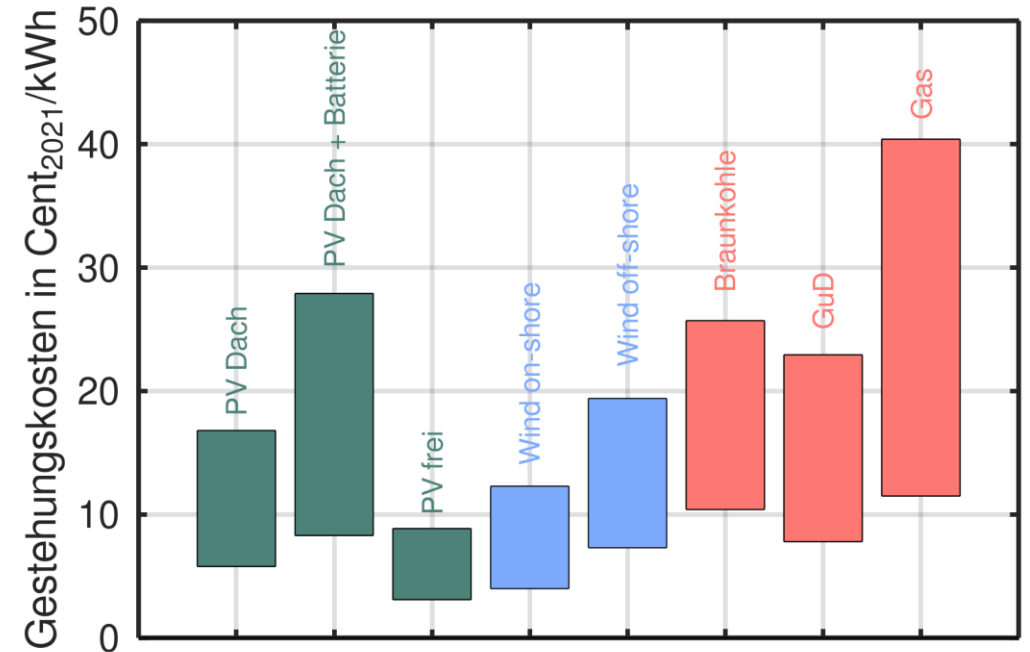
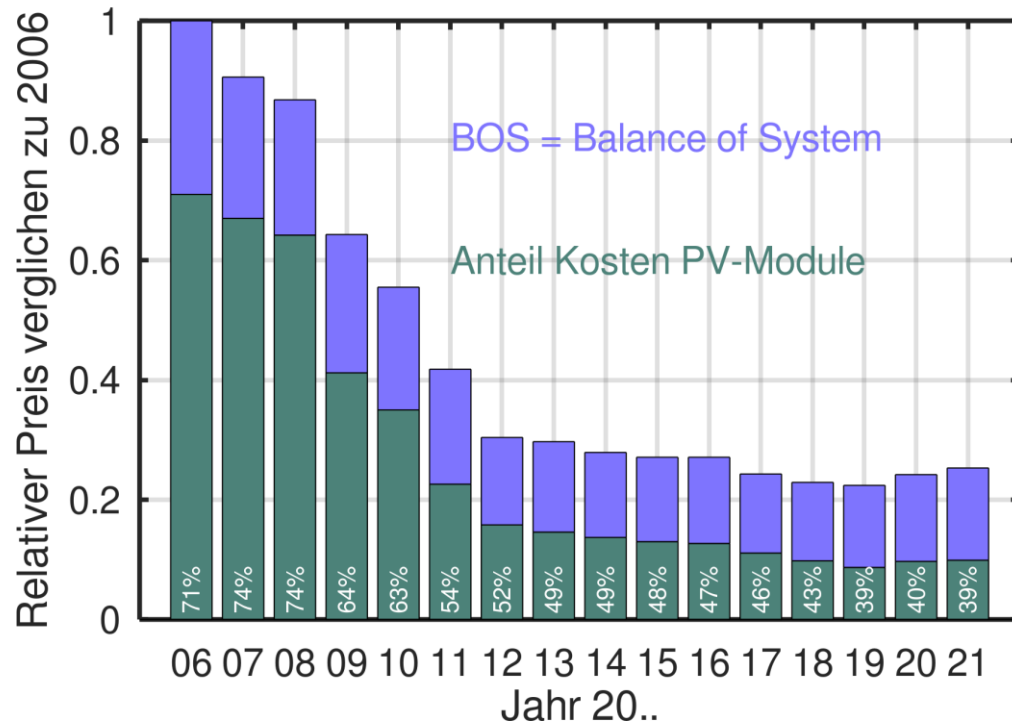


Angebote: 80 Euro für 400 W Modul



Modulkosten einer 10 kW-Anlage < 2000€

PREISENTWICKLUNG



Daten aus: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fraunhofer ISE
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>

AKTUELLE EEG SITUATION

Für PV mit < 10 kW Nennleistung

- Einspeisevergütung
 - ➔ Mit Eigenverbrauch: $8,6 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$
 - ➔ Volleinspeisung $13,4 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$

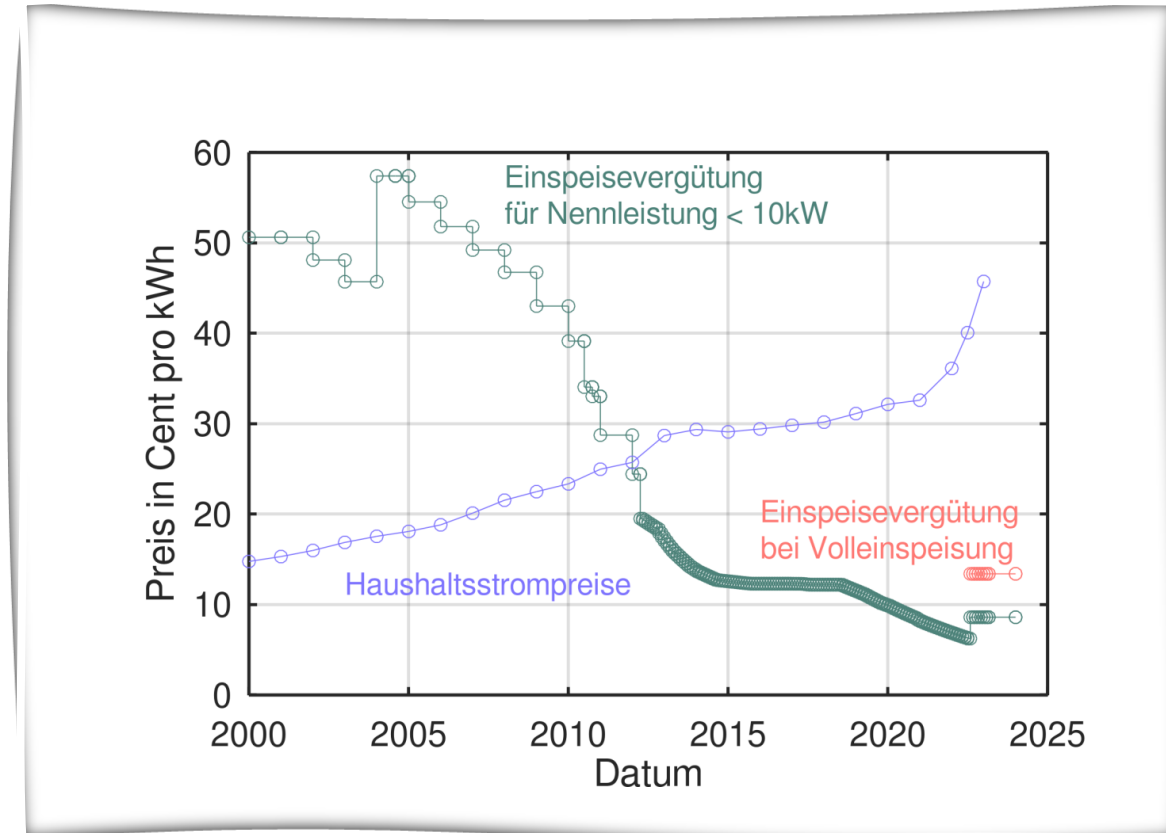
Wichtig für die Wirtschaftlichkeit:

Ertrag, Strompreise, Finanzmarkt, Fördermittel, Eigenkapital,
laufende Kosten (ca. 1-2% der Anschaffungskosten),

Eigenverbrauchsquote, ...

Versicherung, Reinigung, Wartung,
Austausch Wechselrichter, ...

Haushaltsstrompreise > $35 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$

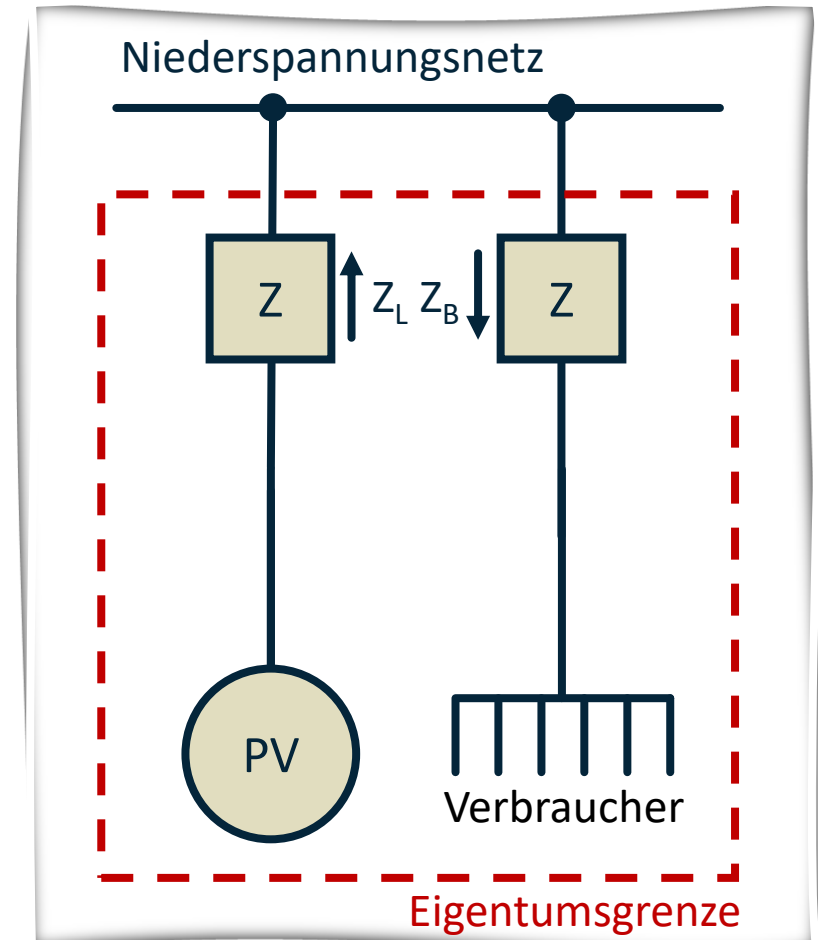


EINFACHE BEISPIELRECHNUNGEN

A 9 kW Nennleistung ohne Eigenverbrauch

- ➔ Gesamtinvestition: **11000€** → $\approx 1200 \frac{\text{€}}{\text{kW}_p}$
- ➔ Laufende Kosten (Rücklagen): $2 \frac{\%}{\text{Jahr}} \cdot 11000\text{€} \approx 220 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$
- ➔ Jahres-Ertrag: $9 \text{ kW} \cdot 900 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}_p \cdot \text{Jahr}} = 8100 \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}}$
- ➔ Einspeisevergütung: $8100 \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \cdot 13,4 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}} \approx 1085 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$

-
- ➔ Überschuss im Jahr: $1085 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} - 220 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} = 865 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$
 - ➔ Amortisationszeit: $\frac{11000\text{€}}{865 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}} = 12,7 \text{ Jahre}$



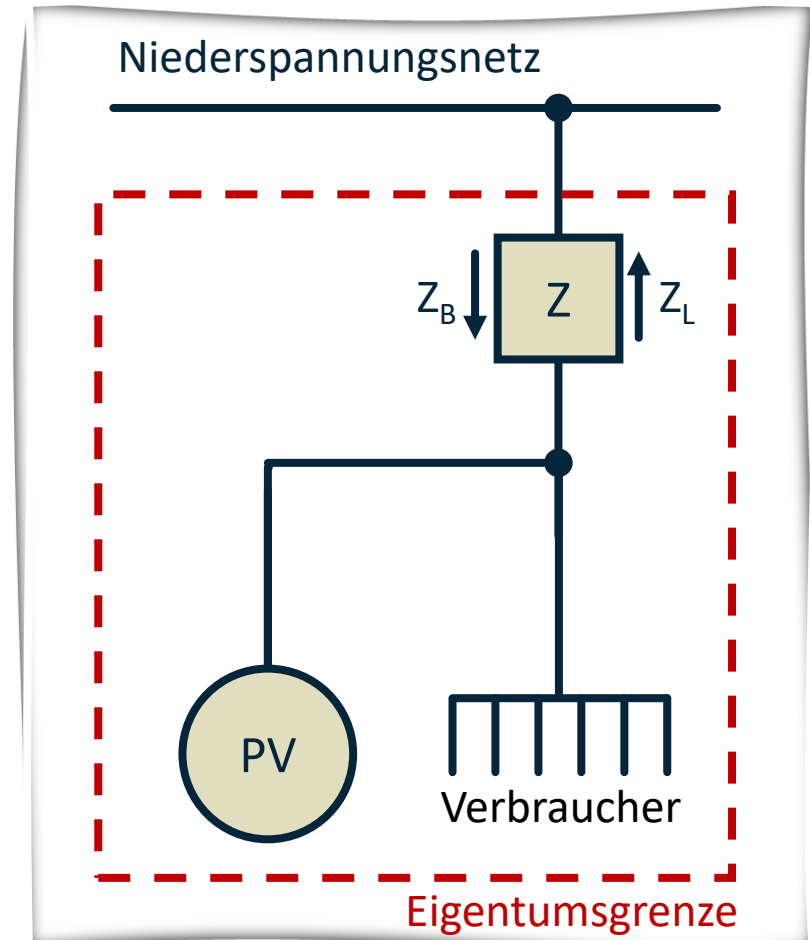
EINFACHE BEISPIELRECHNUNGEN

B 9 kW Nennleistung mit 40% Eigenverbrauch (Haushaltstrompreise 35 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$)

- ➔ Gesamtinvestition: 11000€ → $\approx 1200 \frac{\text{€}}{\text{kW}_p}$
- ➔ Laufende Kosten (Rücklagen): $2 \frac{\%}{\text{Jahr}} \cdot 11000\text{€} \approx 220 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$
- ➔ Jahres-Ertrag: $9 \text{ kW} \cdot 900 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}_p \cdot \text{Jahr}} = 8100 \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}}$
- ➔ Einspeisevergütung: $8100 \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \cdot 60\% \cdot 8,6 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}} \approx 418 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$
- ➔ Vorteil Eigenverbrauch: $8100 \frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}} \cdot 40\% \cdot 35 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}} = 1134 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$

➔ Überschuss im Jahr: $418 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} + 1134 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} - 220 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} = 1332 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$

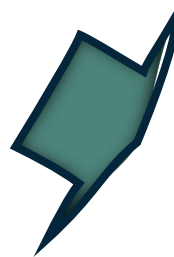
➔ Amortisationszeit: $\frac{11000\text{€}}{1332 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}} = 8,3 \text{ Jahre}$



SO EINFACH IST ES LEIDER NICHT

Die vorherigen Rechnungen sind extreme Vereinfachungen!

- ➔ Ertragsprognose sehr einfach abgeschätzt
- ➔ Zinsen für Fremdkapital? (Annuitätendarlehen)
- ➔ Fördermöglichkeiten!
- ➔ Degradation der Anlage (ca. 0,5 % – 1% pro Jahr)
- ➔ Entwicklung der Strompreise
- ➔ Energieeinsparung
- ➔ ...



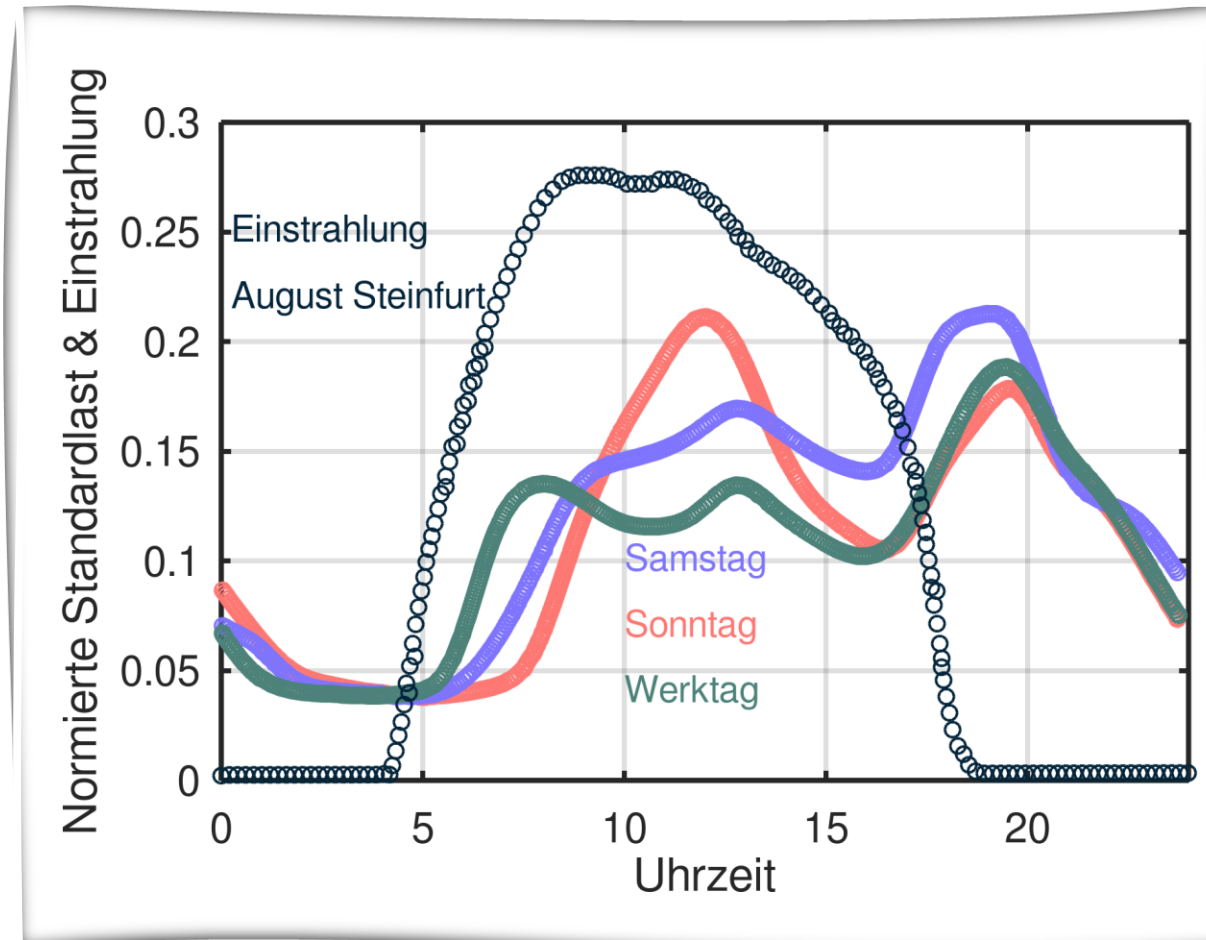
*Die Planung sollte in Zusammenarbeit
mit „Profis“ erfolgen!*

3. EIGENVERBRAUCHSOPTIMIERUNG

EIGENVERBRAUCH

Der Schlüssel zur Wirtschaftlichkeit einer privaten PV-Anlage ist der Eigenverbrauch!

- ➔ **Energiemanagement:** Kluge (smarte) Steuerung von Geräten: Waschmaschine, Trockner, ...
- ➔ Norm-Lastprofile nicht mehr zeitgemäß?!
 - Homeoffice
 - Elektromobilität
 - Wärmepumpen
- ➔ Wärmeerzeugung als „Zwischenspeicher“
- ➔ Batteriespeicher Blei-Gel-Akku und Li-Ionen-Akku



Norm-Lastprofile

EIGENVERBRAUCH

Thermische Speicherung - Heizstab

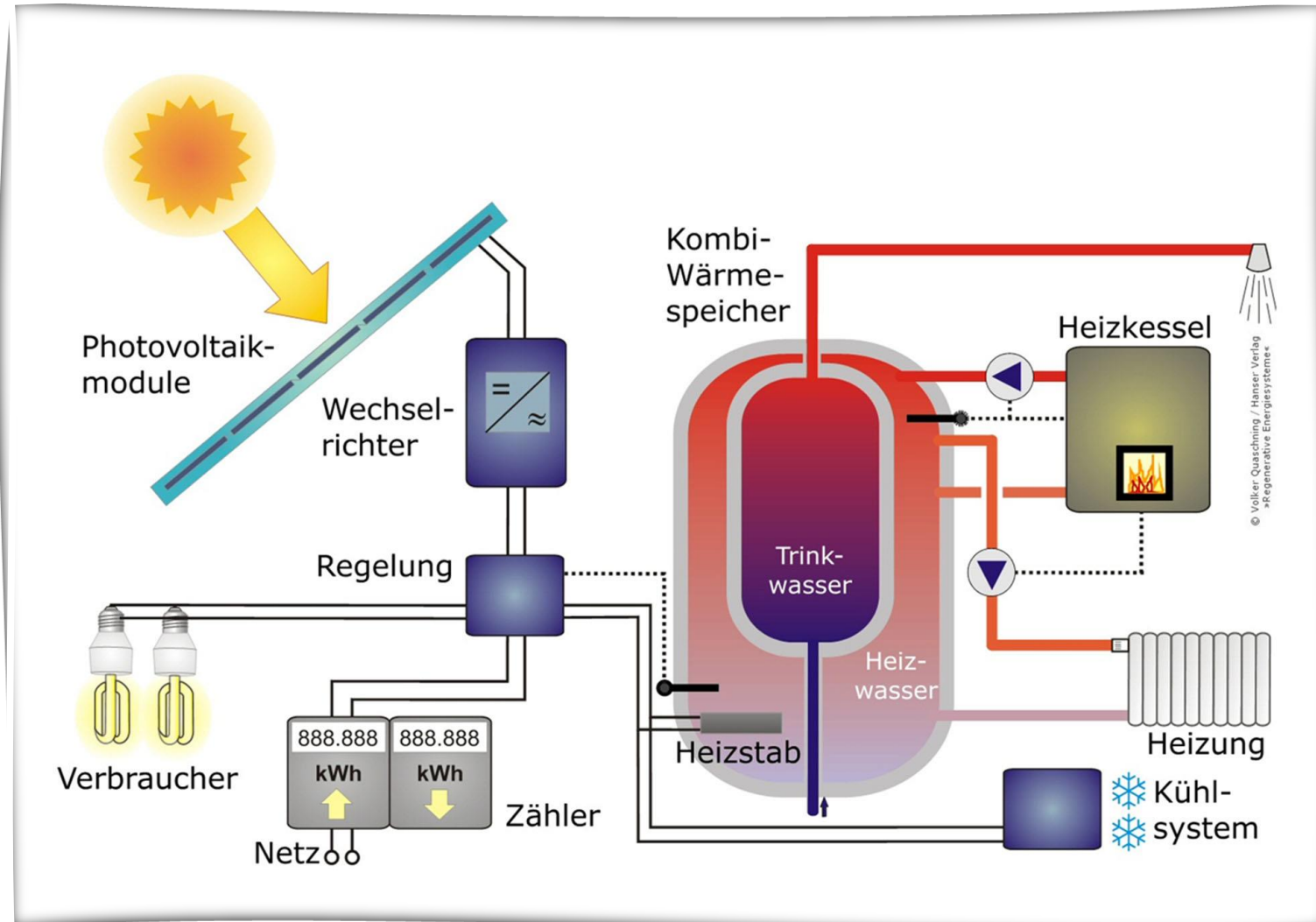
Für Brauchwasser oder Heizung

➔ Wärmekapazität Wasser: $c = 4,19 \frac{kJ}{^\circ C kg}$

z.B. 1000 l Speicher

➔ $Energie \approx 1,2 \frac{kWh}{^\circ C} \cdot \Delta T$

➔ Pro 1 °C Temperaturerhöhung können 1,2 kWh gespeichert werden.



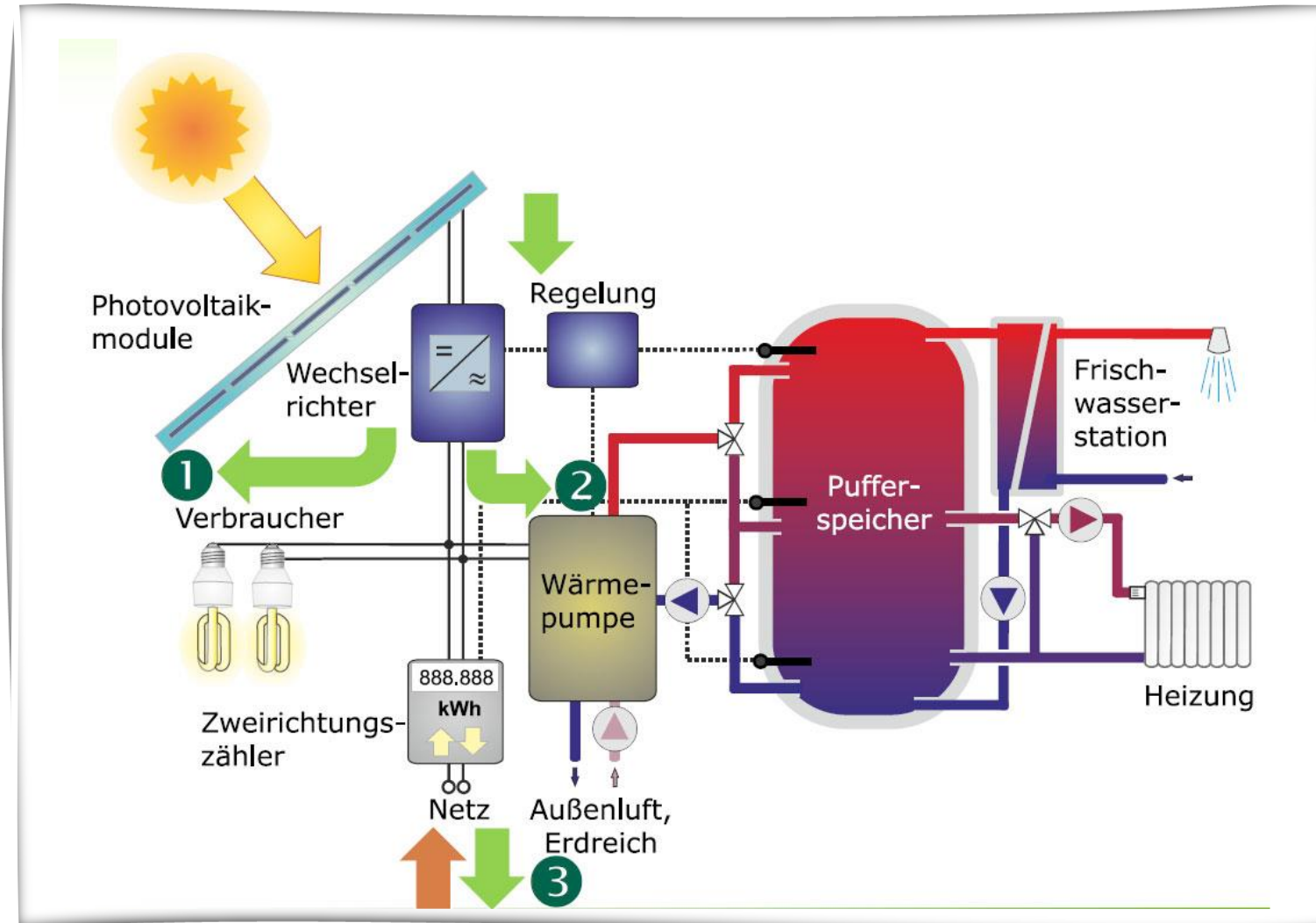
EIGENVERBRAUCH

Thermische Speicherung - Wärmepumpe

Für Brauchwasser oder Heizung

➔ Leistungszahl Wärmepumpe: 3,5 – 5,5

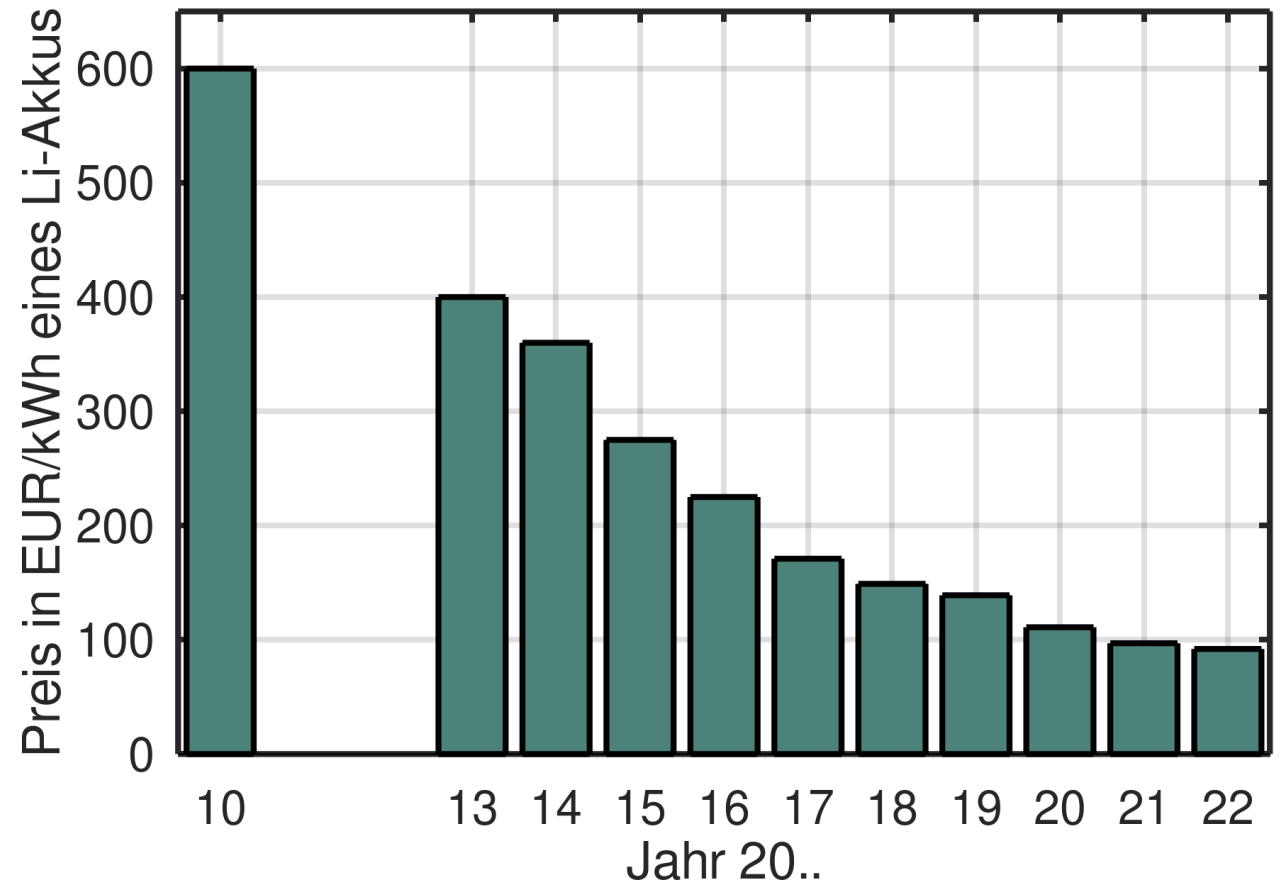
➔ $P_{\text{Heiz}} = 3,5 \text{ bis } 5,5 \cdot P_{\text{elekt.}}$



EIGENVERBRAUCH

Batteriespeicher

- Li-Ionen-Akkus haben sich gegenüber Blei-Akkus durchgesetzt
- Preise sind deutlich gesunken!
- *Aber:* Speicherkosten belaufen sich noch auf 10 – 20 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$
- *Aber:* Elektroautos & Photovoltaik, ein optimales Duo?!

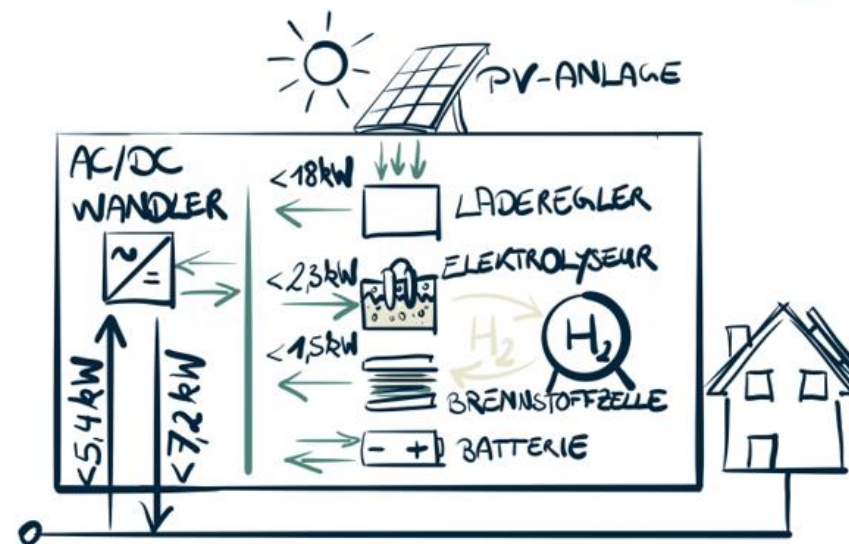


„EIGEN“VERBRAUCH - QUARTIERSLÖSUNGEN

Langfristig: Energiemanagement auf Quartiersebene



- Energie dort verbrauchen, wo sie „entsteht“
- Komplexe Mess-/ Steuer- und Regelungstechnik
- Entlastung der Netze



ZUSAMMENFASSUNG

- PV-Anlagen werden immer günstiger
- Die Einspeisevergütung reicht nicht mehr aus für einen auskömmlichen Betrieb
- Der Schlüssel liegt in einer hohen Eigenverbrauchsquote
- Der Einsatz von Li-Ionen-Akkus als Zwischenspeicher wird finanziell immer attraktiver
- Thermische Speicherung ist jetzt schon attraktiv

➔ *Wichtig:* Eine PV-Anlage ist immer eine individuelle Lösung!



Schritte zur eigenen PV-Anlage

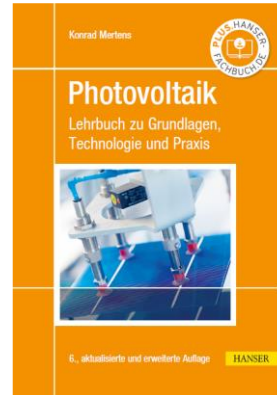
- Ist das Dach geeignet? - Ausrichtung, Statik
- Installierbare Leistung und Ertrag abschätzen.
- Varianten von „Profis“ durchrechnen lassen! (mit oder ohne Akku, Wärmepumpe Heizstab)
- Mehrere Angebote einholen! Preisunterschiede von 30% sind nicht unüblich!
- Fördermöglichkeiten prüfen!
- Installation durch Fachpersonal! – Ein undichtes Dach ist sehr „ärgerlich“

EMPFEHLUNGEN

➔ Prof. Konrad Mertens FH Münster

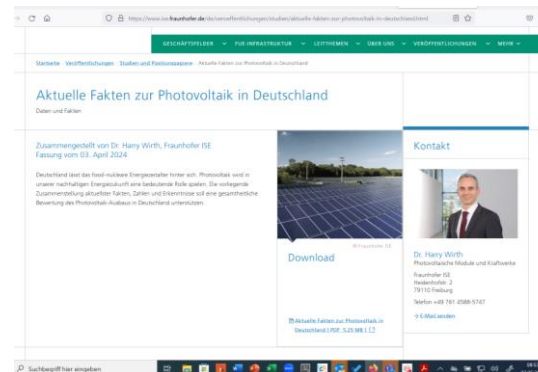
www.lehrbuch-photovoltaik.de

Photovoltaik verstehen, Abbildungen, Renditerechner



➔ PV*SOL (30 Tage Testversion)

➔ [Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland](http://www.ise.freiburg.de), ISE Freiburg



Möchten Sie das ein oder andere diskutieren?

➔ Schreiben Sie mir: maurice.nuys@fh-muenster.de

➔ Rufen Sie mich an: 0176 615 04552

➔ Kommen Sie zur mir zur Stegerwaldstraße 29



Vielen Dank!

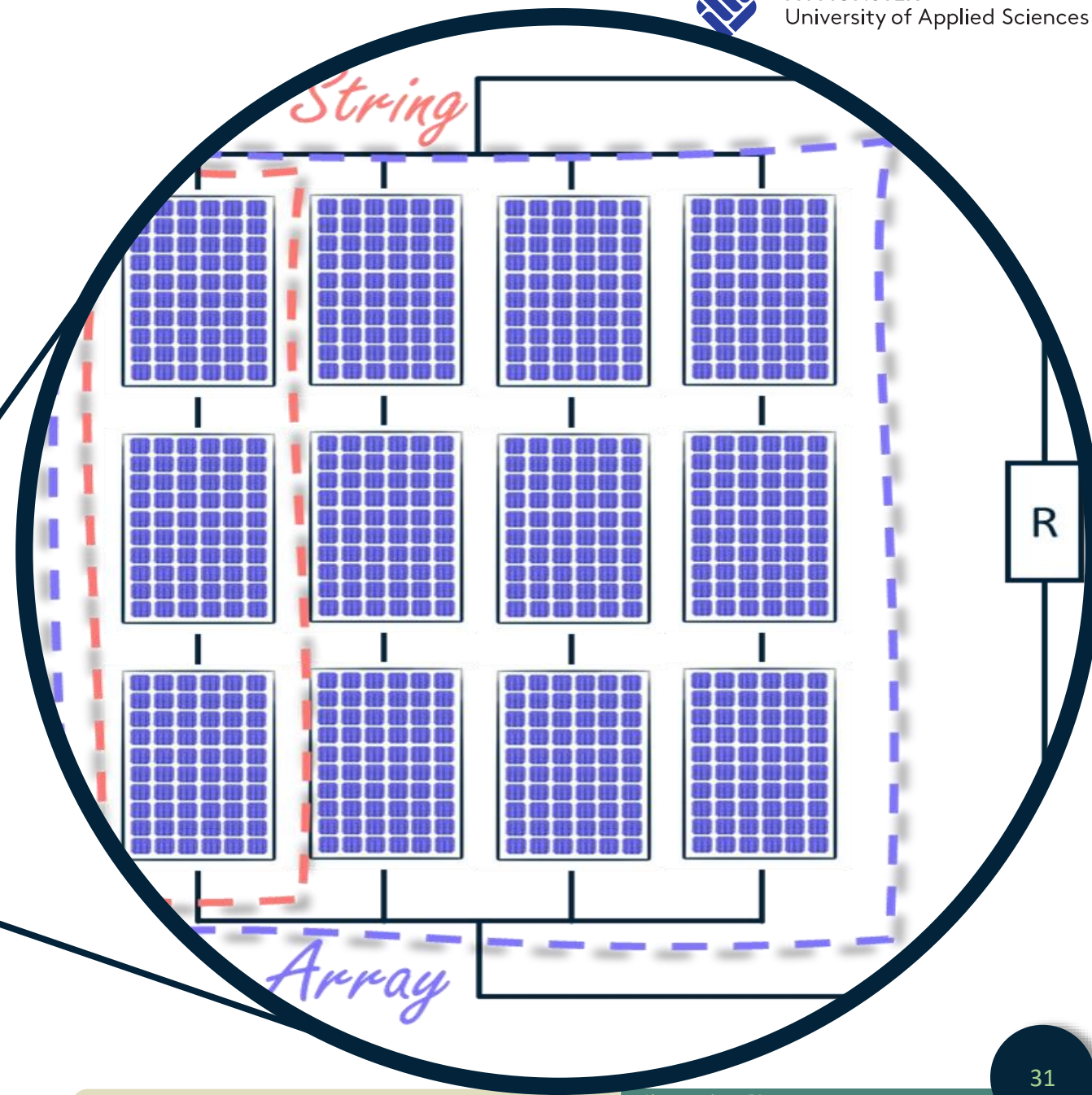
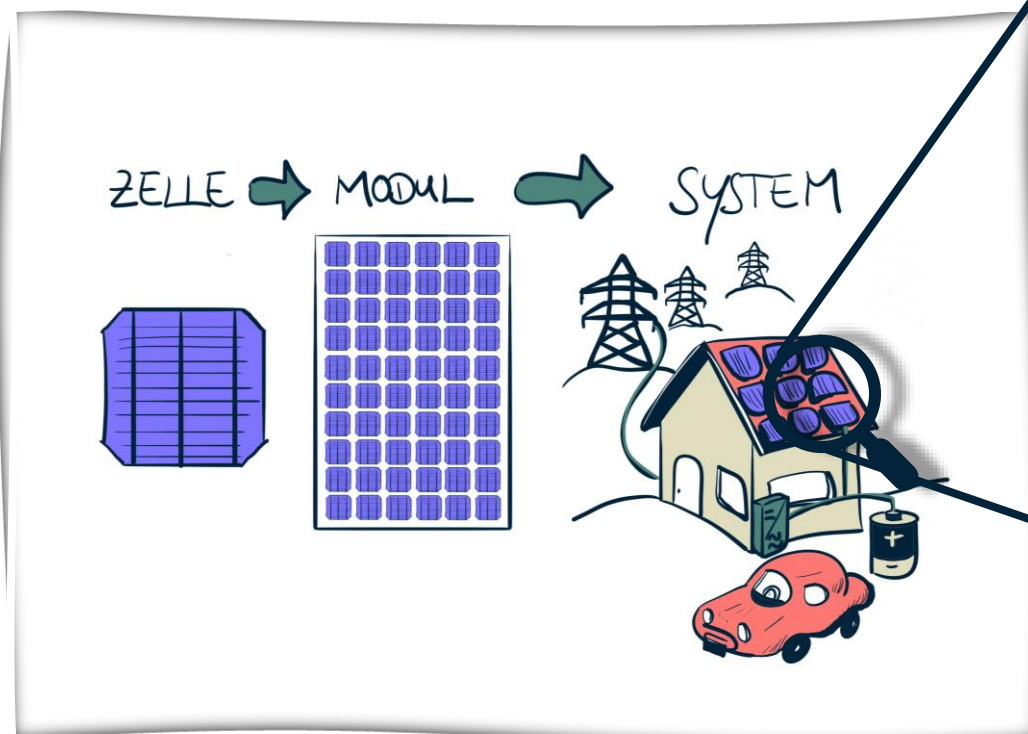
Fragen?

ANLAGE

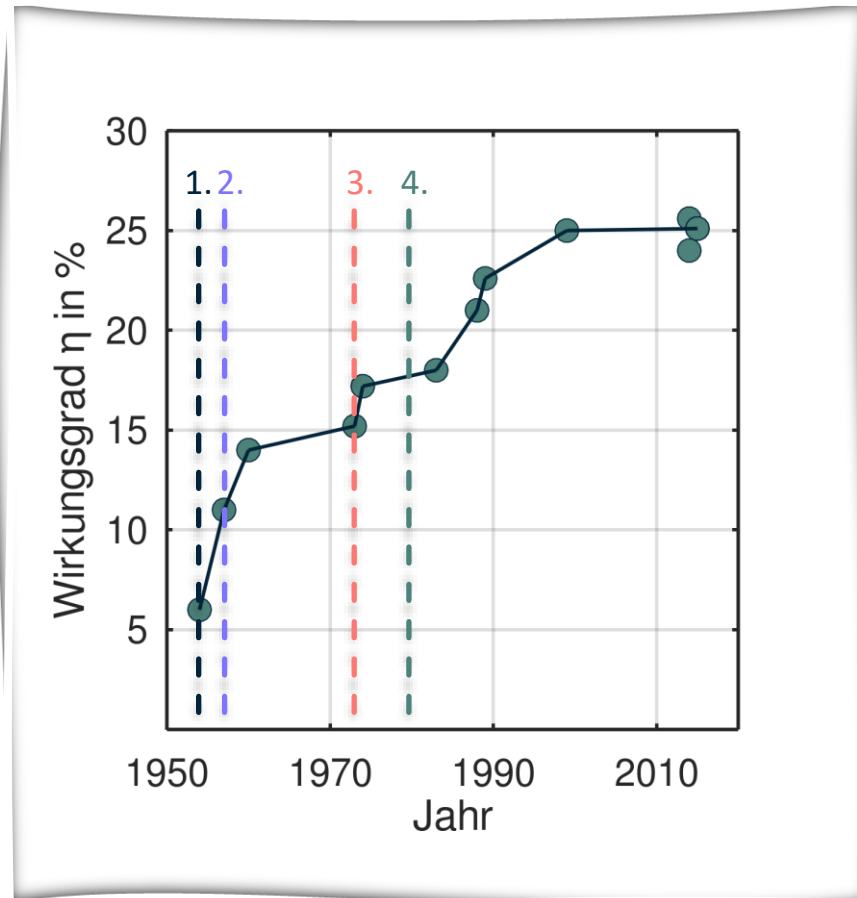
WIRKUNGSGRAD VON SYSTEMEN

Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{Zelle}} > \eta_{\text{Modul}} > \eta_{\text{System}}$$



INTERMEZZO: ENTWICKLUNG SI WIRKUNGSGRAD



Einfluss Politik & Weltereignisse

1. Wunder von Bern
2. 1957 Sputnik-Schock
3. 1973/1974 Ölkrise
4. 1979/1980 Ölkrise II
5. 2022 Putin-Schock werden wir nicht sehen, weil der Wirkungsgrad schon „nahe“ an seinem thermodynamischen Limit ist.

BALKONANLAGEN

Guerrilla-Photovoltaik

- ➔ Solarpaket I: Keine Anmeldung beim Netzbetreiber und im Marktstammdatenregister
- ➔ „Steckerproblematik“: zeitnahe Regelung durch VDE Norm
- ➔ Übergangsweise werden alte rückwärtsdrehende Zähler geduldet
- ➔ Nennleistung 800 W , inklusive Wechselrichter ca. 300€

- ➔ Ertrag: Süd-Ausrichtung:

$$900 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \rightarrow 900 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \cdot 0,8 \text{ kW} = 720 \text{ kWh}$$

→ 200 – 290 € Haushaltsstromäquivalent

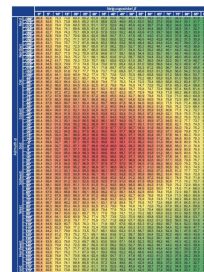
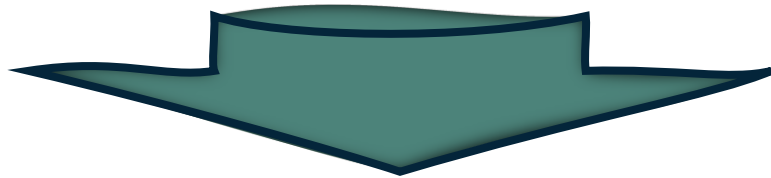


Abbildung: Von Triplec85 - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=135797512>

AGRI-PHOTOVOLTAIK

Nahrung vs. Energie? → NEIN!

- ➔ Doppelnutzung möglich! Teilweise positive Wechselwirkungen!
- ➔ Energiepflanzen: Aktuell werden ca. 20% der deutschen Ackerflächen für Energiepflanzen genutzt



A) Energiemais auf 1 ha:

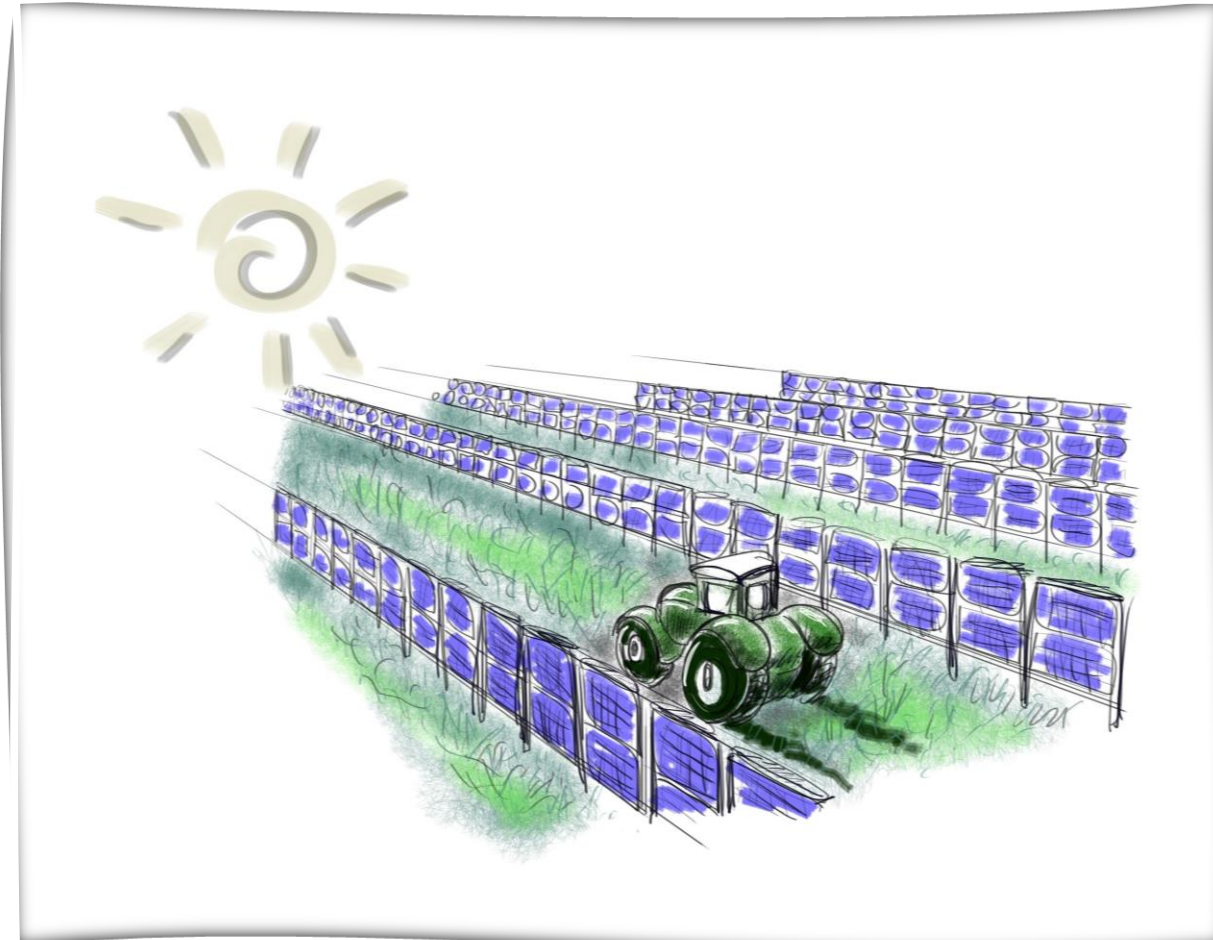
Mais → Biogas → Strom

Ertrag ca. 20.000 kWh

B) PV auf 1 ha:

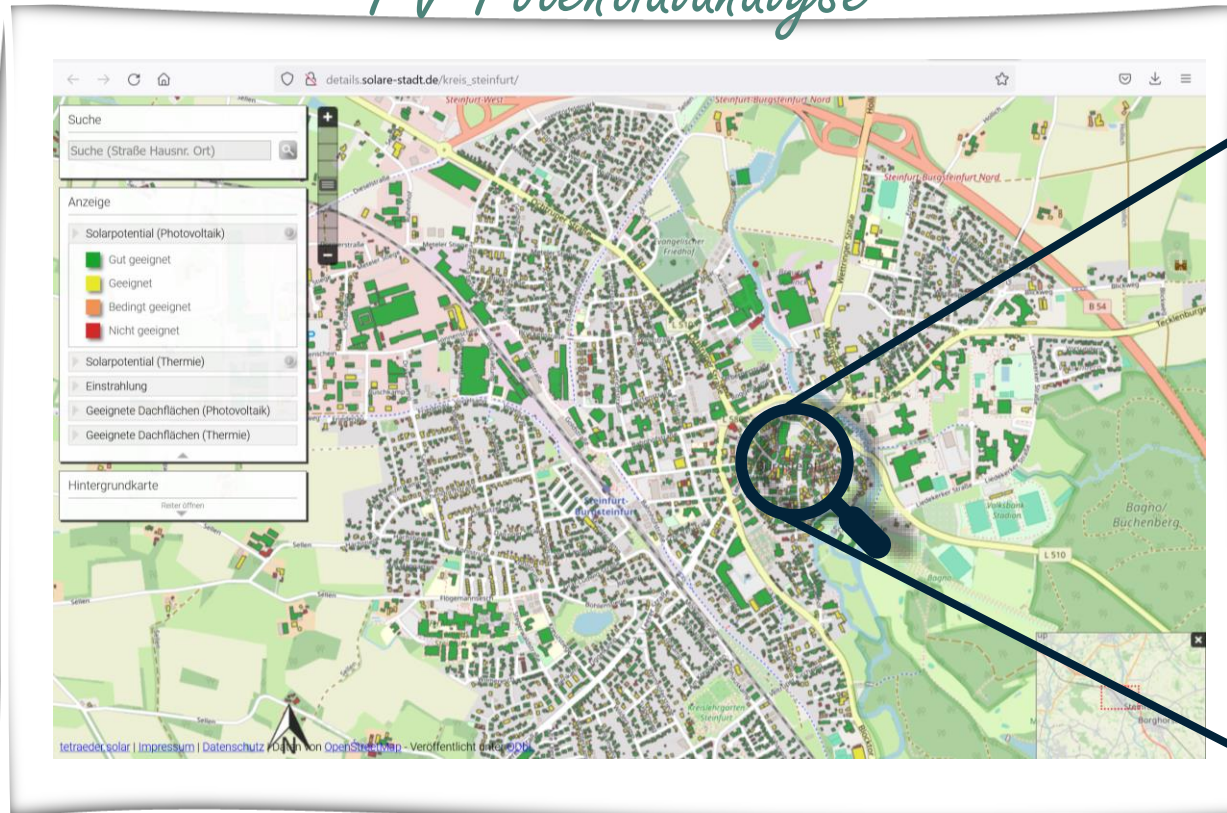
Sonne → Strom

Ertrag ca. 1.000.000 kWh



ERTRAGSPROGNOSEN-AUSRICHTUNG

PV-Potentialanalyse



AKTUELLE FAKTEN ZUR PHOTOVOLTAIK IN DEUTSCHLAND, ISE FREIBURG

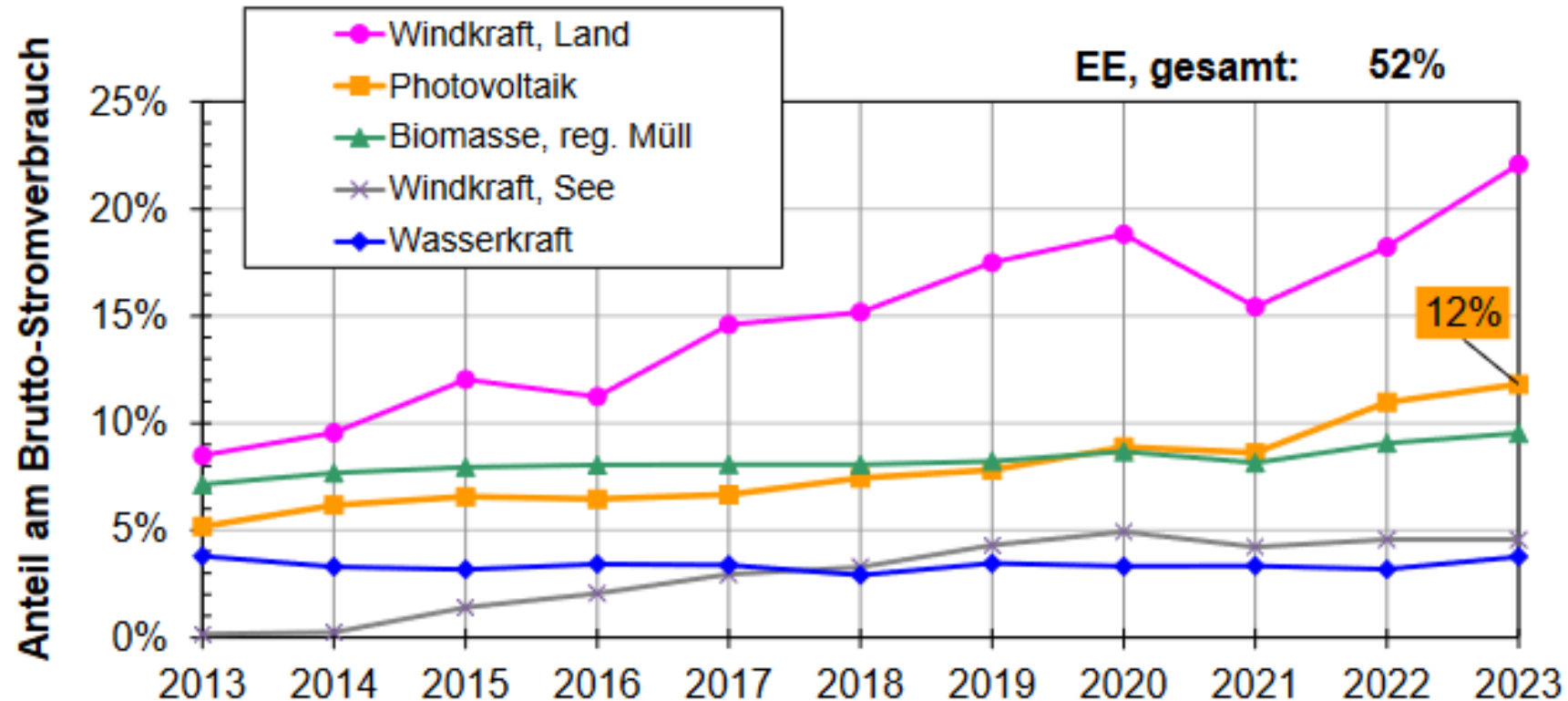
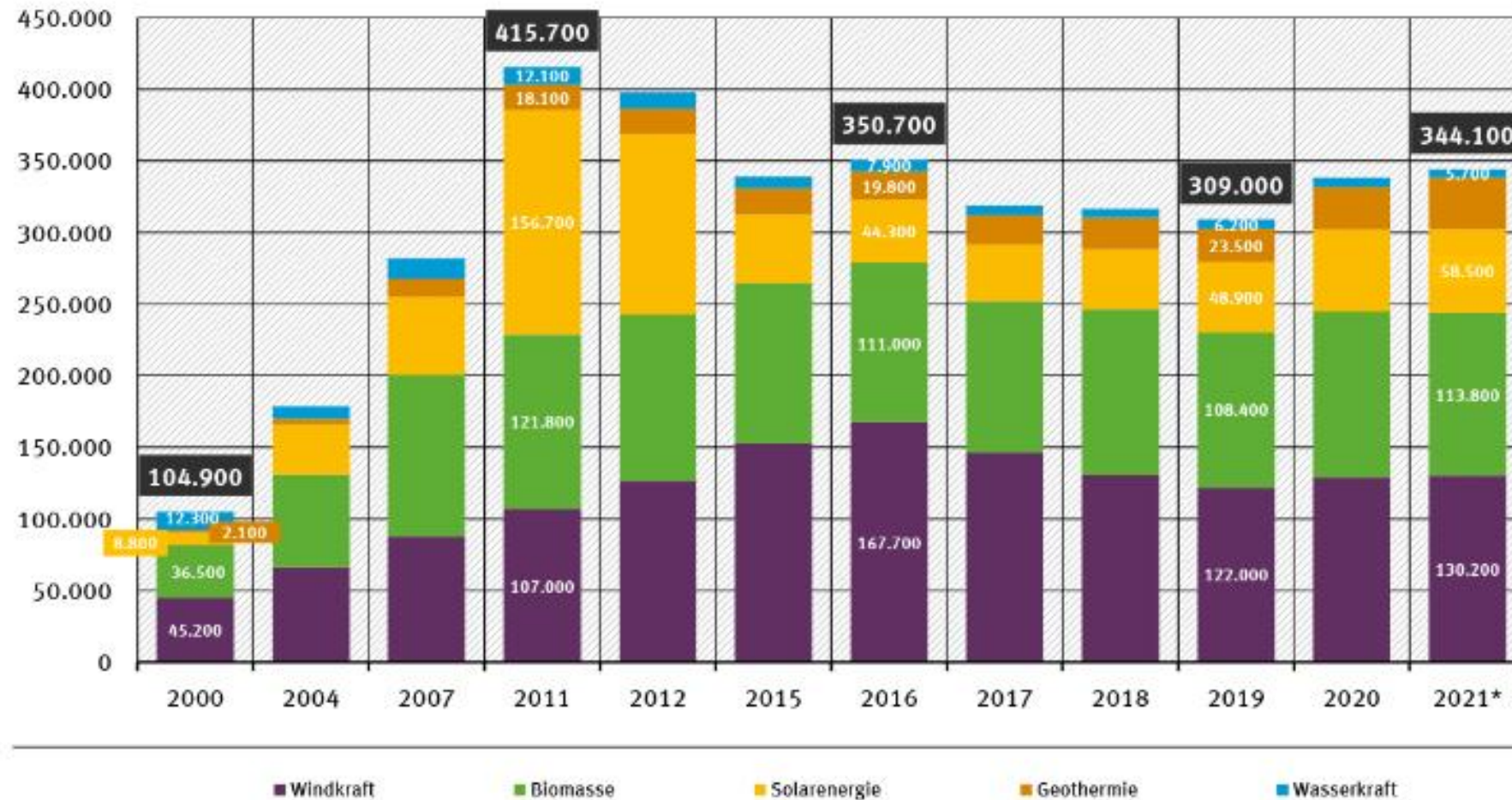


Abbildung 3: Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland [ISE4], [UBA1], [AGEE].

AKTUELLE FAKTEN ZUR PHOTOVOLTAIK IN DEUTSCHLAND, ISE FREIBURG



* vorläufige Daten zu 2021

Quelle: <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihe-der-beschaeftigungszahlen-seit-2000.html>

Abbildung 17: Anzahl der Beschäftigten im Bereich Erneuerbare Energien [UBA11]

AKTUELLE FAKTEN ZUR PHOTOVOLTAIK IN DEUTSCHLAND, ISE FREIBURG

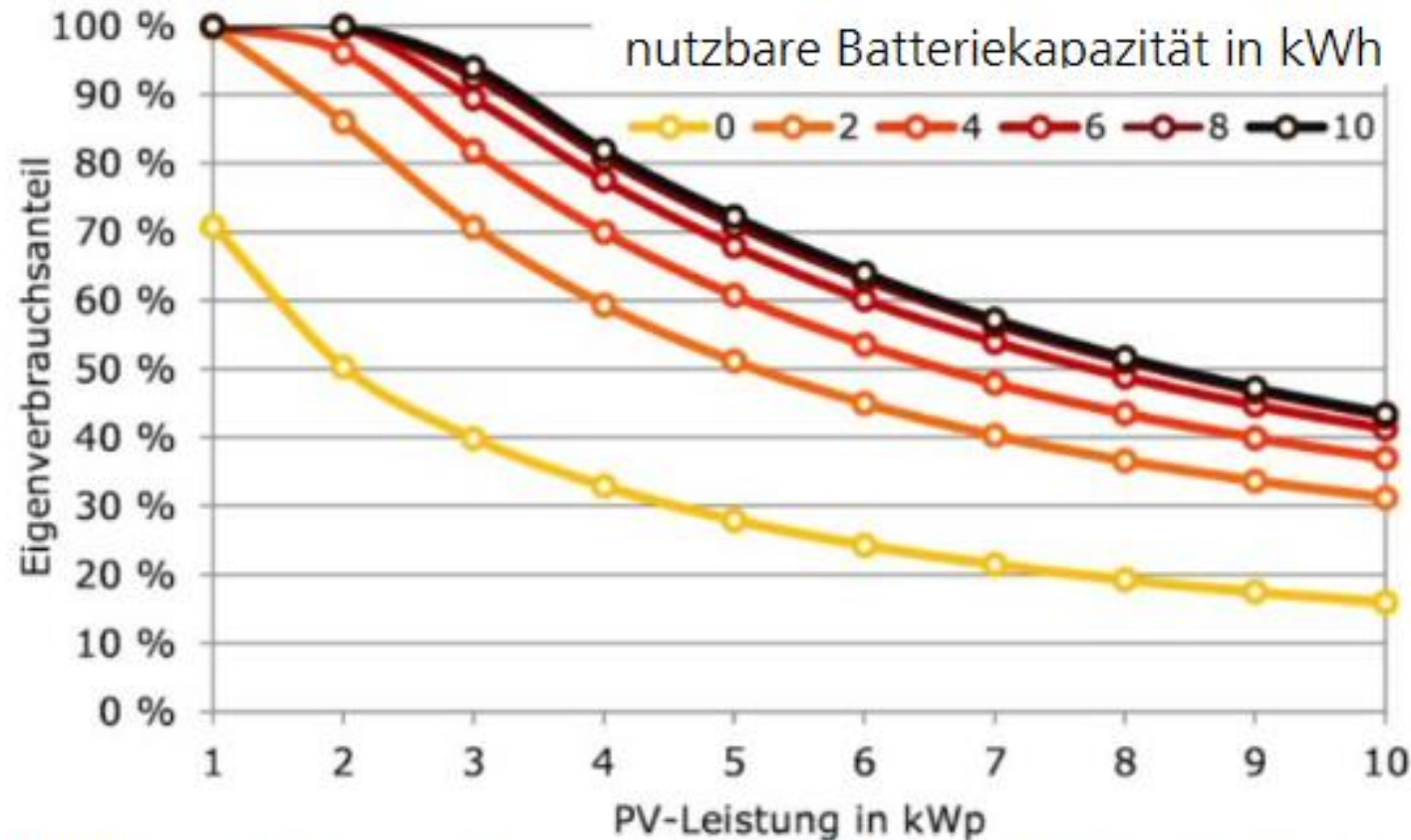


Abbildung 54: Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit von Batteriekapazität und Leistung des Solargenerators für einen Einfamilienhaushalt mit einem Jahresstromverbrauch von 4.700 kWh [Quasch].

AKTUELLE FAKTEN ZUR PHOTOVOLTAIK IN DEUTSCHLAND, ISE FREIBURG

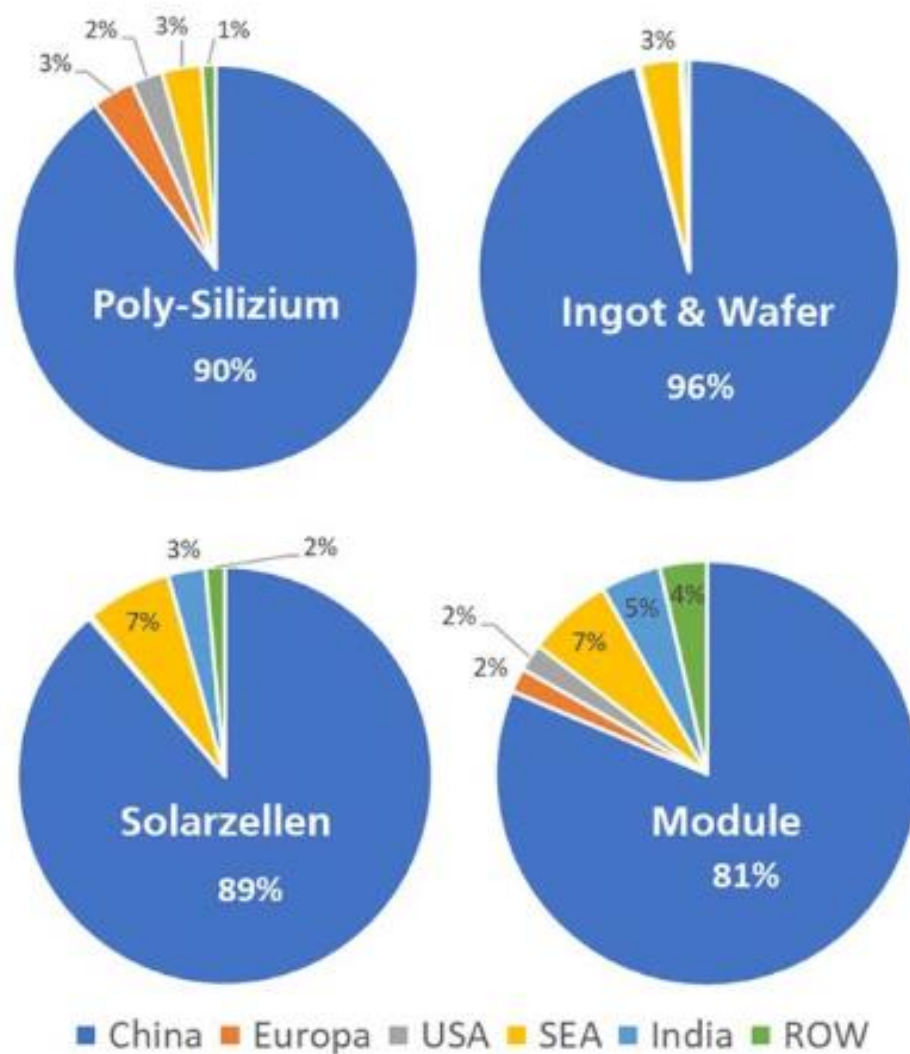


Abbildung 15: Produktionskapazität nach Wertschöpfungsstufen und Ländern, Daten: Wood Mackenzie, 2023