

# **PV-Anlagen für Privateigentümer- Kein Dach ohne Solarstrom!**

Prof. Konrad Mertens

Labor für Optoelektronik und Sensorik, Photovoltaik-Prüflabor

Fachbereich Elektrotechnik und Informatik

Fachhochschule Münster

## Gliederung:

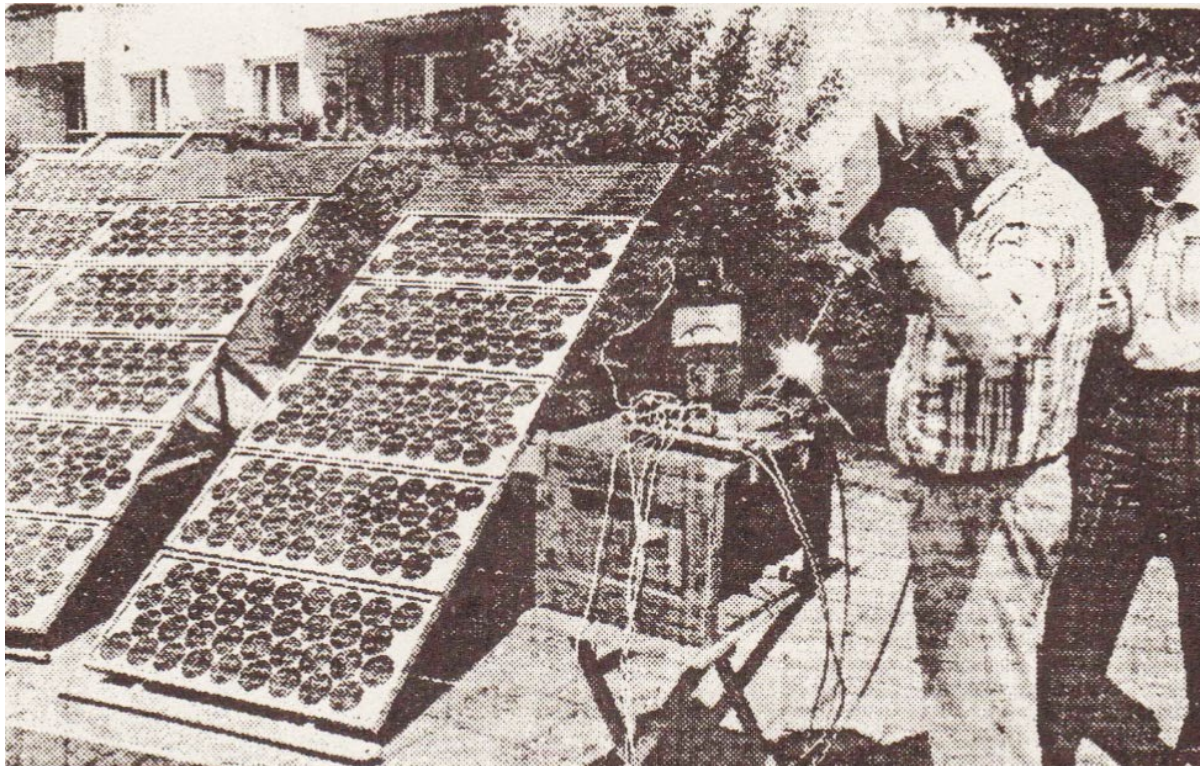
1. Was heißt hier Klimaschutz?
2. Einführung zur Photovoltaik
3. Markt- und Preisentwicklung
4. Wirtschaftlichkeit von konkreten Anlagenbeispielen
5. Speicherung von Solarstrom
6. Photovoltaik und Elektroautos?
7. Fazit

## Zur Person

- Seit 1991 im Solarenergie-Förderverein Aachen (SFV):



Vorführung: Schweißen mit Solarenergie...



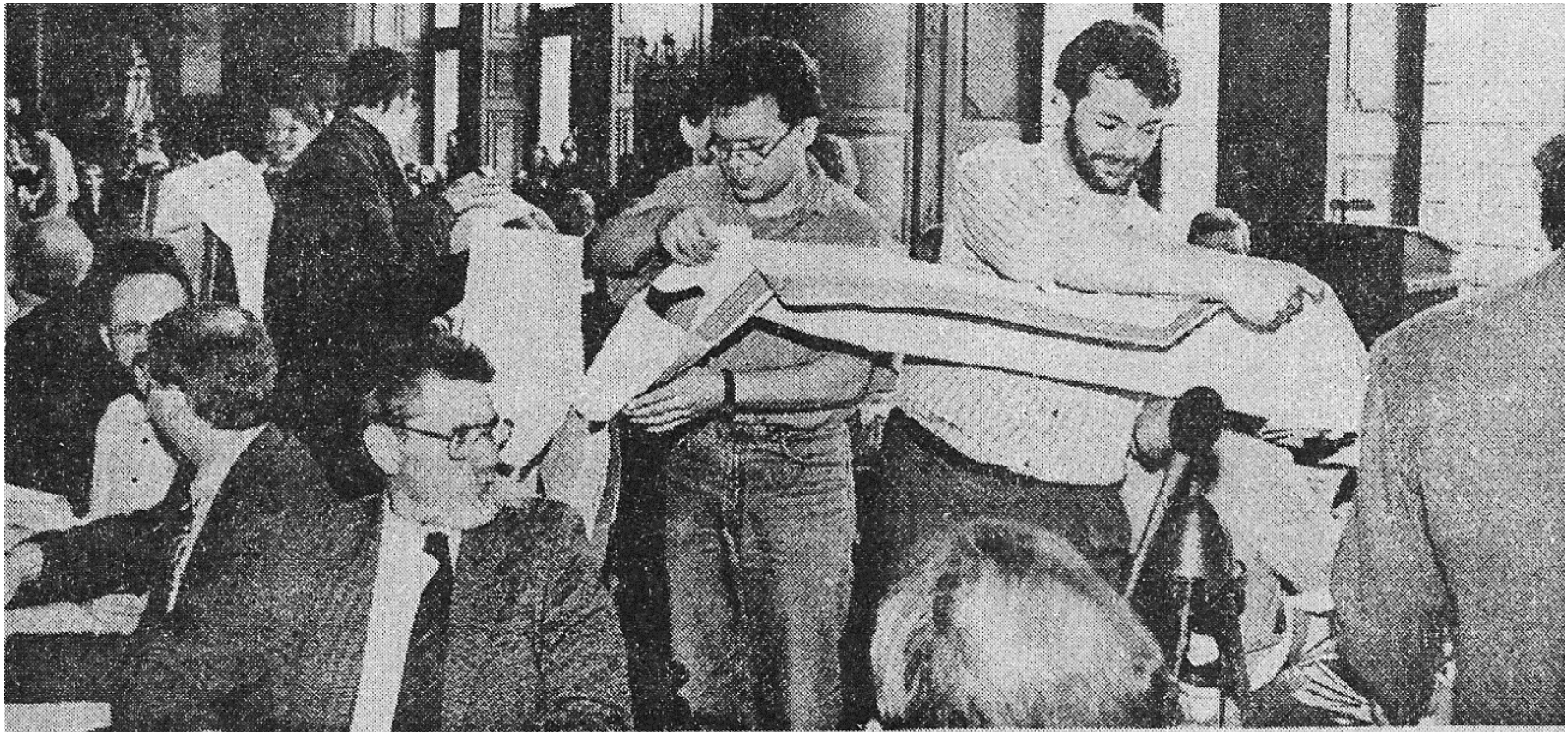
## Zur Person

Vorführung: Betrieb von Geräten mit Solarenergie (Halle, 1990)



## Zur Person

Einsatz für kostendeckende Vergütung...



Befürworter des „Aachener Modells“ entrollten im Rathaus eine 60 Meter lange Papierbahn: zusammengeklebte Blätter mit rund 2 500 Unterschriften für die kostengerechte Vergütung.  
Fotos: Harald Krömer



## Zur Person

- 1996: Bau einer eigenen Photovoltaikanlage (2 kWp)



## Zur Person



- Studium und Promotion (Elektrotechnik) an der RWTH Aachen
- Industrietätigkeit im Bereich Erneuerbare Energien und Intelligente Netze
- Seit 2000 Professor an der Fachhochschule Münster:

### Lehre:

- Photovoltaik
- Sensorik
- Lichtwellenleitertechnik

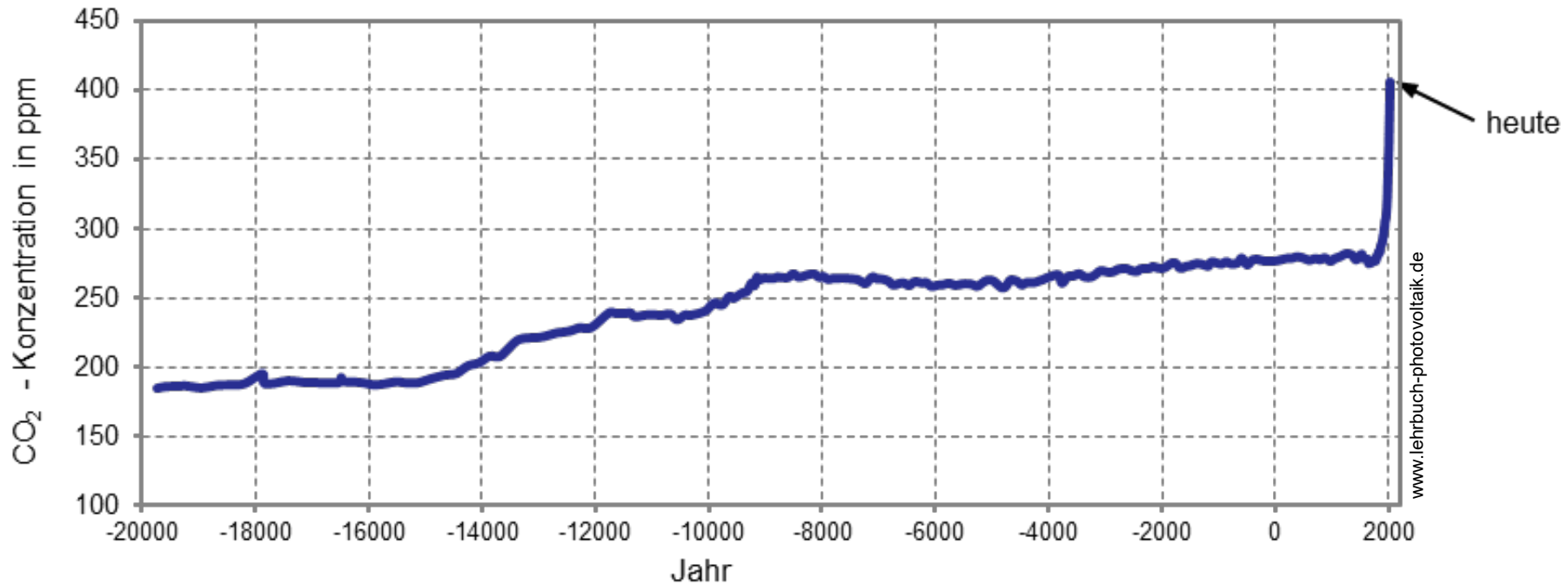
### Forschung:

- Photovoltaik-Prüflabor
- Qualitätsüberprüfung von Photovoltaikanlagen



# 1. Was heißt hier Klimaschutz?

## Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Lauf der letzten 20.000 Jahre:



- ⇒ Temperaturanstieg
- ⇒ Häufiger Stürme und Überflutungen
- ⇒ Verschiebung von Klimazonen

## Der Klimawandel hat schon begonnen:



## Der Klimawandel hat schon begonnen:



Der Klimawandel hat schon begonnen:

## Wald: Klimawandel verursacht Milliarden-Schäden



© Adobestock

agrarheute, 28.08.2019

## Der Klimawandel hat schon begonnen:



Trockenheit lässt Buchen sterben, WAZ, 28.08.2019

## Der Klimawandel hat schon begonnen:



Photo: David Gray/Getty Images

## Australien, Herbst 2019

## Der Klimawandel hat schon begonnen:



Foto: Dean Miller/dpa

## Australien, Frühjahr 2020



## Der Klimawandel hat schon begonnen:



## Kalifornien, Herbst 2020

## Der Klimawandel hat schon begonnen:



Deutschland, Sommer 2021

## Der Klimawandel hat schon begonnen:



Deutschland, Sommer 2021

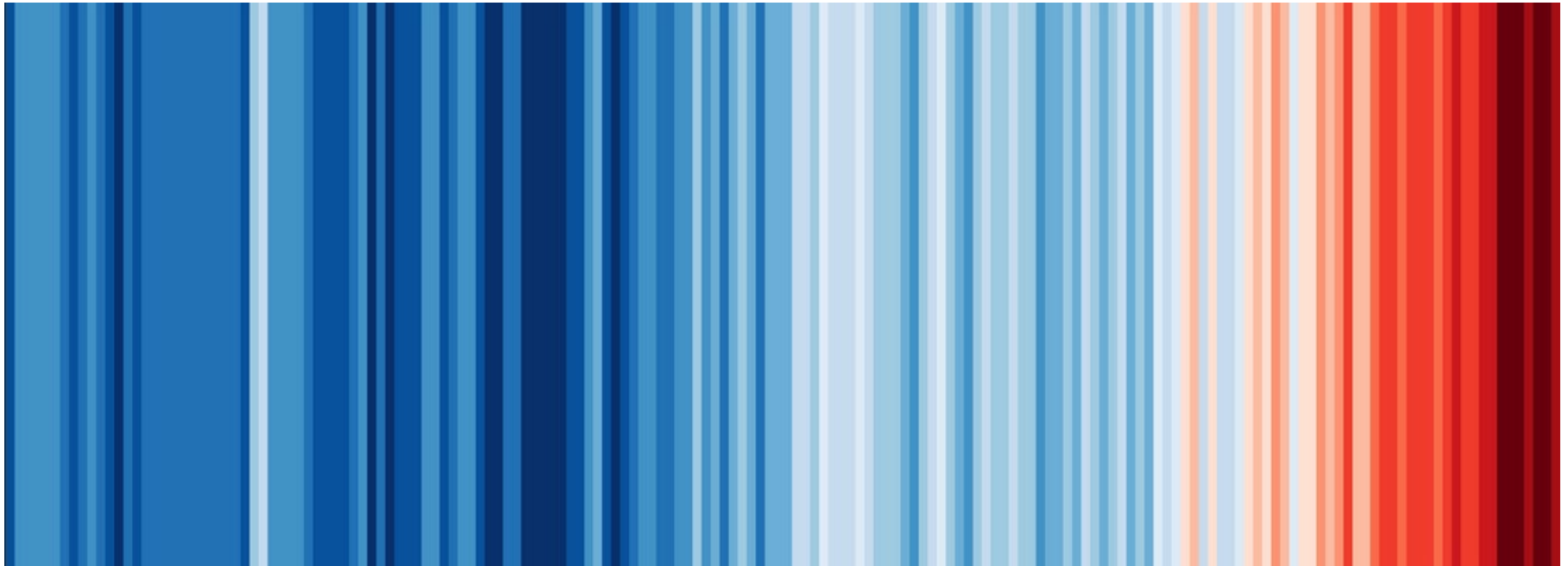
## Der Klimawandel hat schon begonnen:



Australien, Queensland, Frühjahr 2022

# Was ist das?

## Jahrestemperaturen seit 1881:

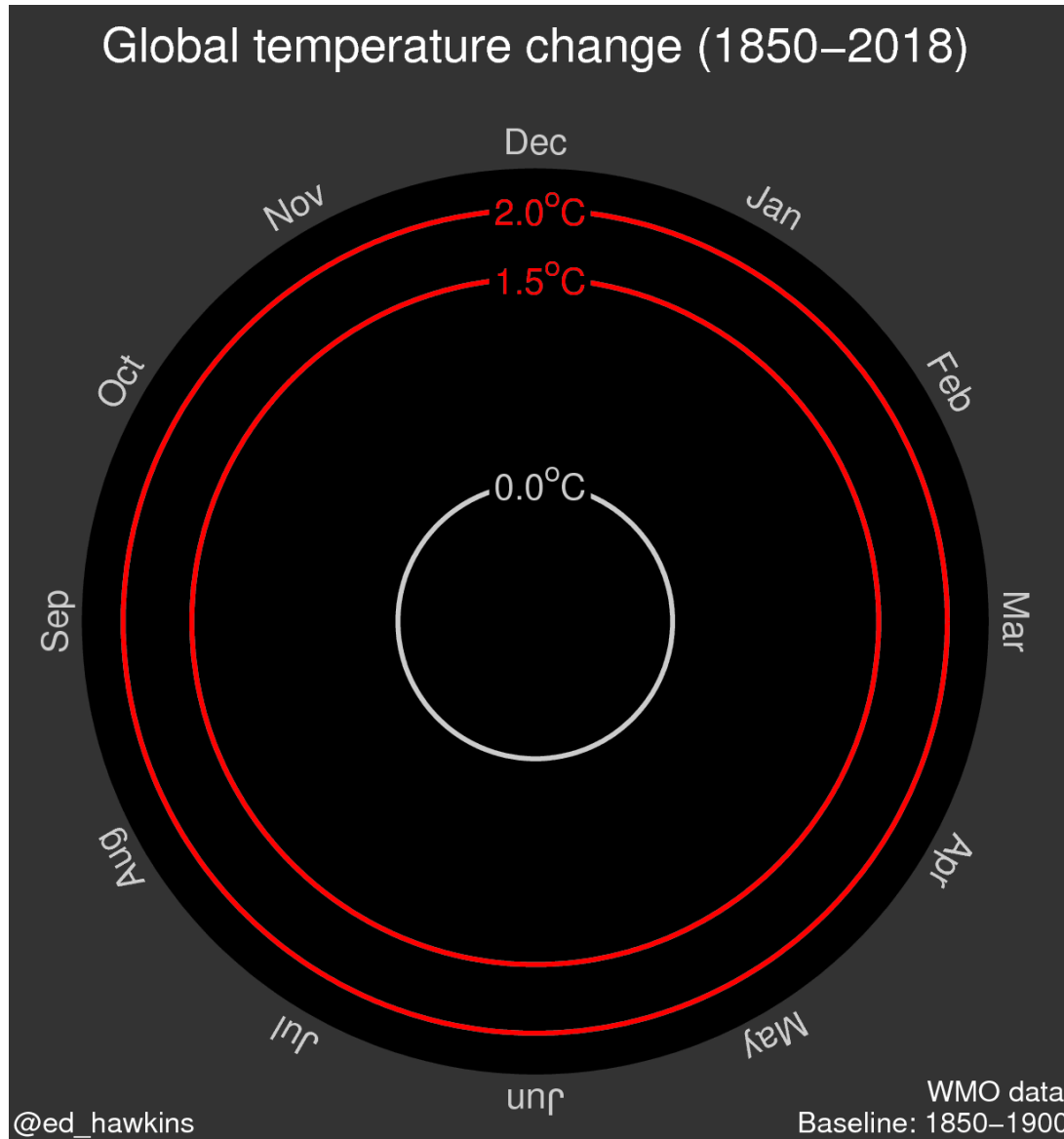


1881

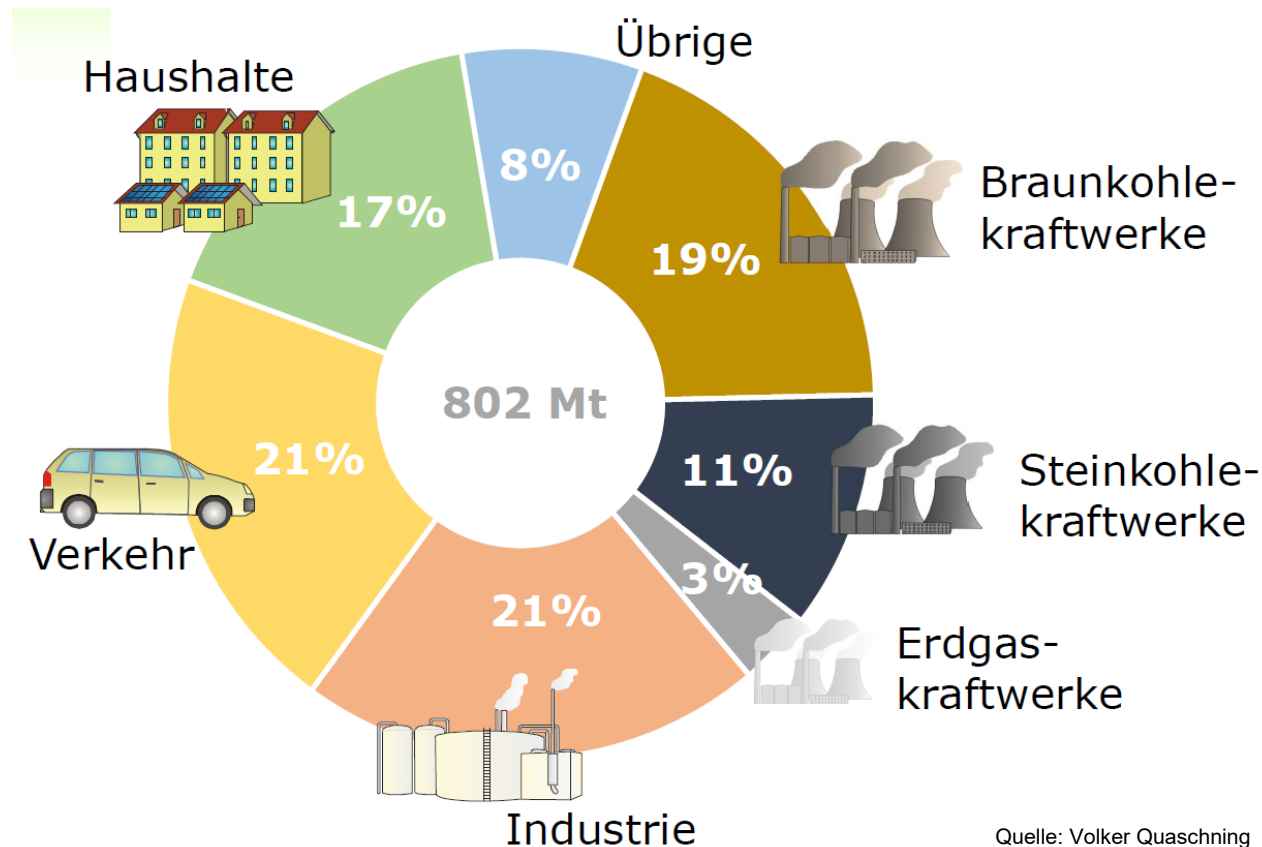
2021

Quelle: U.S. NASA; U.S. ESRL; DWD

Gliederung:

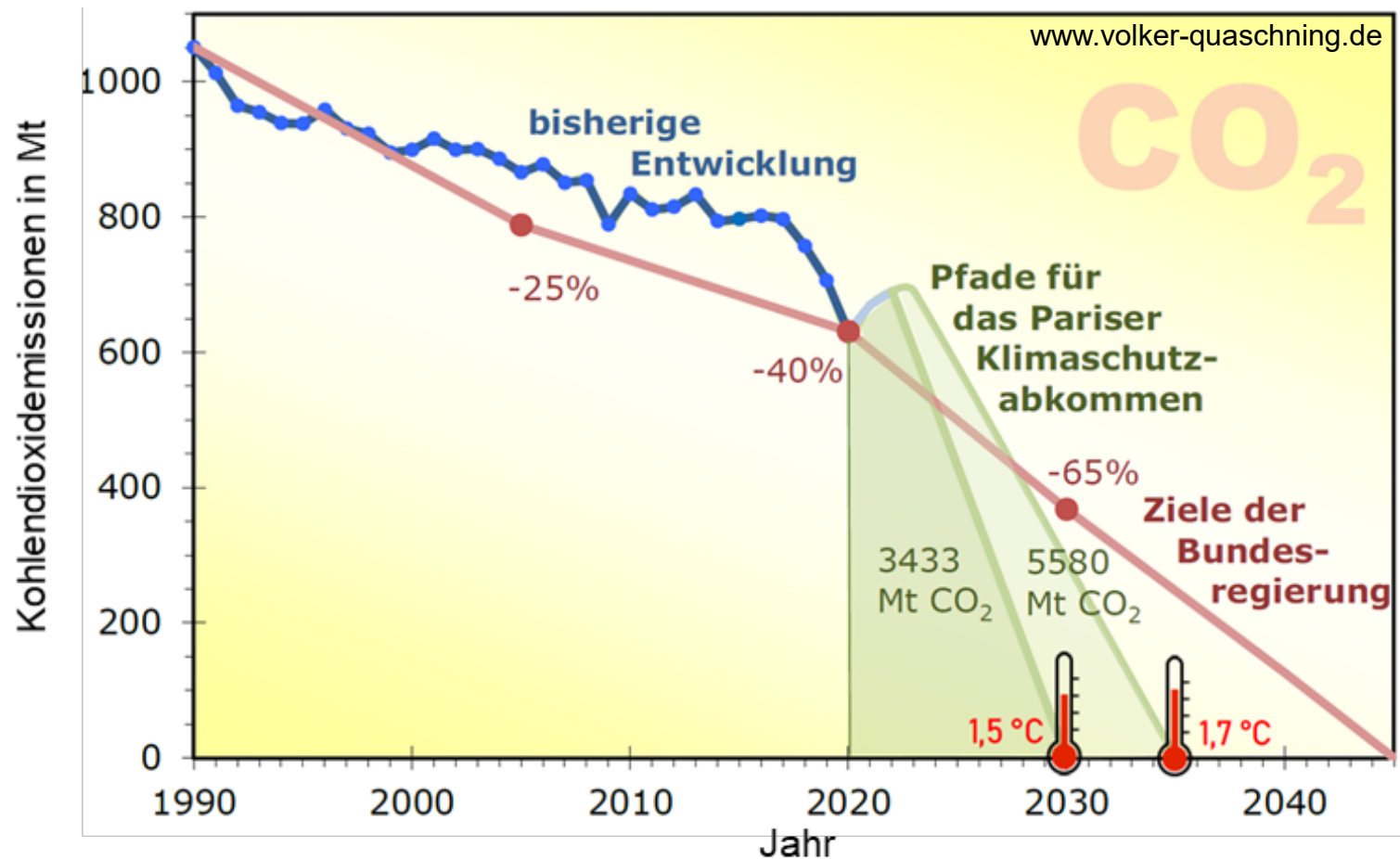


## Verursacher der deutschen CO2-Emissionen:



- ⇒ Start mit Kohlekraftwerken ist sinnvoll
- ⇒ Parallel müssen die anderen Sektoren umgebaut werden!

## Zukunft der Kohlendioxidemissionen in Deutschland:



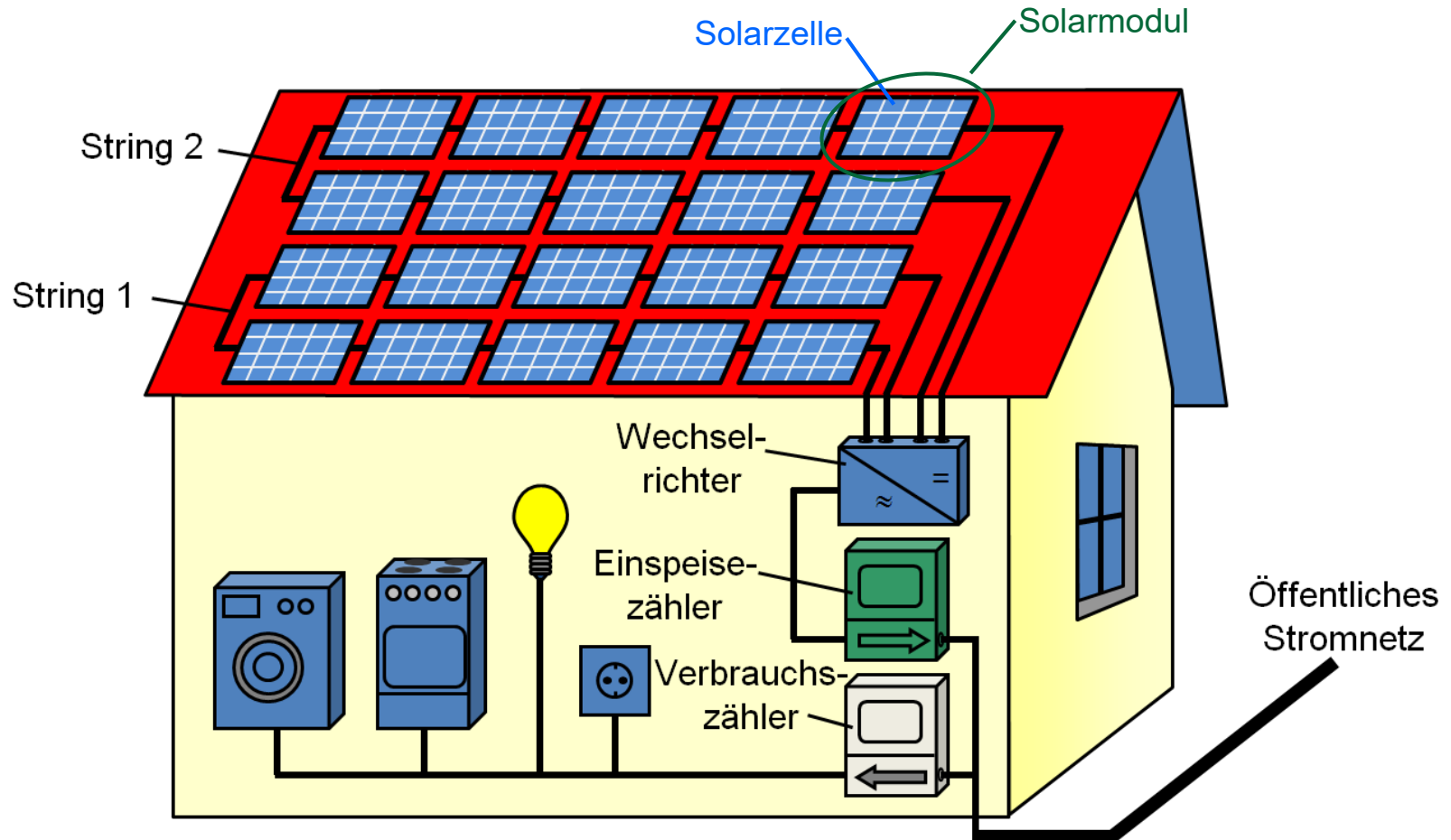
⇒ Wo soll die Energie denn herkommen?

⇒ Aus Solarstrom? Ja, unter anderem!



## 2. Einführung zur Photovoltaik

# Prinzipieller Aufbau einer „klassischen“ Photovoltaikanlage:



## Wirkungsgrad von Solarmodulen:



$$\eta_{\text{Modul}} = \frac{\text{Elektrische Leistung}}{\text{Optische Leistung}} = \frac{P_{\text{Elektrisch}}}{P_{\text{Optisch}}}$$

z.B. Wirkungsgrad  $\eta_{\text{Modul}} = 20 \%$

- Was heißt das? Bei voller Sonneneinstrahlung (1000 W/m<sup>2</sup>) bringt ein Solarmodul (Fläche 1,7 m<sup>2</sup>, Wirkungsgrad 20 %) eine maximale Leistung (Peakleistung) von:

- Modul:

$$P_{\text{Modul}} = 1000 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \cdot 1,7 \text{ m}^2 \cdot 20 \% = 340 \text{ Watt}_p$$

↙ „Peak“

- Ganze Anlage: z.B. 30 Module:  $P_{\text{Anlage}} = 30 \text{ Module} \cdot 340 \text{ Watt}_p = 10,2 \text{ kW}_p \approx 10 \text{ kW}_p$

**⇒ Merke: z.B. 50 Quadratmeter reichen für eine 10 kWp – Anlage!**

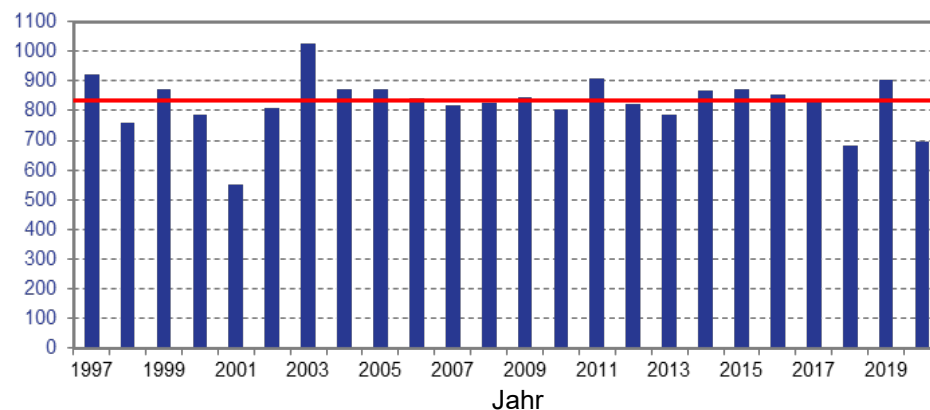
## Beispiel des Energieertrags realer Anlagen:

### a) Anlage Aachen

- Baujahr: 1996
- Leistung: 2 kWp
- Ausrichtung: Süd
- Dachneigung: 45°
- „alte Technik“



Spezifischer jährlicher Ertrag in kWh/kWp



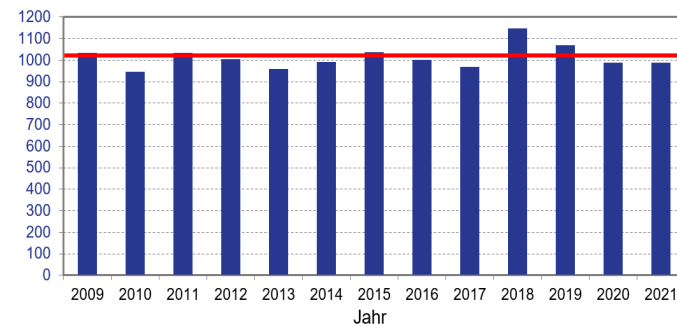
⇒ Durchschnittlicher Ertrag: 830 kWh/kWp

### b) Anlage Steinfurt

- Baujahr: 2008
- Leistung: 25 kWp
- Ausrichtung: Süd
- Neigung: 25°
- „moderne Technik“



Ertrag in kWh/kWp



⇒ Durchschnittlicher Ertrag: 1015 kWh/kWp

⇒ 900 kWh/kWp sind in unseren Breiten ohne Weiteres machbar!

# Ertragsabhängigkeit von der Dachausrichtung

|                 |         | Dachneigung |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|---------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 |         | 0°          | 5°   | 10°  | 15°  | 20°  | 25°  | 30°  | 35°  | 40°   | 45°  | 50°  | 55°  | 60°  | 65°  | 70°  | 75°  | 80°  | 85°  | 90°  |      |
| Dachausrichtung | Ost     | -90°        | 87,8 | 87,6 | 87,0 | 86,2 | 85,2 | 84,1 | 82,8 | 81,3  | 79,7 | 78,0 | 76,2 | 74,1 | 71,9 | 69,5 | 67,0 | 64,4 | 61,7 | 58,7 | 55,7 |
|                 |         | -85°        | 87,8 | 87,9 | 87,6 | 87,0 | 86,3 | 85,4 | 84,3 | 83,0  | 81,6 | 80,0 | 78,2 | 76,2 | 74,0 | 71,6 | 69,1 | 66,3 | 63,6 | 60,7 | 57,5 |
|                 |         | -80°        | 87,8 | 88,2 | 88,2 | 87,9 | 87,5 | 86,8 | 85,9 | 84,8  | 83,5 | 81,9 | 80,2 | 78,2 | 76,0 | 73,6 | 71,1 | 68,3 | 65,3 | 62,3 | 59,2 |
|                 |         | -75°        | 87,8 | 88,4 | 88,8 | 88,8 | 88,5 | 88,1 | 87,4 | 86,4  | 85,2 | 83,8 | 82,1 | 80,2 | 78,0 | 75,5 | 73,0 | 70,2 | 67,1 | 64,0 | 60,7 |
|                 |         | -70°        | 87,8 | 88,8 | 89,3 | 89,6 | 89,6 | 89,3 | 88,8 | 88,0  | 86,9 | 85,6 | 83,9 | 82,1 | 79,9 | 77,4 | 74,7 | 72,0 | 68,9 | 65,5 | 62,1 |
|                 |         | -65°        | 87,8 | 89,0 | 89,8 | 90,3 | 90,6 | 90,5 | 90,2 | 89,6  | 88,5 | 87,3 | 85,7 | 83,8 | 81,7 | 79,3 | 76,4 | 73,5 | 70,5 | 67,1 | 63,5 |
|                 | Südost  | -60°        | 87,8 | 89,3 | 90,3 | 91,1 | 91,6 | 91,6 | 91,5 | 90,9  | 90,1 | 88,9 | 87,4 | 85,5 | 83,3 | 80,9 | 78,2 | 75,1 | 71,9 | 68,5 | 64,8 |
|                 |         | -55°        | 87,8 | 89,6 | 90,9 | 91,8 | 92,4 | 92,8 | 92,7 | 92,3  | 91,6 | 90,4 | 88,9 | 87,1 | 84,9 | 82,4 | 79,7 | 76,7 | 73,3 | 69,7 | 66,1 |
|                 |         | -50°        | 87,8 | 89,7 | 91,3 | 92,5 | 93,3 | 93,8 | 93,9 | 93,6  | 92,9 | 91,8 | 90,4 | 88,7 | 86,4 | 83,8 | 81,1 | 78,0 | 74,6 | 70,8 | 67,1 |
|                 |         | -45°        | 87,8 | 90,0 | 91,7 | 93,1 | 94,1 | 94,8 | 95,0 | 94,8  | 94,2 | 93,1 | 91,7 | 90,0 | 87,9 | 85,3 | 82,3 | 79,2 | 75,7 | 72,0 | 68,0 |
|                 |         | -40°        | 87,8 | 90,2 | 92,2 | 93,7 | 94,9 | 95,6 | 95,9 | 95,8  | 95,3 | 94,4 | 93,0 | 91,1 | 89,0 | 86,5 | 83,6 | 80,2 | 76,8 | 72,9 | 68,8 |
|                 |         | -35°        | 87,8 | 90,3 | 92,5 | 94,3 | 95,5 | 96,3 | 96,8 | 96,8  | 96,3 | 95,5 | 94,1 | 92,3 | 90,1 | 87,6 | 84,6 | 81,3 | 77,6 | 73,7 | 69,5 |
|                 |         | -30°        | 87,8 | 90,5 | 92,8 | 94,7 | 96,1 | 97,0 | 97,6 | 97,7  | 97,2 | 96,3 | 95,1 | 93,3 | 91,0 | 88,4 | 85,5 | 82,1 | 78,3 | 74,3 | 70,1 |
|                 |         | -25°        | 87,8 | 90,7 | 93,0 | 95,0 | 96,6 | 97,7 | 98,3 | 98,3  | 98,0 | 97,1 | 95,8 | 94,1 | 91,9 | 89,2 | 86,2 | 82,7 | 78,9 | 74,8 | 70,5 |
|                 |         | -20°        | 87,8 | 90,8 | 93,3 | 95,4 | 97,0 | 98,1 | 98,8 | 99,0  | 98,6 | 97,7 | 96,4 | 94,7 | 92,5 | 89,8 | 86,8 | 83,2 | 79,5 | 75,3 | 70,8 |
|                 |         | -15°        | 87,8 | 90,9 | 93,5 | 95,6 | 97,3 | 98,5 | 99,1 | 99,4  | 99,1 | 98,3 | 97,0 | 95,2 | 93,0 | 90,3 | 87,2 | 83,7 | 79,8 | 75,5 | 71,0 |
|                 |         | -10°        | 87,8 | 90,9 | 93,6 | 95,7 | 97,5 | 98,8 | 99,5 | 99,7  | 99,4 | 98,7 | 97,4 | 95,6 | 93,4 | 90,6 | 87,5 | 83,9 | 80,0 | 75,7 | 71,1 |
|                 |         | Süd         | -5°  | 87,8 | 90,9 | 93,6 | 95,9 | 97,7 | 98,9 | 99,7  | 99,9 | 99,7 | 98,9 | 97,6 | 95,8 | 93,6 | 90,8 | 87,6 | 84,1 | 80,2 | 75,8 |
|                 | 0°      |             | 87,8 | 90,9 | 93,6 | 95,9 | 97,7 | 99,0 | 99,7 | 100,0 | 99,7 | 98,9 | 97,6 | 95,7 | 93,6 | 90,9 | 87,7 | 84,2 | 80,2 | 75,8 | 71,2 |
|                 | 5°      |             | 87,8 | 90,9 | 93,6 | 95,9 | 97,7 | 98,9 | 99,7 | 99,9  | 99,7 | 98,9 | 97,6 | 95,8 | 93,6 | 90,8 | 87,6 | 84,1 | 80,2 | 75,8 | 71,2 |
|                 | 10°     |             | 87,8 | 90,9 | 93,6 | 95,7 | 97,5 | 98,8 | 99,5 | 99,7  | 99,4 | 98,7 | 97,4 | 95,6 | 93,4 | 90,6 | 87,5 | 83,9 | 80,0 | 75,7 | 71,1 |
|                 | 15°     |             | 87,8 | 90,9 | 93,5 | 95,6 | 97,3 | 98,5 | 99,1 | 99,4  | 99,1 | 98,3 | 97,0 | 95,2 | 93,0 | 90,3 | 87,2 | 83,7 | 79,8 | 75,5 | 71,0 |
|                 | 20°     |             | 87,8 | 90,8 | 93,3 | 95,4 | 97,0 | 98,1 | 98,8 | 99,0  | 98,6 | 97,7 | 96,4 | 94,7 | 92,5 | 89,8 | 86,8 | 83,2 | 79,5 | 75,3 | 70,8 |
|                 | 25°     |             | 87,8 | 90,7 | 93,0 | 95,0 | 96,6 | 97,7 | 98,3 | 98,3  | 98,0 | 97,1 | 95,8 | 94,1 | 91,9 | 89,2 | 86,2 | 82,7 | 78,9 | 74,8 | 70,5 |
|                 | 30°     |             | 87,8 | 90,5 | 92,8 | 94,7 | 96,1 | 97,0 | 97,6 | 97,7  | 97,2 | 96,3 | 95,1 | 93,3 | 91,0 | 88,4 | 85,5 | 82,1 | 78,3 | 74,3 | 70,1 |
|                 | 35°     |             | 87,8 | 90,3 | 92,5 | 94,3 | 95,5 | 96,3 | 96,8 | 96,8  | 96,3 | 95,5 | 94,1 | 92,3 | 90,1 | 87,6 | 84,6 | 81,3 | 77,6 | 73,7 | 69,5 |
|                 | 40°     |             | 87,8 | 90,2 | 92,2 | 93,7 | 94,9 | 95,6 | 95,9 | 95,8  | 95,3 | 94,4 | 93,0 | 91,1 | 89,0 | 86,5 | 83,6 | 80,2 | 76,8 | 72,9 | 68,8 |
|                 | Südwest | 45°         | 87,8 | 90,0 | 91,7 | 93,1 | 94,1 | 94,8 | 95,0 | 94,8  | 94,2 | 93,1 | 91,7 | 90,0 | 87,9 | 85,3 | 82,3 | 79,2 | 75,7 | 72,0 | 68,0 |
|                 |         | 50°         | 87,8 | 89,7 | 91,3 | 92,5 | 93,3 | 93,8 | 93,9 | 93,6  | 92,9 | 91,8 | 90,4 | 88,7 | 86,4 | 83,8 | 81,1 | 78,0 | 74,6 | 70,8 | 67,1 |
|                 |         | 55°         | 87,8 | 89,6 | 90,9 | 91,8 | 92,4 | 92,8 | 92,7 | 92,3  | 91,6 | 90,4 | 88,9 | 87,1 | 84,9 | 82,4 | 79,7 | 76,7 | 73,3 | 69,7 | 66,1 |
|                 |         | 60°         | 87,8 | 89,3 | 90,3 | 91,1 | 91,6 | 91,6 | 91,5 | 90,9  | 90,1 | 88,9 | 87,4 | 85,5 | 83,3 | 80,9 | 78,2 | 75,1 | 71,9 | 68,5 | 64,8 |
|                 |         | 65°         | 87,8 | 89,0 | 89,8 | 90,3 | 90,6 | 90,5 | 90,2 | 89,6  | 88,5 | 87,3 | 85,7 | 83,8 | 81,7 | 79,3 | 76,4 | 73,5 | 70,5 | 67,1 | 63,5 |
|                 |         | 70°         | 87,8 | 88,8 | 89,3 | 89,6 | 89,6 | 89,3 | 88,8 | 88,0  | 86,9 | 85,6 | 83,9 | 82,1 | 79,9 | 77,4 | 74,7 | 72,0 | 68,9 | 65,5 | 62,1 |
|                 |         | 75°         | 87,8 | 88,4 | 88,8 | 88,8 | 88,5 | 88,1 | 87,4 | 86,4  | 85,2 | 83,8 | 82,1 | 80,2 | 78,0 | 75,5 | 73,0 | 70,2 | 67,1 | 64,0 | 60,7 |
|                 |         | 80°         | 87,8 | 88,2 | 88,2 | 87,9 | 87,5 | 86,8 | 85,9 | 84,8  | 83,5 | 81,9 | 80,2 | 78,2 | 76,0 | 73,6 | 71,1 | 68,3 | 65,3 | 62,3 | 59,2 |
|                 |         | 85°         | 87,8 | 87,9 | 87,6 | 87,0 | 86,3 | 85,4 | 84,3 | 83,0  | 81,6 | 80,0 | 78,2 | 76,2 | 74,0 | 71,6 | 69,1 | 66,3 | 63,6 | 60,7 | 57,5 |
| 90°             |         | 87,8        | 87,6 | 87,0 | 86,2 | 85,2 | 84,1 | 82,8 | 81,3 | 79,7  | 78,0 | 76,2 | 74,1 | 71,9 | 69,5 | 67,0 | 64,4 | 61,7 | 58,7 | 55,7 |      |

z.B. Westdach mit 30 Grad Neigung:

- 17 % Minderung
- (entspricht Ertrag von rund 738 kWh/kWp)

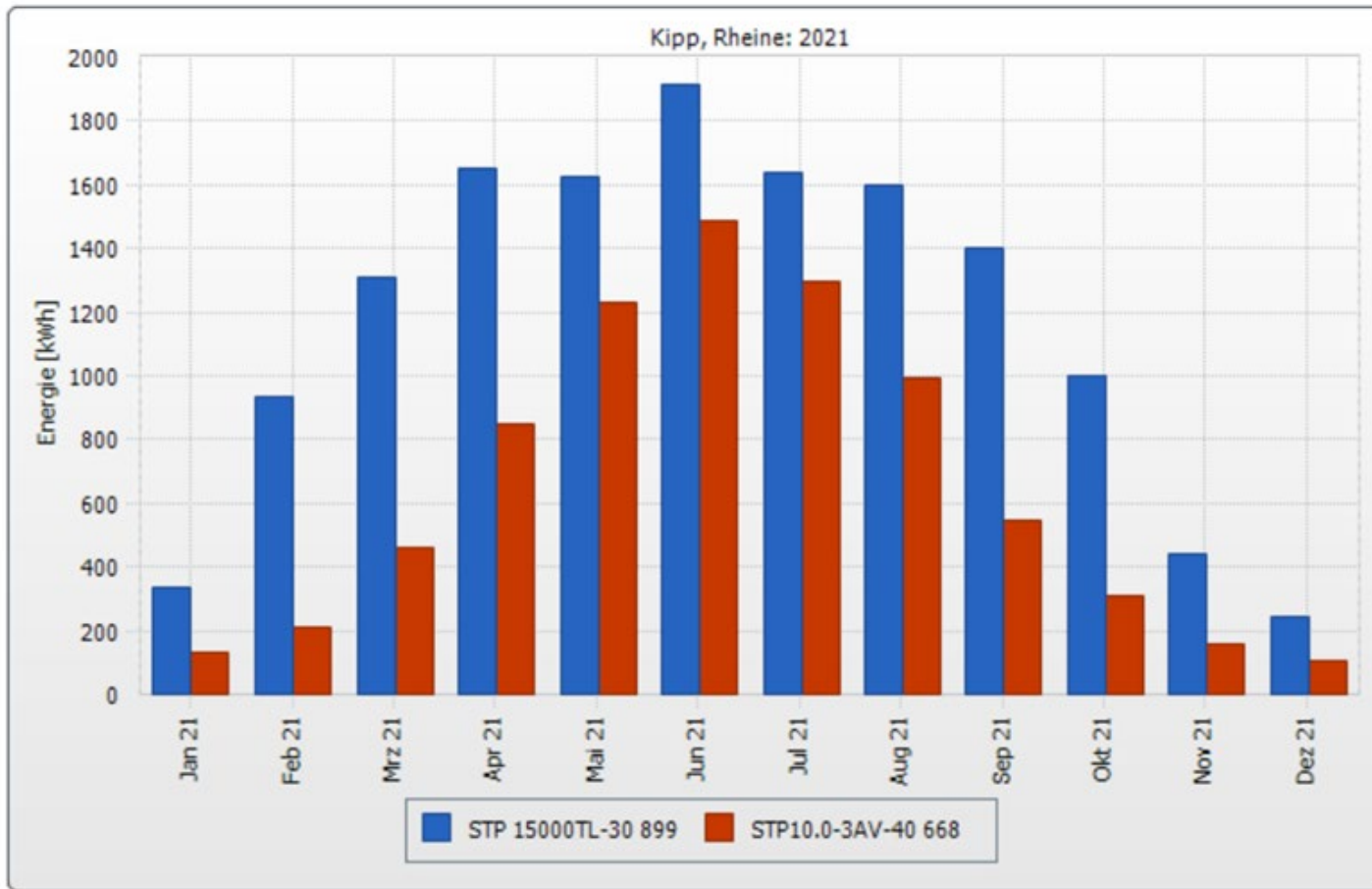
# Ertragsabhängigkeit von der Dachausrichtung

|                  |         | Neigungswinkel $\beta$ |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|------------------|---------|------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
|                  |         | 0°                     | 5°   | 10°  | 15°  | 20°  | 25°  | 30°  | 35°   | 40°  | 45°  | 50°  | 55°  | 60°  | 65°  | 70°  | 75°  | 80°  | 85°  | 90°  |      |  |
| Azimuth $\alpha$ | Nord    | -180°                  | 87,8 | 84,2 | 80,2 | 75,9 | 71,7 | 67,5 | 63,4  | 59,3 | 55,4 | 51,5 | 48,0 | 44,8 | 41,9 | 39,8 | 38,0 | 36,5 | 35,0 | 33,6 | 32,2 |  |
|                  |         | -175°                  | 87,8 | 84,2 | 80,2 | 76,0 | 71,7 | 67,5 | 63,4  | 59,4 | 55,4 | 51,5 | 48,0 | 44,8 | 42,0 | 39,9 | 38,1 | 36,6 | 35,1 | 33,7 | 32,3 |  |
|                  |         | -170°                  | 87,8 | 84,2 | 80,2 | 76,1 | 71,9 | 67,7 | 63,6  | 59,5 | 55,5 | 51,8 | 48,4 | 45,2 | 42,4 | 40,3 | 38,6 | 37,0 | 35,5 | 34,0 | 32,6 |  |
|                  |         | -165°                  | 87,8 | 84,3 | 80,4 | 76,2 | 72,1 | 68,0 | 63,9  | 59,9 | 56,0 | 52,3 | 48,9 | 45,7 | 43,1 | 41,1 | 39,3 | 37,7 | 36,1 | 34,6 | 33,2 |  |
|                  |         | -160°                  | 87,8 | 84,4 | 80,6 | 76,5 | 72,5 | 68,4 | 64,4  | 60,5 | 56,7 | 53,0 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                  |         | -155°                  | 87,8 | 84,5 | 80,9 | 76,9 | 72,9 | 68,9 | 65,0  | 61,2 | 57,4 | 53,9 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                  | Nordost | -150°                  | 87,8 | 84,6 | 81,1 | 77,4 | 73,5 | 69,6 | 65,8  | 62,1 | 58,4 | 55,0 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                  |         | -145°                  | 87,8 | 84,8 | 81,5 | 77,8 | 74,1 | 70,3 | 66,7  | 63,0 | 59,6 | 56,3 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                  |         | -140°                  | 87,8 | 84,9 | 81,8 | 78,4 | 74,8 | 71,3 | 67,7  | 64,2 | 61,0 | 58,0 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                  |         | -135°                  | 87,8 | 85,2 | 82,2 | 79,0 | 75,6 | 72,2 | 68,9  | 65,6 | 62,6 | 59,8 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                  |         | -130°                  | 87,8 | 85,4 | 82,7 | 79,6 | 76,5 | 73,4 | 70,2  | 67,2 | 64,3 | 61,6 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                  |         | -125°                  | 87,8 | 85,6 | 83,1 | 80,3 | 77,5 | 74,6 | 71,6  | 68,8 | 66,1 | 63,6 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                  | Ost     | -120°                  | 87,8 | 85,9 | 83,6 | 81,1 | 78,5 | 75,8 | 73,2  | 70,6 | 68,1 | 65,6 | 63,3 | 61,0 | 58,7 | 56,6 | 54,3 | 52,0 | 49,7 | 47,3 | 45,0 |  |
|                  |         | -115°                  | 87,8 | 86,2 | 84,2 | 81,9 | 79,5 | 77,2 | 74,8  | 72,3 | 70,0 | 67,7 | 65,4 | 63,2 | 61,0 | 58,7 | 56,4 | 54,0 | 51,7 | 49,2 | 46,7 |  |
|                  |         | -110°                  | 87,8 | 86,4 | 84,7 | 82,8 | 80,7 | 78,5 | 76,3  | 74,2 | 72,0 | 69,8 | 67,6 | 65,4 | 63,2 | 60,8 | 58,6 | 56,1 | 53,6 | 51,2 | 48,6 |  |
|                  |         | -105°                  | 87,8 | 86,7 | 85,3 | 83,6 | 81,8 | 79,9 | 78,0  | 76,0 | 74,0 | 71,8 | 69,8 | 67,5 | 65,4 | 63,1 | 60,7 | 58,2 | 55,6 | 53,1 | 50,4 |  |
|                  |         | -100°                  | 87,8 | 86,9 | 85,8 | 84,5 | 82,9 | 81,3 | 79,5  | 77,7 | 75,9 | 73,9 | 71,9 | 69,8 | 67,5 | 65,3 | 62,8 | 60,3 | 57,7 | 55,0 | 52,3 |  |
|                  |         | -95°                   | 87,8 | 87,3 | 86,4 | 85,4 | 84,1 | 82,7 | 81,2  | 79,5 | 77,8 | 76,0 | 74,1 | 72,0 | 69,7 | 67,4 | 64,9 | 62,4 | 59,7 | 56,8 | 54,0 |  |
|                  |         | -90°                   | 87,8 | 87,6 | 87,0 | 86,2 | 85,2 | 84,1 | 82,8  | 81,3 | 79,7 | 78,0 | 76,2 | 74,1 | 71,9 | 69,5 | 67,0 | 64,4 | 61,7 | 58,7 | 55,7 |  |
|                  |         | -85°                   | 87,8 | 87,9 | 87,6 | 87,0 | 86,3 | 85,4 | 84,3  | 83,0 | 81,6 | 80,0 | 78,2 | 76,2 | 74,0 | 71,6 | 69,1 | 66,3 | 63,6 | 60,7 | 57,5 |  |
|                  |         | -80°                   | 87,8 | 88,2 | 88,2 | 87,9 | 87,5 | 86,8 | 85,9  | 84,8 | 83,5 | 81,9 | 80,2 | 78,2 | 76,0 | 73,6 | 71,1 | 68,3 | 65,3 | 62,3 | 59,2 |  |
|                  |         | -75°                   | 87,8 | 88,4 | 88,8 | 88,8 | 88,5 | 88,1 | 87,4  | 86,4 | 85,2 | 83,8 | 82,1 | 80,2 | 78,0 | 75,5 | 73,0 | 70,2 | 67,1 | 64,0 | 60,7 |  |
|                  |         | -70°                   | 87,8 | 88,8 | 89,3 | 89,6 | 89,6 | 89,3 | 88,8  | 88,0 | 86,9 | 85,6 | 83,9 | 82,1 | 79,9 | 77,4 | 74,7 | 72,0 | 68,9 | 65,5 | 62,1 |  |
|                  |         | -65°                   | 87,8 | 89,0 | 89,8 | 90,3 | 90,6 | 90,5 | 90,2  | 89,6 | 88,5 | 87,3 | 85,7 | 83,8 | 81,7 | 79,3 | 76,4 | 73,5 | 70,5 | 67,1 | 63,5 |  |
|                  |         | -60°                   | 87,8 | 89,3 | 90,3 | 91,1 | 91,6 | 91,6 | 91,5  | 90,9 | 90,1 | 88,9 | 87,4 | 85,5 | 83,3 | 80,9 | 78,2 | 75,1 | 71,9 | 68,5 | 64,8 |  |
|                  |         | -55°                   | 87,8 | 89,6 | 90,9 | 91,8 | 92,4 | 92,8 | 92,7  | 92,3 | 91,6 | 90,4 | 88,9 | 87,1 | 84,9 | 82,4 | 79,7 | 76,7 | 73,3 | 69,7 | 66,1 |  |
|                  |         | -50°                   | 87,8 | 89,7 | 91,3 | 92,5 | 93,3 | 93,8 | 93,9  | 93,6 | 92,9 | 91,8 | 90,4 | 88,7 | 86,4 | 83,8 | 81,1 | 78,0 | 74,6 | 70,8 | 67,1 |  |
|                  |         | -45°                   | 87,8 | 90,0 | 91,7 | 93,1 | 94,1 | 94,8 | 95,0  | 94,8 | 94,2 | 93,1 | 91,7 | 90,0 | 87,9 | 85,3 | 82,3 | 79,2 | 75,7 | 72,0 | 68,0 |  |
|                  |         | -40°                   | 87,8 | 90,2 | 92,2 | 93,7 | 94,9 | 95,6 | 95,9  | 95,8 | 95,3 | 94,4 | 93,0 | 91,1 | 89,0 | 86,5 | 83,6 | 80,2 | 76,8 | 72,9 | 68,8 |  |
|                  |         | -35°                   | 87,8 | 90,3 | 92,5 | 94,3 | 95,5 | 96,3 | 96,8  | 96,8 | 96,3 | 95,5 | 94,1 | 92,3 | 90,1 | 87,6 | 84,6 | 81,3 | 77,6 | 73,7 | 69,5 |  |
| -30°             | 87,8    | 90,5                   | 92,8 | 94,7 | 96,1 | 97,0 | 97,6 | 97,7 | 97,2  | 96,3 | 95,1 | 93,3 | 91,0 | 88,4 | 85,5 | 82,1 | 78,3 | 74,3 | 70,1 |      |      |  |
| -25°             | 87,8    | 90,7                   | 93,0 | 95,0 | 96,6 | 97,7 | 98,3 | 98,3 | 98,0  | 97,1 | 95,8 | 94,1 | 91,9 | 89,2 | 86,2 | 82,7 | 78,9 | 74,8 | 70,5 |      |      |  |
| -20°             | 87,8    | 90,8                   | 93,3 | 95,4 | 97,0 | 98,1 | 98,8 | 99,0 | 98,6  | 97,7 | 96,4 | 94,7 | 92,5 | 89,8 | 86,8 | 83,2 | 79,5 | 75,3 | 70,8 |      |      |  |
| -15°             | 87,8    | 90,9                   | 93,5 | 95,6 | 97,3 | 98,5 | 99,1 | 99,4 | 99,1  | 98,3 | 97,0 | 95,2 | 93,0 | 90,3 | 87,2 | 83,7 | 79,8 | 75,5 | 71,0 |      |      |  |
| -10°             | 87,8    | 90,9                   | 93,6 | 95,7 | 97,5 | 98,8 | 99,5 | 99,7 | 99,4  | 98,7 | 97,4 | 95,6 | 93,4 | 90,6 | 87,5 | 83,9 | 80,0 | 75,7 | 71,1 |      |      |  |
| Süd              | -5°     | 87,8                   | 90,9 | 93,6 | 95,9 | 97,7 | 98,9 | 99,7 | 99,9  | 99,7 | 98,9 | 97,6 | 95,8 | 93,6 | 90,8 | 87,6 | 84,1 | 80,2 | 75,8 | 71,2 |      |  |
|                  | 0°      | 87,8                   | 90,9 | 93,6 | 95,9 | 97,7 | 99,0 | 99,7 | 100,0 | 99,7 | 98,9 | 97,6 | 95,7 | 93,6 | 90,9 | 87,7 | 84,2 | 80,2 | 75,8 | 71,2 |      |  |
|                  | 5°      | 87,8                   | 90,9 | 93,6 | 95,9 | 97,7 | 98,9 | 99,7 | 99,9  | 99,7 | 98,9 | 97,6 | 95,8 | 93,6 | 90,8 | 87,6 | 84,1 | 80,2 | 75,8 | 71,2 |      |  |
|                  | 10°     | 87,8                   | 90,9 | 93,6 | 95,7 | 97,5 | 98,8 | 99,5 | 99,7  | 99,4 | 98,7 | 97,4 | 95,6 | 93,4 | 90,6 | 87,5 | 83,9 | 80,0 | 75,7 | 71,1 |      |  |

z.B. Norddach mit 35 Grad Neigung:

- 41 % Minderung
- (entspricht Ertrag von rund 533 kWh/kWp)

# Anlage auf dem Norddach?



Quelle: Peter Nagelmann, Marienstr 21, Rheine

Mai bis Dezember: Nord zu Süddach: 60,5 %

## **3. Markt- und Preisentwicklung**

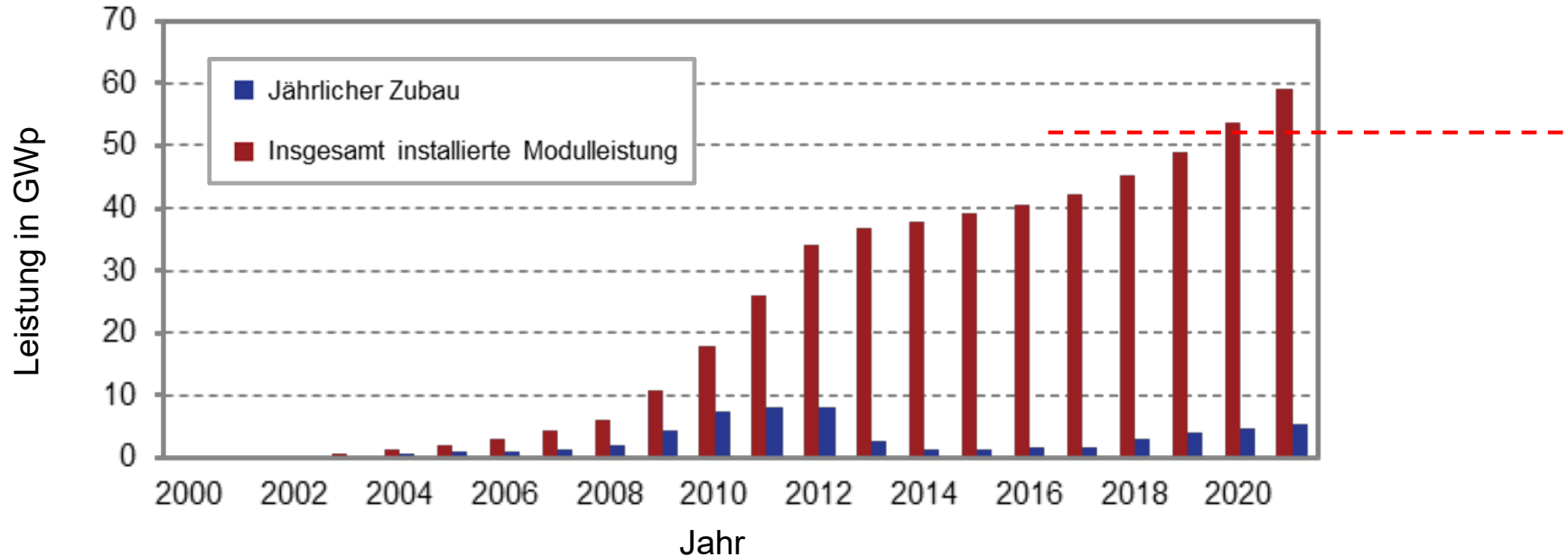


# Ausbau der Photovoltaik in Deutschland

- Installierte Leistung in GWp:



Der 52 GW-Deckel!

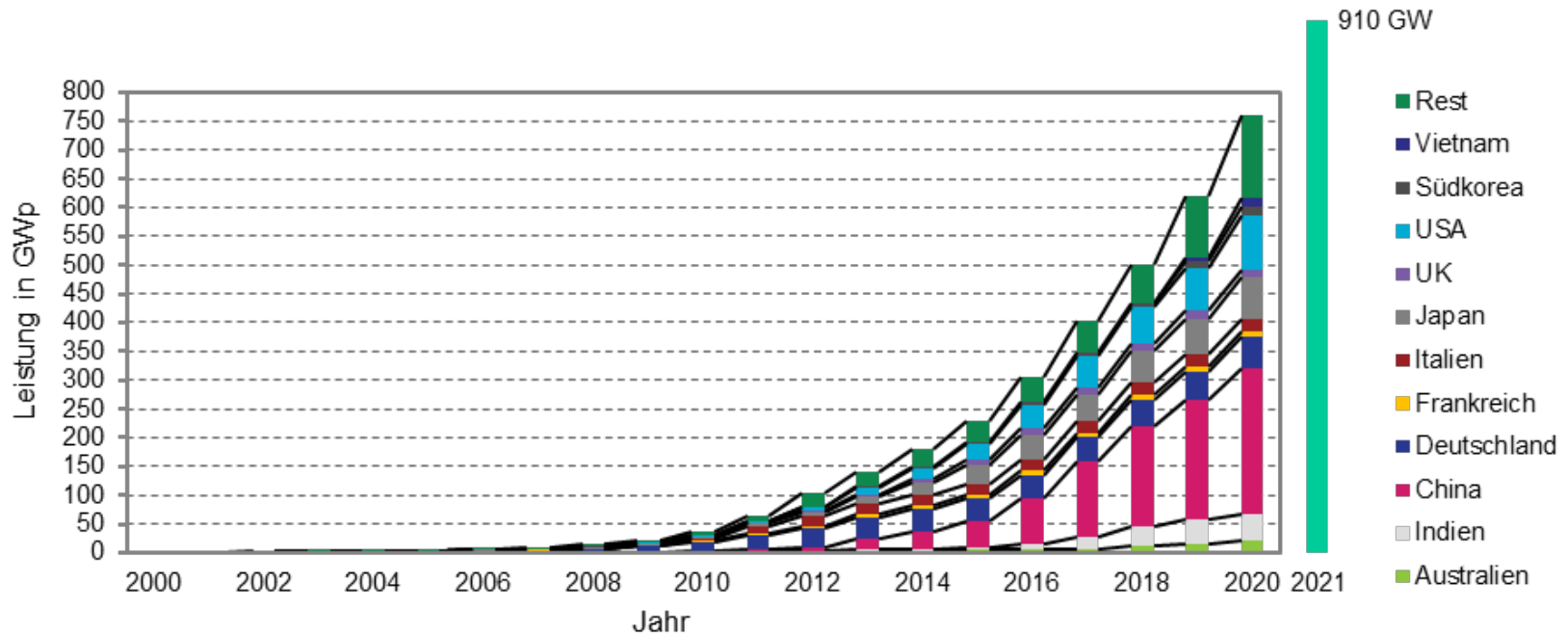


- **Der 52 GW-Deckel ist weg!**
- Jährlicher Zubau zwischenzeitlich bei ca. 7 GWp/Jahr
- Aktuell (2021): ca. 5 GWp/Jahr
- Eigentlich brauchen wir 10 - 15 GWp/Jahr



## Weltweites Wachstum der Photovoltaik

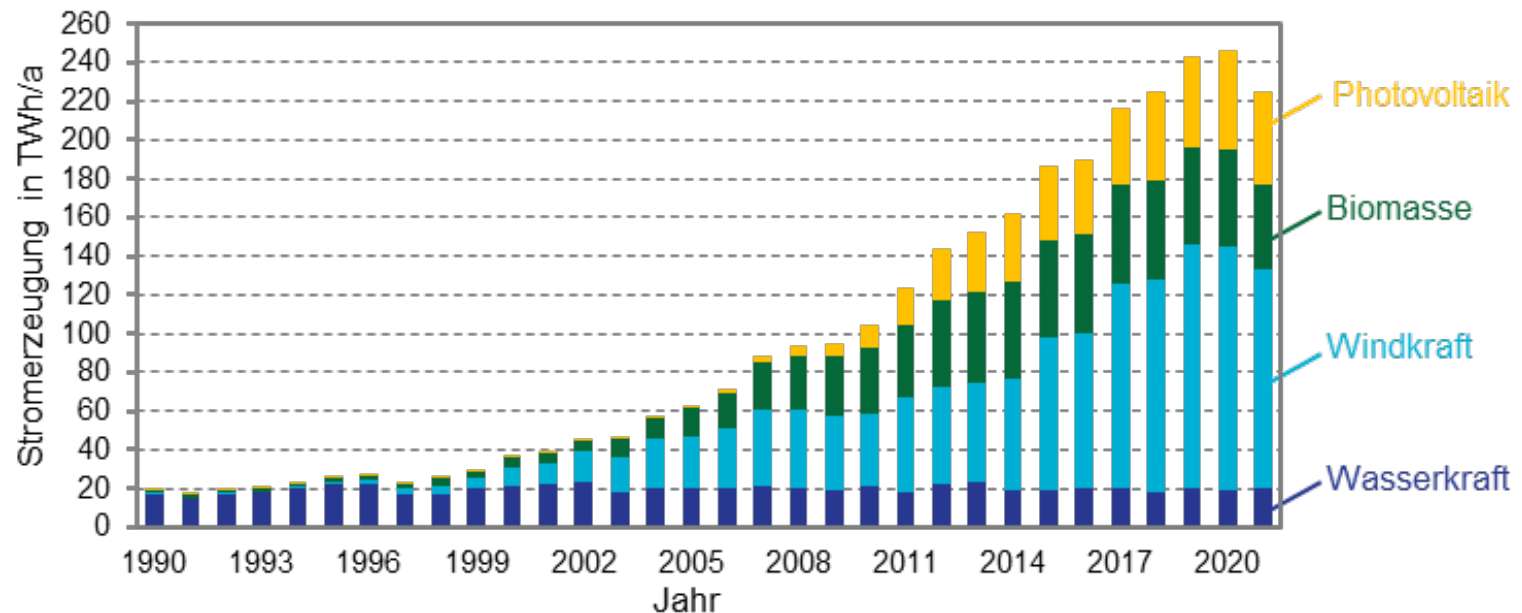
- Bislang weltweit installierte Leistung in GWp:



- Wachstumsraten über 40 %
- 2021: rund 150 GWp zusätzlich installiert!
- Europa spielt aktuell kaum noch eine Rolle

# Stromerzeugung durch erneuerbare Energien in Deutschland

- Stromerzeugung in Mrd. kWh

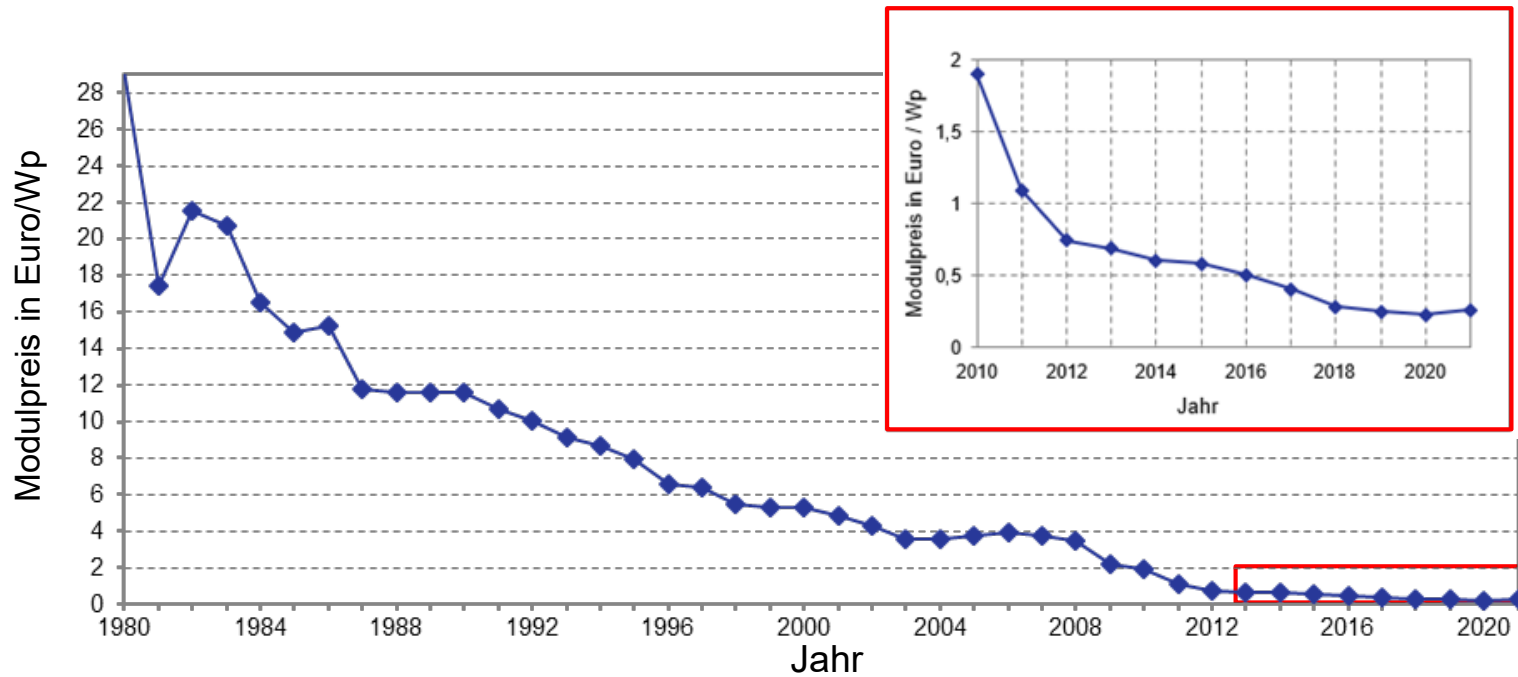


## Aktueller Status (2021):

- Anteil der erneuerbaren Energien am Nettostrombedarf: 50 %
- Anteil der Photovoltaik am Nettostrombedarf: 10 %

## Preisentwicklung:

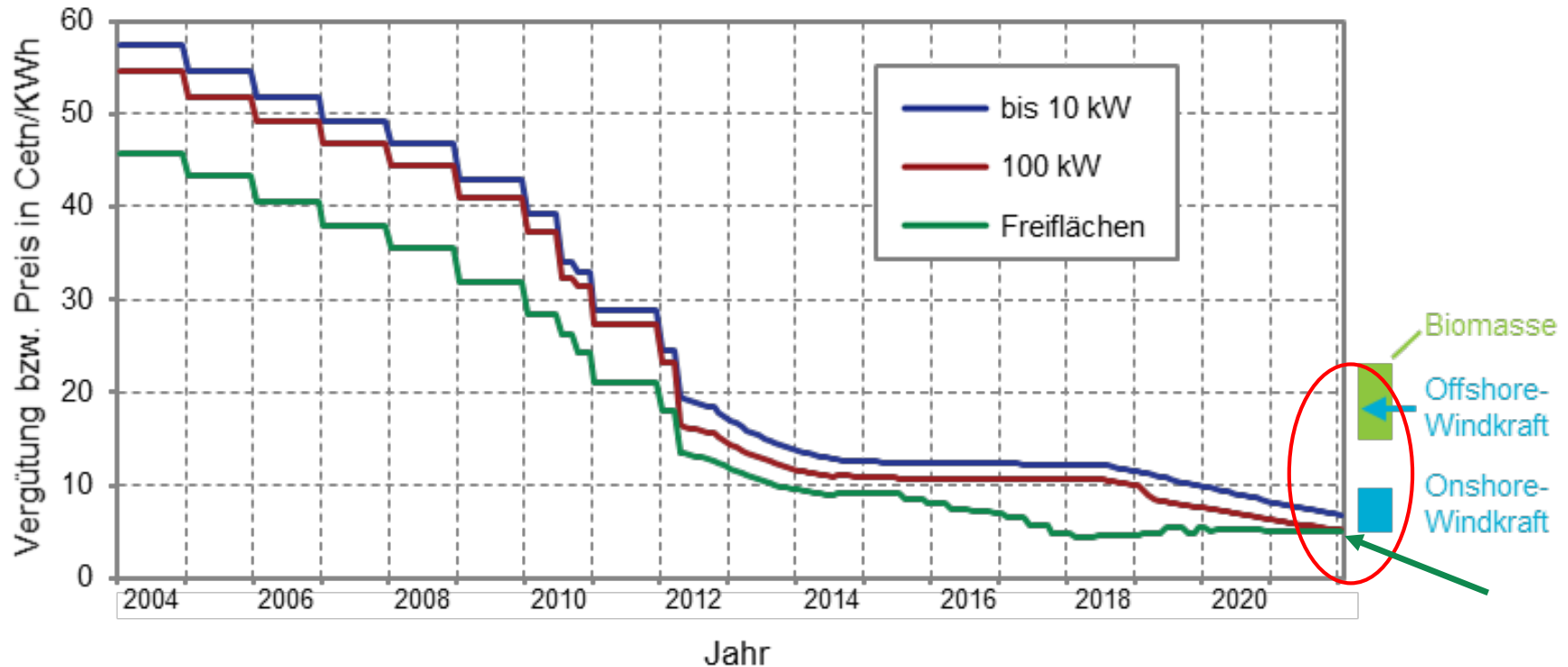
- Modulpreise seit 1980 (inflationsbereinigt):



- Reduzierung von 27 Euro/Wp auf unter 25 Cent/Wp!

## Preisentwicklung:

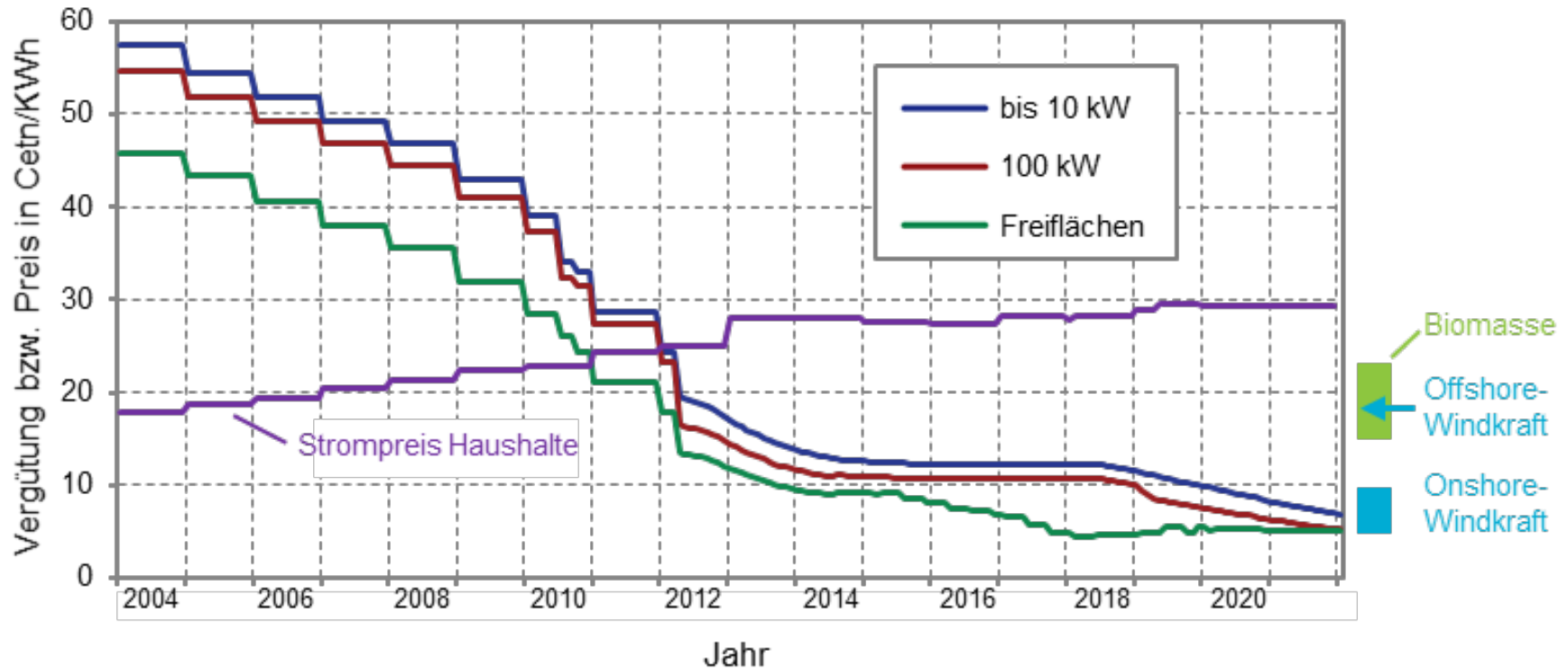
- Entwicklung der Einspeisevergütung seit 2004:



- ⇒ Photovoltaikstrom ist inzwischen günstiger als Biomasse und Offshore-Windkraft!
- ⇒ Ausschreibungen von Freiflächenanlagen: Betreiber bieten 5 Ct/kWh!
- ⇒ Ausschreibung in Abu Dhabi: Betreiber bietet 1,1 Ct/kWh!

## Preisentwicklung:

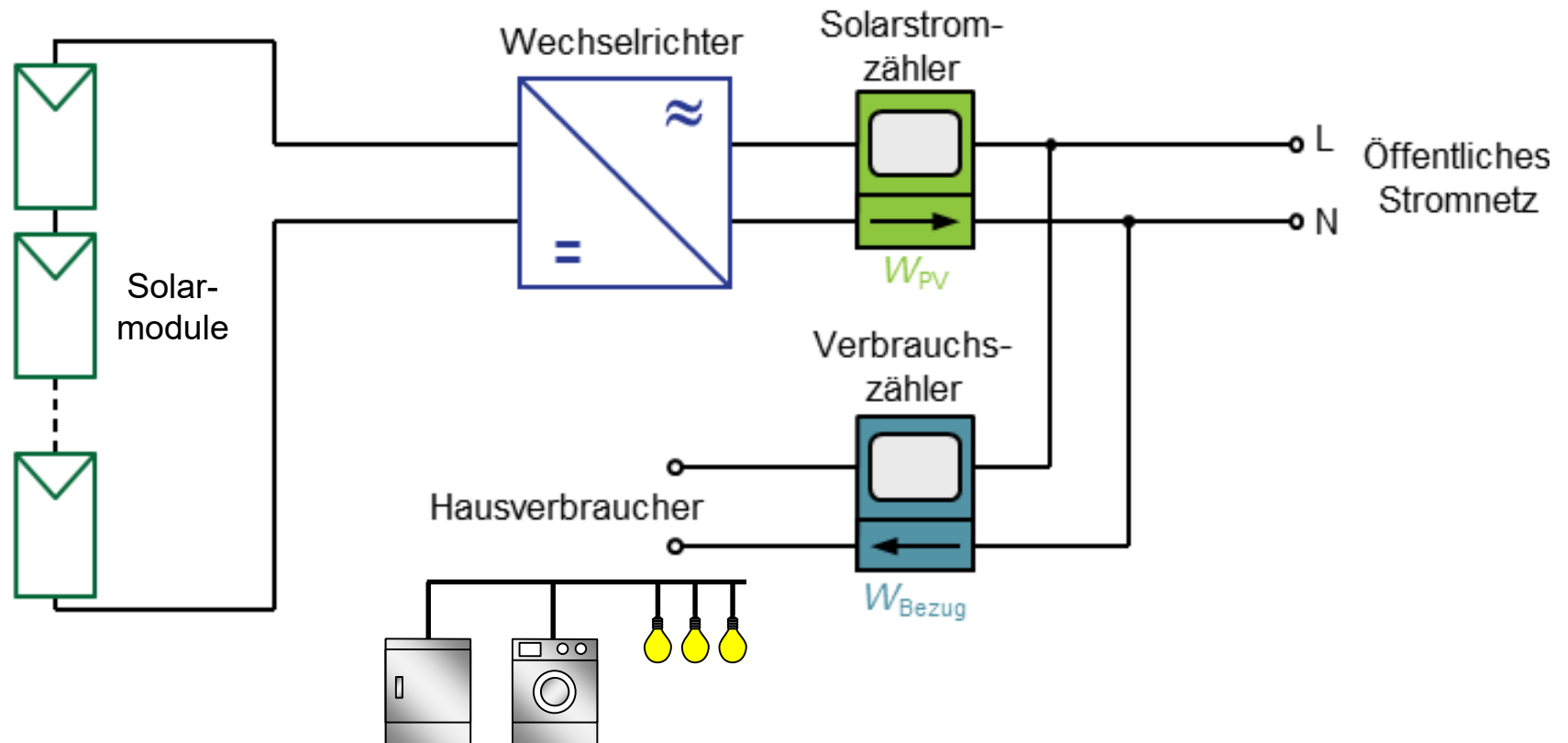
- Einspeisevergütung und Strompreis



⇒ Eigenverbrauch lohnt sich!

## **4. Wirtschaftlichkeit von konkreten Anlagenbeispielen**

## Beispiel A: 10 kWp-Anlage ohne Eigenverbrauch





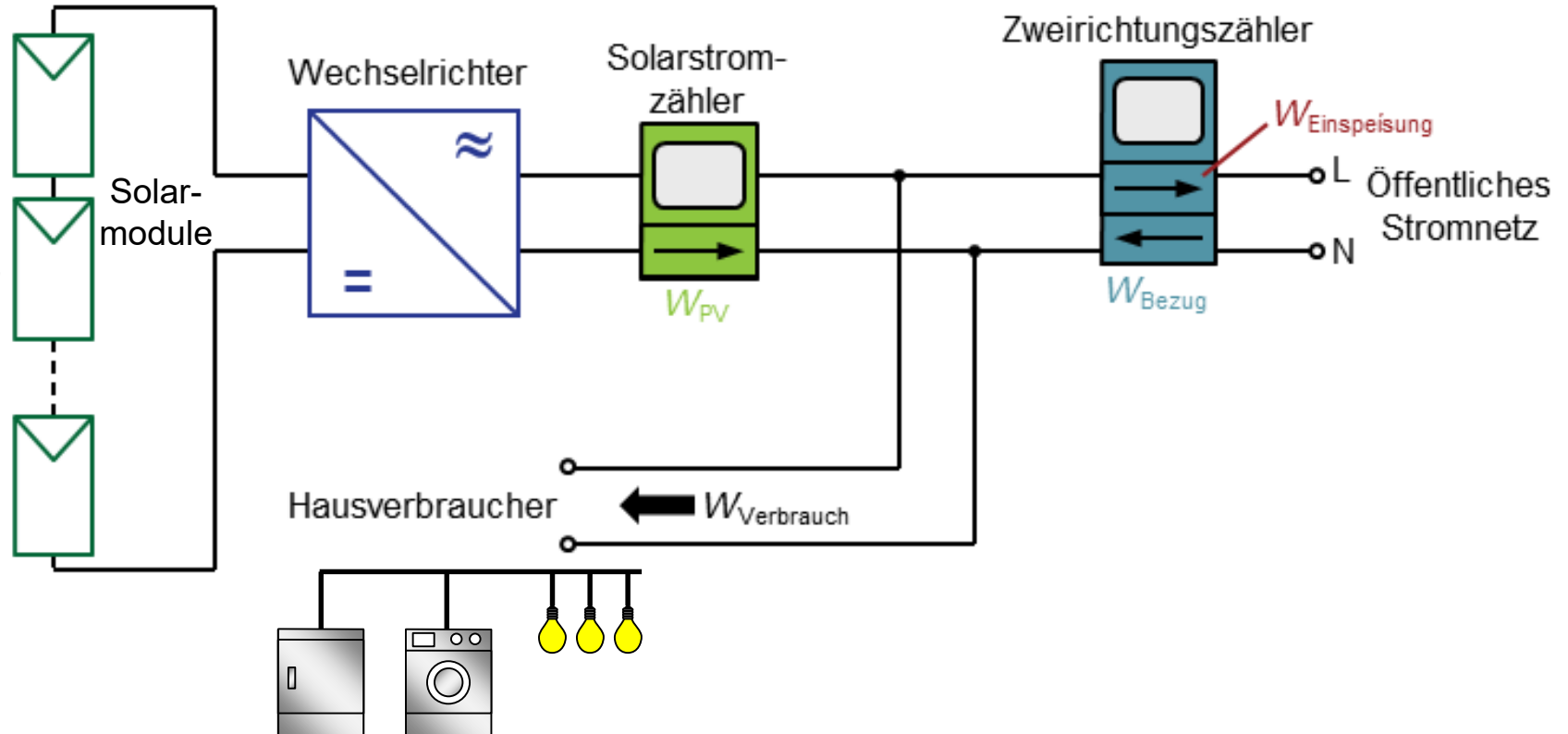
## Beispiel A: 10 kWp-Anlage ohne Eigenverbrauch (Nettopreise)

|                            |   |                      |
|----------------------------|---|----------------------|
| Investitionskosten:        | z.B. 12.000 Euro (entspricht 1.200 Euro/kWp)  |                      |
| Stromertrag:               | $10 \text{ kWp} \times 900 \text{ kWh}/(\text{kWp} \times \text{Jahr}) = \underline{9000 \text{ kWh/Jahr}}$ |                      |
| ⇒ Einnahmen:               | $6,5 \text{ ct/kWh} \times 900 \text{ kWh/Jahr} \times 10 \text{ kWp} =$                                    | <u>585 Euro/Jahr</u> |
| Laufende jährliche Kosten: | 1,5 % der Investitionskosten:   | <u>180 Euro/Jahr</u> |
| ⇒ Ausgaben:                |   | <u>180 Euro/Jahr</u> |
| ⇒ Überschuss:              | $(585 - 180) \text{ Euro/Jahr} =$   | <u>405 Euro/Jahr</u> |
| ⇒ Amortisationszeit:       | $12.000 \text{ Euro} / 405 \text{ Euro/Jahr} =$   | <u>29,6 Jahre</u>    |
| ⇒ Rendite:                 | =   | <u>-3,5 %</u>        |

⇒ kein guter Deal...

⇒ Was kann man tun, um die Rendite zu verbessern?

## Beispiel B: 10 kWp-Anlage mit Eigenverbrauch



## Beispiel B: 10 kWp-Anlage mit Eigenverbrauch

- z.B. 1/3 des erzeugten Stroms wird selbst verbraucht, Tarifstrom kostet z.B. 30 ct/kWh

### • Neue Rechnung:

|                                 |  |                               |
|---------------------------------|--|-------------------------------|
| ⇒ Einnahmen durch Einspeisung:  | $6,5 \text{ ct/kWh} \times 2/3 \times 9000 \text{ kWh/Jahr} =$ | <b>390 Euro/Jahr</b>          |
| ⇒ Vorteil durch Eigenverbrauch: | $30 \text{ ct/kWh} \times 1/3 \times 9000 \text{ kWh/Jahr} =$  | <b>900 Euro/Jahr</b>          |
|                                 | ⇒ Gesamteinnahmen:   | <b><u>1.290 Euro/Jahr</u></b> |

|                            |                               |                             |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Laufende jährliche Kosten: | 1,5 % der Investitionskosten: | <b><u>180 Euro/Jahr</u></b> |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|

|             |  |                             |
|-------------|--|-----------------------------|
| ⇒ Ausgaben: |  | <b><u>180 Euro/Jahr</u></b> |
|-------------|--|-----------------------------|

|               |                                    |                               |
|---------------|------------------------------------|-------------------------------|
| ⇒ Überschuss: | $(1290 - 180) \text{ Euro/Jahr} =$ | <b><u>1.110 Euro/Jahr</u></b> |
|---------------|------------------------------------|-------------------------------|

|                      |   |                          |
|----------------------|---|--------------------------|
| ⇒ Amortisationszeit: | $12.000 \text{ Euro} / 1.110 \text{ Euro/Jahr} =$ | <b><u>10,8 Jahre</u></b> |
|----------------------|---|--------------------------|

|            |   |                     |
|------------|---|---------------------|
| ⇒ Rendite: | = | <b><u>5,9 %</u></b> |
|------------|---|---------------------|

⇒ Rendite ist deutlich verbessert!

## Konkrete Empfehlungen bei Planung und Kauf einer PV-Anlage:

- Dacheignung prüfen (steht ggf. Sanierung an?)
- Installierbare PV-Leistung abschätzen
- Verschiedene Varianten durchrechnen lassen
- Mehrere Angebote einholen!

⇒ Geeignete Solaranlage installieren

## Welche Art von Modulen?

multikristallin:



Wirkungsgrad: 18 %

monokristallin:

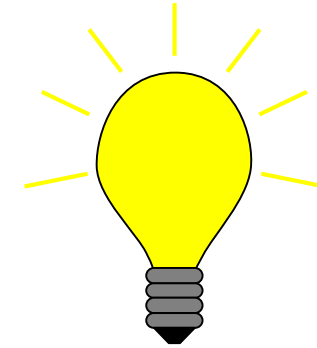


Bilder: Solarwatt

Wirkungsgrad: 22 %

Ebenfalls zu überlegen:

- Gibt es Energieeinsparpotential?



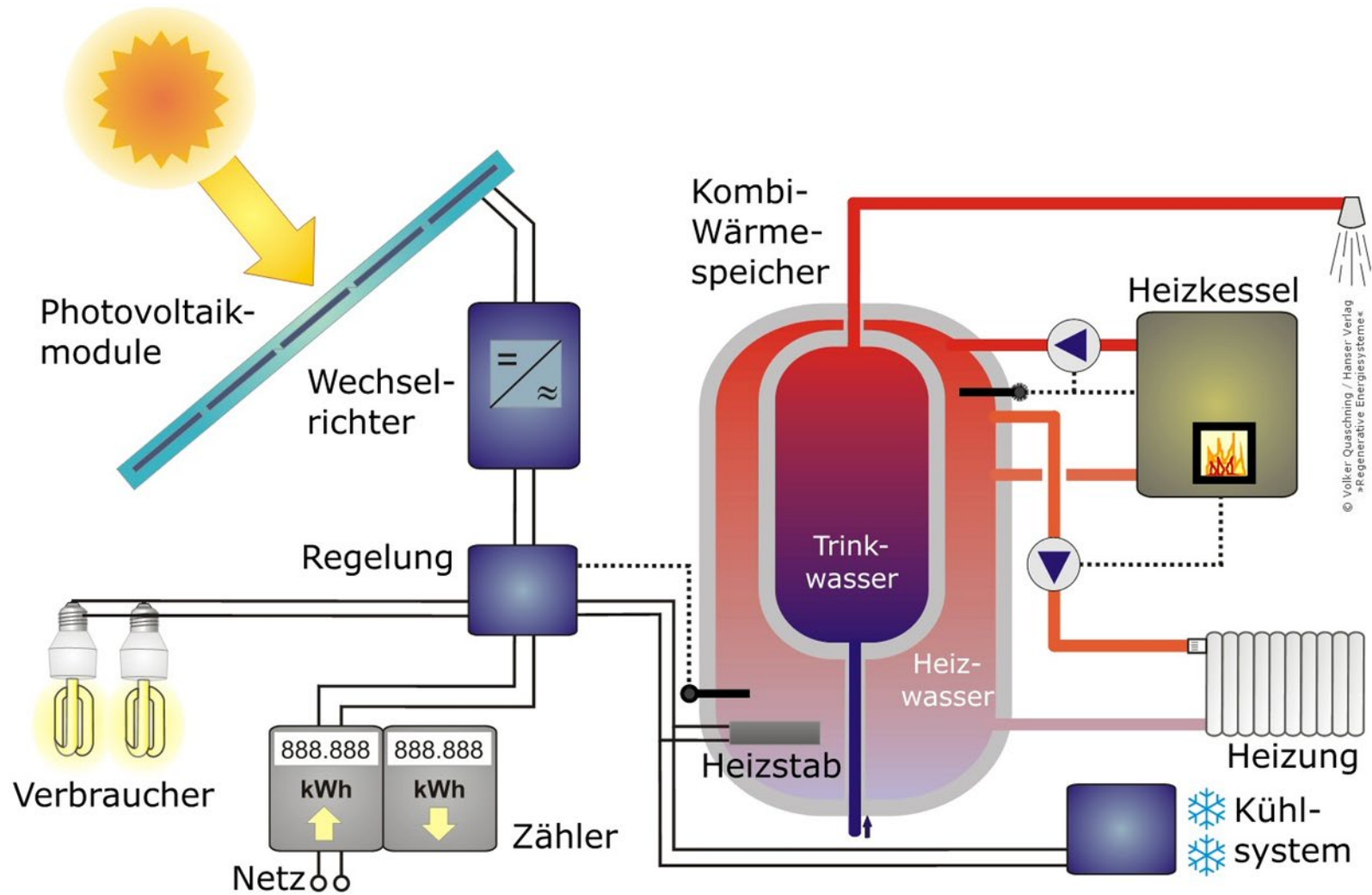
- z.B. Beleuchtung:

- z.B. Haushaltsgeräte:

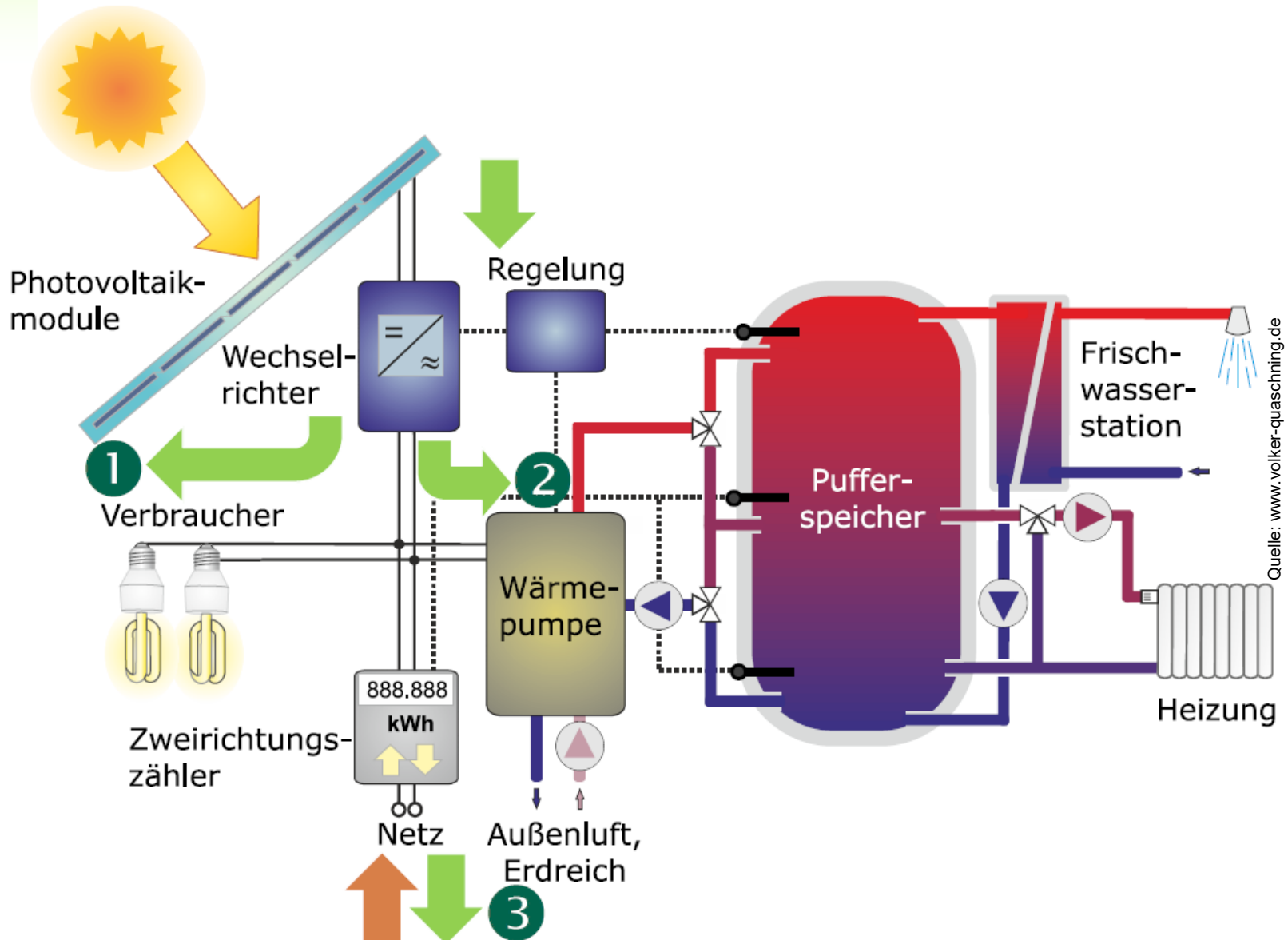


- Macht ggf. Wärmeerzeugung mit Strom Sinn? (Brauchwasser oder Heizung)

# Eigenverbrauchserhöhung durch Wärmeproduktion: Mit Heizstab



# Eigenverbrauchserhöhung durch Wärmeproduktion: Mit Wärmepumpe

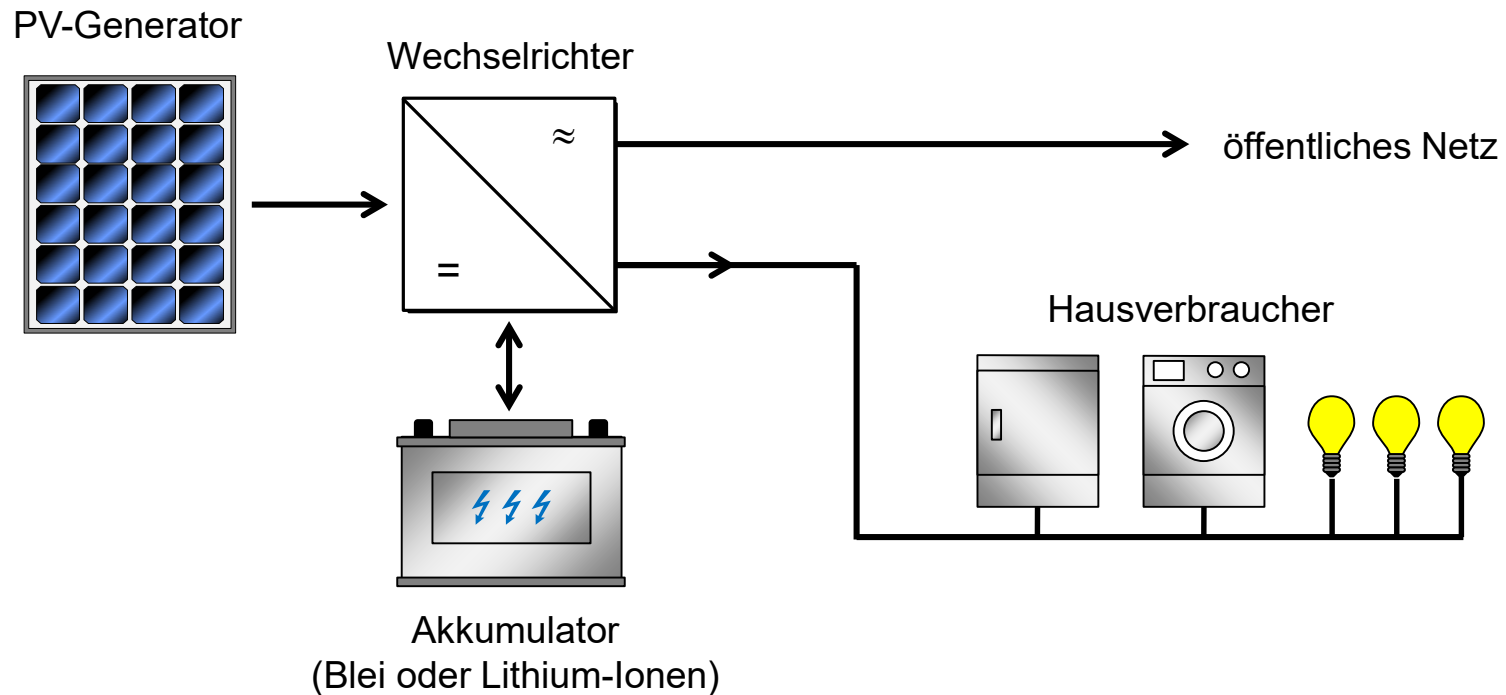




## **5. Speicherung von Solarstrom**

# Prinzip

- Ein Teil des Stroms wird zwischengespeichert, um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen



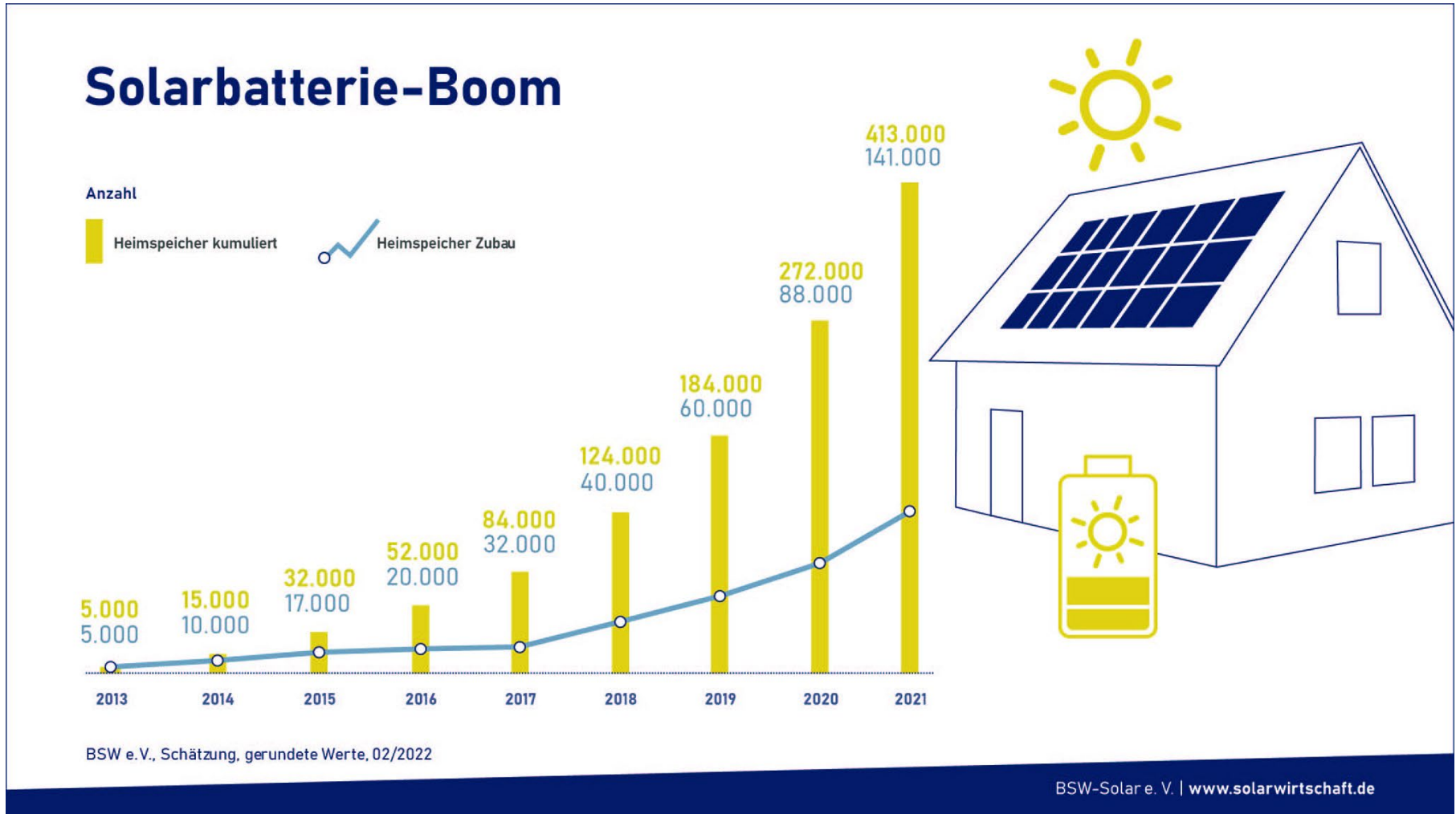
## Aktuelle Situation:

- Lithium-Ionen-Speicher haben sich praktisch durchgesetzt ggü. Bleispeichern



- Zusatzfeatures: z.B. Notstromfunktion, Anbindung an Elektroauto, etc.

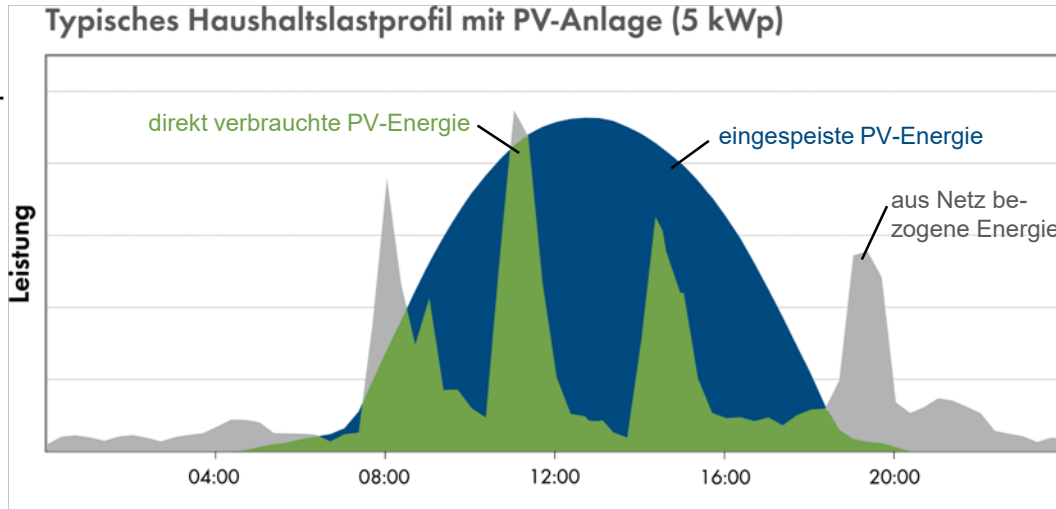
## Aktuelle Situation:



- Mehr als jede 2. PV-Anlage wird mit Speicher gekauft

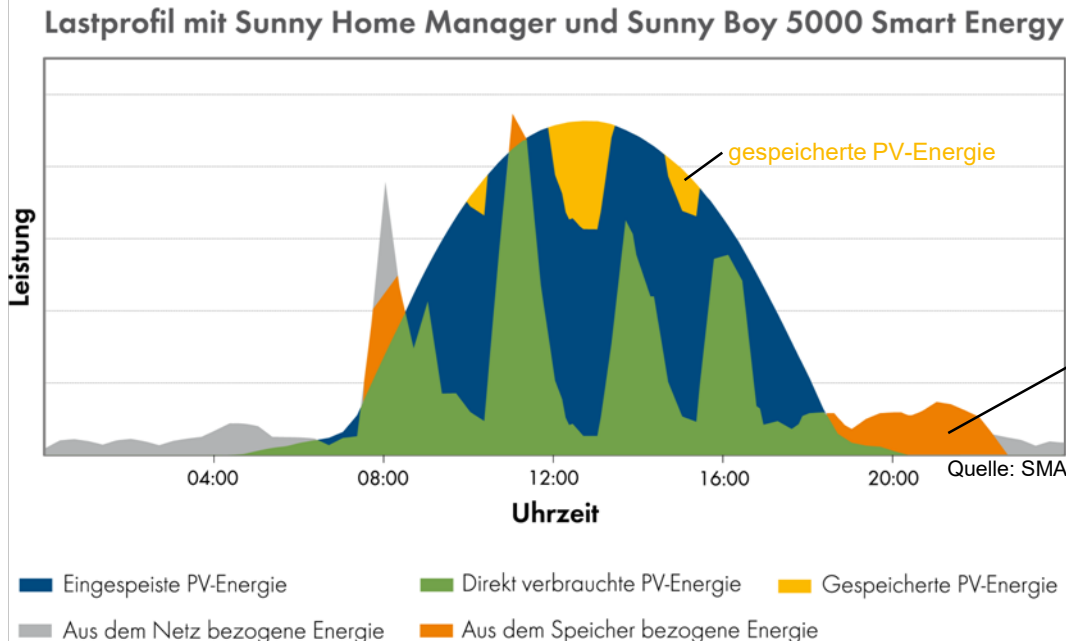
# Intelligentes System zur Erhöhung des Eigenverbrauchs (EFH):

a) Ohne Speicher und Lastmanagement:



⇒ ca. 30 % Eigenanteil

b) Mit Speicher und Lastmanagement:



⇒ ca. 60 % Eigenanteil

aus Speicher bezogene Energie

■ Eingespeiste PV-Energie    
 ■ Direkt verbrauchte PV-Energie    
 ■ Gespeicherte PV-Energie  
■ Aus dem Netz bezogene Energie    
 ■ Aus dem Speicher bezogene Energie

## Aktuelle Situation:

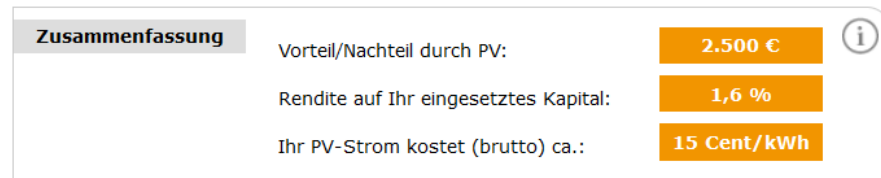
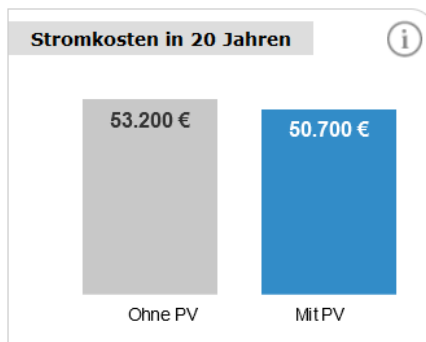
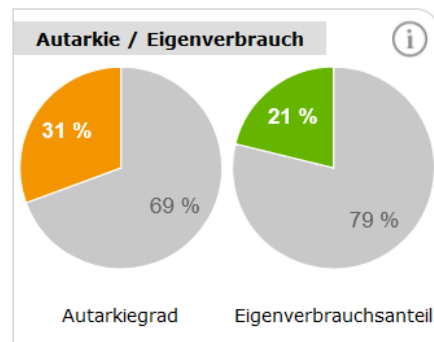
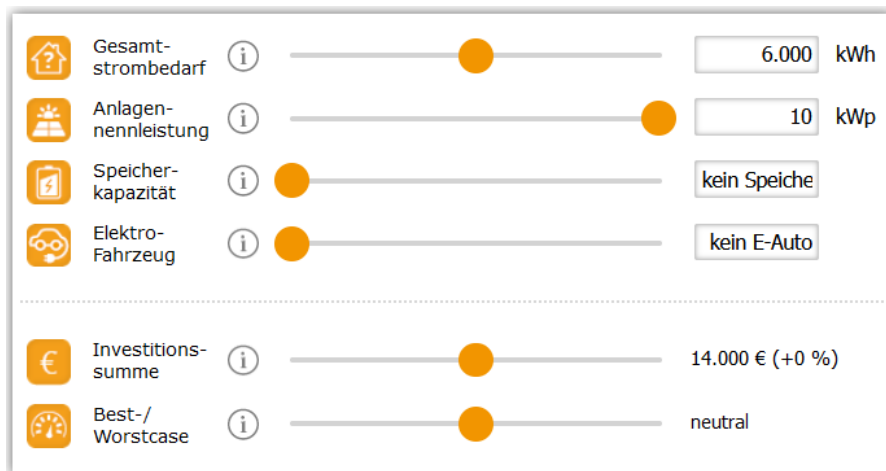
- Bislang wurden in Deutschland gut 400.000 Heimspeicher installiert
- Kosten von Speichern sinken (insb. Lithium-Ionen-Speicher)
- Kosten zur Speicherung einer Kilowattstunde liegen aber immer noch über 15 bis 20 Cent

⇒ Speicher rechnen sich bislang nur in Ausnahmefällen!

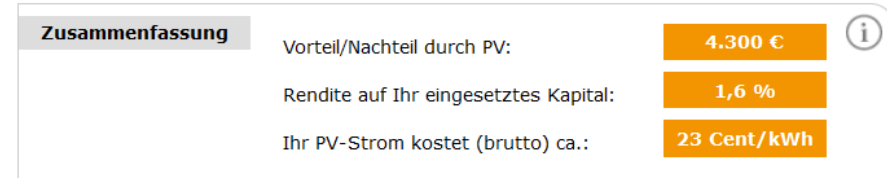
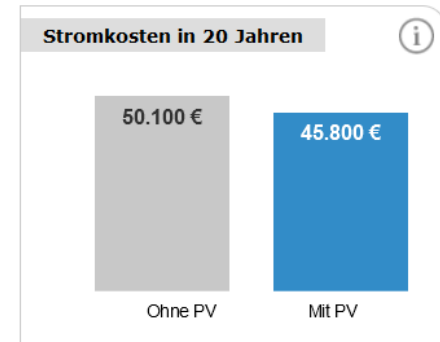
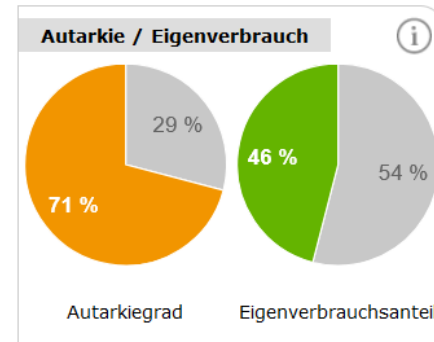
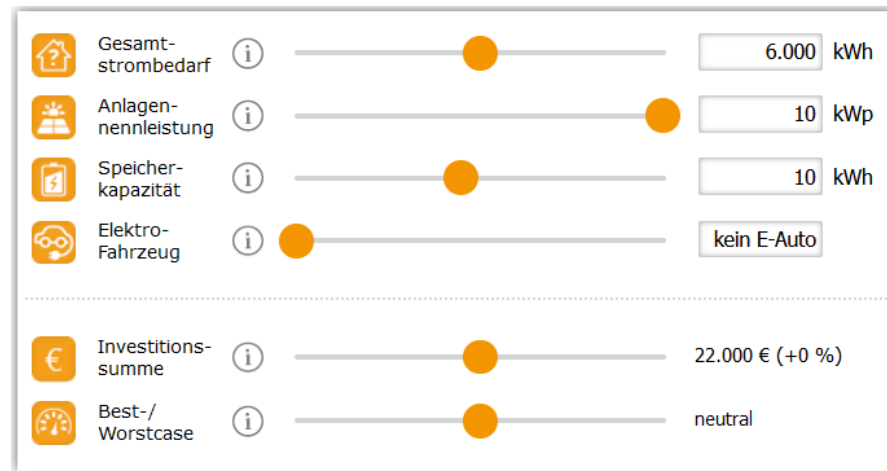
⇒ Speicherung in Wärme (z.B. in Kombination mit Wärmepumpen) ist eher wirtschaftlich!

# Speicherauslegung mit pv-now-easy:

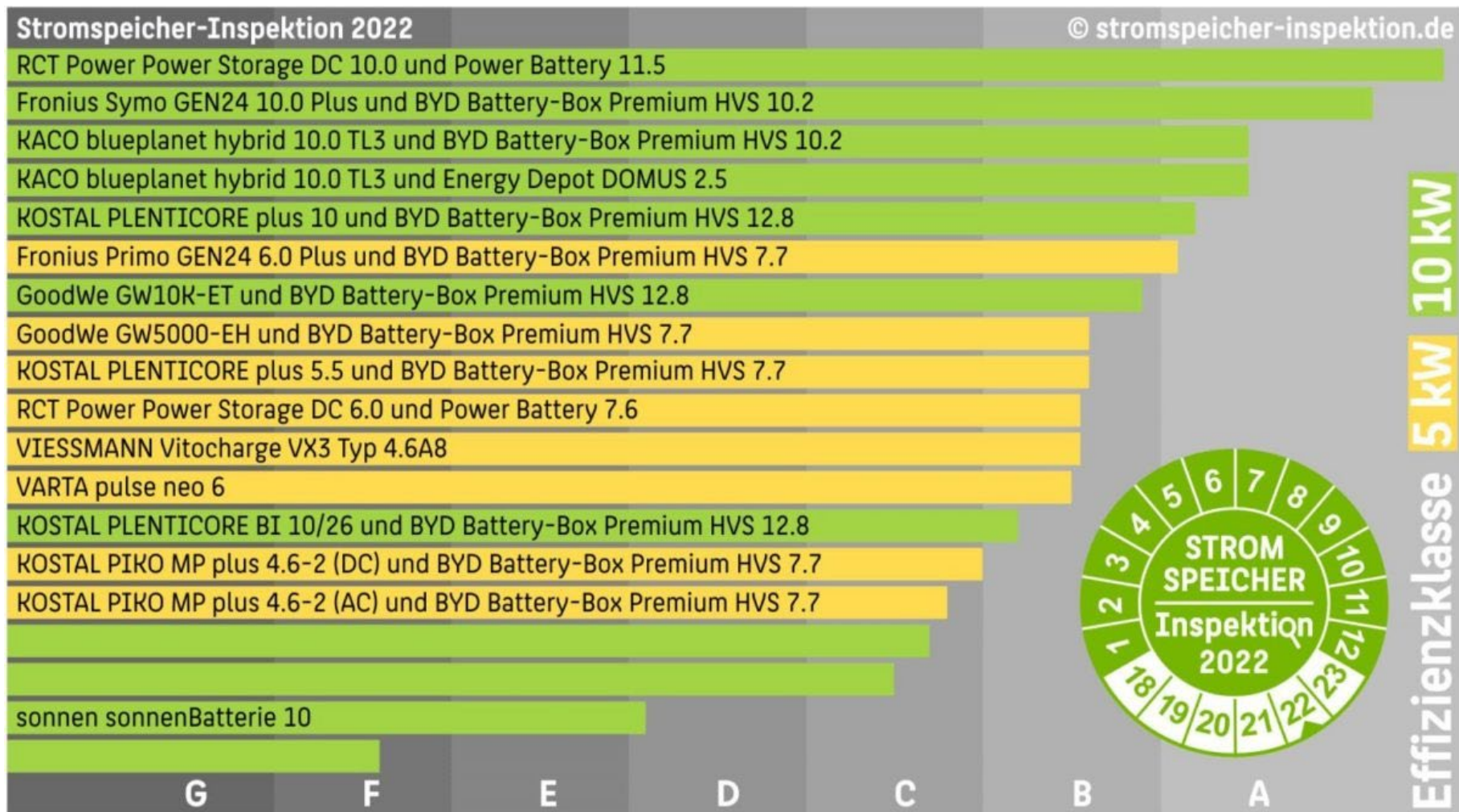
## Fall A: ohne Speicher:



## Fall B: mit Speicher:



## Studie zur Effizienz von aktuellen Stromspeichern:



<https://solar.htw-berlin.de/studien/speicher-inspektion-2021/>



## Was ist hier falsch?



Foto: K. Mertens

# Nutzt die Dächer!



Foto: Mertens



Pixabay



Pixabay



Foto: Mertens



Foto: Mertens



Pixabay



Pixabay



www.pv-magazine.de

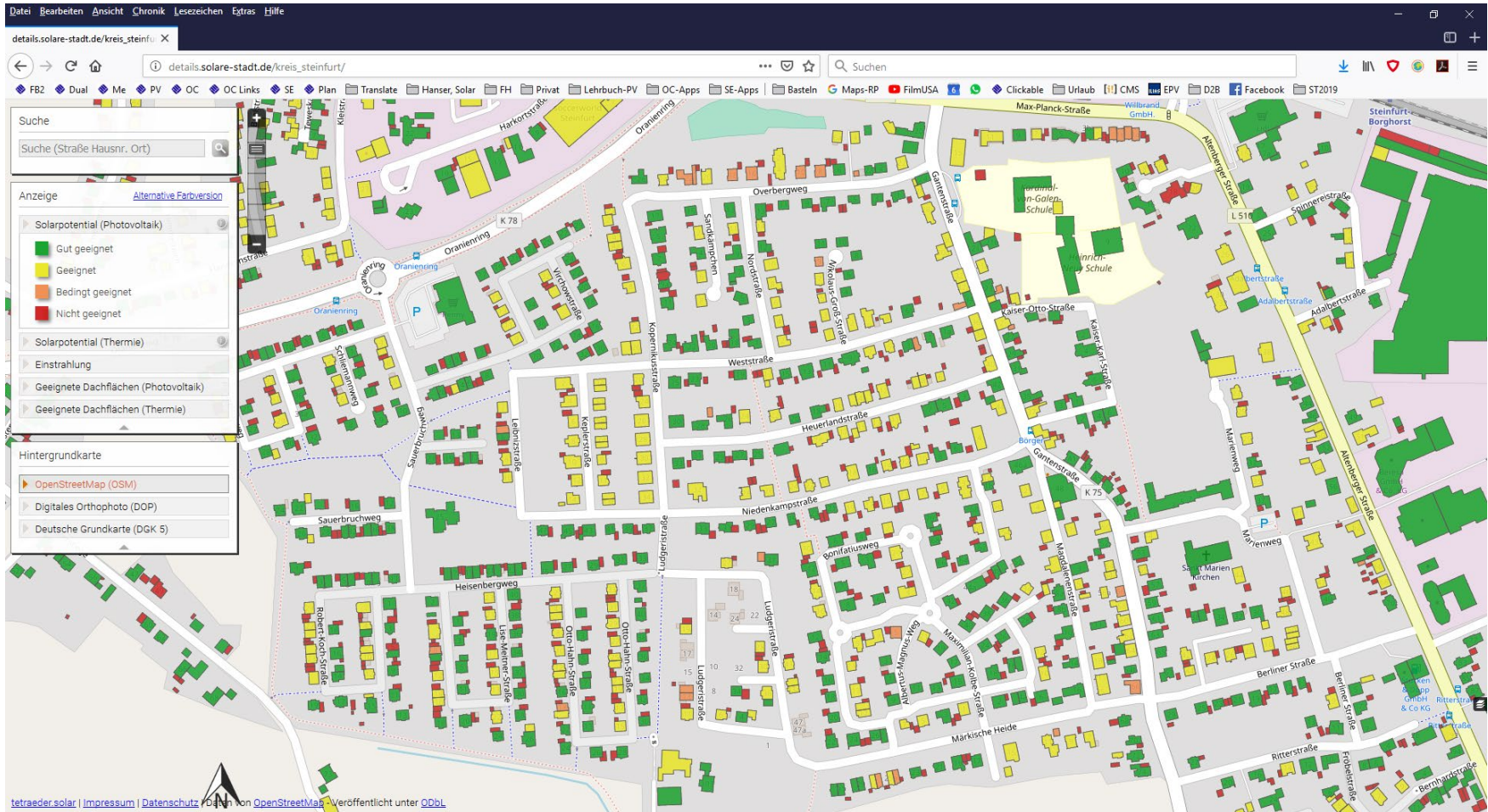
www.solaranlagen-portal.com

## Macht die Dächer voll!



# Die Dächer müssen genutzt werden: Es ist noch genug Platz...

## Beispiel Steinfurt



⇒ [http://details.solare-stadt.de/kreis\\_steinfurt/](http://details.solare-stadt.de/kreis_steinfurt/)

# Die Dächer müssen genutzt werden: Es ist noch genug Platz...

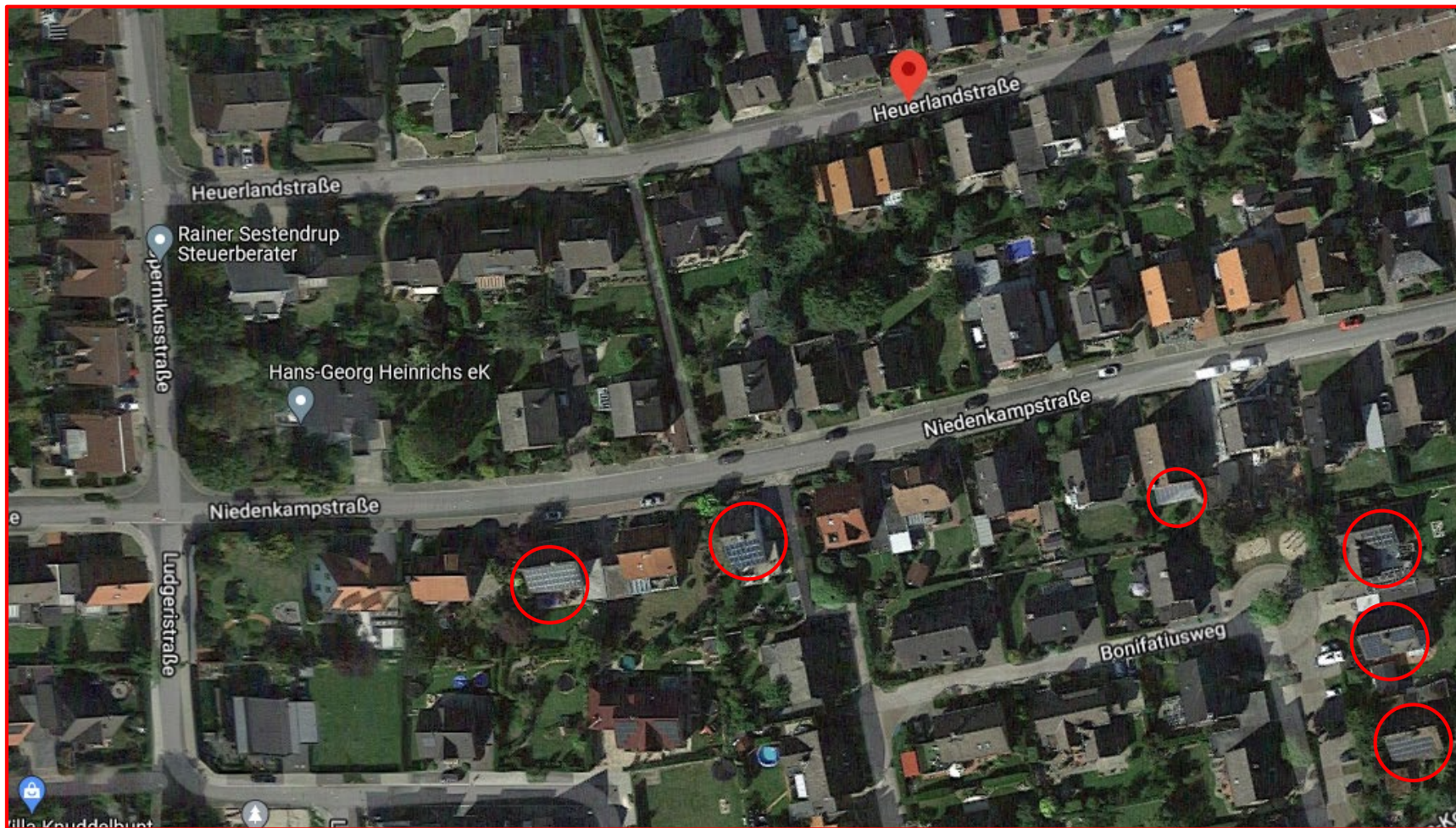
## Beispiel Steinfurt:



Quelle: google maps

# Die Dächer müssen genutzt werden: Es ist noch genug Platz...

## Beispiel Steinfurt:



Quelle: google maps

## **6. Photovoltaik und Elektroautos?**

## Nutzt die Dächer... auch für das Elektroauto...

# 90 Prozent würden Solarstrom tanken

## Womit würden Sie bei gleichem Preis vorzugsweise tanken?

Solarenergie und andere  
Erneuerbare Energien

90%

Stromquelle egal

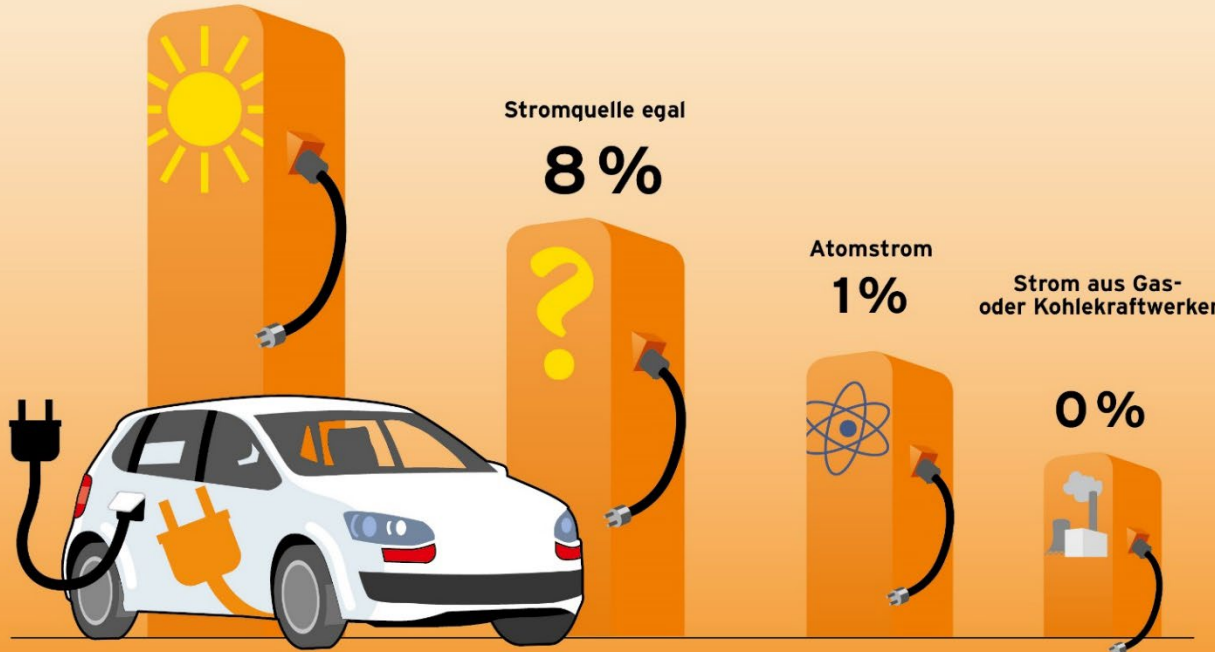
8%

Atomstrom

1%

Strom aus Gas-  
oder Kohlekraftwerken

0%



Basis: Autofahrer, für die grundsätzlich die Anschaffung eines Elektroautos in Frage kommt | An 100 Prozent fehlende Angaben = „weiß nicht“ | Forsa-Umfrage im Auftrag des BSW-Solar, 6/2018

[www.solarwirtschaft.de](http://www.solarwirtschaft.de)

SOLARGRAFIK.de



# Nutzt die Dächer... auch für das Elektroauto...

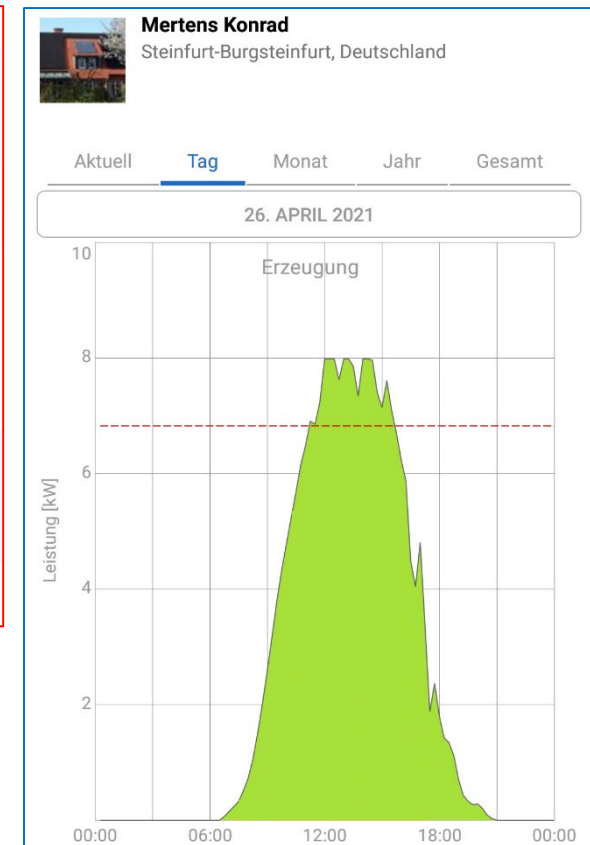
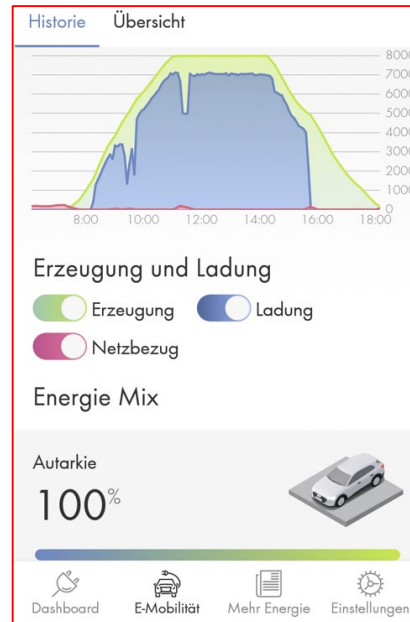
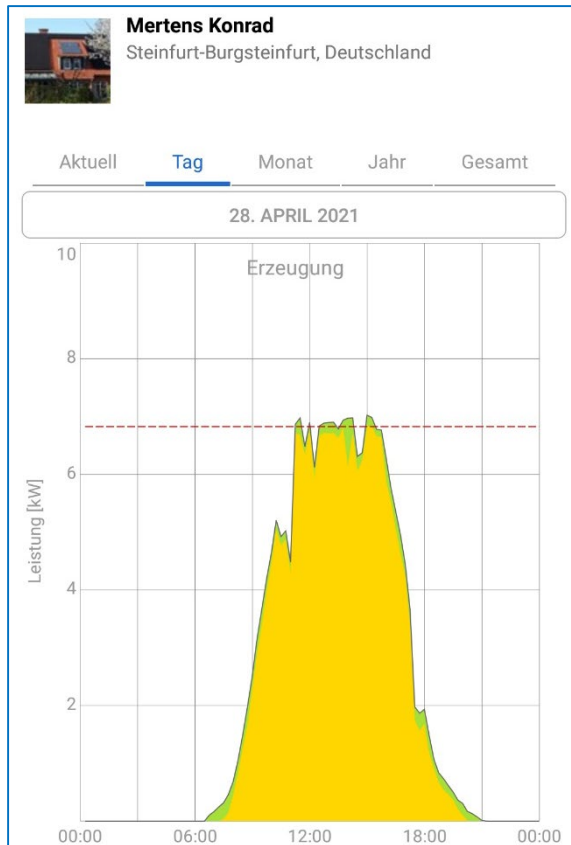
ohne Elektroauto

Tagesertrag: 54 kWh  
**Eigenverbrauch: 3 kWh**



mit Elektroauto  
(einphasig)

Tagesertrag: 58 kWh  
**Eigenverbrauch: 31 kWh**



## Nutzt die Dächer... auch für das Elektroauto...



⇒ z.B. 5 kWp - Anlage: 25.000 km pro Jahr!

⇒ besser: 10 kWp - Anlage: 25.000 km pro Jahr + 4500 kWh für Haushalt...

Wie man es nicht machen sollte:



## Gewöhnungsbedürftig...



Foto: © Bildarchiv Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München; Fotograf: Joachim Gattenlöhner, Kitzingen

## So bekommt man einen hohen Eigenverbrauchsanteil... 😊



Foto: Johannes Weniger

Wie man es nicht machen sollte:



Wie man es nicht machen sollte:



Foto: Jörg Philipp

## 7. Fazit



## Fazit

- Solarstrom ist inzwischen deutlich günstiger als Biomasse- und Offshore-Windkraft
- Die Einspeisevergütung allein reicht aktuell kaum noch für einen auskömmlichen Betrieb
- Durch Eigenverbrauch ist die Rendite dennoch akzeptabel bis sehr gut
- Speicher rechnen sich im Moment i.A. noch nicht, werden aber immer günstiger
- Die Elektromobilität wird den weiteren Ausbau der Photovoltaik beschleunigen
- Macht die Dächer voll, woher soll der Strom denn sonst kommen???

# Lehrbuch: Photovoltaik – Grundlagen, Technologie und Praxis

Photovoltaik verstehen?  
[www.lehrbuch-photovoltaik.de](http://www.lehrbuch-photovoltaik.de)



★★★★★ **Vermutlich das PV Standardwerk - empfehlenswert !**

Rezension aus Deutschland vom 14. November 2019

**Verifizierter Kauf**

Das Buch ist selbst für ambitionierte Nichttechniker extrem hilfreich und gibt einen guten Überblick über PV - Wissen Stand der Technik. Kann das Buch wirklich empfehlen, da es die technischen Grundlagen gut verstehbar vermittelt.

## Abbildungen des Lehrbuchs Photovoltaik

Im Folgenden finden Sie eine Auswahl der im Lehrbuch Photovoltaik vorhandenen Abbildungen.

Diese dürfen nur unter Angabe der Quelle "**K. Mertens, www.lehrbuch-photovoltaik.de**" verwendet werden.

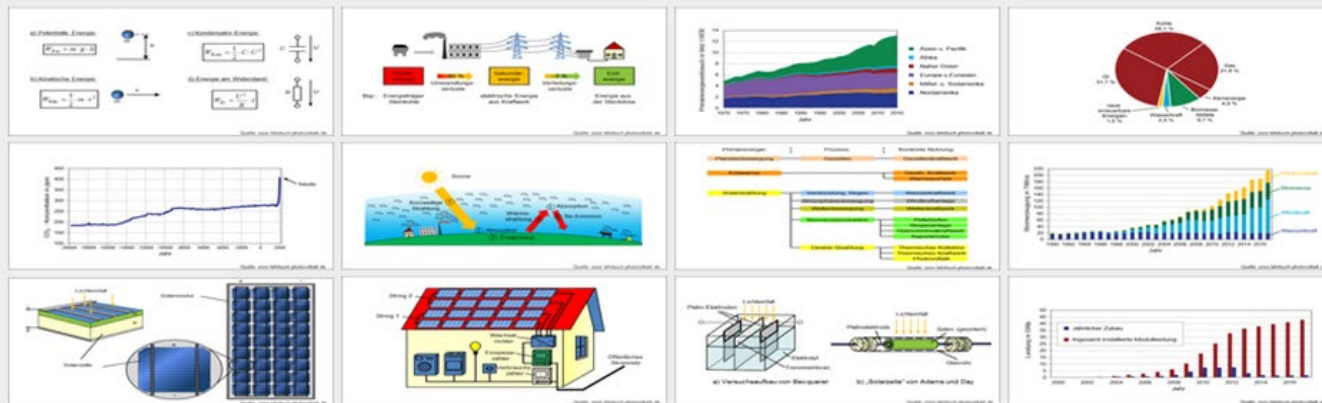
Alternativ kann die vollständige Quellenangabe genutzt werden:

**Konrad Mertens, "Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis", Hanser Verlag, 2018**

### Tipps:

- Die Titel der Bilder erscheinen beim Überfahren mit der Maus.
- Um die Bilder elegant durchblättern zu können, erlauben Sie bitte die Option "Java-Script" an ihrem Browser.
- Zum Speichern eines Bildes auf dem eigenen Rechner klicken Sie direkt, nachdem Sie auf das gewünschte Bild geblättert haben, mit der rechten Maustaste auf das gewünschte Bild und wählen "Grafik speichern unter".

### Abbildungen aus Kapitel 1: Einführung



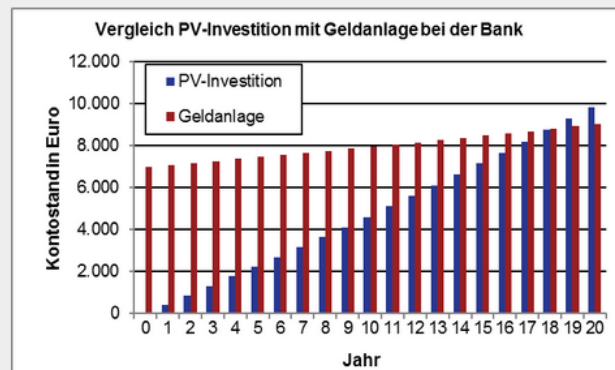
## Software zum Lehrbuch Photovoltaik

Zur Vertiefung der Inhalte des Buches finden Sie hier einige Programme.

Diese dürfen kostenlos heruntergeladen und genutzt werden.

### Objektrenditeberechnung 2.0

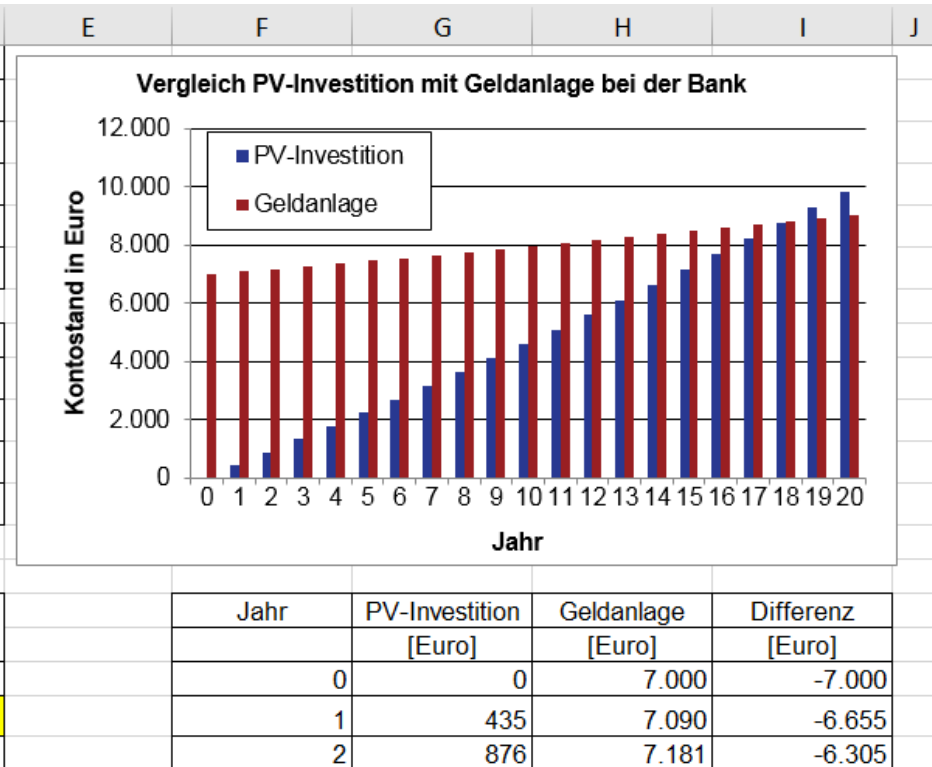
Dieses Programm dient zur einfachen und nachvollziehbaren Berechnung der Rendite einer Photovoltaikanlage. Hierzu wird die Objektrendite ermittelt, bei der man die Investition in eine Photovoltaikanlage vergleicht mit der Geldanlage bei einer Bank.



[Download](#)

## Software: Renditeberechnung

|    | A  | B                | C                     | D        |
|----|--|------------------|-----------------------|----------|
| 1  | Eingaben   |                  |                       |          |
| 2  | Investitionssumme  | $K_0$            | 7.000                 | Euro     |
| 3  | Installierte PV-Leistung                                       | $P_{PV}$         | 5,00                  | kWp      |
| 4  | Kosten pro installierter Leistung                              | $k_0$            | 1400,00               | Euro/kWp |
| 5  | Erwarteter spezifischer Jahresertrag                           | $w_{Jahr}$       | 900                   | kWh/kWp  |
| 6  | Vergütung laut EEG   | $k_{EEG}$        | 12,0                  | Cent/kWh |
| 7  |  |                  |                       |          |
| 8  | Ergebnisse   |                  |                       |          |
| 9  | Jährliche Betriebskosten (1,5 % von $K_0$ )                    | $K_{Betrieb}$    | 105,00                | Euro     |
| 10 | Jährliche Einnahmen  | $K_{Ein}$        | 540,00                | Euro     |
| 11 | Jährlicher Überschuss  | $K_{Überschuss}$ | 435,00                | Euro     |
| 12 | Amortisationszeit  | $T_A$            | 16,1                  | Jahre    |
| 13 |  |                  |                       |          |
| 14 |  |                  |                       |          |
| 15 | Vergleich zwischen PV-Investition und Geldanlage bei der Bank: |                  |                       |          |
| 16 |  |                  |                       |          |
| 17 | Angenommener Zinssatz / Rendite                                | $p$              | 1,3                   | %        |
| 18 |  |                  | Zinssatz ist zu klein |          |
| 19 | Differenz nach 20 Jahren:                                      | $D$              | 815                   | Euro     |



Vortragsfolien zum Download: [www.fh-muenster.de/mertens](http://www.fh-muenster.de/mertens)  
(ganz unten...)

**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!**