

# Auslegung einer PV-Anlage durch Ermittlung der Anlagengröße

## Kurzreferat

Der erste Schritt zur Auslegung einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) besteht in der optimalen Wahl der Größe der Anlage ausgedrückt durch die Nennleistung in kWp. Anlagen können aufgebaut werden im Netz- oder Inselbetrieb, mit oder ohne Batteriespeicher, mit Volleinspeisung oder Überschusseinspeisung (mit oder ohne Anlagensplitting), mit fester Einspeisevergütung oder mit Einspeisung in Direktvermarktung (Marktprämienmodell). Der Anlagenbetreiber kann identisch sein mit dem Gebäudeeigentümer. Andernfalls kann der Anlagenbetreiber den Gebäudeeigentümer mit Strom beliefern, oder die PV-Anlage ganz oder teilweise vermieten oder eine Miete für die Dachnutzung zahlen. In diesem Text geht es primär um eine PV-Anlage im Netzbetrieb, ohne Batteriespeicher, mit Überschusseinspeisung, ohne Anlagensplitting, wobei ein Anlagenbetreiber einen Gebäudeeigentümer mit Strom beliefert. Zur Berechnung von Anlagenpreis, Eigenverbrauch und Autarkie (Deckung) werden Gleichungen theoretisch hergeleitet, an Werten aus der Praxis ausgerichtet und diskutiert. Weitere notwendige Eingabeparameter werden recherchiert. Die optimale Nennleistung hängt ab vom Preis der Anlage (der relative Preis fällt mit der Größe der Anlage), der EEG-Vergütung (fällt mit der Größe der Anlage), der Eigenverbrauchsquote (fällt mit der Größe der Anlage; schlecht für den Anlagenbetreiber) und dem Deckungsbeitrag (steigt mit der Größe der Anlage; gut für den Gebäudeeigentümer). Optimierungskriterium ist die Objektrendite. Betrachtet wird gleichzeitig eine ausgewogene Win-Win-Situation zwischen Anlagenbetreiber und Gebäudeeigentümer sowie eine Anlagengröße, die einen nennenswerten Beitrag zum Umweltschutz liefert. Ergebnis ist eine Tabellenkalkulation, die die Objektrendite über der Anlagengröße darstellt, zusammen mit den Geldflüssen beim Anlagenbetreiber und dem Gebäudeeigentümer. Ergebnis: Bei festem Strompreis für Eigenverbrauch (in EUR/kWh) liefert eine sehr kleine Anlage die höchste Rendite. Der Anlagenbetreiber muss und kann für größere Anlagen einen höheren Strompreis für Eigenverbrauch fordern, weil der Gebäudeeigentümer damit einen höheren Deckungsbeitrag (mehr Autarkie) erhält und dadurch absolut einen größeren Betrag sparen kann. Eine nennenswerte Dachmiete zu zahlen ist nicht sinnvoll. Dies müsste durch einen unverständlich hohen Strompreis für Eigenverbrauch kompensiert werden. Durch eine vom Gebäudeeigentümer gezahlte Anlagenmiete (Festbetrag) könne der Strompreis für Eigenverbrauch gesenkt werden. Dies würde aber kleinere PV-Anlagen profitabler machen. Im gewählten Beispiel konnte mit einem Strompreis für Eigenverbrauch von 69 % des Strompreises des Energieversorgungsunternehmens (EVU) ein profitables Ergebnis erzielt werden und ausgeglichene Geldströme auf beiden Seiten. Die PV-Anlage hat dabei eine nennenswerte Größe, die 1,3-mal mehr Energie liefert, wie vom Gebäudeeigentümer insgesamt verbraucht wird. Das führt auf einen Deckungsbeitrag (Autarkie) von 54 %. 46 % der Energie muss der Nutzer vom EVU zukaufen. Die Eigenverbrauchsquote beträgt 41 %. Mit 59 % geht mehr als die Hälfte der gewonnenen Energie als Überschusseinspeisung in das Netz.

## Inhaltsverzeichnis

PV-Anlagenauslegung (Einleitung) .....	(1)
Liste der Variablen .....	(2)
Definitionen (Eigenverbrauch und Autarkie) .....	(3)
Berechnungsgleichungen (Eigenverbrauch und Autarkie) .....	(4)
Grenzbetrachtungen ( $E_{PV}/E_N = 0$ und $E_{PV}/E_N$ gegen Unendlich) .....	(4)
Typische Anlagenauslegung ( $E_{PV}/E_N = 1$ ) .....	(5)
Weitere Betrachtungen	
Abschätzung der Autarkie bei $E_{PV}/E_N$ gegen Unendlich .....	(6)
Umkehrung der Berechnungsgleichungen .....	(7)
Abschätzung des Anlagenpreises aus zwei Angaben (von jeweils Nennleistung und Preis) ...	(8)
Weitere Parameter	
Bestimmung der optimalen Größe der PV-Anlage	
Literaturverzeichnis	

### Anhang A:

Auswertung der Kurven zum Eigenverbrauch, Gewerbe, G1

### Anhang B

Entstehung der "Annahme" einer Gleichung für den Eigenverbrauchsanteil

### Anhang C

Renditeberechnung (Mertens 2020)

# PV-Anlagenauslegung

Die Anlagenauslegung besteht im ersten Schritt in der "optimalen"

Anlagengröße gegeben in  $P_p$  in kWp.

Diese Optimierung ist insofern einfach, weil es nur eine Variable gibt.

Weil die Vergütung durch den Nutzer,  $V_N$  in EUR/kWh größer ist als die Vergütung bei Einspeisung mit Eigenverbrauch,  $V_{EE}$

sollte der Einspeiseanteil,  $K_{Einspeise}$

so klein wie möglich gehalten werden,

um die relativen Einnahmen zu maximieren.

Weitere Optimierungsbetrachtungen

folgen, die auch die Minimierung der Kosten im Blick haben sowie den Vorteil

des Nutzers durch hohe Autarkie bzw.

hohe Energiemenge aus der Anlage,  $E_{N,PV}$ .

Liste der Variablen

E: Energie p.a.

P: Leistung

K: Faktor

Index

PV: PV-Anlage

N: Nutzer

PV,E: PV-Anlage, Einspeisung

PV,N: PV-Anlage zum Nutzer

N,PV: Nutzer von der PV-Anlage

N,EVU: Nutzer vom Energieversorgungsunternehmen

p: peak

3

$$E_{PV} = E_{PV,E} + E_{PV,N}$$

$$E_N = E_{N,PV} + E_{N,EVU}$$

$$K_{eigen} = \frac{E_{PV,N}}{E_{PV}} \quad \text{Eigenverbrauch [\%]}$$

$$K_{autark} = \frac{E_{N,PV}}{E_N} \quad \text{Autarkie [\%]}$$

$$K_{einspeise} = \frac{E_{PV,E}}{E_{PV}} = 1 - K_{eigen} \quad \text{Einspeiseanteil [\%]}$$

$$K_{bezug} = \frac{E_{N,EVU}}{E_N} = 1 - K_{autark} \quad \text{Bezugsanteil [\%]}$$

$$K_{pv} = \frac{E_{PV}}{P_p} \quad \left[ \frac{\text{kWh p.a.}}{\text{kWp}} \right] \quad E_{PV} = K_{pv} \cdot P_p$$

Annahme:

(1) 
$$\text{Keigen} = \frac{\text{Kautark, max}}{X + \text{Kautark, max}}$$

$$= \frac{E_{PV, N}}{E_{PV}}$$

$$X = \frac{E_{PV}}{E_N}$$

$$E_{PV, N} = E_{N, PV}$$

(2) 
$$\text{Kautark} = \frac{E_{N, PV}}{E_N} = \frac{E_{PV, N}}{E_{PV}} \cdot X$$

$$E_{N, PV} = \frac{E_{PV}}{X}$$

$$\text{Kautark} = \text{Keigen} \cdot X = \frac{X \cdot \text{Kautark, max}}{X + \text{Kautark, max}}$$

Grenzbetrachtungen:

- $\text{Keigen}(x=0) = 1$

Eine ganz kleine PV-Anlage kann ihren Strom immer beim Verbraucher vollständig überbringen. z.B. für den Standby-Verbrauch der Geräte.

- $\text{Keigen}(x \rightarrow \infty) = 0$

Eine im Verhältnis zum Verbraucher riesengroße Anlage kann im Verhältnis kaum noch Strom an den Verbraucher abgeben.

- $\text{Kautark}(x=0) = 0$

Eine ganz kleine PV-Anlage kann beim Verbraucher keinen nennenswerten Verbrauchsanteil erzielen.

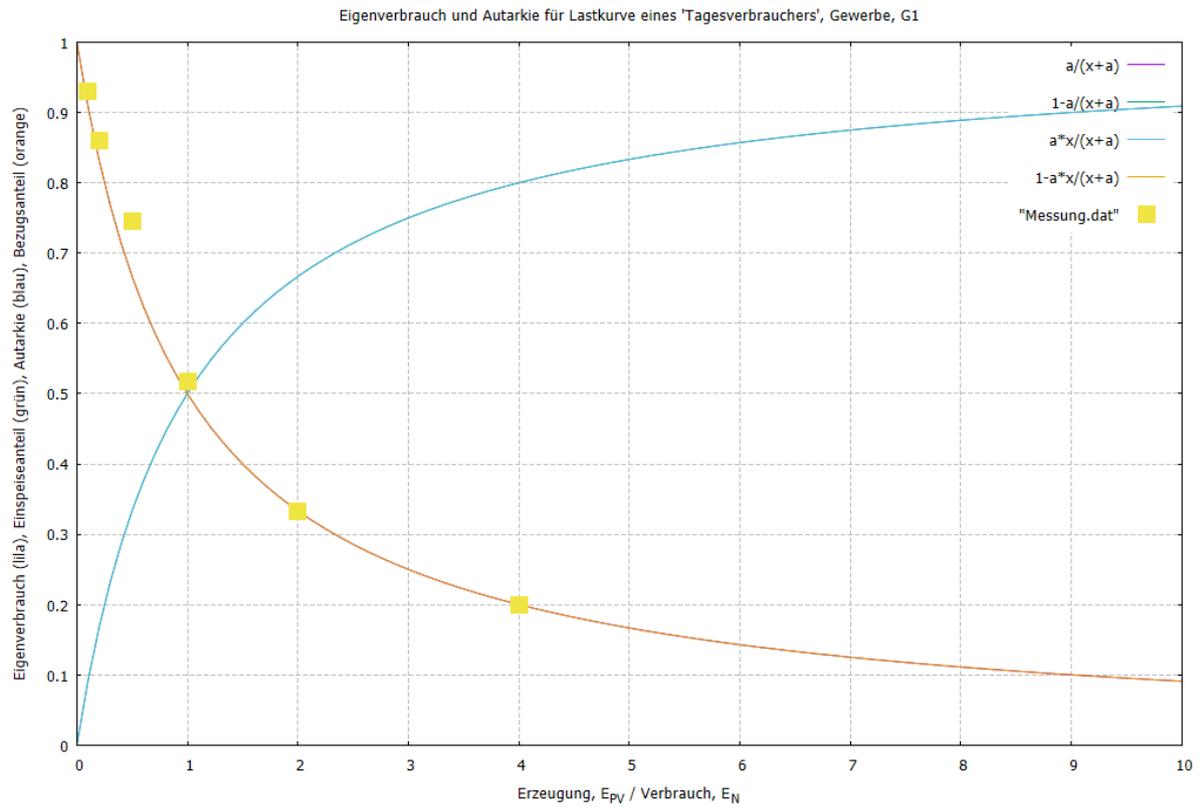
- $\text{Kautark}(x \rightarrow \infty) = \text{Kautark, max}$

(2) 
$$\text{Kautark} = \frac{\text{Kautark, max}}{1 + \frac{\text{Kautark, max}}{X}}$$

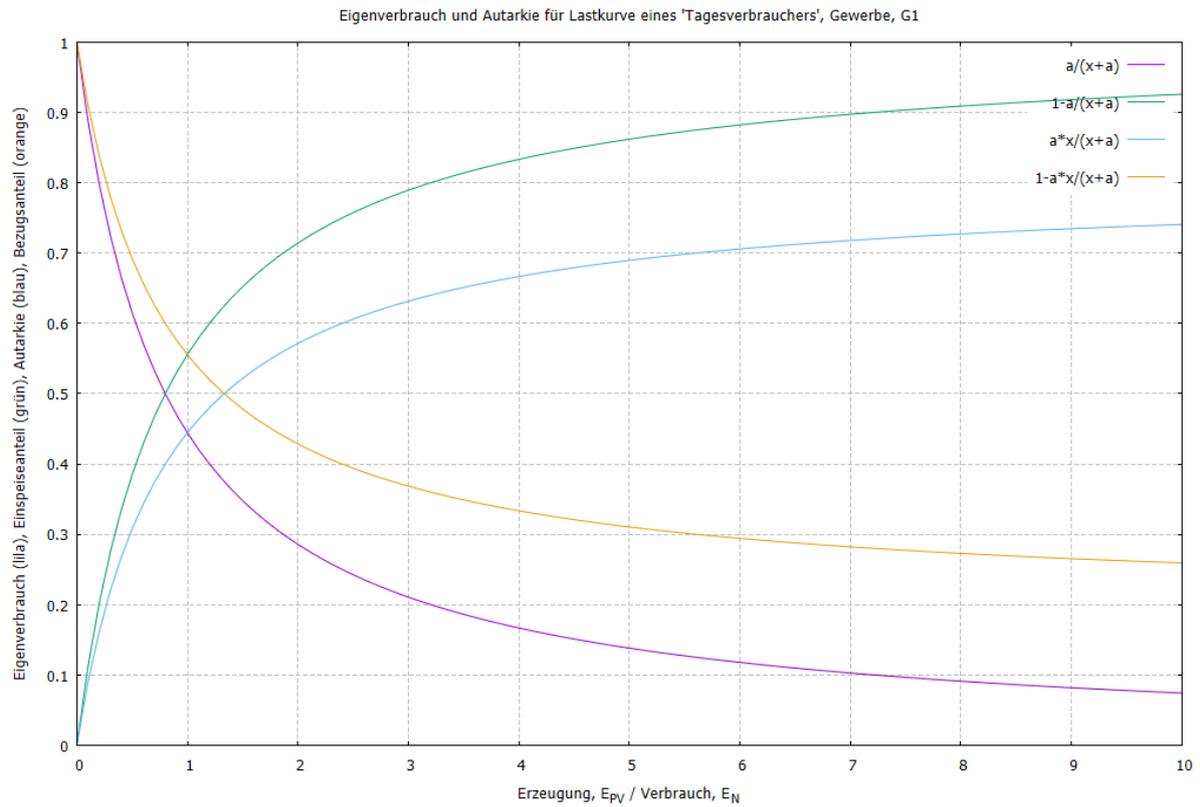
für  $X \rightarrow \infty$

$$= \text{Kautark, max}$$

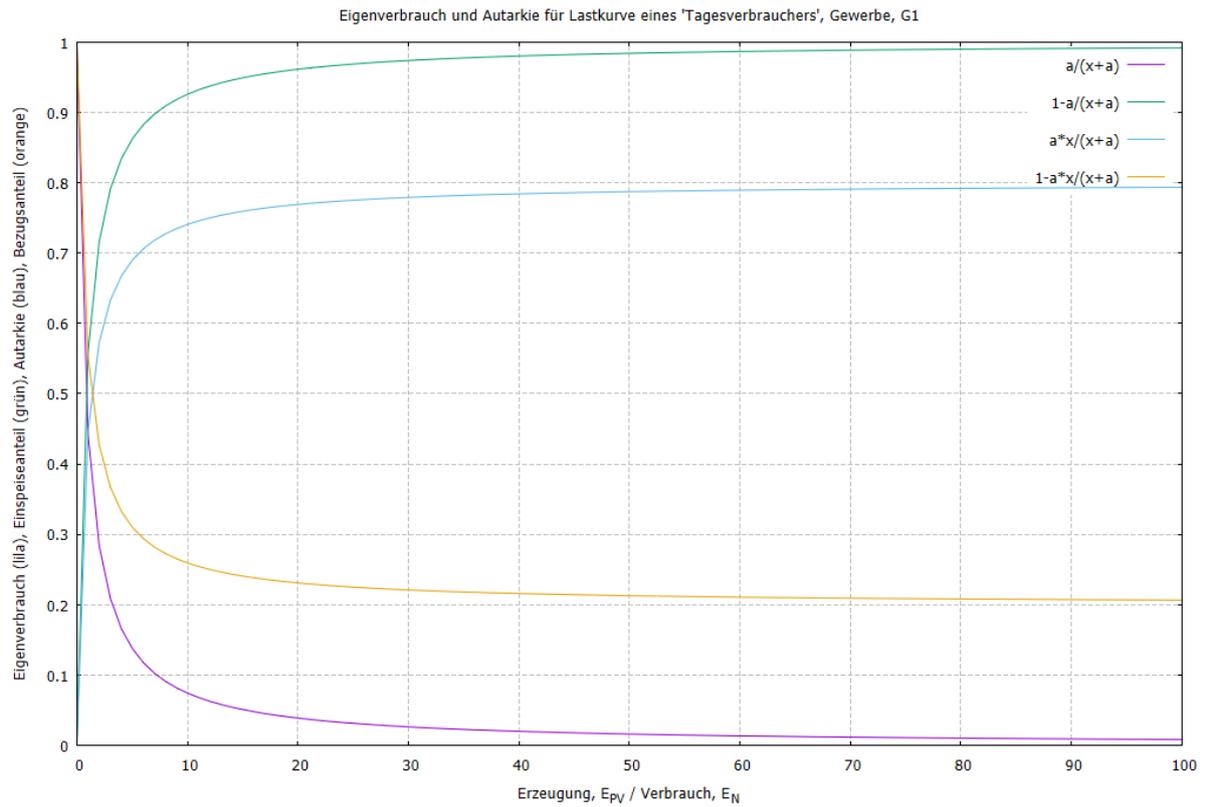
Selbst eine ganz große PV-Anlage führt nicht zu 100% Autarkie, weil/wenn es auch Verbraucher gibt, wenn die Sonne nicht scheint!



**Bild 1:** Eigenverbrauch im Vergleich mit Messwerten aus einer Lastkurve Gewerbe, G1 (reiner Tagverbraucher) und Autarkie. Für große Werte Erzeugung/Verbrauch geht der Eigenverbrauch gegen Null und die Autarkie gegen eins.



**Bild 2:** Gleiche Darstellung wie in Bild 1, jetzt aber zusätzlich mit Einspeiseanteil und Bezugsanteil. Eigenverbrauch und Einspeiseanteil ergeben in Summer per Definition eins. Gleiches gilt für Autarkie und Bezugsanteil (vom EVU).



**Bild 3:** Gleiche Darstellung wie in Bild 2, jetzt aber für übertrieben große Werte Erzeugung/Verbrauch. Wenn Strom teilweise auch nachts verbraucht wird, dann kann die Autarkie auch bei großen PV-Anlagen nicht 100 % erreichen. Hier eine Darstellung für maximal 80 %.

(5)

# Typische Anlagenauslegung (x=1):

Eine typische Anlagenauslegung ist die mit  $E_{PV} = E_N$ .

Beispiel: 5 kWp bei 900 kWh/a/kWp  $\rightarrow$  4500 kWh/a  
Verbrauch 4500 kWh/a

$$x = \frac{E_{PV}}{E_N} = 1$$

•  $Keigen(x=1) = \frac{Kautark, max}{1 + Kautark, max}$

\* reiner Tagesverbraucher ( $Kautark, max = 1$ )

$$Keigen(x=1) = 0,5$$

$Kautark, max$	$Keigen$
1.0	0.5
0.9	0,474
0.8	0,444
0.7	0,412

\*  $Kautark, max = \frac{Keigen(x=1)}{1 - Keigen(x=1)}$  (1a)

$Keigen(x=1)$	$Kautark, max$
0,50	1.0
0,45	0.818
0,40	0.667
0,35	0.538
0,30	0.429 $\leftarrow$ Mertens, S. 313

$Keigen(x=1) = 30\%$  ist eine zu konservative Annahme, weil dies ein  $Kautark, max$  von nur 0,429 bedeutet und damit mehr Nachtverbrauch als Tagesverbrauch.

(6)

$$\begin{aligned} \bullet \text{Kautark} (x=1) &= \frac{1 \cdot \text{Kautark, max}}{1 + \text{Kautark, max}} \\ &= \text{Keigen} (x=1) \end{aligned}$$

Wenn Verbrauch ohne Sonne stattfindet,  
dann sinkt der Eigenverbrauch(santeil)  
und auch die Autarkie  
auf den gleichen Wert (unterhalb von 50%)  
(bei  $x=1$ )

Weitere Betrachtungen:

$\text{Kautark, max} = 1$  reiner Tagesverbraucher

$\text{Kautark, max} = 0$  reiner Nachtverbraucher

(3)

$$\boxed{\text{Kautark, max} = \frac{E_{N, \text{tag}}}{E_N}}$$

$$x = \frac{\text{Kautark, max} (1 - \text{Keigen})}{\text{Keigen}} \quad (1b)$$

Frage: Am Tag fällt 80% des Stromverbrauchs  
an. Wie groß muß die Anlage sein,  
um einen Eigenverbrauchsanteil von  
20% und einen Einspeiseanteil von 80%  
zu erreichen?

Antw.: Mit (1b):  $x = \frac{E_{PV}}{E_N} = 3,2$

(7)

$$K_{\text{autark, max}} = \frac{x \cdot K_{\text{autark}}}{x - K_{\text{autark}}} \quad (2a)$$

$$K_{\text{autark, max}} = \frac{K_{\text{eigen}}}{x - K_{\text{eigen}}} \quad (1a)$$

$$x = \frac{K_{\text{autark}} \cdot K_{\text{autark, max}}}{K_{\text{autark, max}} - K_{\text{autark}}} \quad (2b)$$

# (8) Abschätzung des Anlagenpreises aus zwei Angaben

Vorüberlegungen (Anlagenkosten.ods) zeigen,  
dass:

- Eine Interpolation nicht (Linear) über den Preis, sondern über den spezifischen Preis (Investment, I)  $I_{PV}/P_p$  erfolgen sollte,
- $I_{PV}/P_p$  nicht Linear, sondern als Potenz dargestellt werden sollte:

$$\boxed{I_{PV}/P_p = a_I \cdot P_p^{b_I}}$$

Kurz:

$$y = a_I \cdot x^{b_I}$$
$$y_1 = a_I \cdot x_1^{b_I}$$
$$y_2 = a_I \cdot x_2^{b_I}$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^{b_I}$$

$$b_I = \log_{x_1/x_2} \frac{y_1}{y_2}$$

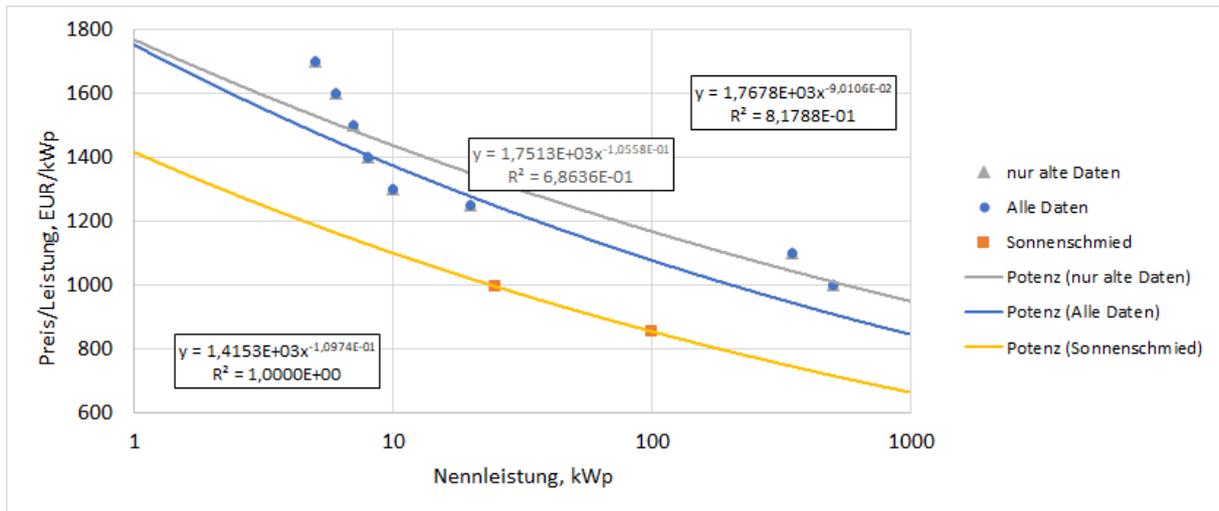
$$b_I = \frac{\ln y_1/y_2}{\ln x_1/x_2}$$

$$\boxed{a_I = \frac{y_1}{x_1^{b_I}}} \quad \text{oder}$$

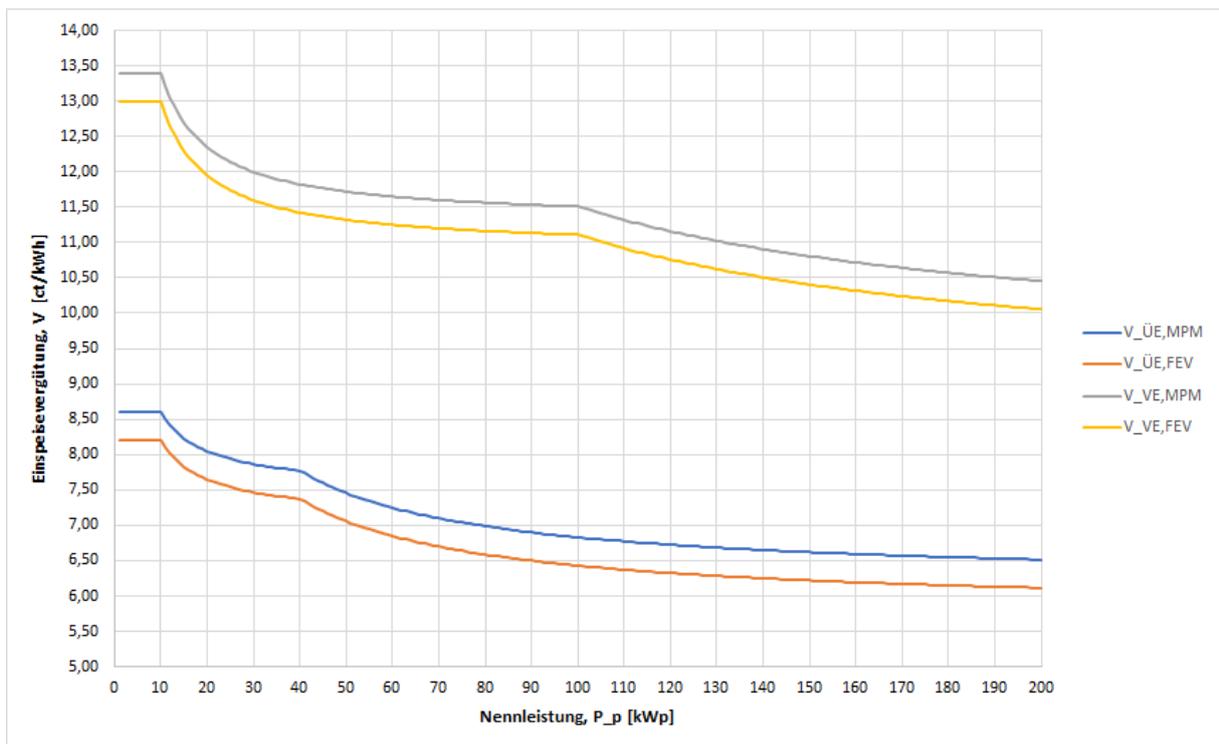
$$a_I = \frac{y_2}{x_2^{b_I}}$$

$$\boxed{I_{PV} = \frac{I_{PV}}{P_p} \cdot P_p}$$

$$I_{PV} = a_I \cdot P_p^{(b_I+1)}$$



**Bild 4:** Verbinden zweier Punkte aus zwei Angeboten für eine PV-Anlage durch eine Hyperbelfunktion.



**Bild 5:** Graphische Darstellung der PV-Einspeisevergütungen nach EEG ab 2023. ÜE: Überschusseinspeisung, VE: Volleinspeisung, MPM: Marktprämienmodell, FEV: Feste Einspeisevergütung. Pp: Nennleistung der PV-Anlage in kWp.

## Weitere Parameter

Bild 6 zeigt die wesentlichen Eingabeparameter in die Tabellenkalkulation zur Berechnung der Objektrendite von PV-Anlagen mit Hinweisen.

Die **installierte Leistung** (in kWp) ist die wichtigste Eingabegröße. Die Investitionssumme und die Vergütung laut EEG werden daraus errechnet. Die Berechnung des Eigenverbrauchsanteils basiert auf dem Verhältnis von erzeugter Energie ( $P_{PV} \cdot w_{\text{Jahr}}$ ) zu verbrauchter Energie,  $E_{VP}/E_N$ . Die ganzen wichtigen Details der weiteren Anlagenauslegung (Module mit ihrer Ausrichtung, Wechselrichter, ...) verbergen sich in dem erwarteten **spezifischen Jahresertrag**,  $w_{\text{Jahr}}$ .

Der **Strompreis** (in EUR/kWh) gefordert vom Energieversorgungsunternehmen,  $k_{EVU}$ , erfordert eine Marktrecherche. Den Wert wird man schwerlich über 20 Jahre voraussagen können. Zu erwarten ist, dass der Wert steigen wird. Wenn hier mit konstanten Stromkosten von heute gerechnet wird, so ist dies eine konservative Annahme.

Bei festem **Strompreis für Eigenverbrauch** (in EUR/kWh),  $k_{EV}$ , liefert eine sehr kleine Anlage die höchste Rendite. Der Anlagenbetreiber muss und kann für größere Anlagen einen höheren Strompreis für Eigenverbrauch fordern, weil der Nutzer damit einen höheren Deckungsbeitrag (mehr Autarkie) erhält und dadurch absolut einen größeren Betrag sparen kann.

Verhandelt wird mit dem Nutzer die **Vergütung durch Eigenverbrauch in Prozent des Strompreises des EVU**,  $k_{EV,rel}$ . Dieser Prozentsatz ist nach dem Ende der Verhandlungen festgeschrieben. Wichtig ist, dass  $k_{EV,rel}$  verschiedener Anlagen nicht miteinander verglichen werden können. Anlagen, die im Verhältnis zum Verbrauch größer sind als andere Anlagen erfordern ein höheres  $k_{EV,rel}$ .

Die jährlichen **Betriebskosten** können aus zwei Eingabevarianten kombiniert werden:

- Die jährlichen *Betriebskosten in EUR/kWp* sind eine gute Möglichkeit, die Kosten, die über mehrere PV-Anlagen anfallen auf die einzelnen Anlagen zu verteilen. Zu verteilende Kosten wären:
  - Bezogene Leistungen
  - Sonstige Aufwendungen
  - Steuern
- Die jährlichen *Betriebskosten in Prozent von der Investitionssumme,  $K_0$*  können auch genutzt werden. Sie werden von Mertens (2020) mit 1,5 % angegeben. Wenn die PV-Anlage (teilweise) durch Kredit finanziert wird, so könnte man das hier unterbringen.

Wichtig ist, dass Betriebskosten über diese zwei Eingabemöglichkeiten nicht doppelt angegeben werden. **Abschreibung** wird in der Renditerechnung direkt berücksichtigt und ist nicht Teil der Betriebskosten hier.

Eingaben in grünen Feldern (siehe auch ab Zeile 40 und P18)			Hinweise
Investitionssumme	$K_0$	24.853 Euro	Berechnung: 1.)
Installierte PV-Leistung	$P_{PV}$	25,00 kWp	unabhängige Variable
Kosten pro installierter Leistung	$k_0$	994 Euro/kWp	= $K_0 / P_{PV}$
Erwarteter spezifischer Jahresertrag	$W_{Jahr}$	900 kWh/kWp	Anlagenauslegung
Vergütung laut EEG	$k_{EEG}$	7,54 Cent/kWh	Berechnung: 2.)
Jährliche Betriebskosten (in Prozent von $K_0$ )	$b$	1,5 %	Quelle: Mertens
Jährliche Steigerung der Betriebskosten in Prozent	$sb$	1,0 %	Quelle: Mertens
Angenommene jährliche Moduldegradation in Prozent	$d$	0,5 %	Quelle: Mertens
Jahresverbrauch des Nutzers	$E_N$	17000 kWh	EVU-Abrechnung
Stromkosten, EVU	$k_{EVU}$	40,0 Cent/kWh	Marktrecherche
Eigenverbrauchsanteil in Prozent	$k_{eigen}$	40,5 %	Berechnung: 3.)
Vergütung durch Eigenverbrauch in % der Stromkosten, EVU	$k_{EV,rel}$	40,0 %	Verhandlungsergebnis
Vergütung durch Eigenverbrauch	$k_{EV}$	27,4 Cent/kWh	= $k_{EV,rel} * k_{EVU}$
Jährliche Betriebskosten (in Euro/kWp)	$b_{P,PV}$	40 Euro/kWp	Quelle: RoGa

Die jährlichen **Betriebskosten** werden aus zwei Eingabevarianten kombiniert:  
=> Die jährliche Betriebskosten in Euro/kWp sind die vereinbarte Darstellung für die RoGa. Vorschlag: "Variante C": aus 4.), 6.) und auch 10.)  
4.) Bezogene Leistungen  
6.) Sonstige Aufwendungen  
10.) Steuern

=> Die jährliche Betriebskosten in Prozent von  $K_0$  können genutzt werden, wenn die PV-Anlage (teilweise) durch Kredit finanziert wird.

**Bild 6:** Eingabeparameter in die Tabellenkalkulation zur Objektrendite von PV-Anlagen.

### Bestimmung der optimalen Größe der PV-Anlage

Bild 7 zeigt die Oberfläche des Tools beschrieben von Martens (2020). Download über:

<https://www.lehrbuch-photovoltaik.de>

Eingaben in grünen Feldern (siehe auch ab Zeile 40 und P18)		
Investitionssumme	$K_0$	24.853 Euro
Installierte PV-Leistung	$P_{PV}$	25,00 kWp
Kosten pro installierter Leistung	$k_0$	994 Euro/kWp
Erwarteter spezifischer Jahresertrag	$W_{Jahr}$	900 kWh/kWp
Vergütung laut EEG	$k_{EEG}$	7,54 Cent/kWh
Jährliche Betriebskosten (in Prozent von $K_0$ )	$b$	1,5 %
Jährliche Steigerung der Betriebskosten in Prozent	$sb$	1,0 %
Angenommene jährliche Moduldegradation in Prozent	$d$	0,5 %
Jahresverbrauch des Nutzers	$E_N$	17000 kWh
Strompreis, EVU	$k_{EVU}$	40,0 Cent/kWh
Eigenverbrauchsanteil in Prozent	$k_{eigen}$	40,5 %
Vergütung durch Eigenverbrauch in % der Stromkosten, EVU	$k_{EV,rel}$	40,0 %
Vergütung durch Eigenverbrauch	$k_{EV}$	27,43 Cent/kWh
Jährliche Betriebskosten (in Euro/kWp)	$b_{P,PV}$	40 Euro/kWp

Jahr	Jahresertrag [kWh]	Einnahmen, EV		Betriebskosten [Euro]	Überschuss [Euro]	Konto-stand [Euro]	Geld-anlage [Euro]	Nutzer	
		Ein-nahmen, EV [Euro]	Ein-nahmen, EV [Euro]					Ersparnis durch EV [Euro]	Dachmiete [Euro]
1	22.500	1.010	2.498	3.508	1.010	2.498	26.389	1.145	10
2	22.388	1.005	2.485	3.490	1.030	2.460	28.020	1.139	10
3	22.276	1.000	2.473	3.473	1.051	2.422	29.752	1.133	10
4	22.164	995	2.461	3.455	1.072	2.384	31.590	1.128	10
5	22.053	990	2.448	3.438	1.093	2.345	33.543	1.122	10
6	21.943	985	2.436	3.421	1.115	2.306	35.616	1.117	10
7	21.833	980	2.424	3.404	1.137	2.266	37.817	1.111	10
8	21.724	975	2.412	3.387	1.160	2.227	40.154	1.105	10
9	21.616	970	2.400	3.370	1.183	2.187	42.635	1.100	10
10	21.508	965	2.388	3.353	1.207	2.146	45.270	1.094	10
11	21.400	960	2.376	3.336	1.231	2.105	48.068	1.089	10
12	21.293	956	2.364	3.320	1.256	2.064	51.039	1.083	10
13	21.187	951	2.352	3.303	1.281	2.022	54.193	1.078	10
14	21.081	946	2.340	3.286	1.307	1.980	57.542	1.073	10
15	20.976	941	2.328	3.270	1.333	1.937	61.095	1.067	10

**Hinweis:**  
Der Zinssatz wird so eingestellt, dass die PV-Investition nach 20 Jahren den gleichen Kontostand ergibt wie die Geldanlage bei der Bank.  
In diesem Fall gibt der Zinssatz die Rendite der PV-Investition an.  
Der passende Zinssatz kann von Hand durchprobiert werden oder per Makro mit der Tastenkombination **STRG + r** (Rendite) automatisch bestimmt werden.

**Bild 7:** Screenshot vom Einstieg in die Tabellenkalkulation von Mertens (2020) zur Berechnung der Objektrendite von PV-Anlagen. Die Tabelle wurde erheblich weiterentwickelt, um die hier dargestellten Abhängigkeiten berechnen zu können.

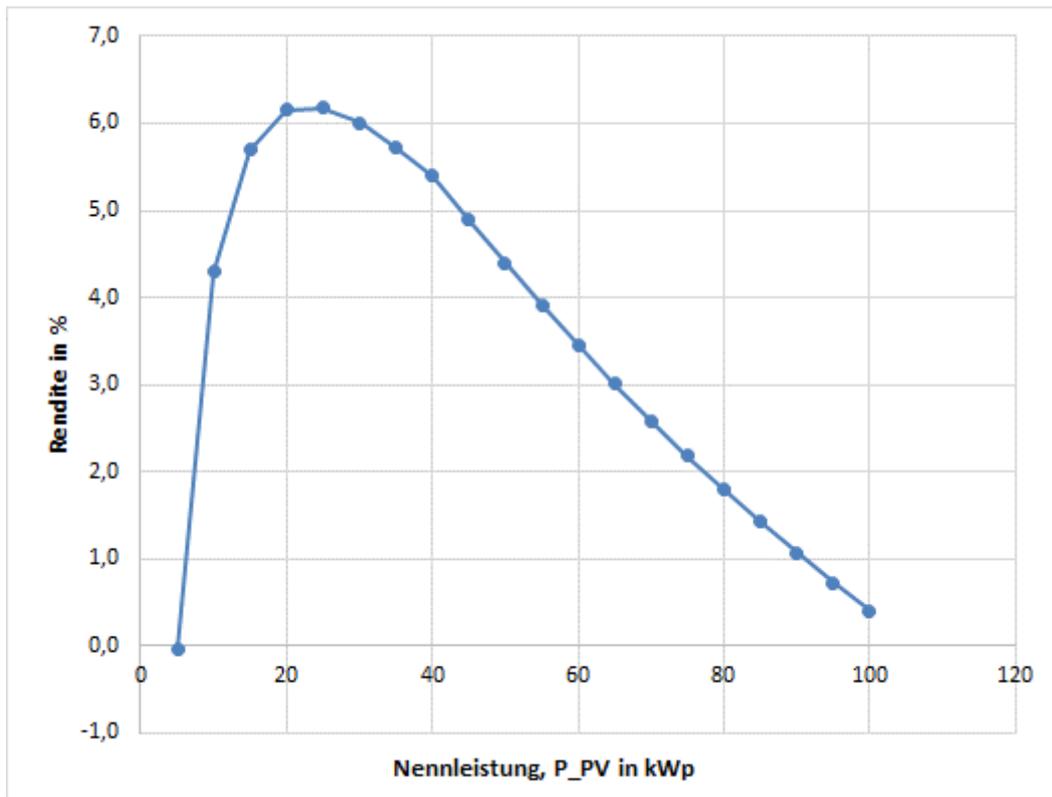
Die **Dachmiete** kann rechts eingegeben werden. Eine negative Dachmiete ist eine volle oder teilweise **Mietzahlung** des Nutzers für die PV-Anlage.

Der **Zinssatz** wird im Tool so eingestellt, dass die PV-Investition nach 20 Jahren den gleichen Kontostand ergibt wie die Geldanlage bei der Bank. In diesem Fall gibt der Zinssatz die **Rendite** der PV-Investition an. Der passende Zinssatz kann von Hand durchprobiert werden oder per Makro mit der Tastenkombination **STRG + r (Rendite)** automatisch bestimmt werden.

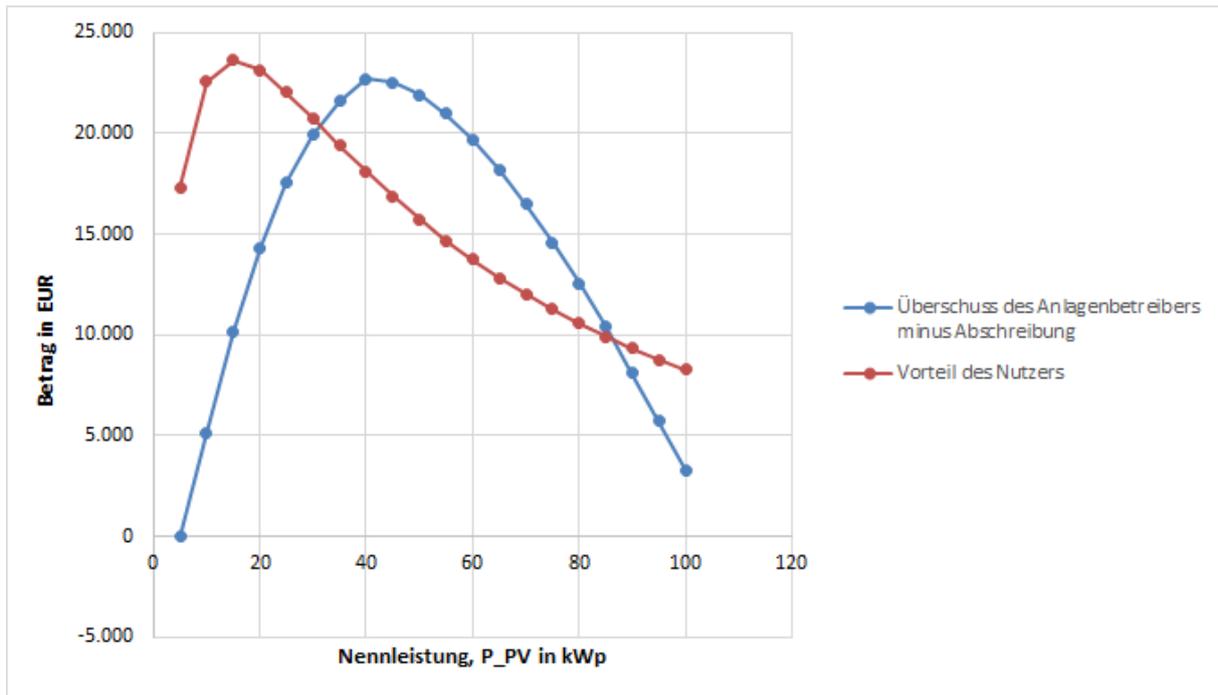
Eine Erweiterung des Tools dient zur **Optimierung der PV-Anlage** nach Bild 8. Es können 20 Anlagengrößen vorbestimmt werden. Diese 20 Berechnungen können per Makro mit der Tastenkombination **STRG + s (sweep)** automatisch ausgeführt werden. Es werden dadurch die Werte in der Spalte E und G bis Q berechnet. Die Werte der Spalten E, Q und R werden geplottet.

Bestimmung der optimalen Größe der PV-Anlage										Anlagenbetreiber										Nutzer		
Nummer der Berechnung	PV-Leistung [kWp]	Eigenertrag [%]	Autarkie [%]	Rendite [%]	K <sub>0</sub> [Euro]	Jahresertrag [kWh]	Einnahmen EEG [Euro]	Einnahmen EV [Euro]	Einnahmen [Euro]	Betriebskosten [Euro]	Überschuss [Euro]	Kontostand [Euro]	Geldanlage [Euro]	Ersparnis EV [Euro]	Dachmiete [Euro]	Vorteil Nutzer [Euro]	Überschuss - K <sub>0</sub> [Euro]					
1	5	77,3	20,5	-2,47	5931	85.851	1.600	8.142	9.742	5.102	4.639	3.598	3.598	26.028	200	25.228	-1.292					
2	10	63,0	33,3	4,83	10993	171.701	5.215	21.622	26.836	9.962	16.874	28.223	28.223	32.432	200	32.632	5.881					
3	15	53,1	42,2	7,28	15772	267.552	9.457	34.634	44.091	14.821	29.269	64.312	64.312	33.779	200	33.979	13.488					
4	20	45,9	48,6	8,26	20375	343.402	14.200	46.055	60.255	19.681	40.574	99.674	99.674	32.835	200	33.035	20.198					
5	25	40,5	53,6	8,58	24853	429.253	19.265	55.847	75.112	24.540	50.572	128.846	128.846	31.026	200	31.226	25.718					
6	30	36,2	57,4	8,56	29233	515.103	24.550	64.219	88.768	29.400	59.369	151.011	151.011	28.938	200	29.138	30.136					
7	35	32,7	60,6	8,36	33533	600.954	29.990	71.408	101.398	34.259	67.138	167.118	167.118	26.825	200	27.025	33.605					
8	40	29,8	63,2	8,07	37766	686.805	35.545	77.622	113.167	38.119	74.049	178.486	178.486	24.796	200	24.996	36.283					
9	45	27,4	65,3	7,60	41941	772.655	40.377	83.034	123.412	43.978	79.434	181.548	181.548	22.894	200	23.094	37.493					
10	50	25,4	67,2	7,12	46065	858.506	45.232	87.782	133.014	48.838	84.176	182.302	182.302	21.133	200	21.333	38.111					
11	55	23,6	68,8	6,64	50145	944.358	50.103	91.976	142.080	53.697	88.383	181.507	181.507	19.510	200	19.710	38.238					
12	60	22,1	70,1	6,18	54183	1.030.207	54.989	95.706	150.694	58.557	92.138	179.687	179.687	18.019	200	18.219	37.954					
13	65	20,7	71,3	5,73	58185	1.116.057	59.886	99.041	158.927	63.416	95.511	177.204	177.204	16.648	200	16.848	37.326					
14	70	19,5	72,4	5,29	62154	1.201.908	64.793	102.041	166.833	68.276	98.558	174.305	174.305	15.387	200	15.587	36.404					
15	75	18,5	73,4	4,87	66091	1.287.759	69.707	104.752	174.458	73.135	101.324	171.163	171.163	14.226	200	14.426	35.233					
16	80	17,5	74,2	4,47	69989	1.373.609	74.628	107.214	181.842	77.985	103.848	167.894	167.894	13.154	200	13.354	33.848					
17	85	16,7	75,0	4,09	73881	1.459.460	79.555	109.459	189.014	82.854	106.160	164.578	164.578	12.162	200	12.362	32.279					
18	90	15,9	75,7	3,72	77738	1.545.310	84.487	111.515	196.002	87.714	108.288	161.270	161.270	11.243	200	11.443	30.550					
19	95	15,2	76,3	3,36	81571	1.631.161	89.423	113.404	202.826	92.573	110.253	158.007	158.007	10.390	200	10.590	28.682					
20	100	14,5	76,9	3,02	85382	1.717.011	94.362	115.145	209.507	97.432	112.075	154.811	154.811	9.595	200	9.795	26.692					

**Bild 8:** Screenshot der Erweiterung des Tools zur automatischen Berechnung mehrerer Anlagengrößen.



**Bild 9:** Objektrendite für den Anlagenbetreiber abhängig von der Nennleistung der PV-Anlage. Ein ausgeprägtes Optimum stellt sich nur ein, wenn der Nutzer bereit ist für eine größere Anlage und damit für mehr Autarkie (und größeren finanziellen Vorteil) einen höheren Strompreis für den Eigenverbrauch zu zahlen. Diese Darstellung basiert auf einem mit der Autarkie steigendem Strompreis für Eigenverbrauch ( $k_{EV,rel} = k_{autark} + 15\%$ ). Im Beispiel ist das ein Strompreis für Eigenverbrauch von 69 % des Strompreises des Energieversorgungsunternehmens bei einer Anlage mit 25kWp.



**Bild 10:** Die Zahlungsflüsse an den Anlagenbetreiber werden hier über 20 Jahre addiert aufgetragen (ohne Verzinsung und abzüglich der vollen Abschreibung). Dies wird verglichen mit den finanziellen Vorteilen des Nutzers ebenfalls addiert über 20 Jahre abhängig von der Größe der PV-Anlage. Eine PV-Anlage mit 25 kWp liefert in etwa gleiche Beträge für Betreiber und Nutzer. Diese Darstellung basiert auf einem mit der Autarkie steigendem Strompreis für Eigenverbrauch ( $k_{EV,rel} = k_{autark} + 15\%$ ).

## Literaturverzeichnis

MERTENS, Konrad, 2020. Photovoltaik – Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis.  
München: Hanser.

SAM, 2010. *Gewerblicher Eigenverbrauch von Solarstrom – Informationen für Anlagenplaner*.  
Verfügbar über:

<https://www.sma.de/partner/expertenwissen/gewerblicher-eigenverbrauch-von-solarstrom>

# Anhang A

## Auswertung der Kurven zum Eigenverbrauch aus Simulation/Messung, Gewerbe, G1

G1 ist ein reiner Tagesverbraucher mit  
 $K_{\text{abark,max}} = 1$

$k_{\text{wp}}$  MWh/a

EPV/EN      Keigen

20	20	1	<del>0,5</del> 50
10	20	0,5	72
40	20	2	32
80	20	4	20

200	50	4	20
100	50	2	32
50	50	1	52
25	50	0,5	73

400	100	4	20
200	100	2	34
100	100	1	52
50	100	0,5	75

400	200	2	35
200	200	1	52
100	200	0,5	75
50	200	0,25	85

500	500	1	53
250	500	0,5	76
100	500	0,2	86

500	1000	0,5	76
250	1000	0,25	86
100	1000	0,1	93

EPV/EN      Keigen

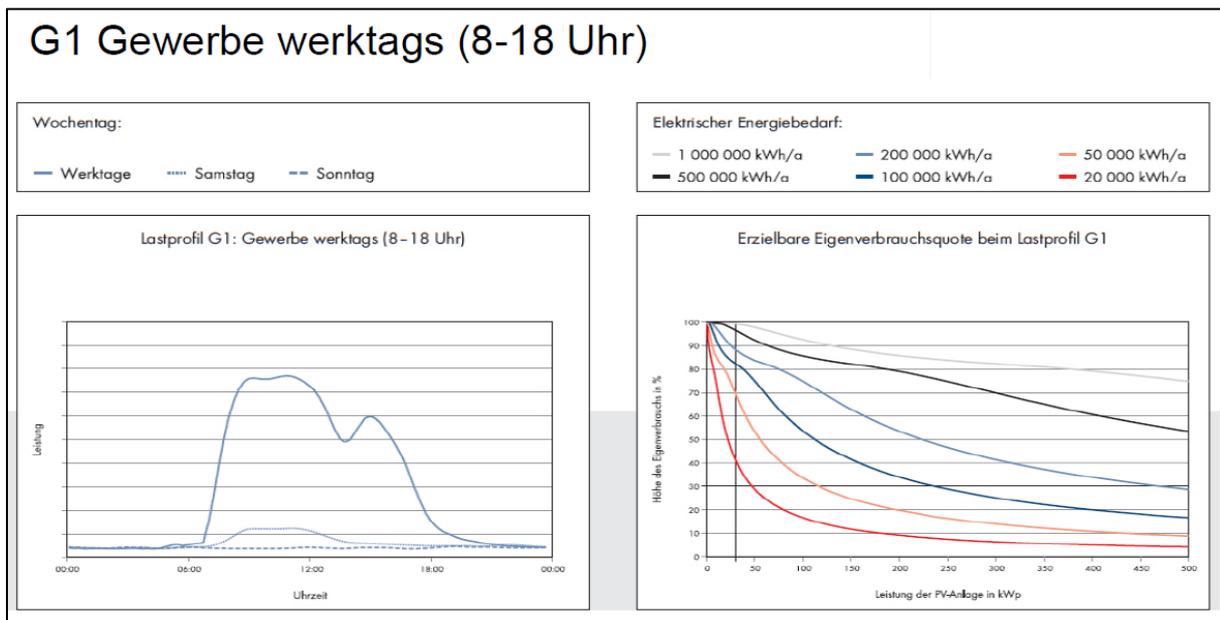
0,1	93
0,2	<del>85,5</del> 86

0,25	85,5	
0,5	72+73+75+75+76+76	$\Rightarrow$ 74,5
1,0	50+52+52+52+53	$\Rightarrow$ 51,8
2,0	32+32+34+35	$\Rightarrow$ 33,25
4,0	20+20+20	$\Rightarrow$ 20

Mittelwert

	Gewerbe werktags (8 - 18 Uhr)	Gewerbe überwiegend Abendstunden	Gewerbe durchlaufend	Gewerbe Ladenöffnungszeiten	Landwirtschaftsbetriebe mit Milchwirtschaft	Sonstige Landwirtschaftsbetriebe
	G1	G2	G3	G4	L1	L2
Charakteristisches Lastprofil						
Typischer Eigenverbrauchsanteil*	10 - 90 %	10 - 100 %	10 - 100 %	10 - 90 %	20 - 70 %	10 - 100 %
<small>* basierend auf in diesen Anwendungen typischem elektrischem Energiebedarf und möglicher Photovoltaik-Leistung auf Gebäuden</small>	<b>Bürogebäude:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bildung</li> <li>• Kantinen</li> <li>• Krankenhäuser</li> <li>• Verwaltungen</li> <li>• Behörden</li> <li>• Banken</li> <li>• Dienstleister</li> <li>• Praxen etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hotels</li> <li>• Restaurants</li> <li>• Cafes</li> <li>• Tankstellen</li> <li>• Kultur, Sport, Freizeitbetriebe</li> <li>• beleuchtungsorientierter Stromverbrauch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Läden mit starker Kühlung</li> <li>• Kälteanlagen</li> <li>• Zwangsbelüftung</li> <li>• Parkhäuser</li> <li>• IT-Infrastruktur</li> <li>• Kläranlagen etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ladengeschäfte</li> <li>• Kaufhäuser</li> <li>• Möbelhäuser</li> <li>• Annahmestellen</li> <li>• Reinigung etc.</li> </ul>	Milchviehbetriebe (Stromverbrauch durch zweimaliges Melken und anschließendes Herunterkühlen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Landwirtschaftliche Betriebe mit Produktion und Haushalt</li> <li>• Schweinemast etc.</li> </ul>

**Bild A.2:** Verschiedene charakteristische Lastprofile im Vergleich nach Standardlastprofil des BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft). Gewerbe, G1 ist auch für Kindergärten geeignet. (SMA 2010)



**Bild A.3:** Der linke Teil des Bildes zeigt den charakteristischen Lastprofil für ein Gewerbe, G1 (vergrößert von Bild A.2). Aus dem rechten Teil des Bildes wurden Werte abgelesen und in Anhang A in einer Tabelle dargestellt. Im Bild wird der Eigenverbrauch über der absoluten Leistung der PV-Anlage aufgetragen. Bei Annahme von 1000 kWh/a entspricht das einer gelieferten Energie. Die Übereinstimmung der Messwerte mit einer Eigenverbrauchskurve für maximal 100 % Autarkie (vollständiger Tagesverbraucher) ist erstaunlich gut. Durch die relative Darstellung der Energie der PV-Anlage (Verhältnisse aus Erzeugung zu Verbrauch) konnten die sechs Linien (ebenfalls mit guter Genauigkeit) als eine Linie dargestellt werden (Bild 1). (SMA 2010)

## Anhang B

### Entstehung der "Annahme" einer Gleichung für Keigen

Erste Annahme:

$$\text{Keigen} = \frac{1}{e^{ke \cdot x}} = \gamma \quad x = \frac{EPV}{EN}$$

$$\text{Kautark} = \frac{EN, PV}{EN} = \frac{EPV, N}{EN} = \frac{EPV, N}{EPV} \cdot x$$

$$EN = \frac{EPV}{x} \quad \xrightarrow{\quad \quad \quad \uparrow}$$

$$\text{Kautark} = \text{Keigen} \cdot x = \frac{x}{e^{ke \cdot x}}$$

Kautark für  $x \rightarrow \infty$     Kautark  $\rightarrow 0$      $\downarrow$

Dies führt auf einen Widerspruch.

Grund:  $e^{ke \cdot x}$  wächst mit  $x$  schneller als  $x$ .

Idee oder Anforderungen:

(a)  $\Rightarrow$  Kautark muß für  $x \rightarrow \infty$  ein konstanter Wert sein:  $\text{Kautark}_{\max}$

(b)  $\Rightarrow$  Keigen ( $x=0$ )  $\stackrel{\Delta}{=} 1.0$

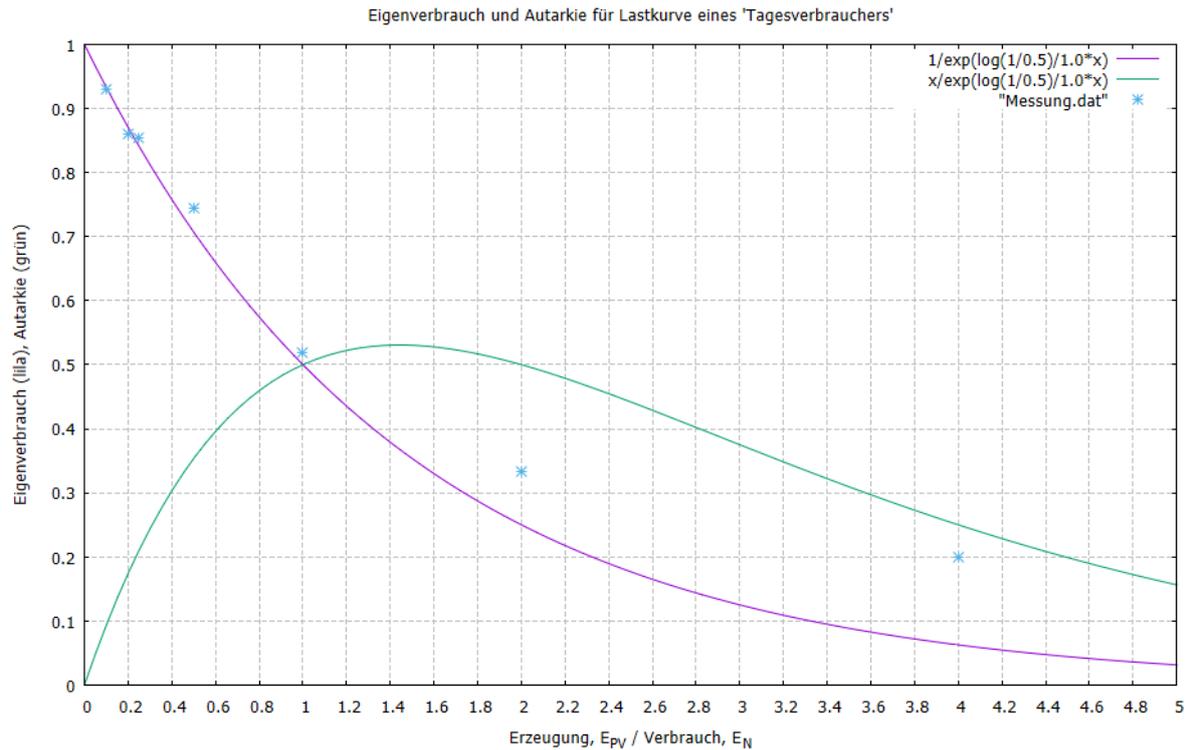
(c)  $\Rightarrow$  Keigen ( $x \rightarrow \infty$ )  $\stackrel{\Delta}{=} 0.0$ , asymptotisch gegen 0.0

Idee: Hyperbel:  $1/x$  wegen (c)

(b): Die Hyperbel muß in  $x$ -Richtung verschoben werden  $1 = \frac{1}{x+a}$  für  $x=0$

(a): Es wird ein weiterer Parameter eingefügt:  $\Rightarrow a=1$   
 $\text{Kautark} = \frac{x \cdot b}{x+a} = \frac{b}{1+a/x}$  für  $x \rightarrow \infty$   $\frac{b}{1} = \text{Kautark}$

$b = \text{Kautark}_{\max}$ . Wegen (b):  $a = \text{Kautark}_{\max}$



**Bild A.1:** Die e-Funktion kann zwar grundsätzlich den Eigenverbrauch (oder auch die Autarkie) beschreiben, jedoch misslingt dann die Umrechnung (per Definition) in die jeweils andere Größe. Die Autarkie darf nicht (wie hier fälschlich berechnet) für große Verhältnisse aus Erzeugung zu Verbrauch gegen Null gehen. Die e-Funktion passt auch nicht so gut zu den Messwerten, wie es bei der Hyperbelfunktion der Fall ist (Bild 1). Die Hyperbelfunktion wurde daher für die Berechnungen gewählt.

### 10.2.2.1 Eingangsgrößen

Die Eingangsgrößen jeder Wirtschaftlichkeitsberechnung sind die Investitionskosten  $K_0$  zum Bau der Photovoltaikanlage, die jährlichen Betriebskosten  $K_{\text{Betrieb}}$  und die erwarteten jährlichen Einnahmen  $K_{\text{Ein}}$ . Bei den Investitionskosten und allen anderen Beträgen verwendet man jeweils die Nettowerte, da die Umsatzsteuer nur ein durchlaufender Posten ist, der im Folgejahr mit dem Finanzamt verrechnet wird.

Für die jährlichen Betriebskosten gilt Folgendes:

Die jährlichen Betriebskosten (inklusive Wartungskosten) werden typischerweise zu 1,5 % der Investitionskosten einer Photovoltaikanlage angesetzt.

Die Betriebskosten umfassen Ausgaben für Versicherungen, Zählermiete, Stromkosten eines Datenloggers etc. Außerdem muss im Laufe der Lebensdauer einer Anlage mit Defekten insbesondere des Wechselrichters gerechnet werden. Die kalkulierten Betriebskosten sind somit auch als Rücklage für Reparaturen zu sehen und sollten keinesfalls niedriger als oben beschrieben für die Wirtschaftlichkeitsberechnung angesetzt werden.

Die jährlichen Einnahmen hängen von der Höhe der Einspeisevergütung  $k_{\text{EEG}}$  und dem erzielten Jahresenergieertrag  $W_{\text{Jahr}}$  ab:

$$K_{\text{Ein}} = k_{\text{EEG}} \cdot W_{\text{Jahr}} \quad (10.6)$$

### 10.2.2.2 Amortisationszeit

Das einfachste Rechenmodell ist die Betrachtung der Amortisationszeit. Damit meint man die Zeit, die vergeht, bis man das eingesetzte Kapital wieder eingenommen hat. In den Jahren danach liegt man somit in der Gewinnzone. Die Amortisationszeit  $T_{\text{Amortisation}}$  erhält man durch Division der Investitionssumme  $K_0$  durch den jährlichen Überschuss  $K_{\text{Überschuss}}$ ; darunter versteht man die Differenz aus jährlichen Einnahmen und Betriebskosten:

$$T_{\text{Amortisation}} = \frac{K_0}{K_{\text{Ein}} - K_{\text{Betrieb}}} = \frac{K_0}{K_{\text{Überschuss}}} \quad (10.7)$$

#### Beispiel 10.3 Amortisationszeit einer 5 kW-Anlage

Susi Sonnig kauft eine 5 kW-Anlage zum Preis von 7000 Euro. Sie kalkuliert relativ vorsichtig mit einem spezifischen Ertrag  $w_{\text{Jahr}}$  von 850 kWh/(kWp·a). Als Einspeisevergütung erhält sie 12 Cent/kWh.

Die jährlichen Einnahmen ergeben sich zu:

$$K_{\text{Ein}} = w_{\text{Jahr}} \cdot P_{\text{STC}} \cdot k_{\text{EEG}} = \frac{850 \text{ kWh}}{\text{kWp} \cdot \text{a}} \cdot 5 \text{ kWp} \cdot 12 \text{ ct/kWh} = 510 \text{ Euro/a}$$

Sie führen mit den Betriebskosten von 105 Euro zu einem jährlichen Überschuss von 405 Euro. Somit ergibt sich für die Amortisationszeit:

$$T_{\text{Amortisation}} = \frac{K_0}{K_{\text{Überschuss}}} = \frac{7000 \text{ Euro}}{405 \text{ Euro/a}} = 17,3 \text{ a}$$



Rechnet man das obige Beispiel mit einem jährlichen spezifischen Ertrag von 900 kWh/kWp so ergibt sich eine günstigere Amortisationszeit von 16,1 Jahren. Bei einer Laufzeit der Einspeisevergütung von 20 Jahren verbleiben Frau Sonnig somit nur noch 4 Jahre, um Gewinne zu erwirtschaften.

### 10.2.2.3 Objektrendite

Die Amortisationszeit ist zwar ein sehr anschauliches Maß, berücksichtigt aber nicht die Verzinsung des eingesetzten Kapitals. Für Frau Sonnig sind die 510 Euro, die sie nach dem ersten Jahr bekommt, gewissermaßen wertvoller als die aus dem zweiten Jahr, da sie das Geld bei der Bank wieder anlegen kann und Zinsen daraus erhält.

Zur Veranschaulichung stellen wir uns zwei Investoren vor: Karl Cash und Susi Sonnig. Herr Cash hat 7000 Euro zur Verfügung, die er bei seiner Bank zu einem festen Zinssatz  $p$  über 20 Jahre anlegt. Am Ende jedes Jahres erhält er Zinsen, die gleich wieder mit angelegt werden. Mit der Zinseszinsformel lässt sich nun ausrechnen, wieviel Geld  $K_n$  er nach den  $n$  Jahren auf seinem Konto hat:

$$K_n = K_0 \cdot (1 + p)^n = K_0 \cdot q^n \quad (10.8)$$

mit  $q$ : Zinsfaktor:  $q = 1 + p$

Nehmen wir z. B. einen Zinssatz von 3 % an, so besitzt Herr Cash nach 20 Jahren eine Summe von:

$$K_{20} = K_0 \cdot (1 + p)^{20} = 7000 \text{ Euro} \cdot 1,03^{20} = 12.643 \text{ Euro} \quad (10.9)$$

Frau Sonnig hat ebenfalls 7000 Euro zur Verfügung und investiert das Geld in eine Photovoltaikanlage. Sie erhält jedes Jahr Einnahmen aus der Stromeinspeisung und legt dieses Geld unter Abzug der Betriebskosten ebenfalls zu dem Zinssatz  $p$  bei der Bank an. Auch hier lässt sich ausrechnen, wie viel Geld sie nach 20 Jahren erwirtschaftet hat:

$$K_{20} = K_{\text{Überschuss}} \cdot (q^{19} + q^{18} + q^{17} + \dots + q^1 + q^0) \quad (10.10)$$

Die Summe in obiger Formel lässt sich mithilfe der aus der Mathematik bekannten geometrischen Reihe vereinfachen, so dass wir schließlich die sogenannte Sparkassenformel erhalten:

$$K_{20} = K_{\text{Überschuss}} \cdot \frac{q^{20} - 1}{q - 1} \quad (10.11)$$

Nehmen wir für Frau Sonnigs Anlage wieder einen jährlichen Überschuss von 405 Euro an, so addieren sich ihre Einnahmen am Ende der 20 Jahre auf:

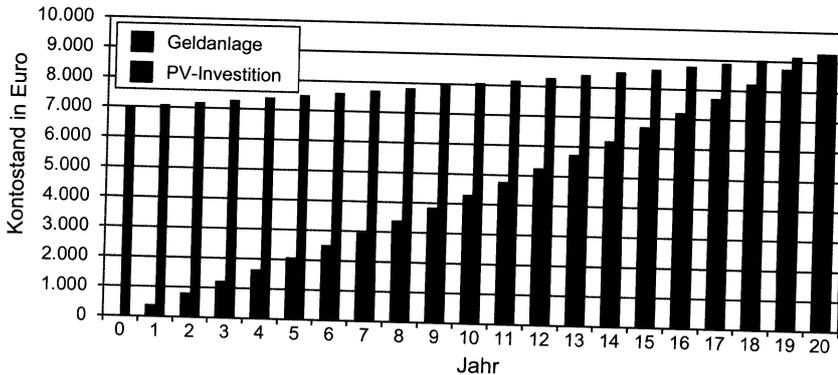
$$K_{20} = 405 \text{ Euro} \cdot \frac{1,03^{20} - 1}{1,03 - 1} = 10.883 \text{ Euro} \quad (10.12)$$

Frau Sonnig hat in den 20 Jahren also weniger Geld als Herr Cash verdient.

Die Objektrendite ist der Zinssatz, den man in die Gleichungen (10.8) und (10.11) einsetzen muss, damit sich in beiden Fällen der gleiche Geldbetrag ergibt. Mit anderen Worten:

Wir vergleichen die Investition in eine Photovoltaikanlage mit der Geldanlage bei einer Bank und definieren den passenden Zinssatz, der uns auf den gleichen Endbetrag kommen lässt, als Objektrendite der Photovoltaikinvestition.

Führen wir diesen Vergleich für die Anlage von Frau Sonnig durch, so kommen wir auf eine Objektrendite von 1,4 %. In Bild 10.8 sind für diesen Fall die Kapitalentwicklungen von Karl Cash und Susi Sonnig gegenübergestellt. Nach 20 Jahren besitzen beide ca. 9.300 Euro.



**Bild 10.8** Veranschaulichung der Objektrendite: Die Investition in eine Photovoltaikanlage wird mit einer Geldanlage verglichen, bei der ein Betrag mit Zinseszins über 20 Jahre angelegt wird (nach [Kre06])

Die im Beispiel angegebene Rendite von 1,4 % ist recht niedrig.

Im EEG orientierte man sich ursprünglich an den aktuellen Preisen von Photovoltaikanlagen und ging bei der Festlegung der Vergütungssätze von einer Rendite von 7,4 % aus. Derartige Renditen sind heute allenfalls noch bei einer hohen Eigenverbrauchsquote zu erreichen (siehe Abschnitt 10.2.2.4).



Ein Installateur hat mir erzählt, dass man mit einer Photovoltaikanlage auf eine Eigenkapitalrendite von über 10 % kommen kann. Was meint er damit? Steht das nicht im Widerspruch zu den oben genannten Renditen?



Der Begriff Eigenkapitalrendite bezieht den Gewinn einer Anlage auf das eingesetzte Eigenkapital. Nehmen wir einmal an, Frau Sonnig hat einen Topstandort in Süddeutschland und erreicht so eine Objektrendite von 5 %. Zur Finanzierung nimmt sie 6000 Euro bei einer Bank zu einem Zinssatz von 3 % auf, die restlichen 1000 Euro zahlt sie aus Eigenmitteln. Mit den geliehenen 6000 Euro erreicht sie eine Rendite von etwa 2 %. Die Eigenkapitalrendite bezieht nun diesen Gewinn auf die 1000 Euro an Eigenkapital und erreicht so z. B. einen Wert von 12 %.

Die Ergebnisse der vorstehenden Rechnung hängen sehr stark von den Annahmen ab. Würde Frau Sonnig die gesamte Investitionssumme als Kredit aufnehmen, stiege die Eigenkapitalrendite ins Unendliche. Das zeigt, dass diese Eigenkapitalrendite keine sinnvolle Maßzahl ist, auf deren Grundlage man eine Investitionsentscheidung treffen kann.

### 10.2.2.4 Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms

Wie bereits in Abschnitt 8.3 beschrieben, kann die Rendite einer Photovoltaikanlage erhöht werden, indem ein möglichst großer Anteil des produzierten Stroms selbst verbraucht wird. Falls Susi Sonnig mit ihrer Familie einen üblichen Strombedarf von 4500 kWh pro Jahr hat, so kann sie von einem Eigenverbrauchsanteil  $a_{\text{Eigen}}$  von rund 30 % ausgehen [Rot12]. Den Preis für aus dem Netz bezogenen Strom nehmen wir zu  $k_{\text{Bezug}} = 28 \text{ ct/kWh}$  an. Damit kann die Rechnung aus Beispiel 10.3 nun modifiziert werden:

#### Beispiel 10.4 Amortisationszeit einer 5 kW-Anlage mit 30 % Eigenverbrauch

Wir bilden zunächst eine „mittlere Vergütung“  $k_{\text{Mittel}}$  aus den beiden Stromanteilen:

$$\begin{aligned} k_{\text{Mittel}} &= a_{\text{Eigen}} \cdot k_{\text{Bezug}} + (1 - a_{\text{Eigen}}) \cdot k_{\text{EEG}} = 0,3 \cdot 28 \text{ ct/kWh} + 0,7 \cdot 12 \text{ ct/kWh} \\ &= 16,8 \text{ ct/kWh} \end{aligned}$$

Rechnet man Beispiel 10.3 mit dieser Vergütungshöhe, so reduziert sich die Amortisationszeit durch den Eigenverbrauch von 17,3 auf 9,6 Jahre. Die Rendite erhöht sich von 1,4 % auf 6 %.



Mit weiter fallenden Einspeisevergütungen und gleichzeitig steigenden Strombezugspreisen spielt der Solarstrom-Eigenverbrauch eine immer größere Rolle für die Rentabilität einer Photovoltaikanlage.

### 10.2.2.5 Weitere Einflussgrößen

Die obige Rechnung lässt sich noch beliebig verfeinern. So kann man z. B. die allgemeine Preissteigerung in die Betriebskosten einrechnen, indem man sie jährlich um knapp 2 % ansteigend annimmt.

Außerdem stellt sich die Frage, ob die Module auch in 20 Jahren noch ihre volle Leistung abgeben. Die Modulhersteller geben meist eine Leistungsgarantie von 90 % innerhalb der ersten 10 Betriebsjahre und von 80 % der Modulnennleistung innerhalb von 20 Jahren. Somit kann man zur Vorsicht eine jährliche Leistungsdegradation von 1 % in die erwartete Vergütung einrechnen. Andererseits zeigen bisherige Erfahrungen mit c-Si-Standardmodulen, dass die Degradation eher bei 0,5 % pro Jahr liegt, so dass dieser Wert ausreichen sollte.

Zuletzt soll nicht vergessen werden, dass eine Photovoltaikanlage nach 20 Jahren nicht wertlos ist. Die Komponenten können noch viele Jahre ihren Dienst tun. Wenn die Anlage weiterhin am Netz bleibt, kann sie die eigenen Strombezugskosten reduzieren. Außerdem ist nicht ausgeschlossen, dass auch nach 20 Jahren noch eine gewisse Vergütung gezahlt wird, da dies volkswirtschaftlich immer noch günstiger sein sollte, als z. B. neue Kohlekraftwerke zu bauen. Unter [www.lehrbuch-photovoltaik.de](http://www.lehrbuch-photovoltaik.de) ist ein Excel-Programm als Download verfügbar, mit dem einfache Renditeberechnungen nachvollziehbar durchgeführt werden können.