

Kriterien zur Auslegung von photovoltaischen Hybridsystemen mit Kraftwärmekopplung zur autarken Versorgung privater Haushalte

Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Klaus Brinkmann



Lehrgebiet Elektrische Energietechnik
Feithstraße 140, Philipp-Reis-Gebäude, D-58084 Hagen, fax: +49/2331/987 357,
e-mail: klaus.brinkmann@fernuni-hagen.de

Einleitung: Photovoltaische Systeme, die über einen weiteren elektrischen Energieerzeuger verfügen, stellen ein Hybridsystem dar. Wird außer einer Stromversorgung ebenfalls eine Deckung des Wärmebedarfs gewünscht, so bietet sich eine Kraft-Wärme-Kopplung als sinnvolle Ergänzung an, wenn sich die Versorgung am Wärmebedarf ausrichten läßt. Mit dem Ziel letztlich eine Energieversorgung aufzubauen, daß sich vollends auf regenerative Quellen stützt, sollte konsequenterweise die Kraftwärmekopplung mit nachwachsenden oder regenerativ erzeugten Rohstoffen betrieben werden. Ziel dieser Präsentation ist es, die Dimensionierungsgrundlagen und Auslegungskriterien für ein derartiges Hybridsystem herzuleiten, welches dafür bestimmt ist, einen *durchschnittlichen privaten Haushalt* in Deutschland netzunabhängig sowohl mit Strom, als auch mit Wärme zu versorgen. Zu diesem Zweck muß das Verbrauchsverhalten privater Haushalte mit dem täglichen Sonnenenergie-Angebot korreliert werden. Daraus läßt sich ein Bestimmungskriterium zur gegenseitigen Abstimmung der PV-Anlage und der KWK-Anlage gewinnen, so daß die Korrelation beider Energiewandler eine lückenlose Energieversorgung privater Haushalte ermöglicht /3/. Die Grundlagen für eine Dimensionierung wurden in einer Form ausgearbeitet, die es erlaubt, Simulationsprogramme für die Planung derartiger Systeme zu nutzen /2/. Als konkretes Ergebnis dieser Überlegungen wird eine beispielhafte Auslegung und Dimensionierung eines photovoltaischen Hybridsystems mit Kraft-Wärme-Kopplung für private Haushalte präsentiert. Dabei wird ebenfalls deutlich, daß das bei Einsatz einer PV-Anlage verbleibende Kraft-Wärme-Verhältnis für eine KWK-Anlage auch den Einsatz einer Dampfkolbenmaschine erlaubt/1/.

Stromverbrauch: Für den durchschnittlichen deutschen Privathaushalt mit 2,2 Personen und 80 m² Wohnfläche läßt sich ein Jahresstromverbrauch von 3146 kWh/a feststellen, wobei etwa zwei Drittel davon, also 2000 kWh als Grundbedarf angesehen werden /3/. Der saisonale Stromverbrauch zeigt höhere Verbrauchswerte in der kalten Jahreszeit als im Sommer.

Dieser jahreszeitlichen Schwankung wird noch ein Wochentag-Einfluß überlagert. Hierbei zeigen sich wiederkehrend höhere Werte an den Samstagen, wobei dieser Mehrverbrauch ebenfalls im Winter stärker ausgeprägt ist. Die Jahresganglinie für den durchschnittlichen Haushalt kann mit hinreichender Genauigkeit durch eine Ausgleichskurve charakterisiert werden in der Form:

$$\bar{P}_{d,Strom} = \left\{ 8,6 + 1,6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d\right) \right\} \left[\frac{kWh}{d} \right] \quad \text{mit} \quad d \equiv \text{Tag} \quad (1)$$

Vergleichende eigene Messungen zugrundelegend, läßt sich mit Hilfe dieser "Master-Kurve" ein vom Durchschnitt abweichender Haushalt ebenfalls recht gut approximieren. Dies ist durch eine einfache Skalierung möglich:

$$P_{d,Strom} = z \cdot \bar{P}_{d,Strom} \quad \text{mit} \quad z = \frac{\text{Jahresverbrauch Haushalt}}{3146 \text{ kWh/a}} \quad (2)$$

Der Skalierungsfaktor für einen ausgewählten Haushalt ergibt sich aus dem Verhältnis des Gesamtenergieverbrauchs eines Jahres zum Durchschnittswert. Für durchschnittliche Haushalte beträgt der Mittelwert für den täglichen Stromverbrauch einer typischen **Sommerwoche 7,439 kWh** und für eine typische **Winterwoche 10,123 kWh**. Die Werte für allgemeine Haushalte können auch hier durch Multiplikation mit dem Skalierungsfaktor z erhalten werden. Messungen mit einer 5-Minuten-Auflösung an einem freistehenden Einfamilienhaus mit einer fünfköpfigen Familie in der Eifel ($z \approx 1,82$) haben zum Beispiel in einer Dezemberwoche folgende Ergebnisse erbracht:

kW	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10
%	84	10,9	3,28	1,98	0,54	<0,15	<0,05	<0,05	-	-

Tabelle 1: Klassenaufteilung des Leistungsbedarfs eines Haushalts

Wärmeverbrauch: Ausgehend vom Jahres-Endenergieverbrauch deutscher Haushalte von 1995 lassen sich für weitere Abschätzungen folgende Verhältnisse festhalten:

$$\frac{\text{Strom}}{\text{Heizung}} \approx 0,11 \quad \text{sowie} \quad \frac{\text{Strom}}{\text{Prozeßwärme}} \approx 0,56. \quad (3)$$

Für den jahreszeitlichen Verlauf des Wärme-Energiebedarfs ergibt sich approximativ:

$$\bar{P}_{d,Wärme} = \left\{ 15,4 + 78,36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0,232\right) \right) \right\} \left[\frac{kWh}{d} \right] \quad \text{mit} \quad d \equiv \text{Tag} \quad (4)$$

Bildlich dargestellt kann man dann folgenden Lastgang für die Wärme erkennen:

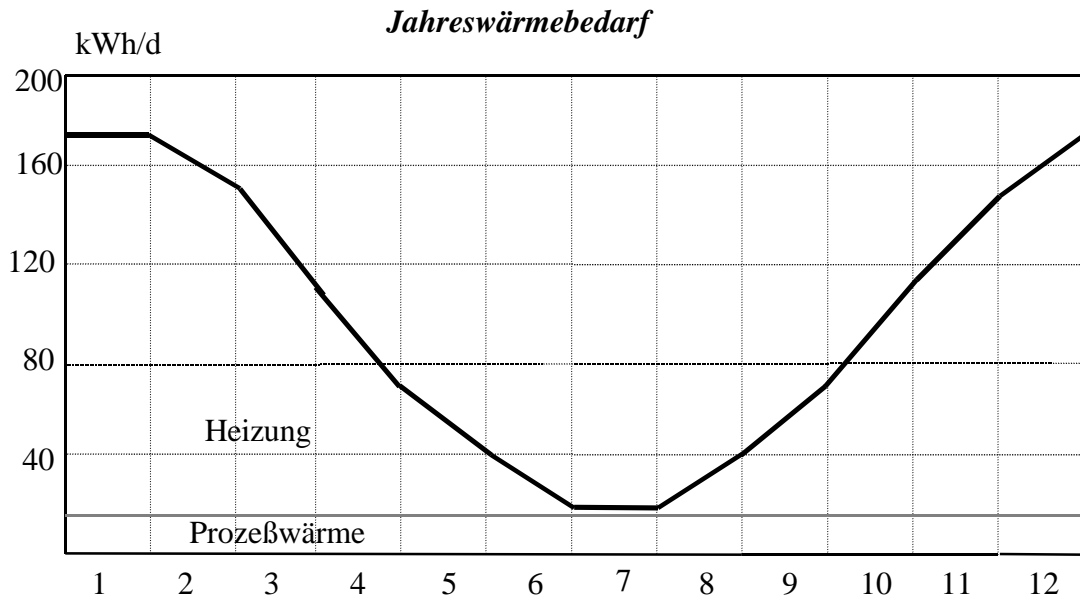


Abb. 1 Täglicher Wärmeverbrauch eines Durchschnittshaushaltes

Korrelation des Strom-Wärme-Verbrauchs: Der jahreszeitliche Verlauf des Strom-Wärme-Verhältnisses kann mit Hilfe der vorgestellten Näherungsformeln für einen allgemeinen Haushalt approximativ angegeben werden:

$$s_d = \frac{z \cdot \overline{P}_{d,Strom}}{z \cdot \overline{P}_{d,Wärme}} = \frac{8,6 + 1,6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d\right)}{15,4 + 78,36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0,232\right)\right)} \quad (5)$$

Daraus ergibt sich näherungsweise der folgende Verlauf für die Jahresganglinie:

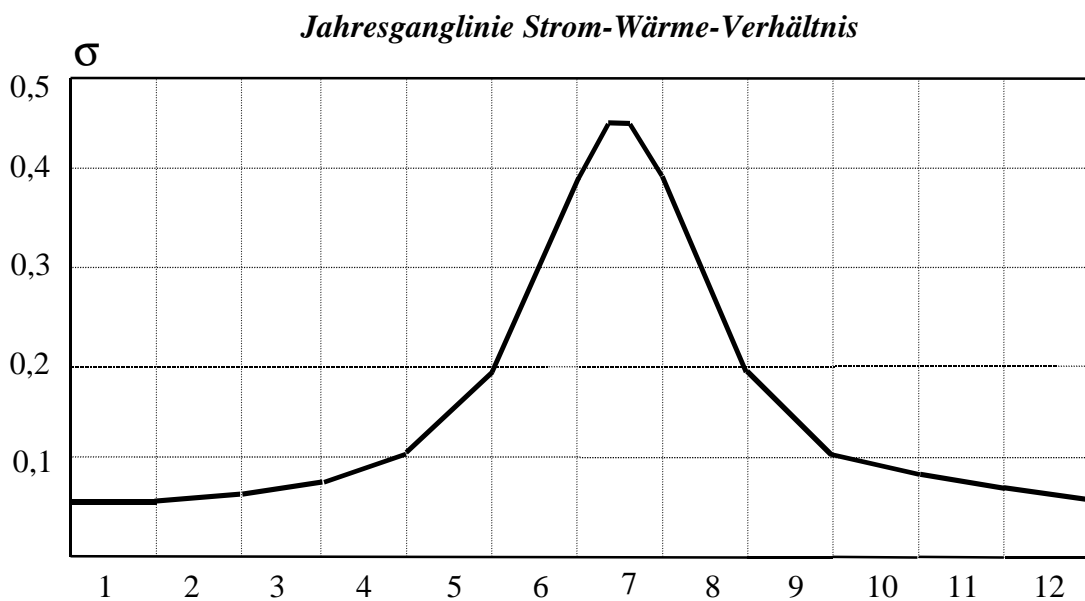


Abb. 2 Tägliches Strom-Wärme-Verhältnis eines Haushaltes

Dimensionierung eines photovoltaischen Hybridsystems: Übernimmt nun die PV-Anlage einen Teil der Stromversorgung eines Haushalts, so ergibt sich für den Betrieb der KWK-Anlage ein verbleibendes Strom-Wärme-Verhältnis von $\sigma_{d,PV}$:

$$\sigma_{d,PV} = \frac{8,6 + 1,6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d\right) - \bar{P}_{d,PV} [kWh/d]}{15,4 + 78,36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0,232\right)\right)} \quad (6)$$

Dieses verbleibende Verhältnis ergibt sich also als Differenz des durch den Verbrauch bedingten Strom-Wärme-Verhältnisses und dem Verhältnis des Stromanteils von der PV-Anlage zum Wärmebedarf. Mit Rücksicht auf das mögliche Strom-Wärme-Verhältnis der KWK-Anlage muß dieses verbleibende Verhältnis unterhalb eines Grenzwertes u bleiben. Allgemein formuliert bedeutet das für den im Mittel täglich mindestens aufzubringenden Energieertrag der PV-Anlage für einen durchschnittlichen privaten Haushalt in [kWh/d]:

$$\bar{P}_{d,PV} \geq 8,6 + 1,6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d\right) - u \cdot \left\{15,4 + 78,36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0,232\right)\right)\right\} \quad (7)$$

Diese Bedingung stellt sozusagen die untere Grenze für die Größe der PV-Anlage dar, in Abhängigkeit von u und somit auch vom elektrischen Wirkungsgrad der KWK-Anlage.

Zur Abschätzung unabhängig von individuellen Aufstellungsbedingungen sei eine $1kW_{ref}$ -PV-Anlage definiert. Für diese gilt näherungsweise im zeitlichen Mittel die folgende *Anlagen-*

Zuordnung $1kWp \cong \frac{1kW_{ref}}{PR}$, $PR \equiv$ Performance-Ratio. Den Jahresverlauf des Energieertrags

einer $1kW_{ref}$ -Anlage kann man wie folgt approximieren:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{d,PV}(1kW_{ref}) &\cong \sum_{i=0}^6 a_i \cdot d^i \quad \text{mit } a_0 = 6,347505E-01, a_1 = 3,7224486E-03 \\ & \quad a_2 = 1,818859E-04, a_3 = 2,818560E-06 \\ & \quad a_4 = -3,168738E-08, a_5 = 9,383729E-11, a_6 = -8,807513E-14 \end{aligned} \quad (8)$$

Wähle das kleinste mögliche $x \in R$, so daß die Gleichheit in der Bedingung

$$x \cdot \sum_{i=0}^6 a_i \cdot d^i \geq 8,6 + 1,6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d\right) - u \cdot \left\{15,4 + 78,36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0,232\right)\right)\right\} \quad (9)$$

mit $d \in [0, 365]$, $x \equiv$ Skalierung, für ein bestimmtes u_0 für jeden Tag d erfüllbar ist.

Wählt man zum Beispiel $u = 0,1$, so ergibt sich $x \approx 1,25$ und somit eine $1,25 kW_{ref}$ -Anlage.

Dieser Wert für u ist u.a. von einer Dampfkolbenmaschine ($1,7 kW_{mech}$) erfüllbar /1/, /3/.

Soll der Energieertrag der PV-Anlage für die Sommermonate ausreichen, so empfiehlt sich für den durchschnittlichen Privathaushalt eine $2 \text{ kW}_{\text{ref}}$ -Anlage. Damit ergibt sich nach (6) und (8):

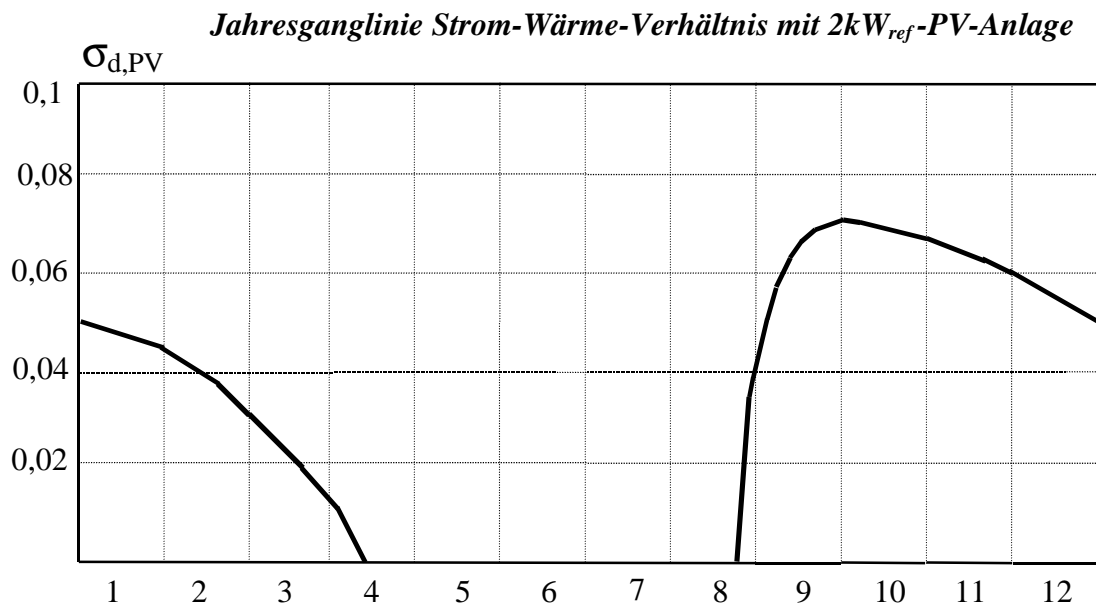


Abb. 3 Verbleibendes Strom-Wärme-Verhältnis mit $2 \text{ kW}_{\text{ref}}$ -PV-Anlage

Zusammenfassung und Ausblick: Eine intensive Nutzung regenerativer Energieträger erfordert, aufgrund der zeitlich und lokal schwankenden Verfügbarkeit, eine dezentrale Versorgungsstruktur. Dabei müssen sich die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten regenerativer Energien kombinatorisch in Form von *Hybridsystemen* ergänzen. Eine dieser Möglichkeiten stellt die Kombination von Photovoltaikanlagen mit einem Aggregat zur Kraft-Wärme-Kopplung dar, zum Beispiel für eine effiziente Versorgung privater Haushalte. Der Nutzung derartiger Hybridsysteme und deren Vernetzung zu komplexeren Verbundsystemen wird in Zukunft eine Schlüsselfunktion zukommen müssen. Aus diesem Grunde ist es unerlässlich, sich weiter intensiv mit allen Aspekten und Problemen der Realisierung von Energieversorgungen mit komplexen regenerativen Hybridsystemen zu beschäftigen.

Referenzen:

- /1/ *"PV-Generator linked to a Piston-Type Steam Engine with Combined Heat and Power as a Hybrid system for a completely self-sufficient Energy-Supply"*, K. Brinkmann
2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion
Vienna Austria, 6-10 July 1998
- /2/ *"Simulation eines Hybridsystems bestehend aus Kraftwärmekopplung mit Dampfmaschine und Photovoltaikanlage"*, K. Brinkmann, R. Taubner
14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 10. bis 12.03.99 Staffelstein
- /3/ *"Systemtechnische Untersuchung eines Hybridsystems bestehend aus Photovoltaikanlage und Dampfmaschine mit Kraft-Wärme-Kopplung"*, K. Brinkmann, Dissertation 1999,
FernUniversität Hagen / Fachbereich Elektrotechnik