

Ökonomische Bewertung teilverschatteter Photovoltaikanlagen

Martin Fürnschuß

Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz

13.02.2019

Motivation

Bisher:

- Konzeptionierung von PV-Anlagen auf maximalen elektrischen Jahresertrag
- Azimutale Ausrichtung nach Süden
- Hohe Förderungen:
 - Einspeisetarif
 - Anschaffung

Heute:

- Förderungen rückläufig
- Prosumer fordern einen ökonomischen Profit mit der PV-Anlage
- Positionierung der PV-Module (azimutal und vertikal) für maximalen ökonomischen Profit

Sonnenstrahlung (1)

Energiequelle zur Stromerzeugung mit Photovoltaik

Globalstrahlung E_G :

- Direktstrahlung $E_{G,Dir}$
- Diffusstrahlung $E_{G,Diff}$
- $E_G = E_{G,Dir} + E_{G,Diff}$

Gemessene Bestrahlungsstärken ($E_{G,Dir}$, $E_{G,Diff}$) und Globalstrahlung E_G Graz, am 11.01.2017

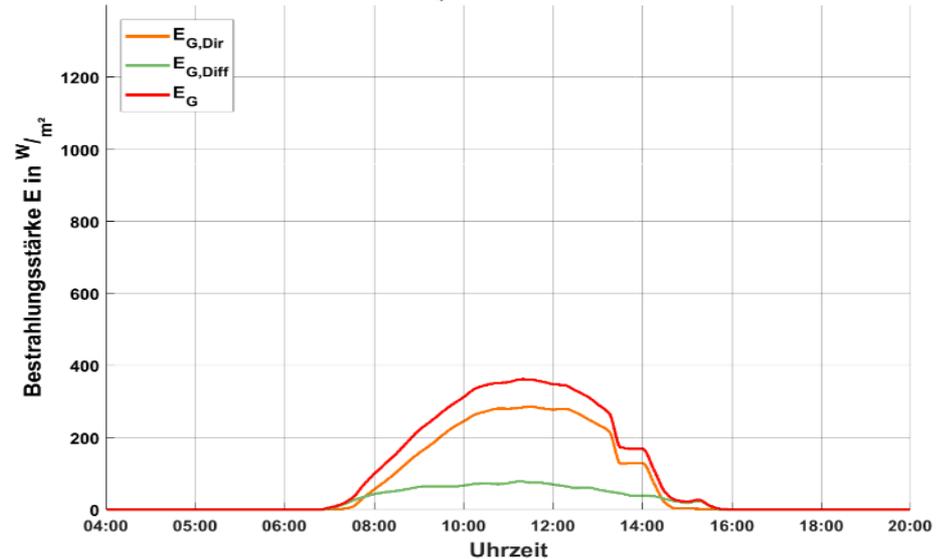


Abbildung 1: Gemessene Bestrahlungsstärken ($E_{G,Dir}$, $E_{G,Diff}$) und Globalstrahlung E_G in Graz am 11.01.2017 - Wintertag

Sonnenstrahlung (2)

Energiequelle zur Stromerzeugung mit Photovoltaik

Globalstrahlung E_G :

- Direktstrahlung $E_{G,Dir}$
- Diffusstrahlung $E_{G,Diff}$
- $E_G = E_{G,Dir} + E_{G,Diff}$

Gemessene Bestrahlungsstärken ($E_{G,Dir}$, $E_{G,Diff}$) und Globalstrahlung E_G Graz, am 22.06.2017

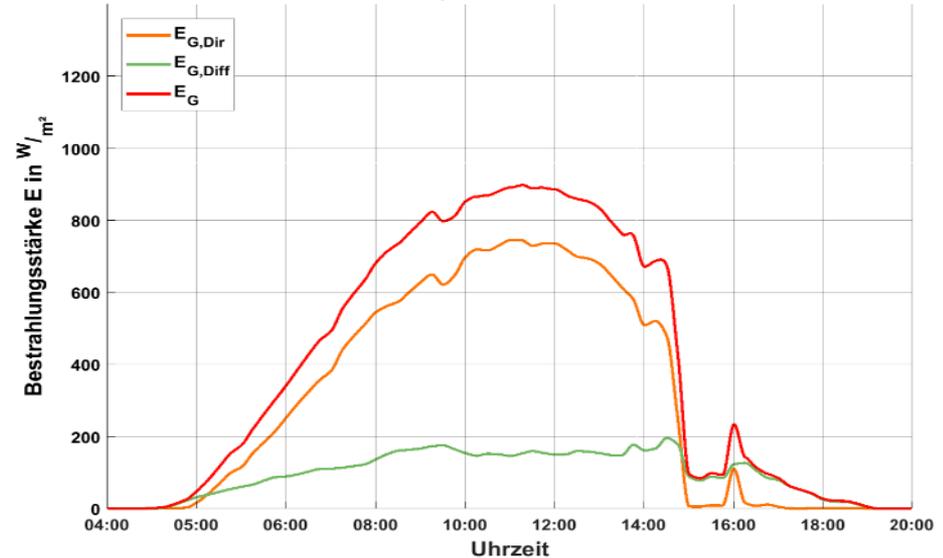


Abbildung 2: Gemessene Bestrahlungsstärken ($E_{G,Dir}$, $E_{G,Diff}$) und Globalstrahlung E_G in Graz am 22.06.2017 - Sommertag

Sonnenstand

DIN-Algorithmus zur Berechnung des Sonnenstandes:

- Eingabeparameter:
 - Längengrad λ
 - Breitengrad φ
 - Uhrzeit (inkl. Datum)
- Ergebnis:
 - Position der Sonne
 - Höhenwinkel γ_S
 - Azimutwinkel α_S

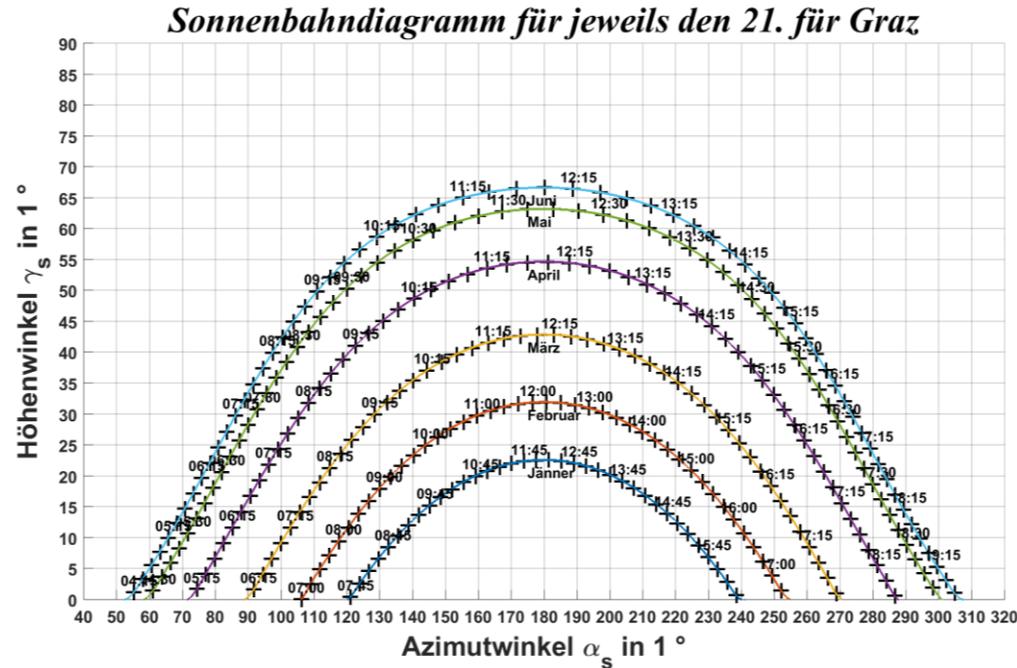


Abbildung 3: Sonnenbahndiagramm für Graz ($\varphi = 47,07^\circ$, $\lambda = 15,44^\circ$), bezogen auf UTC

Bestrahlungsstärke auf ein PV-Modul E_{Mod} (1)

Abhängigkeiten:

- Sonnenstand (γ_S , α_S , Uhrzeit)
- Globalstrahlung E_G
- Azimutale Ausrichtung α_{Mod}
- Vertikale Neigung γ_{Mod}

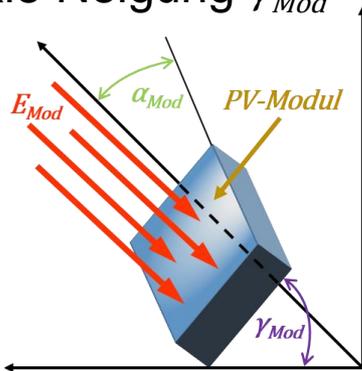


Abbildung 4: Auf ein PV-Modul auftreffende Bestrahlungsstärke

Bestrahlungsstärken auf PV-Modul mit $\gamma_{Mod} = 40^\circ$ und $\alpha_{Mod} = -60^\circ$
Graz, am 22.06.2017

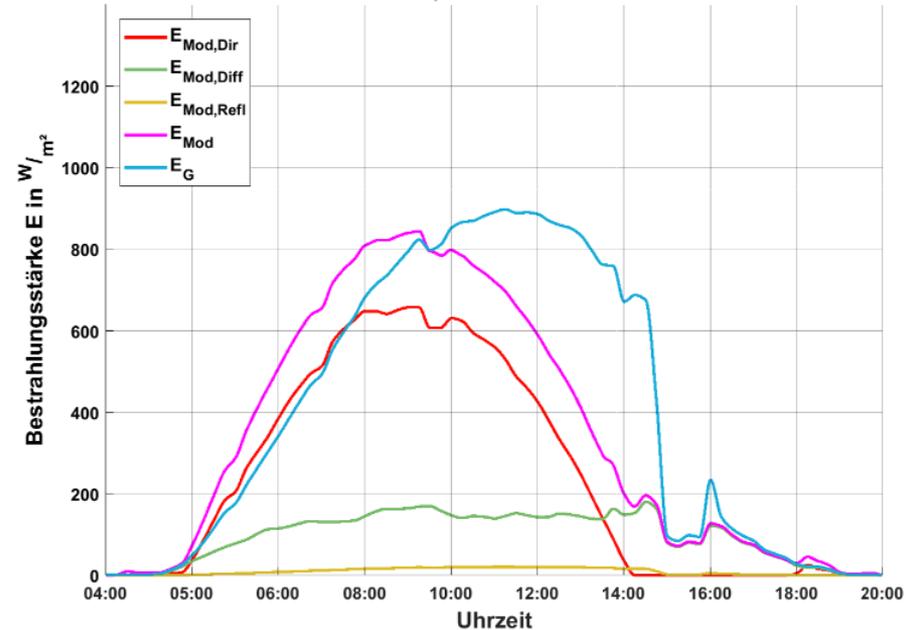


Abbildung 5: Bestrahlungsstärken auf ein PV-Modul aufgeteilt in Direkt-, Diffus- und reflektierte Bestrahlungsstärke und Globalstrahlung, $\alpha_{Mod} = -60^\circ$

Bestrahlungsstärke auf ein PV-Modul E_{Mod} (2)

Abhängigkeiten:

- Sonnenstand (γ_S , α_S , Uhrzeit)
- Globalstrahlung E_G
- Azimutale Ausrichtung α_{Mod}
- Vertikale Neigung γ_{Mod}

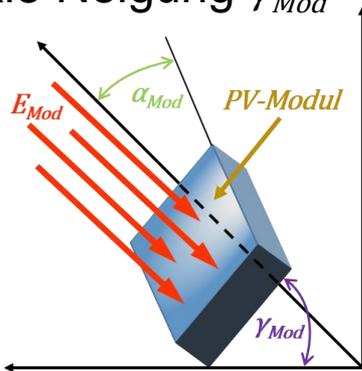


Abbildung 4: Auf ein PV-Modul auftreffende Bestrahlungsstärke

Bestrahlungsstärken auf PV-Modul mit $\gamma_{Mod} = 40^\circ$ und $\alpha_{Mod} = 60^\circ$
Graz, am 22.06.2017

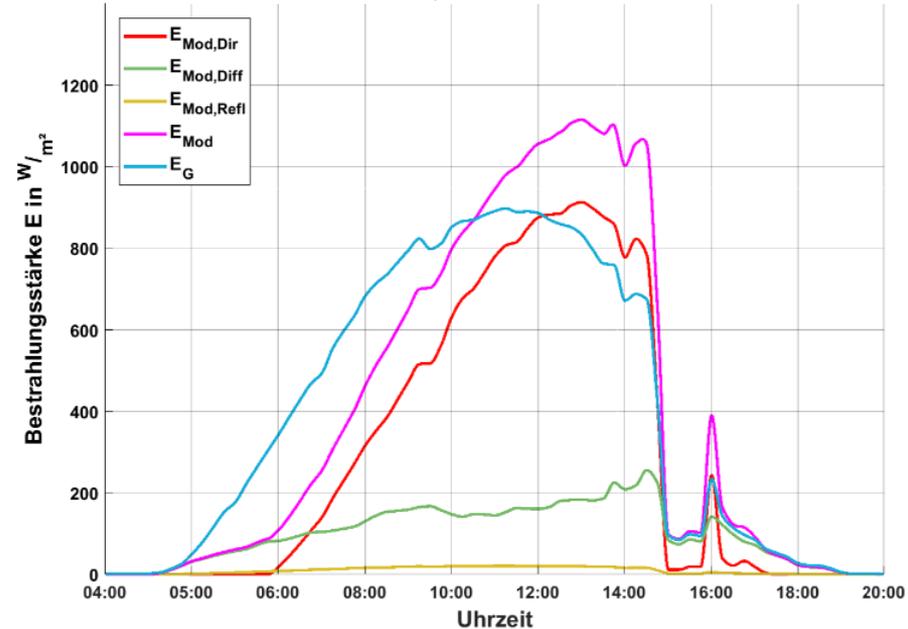


Abbildung 6: Bestrahlungsstärken auf ein PV-Modul aufgeteilt in Direkt-, Diffus- und reflektierte Bestrahlungsstärke und Globalstrahlung, $\alpha_{Mod} = 60^\circ$

Erzeugungprofil eines PV-Moduls

Abhängigkeiten:

- Klimadaten
 - Globalstrahlung
 - Umgebungstemperatur
- Modulparameter
- Sonnenstand
- Positionierung des PV-Moduls

Berechnung mit NOCT-Methode

- Berücksichtigung der tatsächlichen Modultemperatur

Leistung P_{Mod} abhängig von E_{Mod} und ϑ_{Mod} mit $\gamma_{Mod} = 40^\circ$, $\alpha_{Mod} = 60^\circ$
Graz, am 22.06.2017

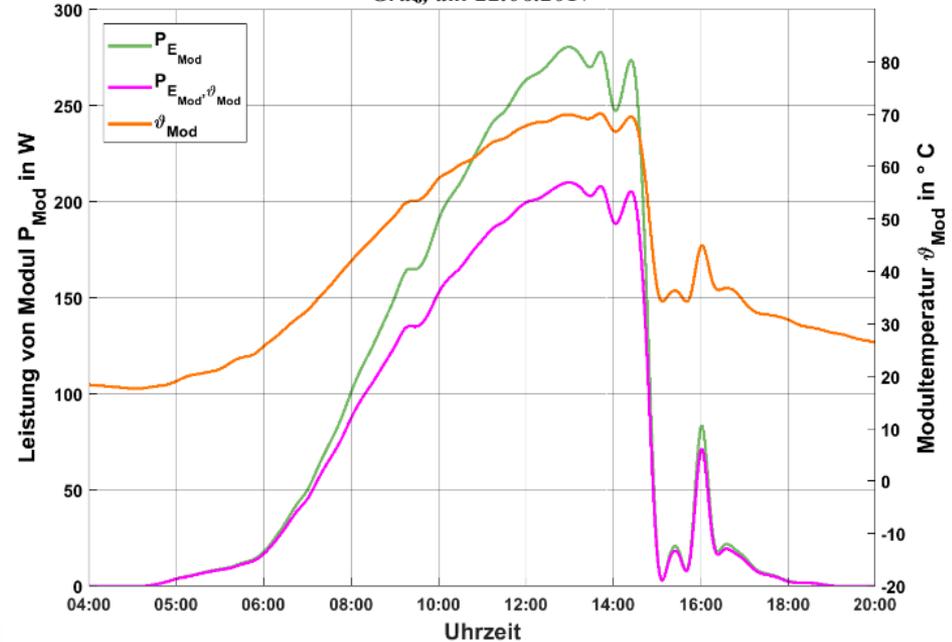


Abbildung 7: Elektrische Leistung eines PV-Moduls P_{Mod} angepasst an E_{Mod} und ϑ_{Mod}

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (1)

Ziel: Optimale Positionierung der PV-Module für maximalen ökonomischen Profit

- Einflussparameter **technisch:**
 - Verschattung
 - Klima
 - Lastprofil Betreiber
 - Standardlastprofil H0
 - Energieverbrauch

Haus mit PV-Anlage und umliegenden Objekten

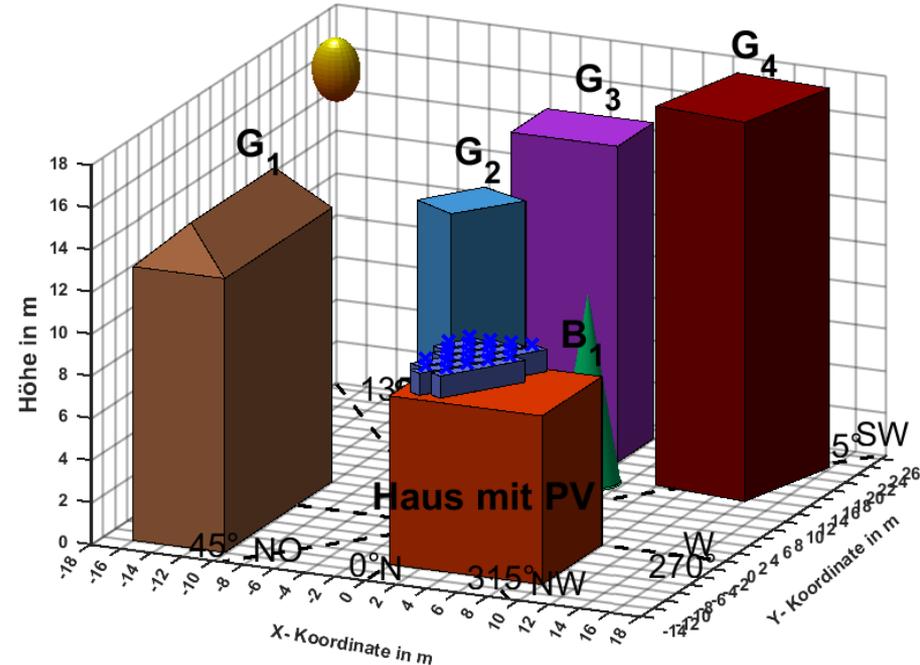


Abbildung 8: Beispiel einer PV-Anlage mit umliegenden Objekten die teilweise für eine Abschattung der PV-Anlage sorgen

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (2)

Ziel: Optimale Positionierung der PV-Module für maximalen ökonomischen Profit

- Einflussparameter **ökonomisch:**
 - Anschaffungskosten A_0
 - Stromhandelspreis Sp
 - Einspeisetarif Et
 - Versicherungskosten A_{Vers}
 - Wartungskosten A_{Wart}
 - Kalkulationszinsfuß i
 - Inflation e

Haus mit PV-Anlage und umliegenden Objekten

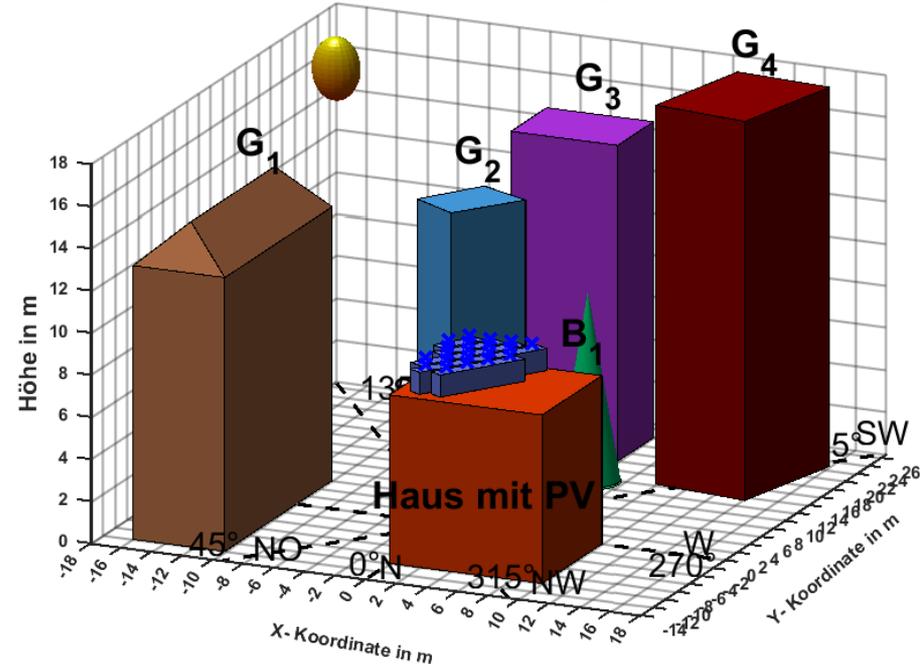


Abbildung 8: Beispiel einer PV-Anlage mit umliegenden Objekten die teilweise für eine Abschattung der PV-Anlage sorgen

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (3)

Verschattungsanalyse (1):

- Für jeden Modulmittelpunkt
- Verschattung durch
 - umliegende Objekte und
 - andere Module.
- Aufnahme aller sichtbaren Punkte vom Beobachterpunkt (Modulmittelpunkt)
 - Azimutwinkel α_{Obj}
 - Höhenwinkel γ_{Obj}

Haus mit PV-Anlage und umliegenden Objekten

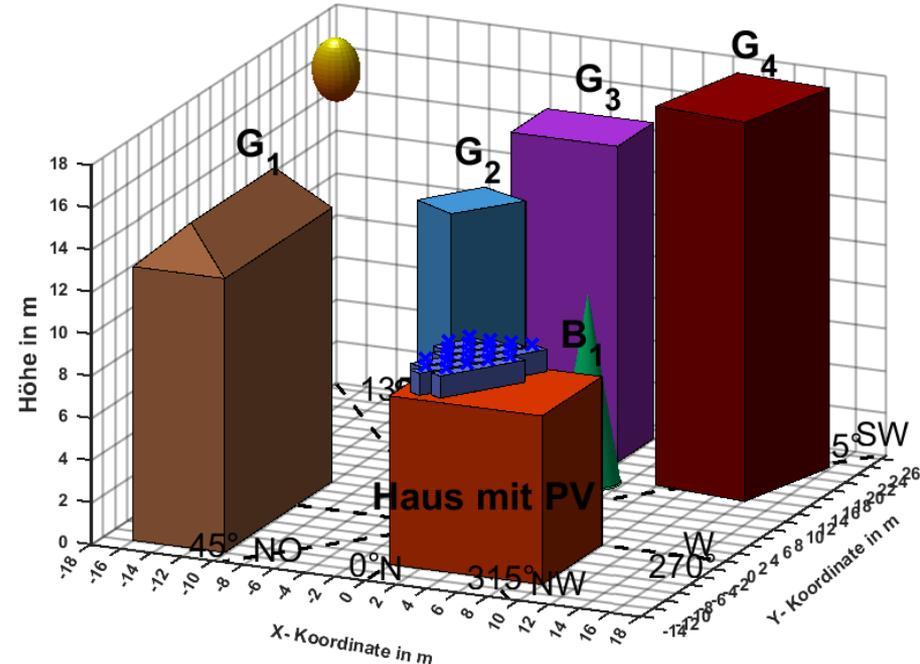


Abbildung 8: Beispiel einer PV-Anlage mit umliegenden Objekten die teilweise für eine Abschattung der PV-Anlage sorgen

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (4)

Verschattungsanalyse (2):

- Verbindung aller sichtbaren Punkte zu einem Schattenpolygonzug
- Ähnliche Darstellung wie bei einem Sonnenbahndiagramm:
 - Azimutwinkel α_{Obj}
 - Höhenwinkel γ_{Obj}

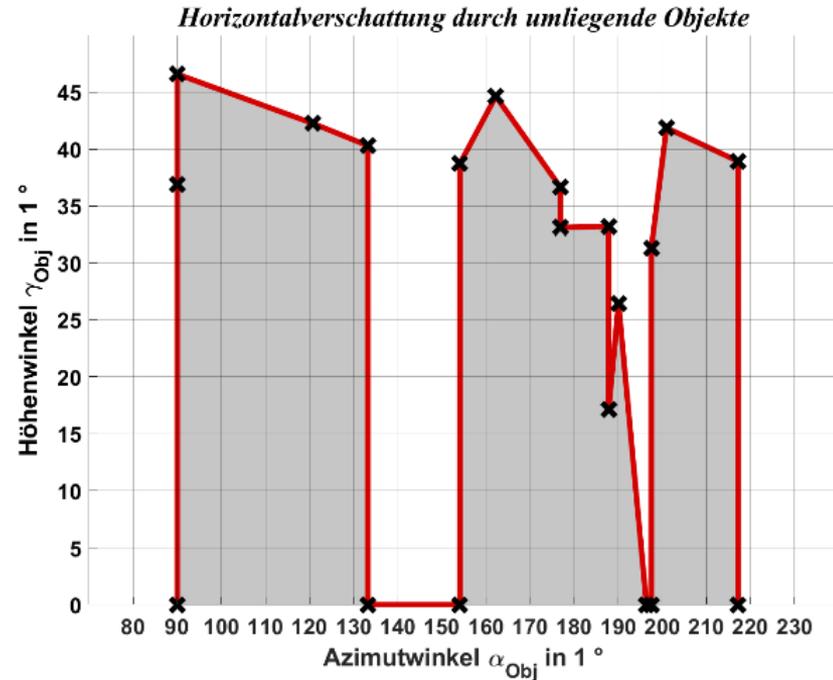


Abbildung 9: Horizontalverschattung durch die umliegenden Objekte

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (5)

Verschattungsanalyse (3):

- Zusammenlegung von Schattenpolygonzug und Sonnenbahndiagramm
- Anzahl der Schnittpunkte **gerade** oder **Null**: PV-Modul **nicht verschattet**
- Anzahl der Schnittpunkte **ungerade**: PV-Modul **verschattet**

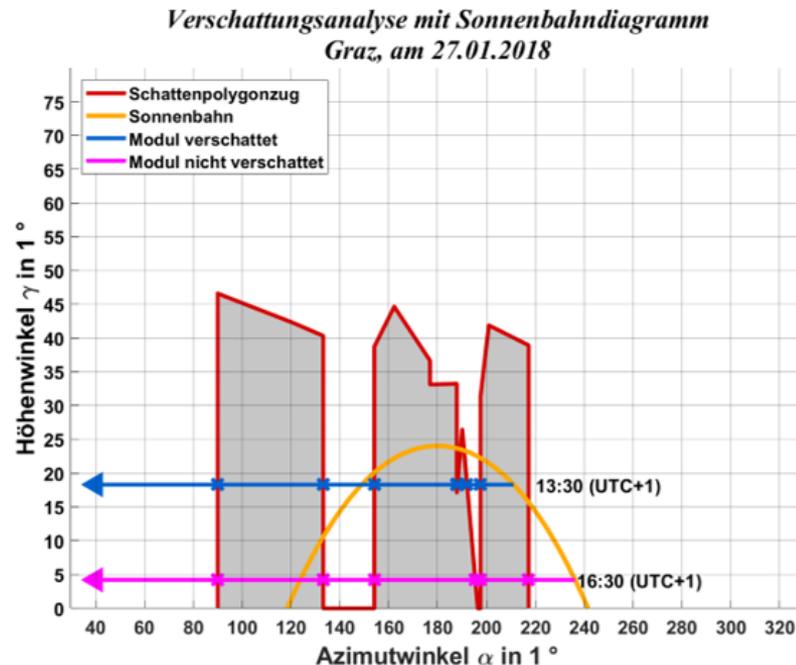


Abbildung 10: Verschattungsanalyse mit Sonnenbahndiagramm in Graz

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (6)

Erzeugungprofil der PV-Anlage (1):

Einflüsse:

- Verschattung
 - Datum/Uhrzeit

- Positionierung der PV-Module
 - Azimutale Ausrichtung α_{Mod}
 - Vertikale Neigung γ_{Mod}
 - Modulreihenabstand I_{Reihe}

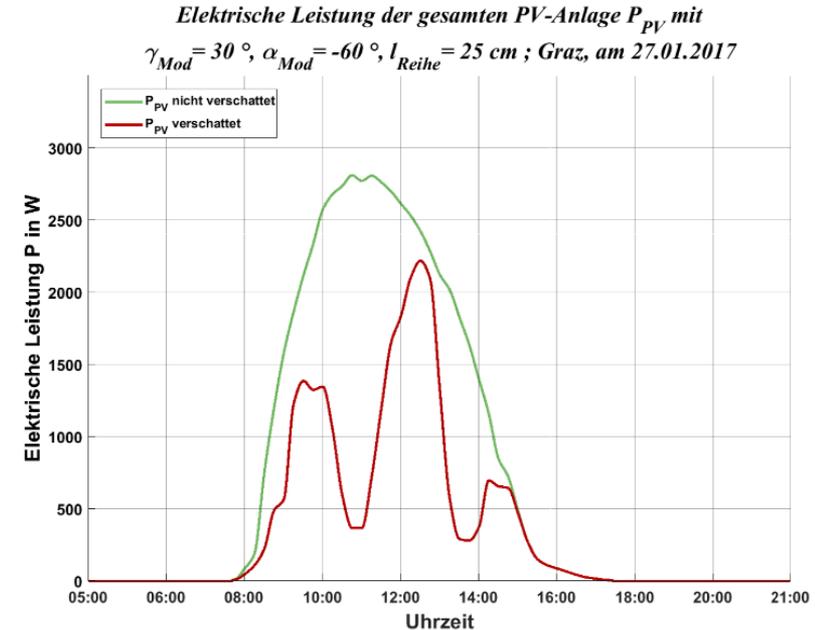


Abbildung 11: Elektrische Leistung der PV-Anlage P_{PV} mit und ohne Verschattung bei $\alpha_{Mod} = -60^\circ$

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (7)

Erzeugungprofil der PV-Anlage (2):

Einflüsse:

- Verschattung
 - Datum/Uhrzeit

- Positionierung der PV-Module
 - Azimutale Ausrichtung α_{Mod}
 - Vertikale Neigung γ_{Mod}
 - Modulreihenabstand I_{Reihe}

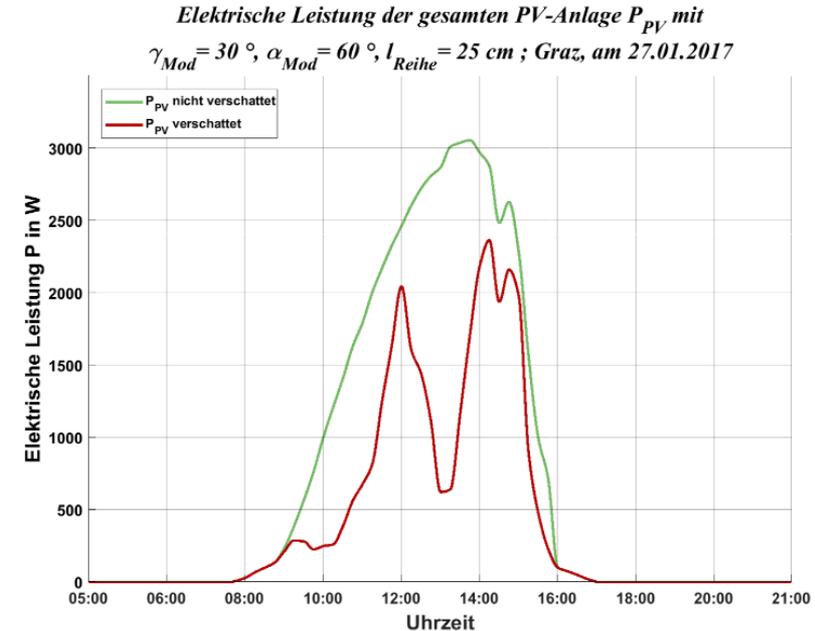


Abbildung 12: Elektrische Leistung der PV-Anlage P_{PV} mit und ohne Verschattung bei $\alpha_{Mod} = 60^\circ$

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (8)

Kapitalwertmethode (1):

Zahlungsströme:

- Anschaffungskosten A_0
- Summe aller Einzahlungen E_{ges}
- Summe aller laufenden Kosten A_{lauf}
- Kalkulationszinsfuß i

$$C_{(T)} = A_0 + \sum_{t=1}^T \frac{E_{ges(t)} + A_{lauf}}{(1+i)^t}$$

- $C_{(T)} > 0$: Investition **rentabel**
- $C_{(T)} < 0$: Investition **unrentabel**

Bezeichnung	Wert
Anschaffungskosten A_0	1500 €/kWp
Versicherungskosten A_{vers}	10 €/kWp a.
Wartungskosten A_{Wart}	5 €/kWp a.
Einspeisetarif E_t	3 ct/kWh
Stromhandelspreis S_p	20 ct/kWh
Inflation e	2,00 %
Zinsfuß i	1,00 %
Degradation $Degr.$	1,00 %

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (9)

Kapitalwertmethode (2):

Methodik:

1. Berechnung des jährlichen **Erzeugungsprofils** der PV-Anlage
2. Überlagerung mit **Lastprofil** (H0)
3. Berechnung der **Einnahmen** durch den **Eigenverbrauch** und die **Einspeisung** ins Verteilernetz der erzeugten elektrischen Energie im 15-min-Intervall.
4. Durchführung dieses Vorganges für **unterschiedliche Positionierungen** der PV-Module
5. Wahl jener **Positionierung**, bei welcher der **Kapitalwert** nach T - Jahren **maximal** wird

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (10)

Kapitalwertmethode (3):

Einflüsse auf Kapitalwert C_{25} :

- Verhältnis von Strombedarf zur Stromerzeugung: $W_{verbr} = X \cdot W_{PV}$
- Positionierung der PV-Module

Maximaler Kapitalwert nicht zwingend bei höchstem elektrischen Jahresertrag!

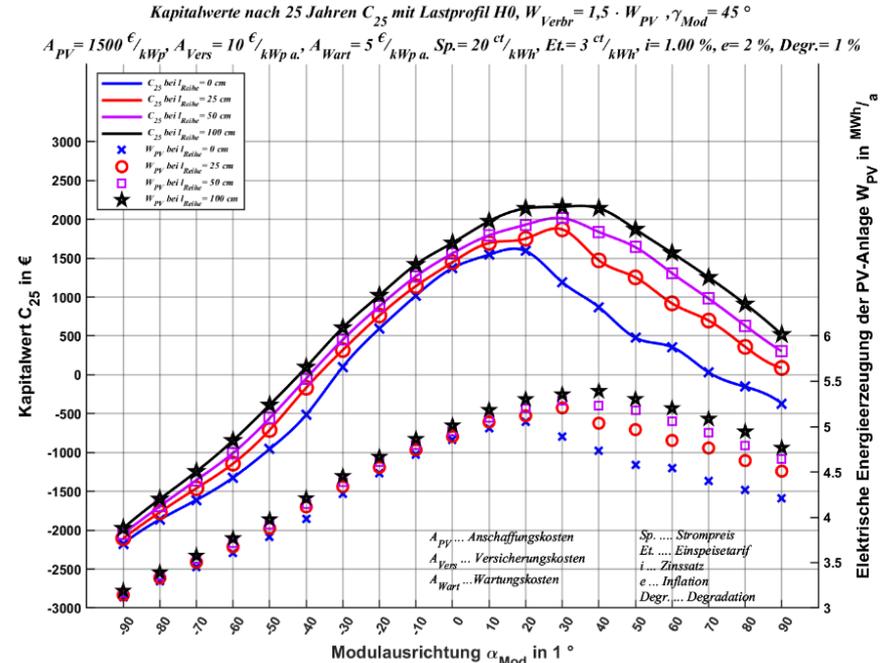


Abbildung 13: Kapitalwerte C_{25} , elektrische Jahreserträge W_{PV} der PV-Anlage bei $\gamma_{Mod} = 45^\circ$ und unterschiedlichen Modulreihenabständen l_{Reihe}

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (11)

Kapitalwertmethode (3):

Einflüsse auf Kapitalwert C_{25} :

- Verhältnis von Strombedarf zur Stromerzeugung: $W_{verbr} = X \cdot W_{PV}$
- Positionierung der PV-Module

Maximaler Kapitalwert nicht zwingend bei höchstem elektrischen Jahresertrag!

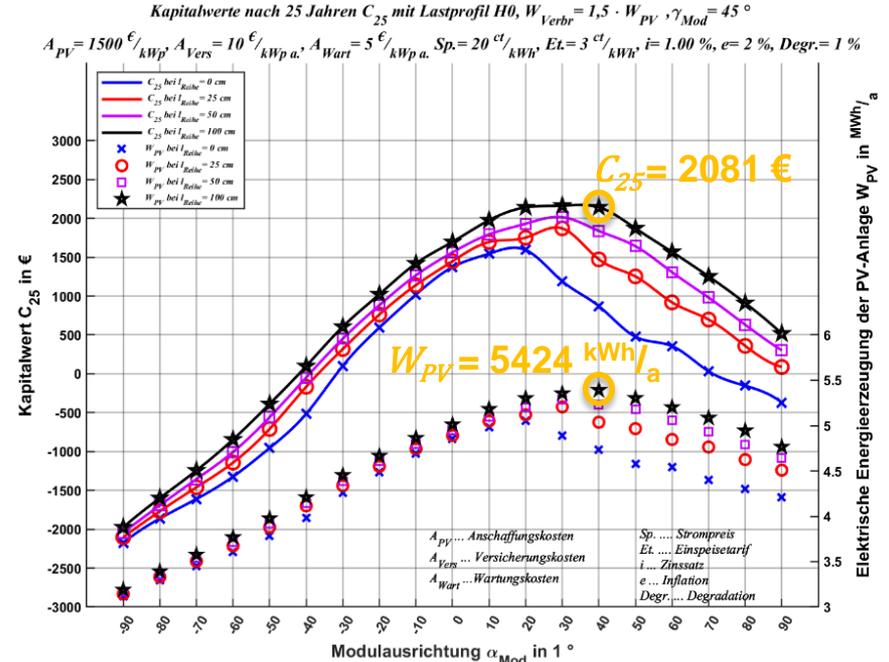


Abbildung 13: Kapitalwerte C_{25} , elektrische Jahreserträge W_{PV} der PV-Anlage bei $\gamma_{Mod} = 45^\circ$ und unterschiedlichen Modulreihenabständen l_{Reihe}

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (13)

Kapitalwertmethode (4):

Untersuchung der Szenarien:

- $W_{Verbr} = W_{PV}$
- $W_{Verbr} = 2 \cdot W_{PV}$
- $W_{Verbr} = 1,5 \cdot W_{PV}$
- $W_{Verbr} = 0,5 \cdot W_{PV}$

Szenarien basierte Entwicklung des Kapitalwerts C_t über 25 Jahre mit Lastprofil H0

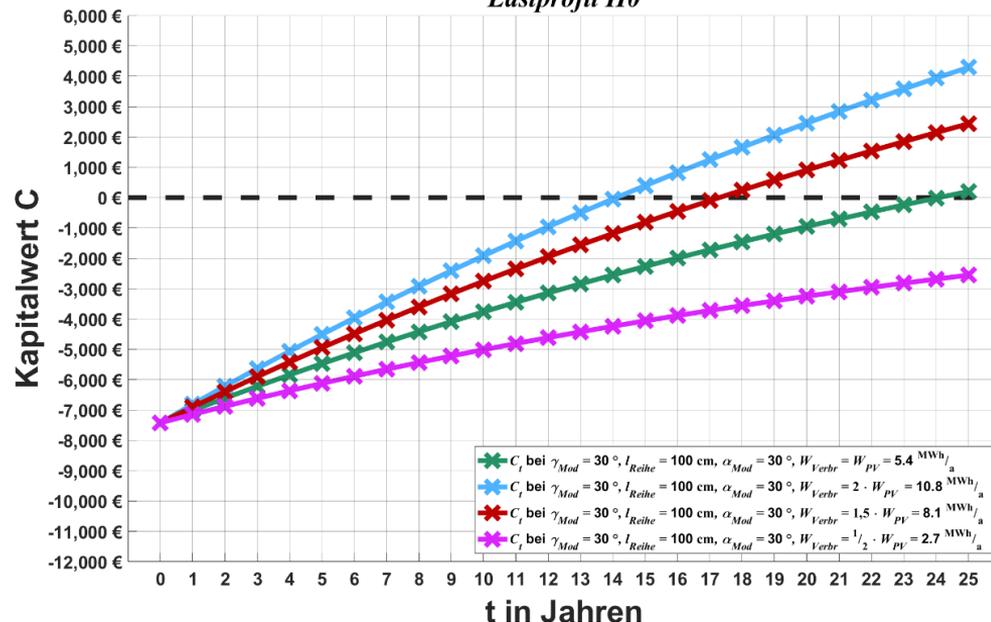


Abbildung 14: Entwicklung des maximal erzielbaren Kapitalwerts C_t bei gewinnoptimierter Positionierung der PV-Module und unterschiedlichen Stromverbräuchen

Konzeptionierung einer 5-kWp-PV-Anlage (14)

Sensitivitätsanalyse:

Kapitalwert ist sensitiv gegenüber:

- Einspeisetarif E_t
- Anschaffungskosten A_0
- Strompreis S_p
- Sensitivitäten abhängig vom Standort der PV-Anlage

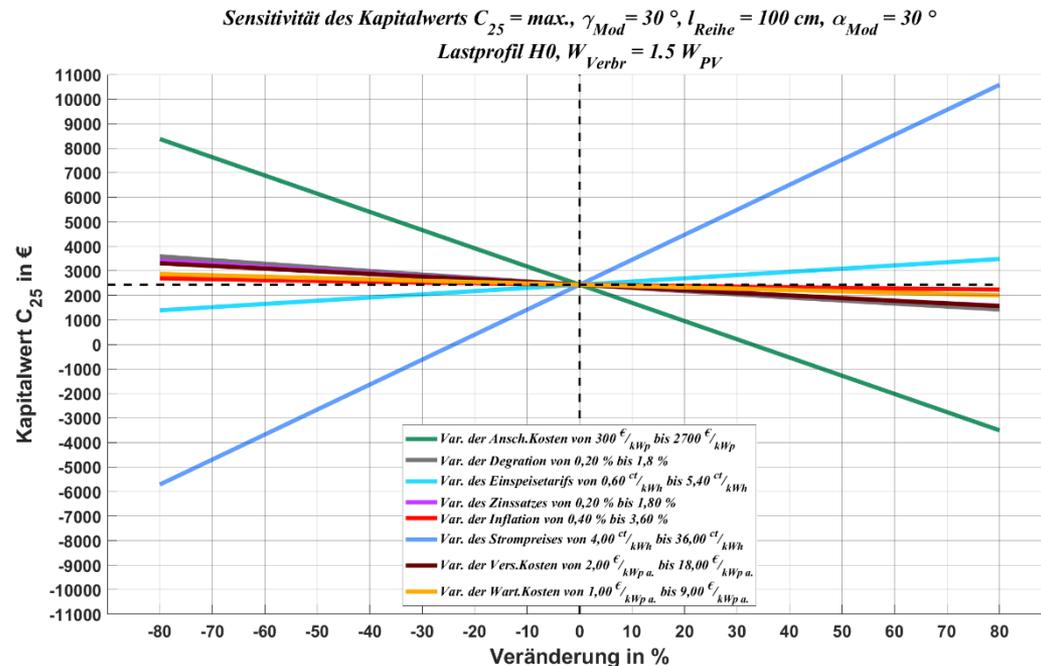


Abbildung 15: Sensitivität des maximal erzielbaren Kapitalwerts nach 25 Jahren C_{25} der PV-Anlage mit $W_{Verbr} = 1,5 \cdot W_{PV}$ und Lastprofil H0

Technische Erkenntnisse

Einflussparameter auf elektrische Energieerzeugung

- Standort
 - Sonnenbahndiagramm
 - Globalstrahlung E_G
 - Wetter
- Geometrische Parameter
 - Anzahl der PV-Module
 - Neigungswinkel γ_{Mod}
 - Azimutale Ausrichtung α_{Mod}
 - Modulreihenabstand I_{Reihe}
- Modultemperatur
 - Berücksichtigung mit der NOCT-Methode
- Verschattung der PV-Module
 - Durch umliegende Objekte und durch gegenseitige Verschattung.
 - Höheres Risiko bei
 - geringen Sonnenhöhen γ_S
 - Winter (UTC+1)
 - Morgens/Abends
 - östlich- oder westlich gelegenen Objekten
 - hohen Modulneigungswinkel und geringen Modulreihenabstand
 - Südlich gelegene Objekte tragen kaum zur Verschattung bei
 - γ_S ist Mittags groß

Ökonomische Erkenntnisse

- Für den Betreiber optimale Positionierung der PV-Module muss nicht mit $W_{PV} = \max$ einhergehen.
- Optimale Positionierung resultiert aus dem Konsumverhalten des Betreibers (Lastprofil)
- Jede PV-Anlage sollte separat untersucht werden
 - Lastprofil
 - Anschaffungskosten
- Technische und ökonomische Einflüsse können im **Kapitalwert** vereint werden.
- Hoher Einfluss der
 - Anschaffungskosten A_0 , maßgeblich beschrieben durch die Modulanzahl, des
 - Strompreises Sp , des
 - Einspeisetarifs Et , des
 - elektrischen Energieverbrauches W_{Verbr} , welcher von der PV-Anlage oder dem Verteilernetz gedeckt wird.
- Höherer **Eigenverbrauch**
→ Höherer **Kapitalwert**

Ökonomische Bewertung teilverschatteter Photovoltaikanlagen

Martin Fürnschuß

Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz

13.02.2019