Bachelorarbeit

Optimale Positionierung einer Photovoltaikanlage

Manuel Hainzl

DI Dr. Daniel Adelberger, DI[in] Dr.[in] Gunda Singer

JOHANNES KEPLER UNIVERSITY LINZ

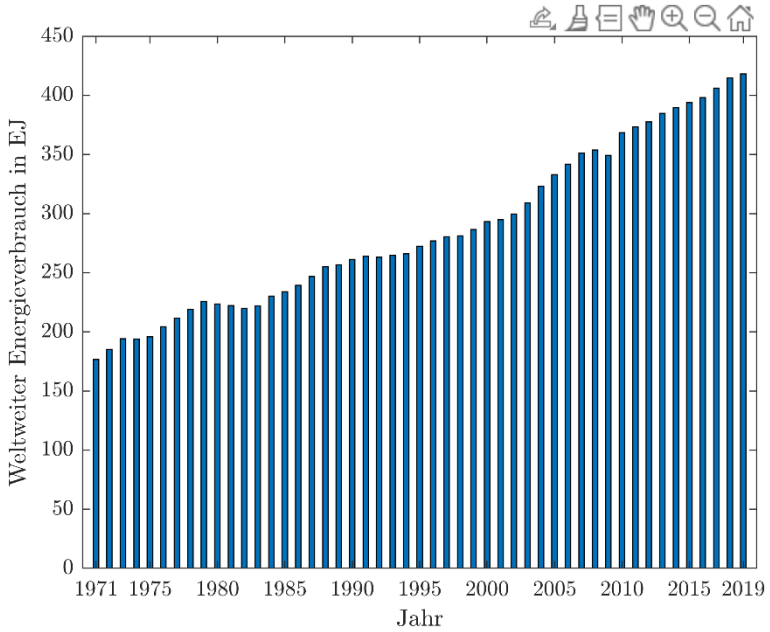
Inhalt

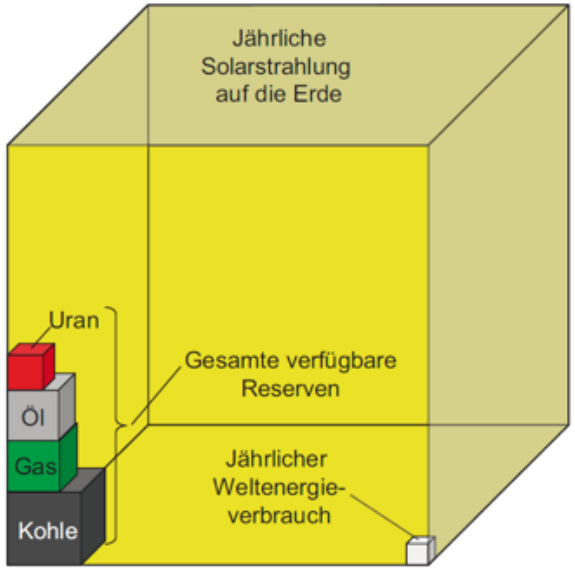
- Motivation
- Modellierung
- Optimierung
- Messdatenaufnahme
- Schlussfolgerung

Inhalt

- Motivation
- Modellierung
- Optimierung
- Messdatenaufnahme
- Schlussfolgerung

Motivation





Quelle: Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, 2020

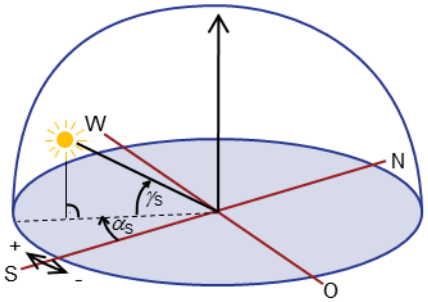
Inhalt

- Motivation
- Modellierung
- Optimierung
- Messdatenaufnahme
- Schlussfolgerung

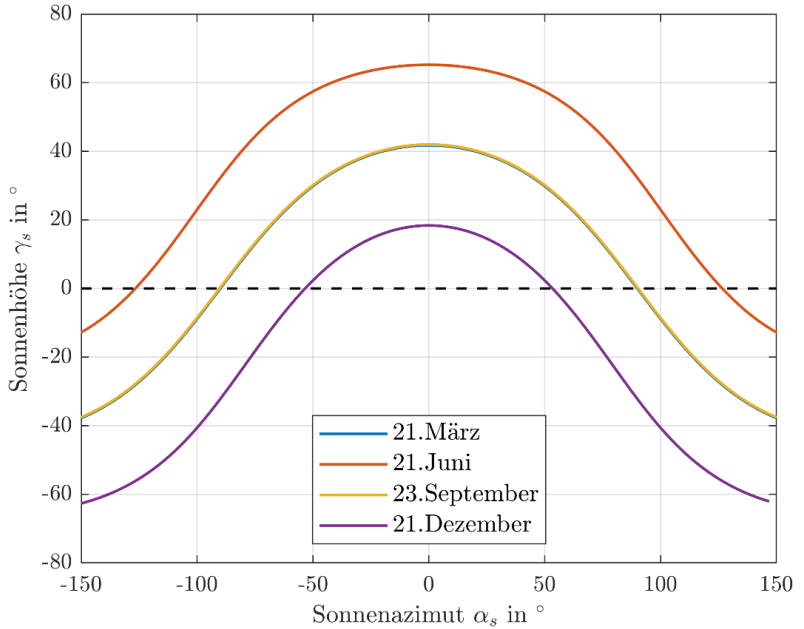
Modellierung - Sonnenposition

Azimutwinkel (Horizontalwinkel) α_s

Elevation (Höhenwinkel) γ_s



Quelle: Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, 2020



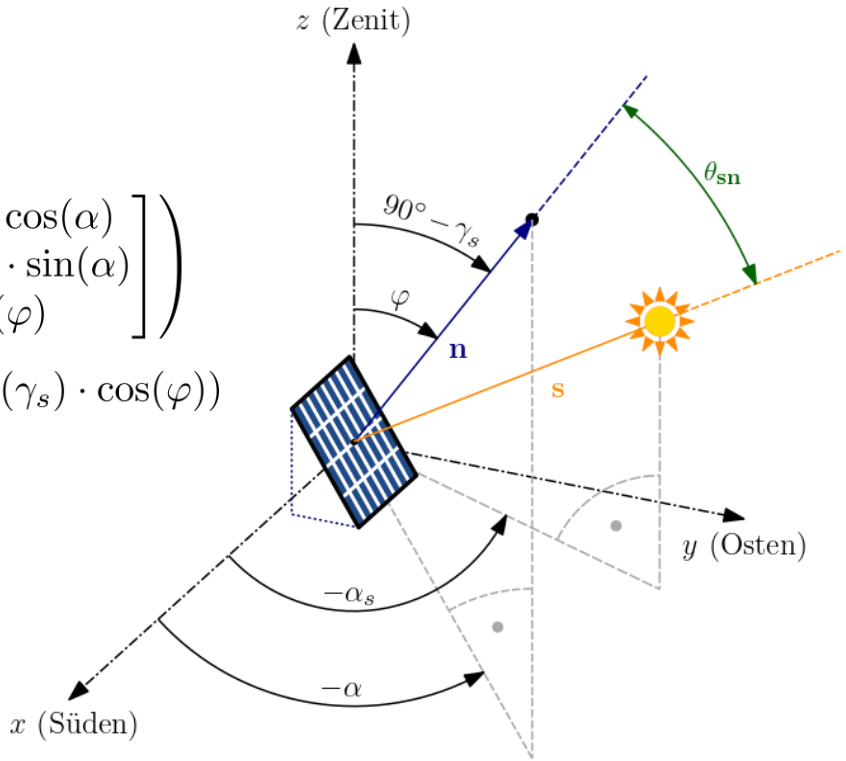
Modellierung - Einfallswinkel

- Definition: $\theta_{\mathbf{sn}} = \angle(\mathbf{s}, \mathbf{k})$
- Berechnung mittels Vektorrechnung

$$\theta_{sn} = \arccos\left(\mathbf{s}_{Kart} \cdot \mathbf{n}_{Kart}\right)$$

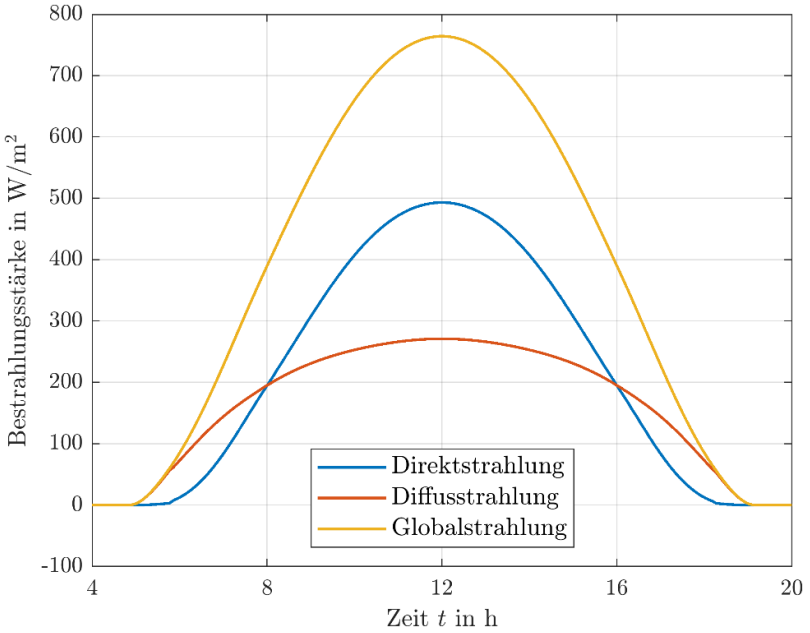
$$= \arccos\left(\begin{bmatrix} \cos(\gamma_s)\cdot\cos(\alpha_s) \\ -\cos(\gamma_s)\cdot\sin(\alpha_s) \\ \sin(\gamma_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\varphi)\cdot\cos(\alpha) \\ -\sin(\varphi)\cdot\sin(\alpha) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix}\right)$$

$$\stackrel{!}{=} \arccos\left(\cos(\gamma_s)\cdot\sin(\varphi)\cdot\cos(\alpha_s - \alpha) + \sin(\gamma_s)\cdot\cos(\varphi)\right)$$

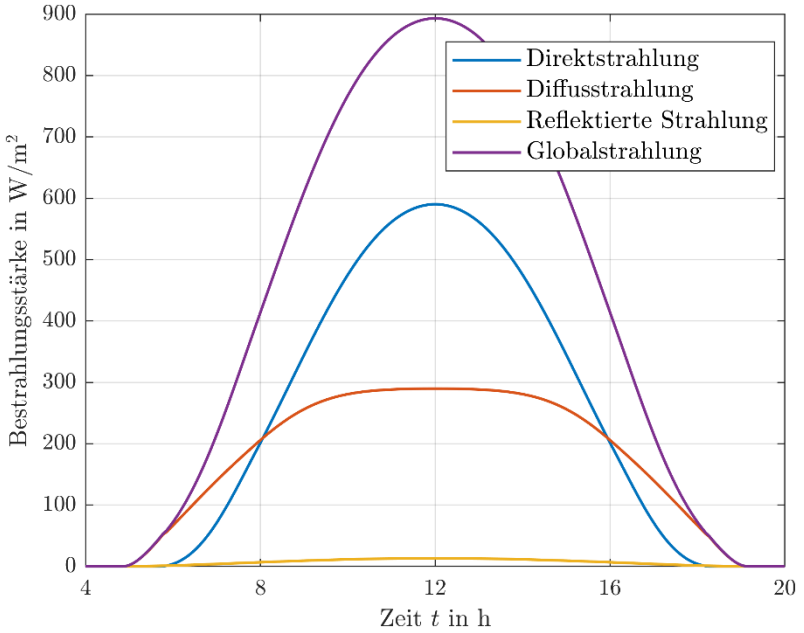


Modellierung - Bestrahlungsstärke

$$E_{hor,glob} = E_{hor,dir} + E_{hor,dif}$$



$$E_{gen,glob} = E_{gen,dir} + E_{gen,dif} + E_{gen,ref}$$



Inhalt

- Motivation
- Modellierung
- Optimierung
- Messdatenaufnahme
- Schlussfolgerung

Optimierung - Problemdefinition

- Problemklasse: Nichtlineares Problem (NP)
- Problemformulierung:

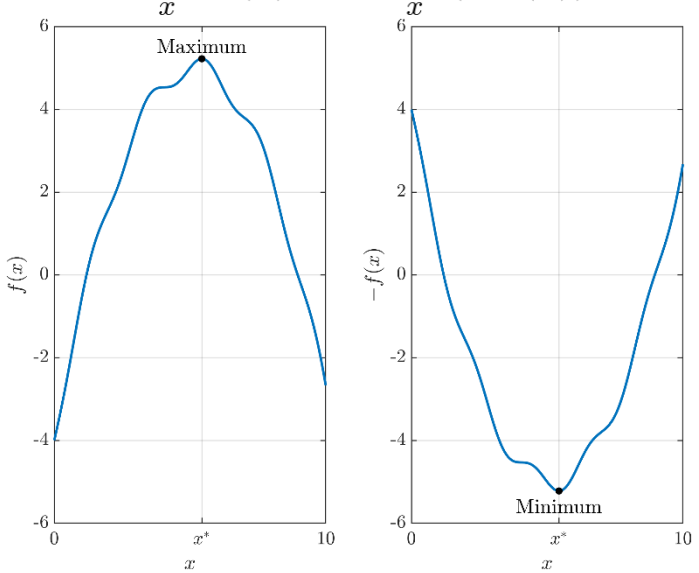
$$[\boldsymbol{\alpha}^*, \boldsymbol{\varphi}^*] = \arg \max_{[\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\varphi}]} H_{gen,glob} = \arg \max_{[\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\varphi}]} \sum E_{gen,glob} \cdot T_a$$

$$s.t. \quad \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$$

$$\varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}$$

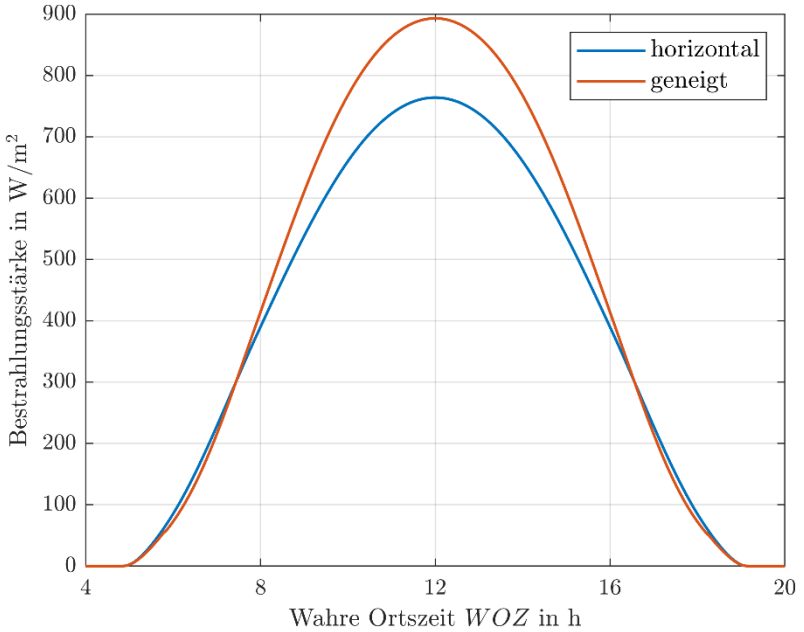
- Solver: fmincon

$$\max_x J(x) \stackrel{!}{=} -\min_x(-J(x))$$



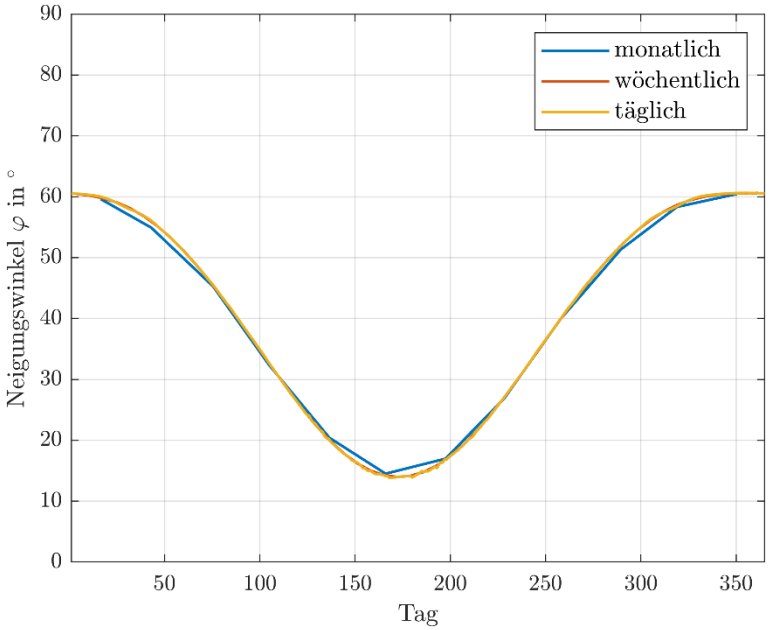
Optimierung – Manuelle Positionsänderung

- Jährliche Optimierung:
  $\varphi^* = 34.21°$
- Halbjährliche Optimierung mit Positionsintervalle Oktober – März und April – September:
  $\boldsymbol{\varphi}^* = [52.95° \quad 24.39°]$
- Vierteljährliche Optimierung mit Positionsintervalle Jänner – März, April - Juni, Juli - September und Oktober – Dezember
  $\boldsymbol{\varphi}^* = [51.26° \quad 21.97° \quad 27.09° \quad 55.29°]$



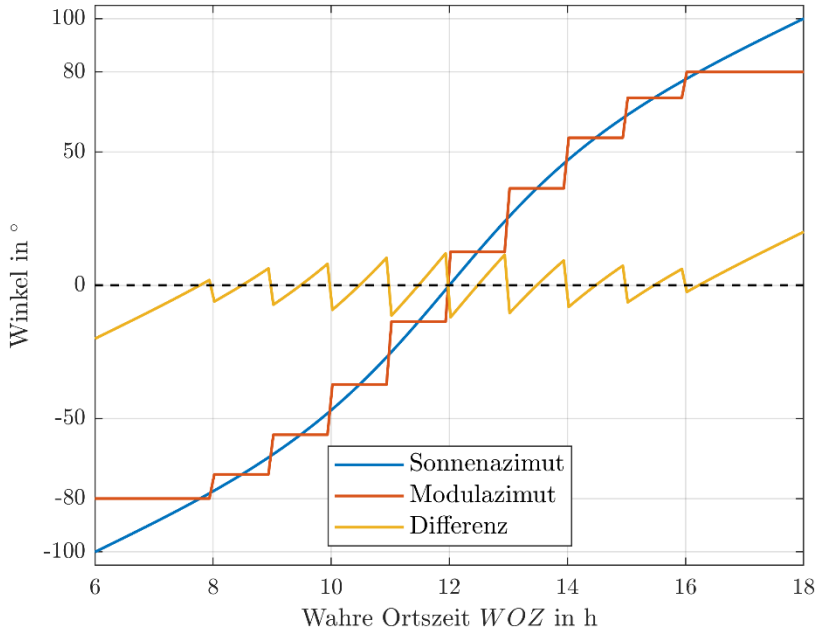
Optimierung – Manuelle Positionsänderung

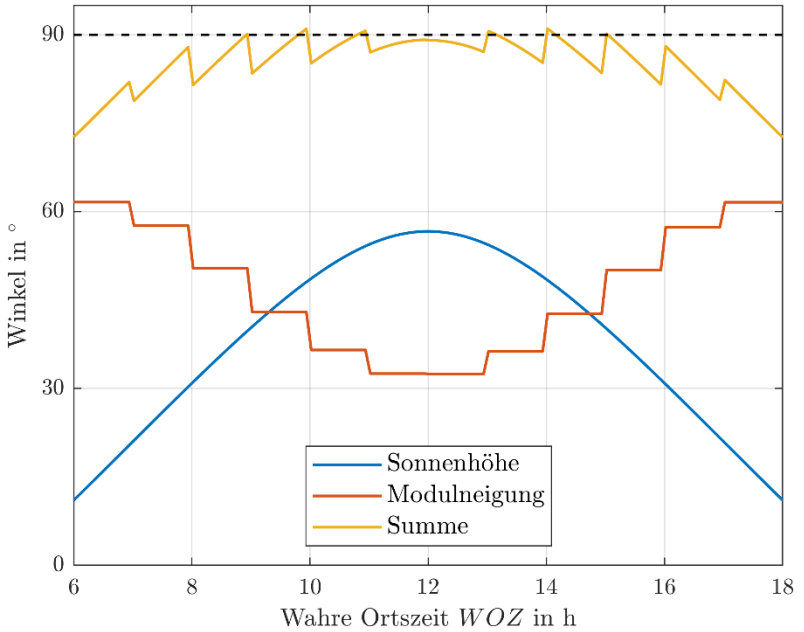
- Monatliche, Wöchentliche und Tägliche Optimierung:
  - Höhere Neigungswinkel in den Wintermonaten
    $\varphi^* = [55°; 65°]$
  - Niedrigere Neigungswinkel in den Sommermonaten
    $\varphi^* = [10°; 20°]$



Optimierung – Nachführsystem (stündlich)

$$\theta_{\mathbf{sn}} \to 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha \to \alpha_s \quad \& \quad \varphi + \gamma_s \to 90°$$

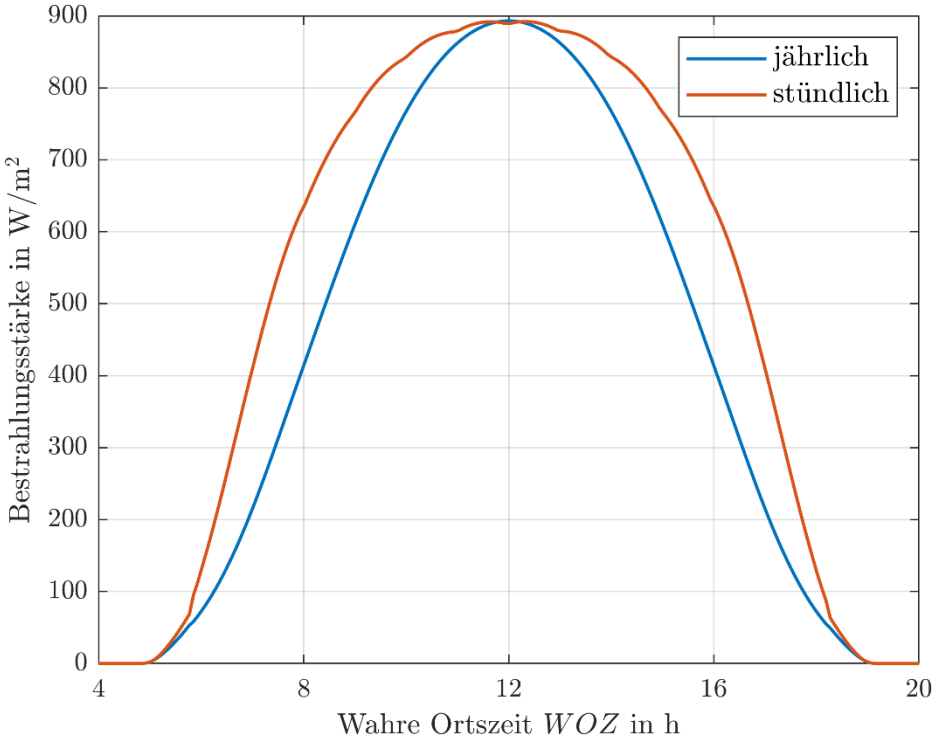




Optimierung - Ergebnisübersicht

Positionierungsstrategie	H_{glob}	**Erhöhung**
keine (horizontal)	$1.461 \times 10^3\,\mathrm{kW\,h\,m^{-2}}$	0.00 %
jährlich	$1.740 \times 10^3\,\mathrm{kW\,h\,m^{-2}}$	19.08 %
halbjährlich	$1.776 \times 10^3\,\mathrm{kW\,h\,m^{-2}}$	21.56 %
vierteljährlich	$1.777 \times 10^3\,\mathrm{kW\,h\,m^{-2}}$	21.63 %
monatlich	$1.788 \times 10^3\,\mathrm{kW\,h\,m^{-2}}$	22.37 %
wöchentlich	$1.790 \times 10^3\,\mathrm{kW\,h\,m^{-2}}$	22.51 %
täglich	$1.790 \times 10^3\,\mathrm{kW\,h\,m^{-2}}$	22.51 %
stündlich	$2.090 \times 10^3\,\mathrm{kW\,h\,m^{-2}}$	43.05 %

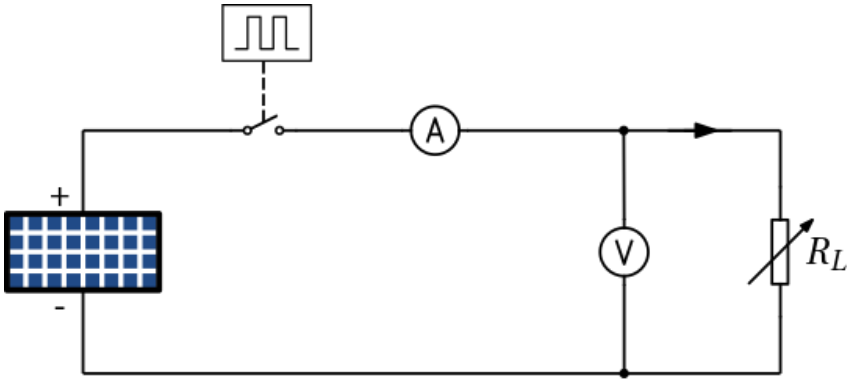
Optimierung – Vergleich

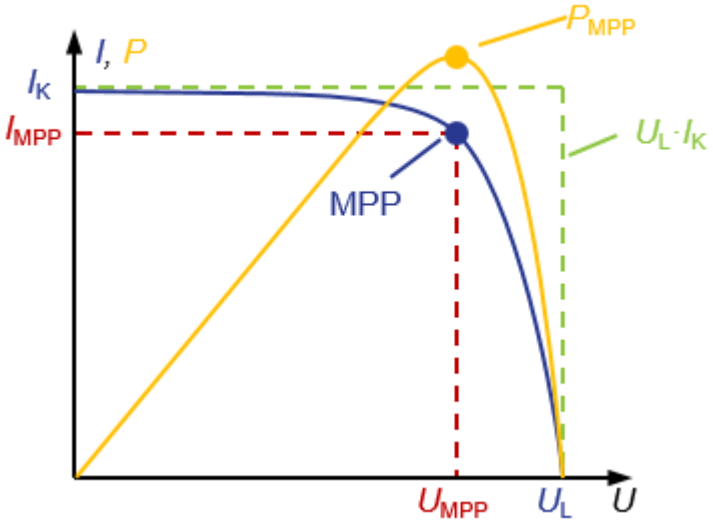


Inhalt

- Motivation
- Modellierung
- Optimierung
- Messdatenaufnahme
- Schlussfolgerung

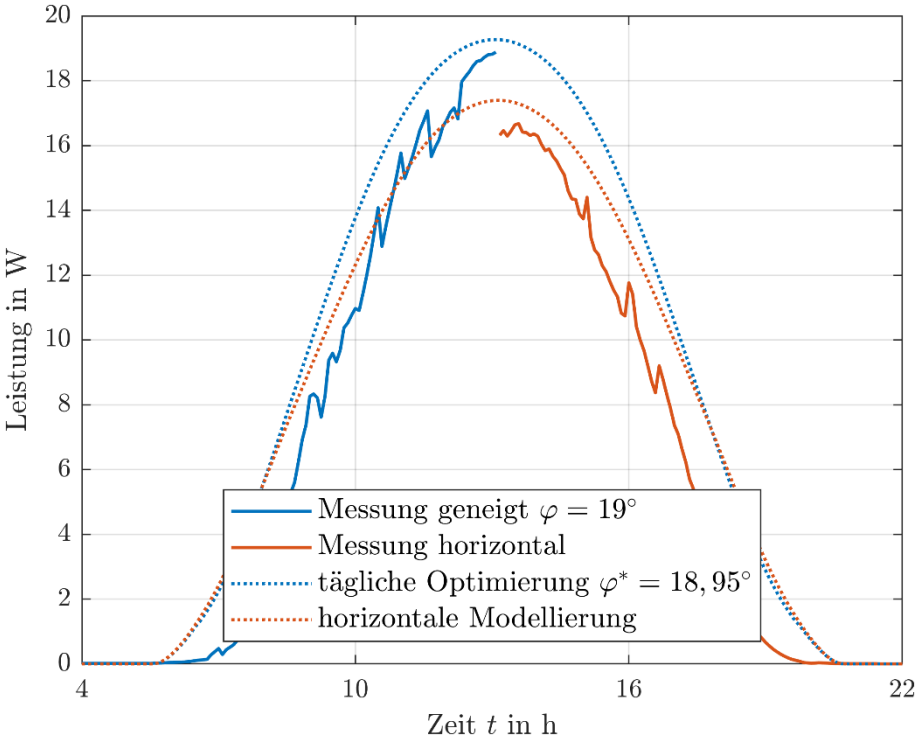
Messdatenaufnahme - Funktionsweise



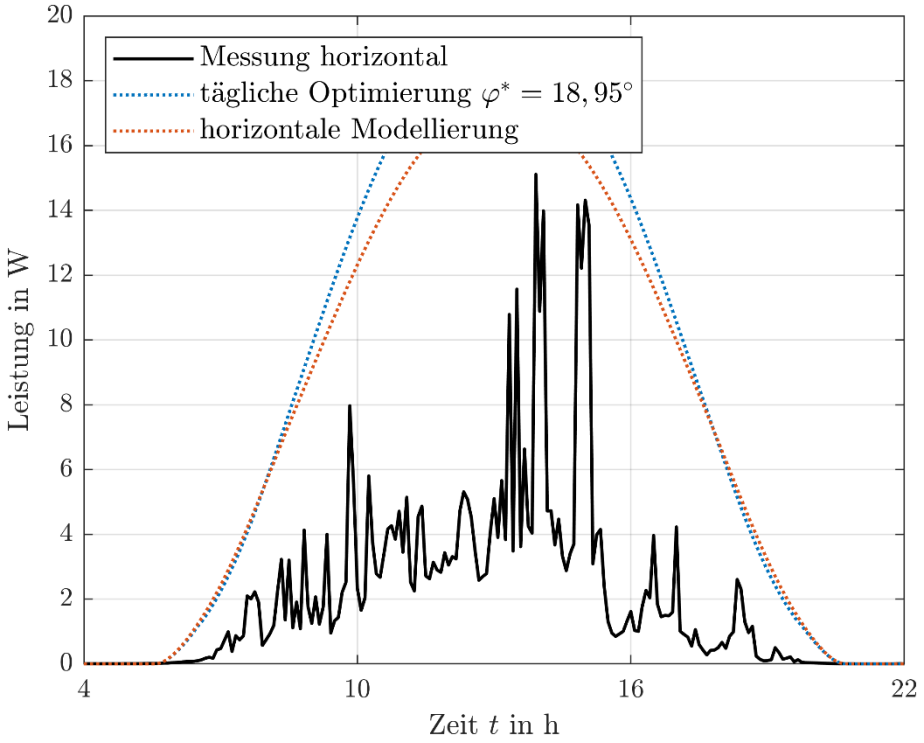


Quelle: Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, 2020

Messdatenaufnahme – Sonniger Tag



Messdatenaufnahme – Bewölkter Tag



Inhalt

- Motivation
- Modellierung
- Optimierung
- Messdatenaufnahme
- Schlussfolgerung

Schlussfolgerung

- Durch optimale Positionierung der Photovoltaikmodule lassen sich **Energieerhöhungen zwischen 19% und 43%** je nach Positionierungsstrategie realisieren!
- Manuelle Positionsänderung:
  → nur mehr marginaler Mehrwert ab der monatlichen Optimierung
- Nachführsystem:
  → auch der Energieverbrauch der Motoren muss berücksichtig werden
  → auf Dächern wegen Platzbeschränkungen i.A. ungeeignet

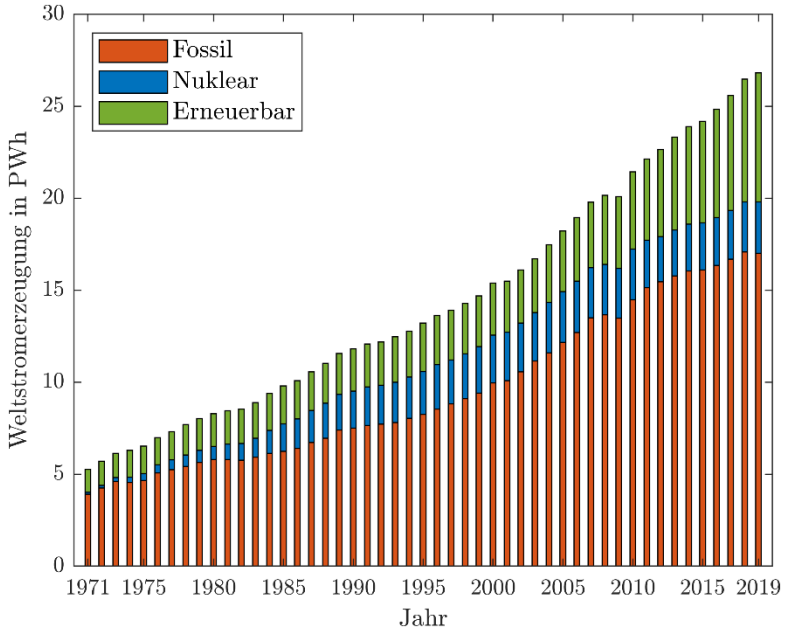
Positionierungsstrategie	Erhöhung
keine (horizontal)	0.00 %
jährlich	19.08 %
halbjährlich	21.56 %
vierteljährlich	21.63 %
monatlich, wöchentlich und täglich	≈ 22.5 %
stündlich	43.05 %

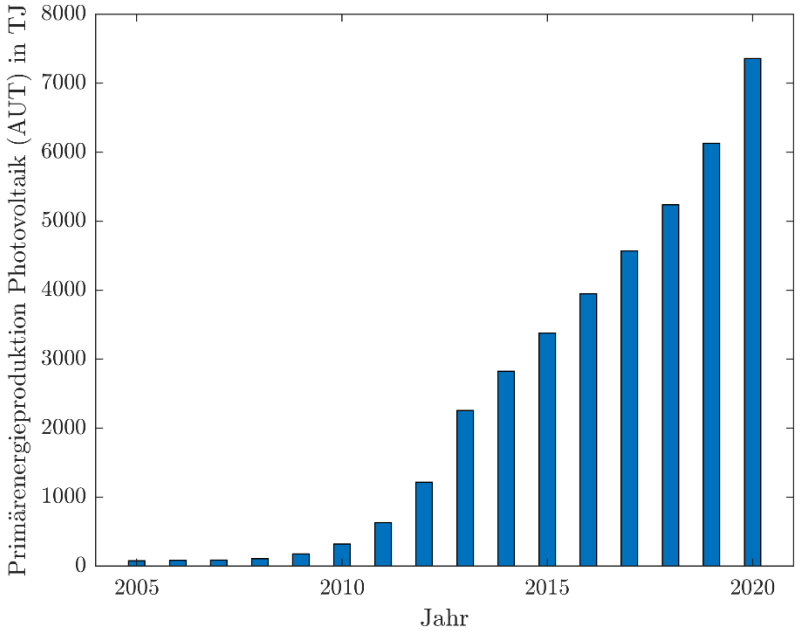
Institute for Design and Control of Mechatronical Systems

http://desreg.jku.at

JOHANNES KEPLER
UNIVERSITY LINZ

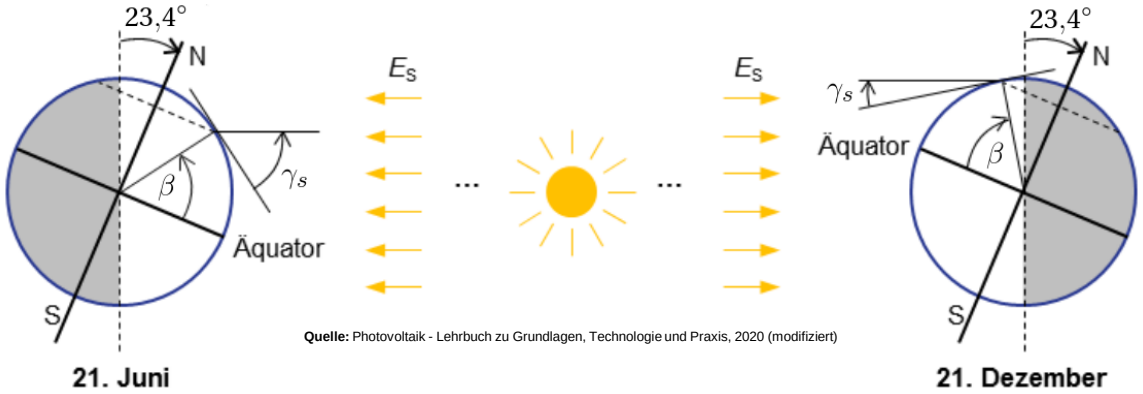
Entwicklung Stromerzeugung/Photovoltaik





Hilfs-/Zwischengrößen Sonnenposition

- Modellierung mit DIN 5034-2 (Tageslicht in Innenräumen - Teil 2: Grundlagen)
- Hilfs-/Zwischengrößen (Auszug)
  - Sonnendeklination δ
  - Wahre Ortszeit (WOZ)
  - Stundenwinkel $\omega = (12\,\mathrm{h} - WOZ) \cdot 15°$

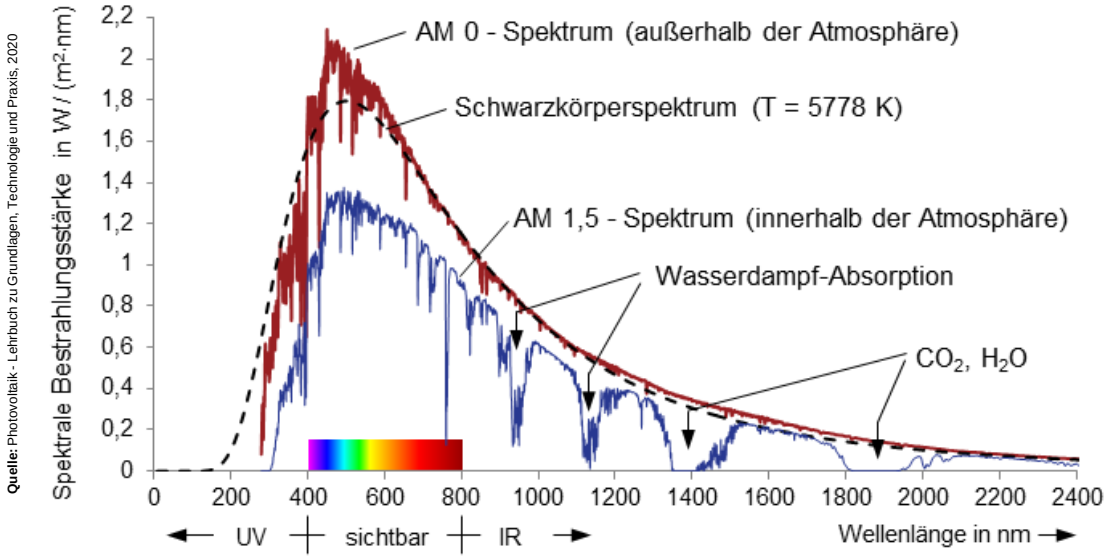


Quelle: Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, 2020 (modifiziert)

Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen

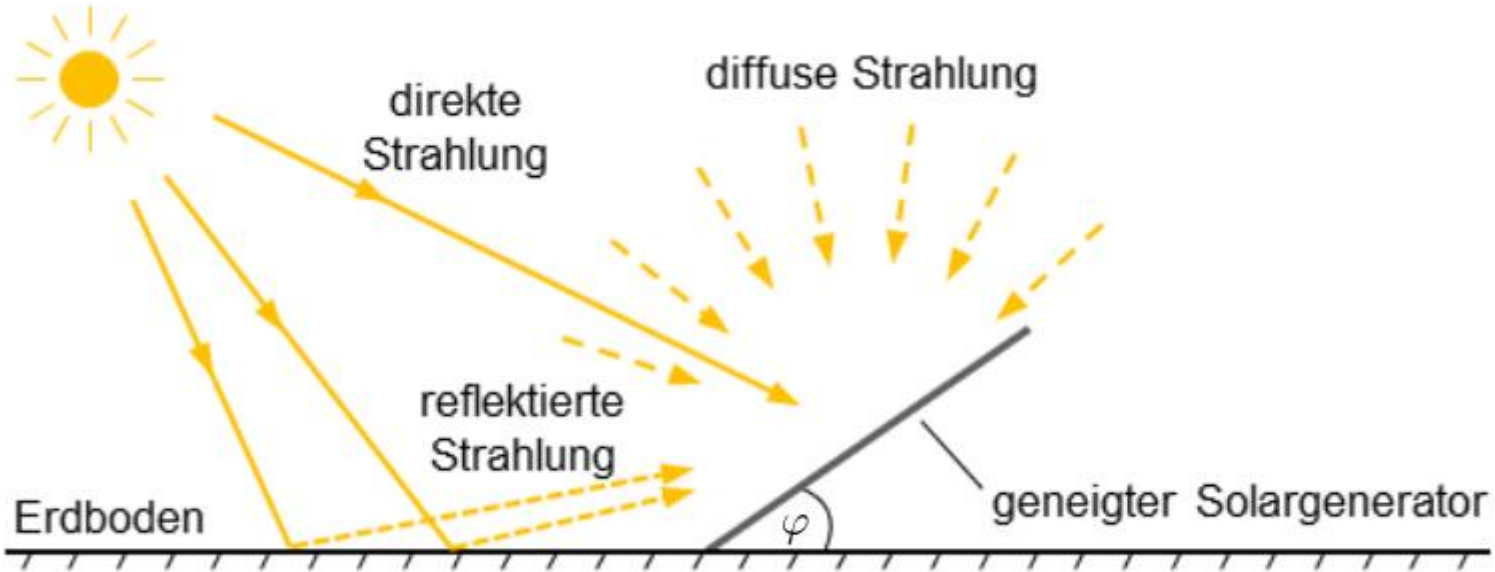
- Bestrahlungsstärke außerhalb Erdatmosphäre: $E_0 = 1361\,\mathrm{W\,m^{-2}}$
- Innerhalb wegen verschiedener Reduktionseinflüsse deutlich geringer:

$$E_{hor,glob} = E_0 \cdot \sin(\gamma_s) \cdot \left(1 - \frac{red}{100}\right)$$



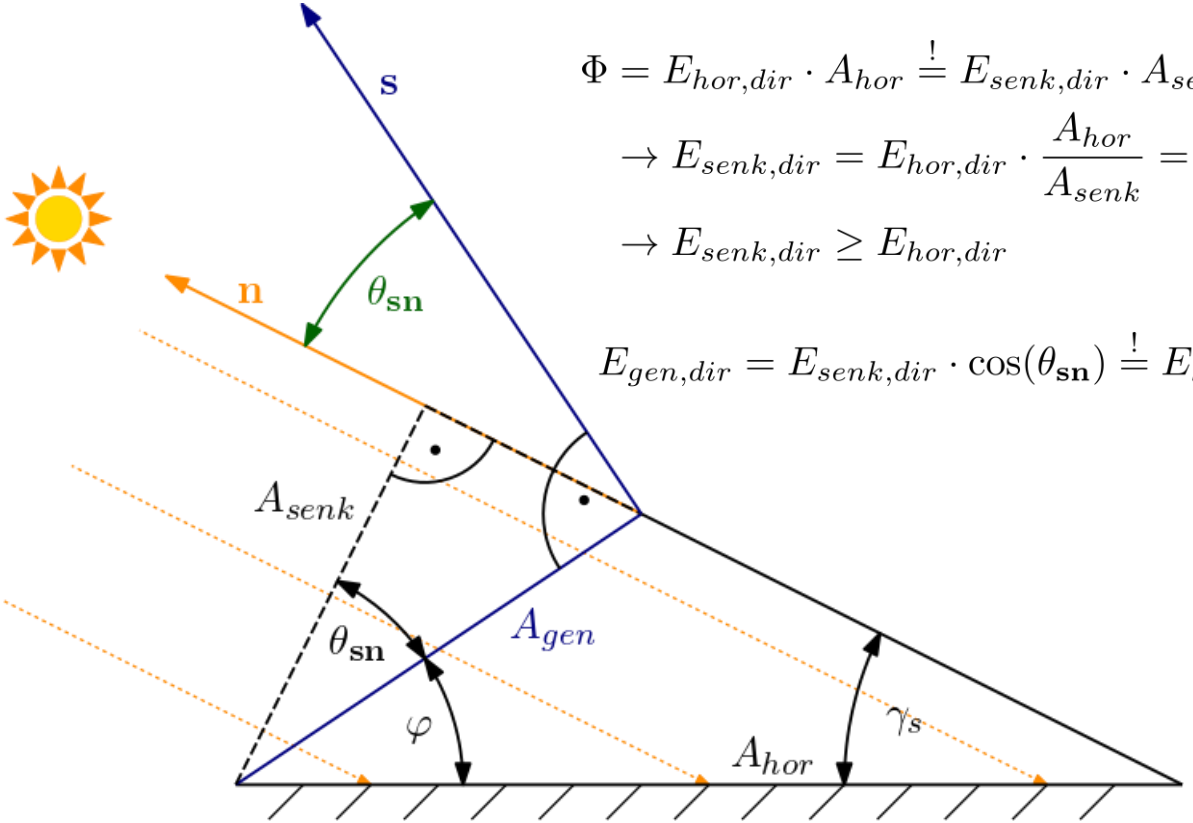
Anteile der Bestrahlungsstärke

$$E_{gen,glob} = E_{gen,dir} + E_{gen,dif} + E_{gen,ref}$$



Quelle: Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, 2020 (modifiziert)

Einfluss der Modulneigung auf direkte Strahlung



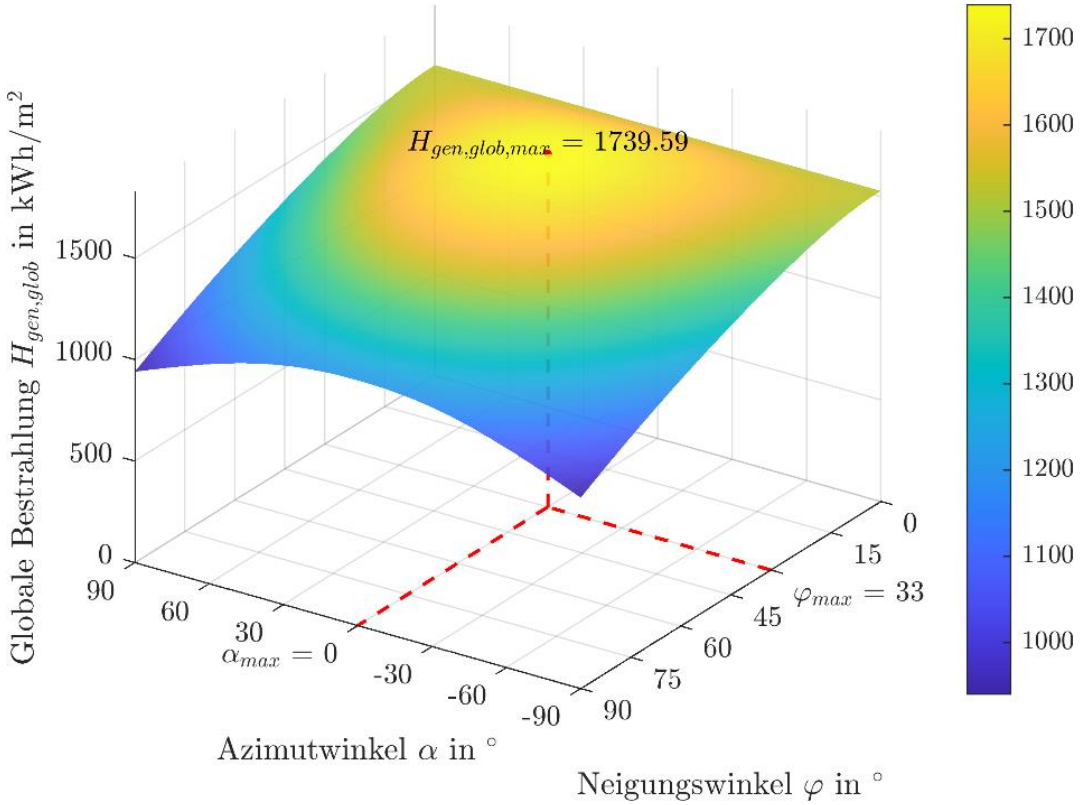
$$\Phi = E_{hor,dir} \cdot A_{hor} \stackrel{!}{=} E_{senk,dir} \cdot A_{senk}$$

$$\rightarrow E_{senk,dir} = E_{hor,dir} \cdot \frac{A_{hor}}{A_{senk}} = E_{hor,dir} \cdot \frac{1}{\sin(\gamma_s)}$$

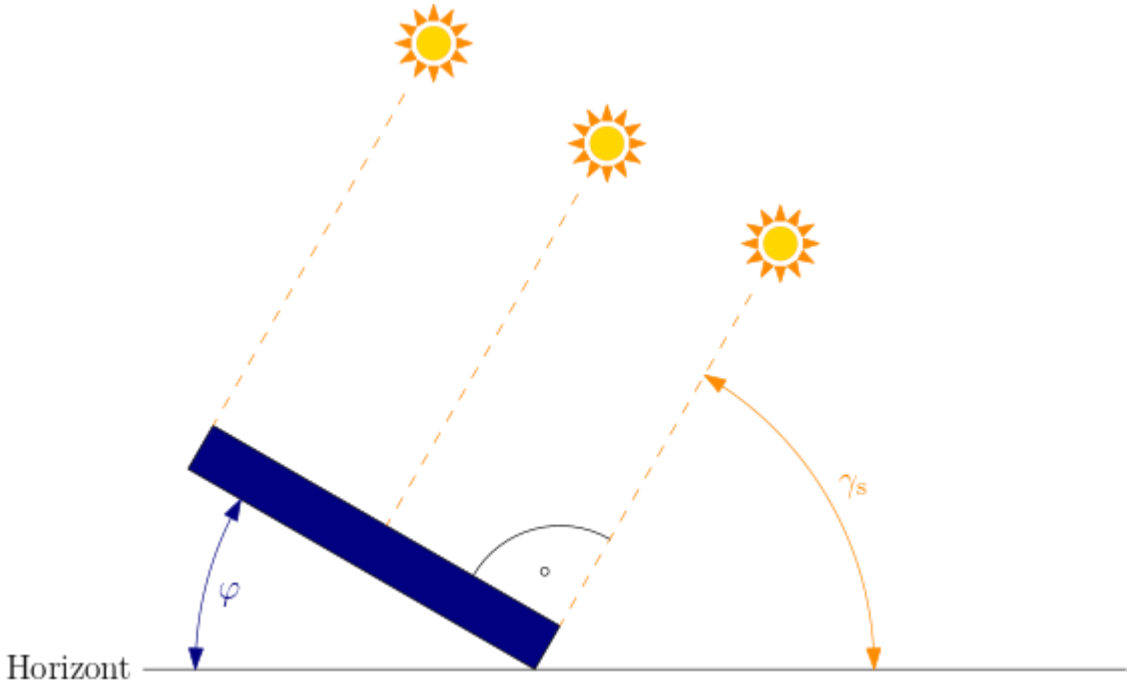
$$\rightarrow E_{senk,dir} \geq E_{hor,dir}$$

$$E_{gen,dir} = E_{senk,dir} \cdot \cos(\theta_{sn}) \stackrel{!}{=} E_{hor,dir} \cdot \frac{\cos(\theta_{sn})}{\sin(\gamma_s)}$$

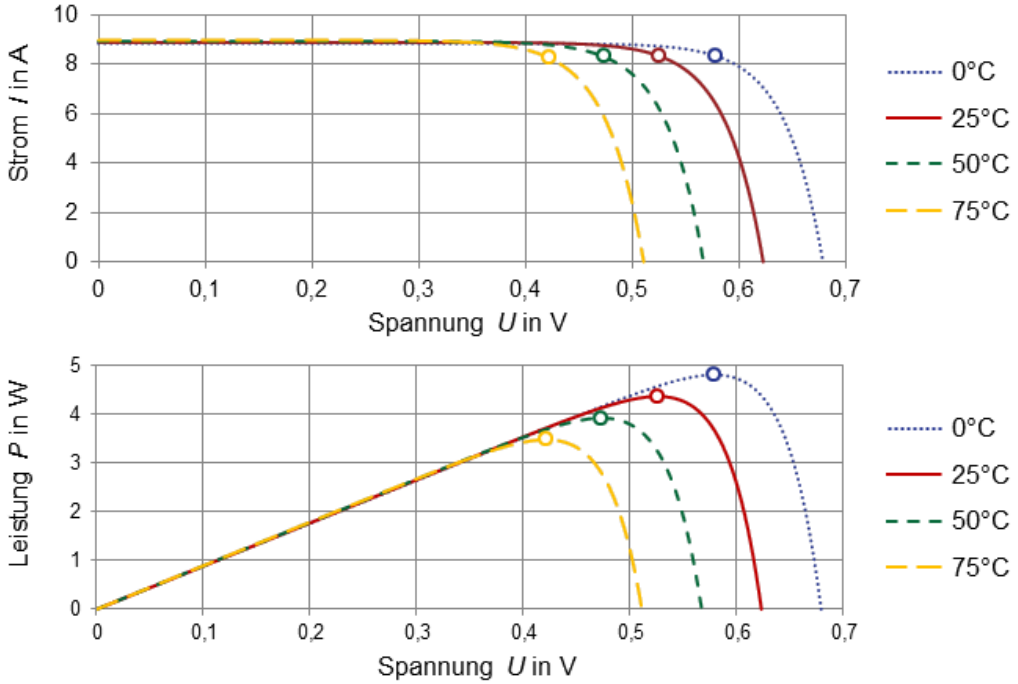
Empirische Optimierung

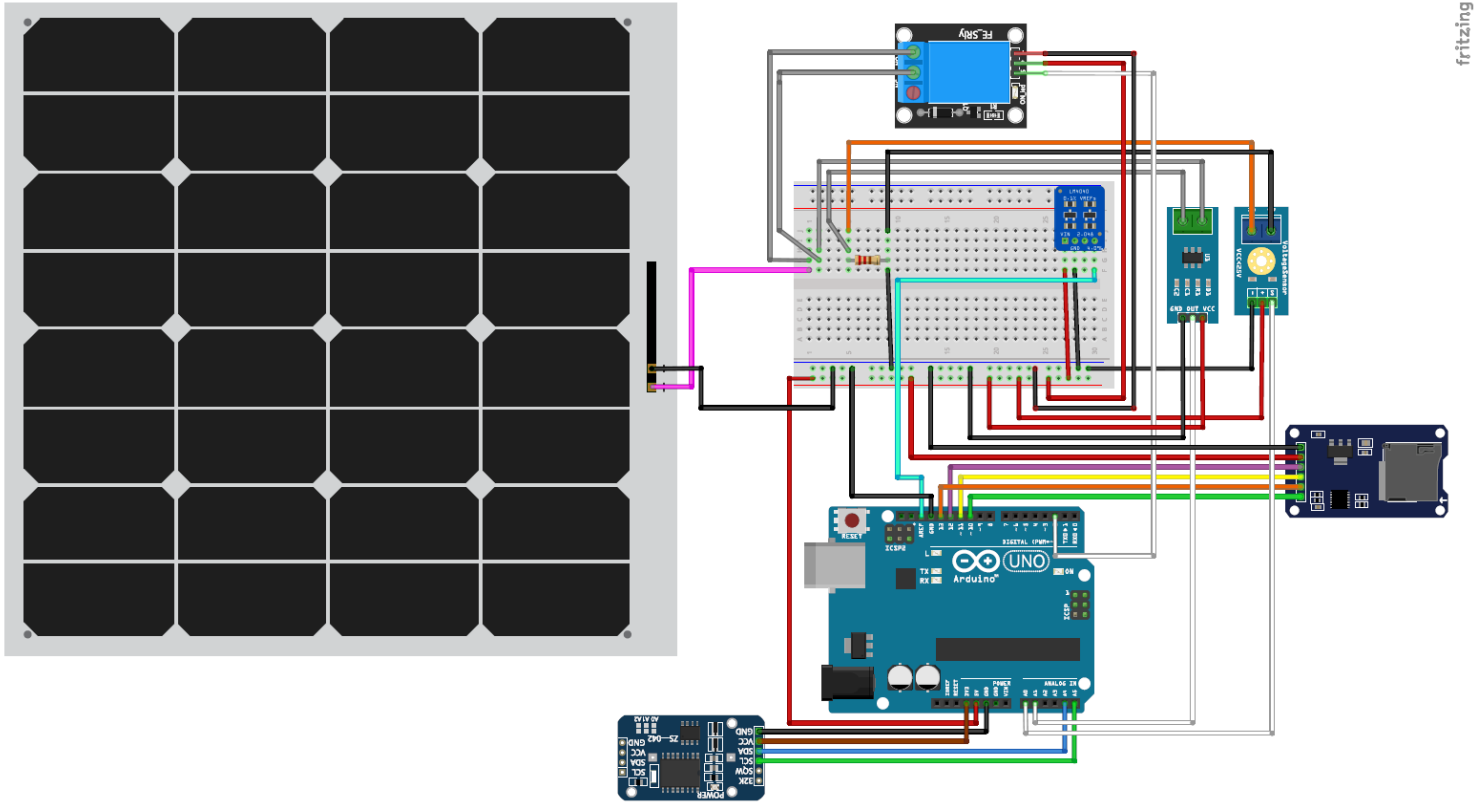


Zusammenhang Modulneigung Nachführsystem



Einfluss der Temperatur



Quelle: Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, 2020 (modifiziert)

Verschaltung Steckplatine