

# Verschattung – Berücksichtigung und Minimierung von Ertragsverlusten

Dipl.-Ing (FH) Philipp Vanicek  
Leiter Arbeitsgruppe PV-Ertragsgutachten  
Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie  
Landesverband Berlin Brandenburg

## Bedeutung der Verschattung

Eine Auswertung von über 500 PV-Anlagen in der Region Freiburg aus dem Jahr 2005 ergab das es bei etwa 50% der Anlagen zu ganzjähriger Verschattung kommt. Dadurch entstehen Ertragseinbußen zwischen 3% und 10%. Im Winter sind sogar mehr als 80% der Anlagen von Verschattung betroffen.

Verschattung stellt damit den häufigsten Mangel bei Planung und Ausführung dar.

Quelle: Wegweiser Solarstromanlagen – Auswertung zur Qualitätssicherung  
Herausgeber: Energieagentur Regio Freiburg GmbH, 2006



Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Arten von Verschattung

### Temporäre Verschattung:

- Verschmutzung
- Schnee

### Gebäudebedingte Verschattung

### Standortbedingte Verschattung

- nahe Objekte
- Horizonteinschränkung

### Eigenverschattung



Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Verschmutzung

- Stark Standortabhängig
- In Deutschland überwiegen Vogelexkreme und Laub
- In Südlichen Gefilden hingegen Staub
- Erhöhte Belastungen sind an Verkehrswegen sowie in der Nähe industrieller Anlagen zu erwarten
- Auch in Regionen mit intensiver Landwirtschaft sowie besonders auf den Dächern von Mastbetrieben ist mit zum Teil starker Verschmutzung zu rechnen

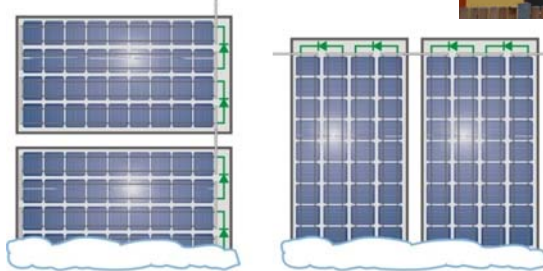




Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Schnee

- Meist vernachlässigbare Verluste
- Schnee schmilzt und rutscht von PV-Modulen schneller ab als von Ziegeldächern
- Während des Schneefalls kaum Einstrahlung
- Anders in alpinen Regionen und bei Schneeanhäufung



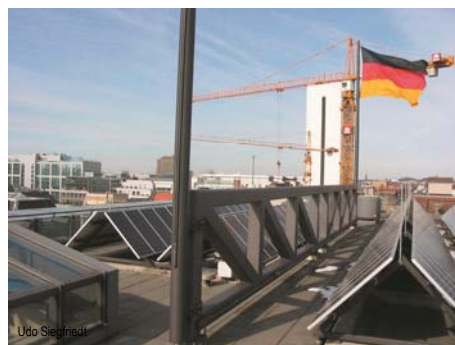
Ist von einer regelmäßigen Verschattung durch Schnee auszugehen kann dies bereits bei der Planung des Anlagenkonzeptes berücksichtigt werden



Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Gebäudebedingte Verschattungen

z. B. Schornsteine, Gauben, Antennen, Blitzableiter, Dach- und Fassadenvorsprünge, Lüfteraufbauten



Udo Siegmund



Solon SE



Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Standortbedingte Verschattungen

Häufigste und oft unterschätzte  
Verschattung  
z. B. Bäume, Nachbargebäude,  
Freileitungen, Zäune

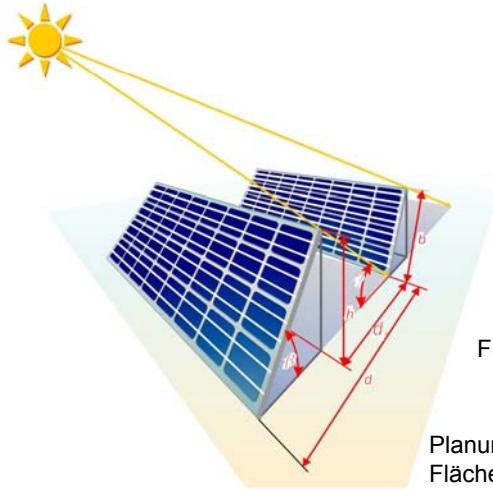


Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Eigenverschattung bei PV-Anlagen



## Verschattung bei aufgeständerten Anlagen



- $b$  - Modulbreite
- $h$  - Aufständerungshöhe
- $d$  - Modulreihenabstand
- $\beta$  - Neigungswinkel
- $d_r$  - Gestellabstand
- $\gamma$  - Abschattungswinkel

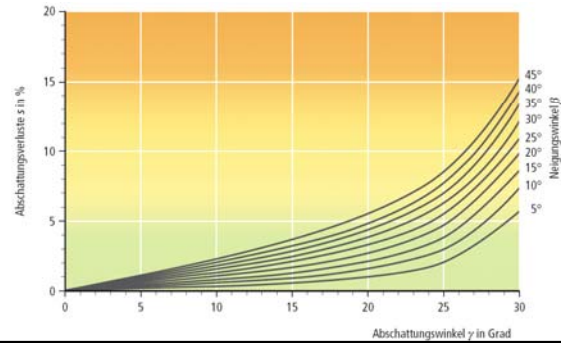
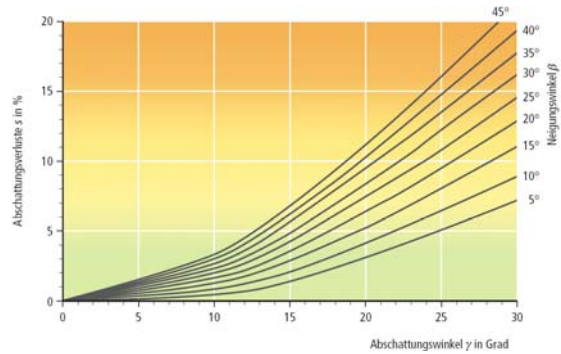
Flächennutzungsgrad  $f = \frac{b}{d}$

Planungsaufgabe: Optimierung zwischen Flächennutzung, Einstrahlungsgewinn und Abschattungsverlusten

## Optimierung des Reihenabstands

Neben dem Abschattungswinkel sind vor allem die Einstrahlungen im Winter zu berücksichtigen.

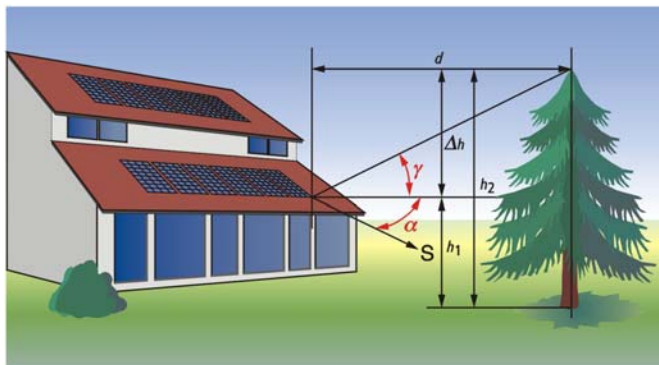
Standorte wie Spanien weisen auch im Winterhalbjahr nennenswerte Einstrahlungen auf. Um geringe Ertragsverluste zu erhalten muss daher der Abschattungswinkel kleiner sein als der Zenitwinkel der Sonne am 21. Dezember



## Verschattungsaufnahme und Auswertung

- Geometrische Verschattungsanalyse
- Verschattungsanalyse mittels Sonnenbahndiagramm auf Folie
- Digitale Verschattungsaufnahme
- Software gestützte Verschattungsanalyse

## Geometrische Verschattungsanalyse



### Bestimmung von Höhen- und Azimutwinkeln der Objekte:

$\gamma$  - Höhenwinkel

$h_1$  - Höhe der PV-Anlage

$\alpha$  - Azimut

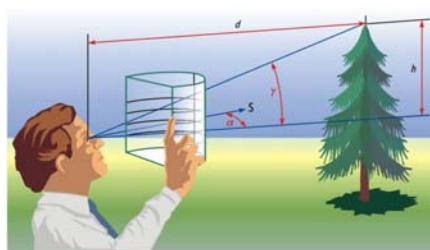
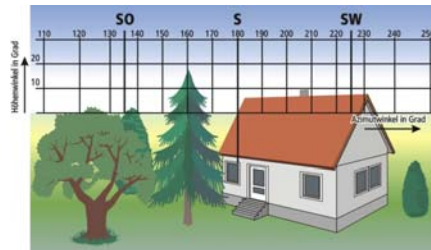
$h_2$  - Höhe des verschattenden Objektes

$d$  - Abstand zwischen PV-Anlage und verschattendem Objekt

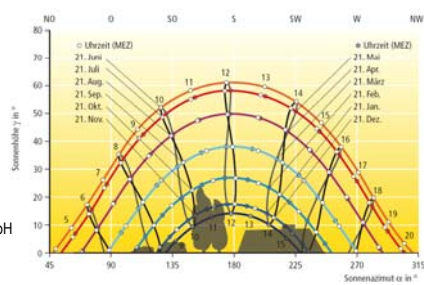


Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Verschattungsanalyse auf Folie



Sonnenbahn-  
indikator  
Bilder: sunovation GmbH



Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Digitale Verschattungsanalyse - HoriCatcher





Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

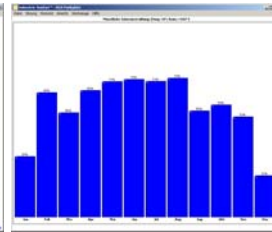
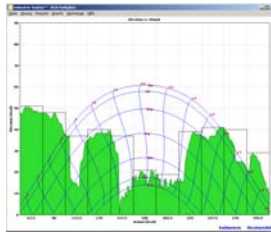
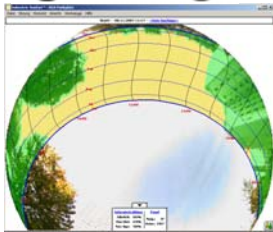
## Digitale Verschattungsanalyse - SunEye



Digitalfotos erstellen mit Fisheye-Objektiv

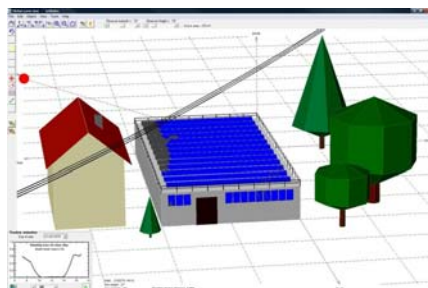
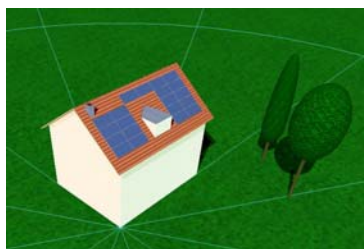
*Automatisches / manuelles Erstellen von Horizontlinien*

*Übergabe in Simulationsprogramme oder direkte Ausgabe von Verschattungsverlusten*

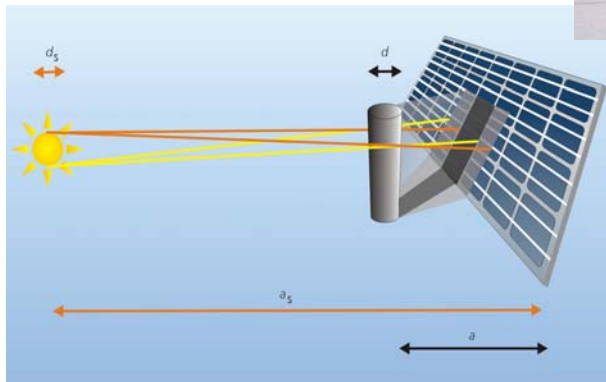


Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Softwaregestützte Verschattungsanalyse



## Nahverschattungen: Teilschatten und Kernschatten



ohne Kernschatten:

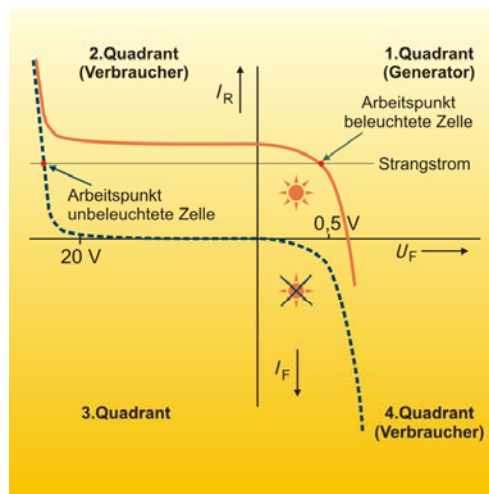
$$a_{opti} = \frac{a_s \times d}{d_s} = 108 \times d$$

Kernschatten in Zellbreite:

$a \geq a_{opti} - 1 \text{ m}$   
(Zellbreite 10 cm)

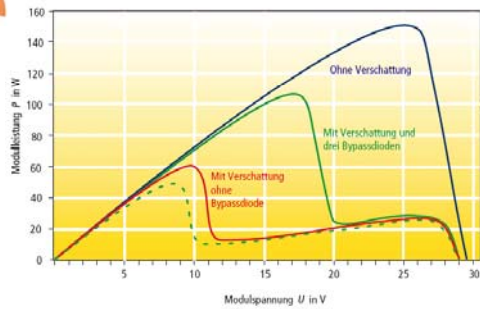
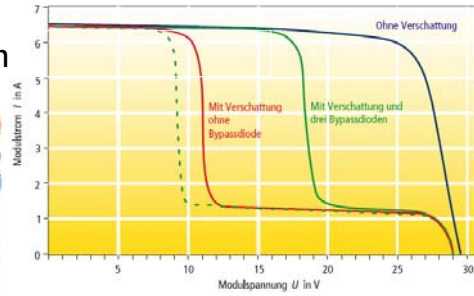
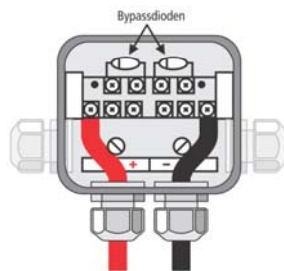
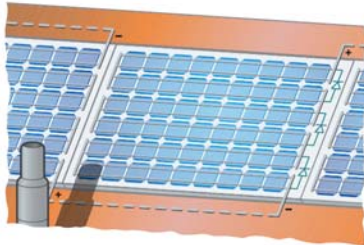
$a \geq a_{opti} - 2 \text{ m}$   
(Zellbreite 20 cm)

## Arbeitspunkte der beleuchteten und unbeleuchteten Zelle



Alle in Reihe geschalteten Zellen weisen den gleich Strom auf  
Jede Zelle hat einen Arbeitspunkt, der auf ihrer Kennlinie liegt  
Sind nur wenige Zellen verschattet, geben die unverschatteten Zellen den Strangstrom vor  
Der Arbeitspunkt der beleuchteten Zellen bleibt (nahezu) gleich  
Der Arbeitspunkt der verschatteten Zelle ist beim gleichen Strom, aber bei negativer Spannung  
Die Leistung der verschatteten Zelle ergibt sich aus dem Strangstrom und der (negativen) Spannung  
Die verschattete Zelle ist ein Verbraucher und muss die Leistung als Wärme abgeben

## Verschattung / Bypassdioden



## Optimierung bei verschatteten kristallinen Modulen



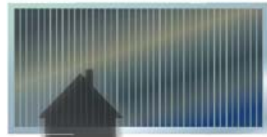
Schattenwurf auf 4 Module  
Insgesamt betroffen sind 7 Bypassdioden



Schattenwurf auf 2 Module  
Insgesamt betroffen sind 2 Bypassdioden

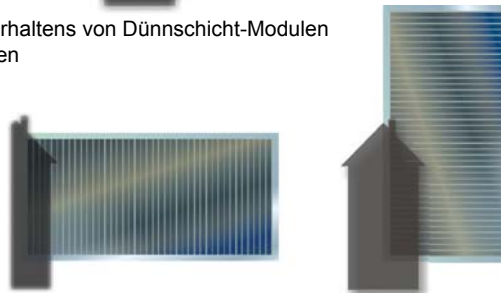
Beim Beispielgenerator mit 16 Modulen und 32 Bypassdioden ergibt sich durch die geänderte Modulmontage, dass sich die Verschattung statt auf 20% lediglich auf 6% der Bypassdioden auswirkt

## Verschattung bei Dünnschichtmodulen

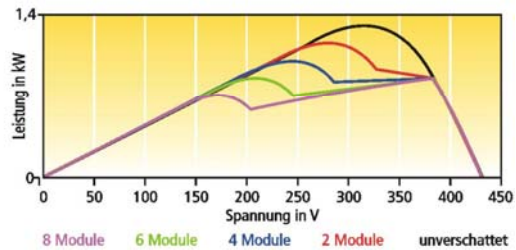
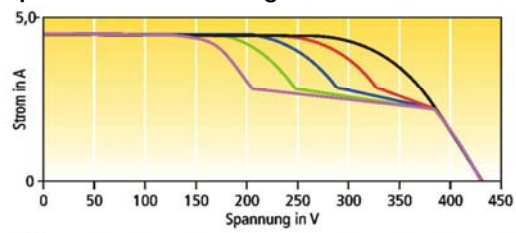
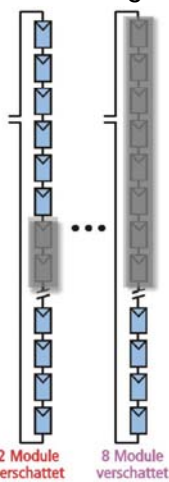


Vergleich des Verschattungsverhaltens von Dünnschicht-Modulen und kristallinen Silizium-Modulen

Anlagenplanung unter Beachtung der Verschattung bei Dünnschicht-Modulen

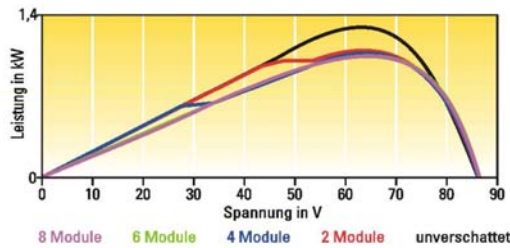
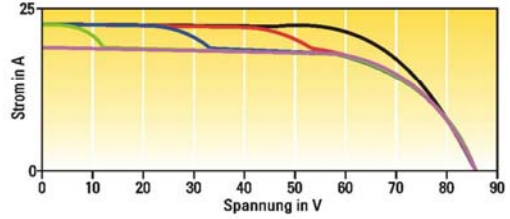
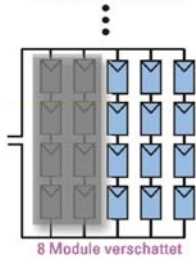
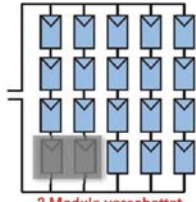


## Verschaltungskonzepte bei Verschattung



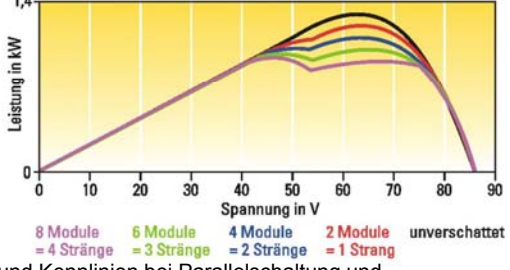
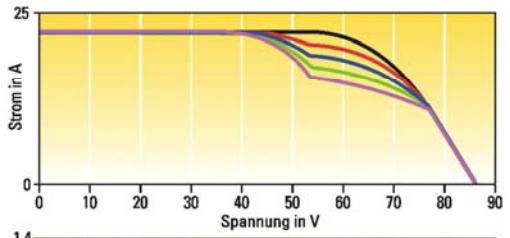
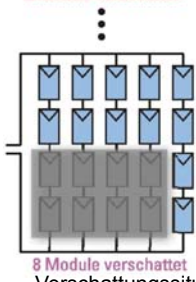
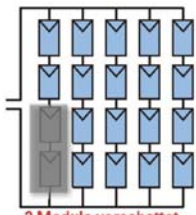
Verschattungssituation und Kennlinien bei Reihenschaltung

### Verschaltungskonzepte bei Verschattung



Verschattungssituation und Kennlinien bei Parallelschaltung und Verschattung in zwei Strängen

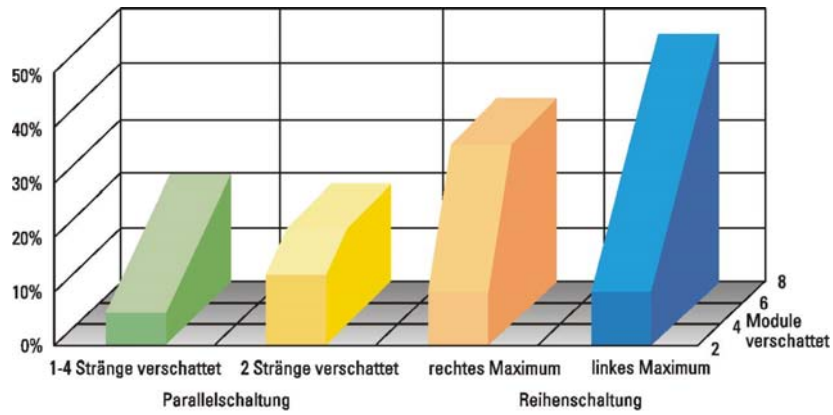
### Verschaltungskonzepte bei Verschattung



8 Module = 4 Stränge    6 Module = 3 Stränge    4 Module = 2 Stränge    2 Module = 1 Strang    unverschattet

Verschattungssituation und Kennlinien bei Parallelschaltung und Verschattung in ein bis vier Strängen

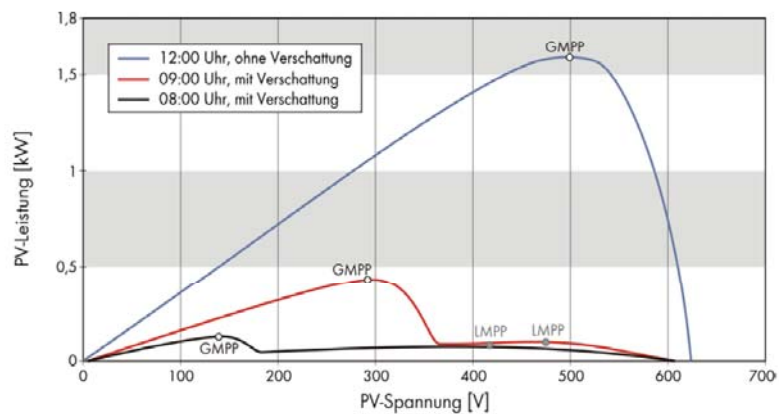
## Leistungsverluste abhängig vom Verschaltungskonzept



Bei der Parallelschaltung hängt der Verschattungsverlust von der Anzahl der verschatteten Stränge ab.

Bei der Reihenschaltung gibt es 2 mögliche Arbeitspunkte, die Verluste steigen mit der Anzahl der verschatteten Module

## Der „globale“ MPP



**Abbildung 1:** Leistungs-Spannungs-Kennlinie eines teilverschatteten PV-Generators zu drei verschiedenen Tageszeiten (zweimal mit Verschattung, einmal unverschattet)

## Ertragsverluste durch falsches Regeln

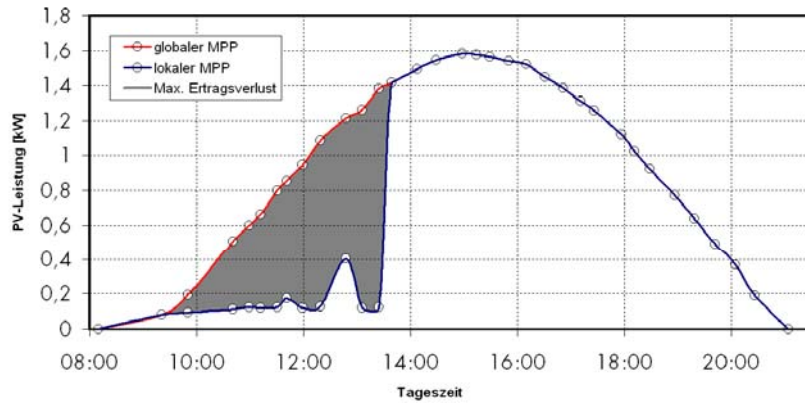


Abbildung 3: Verlauf der globalen bzw. lokalen MPP-Leistung eines Teilgenerators der PV-Anlage aus Abb. 2 mit morgendlicher Verschattung

## Weitere Optimierungsmöglichkeiten

### Multi-MPPT Wechselrichter

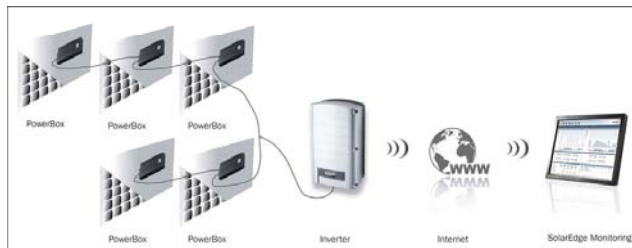
- Planungsintensiv

### Modulwechselrichter und Power Optimizer

- einfache Planung
- Zusatzfunktionen
- Langlebigkeit noch fraglich



Danfoss



SolarEdge



Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

## Zusammenfassung

### **Wichtigster Punkt: Verschattung erkennen**

- Lokalisieren von Objekten die zu Verschattung führen können
- Möglichen Verlust richtig einschätzen

### **Planung an die Verschattungssituation anpassen**

- Anlagenlayout in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten wählen (je weniger Module betroffen sind desto besser)
- Verschattung optimieren
- technische Möglichkeiten nutzen wenn es erforderlich ist



Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.  
International Solar Energy Society, German Section

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**