

Institut für Solartechnik SPF  
OST Ostschweizer Fachhochschule  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil  
Tel. +41 55 222 48 21, Fax +41 55 222 48 44  
www.spf.ch

Amt für Energie und Verkehr Graubünden  
Peter Müller  
Ringstrasse 10  
7001 Chur

## **Ertragssimulation vertikal montierter, bifazialer PV-Module**

*Autor(en):*  
Kanchan Bohara  
Evelyn Bamberger

*Tel:* 058 257 4829

*Datum:* 15. Februar 2023

## Zusammenfassung

Im Auftrag des Amts für Energie und Verkehr Graubünden wurden parametrische Simulationen für vertikal montierte, bifaziale Module am Standort Davos durchgeführt, wobei Ausrichtung, Reihenabstand und Albedo variiert wurden. Als Ausrichtungen wurden Ost-West, Süd-Nord und Südost-Nordwest betrachtet, der Reihenabstand wurde zwischen dem 2.5fachen und 1fachen der Modulhöhe variiert. Als Albedo wurden Werte von 0.25 (dunkle Dacheindeckung mit geringer Reflexion) und 0.8 (stark reflektierende Dacheindeckung) angenommen, sowie eine Variante mit niedriger Albedo der Dacheindeckung und schneebedecktem Dach im Winter mit hoher Albedo.

Bei ausreichend grossem Reihenabstand, so dass Reihenverschattungsverluste gering sind, liegt der Jahresenergieertrag für alle Ausrichtungen ähnlich hoch (1'177 bis 1'218 kWh/kWp bei Albedo 0.25). Deutliche Unterschiede gibt es dagegen im Winterstromanteil (Dezember bis März): Bei Südausrichtung ist er mit 34 % am höchsten, bei Ostausrichtung mit 25 % deutlich niedriger.

Bei einer Verringerung des Reihenabstands vom 2.5fachen auf das 1fache der Modulhöhe sinkt der spezifische Jahresertrag auf 66 % (Süd) bis 69 % (Ost). Dabei sinkt der Winterertrag stärker als der Sommerertrag. Bei Südausrichtung ist dieser Effekt besonders ausgeprägt, so dass der Winterstromanteil um 14 Prozentpunkte auf 20 % sinkt. Bei Ostausrichtung sinkt er nur geringfügig und liegt mit 23 % etwas höher.

Ein schneebedecktes Dach im Winter führt erwartungsgemäss zu einer Erhöhung des Winterstromanteils um 1 bis 4 Prozentpunkte gegenüber einer niedrigen Ganzjahresalbedo. Eine ganzjährig hohe Albedo (0.8) steigert den Jahresertrag gegenüber einer ganzjährig niedrigen Albedo (0.25) für alle Ausrichtungen ähnlich um 30-32 % bei grossen Reihenabständen und um 20-23 % bei geringen Reihenabständen aufgrund der zunehmenden Verschattung des Untergrunds. Der Ertrag steigt im Sommer stärker als im Winter, so dass der Winterstromanteil sinkt, allerdings in unterschiedlichem Mass je nach Ausrichtung. Eine hohe Albedo steigert den Winterertrag bei Südausrichtung nur geringfügig, bei Ostausrichtung deutlich stärker.

Für einen hohen spezifischen Winterertrag sollten die PV-Module möglichst nach Süden mit ausreichend hohem Reihenabstand für eine niedrige Reihenverschattung installiert werden. Durch eine Verringerung des Reihenabstands kann der Jahresertrag auf der gleichen genutzten Dachfläche gesteigert werden. Der Winterertrag sinkt allerdings bei Südausrichtung, während er bei Ostausrichtung steigt. Bei Ostausrichtung und 1 m Reihenabstand wird auf der gleichen genutzten Dachfläche in etwa der gleiche Winterertrag erreicht wie bei Südausrichtung und 2.5 m, allerdings mit der 2.5fachen installierten Leistung.

Im Tagesverlauf ist für die Südausrichtung eine charakteristische Mittagsspitze zu sehen, während es bei Ostausrichtung jeweils ein Vormittags- und ein Nachmittagspeak gibt. Gleiches gilt für die Südostausrichtung, wobei hier das Vormittagspeak ausgeprägter ist. Damit wird je nach individuellem Verbrauchsprofil häufig ein höherer PV-Eigenverbrauch erreicht.

Alle Aussagen gelten für den betrachteten Standort. Je nach Horizont- und Nahverschattung, beispielsweise durch Nachbargebäude oder Bäume in einer bestimmten Richtung, verfügbarer Dachfläche etc. kann sich die Situation ändern. Wichtig ist ebenfalls ein Bewusstsein für die Zielsetzung, ob etwa ein hoher spezifischer oder absoluter Jahres- oder Winterertrag, ein bestimmter Tagesverlauf etc. erreicht werden soll, von der die optimale Lösung abhängt.

---

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Randbedingungen</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Betrachtetes PV-System</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Simulationsergebnisse</b> .....	<b>4</b>
3.1	Einstrahlung und Verschattung .....	4
3.2	Jährlicher und monatlicher Energieertrag .....	9
3.2.1	Energieertrag Basisvariante (Albedo 0.25) .....	9
3.2.2	Energieertrag bei einer Albedo von 0.74 für die Wintermonate .....	11
3.2.3	Energieertrag bei einer Albedo von 0.8.....	13
3.3	Stromerzeugung im Winter .....	14
3.4	Energieertrag im Tagesverlauf.....	15

---

# 1 Einleitung und Randbedingungen

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Amtes für Energie und Verkehr Graubünden für die Berechnung des Energieertrags von vertikal montierten, bifazialen PV-Modulen erstellt, die in drei verschiedenen Richtungen (Ost-West, Süd-Nord, Südost-Nordwest) ausgerichtet sind. Für die Energieertragsanalyse wurden verschiedene parametrische Simulationen durchgeführt, bei denen neben der Ausrichtung auch der Reihenabstand zwischen den PV-Modulen und die Albedo variiert wurden.

Die Simulationen wurden für den Standort Davos durchgeführt, die genaue Lage ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Breitengrad und der Längengrad des Standorts betragen  $46.485^\circ$  bzw.  $9.506^\circ$  auf einer Höhe von 1'562 m.



Abbildung 1: Standort in Davos in Google Maps

Für die Simulation wurde die Software PVsyst Version 7.2.21 verwendet. Die Software verfügt über eine umfangreiche Wetterdatenbank von Meteonorm, zusätzlich können je nach gewähltem Standort synthetische Wetterdaten in stündlicher Auflösung erzeugt werden. Für die Simulation wird die Wetterdatenbank des nahegelegenen Meteo-Standortes in Davos verwendet.

In Abbildung 2 ist das Sonnenstandsdiagramm für den gewählten Standort dargestellt, welches den Sonnenstand im Tages- und Jahresverlauf sowie die Horizontlinie zeigt, die für die Horizontverschattungsanalyse in PVsyst verwendet wird. Die Abbildung zeigt, dass die Verschattung morgens etwas höher sein wird als tagsüber und abends.

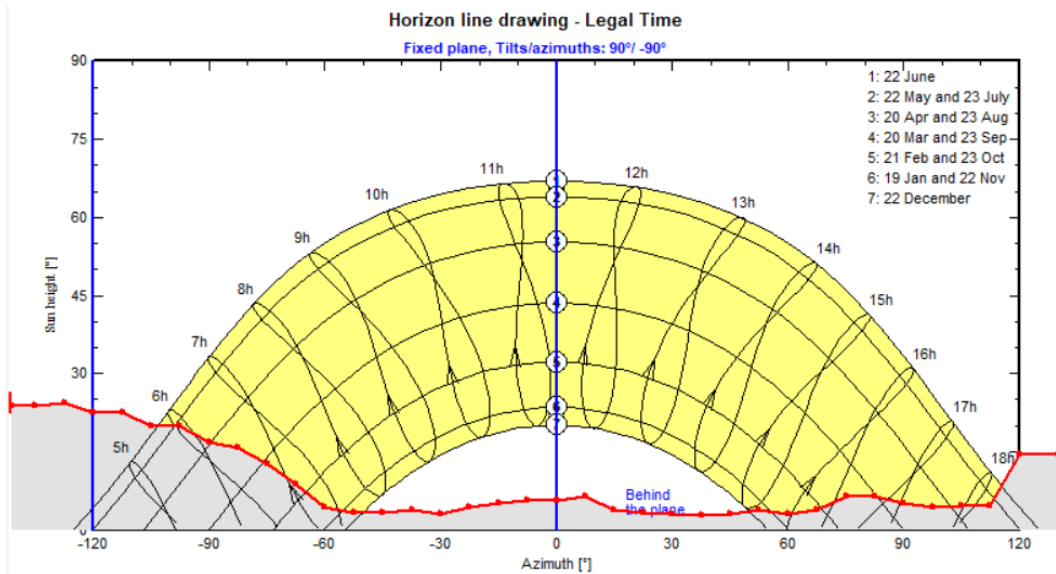


Abbildung 2 Sonnenstandsdiagramm mit Horizontlinie für den Standort in Davos

## 2 Betrachtetes PV-System

Für die Simulation wird eine PV-Aufdachanlage mit etwa 10 kWp Nennleistung angenommen, wobei das aktive PV-Feld etwa 60 m<sup>2</sup> gross ist. Die Module sind vertikal montiert und es werden bifaziale Module eingesetzt. Tabelle 1 zeigt die technischen Details des gewählten Modultyps. Es werden 36 Module angenommen, die in drei Reihen in Strings mit jeweils 12 Modulen angeordnet sind. Abbildung 3 zeigt die Anordnung der PV-Module auf dem Dach in der Software PVsyst. Die drei Strings sind an einen Wechselrichter mit einer Leistung von 10 kW AC angeschlossen.

Tabelle 1 Technische Daten des für die Simulation verwendeten bifazialen PV-Moduls

Modultyp	HJT 290
Hersteller	Meyer Burger AG
Nennleistung	290 Wp
Modulwirkungsgrad	17.7 %
Abmessungen (Länge x Breite x Höhe)	1.656 m x 0.991 m x 0.0065 m
Bifazialitätsfaktor	0.9
Temperaturkoeffizient	-0.28 %/°C

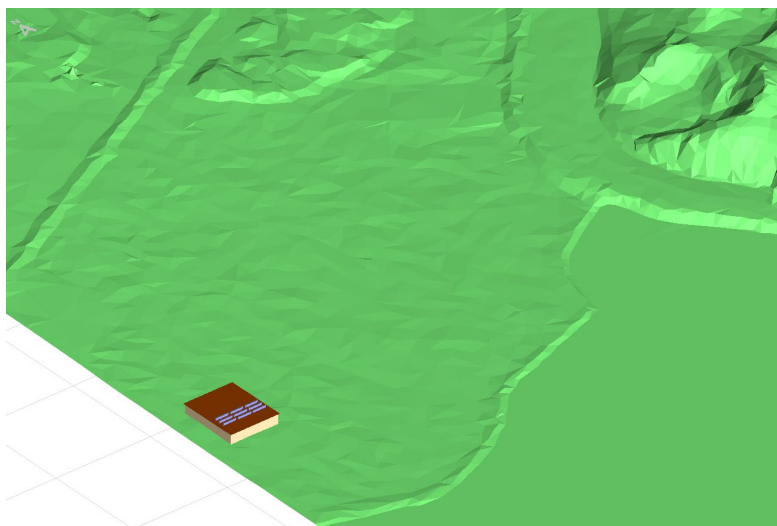


Abbildung 3 PV-Module auf einem Dach in Davos, dargestellt in der Software PVsyst (Quelle der 3D-Raumdaten: SwissALTI3D - Geodaten-Referenz (Bundesamt für Landestopografie, 2022))

Um den Energieertrag des Systems zu analysieren, werden Jahressimulationen auf Stundenbasis durchgeführt. Es werden drei unterschiedliche Ausrichtungen der bifazialen Module simuliert: Ost-West, Süd-Nord und Südost-Nordwest. Die Azimutwerte für diese Ausrichtungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

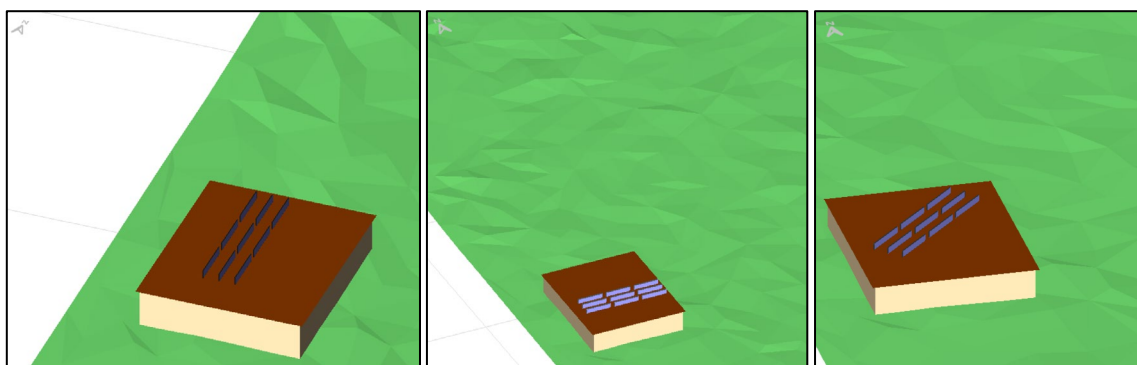


Abbildung 4 Ausrichtung der bifazialen PV-Modulen in Ost-West (links), Süd-Nord (Mitte) und Südost-Nordwest (rechts)

Tabelle 2 Azimutwinkel der unterschiedlichen Ausrichtungen

Modulausrichtung	Azimut (°)
Ost-West	-90
Süd-Nord	0
Südost – Nordwest	-45

Der Abstand zwischen den Modulreihen wird mit 2.5 m, 2 m und 1 m angenommen bei einer Modulhöhe von ca. 1 m, was Verschattungswinkeln von ca. 22°, 26° und 45° entspricht. Zusätzlich werden unterschiedliche Dacheindeckungen mit verschiedenen Reflexionsgraden (Albedo) betrachtet. Als Standardfall wird von einer eher dunklen Dacheindeckung mit geringer Reflexion ausgegangen. Eine im Winter vorhandene Schneedecke wird zu deutlich höherer

Reflexion des Sonnenlichts führen, hierfür wird eine Albedo von 0.74 angenommen (Mischung aus Neu- und Altschnee). Es wird von einer Schneebedeckung von Dezember bis März ausgegangen. Als weiterer Vergleich wird eine gut reflektierende, weisse Dachfolie simuliert. Tabelle 3 zeigt die für die Simulation verwendeten Albedowerte (Durchschnittswerte).

Tabelle 3 Für die Simulationen verwendete Albedowerte

Dacheindeckung	Albedo
Dunkle Dacheindeckung (z.B. Dachpappe oder Gründach)	0.25
Schnee (von Dezember bis März)	0.74
Weisse Dachfolie	0.80

Für die Einstrahlungs- und Ertragsberechnung sollen ausschliesslich mittlere Modulreihen berücksichtigt werden, die sowohl eine Modulreihe davor als auch dahinter haben und somit von beiden Seiten Reihenverschattung erfahren. Dafür werden vor der ersten und hinter der letzten Reihe Abschattungsobjekte in Modulgrösse und mit dem gleichen Abstand verwendet (Abbildung 5). Dies ist notwendig, da PVsyst nicht über die Möglichkeit verfügt, den Energieertrag reihenweise (oder stringweise) zu berechnen.

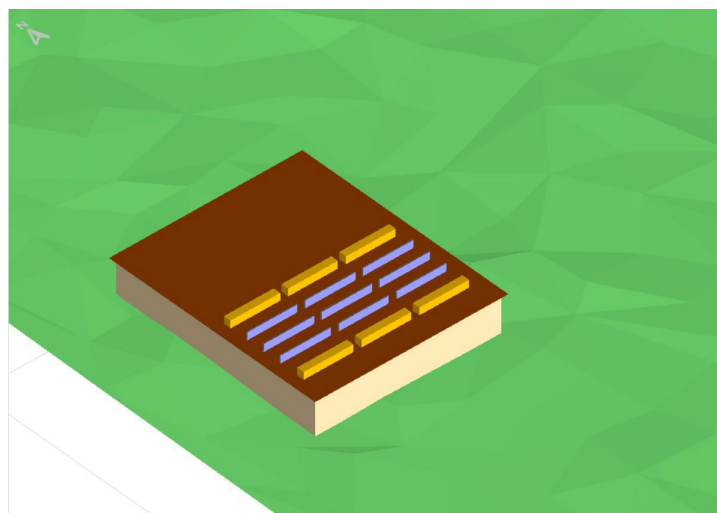


Abbildung 5 Verschattungsobjekte in der ersten und letzten Reihe bei einer nach Süden ausgerichteten PV-Anlage und Reihenabstand 2.5 m

### 3 Simulationsergebnisse

#### 3.1 Einstrahlung und Verschattung

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Einstrahlung auf die Modulebene betrachtet. Ausgangspunkt ist die jährliche Globalstrahlung, also die gesamte, auf die horizontale Fläche innerhalb eines Jahres einfallende Solarstrahlung. Diese beträgt etwa 1'443 kWh/m<sup>2</sup>. Um die effektive Einstrahlung auf die Modulebene zu erhalten, wird der Neigungswinkel der Module einbezogen, Nah- und Horizontverschattungsverluste sowie sonstige optische Verluste abgezogen, und Bodenreflexionen berücksichtigt. Der ausgewiesene Wert berücksichtigt nur

die Einstrahlung auf die Frontseite des Moduls, nicht die auf die Rückseite. Als Nahverschattungsverluste werden im vorliegenden Fall ausschliesslich Verluste durch die gegenseitige Reihenverschattung betrachtet. Durch eine Verringerung des Reihenabstands steigt die gegenseitige Verschattung der Modulreihen untereinander, die Nahverschattung steigt also und die effektive Einstrahlung sinkt. Für die Berechnung wird eine Albedo von 0.25 verwendet.

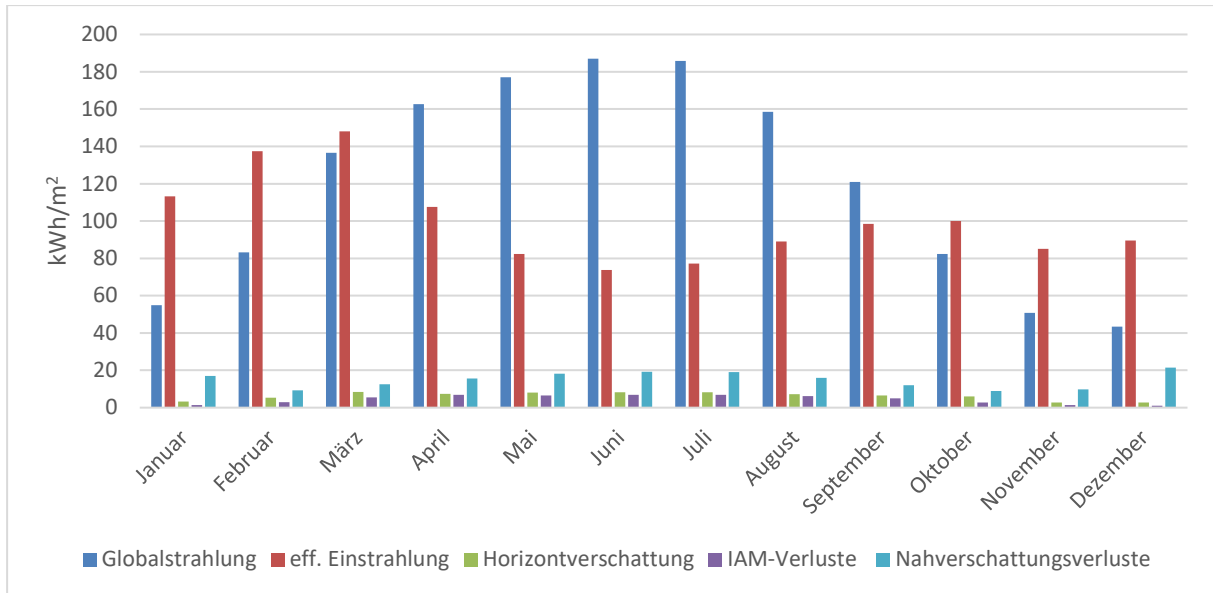


Abbildung 6 Globalstrahlung, effektive Einstrahlung und Verschattungsverluste in Südausrichtung bei einem Abstand von 2.5 m

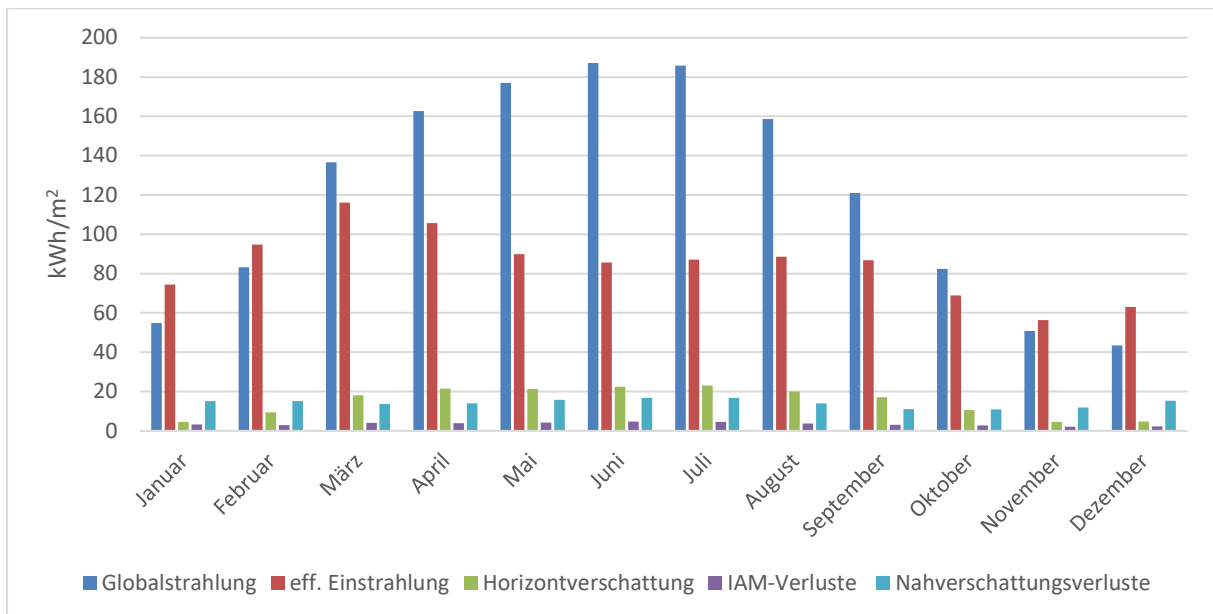


Abbildung 7 Globalstrahlung, effektive Einstrahlung und Verschattungsverluste in Südostausrichtung bei einem Abstand von 2.5 m



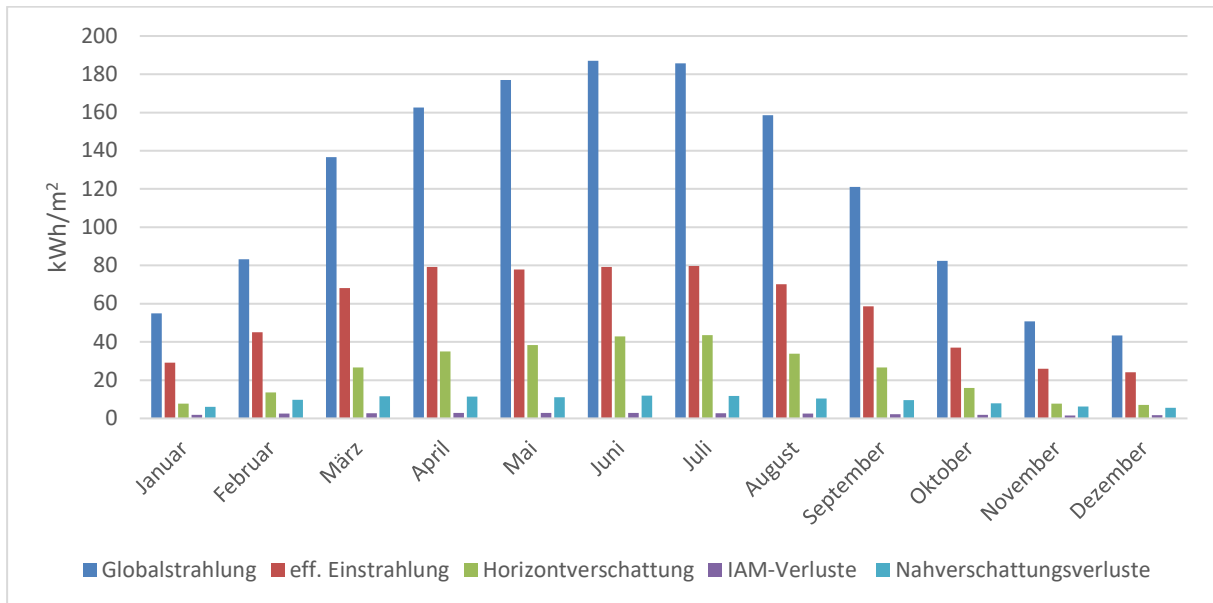


Abbildung 8 Globalstrahlung, effektive Einstrahlung und Verschattungsverluste in Ostausrichtung bei einem Abstand von 2.5 m

Die Horizontverschattung ist bei einer Ostausrichtung am höchsten, während die Nahverschattung bei allen drei Varianten ähnlich hoch liegt. Wird der Abstand auf 2 m verringert, erhöhen sich die Reihenverschattungsverluste erwartungsgemäss.

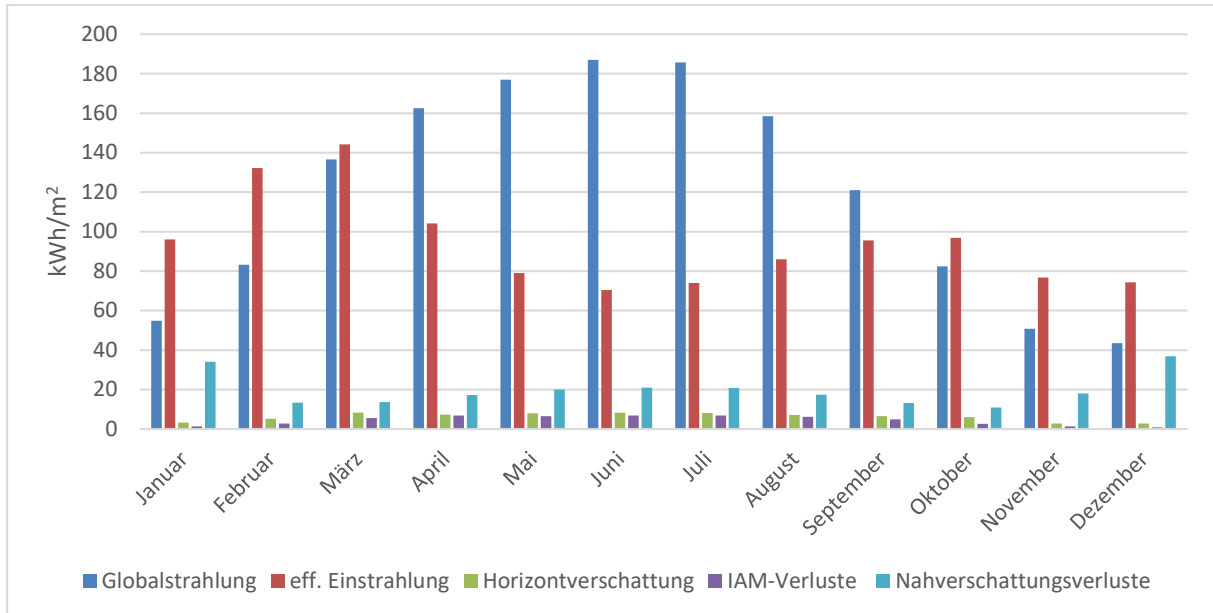


Abbildung 9 Globalstrahlung, effektive Einstrahlung und Verschattungsverluste in Südausrichtung bei einem Abstand von 2 m

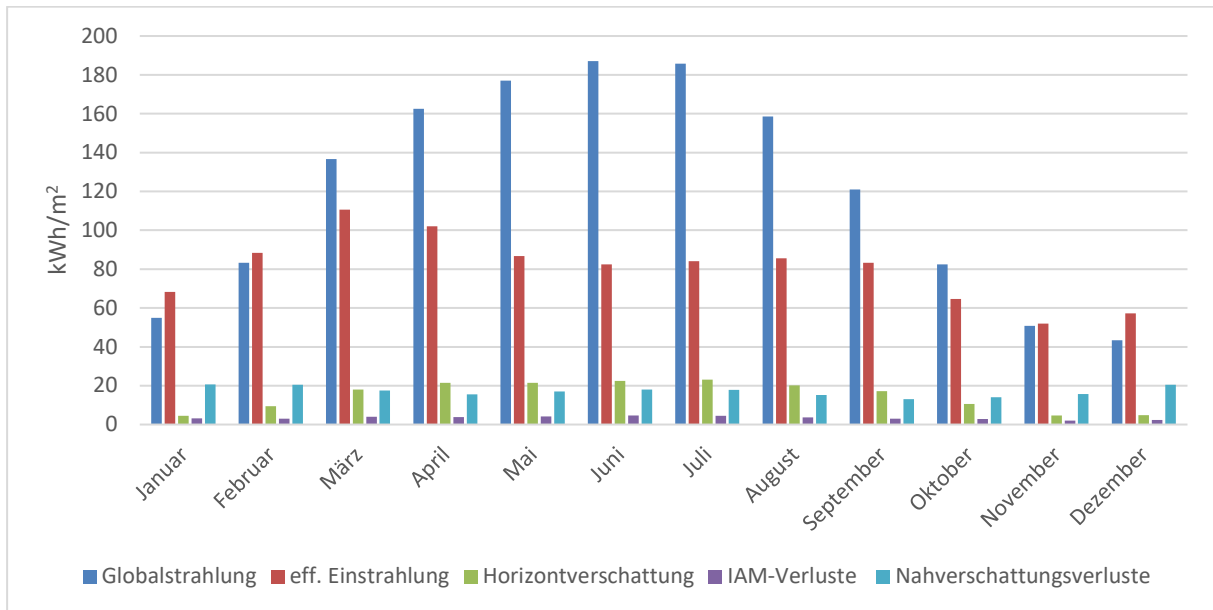


Abbildung 10 Globalstrahlung, effektive Einstrahlung und Verschattungsverluste in Südostausrichtung bei einem Abstand von 2 m

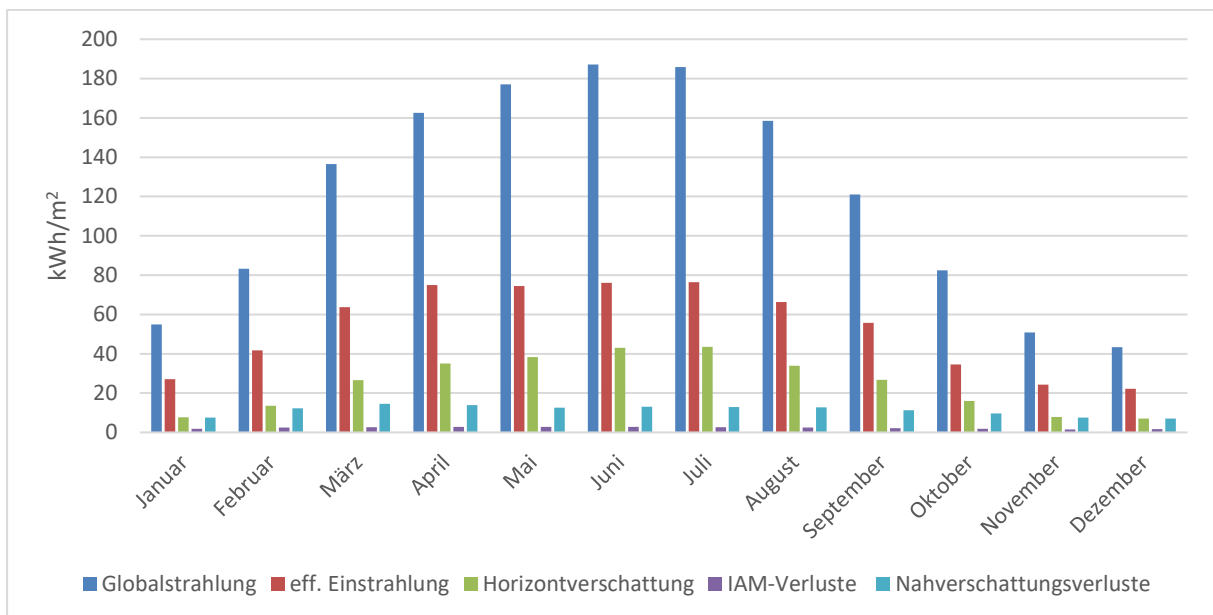


Abbildung 11 Globalstrahlung, effektive Einstrahlung und Verschattungsverluste in Ostausrichtung bei einem Abstand von 2 m

Bei einer weiteren Verringerung des Abstands auf 1 m steigen die jährlichen Nahverschattungsverluste bei der Südausrichtung am stärksten und dort vor allem im Winter. Über ein Jahr betrachtet steigen die Nahverschattungsverluste bei Südausrichtung auf das 2.7-fache, bei Südostausrichtung auf das 2.4-fache und bei Ostausrichtung auf das 2.3-fache im Vergleich zu diesen Ausrichtungen mit einem Reihenabstand von 2.5 m.

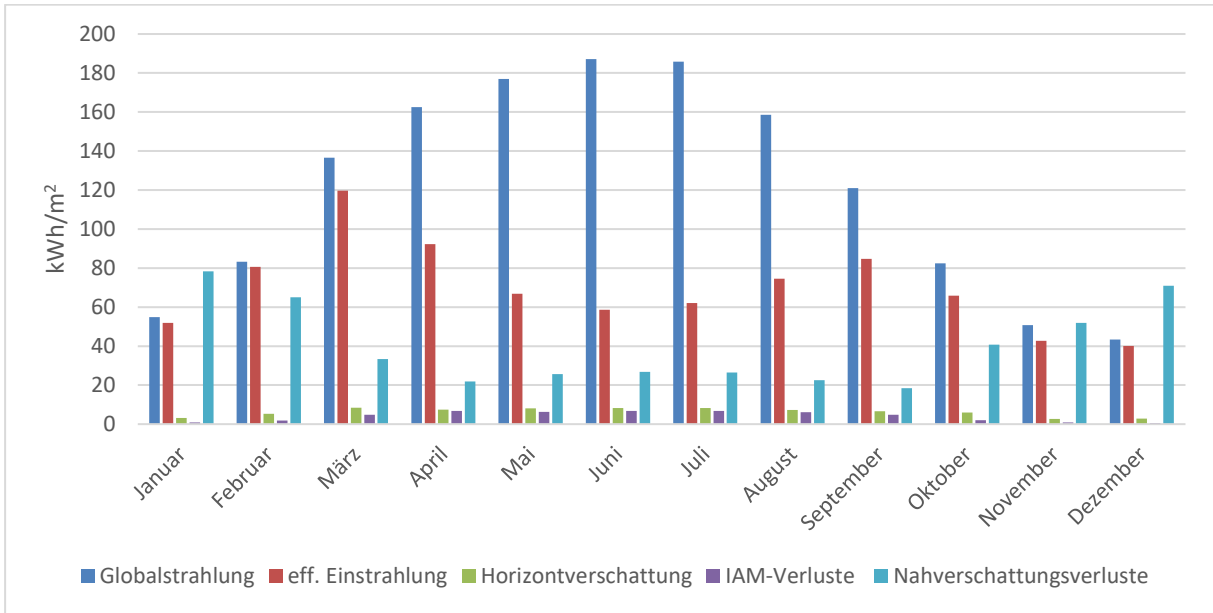


Abbildung 12 Globalstrahlung, effektive Einstrahlung und Verschattungsverluste in Südausrichtung bei einem Abstand von 1 m

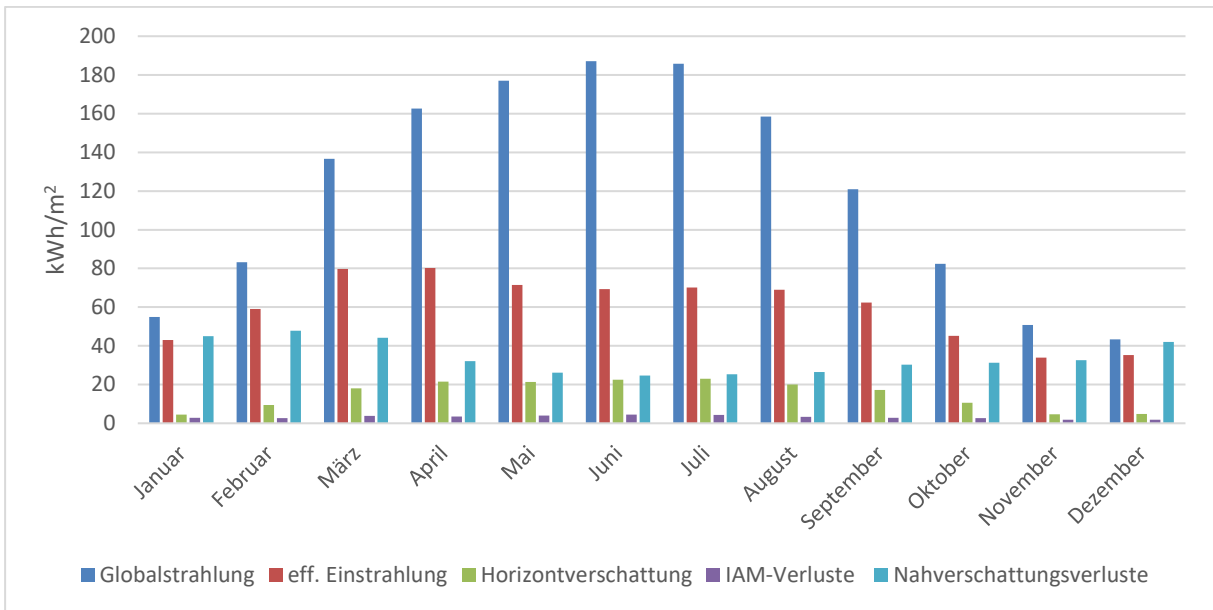


Abbildung 13 Globalstrahlung, effektive Einstrahlung und Verschattungsverluste in Südostausrichtung bei einem Abstand von 1 m

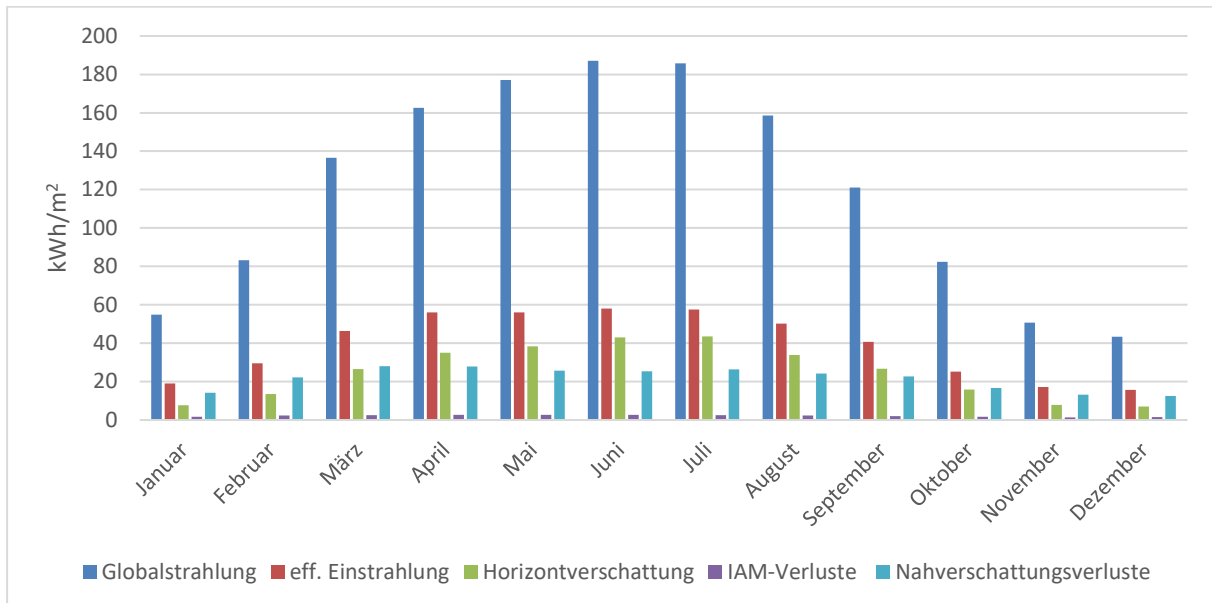


Abbildung 14 Globalstrahlung, effektive Einstrahlung und Verschattungsverluste in Ostausrichtung bei einem Abstand von 1 m

### 3.2 Jährlicher und monatlicher Energieertrag

Durch die Reihenverschattung entstehen neben Einstrahlungsverlusten auch elektrische Verluste, da der Strom im Modul von der schwächsten Zelle und im String vom schwächsten Modul beeinflusst wird. Im Folgenden wird daher der wechselstromseitige (AC) Energieertrag betrachtet, also die vom Wechselrichter erzeugte Energie. Es wird jeweils der spezifische Energieertrag in kWh/kW<sub>p</sub> ausgegeben.

Neben der Variation von Ausrichtung und Reihenabstand werden auch die Albedowerte variiert, um ihre Auswirkungen auf den jährlichen und monatlichen Energieertrag zu analysieren. Der Abstand zwischen Dach und Modulunterkante beträgt 0.2 m.

#### 3.2.1 Energieertrag Basisvariante (Albedo 0.25)

Tabelle 4 zeigt den jährlichen Energieertrag für die unterschiedlichen Ausrichtungen und Reihenabstände bei einer Albedo von 0.25. Bei einem Reihenabstand von 2.5 m ist der Jahresertrag für alle Ausrichtungen ähnlich hoch, allerdings unterscheidet sich die Verteilung über das Jahr gesehen deutlich, wie Abbildung 15 bis Abbildung 17 zeigen. Bei abnehmendem Reihenabstand sind die Verschattungsverluste für die Südausrichtung am stärksten, insbesondere im Winter. Der Winterertrag (Dezember bis März) ist bei 2.5 m Reihenabstand für die Südausrichtung noch am höchsten, bei 1 m Abstand am niedrigsten. Der Jahresenergieertrag liegt bei 1 m Reihenabstand bei Ostausrichtung ca. 12 % höher als bei Südausrichtung.

Tabelle 4 Jährlicher Energieertrag bei einer Albedo von 0.25

Ausrichtung	Jährlicher Energieertrag (kWh/kWp)		
	2.5 m Reihenabstand	2 m Reihenabstand	1 m Reihenabstand
Süd	1'218	1'089	646
Südost	1'196	1'102	679
Ost	1'177	1'086	727

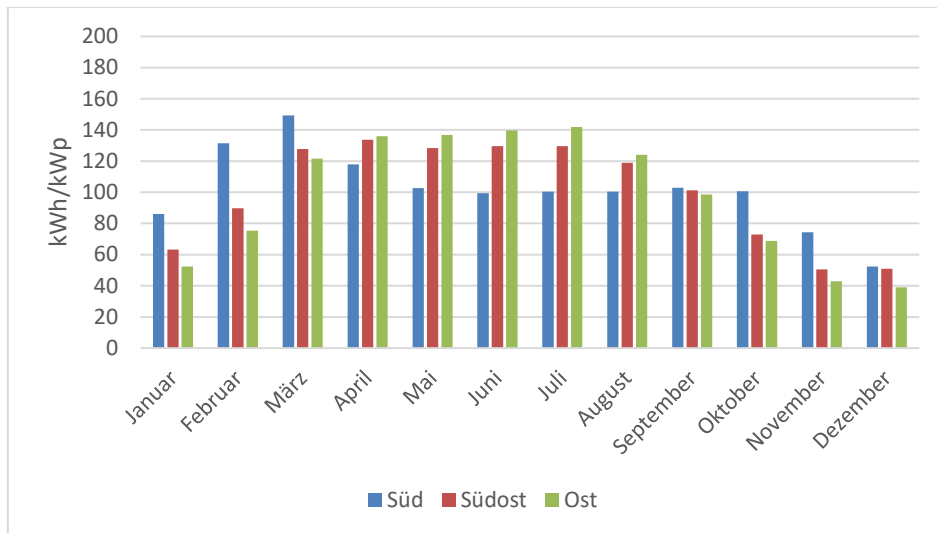


Abbildung 15 Monatlicher Energieertrag bei einem Reihenabstand von 2.5 m und einer Albedo von 0.25

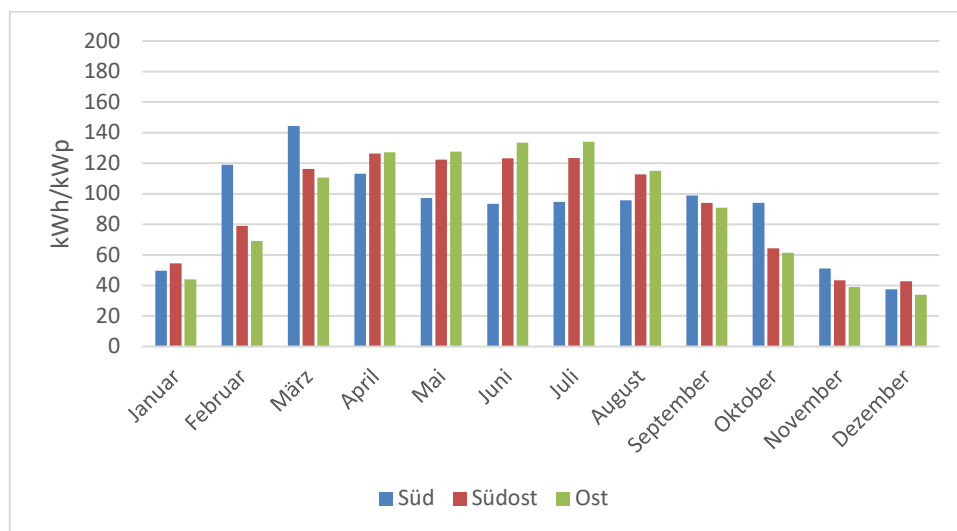


Abbildung 16 Monatlicher Energieertrag bei einem Reihenabstand von 2 m und einer Albedo von 0.25

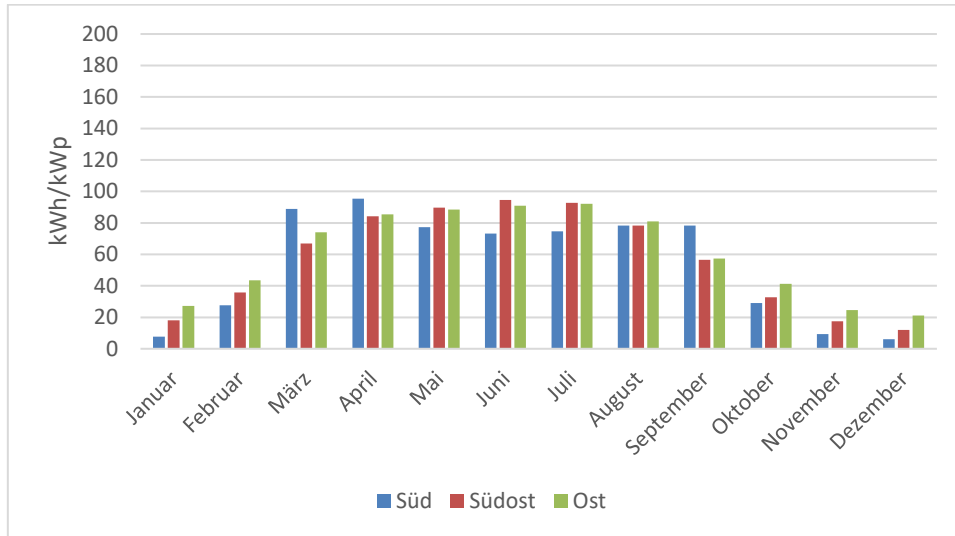


Abbildung 17 Monatlicher Energieertrag bei einem Reihenabstand von 1 m und einer Albedo von 0.25

### 3.2.2 Energieertrag bei einer Albedo von 0.74 für die Wintermonate

Für die Wintermonate wird eine Schneebedeckung des Daches erwartet, die zu einer Erhöhung der Albedo führt. Um dies zu berücksichtigen, wird für die Wintermonate Dezember bis März eine Albedo von 0.74 angenommen, was einer Mischung aus frischer und alter Schneedecke entspricht. Für die übrigen Monate bleibt eine Albedo von 0.25 bestehen.

Der Ertrag steigt prozentual gesehen für die Ostausrichtung und für 2.5 m Reihenabstand am stärksten (Tabelle 5). Während es für 2.5 m Ostausrichtung knapp 6 % sind, steigt der Ertrag der Südausrichtung mit 1 m Reihenabstand nur um ca. 1.5 %. Der Ertrag in den Wintermonaten steigt für die Ostausrichtung mit 2.5 m Reihenabstand um fast 24 %, bei der Südausrichtung mit 1 m Abstand um 7.5 %.

Tabelle 5 Jährlicher Energieertrag bei einer Albedo von 0.74 für die Wintermonate

Ausrichtung	Jährlicher Energieertrag (kWh/kWp)		
	2.5 m Reihenabstand	2 m Reihenabstand	1 m Reihenabstand
Süd	1'264	1'122	656
Südost	1'258	1'150	699
Ost	1'245	1'120	754

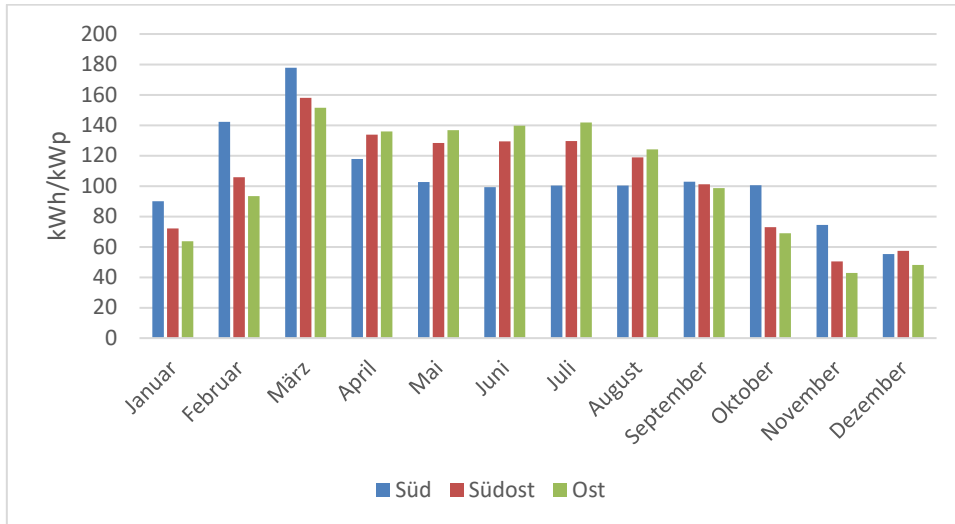


Abbildung 18 Monatlicher Energieertrag bei einem Reihenabstand von 2.5 m und einer Albedo von 0.74 in den Wintermonaten

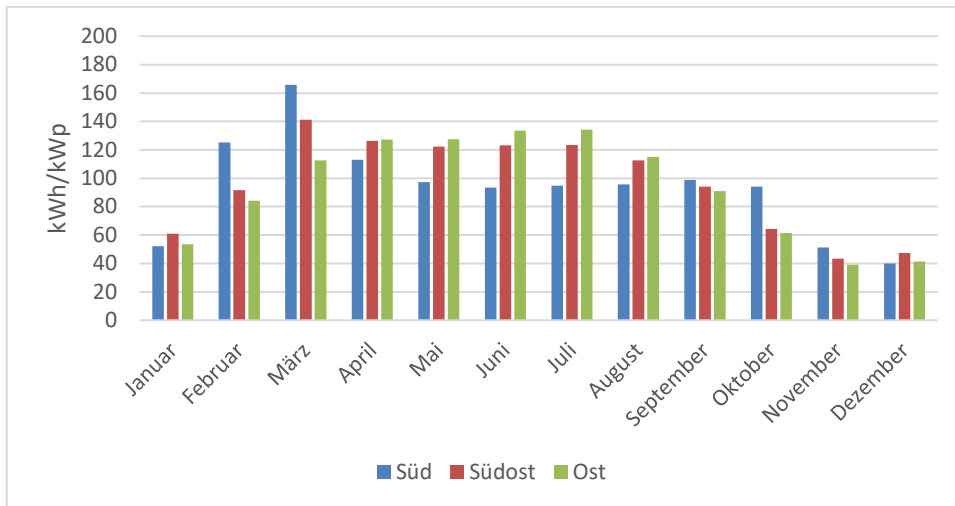


Abbildung 19 Monatlicher Energieertrag bei einem Reihenabstand von 2 m und einer Albedo von 0.74 in den Wintermonaten

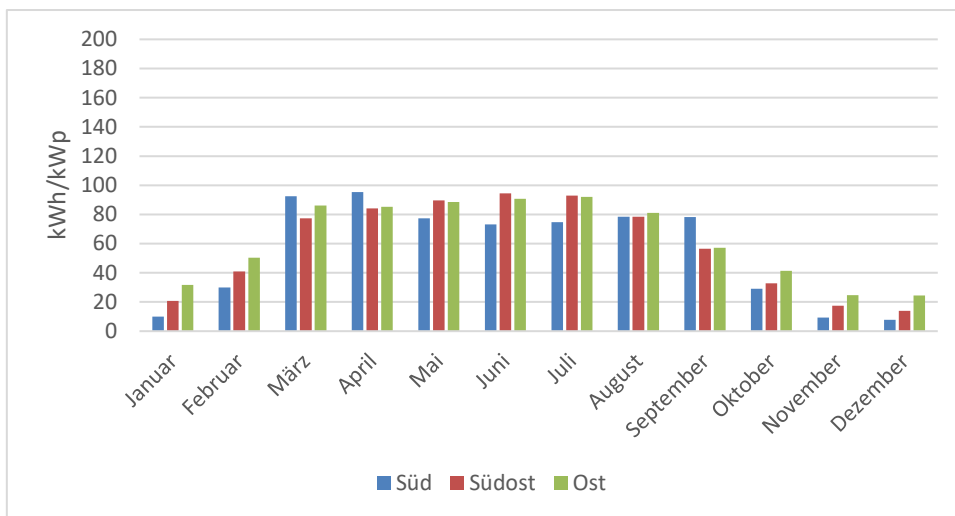


Abbildung 20 Monatlicher Energieertrag bei einem Reihenabstand von 1 m und einer Albedo von 0.74 in den Wintermonaten

### 3.2.3 Energieertrag bei einer Albedo von 0.8

Für einen Vergleich mit Dacheindeckungen mit hoher Reflexion wird eine weiße Dachfolie mit einer Albedo von 0.8 angenommen. Die hierdurch erreichte Steigerung des Jahresertrags ist für alle Ausrichtungen ähnlich und beträgt bei 2.5 m Reihenabstand 30-32 % und bei 1 m Reihenabstand noch 20-23 % gegenüber einer Ganzjahresalbedo von 0.25 (Tabelle 6). Die Steigerung des Winterertrags ist wiederum für die Südausrichtung am geringsten (8-12 %) und für die Ostausrichtung am höchsten (18-27 %).

Tabelle 6 Jährlicher Energieertrag bei einer Albedo von 0.8

Ausrichtung	Jährlicher Energieertrag (kWh/kWp)		
	2.5 m Reihenabstand	2 m Reihenabstand	1 m Reihenabstand
Süd	1'605	1'413	797
Südost	1'566	1'412	819
Ost	1'533	1'386	870

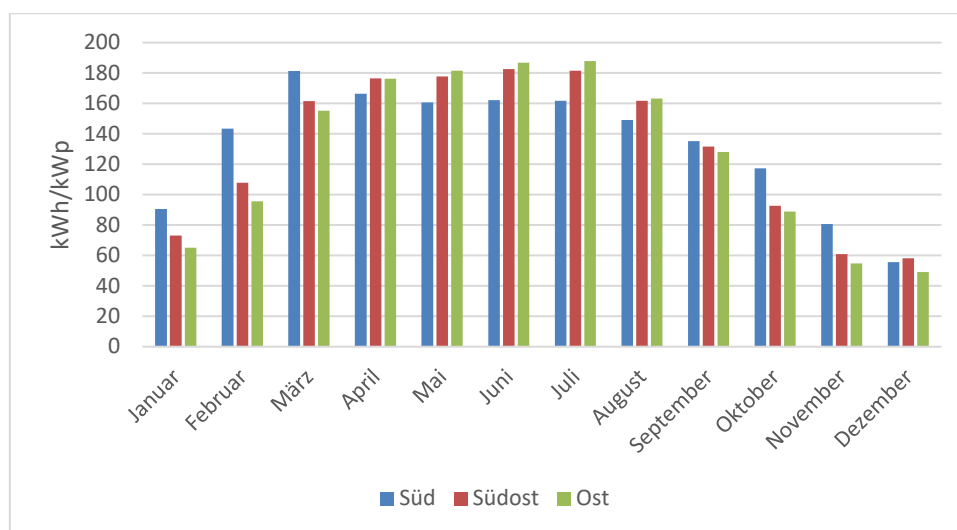


Abbildung 21 Monatlicher Energieertrag bei einem Reihenabstand von 2.5 m und einer Albedo von 0.8

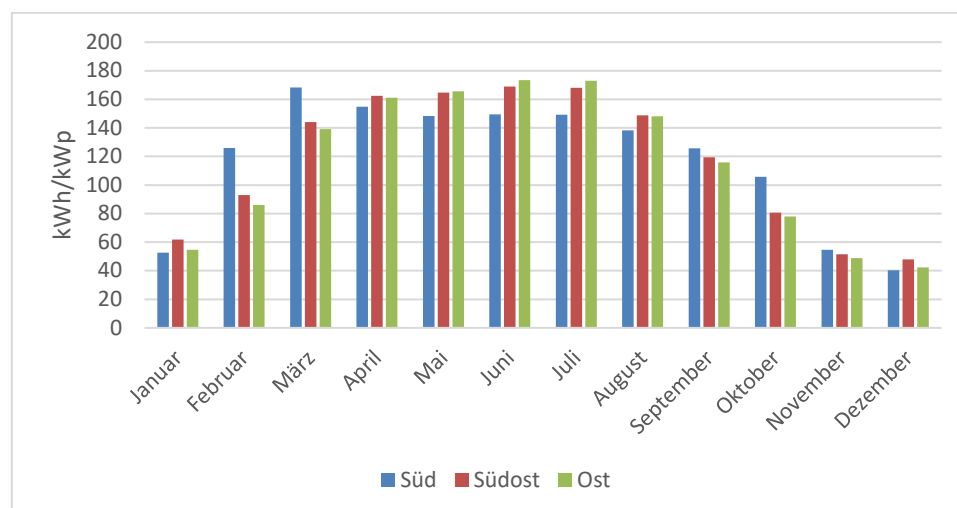


Abbildung 22 Monatlicher Energieertrag bei einem Reihenabstand von 2 m und einer Albedo von 0.8



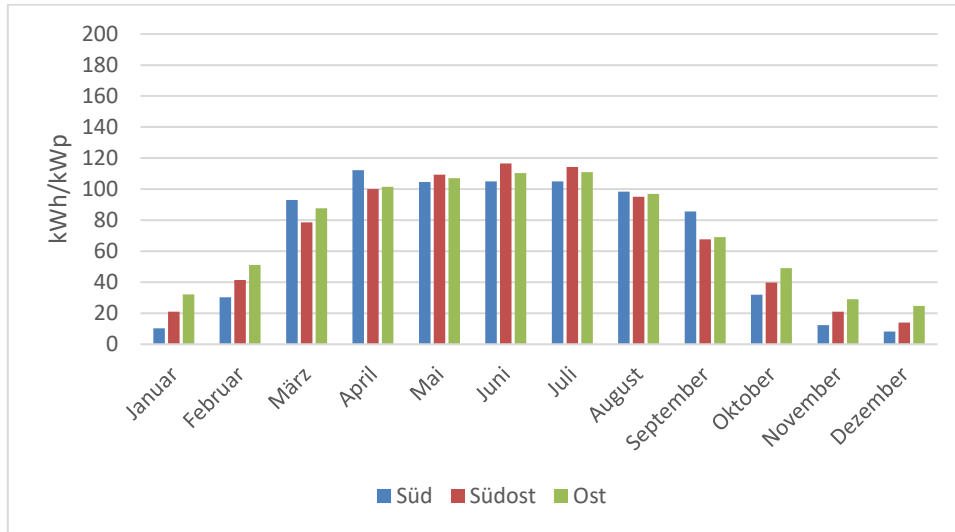


Abbildung 23 Monatlicher Energieertrag bei einem Reihenabstand von 1 m und einer Albedo von 0.8

### 3.3 Stromerzeugung im Winter

Für die Analyse der Stromerzeugung im Winter werden die Monate von Dezember bis März als Wintermonate betrachtet (Tabelle 7). Der Anteil Winterstrom ist bei Südausrichtung und 2.5 m Reihenabstand für alle Albedovarianten jeweils am höchsten (29-37 %), er liegt zwischen 5 und 9 Prozentpunkte höher als bei Ostausrichtung (24-29 %). Bei Südausrichtung und 1 m Reihenabstand ist der Winterertrag mit 18-21 % am niedrigsten, 3 bis 5 Prozentpunkte weniger als bei Ostausrichtung. Der Winterstromanteil sinkt demnach bei einer Verringerung des Reihenabstands bei Südausrichtung am stärksten (um 11-16 Prozentpunkte), bei Ostausrichtung dagegen nur geringfügig (um 1-3 Prozentpunkte). Von allem Varianten wird bei Südausrichtung, 2.5 m Reihenabstand sowie hoher Albedo im Winter und niedriger im Sommer mit 37 % der höchste Winterstromanteil erreicht.

Absolut betrachtet lässt sich der Winterertrag bei Ostausrichtung auf der gleichen genutzten Dachfläche durch Verringerung des Reihenabstands steigern. Bei Südostausrichtung steigt der Winterertrag zwar noch bei einer Verringerung von 2.5 auf 2 m, bei 1 m sinkt er in etwa wieder auf den gleichen Wert wie bei 2.5 m. Bei Südausrichtung steigt er zwar bei Verringerung auf 2 m noch geringfügig an, sinkt dann aber bei 1 m deutlich. Insgesamt wird mit Ostausrichtung bei 1 m Reihenabstand auf der gleichen genutzten Dachfläche in etwa der gleiche Winterertrag wie die Südausrichtung bei 2.5 m erreicht, allerdings mit der 2.5fachen installierten Leistung.

Bei schneebedecktem Dach im Winter und niedriger Albedo im Rest des Jahres steigt der Winterstromanteil um 1 bis 4 Prozentpunkte. Eine für das gesamte Jahr hohe Albedo hat im Sommer den grössten Effekt, so dass sowohl Jahresertrag als auch Winterertrag absolut gesehen steigen, der Winterstromanteil aber sinkt. Eine hohe Albedo steigert den Jahresertrag für alle Ausrichtungen ähnlich, den Winterertrag bei Südausrichtung allerdings nur gering, bei Ostausrichtung deutlich stärker. Je kleiner der Reihenabstand desto geringer ist der Albedoeffekt aufgrund der zunehmenden Verschattung des Untergrunds.

Tabelle 7 Winterstromerzeugung bei Variation von Ausrichtung, Reihenabstand und Albedo

		2.5 m Reihenabstand			2 m Reihenabstand			1 m Reihenabstand		
Albedo	Ausrichtung	Süd	Südost	Ost	Süd	Südost	Ost	Süd	Südost	Ost
0.25	Jährlicher Ertrag (kWh/kWp)	1'218	1'196	1'177	1'089	1'102	1'086	646	679	727
	Winterertrag (kWh/kWp)	419	332	288	350	292	258	131	133	166
	Jährlicher Ertrag (kWh/m <sup>2</sup> Dachfläche*)	294	289	284	329	333	328	390	410	439
	Winterertrag (kWh/m <sup>2</sup> Dachfläche*)	101	80	70	106	88	78	79	80	100
	Winterertrag (%)	34%	28%	25%	32%	27%	24%	20%	20%	23%
0.74 im Winter	Jährlicher Ertrag (kWh/kWp)	1'264	1'258	1'245	1'122	1'150	1'120	656	699	754
	Winterertrag (kWh/kWp)	465	393	357	383	341	292	140	153	193
	Jährlicher Ertrag (kWh/m <sup>2</sup> Dachfläche*)	305	304	301	339	347	338	396	422	455
	Winterertrag (kWh/m <sup>2</sup> Dachfläche*)	112	95	86	116	103	88	85	92	116
	Winterertrag (%)	37%	31%	29%	34%	30%	26%	21%	22%	26%
0.8	Jährlicher Ertrag (kWh/kWp)	1'605	1'566	1'533	1'413	1'412	1'386	797	819	870
	Winterertrag (kWh/kWp)	471	401	365	387	347	322	142	155	196
	Jährlicher Ertrag (kWh/m <sup>2</sup> Dachfläche*)	388	378	370	427	426	419	481	494	525
	Winterertrag (kWh/m <sup>2</sup> Dachfläche*)	114	97	88	117	105	97	85	94	118
	Winterertrag (%)	29%	26%	24%	27%	25%	23%	18%	19%	23%

\* Dachfläche meint die durch den PV-Generator effektiv genutzte Dachfläche inklusive Reihenabstände, aber ohne Randabstände etc.

### 3.4 Energieertrag im Tagesverlauf

Neben dem Jahresverlauf unterscheidet sich auch der Tagesverlauf für unterschiedliche Ausrichtungen deutlich. Abbildung 24 zeigt den Tagesverlauf am 7. Juli, einem sonnigen Sommertag, Abbildung 25 den Tagesverlauf am 23. Januar, einem sonnigen Wintertag, jeweils für die verschiedenen Ausrichtungen und Reihenabstände. Die Albedo beträgt einheitlich 0.25.

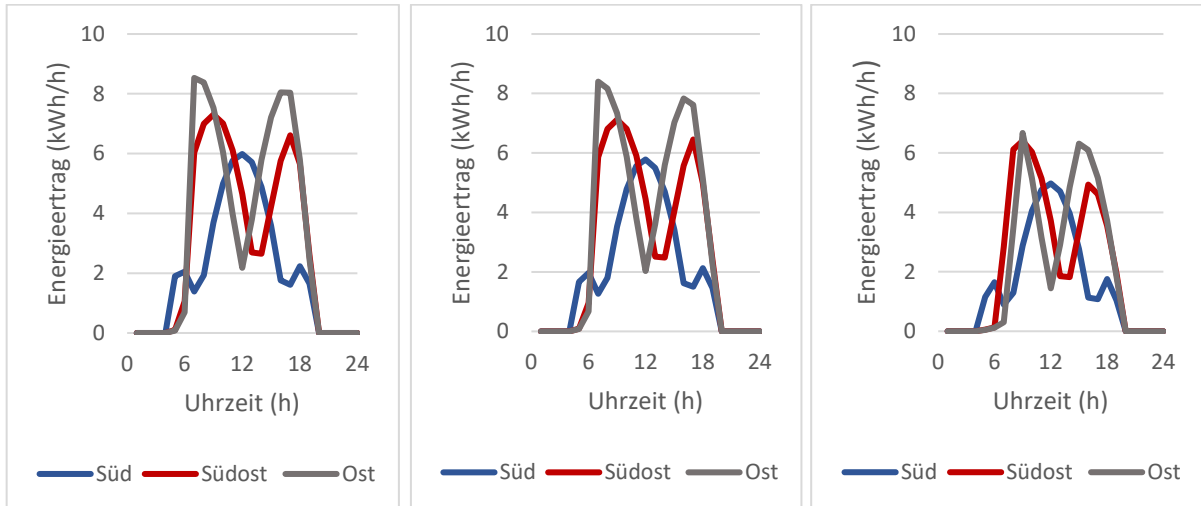


Abbildung 24 Energieertrag an einem sonnigen Sommertag bei einer Albedo von 0.25 und einem Abstand von 2.5 m (links), 2 m (Mitte) und 1m (rechts)

An sonnigen Tagen zeigt die Ost-West Ausrichtung charakteristische Peaks am Morgen und am Abend, während die Südausrichtung ein Mittagspeak aufweist. Dieses hat im Sommer aufgrund der Modulneigung und des hohen Sonnenstands zur Mittagszeit eine geringere maximale Leistung als bei den anderen Ausrichtungen. Morgens und abends sind im Sommer zwei lokale Peaks durch die Einstrahlung auf die Modulrückseite zu erkennen. Die Südostausrichtung weist ebenfalls zwei Peaks auf, wobei das Vormittagspeak ausgeprägter ist. Mit Verringerung des Reihenabstands nimmt der Ertrag bei allen Ausrichtungen ab, am stärksten bei Ostausrichtung.

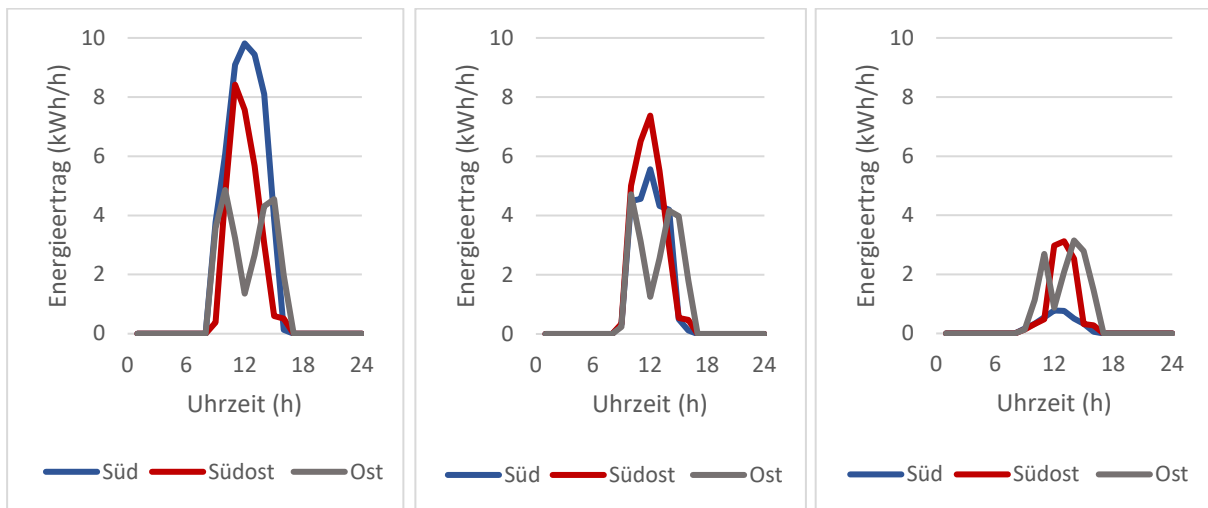


Abbildung 25 Energieertrag an einem sonnigen Wintertag bei einer Albedo von 0.25 und einem Abstand von 2.5 m (links), 2 m (Mitte) und 1m (rechts)

An einem sonnigen Wintertag ist der Einfluss des Reihenabstands besonders hoch. Bei Südausrichtung und 2.5 m Abstand wird mittags aufgrund des niedrigen Sonnenstands die höchste Leistung des Jahres erreicht. Bei Südausrichtung sinkt der Ertrag mit Verringerung des Reihenabstands aufgrund der zunehmenden Reihenverschattung am stärksten, während bei Ostausrichtung dieser Effekt deutlich geringer ist.