

Betriebsergebnisse bifazialer Solaranlagen

Manuel Baier¹, René Schüler¹

¹ IBC SOLAR AG, Am Hochgericht 10, 96231 Bad Staffelstein

Abstract

Die Entwicklung und der Einsatz von bifazialen Solarmodulen sind ein effektiver Schritt der PV-Branche, um den Ertrag eines Solarparks bei gleichbleibender Flächennutzung zu steigern. Ein weiterer Ansatz für bifaziale Solarmodule, ist die Realisierung eines Ost/West-Systems. Entscheidend für die Planung eines Großprojektes sind Kenntnisse zur Abschätzung des Mehrertrags mit Hilfe kleinerer Feldversuche. Zur Analyse des Mehrertrags für bifaziale Solarmodule wurden drei Freiflächen-Südsysteme, zwei Freiflächen-Ost/West-Systeme und zwei Dachsysteme mit PERC-Solarmodulen installiert. Bei Felduntersuchungen zwischen monofazialen und bifazialen Südsystemen zeigten die bifazialen Solarmodule einen Mehrertrag von 8,97 %. Für einen Standort in Süddeutschland sollte weiterhin zur Ertragsmaximierung eine Ausrichtung nach Süden bevorzugt werden. Untersuchungen konnten zeigen, dass bei dem Vergleich zwischen Süd- und Ost/West-Ausrichtung für die letzte Aufstellungsart der Ertrag um 13,1 % sinkt. Des Weiteren zeigten die Untersuchungen, dass sich mit dem Einsatz von hellen Dachfolien der Ertrag eines bifazialen Systems steigern lässt.

1. Einleitung

Die Mehrzahl der in Deutschland installierten Freiflächensolarparks werden nach einer älteren Empfehlung nach Süden mit einem Neigungswinkel von 30° ausgerichtet [1]. Mit dem Erscheinen bifazialer Solarmodule, die neben der Sonneneinstrahlung auf der Vorderseite auch die Einstrahlung auf der Rückseite nutzen, könnte sich diese Vorgehensweise jedoch ändern. Bifaziale Solarmodule versprechen einen Mehrertrag bei gleichbleibender Flächenbeanspruchung gegenüber monofazialen Solarmodulen. Für den zusätzlichen Ertrag der Rückseite ist die am Untergrund diffus reflektierte Direkt- und Diffusstrahlung der Sonne essentiell. Die Rückstrahlkraft des Untergrunds, auch Albedo genannt, ist die entscheidende Größe für den möglichen Mehrertrag von bifazialen Solarmodulen.

Zusätzlich zu einer südlichen Ausrichtung könnte für die bifaziale Zelltechnologie auch die Option einer Ost/West-Aufstellung vielversprechend sein. Ein solches System würde die Sonneneinstrahlung in den Morgen- und Abendstunden nutzen und gleichzeitig eine Mehrfachnutzung der Solarparkfläche ermöglichen. Ein solches Beispiel für die Mehrfachnutzung wäre die Installation eines Ost/West-Systems auf einem Feld, auf dem zugleich Nutzpflanzen kultiviert werden.

Zur Beurteilung der Potentiale von bifazialen Solarmodulen werden deswegen bei der IBC SOLAR AG verschiedene Aufstellungskonzepte für bifaziale Solarmodule installiert, untersucht und ausgewertet. Für die Untersuchungen wurden neue Solarsysteme auf der hauseigenen Testanlage und dem Dach des Hauptgebäudes installiert. Insgesamt umfasst die Untersuchung drei Freiflächen-Südsysteme, zwei Freiflächen-Ost/West-Systeme und zwei Dachinstallationen. Um externe Einflüsse bei der Auswertung durch ältere elektronische Komponenten auszuschließen, wurde bei allen Systemen eine neue Verkabelung und ein neuer Wechselrichter eingesetzt. Des Weiteren wurde bei den Freiflächensystemen darauf geachtet, dass alle die gleiche Kabellänge aufweisen. Durch dieses Vorgehen sind die Kabelverluste für alle Systeme annähernd gleich und können so direkt miteinander verglichen werden. Als Halterung wurden für die Freiflächensysteme in Zusammenarbeit mit der Firma CWF zwei neuartige Einlegesysteme für bifaziale Solarmodule mit Süd- und Ost/West-Ausrichtung entwickelt. Für die beiden Dachsysteme wurde hingegen das hauseigene Montagesystem IBC AeroFix für Flachdächer eingesetzt.

2. Ergebnisse für Freiflächennutzung

Für die Untersuchungen der Freiflächensysteme wurden folgende Solarmodule eingesetzt:

- IBC MonoSol 320 VL-HC
Monofaziales Half-Cut-Solarmodul mit 320 Wp
- URE D6L295K3A
Bifaziales PERC-Solarmodul mit 295 Wp
- LONGi LR6-60HBD310M
Bifaziales PERC- und Half-Cut-Solarmodul mit 310 Wp
- JinkoSolar JKM320M-60H-TCV
Bifaziales PERC- und Half-Cut-Solarmodul mit 320 Wp

Für die Untersuchungen wurden jeweils sechs Solarmodule eines Typs zu einem String verschaltet. Die Auswertung der Untersuchungen erfolgte durch die Bestimmung des spezifischen Ertrags E durch die Formel (1). Bei dem spezifischen Ertrag handelt es sich um den Quotienten aus gewonnener elektrischer Energie E_{erzeugt} durch die Anzahl der Solarmodule in einem String n und der Gesamtmodulleistung P . Für die Auswertung wurde der spezifische Ertrag gewählt, da dieser Wert einen leistungsunabhängigen Vergleich zwischen zwei Systemen ermöglicht.

$$E = E_{\text{erzeugt}} / (n \cdot P) \quad (1)$$

Die Untersuchungen wurden jeweils in den Sommermonaten Mai bis September 2019 durchgeführt. Alle drei Südsysteme waren während der gesamten Zeit auf einen Neigungswinkel von 30° eingestellt. Die Leistungsdaten eines Solarsystems wurden durch den jeweiligen identischen Wechselrichter gemessen und an das Monitoring-Portal VCOM der Firma meteocontrol GmbH gesendet.

2.1 Mono- vs. bifaziale Solarmodule

In Kalenderwoche 21 wurde der Unterschied zwischen den nach Süden ausgerichteten monofazialen und bifazialen Solarmodulen untersucht. Als Untergrund diente zum Messzeitpunkt der Bestandsboden der Testanlage. Hierbei handelt es sich um einen Schotterboden mit einem hohen weißen Farbanteil. Unterbrochen wird der Bestandsboden durch gelegentlich auftretende Vegetation.

Innerhalb der einwöchigen Messung betrug der spezifische Ertrag der monofazialen Solarmodule 21,79 kWh/kWp. Der Ertrag der bifazialen Solarmodule lag bei 23,74 kWh/kWp. Der generierte Mehrertrag des bifazialen Systems gegenüber dem monofazialen System betrug somit 8,97 %. Trotz gleichbleibender Flächenbeanspruchung liefert das bifaziale Südsystem gegenüber dem monofazialen Südsystem einen deutlichen Mehrertrag. Für die Untersuchungen wurden Solarmodule mit PERC-Zelltechnologie eingesetzt. Die Verwendung von Zelltechnologien mit einem höheren Bifazialkoeffizienten könnten den Mehrertrag noch weiter steigern.

2.2 Albedo-Einfluss für ein bifaziales Südsystem

Im Zuge der Untersuchungen des Einfluss der Albedo auf den spezifischen Ertrag wurden die folgenden Untergründe eingesetzt: Bestandsboden, Kunstrasen und Mainkies. Für den Messzeitraum stand auf der Testanlage keine geschlossene Rasendecke zur Verfügung. Als Ersatz wurde ein Kunstrasen verwendet. Aufgrund des hohen weißen Farbanteils des Bestandsbodens wurde ein dunklerer Kies als Gegenpart gewählt. Abbildung 1 zeigt die drei eingesetzten Bodenarten unter jeweils einem der drei nach Süden ausgerichteten Systeme.



Abb. 1: Die drei Südsysteme mit den verschiedenen Bodenarten – Von links nach rechts: Kunstrasen, Bestandsboden, Mainkies

Die Messungen erfolgten in den Kalenderwochen 21 und 22. In der ersten Kalenderwoche wurde das System auf dem Untergrund Kunstrasen mit einem auf dem Bestandsboden installierten System verglichen. Das System mit dem Kunstrasen erzielte einen spezifischen Ertrag von 23,60 kWh/kWp. Der spezifische Ertrag des Systems mit dem Bestandsboden erreichte hingegen, aufgrund des höheren Albedo-Wertes, einen spezifischen Ertrag von 23,74 kWh/kWp. Der Mehrertrag des Systems mit dem Bestandsbodens gegenüber dem System mit dem Kunstrasen beträgt 0,618 %.

In der zweiten Woche wurde ein auf Mainkies installiertes System mit einem System auf Bestandsboden vermessen. Bei der Untersuchung erzielte der Mainkies einen spezifischen Ertrag von 29,77 kWh/kWp. Wie auch in der vorhergehenden Woche erreichte das System mit dem Bestandsboden einen höheren spezifischen Ertrag von 30,01 kWh/kWp. Der Mehrertrag des Bestandsbodens betrug somit 0,793 %. Für beide Untersuchungen liegt der Mehrertrag unter einem Prozent. Aufgrund der Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass bei der Kombination aus natürlichem Boden (Vegetation, Kies und Erde) und der Montagehöhe von 1,2 m der Ertragsunterschied bei Freiflächenanlagen aufgrund des Untergrundes zu vernachlässigen ist. Auf eine zusätzliche Bodenbearbeitung mittels Gras oder Kies kann für bifaziale Freiflächenanlagen wegen der Unrentabilität wahrscheinlich verzichtet werden.

2.3 Transparente Rückseitenfolie

Für die Rückseite von bifazialen Solarmodulen setzen die meisten Hersteller eine Solarmodulglasscheibe ein, weshalb dieser Modultyp auch als Glas-Glas-Modul bezeichnet wird. Aufgrund der doppelten Verglasung besitzen bifaziale Solarmodule oftmals eine sehr hohe Masse, was die Installation der Module erschwert. Durch den Einsatz einer für den Spektralbereich der Photovoltaik transparenten Rückseitenfolie kann die Masse um bis zu 5 kg reduziert werden.

In der Kalenderwoche 34 fand deswegen eine Untersuchung statt, die bifaziale Solarmodule mit transparenter Rückseitenfolie mit bifazialen Glas-Glas-Modulen vergleicht. Am Ende der einwöchigen Messung kommt das Glas-Glas-Modul auf einen spezifischen Ertrag von 85,93 kWh/kWp und das Modul mit der Rückseitenfolie auf einen spezifischen Ertrag von 86,46 kWh/kWp. Der Ertragsunterschied betrug lediglich 0,608 %. Der geringe Mehrertrag der Module mit der transparenten Rückseitenfolie lässt sich wahrscheinlich durch eine lichtinduzierte Degradation (LID) der Glas-Glas-Module erklären, da diese Module bereits bei vorhergehenden Untersuchungen verwendet wurden.

2.4 Süd- vs. Ost/West-System

Abbildung 2 zeigt die beiden installierten Ost/West-Systeme. Der Vergleich zwischen einer Süd- und einer Ost/West-Ausrichtung erfolgte in den Kalenderwochen 30 und 31. Innerhalb dieser zweiwöchigen Untersuchung wurde ein Ost/West-System mit bifazialen Solarmodulen mit jeweils einem Südsystem mit monofazialen und bifazialen Solarmodulen verglichen. Während der Messung befand sich unter allen drei Systemen der Bestandsboden. In der Tabelle 1 sind die spezifischen Erträge der drei Systeme dargestellt.



Abb. 2: Ost/West-Systeme mit den Untergründen Bestandsboden und Mainkies

Tab. 1: Spezifische Erträge für die drei Systeme

System	Spezifischer Ertrag
Bifazial / Süd-Ausrichtung	62,77 kWh/kWp
Monofazial / Süd-Ausrichtung	56,35 kWh/kWp
Bifazial / Ost/West-Ausrichtung	54,55 kWh/kWp

Beim Vergleich zwischen monofazialen, nach Süden ausgerichteten Solarmodulen mit bifazialen, nach Ost/West ausgerichteten Solarmodulen erzielten letztere einen Minderertrag von 3,19 %. Wird das Ost/West-System mit einem bifazialen, nach Süden ausgerichteten System verglichen steigt der beobachtete Minderertrag auf einen Wert von 13,1 % an. Für die Untersuchung wurden auf allen drei Systemen Solarmodule mit PERC-Zelltechnologie eingesetzt. Diese Technologie erreicht einen Bifazialkoeffizienten von ca. 60-70 %. Der Einsatz einer Zelltechnologie mit einem Bifazialkoeffizienten größer als 90 % könnte bei einer Ost/West-Installation zu einem positiven Mehrertrag gegenüber eines monofazialen nach Süden ausgerichteten Systems führen. Eine solche Zelltechnologie wäre z. B. Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer (HIT) mit Bifazialkoeffizienten größer als 90 %. Für einen Standort in Süddeutschland sollten für eine optimale Ertragsmaximierung bifaziale Solarmodule weiterhin nach Süden ausgerichtet werden.

Unabhängig von dieser Erkenntnis bleiben jedoch zwei Vorteile einer Ost/West-Installation bestehen. Abbildung 3 verdeutlicht den ersten der zwei Vorteile. Im Gegensatz zu einer Südausrichtung liefert eine Ost/West-Ausrichtung im Laufe eines Tages zwei Leistungsmaxima und zwar in den Morgen- und Abendstunden. Eine bifaziale Ost/West-Installation stellt somit genau dann seine Leistungsmaxima zur Verfügung, wenn durch die nach Süden ausgerichteten Installationen nur sehr geringe Leistungen abgerufen werden können. Der zweite Vorteil ist die zu Beginn beschriebene Mehrfachnutzung der Solarparkfläche. Für zukünftige Projekte könnten dadurch Flächen erschlossen werden, die mit der bisherigen Aufstellungsart unrentabel waren. Des Weiteren könnten Solarparks in Kombination mit einer landwirtschaftlicher Flächennutzung die Akzeptanz der Bevölkerung für große Solarprojekte steigern.

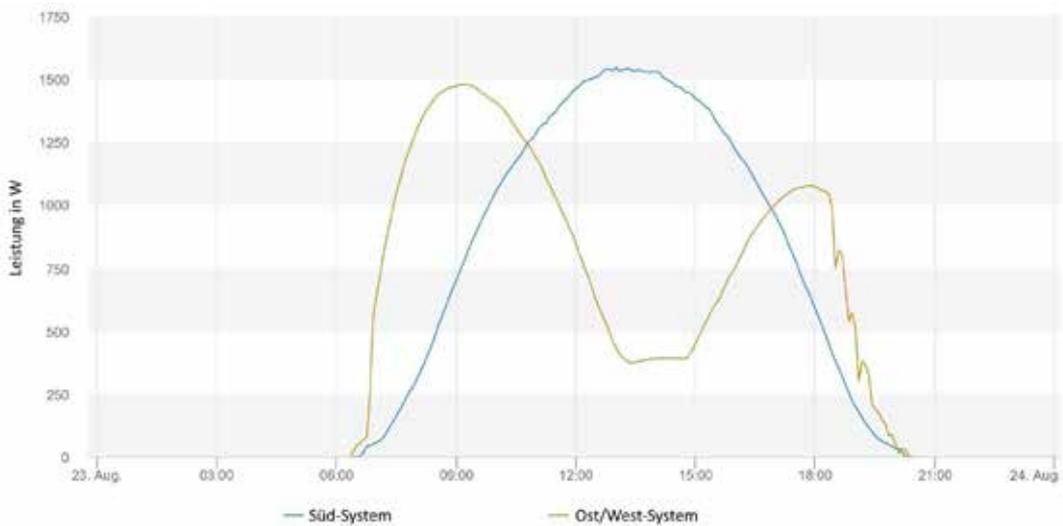


Abb. 3: Leistungskurven eines Süd- und Ost/West-Systems am 23. August 2019

Bei der Planung und Realisierung eines Ost/West-Systems sollte jedoch unbedingt berücksichtigt werden, dass sich die parallel installierten Modulreihen gegenseitig verschatten können. Ein zu geringer Reihenabstand würde die Leistung daher stark beeinflussen. Dabei sollte während der Planung besonders darauf geachtet werden, dass in den Wintermonaten die Sonne eine geringere Sonnenhöhe aufweist und dadurch die Schattenlänge zunimmt. Abbildung 4 zeigt die Leistungskurven zweier parallel installierter Ost/West-Systeme mit der Verschattungsproblematik. Hier zeigt sich, dass in den Morgenstunden mit einem östlichen Sonnenstand das System 2 durch das System 1 verschattet wird. In den Abendstunden mit einem westlichen Sonnenstand kommt es hingegen zu einer Verschattung von System 1 durch System 2. Neben der Verschattung durch andere Modulreihen sollten sich die Solarmodule und die Halterung möglichst in einer Ebene befinden, um Eigenverschattungen durch vorstehende Solarmodule zu verhindern.

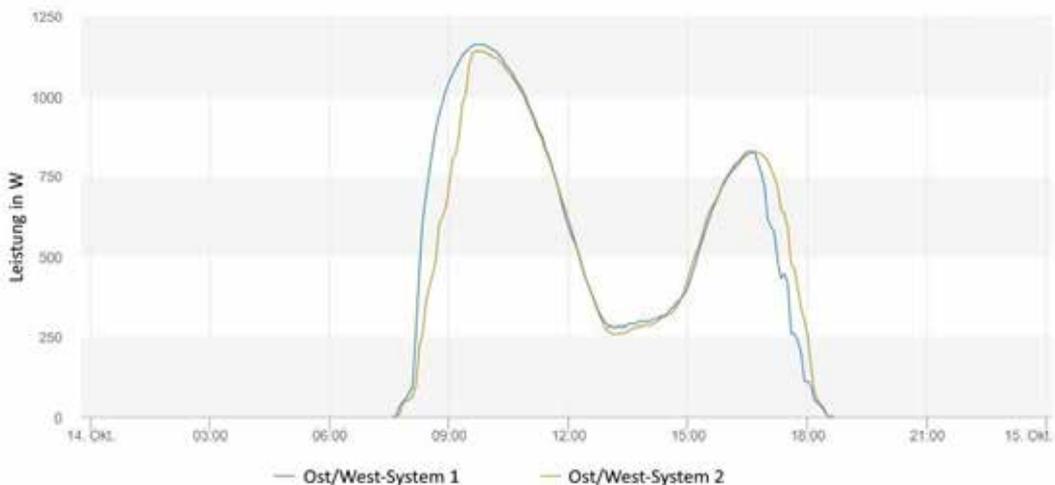


Abb. 4: Leistungskurven zweier paralleler Ost/West-Systeme am 14. Oktober 2019

2.5 Albedo-Einfluss für ein bifaziales Ost/West-System

Wie für die Südsysteme, wird auch für die Ost/West-Systeme der Einfluss der Albedo auf den Ertrag von bifazialen Solarmodulen untersucht. Für die Untersuchungen wurden die gleichen Untergründe wie in Kapitel 2.2 verwendet. Die Messungen erfolgten innerhalb von vier Wochen. Während in den Kalenderwochen 32 und 33 der Bestandsboden mit dem Kunstrasen verglichen wurde, fand in den Kalenderwochen 37 und 38 ein Vergleich zwischen Systemen mit dem Bestandsboden und dem Mankies statt. Bei den Messungen musste darüber hinaus berücksichtigt werden, dass sich die parallel installierten Solarmodule in den Morgen- und Abendstunden gegenseitig verschatten können. Aufgrund der Verschattungsproblematik wurden nur die Ertragswerte zwischen 9:00 und 17:00 Uhr ausgewertet. Wie auch in den Messungen der Südsysteme, liefert der Bestandsboden aufgrund seines weißen Farbanteils den besten Albedo-Wert und ist daher der profitabelste Untergrund für diese Systeminstallation. Tabelle 2 beinhaltet die gemessenen spezifischen Erträge für die beiden Messkonfigurationen.

Tab. 2: Spezifische Erträge der Ost/West-Systeme bei verschiedenen Untergründen

Kalenderwoche	Bestandsboden	Kunstrasen
32-33	30,56 kWh/kWp	29,61 kWh/kWp
	Bestandsboden	Mankies
37-38	32,24 kWh/kWp	31,23 kWh/kWp

Im Vergleich mit einem Kunstrasensystem erzielt das Bestandsbodensystem einen Mehrertrag von 3,12 %. Im direkten Vergleich zwischen Bestandsboden und Mankies liegt der Mehrertrag hingegen bei 3,14 %. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einfluss der Albedo auf den Mehrertrag bei einer Ost/West-Ausrichtung größer ist, als bei einer konventionellen Südausrichtung.

2.6 Montagehöhe für ein bifaziales Ost/West-System

Für die Untersuchungen des Einflusses der Montagehöhe auf den Ertrag von bifazialen Solarmodulen wurden jeweils drei Solarmodule desselben Typs auf einer der beiden Ost/West-Systeme installiert. Verglichen wurden die beiden Montagehöhen 0,5 m und 1,5 m. Die Montagehöhe ist definiert als Höhe zwischen der Unterkante eines Solarmoduls und dem Untergrund. Die Messung erfolgte in den beiden Kalenderwochen 28 und 29. Als Untergrund befand sich unter den beiden Systemen der Bestandsboden, um Einflüsse durch verschiedene Albedo-Werte zu reduzieren. Die unterschiedlichen Montagehöhen haben jedoch zur Folge, dass es in den Abendstunden zu einem Schattenwurf auf das System mit der geringeren Montagehöhe kommt. Aufgrund der Verschattung werden daher für die Ertragsauswertung nur Daten vor 17:30 Uhr ausgewertet. Das System mit einer Montagehöhe von 0,5 m generierte einen spezifischen Ertrag von 30,44 kWh/kWp. Bei einer Montagehöhe von 1,5 m konnte hingegen ein spezifischer Ertrag von 31,35 kWh/kWp festgestellt werden. Das System mit der höheren Montagehöhe erzielt einen Mehrertrag von 2,97 %. Sowohl die Direkt- als auch die Diffusstrahlung fällt zu gleichen Anteilen auf die Solarmodule mit den unterschiedlichen Montagehöhen. Eine Erklärung für den Zugewinn am Ertrag wäre der gesteigerte Einfall von Reflexionsstrahlung durch eine höhere Montagehöhe.

In Zusammenhang mit der geschilderten Verschattungsproblematik in 2.4 ist eine besonders hohe Installation der Module jedoch nicht empfehlenswert. Eine große Installationshöhe führt unweigerlich zu einer Zunahme der Verschattung bei gleichbleibenden Reihenabstand sowie zu einer erhöhten

Windanfälligkeit. Daraus folgt unweigerlich, dass bei großen Montagehöhen weniger Module pro Fläche und weniger kWp pro Fläche installiert werden kann. Dadurch wird sich der Mehrertrag durch die höhere Installation ab einem gewissen Zeitpunkt ins Negative kehren.

3. Ergebnis für Dachflächen

Bei der Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten für bifaziale Solarmodule auf Flachdächern wurden jeweils 15 Solarmodule mit einer silbernen Dachfolie und 15 Solarmodulen mit einer schwarzen Dachfolie miteinander verglichen. Als Halterung wurde das hauseigene Montagesystem IBC AeroFix Ost-West 10° verwendet.

Die Messung erfolgte in den Kalenderwochen 34 und 35. Die Solarmodule mit der silbernen Untergrundfolie erreichten in der zweiwöchigen Messung einen spezifischen Ertrag von 171,24 kWh/kWp. Die Solarmodule mit der schwarzen Folie erreichten hingegen nur einen spezifischen Ertrag von 177,35 kWh/kWp. Innerhalb des Messintervalls kann daher ein Mehrertrag von 3,57 % bei der Verwendung von bifazialen Solarmodulen mit einer silbernen Rückseitenfolie und dem AeroFix-System erreicht werden. An besonders sonnenreichen Tag beträgt der Mehrertrag einer weißen Dachfolie sogar bis zu 4,24 %.



Abb. 5: Flachdachanlage mit bifazialen Solarmodulen und verschiedenfarbigen Dachfolien

4. Ausblick und Zusammenfassung

Die Untersuchungen von IBC SOLAR AG konnten zeigen, dass sich mit bifazialen Solarmodulen und einer Südausrichtung ein deutlicher Mehrertrag erzielen lässt. Im Vergleich zwischen monofazialen und bifazialen Solarmodulen betrug der Mehrertrag 8,97 %. Durch den Einsatz einer Zelltechnologie mit einem höheren Bifazialkoeffizienten könnte der Mehrertrag noch gesteigert werden. Für die typischen Freiflächenböden fällt der Ertragsunterschied nur sehr gering aus und liegt hier bei unter einem Prozent. Bei neuen Anlagenprojekten mit derartiger Bodenbeschaffenheit und einer Aufstellungshöhe von 1,2 m kann demnach auf eine Anpassung des Bodens verzichtet werden.

Aufgrund der noch gängigen Praxis der vorder- und rückseitigen Verglasung von bifazialen Solarmodulen können solche Module eine Masse von bis zu 25 kg aufweisen. Durch den Einsatz einer entsprechenden transparenten Rückseitenfolie kann die Gesamtmasse eines Solarmoduls um bis zu 5 kg gesenkt werden. Das vereinfacht wiederum die Montage und reduziert die Installationskosten. Zudem belegten die Untersuchungen, dass eine entsprechende transparente Rückseitenfolie im Vergleich zu einem bifazialen Glas-Glas-Modul keinen Minderertrag aufweist. Um eine optimale Ertragsmaximierung zu erhalten, ist für einen Standort in Süddeutschland eine Südausrichtung der

bifazialen Solarmodule empfehlenswert. Im direkten Vergleich zwischen monofazialen und nach Süden ausgerichteten Solarmodulen mit bifazialen Ost/West-Modulen, wurde ein Minderertrag von 3,19 % festgestellt. Der Minderertrag könnte sogar mit Hilfe einer anderen Zelltechnologie als PERC, die einen höheren Bifazialkoeffizienten aufweist weiter reduziert werden. Trotz des geringeren Ertrags der Ost/West-Systeme bleiben die beiden Vorteile der Mehrfachflächennutzung und der Leistungsmaxima in den Morgen- und Abendstunden bestehen. Bei der Planung einer entsprechenden Anlage sollte jedoch die mögliche Verschattung durch die einzelnen Reihen und der Halterung berücksichtigt werden. Für eine umfänglichere Auswertung ist es notwendig, dass die durchgeführten Untersuchungen in den Wintermonaten nochmals reproduziert werden. Hierbei kann das Verhalten der verschiedenen bifazialen Systeme bei einem flacheren Lichteinfall bzw. einen höheren Diffusanteil durch eine starke Bewölkung näher untersucht werden. Schlussendlich können die gewonnenen Erkenntnisse als Grundlage für die Planung und Realisierung von Pilotprojekten genutzt werden.

5. Literaturverzeichnis

[1] Jantsch M., Roth W. & Schmidt H.: Nationales Symposium für Photovoltaik und Solarenergie, Tagungsband 7, Seite 217, Bad Staffelstein (1992)