

Leitfaden bifaziale Module 2, Juli 2021

Planungshinweise für den Einsatz gebäudeintegrierter Photovoltaikanlagen mit bifazialen Siliziumzellen



Balkongeländer mit bifazialen Photovoltaikmodulen (Quelle: BKG Architekten)

Autoren

Christian Renken, CRENERGIE SARL

Mauro Cattivio und Francesco Frontini, SUPSI

Christian Moll, Swissolar, Schweizerischer Fachverband für Sonnenenergie

Nathalie Spiller, Swissolar, Schweizerischer Fachverband für Sonnenenergie

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	4
2.	Optimales Solarmoduldesign für Geländer und Glasdächer	5
2.1	Einflussgrößen auf den Energieertrag.....	5
2.2	Empfehlungen	7
3.	Architektonische Gestaltungsmöglichkeiten.....	8
3.1	Aussenmasse Solarmodule	8
3.2	Abmessungen und Design bifazialer Siliziumzellen	8
3.3	Anordnung bifazialer Siliziumzellen im Solarmodul.....	9
3.4	Farbgestaltung	10
3.5	Strukturiertes Glas	11
3.6	Sommerlicher Wärmeschutz mit bifazialen Solarmodulen	11
4.	Technische Systemauslegung	12
4.1	Berücksichtigung von Modulbeschattung	12
4.2	Mechanische Befestigung.....	13
4.3	Elektrische Kontaktierung der Solarmodule.....	13
4.4	Wahl des Wechselrichterkonzepts.....	13
5.	Wirtschaftlichkeit	14
6.	Marktübersicht Produktelieferanten	15
7.	Literaturverzeichnis	17
8.	Abbildungsverzeichnis.....	18

1. Einleitung

Das vorliegende Dokument «bifaziale Module 2» ergänzt den Leitfaden: «Anwendung von bifazialen Solarmodulen – Einsatzmöglichkeiten an Gebäuden, Dimensionierung der Anlagenkomponenten», erschienen im August 2019 bei EnergieSchweiz, Link: : <http://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/9897>. Der Leitfaden behandelt die Gestaltungsmöglichkeiten und gibt technische Hinweise für den Einsatz bifazialer Zellentechnologien insbesondere für die gebäudeintegrierte Photovoltaik. Typische Anwendungsgebiete sind Terrassen- und Balkongeländer, schattenspendende Überdachungen wie Carports sowie architektonische Glas/Metall-Konstruktionen. Die spezifischen Kosten von Solarmodulen mit bifazialen Siliziumzellen sind praktisch vergleichbar zu denen mit herkömmlichen Siliziumzellen. Der jährliche Energieertrag kann jedoch mit Einsatz dieser Technologie um 5% bis 30% gesteigert werden. Bei Glas/Glas-Solarmodulen, die oft aus ästhetischen Gründen mit grossen Zellenabständen realisiert werden, kann mit bifazialen Zellen der tiefere Flächennutzungsgrad durch den Zusatzertrag der Zellenrückseite kompensiert werden.

Der Markt bietet die bifaziale Zellentechnologie als standardisierte Systeme oder objektbezogen als massgefertigte Produkte an. Es gibt mittlerweile eine Auswahl an standardisierten Systemen für Geländer und Überdachungen. Die Solarmodule und die Befestigungskonstruktion sind dabei funktionell aufeinander abgestimmt und der Systemaufbau entspricht den normativen Anforderungen für die gängigsten Anwendungszwecke. Abhängig vom Hersteller können die Abmessungen der Solarmodule an das Objekt angepasst werden. Die Systeme bieten für den Installateur den Vorteil, dass eine umfassende Projektierung entfällt und das System unter Einhaltung der technischen Spezifikation einfach installiert werden kann. Soll ein individuelles Gewerk mit Einsatz der Technologie realisiert werden, dann bedarf es einer objektbezogenen Planung der Konstruktion. Besondere Wünsche hinsichtlich des Designs oder der Art der Befestigung werden dabei berücksichtigt. Die Projektierung empfiehlt sich mit Solar- und Fassadenplaner durchzuführen.



Abbildung 1: Beispiele über Photovoltaik-Geländer und Glas/Metallkonstruktionen, v.l.n.r. MGTesys, Balkon- und Terrassengeländer, iQ-Bausystem GmbH & Co. KG, Terrassenüberdachung, Ertex Solar, Glas/Metall-Sonderkonstruktion

2. Optimales Solarmoduldesign für Geländer und Glasdächer

Damit das Potenzial der bifazialen Zellen in der Gebäudeintegration optimal genutzt werden kann, spielt das Flächenverhältnis zwischen Zellen und Modulfläche und die Platzierung der Module am Bauobjekt eine massgebliche Rolle. Das SUPSI hat in der Fallstudie «Optical PV raytracing simulations for the analysis of BIPV modules in different scenarios» diese Zusammenhänge untersucht.

2.1 Einflussgrössen auf den Energieertrag

Das SUPSI führte mit Hilfe einer optischen Raytracing-Simulation Energieertragsberechnungen an einer hinterlüfteten Fassade mit bifazialen Modulen durch. Insbesondere die gebaute Umgebung wurde in die Simulation mit einbezogen.

Das gewählte Szenario war eine bifaziale BIPV-Fassade, bestehend aus mehreren PV-Modulen, die vertikal in einem bestimmten Abstand vom Gebäude montiert sind. Die Resultate können im Grundsatz auch z.B. auf Balkongeländer übertragen werden.

Mit der Simulation wurden vier verschiedene Parameter untersucht, die die Rückstrahlung auf der Zellenrückseite beeinflussen:

- Der **Abstand zwischen den PV-Modulen und der Fassade**, der typischerweise für die Hinterlüftung verwendet wird. Bei Vergrößerung des Abstands, stieg die Intensität der Rückstrahlung auf die Module.
- Die Vergrößerung der Fugenabstände **zwischen den PV-Modulen (Moduldichte)** durch eine offene Montagestruktur führt ebenfalls zur Erhöhung der reflektierten Bestrahlungsstärke.
- Das **Verhältnis zwischen Zellen-/Modulfläche (Zelldichte)**, abhängig vom Abstand zwischen den PV-Zellen. Je kleiner das Verhältnis, desto mehr Licht durchdringt das Modul und wird auf der Rückseite reflektiert.
- Das **Reflexionsvermögen (Albedo)** des Fassadenuntergrunds, auf dem die Module montiert werden. Weitere Details zum Reflexionsvermögen (Albedo) sind im 1. Leitfaden: «Anwendung von bifazialen Solarmodulen – Einsatzmöglichkeiten an Gebäuden, Dimensionierung der Anlagenkomponenten» zu finden.

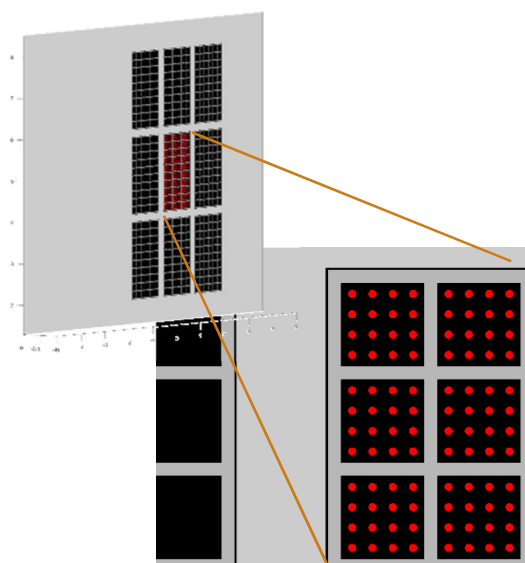


Abbildung 2: Simulationsschema. In der Mitte das zu untersuchende Modul, umgeben von identischen Elementen, mit parametrisierten Abständen von Zellen, Modulen und Fassade in Metern.

Es wurde eine ganzjährige Simulation mit Stundenintervall durchgeführt. Dabei wurden die beschriebenen Parameter verändert, damit deren Einfluss auf den Energieertrag bestimmt werden konnte.

Die elektrische Simulation zeigt, dass die reflektierte Bestrahlungsstärke auf der Rückseite des Moduls sehr inhomogen sein kann, was zu bedeutenden Fehlanpassungsverlusten (Mismatch) führen kann. D.h. der zusätzliche Ertragsgewinn im realen Betrieb kann deutlich unter dem der berechneten Simulationsergebnisse liegen.

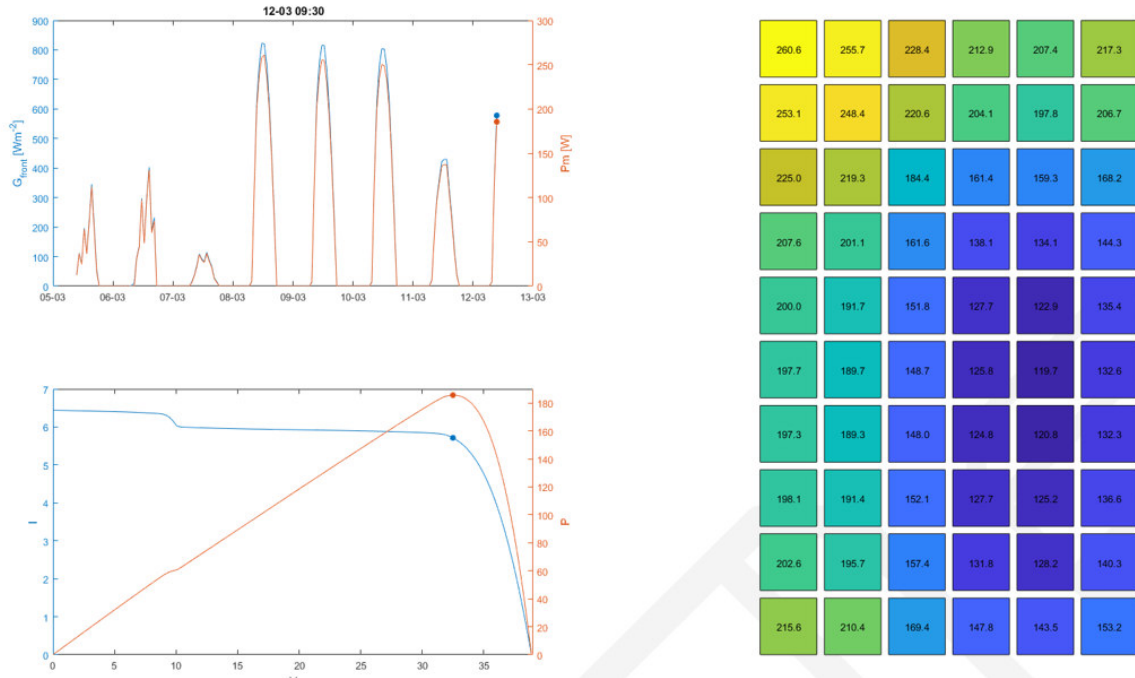


Abbildung 3: Fehlanpassung der Solarzellen in einem bifazialen Solarmodul aufgrund ungleichmäßiger Einstrahlung: Sonneneinstrahlung (oben links), I-U-Kurve des bifazialen Moduls (unten links), Höhe der Gesamteinstrahlung auf die Zellen (rechts), dunkle Farbe niedrigere Einstrahlung, helle Farbe höher.

Ein Blick auf die detaillierten Simulationsergebnisse zeigt, dass die Fehlanpassung aufgrund ungleichmässiger Einstrahlungsbedingungen eine Rolle spielt. Es ist daher umso wichtiger eine unerwünschte Verschattung der Module zu vermeiden, um weitere Leistungsverluste zu verhindern. Dies gilt insbesondere für bifaziale Module mit geringem Fassadenabstand (Rückreflektor). Die erzeugte Energiemenge, hängt linear von der Albedo ab (wenn die anderen Parameter, also Fassadenabstand, Modul- und Zelldichte nicht variiert werden). Im Gegensatz dazu ist die Abhängigkeit der Energieproduktion von der Modul- und Zelldichte nicht linear, wie in Abbildung 4 zu sehen ist.

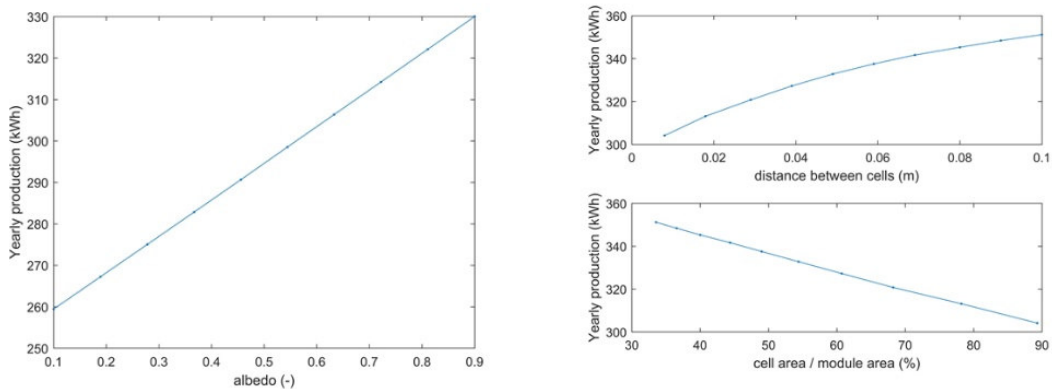


Abbildung 4: Jahresproduktion in Abhängigkeit von Albedo (linear), Dichte der Zellen und der Module (nicht linear).

Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, ermöglicht die Vergrößerung des Abstands von 10 cm auf 100 cm vom Rückreflektor eine Steigerung der pro Quadratmeter erzeugten Leistung um 13%. Darüber hinaus ermöglichen niedrigere Zelldichten bei größeren Abständen eine Steigerung der Energieproduktion, was dem Architekten und Planer Gestaltungsfreiheit gibt.

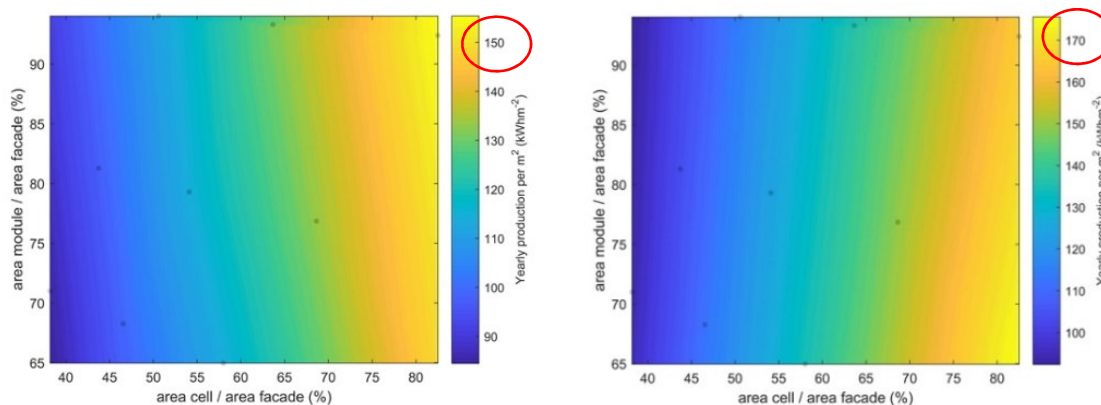


Abbildung 5: Jahresproduktion pro Quadratmeter, bei konstanter Albedo, 10 cm Fassadenabstand (links), 100 cm Fassadenabstand (rechts).

Mit anderen Worten:

- Je grösser der Fassadenabstand (Abstand zum Reflektor) ist, desto gleichmässiger verteilt sich das Licht auf der Rückseite und desto grösser ist die Energieausbeute.
- Bei kürzeren Abständen zum Reflektor (Fassadenabstand) ist der Einfluss des Zelldichte auf den Energieertrag höher als der Moduldichte.
- Bei grösseren Abständen spielt neben der Zelldistanz auch die Modulldistanz eine Rolle, damit mehr Licht auf die Rückseite gelangt und die Jahresproduktion steigt.

2.2 Empfehlungen

Aus diesen Resultaten können folgende interessante Anwendungen in der Gebäudeumgebung abgeleitet werden, bei denen bifaziale Module unmittelbare Vorteile gegenüber monofazialen bieten:

- Balkone
PLUS: besonders für den vorderen Teil von Balustraden, die mehr als einen Meter Abstand zur Wand zeigen: optimale Gleichmässigkeit der Rückstrahlung, optimale Albedo bei hellen Farben, Halbtransparenz.
Zu beachten/vermeiden: Dauerbeschattungen (eine Bestätigung der Produkteignung durch den Hersteller ist einzuholen), mechanische Robustheit/Sicherheit des Produkts
- Vorhangfassaden
PLUS: Bessere Gleichmässigkeit des Lichts bei Abständen von mehr als 50 cm zum Reflektor, optimale Albedo
Zu beachten/vermeiden: Beeinträchtigung durch die Montagekonstruktion, mechanische Robustheit/Sicherheit
- Offene Carports:
PLUS: Abstand zum Boden sorgt für gleichmässige Reflexion des Lichts auf die Unterseite optimale Albedo ohne Autos, Transparenz.
Zu beachten/vermeiden: Mechanische Robustheit/Sicherheit im Falle eines Bruchs (auskragendes Element), Neigung zur Selbstreinigung/Abrutschen des Schnees (Vermeidung von Dauerschatten).
- Beschattungssysteme
PLUS: Sonnenschutz, optimale Albedo

Zu beachten/vermeiden: mechanische Robustheit/Sicherheit, Dauerschatten

- Bauten mit großen Glasflächen

PLUS: Transparenz, diffuses Licht auf der Rückseite

Zu beachten/vermeiden: mechanische Robustheit/Sicherheit, Montagetopologie (höhere Temperaturen als bei offener Rack Montage).

3. Architektonische Gestaltungsmöglichkeiten

Mit Glas/Glas-Solarmodulen lassen sich individuell gestaltete und dimensionierte Konstruktionen entwickeln. Es gibt vielzählige Möglichkeiten in der Gestaltung. Der Ablauf der Planung erfolgt gemäss dem Phasenmodell der SIA112 und es empfiehlt sich insbesondere die Projektkosten frühzeitig zu evaluieren, da besonders die gestalterischen Wünsche zu Zusatzkosten führen.

3.1 Aussenmasse Solarmodule

Die Abmessungen von Solarmodulen können objektbezogen frei definiert werden. Abhängig vom Produktionsverfahren bieten die Hersteller Glas/Glas-Solarmodule mit Aussenmassen von bis zu 400 cm x 250 cm, bei Glasstärken von bis zu 2x15mm an. Die Anzahl der Zellen pro Solarmodul kann bis zu 1000 Stück betragen. Das Glasformat muss dabei nicht zwingend rechteckig sein, es können auch asymmetrische Formate definiert werden. Bei Solarmodulen in grossem Sonderformat sind neben den höheren Produktkosten auch Zusatzkosten für Transport und Handling bei der Montage einzuberechnen. Eine Marktübersicht von möglichen Lieferanten und deren Produkte mit bifazialen Zellen befindet sich in Kapitel 6.

3.2 Abmessungen und Design bifazialer Siliziumzellen

Die bisher marktüblichen Siliziumzellen, die in Glas/Glas-Verbund eingekapselt werden, besitzen Aussenmasse von 156.75 x 156.75mm. Die Technologie entwickelt sich jedoch rasant weiter. Immer mehr sind grössere Siliziumzellen am Markt verfügbar mit Aussenmassen von 158.75 x 158.75 mm, 166 x 166 mm und sogar 210 x 210mm. D.h. die bisher typischen Breitemasse von ca. 100 cm nehmen mit den grösseren Zellen auf mindestens ca. 105 cm zu. Bei Bauprojekten mit entsprechender Vorlaufzeit sind diese Massänderungen in der Planung zu berücksichtigen. Die frühzeitige Abklärung mit den Zulieferanten ist daher unbedingt zu empfehlen.

Typische monokristalline Siliziumzellen verfügen in den meisten Fällen über abgerundete Ecken. Diese Form der Zellen wird als «pseudo squared» bezeichnet. Es gibt aber auch sogenannte «full squared»-Zellen, die über eine vollständig quadratische Form mit vollständig ausgeprägten Ecken verfügen. Die Auswahl der Form hängt meist von der Verfügbarkeit der Produkte des Solarmodulherstellers ab.

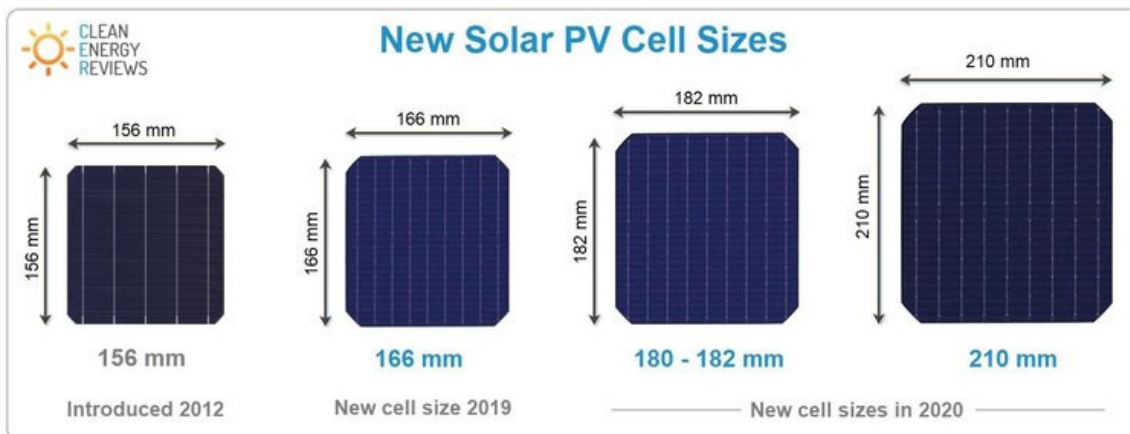


Abbildung 6: Technologische Entwicklung der Abmessungen kristalliner Siliziumzellen

Im Erscheinungsbild verfügen die bifazialen Zellen über den Vorteil, dass sie auf Front- und Rückseite annähernd gleich aussehen. Die Farbe der Zelle ist typischerweise dunkelblau, anthrazit oder schwarz. Bei herkömmlichen Zellen ist die Rückseite normalerweise grau. Bei Terrassen- oder Balkongeländern, wo sich der Betrachter auch nahe an den Solarmodulen aufhält, ist die Wahl der bifazialen Zellen daher rein optisch ein Vorteil.



Abbildung 7: Vorder- und Rückansicht einer bifazialen Zelle (links) und einer herkömmlichen (rechts) Siliziumzelle.

3.3 Anordnung bifazialer Siliziumzellen im Solarmodul

Bei Standard-Solarmodulen beträgt der Abstand zwischen den Siliziumzellen typischerweise 2 bis 5mm. Bei Herstellung objektspezifischer Module können diese Abstände auch grösser gewählt und abhängig vom Hersteller auch frei definiert werden. Der Abstand der Zellen zu den Glaskanten beträgt typischerweise minimal 20mm. An den Seiten, wo sich elektrische Querverbinder und Anschlussdosen befinden, muss mit 35 - 70mm gerechnet werden. Die Solarmodulhersteller geben Auskunft darüber, mit welchen Mindestabständen bei Ihren Produkten gerechnet werden muss.

Mit dem Abstand zwischen den Siliziumzellen kann die Lichtdurchlässigkeit durch das Glas-/Glasmodul verändert werden, typischerweise beträgt diese zwischen 10 und 40%. Bei der Bestimmung der Zellenabstände spielen in erster Linie architektonische Gründe eine Rolle. Eine hohe Lichtdurchlässigkeit bewirkt ein helleres und offenes Erscheinungsbild der Konstruktion. Nachteil: Der solare Energieertrag und damit die Effizienz der Solaranlage nimmt ab. Mit dem Einsatz bifazialer Zellen wird die Ertragsabnahme zum Teil wieder kompensiert.

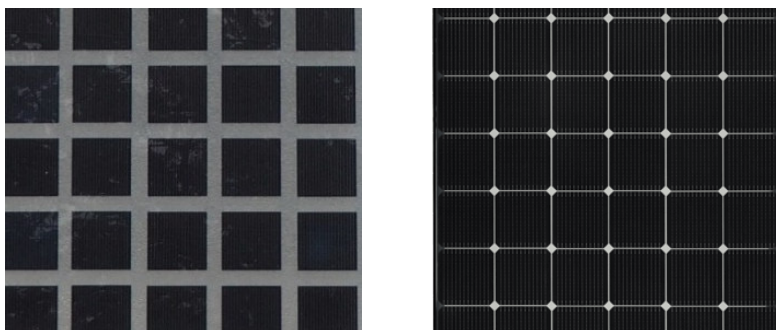


Abbildung 8: Unterschiedliche Abstände zwischen den Siliziumzellen in Solarmodulen, links 40 mm und rechts 3 mm.

Besteht die Möglichkeit den Hintergrund der Fassade oder des Mauerwerks mit einem möglichst hellen Farbton zu gestalten, dann wird der Energieertrag zusätzlich erhöht. Bei nur schwach reflektierenden Oberflächen, wie z.B. Beton ist mit Zusatzerträgen von bis zu 10% und bei hellen Oberflächen, wie z.B.

einer weissen Wand mit über 20% zu rechnen. Der Abstand zwischen den Modulen und dem Rückreflektor spielt für den Zusatzertrag der Modulrückseite ebenfalls eine wichtige Rolle, wie in Punkt 2.1 beschrieben.

3.4 Farbgestaltung

Die farbliche Gestaltung der Glas/Glas-Module ist mit unterschiedlichen Technologien möglich. Es können farbige PVB- oder EVA- Einkapselungsfolien im Glasverbund verwendet werden. Das Glas und die Zellen des Elements erhalten dadurch ein farbiges Erscheinungsbild. Als Alternative kann die Glasoberfläche beschichtet werden, mittels Nanobeschichtung, Siebdruck oder Digitalprint. Alle Farbtechnologien haben eines gemeinsam: sie bewirken eine Leistungsminderung der Solarzellen. Abhängig von Technologie, Schichtdicke und Farbton entstehen im besten Fall lediglich 10% Leistungsverlust und im ungünstigsten Fall über 40%.



Abbildung 9: Glas/Glas-Modul mit blauer PVB-Folie (Quelle: KIOTO Photovoltaics GmbH)

Die silberfarbigen elektrischen Verbinder auf Vorder- und Rückseite der Zellen können durch dunkles Tape im Herstellprozess abgedeckt oder eingefärbt werden. Die Zellen erhalten dadurch ein homogenes Erscheinungsbild.

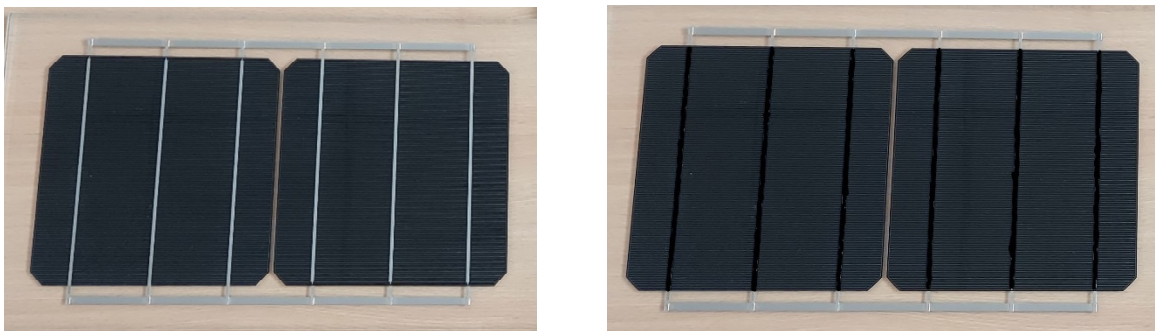


Abbildung 10: Siliziumzellen ohne abgedeckten Zellenverbinder (links) und mit abgedeckten Zellenverbinder auf den Zellen (rechts).

3.5 Strukturiertes Glas

Die Wahl strukturierter Deckgläser bietet eine weitere Möglichkeit dem Solarmodule ein individuelles Erscheinungsbild zu verleihen. Neben dem herkömmlichen glatten Floatglas kann satiniertes oder strukturiertes Glas für die solare Anwendung genutzt werden.

Nach Entwurf objektbezogener Solarmodule ist die Herstellung von Mustermodulen, im besten Fall als Funktionsmuster in Originalgrösse zu empfehlen. Das Erscheinungsbild und die elektrische Leistung kann ermittelt und bewertet werden. Bei Bedarf können unabhängige Leistungsmessungen durchgeführt werden. Das SUPSI bietet diese Dienstleistung an.

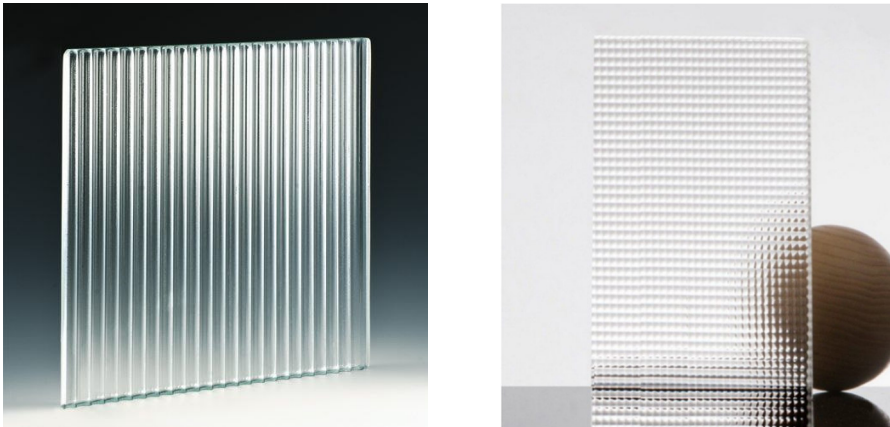


Abbildung 11: Verschiedene Varianten strukturierter Deckgläser

3.6 Sommerlicher Wärmeschutz mit bifazialen Solarmodulen

Sollen die bifazialen Solarmodule für den sommerlichen Wärmeschutz der Gebäudeverglasung genutzt werden, sind die Anforderungen gemäss SIA180 zu berücksichtigen. Um thermische Lasten ausreichend zu reduzieren, müssen die Fenster mit einer zusätzlichen Sonnenschutzvorrichtung ausgestattet werden. Der geforderte g-Wert für südorientierte Fassaden beträgt gemäss SIA180:2014 max. 0.15 bei einem Fensteranteil von bis zu 45%. Bei noch höherem Fensteranteil muss ein g-Wert unter 0.1 erreicht werden. Damit diese Anforderungen erfüllt werden können, muss der aussenliegende Sonnenschutz quasi geschlossen sein, wie es z.B. mit Lamellenstoren der Fall ist. Werden Solarmodule z.B. als Sonnenschutz-Schiebeläden eingesetzt müssen daher die Zellenabstände auf das Minimum von 2-3 mm reduziert werden und ggf. das Glas noch zusätzlich mit einer Farbbeschichtung abgedunkelt werden, insbesondere am Glasrand. Der bifaziale Zusatzenergieertrag wird in diesem Fall auf ein Minimum reduziert, da nur wenig Lichtstrahlung auf die Modulrückseite gelangen kann. Die genauen Anforderungen sind objektbezogen mit dem Bauphysiker zu klären.

4. Technische Systemauslegung

Hinweise zur technischen Systemauslegung von Solaranlagen mit bifazialen Modulen sind im Leitfaden «Anwendung von bifazialen Solarmodulen - Einsatzmöglichkeiten an Gebäuden, Dimensionierung der Anlagenkomponenten» zu finden. In diesem Kapitel wird daher ausschliesslich auf die besonders relevanten Punkte bei Anwendung gebäudeintegrierter bifazialer Solarmodule hingewiesen.

4.1 Berücksichtigung von Modulbeschattung

Der höchste Zusatzertrag mit bifazialen Solarmodulen wird erreicht, wenn die Modulrückseite möglichst von konstruktiven Teilen oder Gegenständen frei bleibt. Tritt dennoch Beschattung durch direkte oder indirekte Bestrahlung auf, dann reduziert sich zwar der Energieertrag, mit schädigenden Rückströmen in den beschatteten Zellen ist jedoch nicht zu rechnen, siehe die Publikationen von (de Groot & van Aken, 2017) und (Bende, Dekker, & Jansen, 2014). Die Bypassdioden im Modul schützen die bifazialen Siliziumzellen. Es wird dennoch empfohlen, bei Einbausituationen, wo langsam wandernde, harte Schatten durch nahe Objekte auf den Zellen auftreten können, die Einsatztauglichkeit und die Gewährleistung durch den Solarpanelherstellers bestätigen zu lassen.



Abbildung 12: Beschattungen auf der Modulrückseite durch die Betonplatte des Balkons und durch die Balkonpflanzen. Der Einsatz von herkömmlichen monofazialen Zellen ist in diesem Fall empfehlenswert (Quelle: www.easycarport.ch).



Abbildung 13: Ganzglas-Geländer mit weitestgehend unbeschatteten Zellen: Ideale Einsatzmöglichkeit für bifaziale Zellen (Quelle: <https://a2-solar.com/>).

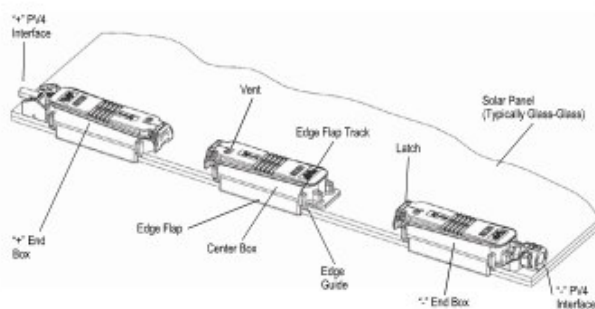
4.2 Mechanische Befestigung

Bei Sonderkonstruktionen aus Glas/Metall werden Glasstärken sowie der Glastype des Solarmoduls auf das Glashaltesystem abgestimmt. Spezialisierte Baustatiker für Glaskonstruktionen berechnen die Dimensionierung. Die Integration der DC-Kabel im Befestigungssystem sowie die allfällige Unterbringung von Leistungsoptimierern oder Mikrowechselrichtern in oder an der Tragkonstruktion sind Teil der Solarplanung. Nützliche und weiterführende Informationen zum Bauen mit Glas bietet die Broschüre «Glas in der Architektur – Sicher bauen mit Glas» von der BFU - Beratungsstelle für Unfallverhütung (Jeannotat, 2020).

4.3 Elektrische Kontaktierung der Solarmodule

Bifaziale Solarmodule müssen über kleinformatige elektrische Anschlussdosen, die am Modulrand platziert werden, verfügen. Die Abschattung der Zellen wird damit vermieden. Bei der Herstellung von kundenspezifischen Modulen werden der Typ und die Positionierung der Anschlussdosen auf die Befestigungskonstruktion abgestimmt. Bei bifazialen Solarmodulen kommen meist sogenannte unipolare Anschlussdosen zum Einsatz. D. h. der positive und negative Anschlusspol besteht jeweils aus einer eigenen Anschlussdose. Die Anschlussdosen lassen sich auf dem Modulglas, aber auch auf der Modulkante positionieren.

Glass-Glass Edge Mount Application with Flap



Traditional Mid-Panel Application

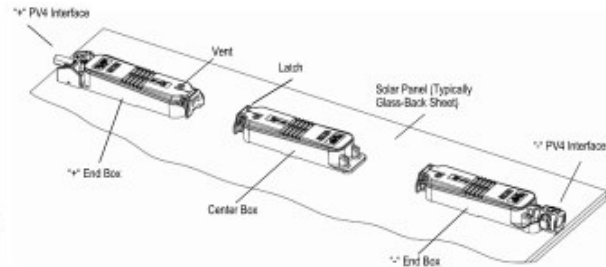


Abbildung 14: Anschlussdosen für bifaziale Solarmodule an Produktbeispielen des Herstellers TE Connectivity.

4.4 Wahl des Wechselrichterkonzepts

Zur Bestimmung der geeigneten Wechselrichterleistung wird neben der maximalen Produktionsleistung der Frontseite die Zusatzleistung der Rückseite berücksichtigt. Die Modulrückseite kann je nach lokaler Einbausituation zwischen 5% und 30% zusätzliche Leistung liefern. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, hängt dies von der Albedo des Rückreflektors, vom Abstand des Rückreflektors und von der Lichtdurchlässigkeit der gesamten Konstruktion ab. Die zu erwartende Zusatzleistung kann mit Hilfe der Planungshinweise aus der Publikation «Leitfaden bifaziale Module: Anwendung von bifazialen Solarmodulen – Einsatzmöglichkeiten an Gebäuden, Dimensionierung der Anlagenkomponenten» abgeschätzt oder mittels einer Simulationssoftware, wie z.B. PVSYST berechnet werden. Verfügt die integrierte Anlage über verschiedene ausgerichtete Flächen, dann ist ein Wechselrichterkonzept mit kleinen String-Wechselrichtern, Wechselrichtern mit Leistungsoptimierern oder Mikrowechselrichtern zu empfehlen. Die Wahl der Geräte sowie deren Dimensionierung ist für jede Teilfläche durchzuführen, lokale Beschattungen sind ebenfalls zu berücksichtigen. Insbesondere bei Einsatz von Leistungsoptimierern und Mikrowechselrichtern ist ein besonderes Augenmerk auf die Platzierung der Geräte in der Baukonstruktion zu richten. Die spätere Zugänglichkeit für Wartungszwecke ist mit einzuplanen. Weitere Informationen: Stand-der-Technik-Papier Solaranlagen n° 22001, Swissolar.

5. Wirtschaftlichkeit

Die spezifischen Anschaffungskosten bifazialer Solarmodule sind praktisch gleich, wie für herkömmliche Solarmodule. Es sind keine oder nur geringe Mehrkosten zu erwarten. Abhängig von der Art des Einsatzes werden 5% bis 30% Zusatzertrag erzielt und damit die Wirtschaftlichkeit integrierter Photovoltaikanlagen durch die Verwendung der bifazialen Technologie verbessert. In Bezug auf die Berechnung der Einmalvergütung für Photovoltaikanlagen (PRONOVO) wird bei bifazialen Solarmodulen ausschliesslich die Nominalleistung der Modulvorderseite berücksichtigt. D.h. die Förderbeitragshöhe für diese Module werden gleich berechnet wie für herkömmliche monofaziale Solarmodule. Diese Praxis wird sich voraussichtlich bald ändern, da seit Anfang 2021 die neue IEC61215-1:2021 in Kraft ist. In der Norm ist neu definiert, dass zur Bestimmung der Nominalleistung bifazialer Solarmodule neben den Bestrahlungsstärke von 1000W/m² gemäss Standard Test Conditions (STC) auf der Modulfrontseite zusätzlich eine Bestrahlungsstärke von 135W/m² auf der Modulrückseite berücksichtigt wird. Bei allfälliger Anwendung der neuen Norm zur Berechnung der Förderbeiträge, würde die Einmalvergütung für bifaziale Solarmodule um rund 10% zunehmen.

Am Beispiel typischer Kennwerte für ein Photovoltaik-Terrassengeländer wird nachfolgend der Zusammenhang zwischen bifazialer Zusatzenergieertrag und der Steigerung der Rentabilität gezeigt.

$$\text{Kapitalrendite} = \frac{\text{Ertrag} - \text{Eigenverbrauch} + \text{Ertrag Überschuss} - \text{Aufwand} - \text{Unterhalt}}{\text{Investition Photovoltaik}}$$

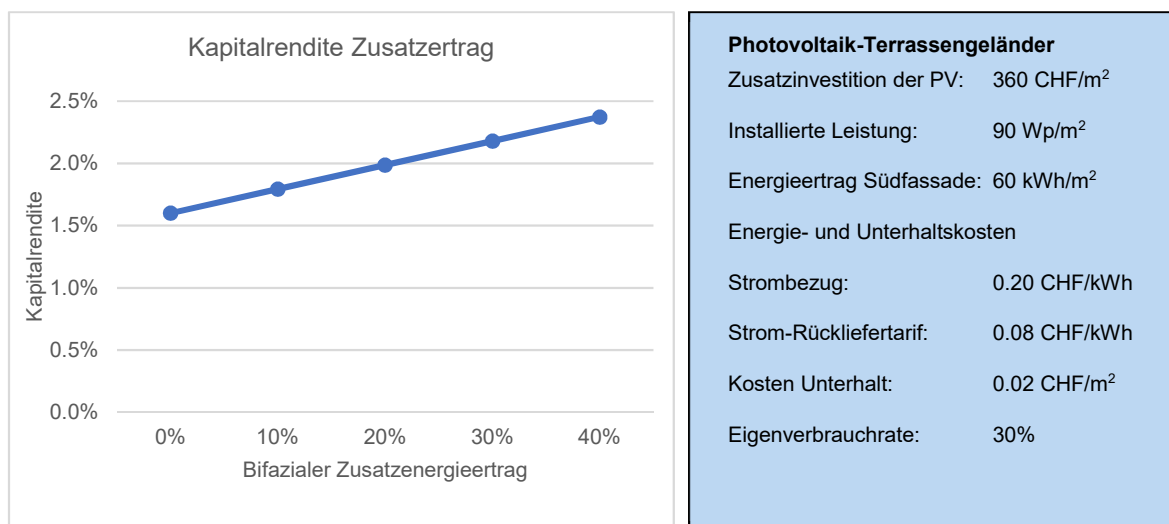


Abbildung 15: Rechenbeispiel Kapitalrendite für südorientiertes Photovoltaik-Terrassengeländer.

6. Marktübersicht Produktelieferanten

In der Schweiz sowie in den Nachbarländern bieten verschiedene Hersteller gebäudeintegrierte Photovoltaikmodule auch mit Einsatz bifazialer Siliziumzellen an. Die Unternehmen verfügen z.T. über standardisierte Produkte oder Systeme oder fertigen auch kundenspezifische Produkte. Die nachfolgende Marktübersicht zeigt eine Auswahl von Hersteller sowie deren technischen Möglichkeiten. Die Übersicht hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Unternehmen werden in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt (Stand Juli 2021).

Hersteller / Produkte	Dimensionen [mm]	Aufbau / Eigenschaften (Glasstärke, Materialien)	Transparenz	Zellenanzahl	elektrische Leistung	Bifacial Factor	Zertifikate
3S Solar Plus AG, Schorenstrasse 39, 3645 Gwatt (Thun)							www.3s-solarplus.ch
Standardprodukt MegaSlate Balcony							
L-Size	1385 x 930	4mm TVG / EVA / Zellen / EVA / 4mm	23.70%	40 Stk.	190 Wp	72%	CE Zeichen
M-Size	1050 x 930	TVG	24.50%	30 Stk.	140 Wp	72%	CE Zeichen
Spezialprodukte k.A.							
A2-Solar GmbH, Am Urbicher Kreuz 18, D-99099 Erfurt							www.a2-solar.com
Standardprodukte							
k.A.							
Spezialprodukte							
	max. 4000 x 2500	0.25 - 30mm mit Glas min. 2x 0.7mm, max.2x 15mm	10 - 90%	max. 500	max. 1'000 Wp	k.A.	erfüllen Zertifizierungen
		Farbbeschichtungen auf Glas / Zellverbinder					
Kioto Photovoltaics, Solarstrasse 1, 9300 St. Veit/Glan (A)							www.kiotosolar.com
Standardprodukte							
KPV GML bifacial	1700 x 1015	4/6 mm TVG / EVA / Zellen / EVA /	15%	60	300 Wp	k.A.	IEC61215 konform
		4/6mm TVG, Laminatstärke: 9/13mm	40%	40	200 Wp	k.A.	IEC61215 konform
Spezialprodukte							
	max. 2100 x 1210	min. 2x 2mm, max.2x 8mm, TVG / EVA / Zellen / EVA / TVG	Zellenanzahl & Tranzparenz ist definierbar			k.A.	IEC61215 konform
		strukturiertes Glas, Farbbeschichtungen auf Glas / Zellenverbinder					
Megasol Energie AG, Industriestrasse 3, 4543 Deitingen							www.megasol.ch
Standardprodukt							
M425-60-t BF GG3		4mm TVG / EVA / 4mm TVG	10%	60 Stk.	325 Wp	75%	IEC 61215 / IEC 61730
Spezialprodukte							
	max. 4000 x 2500	min. 2x 1mm, max.2x 12mm, Verkapselungsmaterial: EVA, PVB, POE, Glastyp, diverse Farbbeschichtungen	10 - 90%	max. 999	1'695 Wp	70 - 85%	IEC 61215 / IEC 61730
Metsolar, Vismaliuku st. 34, 10243 Vilnius (Lithauen)							www.metsolar.eu
Standardprodukte							
k.A.							
Spezialprodukte							
	max. 3300 x 1700	min. 2x 2mm, max.2x 8mm, Float, ESG / TVG / POE in 2-8mm, strukturiertes Glas, Farbbeschichtungen Glas / Zellenverbinder	Zellenanzahl & Tranzparenz ist definierbar			max. 93%	IEC61215 / IEC61730 konform
MGT-esys GmbH, Am Breiten Wasen 17, 6800 Feldkirch (A)							www.mgt-esys.at
Standardprodukte							
k.A.							
Spezialprodukte							
	max. 4150 x 2000	min. 2x 4mm, max.2x 12mm, TVG oder ESG / PVB / Zellen / PVB / TVG oder ESG	8 - 40%	max. 300	k.A.	70%	IEC61215 / IEC61730 konform
		strukt. Glas, Farbbeschichtungen Glas / Zellenverbinder					
Solarwall Ltd, Boulevard de l'Arc-en-Ciel 38, 1030 Bussigny							www.solarwall.ch
Standardprodukte							
k.A.							
Spezialprodukte							
	max. 5000 x 2200	min. 2x 4mm, max 2x 12mm. Glas ESG-HST / EVA oder PVB oder POE / TVG	10 - 60%	projektabhängig		k.A.	IEC61215 / IEC61730 konform
		Strukt. Glas, Farbbeschichtungen Glas / Zellenverbinder					
Sunage SA, Coso San Gottardo 54b, 6830 Chiasso							www.sunage.ch
Standardprodukte							
k.A.							
Spezialprodukte							
	max. 3000 x 3000	für Balkone 2x 6mm, 6+6+10mm, Laminatstärke: 13.5 / 23.5 mm, Float / strukturiertes Glas / ESG / TVG / Farbbeschichtungen	Zellenanzahl & Tranzparenz definierbar			k.A.	IEC61215, IEC 61730

Abbildung 16: Marktübersicht schweizerischer und europäischer Solarmodulproduzenten für bifaziale Solarmodule.

7. Literaturverzeichnis

- Leitfaden bifaziale Module: Anwendung von bifazialen Solarmodulen –Einsatzmöglichkeiten an Gebäuden, Dimensionierung der Anlagenkomponenten, EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Christian Renken, Mauro Caccivio, Francesco Frontini
- Optical PV raytracing simulations for the analysis of BIPV modules in different scenarios”, presentation in the frame of COST Action “PEARL PV”, V.Medici, SUPSI
- Near-field partial shading on rear side of bifacial modules, Koen M. de Groot and Bas B. Van Aken, ECN, The Netherlands
- Performance And Safety Aspects Of Pv Modules Under Partial Shading: A Simulation Study, E.E. Bende, N.J.J. Dekker, M.J. Jansen, ECN, The Netherlands
- Hot spot endurance test modification for Bifacial photovoltaic modules, D. Philipp, H. Manuel, E. Fokuhl, Fraunhofer ISE, Germany
- Glas in der Architektur – Bauliche Massnahmen zur Unfallprävention, Autorin Beatrix Jeannotat, Fachdokumentation der BFU - Beratungsstelle für Unfallverhütung und SIGAB - Schweizerisches Institut für Glas am Bau
- Stand-der-Technik-Papier zu VKF Brandschutzmerkblatt Solaranlagen, Swissolar

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiele über Photovoltaik-Geländer und Glas/Metallkonstruktionen, v.l.n.r. MGTesys, Balkon- und Terrassengeländer, iQ-Bausystem GmbH & Co. KG, Terrassenüberdachung, Ertex Solar, Glas/Metall-Sonderkonstruktion	4
Abbildung 2: Simulationsschema. In der Mitte das zu untersuchende Modul, umgeben von identischen Elementen, mit parametrisierten Abständen von Zellen, Modulen und Fassade in Metern.....	5
Abbildung 3: Fehlanpassung der Solarzellen in einem bifazialen Solarmodul aufgrund ungleichmäßiger Einstrahlung: Sonneneinstrahlung (oben links), I-U-Kurve des bifazialen Moduls (unten links), Höhe der Gesamteinstrahlung auf die Zellen (rechts), dunkle Farbe niedrigere Einstrahlung, helle Farbe höher.....	6
Abbildung 4: Jahresproduktion in Abhängigkeit von Albedo (linear), Dichte der Zellen und der Module (nicht linear).....	6
Abbildung 5: Jahresproduktion pro Quadratmeter, bei konstanter Albedo, 10 cm Fassadenabstand (links), 100 cm Fassadenabstand (rechts).....	7
Abbildung 6: Technologische Entwicklung der Abmessungen kristalliner Siliziumzellen	8
Abbildung 7: Vorder- und Rückansicht einer bifazialen Zelle (links) und einer herkömmlichen (rechts) Siliziumzelle.....	9
Abbildung 8: Unterschiedliche Abstände zwischen den Siliziumzellen in Solarmodulen, links 40 mm und rechts 3 mm.....	9
Abbildung 9: Glas/Glas-Modul mit blauer PVB-Folie (Quelle: KIOTO Photovoltaics GmbH)	10
Abbildung 10: Siliziumzellen ohne abgedeckten Zellenverbinder (links) und mit abgedeckten Zellenverbinder auf den Zellen (rechts).....	10
Abbildung 11: Verschiedene Varianten strukturierter Deckgläser.....	11
Abbildung 12: Beschattungen auf der Modulrückseite durch die Betonplatte des Balkons und durch die Balkonpflanzen. Der Einsatz von herkömmlichen monofazialen Zellen ist in diesem Fall empfehlenswert (Quelle: www.easycarport.ch).	12
Abbildung 13: Ganzglas-Geländer mit weitestgehend unbeschatteten Zellen: Ideale Einsatzmöglichkeit für bifaziale Zellen (Quelle: https://a2-solar.com/).....	12
Abbildung 14: Anschlussdosen für bifaziale Solarmodule an Produktbeispielen des Herstellers TE Connectivity.....	13
Abbildung 15: Rechenbeispiel Kapitalrendite für südorientiertes Photovoltaik-Terrassengeländer.	14
Abbildung 16: Marktübersicht schweizerischer und europäischer Solarmodulproduzenten für bifaziale Solarmodule.....	16