

Schindeltechnologie für Hocheffizienz PV-Module

Exposé zum Forschungsprojekt im
Rahmen der Promotion von

Nils Manuel Klasen
(M.Sc.)

Zur Einreichung bei der

Stiftung Energie & Klimaschutz Baden-Württemberg

Für den Ideenwettbewerb

**Meine Stadt von Morgen: Energielandschaft der
Zukunft**

**Referent, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Materialien,
Werkstoff- und Biomechnik (IAM-WBM):**

Prof. Dr.-Ing. habil. Marc Kamlah

Betreuung am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg i.Br.:

Dr. Achim Kraft

Dr. Ulrich Eitner

M.Sc. (Energietechnologie) Nils Klasen
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
nils.klasen@ise.fraunhofer.de, 0761/4588-2147

Schindeltechnologie für Hocheffizienz PV-Module

Motivation

Die aktuelle politische Debatte um den Verbrennungsmotor und seine Alternativen zeigt, dass in einer Zukunft frei von fossilen Brennstoffen und gleichzeitig wachsenden Mobilitäts- und Energiebedürfnissen der Menschen neue Lösungen für eine effiziente Energieerzeugung mit Hilfe erneuerbarer Energien entwickelt werden müssen. In Zukunft müssen Autos als neuer großer Verbraucher von elektrischer Energie berücksichtigt werden, denn aktuell entfällt im (Primär-)Energieeinsatz der BRD ca. ein Drittel auf den Bereich Verkehr [1]. Selbstverständlich kann Strom universell in allen Bereichen des täglichen Lebens eingesetzt werden. Ebenso vielfältig wie seine Einsatzmöglichkeiten sind auch die technischen Strategien für seine Erzeugung. In das Forschungsfeld siliziumbasierter Photovoltaik eingebunden, beschäftigt sich diese Promotion mit einer speziellen Verbindungstechnologie dem so genannten Schindeln. Mittels dieser innovativen Verschaltungstechnik sollen Solarzellen verschaltet und zu Hocheffizienz-Modulen verarbeitet werden. Dies ermöglicht eine elektrische Leistung von PV-Modulen auf Standardfläche ($\sim 1,6 \text{ m}^2$) von 400 W, was einer Leistungsdichte von 240 W/m^2 entspricht und einen neuen Benchmark im Bereich hocheffizienter PV-Module setzt. Das Modul wird damit aktuell erhältliche Premium-Module um bis zu 100 W übertreffen. Durch die anwendungsbezogene Ausrichtung dieses Projektes könnten Ergebnisse der Promotion bereits in wenigen Jahren in kommerziell erhältlichen Produkten wieder zu finden sein. Erste Schindelmodule wie in Abb. 1 zu sehen sind bereits am Markt erhältlich, weisen allerdings noch ein großes Potential zur Wirkungsgradsteigerung auf. Silicium-basierte Photovoltaik-Module halten aktuell über 90 % Marktanteil und es ist zu erwarten, dass sich dies auch mittelfristig nicht ändert. Das liegt vor allem am stark gesunkenen LCOE und der Lebensdauer von bis zu 25 Jahren für diese Technologie. Eine aktuelle Veröffentlichung in der *Nature Energy* bescheinigt der Solarenergie sogar ein bislang unterschätztes Potential zur Verringerung des Klimawandels. Danach ist ein 30 - 50%iger Anteil an der Stromerzeugung in Zukunft realistisch [3]. Es ist also auch weiterhin sehr lohnenswert, in die Photovoltaikforschung zu investieren und die Silicium-Technologie an die physikalischen Grenzen zu treiben.



Abb. 1: Demnächst kommerziell erhältliches Schindelmodul von Seraphim [2].

Gerade in urbanen Gebieten ist der limitierende Faktor für Photovoltaikanlagen die zur Verfügung stehende Fläche. Umso wichtiger ist es, die wenigen Flächen möglichst effektiv zu nutzen und den Ertrag auf ihnen zu maximieren. Hier werden Technologien wie die Schindelmodule durch ihre hohe Leistungsdichte überzeugen. Zusätzlich spielt die Integration von PV in Fassaden eine wachsende Rolle und Hersteller nehmen zur Zeit bis zu 20 % Transmissionsverluste durch bedruckte Gläser in Kauf, um das Vorhandensein von Solarzellen zu

kaschieren. Das bedeutet gleichfalls auch 20 % Leistungsverlust nur für ein gewünschtes Erscheinungsbild zu akzeptieren. Auch hier kann die Schindeltechnologie punkten: Wie in Abb. 1 zu erkennen, erscheint das Produkt nahezu aus einer homogenen Fläche zu bestehen, welche nur noch durch die schmalen Stringzwischenräume unterbrochen wird. Die Paneele eignen sich also auch hervorragend für die Fassadenintegration ohne dabei unnötige optische Verluste hinnehmen zu müssen. Diese Promotion hat also gute Chancen darauf, bereits in naher Zukunft ein Teil der Stadt von morgen zu werden.

Theoretischer Hintergrund und Problemstellung

Beim Schindeln werden Solarzellen ohne die Verwendung von Kupfer-Verbindern direkt Vorder- zu Rückseite mechanisch und elektrisch miteinander verbunden (Abb. 2b). Zusätzlich kommen, wie in Abb. 3 zu erkennen, schmale Zellstreifen anstelle von Vollformatwafern zum Einsatz. Folglich ist der Strom durch die in Serie geschalteten Elemente verglichen zu Standard 6"-Zellen deutlich reduziert.

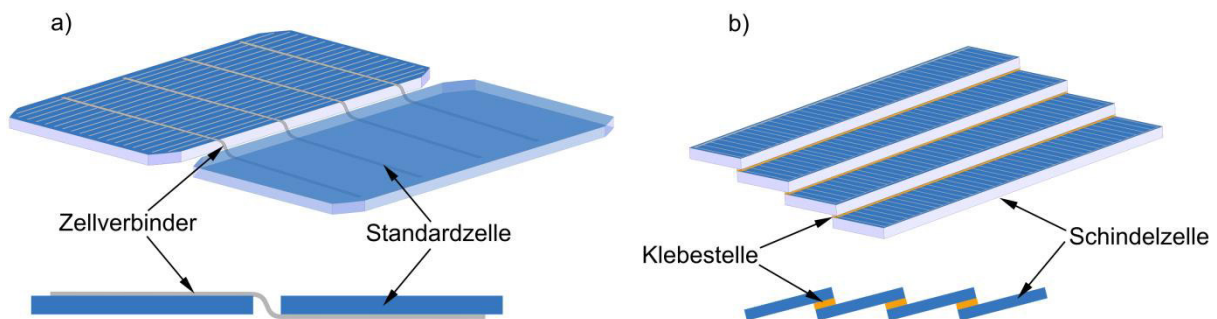


Abb.2: a) Standardverschaltung von Solarzellen mit Zellverbindern b) Schindeltechnologie

Beide Maßnahmen führen zu einer Verringerung der elektrischen Verluste im Modul. Kleinere Ströme und geringere Transportwege in den Zellstreifen ermöglichen zudem eine feinere Metallisierung ohne sichtbare Busbars auf der Zelloberfläche. So kann auch auf Zellseite die aktive Fläche gesteigert werden und Silber-Metallisierung eingespart werden. Der Knackpunkt für die Modulproduktion liegt in der Fugestelle zwischen den Solarzellen. Hier entstehen im fertigen Modul hohe (thermo-)mechanische Belastungen, verursacht durch stark differierende

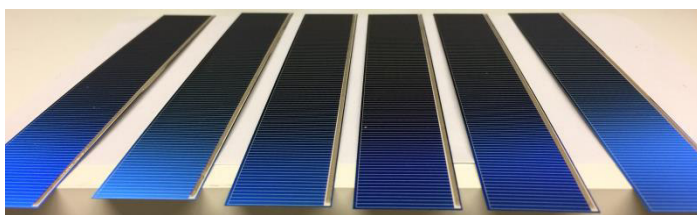


Abb. 3: Aus einer 6"-Solarzelle werden 6 Schindelzellen hergestellt. Hier bereits mit leitfähigem Kleber versehen.

thermische Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Silicium. Gleichzeitig ist das verbindende Material das einzige Glied, welches Bewegungen der Verbundmaterialien im Modul ermöglicht, weshalb Lote aufgrund ihrer hohen Steifigkeit als eher ungeeignet gelten.

Polymerbasierte, durch metallische Partikel leitfähige Klebstoffe bieten die Möglichkeit die Anforderungen an die Flexibilität und gleichzeitig ein ausreichendes Maß an elektrischer Leitfähigkeit zu erfüllen. Deren mechanische Eigenschaften lassen sich über die Wahl der Polymermatrix, z.B. Silikone oder Epoxide und ebenfalls durch ihre Verarbeitung einstellen. Jedoch fehlen essentielle Erfahrungen, ihre Langzeitstabilität und Beständigkeit sowohl der Verbindung als auch das Material selbst betreffend. Ihr mechanisches Verhalten folgt komplexen visko-elastischen Materialmodellen und ist damit neben einer starken Temperaturabhängigkeit auch abhängig von Belastungsfrequenzen. Dies bedeutet beispielsweise, dass ein solches Material bei einer sprunghaft erzwungenen Dehnung um Größenordnungen steifer reagieren

kann, als es das würde, wenn dieselbe Dehnung langsam aufgebaut wird. Im Rahmen der Promotion sollen die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der leitfähigen Kleber im Detail betrachtet und Materialmodelle entwickelt werden, die in Simulationen das Design der Fügestelle unterstützen. Um zuverlässige Ergebnisse für die mechanischen Eigenschaften zu erhalten müssen bestehende Messmethoden weiter- oder neu entwickelt werden. Zwei gängige Verfahren sind die dynamisch mechanische Analyse oder Messungen mit einem Rheometer, welche die Antwort des Materials auf eine schwingende Anregung bestimmen. Zugversuche zeigen, dass die bestimmbar Materialgrößen wie E-Modul, Dehngrenze oder Bruchspannung starken Schwankungen unterliegen und eventuell statistische Methoden herangezogen werden müssen, um diese Größen zu beschreiben. Ein zentraler Fokuspunkt der Forschung wird also auf der Untersuchung dieser Materialklasse liegen, auch, weil sich leitfähige Klebstoffe aktuell in der PV-Branche kaum gegen das etablierte Lötten durchzusetzen vermögen. Dies könnte sich aber bereits in naher Zukunft ändern, sollte es zu einem Wegfall der Ausnahmeregelung von der RoHS über den Einsatz von Blei in elektronischen Bauteilen kommen. Neben bleifreien Loten werden leitfähige Klebstoffe dann eine wichtige Rolle spielen.

Hohe witterungsbedingte Beanspruchungen und eine Leistungsgarantie von 25 Jahren auf PV-Module verlangen nach der Untersuchung der Beständigkeit der Klebstoffe. Ändern sich die mechanischen Eigenschaften über die Zeit? Unterliegen sie im Modul Einflüssen wie Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Chemikalien und lassen sich diese mit Versagensmechanismen in Verbindung bringen?

Neben dem Materialwissenschaftlichen Aspekt werden Fragen aus der Modultechnologie eine zweite große Rolle spielen. Im Modul kommen erstmals Schindel-verschaltete Bifazialzellen, Vorder- und Rückseiten aktive Solarzellen, zum Einsatz. Dadurch ändern sich die Anforderungen an den Modulaufbau, z.B. wird eine transparente Rückseite benötigt. Hier sollen die erarbeiteten viskoelastischen Modelle in FEM-Simulationen eingesetzt werden, um die Modulentwicklung voran zu treiben. Die Bifazialität kann darüber hinaus auch Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Moduls nehmen. Beispielsweise sind Verschattung und daraus resultierende Hotspots, Stellen im Modul, die sich so stark aufheizen, dass sie das Modul schädigen oder gar zerstören können, noch eine große Unbekannte.

Zelle zu Modul Analyse (CTM)

Um verschiedene Modultechnologien sinnvoll miteinander vergleichen zu können, bietet es sich an nicht absolute Leistungswerte, sondern die relative Änderung von den eingangs verwendeten Zellen zum fertig laminierten Modul heran zu ziehen. Man spricht von einer Zelle-zu-Modul Analyse (engl. Cell-to-Module, CTM). Eine solche Analyse erfolgt kaskadenartig und deckt dabei verschiedenste Verlust- und Gewinnmechanismen ab [4]. Diese werden in k-Faktoren ausgedrückt und lassen sich nach ihrem physikalischen Ursprung (optisch, elektrisch, geometrisch) gruppieren. Das Ergebnis ist ein, wie in Abb. 3 gezeigtes Wasserfalldiagramm, das übersichtlich Mechanismen und ihre Auswirkung auf die Modulleistung quantitativ darstellt.

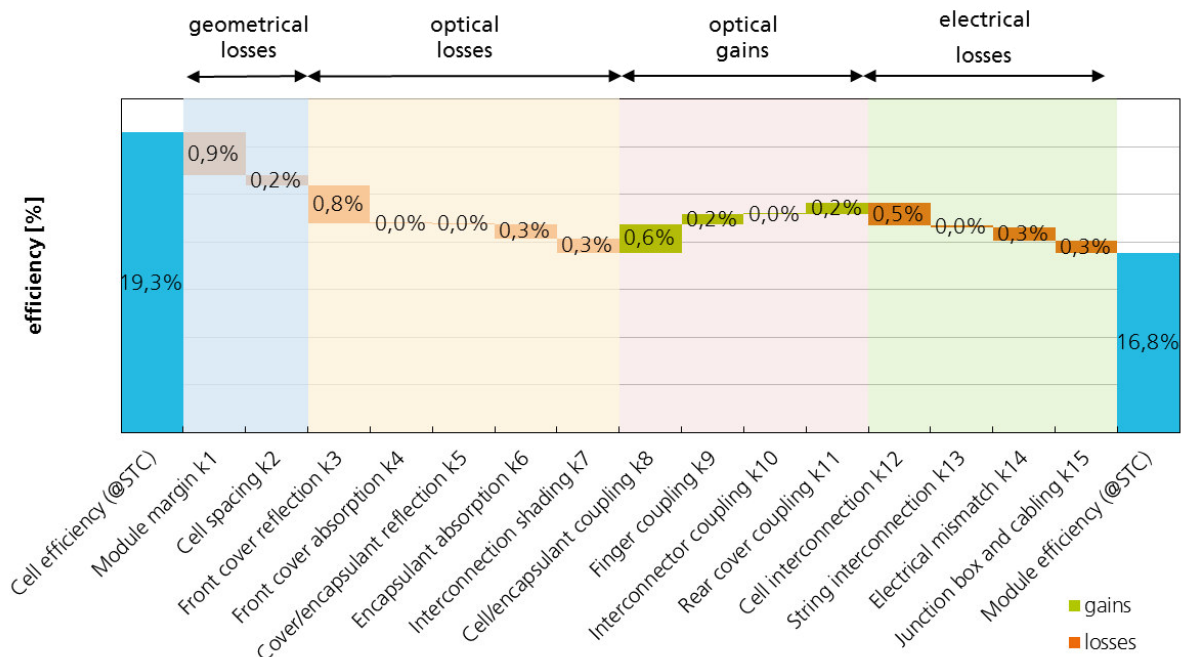


Abbildung 3: Beispielhafte CTM-Analyse für den Wirkungsgradverlust bei Standardverschaltung [5].

Qualitativ wird im Folgenden aufgezeigt, an welchen der Verlustfaktoren die Schindeltechnologie ansetzt und welche Vorteile sich daraus ergeben. Das Ergebnis ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab.1: Durch das Schindelkonzept optimierte Verlustfaktoren der CTM-Analyse

k-Faktor	Vorteil der Schindeltechnologie gegenüber Standardverschaltung
k2	Durch die Überlappung der Zellen werden inaktive Flächen, auf denen sich Metallisierung befindet durch aktive Zellfläche der darüber liegenden Zelle ersetzt. Hier k2 wird positiv und steigert somit die Modulleistung.
k7	Wird deutlich verringert, da weniger Zellmetallisierung benötigt wird (dünnere Finger) und es keine Verschattung durch Zellverbinder gibt.
k12	Die Sechstelung der Schindelzellen resultiert in einer deutlichen Verringerung des Stroms innerhalb eines Strings und reduziert so die ohmschen Verluste in welche der Strom quadratisch eingeht. Abhängig von der Leitfähigkeit des verwendeten Materials sind auch in der Fügestelle geringere Verluste zu erwarten.
k14	Durch eine Initialcharakterisierung der Solarzellen lassen sich diese mittels eines Sortieralgorithmus elektrisch aufeinander abstimmen und verringern so den elektrischen Mismatch. Ebenso verringern hohe Ablagegenauigkeiten durch die Anwendung eines patentierten Prozesses diesen elektrischen Mismatch weiter.

Ziel der Promotion

Ziel dieser Promotion ist die Demonstration der Rekordleistung von 400 W auf der Fläche eines Standard-PV-Moduls. Dies entspricht einer Leistungsdichte von 240W/m^2 und öffnet das Fenster zu einer neuen Hochleistungstechnologie für Silizium basierte Photovoltaische Module. Erreicht wird dies durch die Implementierung der Schindeltechnologie in die Modulproduktion. Ein tiefgehendes wissenschaftliches Verständnis der dafür eingesetzten leitfähigen Klebstoffe sowie die Analyse der Langzeitstabilität dieser innovativen Verschaltungstechnologie für Silizium Solarzellen stehen im Fokus der Promotion. Die zurzeit verwendeten bleihaltigen Lote für die Verschaltung von Solarzellen bieten keine nachhaltige Lösung. Die PV-Industrie benötigt Forschungsergebnisse, welche Leitkleber als echte Alternative in der hart umkämpften Branche etablieren. Das hier untersuchte innovative Konzept zur Verschaltung von hocheffizienten Solarzellen wird potentiell die nächste Generation PV-Module darstellen.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt vom 27.03.2017, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren>
- [2] Webauftritt Seraphim, <http://www.seraphim-energy.com/en/portal/module-eclipse>
- [3] Creutzig, Felix; Agoston, Peter; Goldschmidt, Jan Christoph; Luderer, Gunnar; Nemet, Gregory; Pietzcker, Robert C. (2017): The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. In: *Nat. Energy* 2, 17140 EP -. DOI: 10.1038/nenergy.2017.140.
- [4] I. Haedrich et al, "Unified methodology for determining CTM ratios: Systematic prediction of module power", *Solar energy materials and solar cells* 131 (2014), pp.14-23, ISSN: 0927-0248, SiliconPV, 2014
- [5] Mittag, Max; Ebert, Matthieu (2017): Systematic PV-module optimization with the cell-to-module (CTM) analysis software "SmartCalc.CTM". In PV-International (tbp)

Schindeltechnologie für Hocheffizienz Solarmodule

N. Klasen^{1,2}, A. Mondon¹, A. Kraft¹, U. Eitner¹, M. Kamlah²

¹ Fraunhofer Institut für Solare Energie Systeme ISE, Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Tel. +49 761/4588-2147, nils.klasen@ise.fraunhofer.de

² Institut für Angewandte Materialien – Werkstoff- und Biomechanik (IAM-WBM), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Motivation und Vision

- Stadt der Zukunft: Begrenzte Flächen und hohe Ansprüche an das Erscheinungsbild von Photovoltaik.
- Wirkungsgrade von Silicium-Solarzellen nähern sich ihrem physikalischen Limit ($\eta_{2017} = 26,6\%$ | $\eta_{max} = 29,4\%$) [1,2].
- Potential für Leistungssteigerungen bei der Modulintegration, also der Verschaltung und Einkapselung von Solarzellen zu einem Solarmodul mit Verwendung der **→ Schindeltechnologie**

Schindelverschaltung

- Direkte elektrische und mechanische Verbindung von Solarzellen [3].
- Zellzwischenräume und konventionell genutzte Cu-Zellverbinder entfallen.

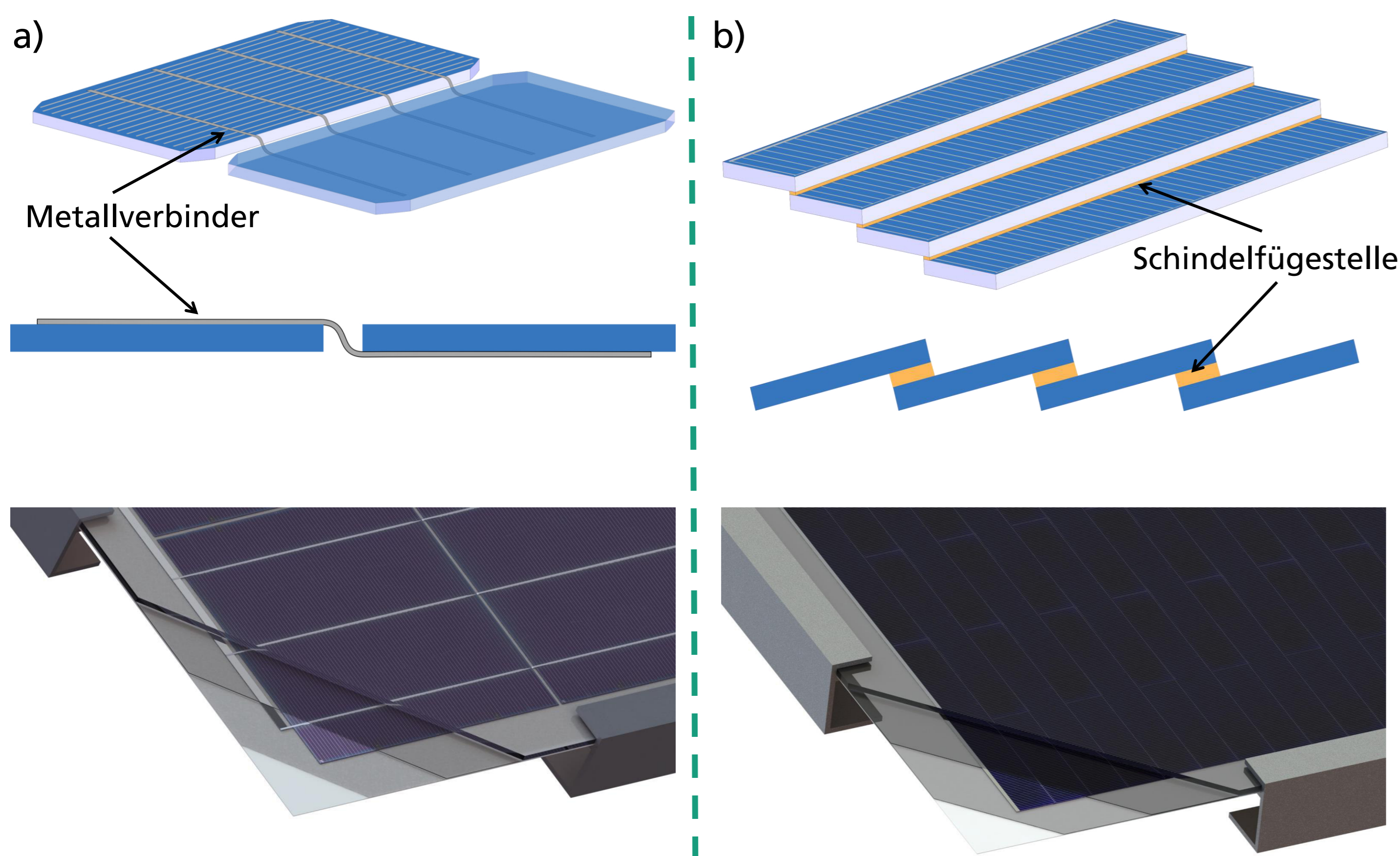


Abb.1: a) Konventionelle Verschaltung mittels Cu-Zellverbinder
b) Schindelverschaltung über eine Fügestelle zwischen den Zellen

Vorteile der Schindelverschaltung

- ⊕ Keine Verluste durch Zellzwischenraum } Steigerung der aktiven Modulfläche
- ⊕ Keine Verschattung durch Zellverbinder } Steigerung der aktiven Modulfläche
- ⊕ Keine elektrischen Verluste durch Zellverbinder } Reduktion elektr. Verluste
- ⊕ Geringere Stromstärken verringern elektrische Verluste } Reduktion elektr. Verluste

$$I_{ph} \propto A_{Zelle} \quad // \quad P_{Verlust, el.} \propto I_{ph}^2$$

- ⊕ Mehr Leistung auf gleicher Modulfläche

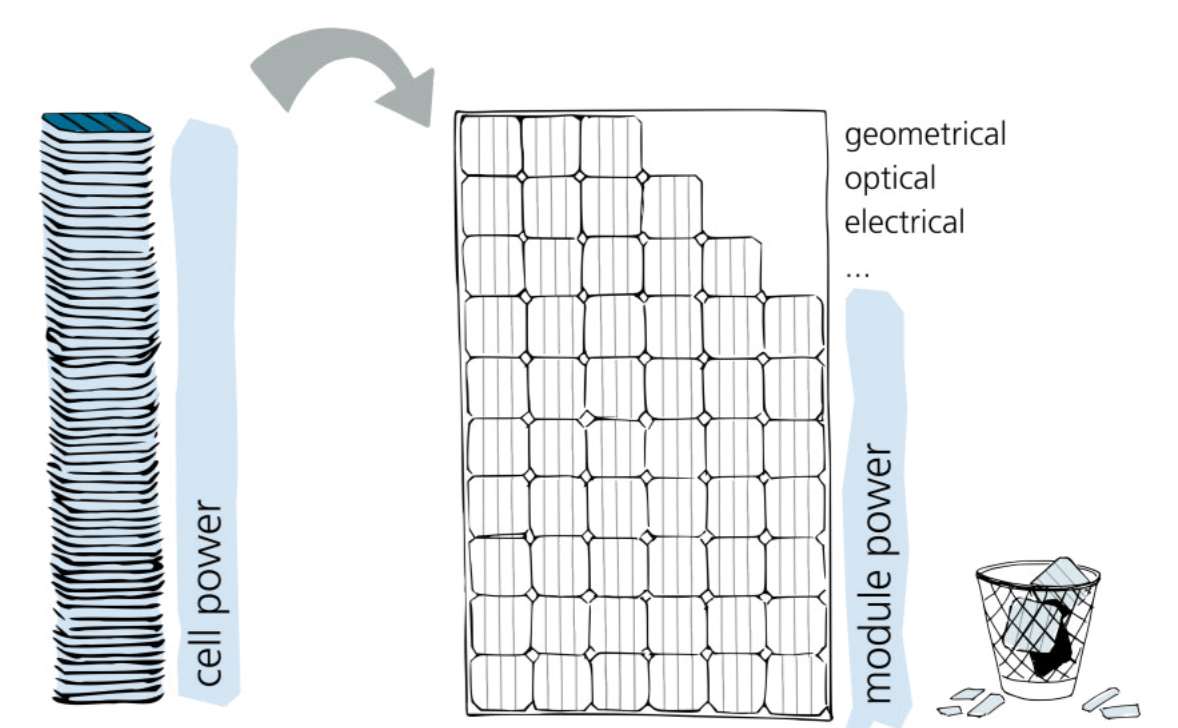
Ziel: $240 \frac{W}{m^2}$ bzw. 400 W/Modul | Aktuell: $\sim 180 \frac{W}{m^2}$ bzw. 300 W/Modul

Darüber hinaus:

- ⊕ Bleifreie Lote / leitfähige Klebstoffe reduzieren Blei im Modul signifikant.
- ⊕ Einsatz bifazialer Solarzellen zur Steigerung der Modulleistung
- ⊕ Hohe Ästhetik für Gebäudeintegration

Cell-to-Module (CTM)

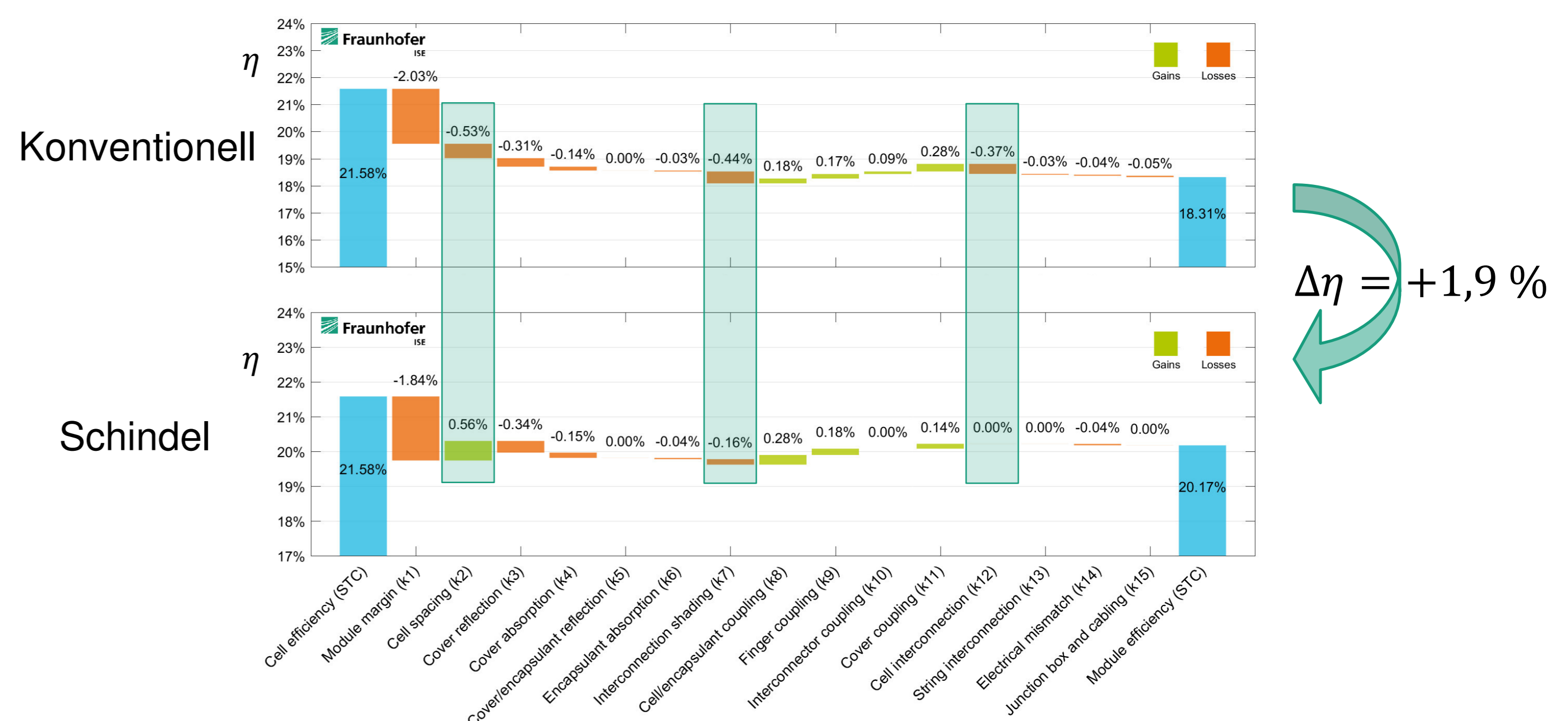
- Leistungs- und Wirkungsgradverluste bei der Modulintegration [4].
- Ursache: Verschattung, Absorption, Reflexion, ohmsche Verluste, inaktive Flächen
- Analyse mit Cell-to-Module (CTM)-Ansatz.
- Vergleich der absoluten elektrischen Leistung / des Wirkungsgrades vor und nach der Modulintegration.



Tab.1: Verbindungstechnologien bei gleicher Modulfläche in der CTM-Analyse [5]

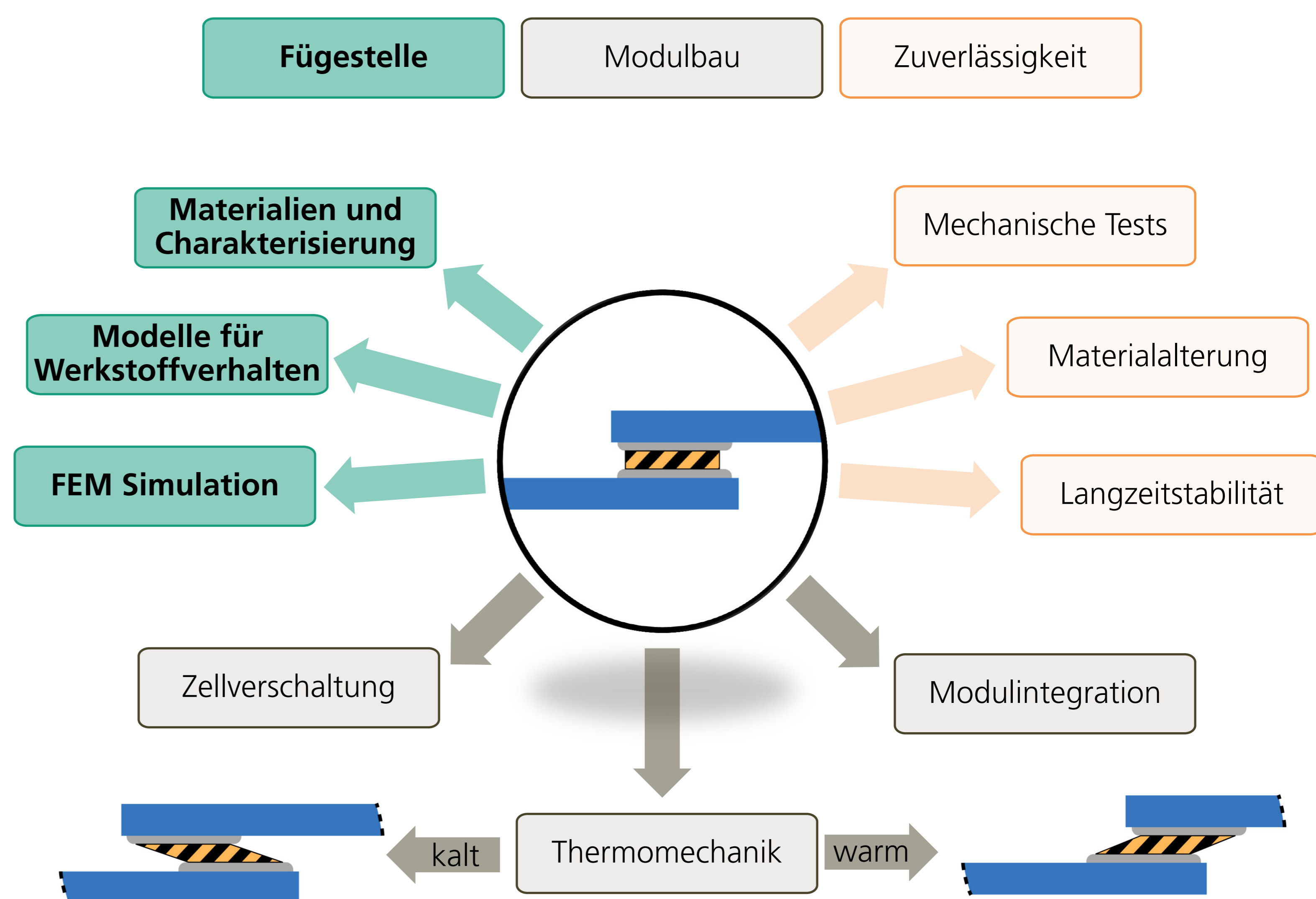
		Zellen	Modul	CTM	
Konventionell	Leistung P [W]	314	302	-12	ΔP = +34 W
	Wirkungsgrad η [%]	21,6	18,3	-3,3	
Schindel	Leistung P [W]	338	336	-2	
	Wirkungsgrad η [%]	21,6	20,2	-1,4	

Bei gleicher Leistung ~10 % Flächeneinsparung durch Schindeltechnologie



Promotion zur Schindelverschaltung

- Fügestelle als zentrales Merkmal der Schindeltechnologie im Fokus der Forschungsarbeiten
- Folgende Themenfelder werden bearbeitet:



[1] Richter, Armin et al. (2013): Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells. In: *IEEE J. Photovoltaics* 3 (4), S. 1184–1191. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2013.2270351.
 [2] Yoshikawa, Kunta et al. (2017): Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. In: *Nat. Energy* 2 S. 17032. DOI: 10.1038/nenergy.2017.32.
 [3] Klasen, Nils et al. (tbp): Shingled Cell Interconnection: Aiming for a new Generation of Bifacial PV-Modules. Presented at 7th Metallization Workshop 2017, Konstanz, Germany.
 [4] Haedrich, Ingrid et al. (2014): Unified methodology for determining CTM ratios. Systematic prediction of module power. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 131, S. 14–23. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.06.025.
 [5] Mittag, Max et al. (2017): Cell-to-Module (CTM) analysis for photovoltaic modules with shingled solar cells. presented at the 44th IEEE PVSC, Washington, D.C.