

Photovoltaik- Sonnenschutzverglasung (PV-SoGla)

Kai Gehrke, Nico Ruskaup, Stephan Heise

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Vernetzte Energiesysteme
Oldenburg



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Forschungsbericht 2026-12

Photovoltaik-Sonnenschutzverglasung (PV-SoGla)

Kai Gehrke, Nico Ruskaup, Stephan Heise

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Vernetzte Energiesystem
Oldenburg

61 Seiten
67 Bilder
1 Tabellen
20 Literaturstellen



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



Herausgeber:

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Wissenschaftliche
InformationLinder Höhe
D-51147 Köln

ISSN 1434-8454
ISRN DLR-FB-2026-12
Erscheinungsjahr 2026
DOI: [10.57676/8k73-ts35](https://doi.org/10.57676/8k73-ts35)

Erklärung des Herausgebers

Als Manuskript gedruckt.

Abdruck oder sonstige Verwendung nur nach Absprache mit dem DLR gestattet.

Photovoltaik, Dünnschicht, Transparente Photovoltaik, Fenster

Kai GEHRKE, Nico RUSKAUP, Stephan HEISE

DLR, Institut für Vernetzte Energiesystem, Oldenburg

Photovoltaik-Sonnenschutzverglasung (PV-SoGla)

Das Projekt PV-SOGLA zielt darauf ab, Grundlagen zu schaffen, um zukünftig Glas-veredelnde Betriebe zu befähigen, Photovoltaik-Sonnenschutzverglasungen in ihren vorhandenen Prozesslinien herzustellen. Aufgrund der großen Verbreitung von Glasfassaden vor allem in stark urbanisierten Räumen können die Ergebnisse dazu beitragen, die Klimaziele im Gebäudebestand schneller zu erreichen. Ziel des Projekts ist der Erwerb von neuem Grundlagenwissen bezüglich der Farbneutralität der neuartigen transparenten Solarzelle und die Untersuchung von Sputterverfahren zur Herstellung der Halbleiterschichten und insbesondere eines sehr dünnen Germaniumabsorbers. In experimentellen Serien gekoppelt mit einer optischen Modellierung werden alle relevanten Stellschrauben in der Technologie der auf einer Nanokavität basierenden Solarzelle auf die Erreichung der erforderlichen Transmission und deren erforderliche chromatischen Eigenschaften hin analysiert. Dazu werden gesputterte Germaniumabsorber mit einem bekannten Germaniumabsorber aus einem PECVD Prozess verglichen und gezielt Parameter identifiziert und untersucht, welche es ermöglichen, den gesputterten Absorber in einer Dünnschicht solarzelle einzusetzen. Auf Basis dessen wird ein Sputterprozess definiert, welcher einen geeigneten Germaniumabsorber erzeugt. Weiter wird dieser Prozess genutzt, um eine experimentelle Solarzelle mit diesem gesputterten Germaniumabsorber zu produzieren. Es konnte eine Effizienz von über 1% erreicht werden. Relevante Einflussgrößen auf die elektrischen Eigenschaften der Solarzelle werden dabei systematisch untersucht. Um die Abscheidung der aktiven Halbleiterschichten zukünftig in Prozesslinien der Glasveredler zu integrieren, werden an einer industrienahen In-line-Magnetron sputteranlage Germaniumschichten gesputtert.

Photovoltaic, Thin film, transparent Photovoltaic, Window

(Published in German)

Kai Gehrke, Nico Ruskaup, Stephan Heise

German Aerospace Center (DLR), Institut für Vernetzte Energiesystem, Oldenburg

Photovoltaic Solar Protection Window (PV-SoGla)

The PV-SOGLA project aims at creating a basis to enable glass-processing companies to manufacture photovoltaic solar control glazing in their existing process lines in the future. Due to the widespread use of glass facades, especially in highly urbanized areas, the results can help to achieve the climate goals for existing buildings more quickly. The aim of the project is to acquire new basic knowledge regarding the color neutrality of the novel transparent solar cell and to investigate sputtering processes for the production of the semiconductor layers and in particular a very thin germanium absorber. In experimental series coupled with optical modeling, the relevant parameters of the technology of the nanocavity-based solar cell are analyzed to achieve the required transmission and its required chromatic properties. For this purpose, sputtered germanium absorbers are compared with a known germanium absorber from a PECVD process and specific parameters are identified and investigated which enable the sputtered absorber to be used in a thin-film solar cell. Based on this, a sputtering process is defined which produces a suitable germanium absorber. Furthermore, this process is used to produce an experimental solar cell with this sputtered germanium absorber. An efficiency of over 1% was achieved. Relevant parameters influencing the electrical properties of the solar cell are systematically investigated. In order to integrate the deposition of the active semiconductor layers into glass refiners' process lines in the future, germanium layers are sputtered on an industry-oriented in-line magnetron sputtering system.

Photovoltaik-Sonnenschutzverglasung (PV-SoGla)

Zukunft Bau Forschungsbericht

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)

Institut für Vernetzte Energiesysteme

Carl-von-Ossietzky-Str. 15, 26129 Oldenburg

Kai Gehrke, Nico Ruskaup, Stephan Heise

Telefon 0441 99906-236

kai.gehrke@dlr.de

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen aus Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung.

Kurzbeschreibung

Das Projekt PV-SOGLA zielt darauf ab, Grundlagen zu schaffen, um zukünftig Glas-veredelnde Betriebe zu befähigen, Photovoltaik-Sonnenschutzverglasungen in ihren vorhandenen Prozesslinien herzustellen. Aufgrund der großen Verbreitung von Glasfassaden vor allem in stark urbanisierten Räumen können die Ergebnisse dazu beitragen, die Klimaziele im Gebäudebestand schneller zu erreichen. Ziel des Projekts ist der Erwerb von neuem Grundlagenwissen bezüglich der Farbneutralität der neuartigen transparenten Solarzelle und die Untersuchung von Sputterverfahren zur Herstellung der Halbleiterschichten und insbesondere eines sehr dünnen Germaniumabsorbers. In experimentellen Serien gekoppelt mit einer optischen Modellierung werden alle relevanten Stellschrauben in der Technologie der auf einer Nanokavität basierenden Solarzelle auf die Erreichung der erforderlichen Transmission und deren erforderliche chromatischen Eigenschaften hin analysiert. Dazu werden gesputterte Germaniumabsorber mit einem bekannten Germaniumabsorber aus einem PECVD Prozess verglichen und gezielt Parameter identifiziert und untersucht, welche es ermöglichen, den gesputterten Absorber in einer Dünnschicht-Solarzelle einzusetzen. Auf Basis dessen wird ein Sputterprozess definiert, welcher einen geeigneten Germaniumabsorber erzeugt. Weiter wird dieser Prozess genutzt, um eine experimentelle Solarzelle mit diesem gesputterten Germaniumabsorber zu produzieren. Es konnte eine Effizienz von über 1% erreicht werden. Relevante Einflussgrößen auf die elektrischen Eigenschaften der Solarzelle werden dabei systematisch untersucht. Um die Abscheidung der aktiven Halbleiterschichten zukünftig in Prozesslinien der Glasveredler zu integrieren, werden an einer industrienahen In-line-Magnetronsputteranlage Germaniumschichten gesputtert.

Abstract in English

The PV-SOGLA project aims at creating a basis to enable glass-processing companies to manufacture photovoltaic solar control glazing in their existing process lines in the future. Due to the widespread use of glass facades, especially in highly urbanized areas, the results can help to achieve the climate goals for existing buildings more quickly. The aim of the project is to acquire new basic knowledge regarding the color neutrality of the novel transparent solar cell and to investigate sputtering processes for the production of the semiconductor layers and in particular a very thin germanium absorber. In experimental series coupled with optical modeling, the relevant parameters of the technology of the nanocavity-based solar cell are analyzed to achieve the required transmission and its required chromatic properties. For this purpose, sputtered germanium absorbers are compared with a known germanium absorber from a PECVD process and specific parameters are identified and investigated which enable the sputtered absorber to be used in a thin-film solar cell. Based on this, a sputtering process is defined which produces a suitable germanium absorber. Furthermore, this process is used to produce an experimental solar cell with this sputtered germanium absorber. An efficiency of over 1% was achieved. Relevant parameters influencing the electrical properties of the solar cell are systematically investigated. In order to integrate the deposition of the active semiconductor layers into glass refiners' process lines in the future, germanium layers are sputtered on an industry-oriented in-line magnetron sputtering system.

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung.....	2
Abstract in Englisch	2
Einführung.....	4
Problemstellung.....	6
Zielstellung	7
Forschungsdesign	8
Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben	8
Forschungsfragen	9
Untersuchungsmethodik.....	9
Projektteam.....	10
Arbeitsschritte und Meilensteine.....	11
Meilensteine	12
Projektverlauf	13
Vorbereitende Arbeiten und Methoden zum Germaniumspattern	13
Prozessentwicklung	14
Charakterisierung Germaniumschichten	14
Wachstumsgeschwindigkeit	15
Homogenität	15
Morphologie	16
Sputterdruck	16
Sputtergase	17
Absorberentwicklung	20
Herstellung Solarzellen und Charakterisierung.....	27
Optische Zelleigenschaften und Farbneutralität	31
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	42
Ertragsprognose.....	44
Auswirkungen auf das Stadtklima.....	57
Auswirkung der Hauptanwendung	57
Alternative Anwendungen.....	57
Dissemination.....	59
Ergebnisse	60
Schlussworte.....	60
Anhang	60

Einführung

Moderne Städte sind geprägt durch die Silhouetten großer Gebäude, deren Fassaden sich aus großflächigen Verglasungen zusammensetzen, wie beispielsweise in Abbildung 1 anhand der Oulu Stadtbibliothek dargestellt. Diese transparenten Strukturen dienen nicht nur als architektonisches Stilmittel, sondern bieten auch funktionale Vorteile, etwa eine verbesserte Tageslichtnutzung und einen offenen Raumeindruck. Zugleich stellen großflächige Glasfassaden jedoch eine besondere Herausforderung an den baulichen Wärmeschutz und die Steuerung des Lichteinfalls dar. Um die mit dieser Bauweise verbundenen Probleme, insbesondere den Wärmeeintrag in das Gebäudeinnere zu adressieren, greifen Architekten auf Sonnenschutzverglasungen zurück.



Abbildung 1: Glasfassade einer Bibliothek in Finnland. [1]

Sonnenschutzverglasungen arbeiten nach dem Prinzip, nur einen definierten Anteil des Sonnenlichts in das Gebäudeinnere zu lassen, siehe Abbildung 2. Dies geschieht entweder durch Reflexion oder durch Absorption eines Teils der einfallenden Strahlung, sodass die Transmission gezielt reduziert wird. Auf diese Weise lassen sich einerseits der solare Leistungseintrag steuern und andererseits unerwünschte Blendungen minimieren. Für die Herstellung solcher Verglasungen greift die Industrie auf großtechnische Sputteranlagen zurück, mit denen dünne Materialschichten auf Gläser aufgebracht werden.

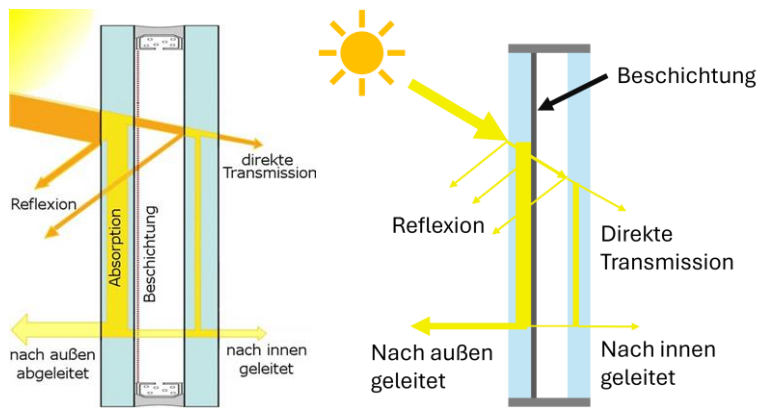


Abbildung 2: Eine Sonnenschutzverglasung lässt nur einen kleinen Teil des Sonnenlichts in das Gebäude durch.

Urbane Glasfassadenflächen bieten das Potential, für eine nachhaltigere Energieversorgung genutzt zu werden. Dazu fokussiert sich dieses Projekt darauf, die Grundlagen zu bereiten, bestehende Sonnenschutzverglasungen durch die Funktionalität von transparenten, farbneutralen Dünnschichtsolarzellen zu erweitern. Der Ansatz hierbei ist es, teiltransparente photovoltaisch aktive Schichten zu entwickeln, die sich in die bestehenden Beschichtungslinien einfügen lassen - unter Beibehaltung ihrer Sonnenschutzfunktion und ohne das architektonische Erscheinungsbild durch störende Farbeindrücke innen oder außen zu beeinträchtigen. Entscheidend dabei ist die Fähigkeit zur Herstellung dieser Solarzellen vollständig mittels industriell etablierter Sputterprozesse, was eine reibungslose Integration in vorhandene Produktionslinien der Glasindustrie ermöglichen soll.

Eine zentrale Herausforderung liegt in der Frage, wie eine qualitativ hochwertige Absorberschicht mittels der üblichen In-Line Magnetronsputterverfahren hergestellt werden kann. Dafür wird die Verwendung von Germanium als Absorbermaterial untersucht. Germanium besitzt im Vergleich zum klassischen Silizium einen höheren Absorptionskoeffizienten in den relevanten Wellenlängenbereichen, sodass bereits extrem dünne Schichten eine ausreichende Absorption gewährleisten. Weiterhin kommen dotierfreie, selektive Kontaktmaterialien auf Metalloxidbasis zum Einsatz, die als n- und p-Kontakt verwendet werden. Auch diese Materialien haben optische Eigenschaften, welche zum Erzielen der definierten optischen Charakteristika und vor allem einer farbneutralen Transmission vielversprechend erscheinen.

Vor diesem Hintergrund befasst sich die vorliegende Arbeit sowohl mit der grundlegenden Untersuchung der Struktur- und Materialeigenschaften gesputterter, dünner Germaniumschichten als auch mit deren Eignung und Optimierung als Absorbermaterial in transparenten Dünnschichtsolarzellen. Im experimentellen Teil werden dünne Germaniumschichten untersucht und charakterisiert. Auf Basis dessen wird eine funktionale Solarzelle gefertigt, welche einen gesputterten Germaniumabsorber verwendet.

Weiterhin wird mittels Modellierung ein realistischer Zellaufbau analysiert, um Möglichkeiten und Grenzen im Hinblick auf die Erzielung größtmöglicher Farbneutralität und optimaler Transmission herauszuarbeiten. Dazu werden unter anderem einzelne Schichten charakterisiert und deren optischer Einfluss im Gesamtsystem analysiert. Auf Basis dessen wird ein Schichtstapel entwickelt, der die genannten optischen Anforderungen und Anforderungen an die Beschichtungstechnik erfüllen kann. Mit diesem werden weitere Modellierungen im Hinblick auf sein optisches Verhalten durchgeführt.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, das wirtschaftliche Potential solcher farbneutraler, gesputterter Dünnschichtsolarzellen im Kontext urbaner Anwendungen einzuordnen. Perspektiven alternativer Einsatzgebiete, wie beispielsweise adaptive Fassaden oder Energiegewinnung auf weiteren Gebäudeteilen, werden ebenfalls diskutiert. Damit leistet die Arbeit einen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Gebäudehüllen, die architektonische Freiheit, funktionalen Sonnenschutz und eine dezentrale Energieerzeugung zukunftsweisend miteinander verbinden.

Problemstellung

Sonnenschutzverglasung wird seit vielen Jahren in voll verglasten Fassaden eingesetzt, um die Kühllast von Gebäuden zu reduzieren. Dabei werden standardmäßig Beschichtungen eingesetzt, die einen Anteil von 40-60% des einfallenden Lichts absorbieren. Diese Beschichtungen durch semitransparente Photovoltaik-Beschichtungen zu ersetzen, birgt ein riesiges Potential zur Dekarbonisierung urbaner Räume. Damit transparente Photovoltaik im Gebäude als Sonnenschutzverglasung eingesetzt werden kann, muss diese neben einem Mindestmaß an Transparenz und Effizienz auch die Anforderungen einer ausreichenden Farbneutralität erfüllen. Aus der Übersichtsarbeit von Lee 2020 ist erkennbar, dass nur wenige Forschungsansätze der notwendigen Farbneutralität entsprechen. Ein Ansatz um dieses Ziel zu erreichen ist es, Solarzellen mit sehr dünnem Absorber zu verwenden, so dass eine ausreichende Transparenz erreicht wird. Dabei kommen zum Beispiel Absorber aus amorphem Silizium oder Perowskite in Frage, die aber aufgrund ihres Absorptionsprofils eine farbneutrale Transmission nur schwer möglich machen.

Einen Schritt weiter geht der in diesem Projekt verfolgte Ansatz: Es wird ein Nanoabsorber aus amorphem Germanium verwendet. Aufgrund der geringen Schichtdicke von nur 1,5-20 Nanometern des Absorbers ist bei einfachem Durchgang von Licht durch die Zelle eine hohe Transmission gegeben. Das Absorptions- und Transmissionsprofil kann nun durch einen spektral selektiven Rückkontakt moduliert werden und für Spezialanwendungen angepasst werden. Die Verwendung eines amorphen Nanoabsorbers aus Germanium erlaubt zusätzlich die Flexibilisierung in einer weiteren Dimension. Durch die extreme Einschränkung der Schichtdicke können quantenmechanische Effekte genutzt werden, durch die sich die Bandlücke des Absorbers einstellen lässt. Durch die Kombination dieser beiden Merkmale ergibt sich die besondere Flexibilität in der Anwendung von Solarzellen mit amorphem Nanoabsorber aus Germanium, welche mit anderen Technologien nicht erreicht werden kann.

Ein Produkt, das eine Lösung für den Massenmarkt darstellt, muss hohe Anforderungen an Transparenz, Farbneutralität, Langzeitstabilität und variabler Größe erfüllen. Die Technologie muss zudem in der Herstellung skalierbar sein und möglichst kompatibel mit bestehenden Anlagen bei den Glas-veredelnden Produzenten sein. Da bestehende Lösungen nicht alle Anforderungen in ausreichendem Maß erfüllen, sind PV-Fenster bis jetzt ein Nischenprodukt. Dies ist fast verwunderlich, da es einen großen Überlapp bzw. viele Synergien zwischen bestehenden Produkten zur Sonnenschutzverglasung und PV-Fenstern gibt. Sonnenschutzverglasung und PV-Fenster teilen sich Elemente wie Absorbierende Schichten und low-e-Schichten, welche auch als transparente Elektroden von Solarzellen fungieren können. Des Weiteren sind in beiden Fällen auch das Glas selbst sowie Fensterrahmen und Installation nahezu identisch. Daher sind in einer Sonnenschutzverglasung schon viele Kosten enthalten, die für ein PV-Fenster anfallen. Um diese Synergien voll ausnutzen zu können, wird ein Herstellungsverfahren benötigt, dass mit den in Sonnenschutzverglasung vorhandenen Komponenten und den Verfahren zu ihrer Herstellung kompatibel ist. Zur Herstellung ist daher ein Inline-Verfahren, optimaler Weise ein Sputterprozess notwendig, welche typischerweise auch von deutschen Glasveredlern zur Herstellung von Sonnen- und Wärmeschutzverglasungen eingesetzt werden. Dies würde, analog zur historischen Entwicklung bei der Herstellung von low-e-Verglasungen, das Potential für eine massive Ausweitung der Produktion und somit Kostensenkungspotentiale aufgrund der „Economy of Scale“ eröffnen. Das Fernziel ist also, Glasveredler zu befähigen PV-Fenster mit verschwindend geringen Mehrkosten gegenüber bestehenden Sonnenschutzverglasungen anbieten zu können.

Es besteht daher Bedarf für eine Technologie für PV-Fenster, die sowohl in den physikalischen Eigenschaften der Zelle als auch in der Herstellungsmethode den genannten Anforderungen entspricht. Um diese Forschungslücke zu schließen, sollen innerhalb dieses Vorhabens zwei Dinge grundlegend erforscht werden: Erstens, wie die Nanoabsorber-Solarzelle in Bezug auf Transmission, Farbneutralität und Effizienz weiterentwickelt werden kann. Und zweitens, inwieweit die Abscheidungsprozesse der

aktiven Schichten in der Solarzelle, welche derzeit Prozesse der plasmaunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung (PECVD) sind, auf Sputterprozesse übertragbar sind. Unsere Kernthese ist, dass skalierbare Inline-Prozesse für eine farbneutrale Solarzelle erforderlich sind, damit PV-Fenster aus dem Nischendasein herauskommen.

In Deutschland und Europa entfallen ungefähr ein Drittel des Energiebedarfs auf den Gebäudebestand. Um die deutschen und europäischen Klimaziele zu erreichen, ist daher ein weitgehend klimaneutraler Gebäudebestand notwendig. Dabei können die PV-Sonnenschutzverglasungen einen wichtigen Beitrag leisten. Mit dem Einsatz dieser Technologie wird sowohl der Wärmeeintrag ins Gebäude reduziert, und damit die erforderliche Kühlleistung, als auch Strom am Ort des Bedarfs erzeugt. Damit kann der Energiebedarf und CO₂-Abdruck von Gebäuden deutlich reduziert werden.

Innerhalb dieses Vorhabens soll neues Grundlagenwissen geschaffen werden, welches den Weg zur Realisierung einer solchen PV-Sonnenschutzverglasungen ebnet. Dabei geht es um anwendungsorientierte Grundlagenforschung, womit ein breiter Fundus an Kenntnissen als Basis für die Weiterentwicklung zu einem PV-Fenster-Produkt gelegt werden soll. Das Vorhaben ist auch aus wirtschaftlicher Perspektive im öffentlichen Interesse, da es mittelfristig Glas-veredelnde Betriebe dazu befähigen soll, die Prozesse zur Herstellung eines PV-Fensters in ihre Großserienfertigung zu integrieren. Durch diese Innovation würde der Fortbestand der vollen Wertschöpfungskette von modernen Glas- und Fensterprodukten innerhalb der deutschen Industrie begünstigt werden.

Zielstellung

Das übergeordnete Ziel von PV-SoGla, die Glasindustrie zu befähigen, aktive PV-Beschichtungen auf den bekannten Inline-Sputteranlagen herstellen zu können, wurde in der Projektplanungsphase in thematisch klar voneinander abgegrenzte Ziele unterteilt und diese mit Meilensteinen im Projektplan terminiert.

Um bei dem Übergang von einer PECVD-Deposition zur Sputterdeposition die Funktionalität der einzelnen Schichten, d.h. der Germanium Absorberschicht, der n- und p-dotierten Kontaktschichten und der Pufferschichten, zu übertragen, ist es notwendig, ein „detailliertes physikalisches Verständnis der Schichteigenschaften und deren Einfluss auf die elektrische und optische Zellperformance“ zu erlangen. Dieses Ziel wurde für den Monat M12 terminiert.

Ausgehend von diesem Verständnis ist es im Anschluss möglich, die Schichten durch gesputterte Varianten zu ersetzen bzw. durch andere Materialien zu ersetzen, die gesputtert werden können und die gleiche Funktionalität bieten. Das zweite Teilziel ist somit ein „Verständnis davon wie diese Schichteigenschaften mit Sputterverfahren erreichbar sind und damit funktionierende Solarzellen präpariert werden können“ und wurde für den Monat M24 terminiert.

Für die gesputterte Variante der Solarzelle kann somit ausgearbeitet werden, wie sie sich unter Parametervariationen verhält. Die „Demonstration der wesentlichen Stellschrauben in der Nanoabsorber-Solarzelle für Transmission und Farbneutralität und der Grad der Transmission, der unter Farbneutralität und einer Effizienz von mindestens 1% erreicht werden kann,“ wurde als Ziel im Monat M24 terminiert.

Auch in diesem technologisch frühen Entwicklungsstadium ist es durchaus sinnvoll die Anwendungsvektoren und Wirtschaftlichkeit zu betrachten, um möglichst früh weitere Rahmenbedingungen herauszuarbeiten, die nur am Rande mit der Dünnschichttechnik beeinflusst werden können. Das Ziel „Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die Anwendungsfelder Fassadenfenster, Dachfenster, sonstige Verglasungen“ wurde für den Monat M34 terminiert.

Zudem können weitere Anwendungen antizipiert werden, in denen die teiltransparenten Solarzellen im Außenraum eine Wirkung z.B. auf die Überhitzung von versiegelten Flächen haben. Die „Skizzierung

alternativer Anwendungsfelder und deren Auswirkung auf das Stadtklima“ ist als Ziel für den Monat M34 terminiert worden.

Die Projektergebnisse sollen einem breiten Fachpublikum bekannt werden und somit ist die „Dissemination der Erkenntnisse an wissenschaftliche und industrielle Experten aus der Fachbranche“ als finales Ziel für den Monat M36 terminiert.

Forschungsdesign

Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben

Die Basis für das Vorhaben bildet die Ge-Nanoabsorber-Solarzelle, die am DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme in Oldenburg entwickelt wurde. Mit dieser Technologie konnte in einer opaken Variante eine Effizienz von 5,3% erreicht werden. Zudem konnten die quantenmechanischen Effekte im Ge-Nanoabsorber gezeigt werden, die eine Einstellung der Bandlücke in einem Bereich von etwa 1-1,6 eV über Anpassung der Schichtdicke erlauben. Die ideale Bandlücke für transparente Solarzellen liegt im Bereich von 1,1-1,4 eV, der somit für Ge-Nanoabsorber zugänglich ist. Zusätzlich kann mit der Anpassung der Bandlücke das Absorptions- bzw. Transmissionsspektrum der Zelle so gestaltet werden, dass Farbneutralität besser erreicht werden kann.

Die volle spektrale Flexibilität entfaltet die Ge-Solarzelle durch das Zusammenspiel zwischen Absorber und Rückkontakt. Zum einen erlaubt ein teilweise reflektierender Rückkontakt eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke im Absorber und somit der Absorption, die dabei noch durch den Abstand zwischen Rückkontakt und Absorber eingestellt werden kann. Zum anderen kann der Rückkontakt selbst spektral selektiv gestaltet werden um die Absorption und Transmission gezielt zu beeinflussen. Für einen spektral selektiven Kontakt kommen Schichtstapel aus Oxiden und Metall in Frage, wie sie zuvor für spektral selektive Solarzellen eingesetzt wurden und auch für farbige CIGS-Solarmodule entwickelt wurden. Es können aber auch Bragg-Reflektoren verwendet werden, wie von Li 2019 an einer organischen Solarzelle demonstriert wurde.

Die neueste Anwendung des Ge-Nanoabsorbers ist die Kombination mehrerer Absorber zu einer Multiquantenwell-Solarzelle (MQW-Solarzelle). In ersten Versuchen wurde dabei eine transparente Solarzelle mit hoher Transmission (50% bei und ~900 nm) und einer Effizienz von 3% erreicht. [2] [3]

Die Anpassungsmöglichkeiten von Solarzellen auf Basis eines Ge-Nanoabsorbers über die Bandlücke, Position und Anzahl des Absorbers und über die Interaktion mit einem spektral selektiven Rückkontakt erlauben eine bemerkenswerte Flexibilität der Struktur. Daher ist die Solarzelle auf Basis eines Ge-Nanoabsorbers ein besonders erfolgversprechender Kandidat für die Realisierung einer farbneutralen PV-Sonnenschutzverglasung mit ausreichender Transmission.

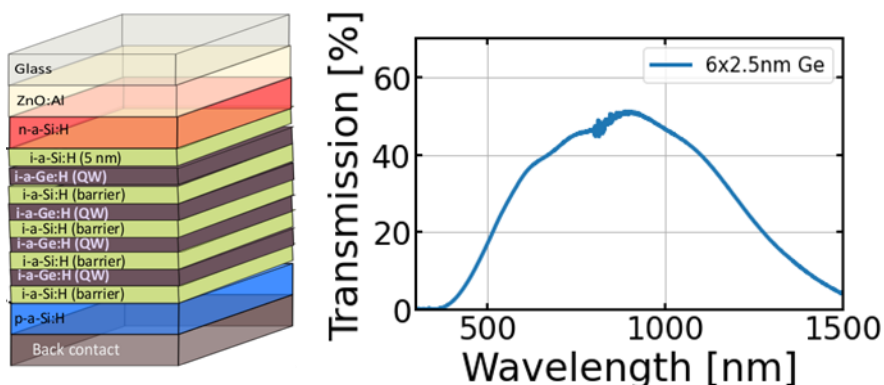


Abbildung 3: Mit der Anordnung mehrerer Nanoabsorber zu einer Multiquantenwellzelle wurden eine hohe Transmission bei einer Effizienz von 3% erreicht.

Forschungsfragen

Wie im vorhergehenden Abschnitt ausgeführt wurde, stehen bei einer Solarzelle mit Ge-Nanoabsorber eine Vielzahl an Stellschrauben zur Verfügung, wie die Bandlücke des Absorbers, die Anzahl der Absorberschichten, die Position des Absorbers relativ zum Rückkontakt und das optische Design des spektral selektiven Rückkontakts. Zusätzlich spielen auch die Eigenschaften der restlichen Schichten, wie Frontkontakt, Puffer- und Dotierschichten, eine entscheidende Rolle für die optischen Eigenschaften. Daher ist die erste zentrale Forschungsfrage, die mit diesem Vorhaben beantwortet werden soll, was die entscheidenden Einflussgrößen sind, um den Schichtstapel einer Ge-Nanoabsorber-Solarzelle möglichst wenig komplex und farbneutral zu gestalten.

Die zweite Forschungsfrage betrifft die Integrierbarkeit der Depositionsprozesse in die Fertigungslinien der Glasveredler. Wie oben bereits dargestellt wurde, wird ein effizienter Inline-

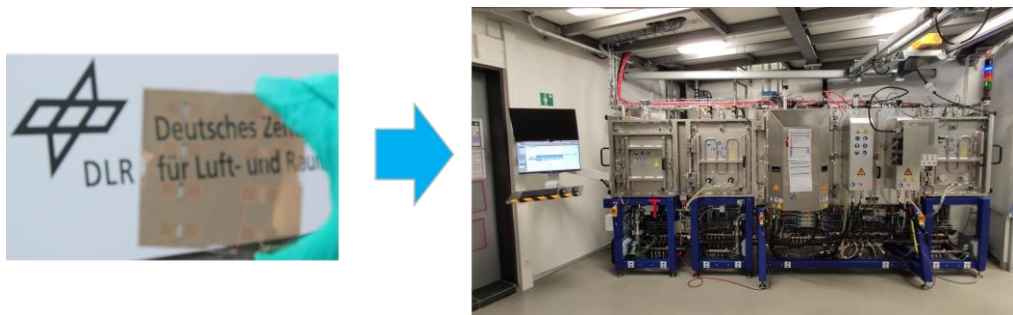


Abbildung 4: Eines der Projektziele ist zu untersuchen, wie eine transparente Solarzelle mit Germanium-Nanoabsorber mittels Sputterverfahren hergestellt werden kann. Sputterverfahren sind gut skalierbar und kommen in der Industrie zur Glasveredelung zum Einsatz.

Prozess, der bestenfalls mit in der deutschen Glasindustrie bestehenden Anlagen kompatibel ist, ein hohes Produktionsvolumen und ein wirtschaftlich und ökologisch relevantes Produkt erlauben. Dafür wäre ein Herstellungsverfahren durch Sputterprozesse optimal. Daher soll in diesem Vorhaben erforscht werden, was die zentralen physikalischen Eigenschaften des Ge-Absorbers sind, und inwieweit sich diese Eigenschaften statt mit einem PECVD-Prozess mit einem Sputterprozess erreichen lassen.

Untersuchungsmethodik

Im Projekt wurden Schichtdeposition, Charakterisierung, Integration und Modellierung eng verzahnt in einem iterativen Vorgehen eingesetzt.

Schichtdeposition: Zur Präparation von Schichten wurden vor allem zwei Depositions-Anlagen verwendet:

1. Clustertool: Substratgröße $10 \times 10 \text{ cm}^2$, PECVD und statisches Sputtern (VonArdenne)
2. Industriennahe In-line Sputteranlage: Substratgröße $30 \times 30 \text{ cm}^2$ bzw. 4 Stück $10 \times 10 \text{ cm}^2$, (Singulus V600)

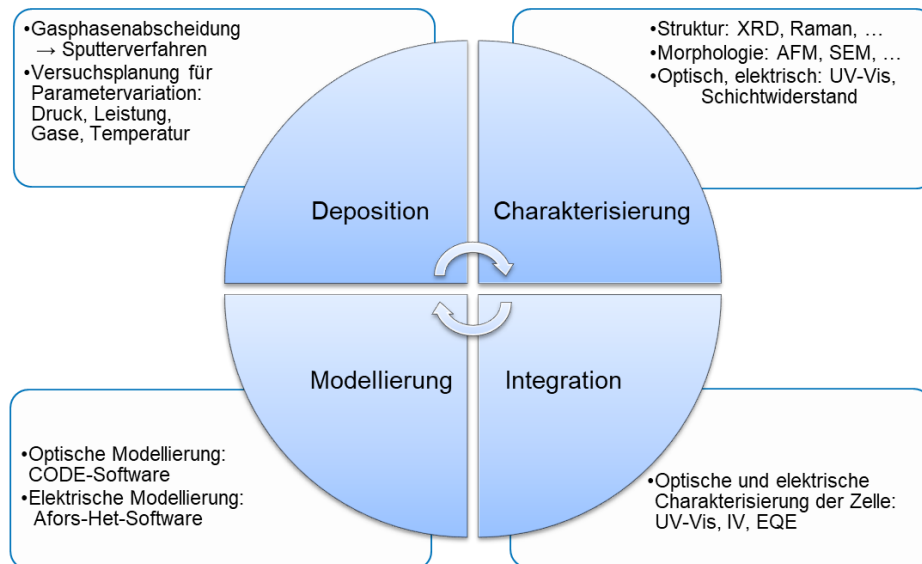


Abbildung 5: Die Deposition, Charakterisierung, Integration und Modellierung werden eng verzahnt und iterativ angewendet.

Auf der ersten Anlage wurden die PECVD-Prozesse für die Deposition der Referenzzelle mit Ge-Nanoabsorber gefahren sowie die Entwicklung des Zellstapels für höhere Transmission und Farbneutralität vorangetrieben. Die zweite Anlage ist eine Inline-Sputteranlage mit neuester Ausstattung, wie einem Restgasanalysator und vielen verschiedenen Betriebsmodi. Sie ist daher optimal für die Deposition von gesputterten Ge-Schichten und der Untersuchung von Sputterprozessen geeignet.

Charakterisierung: Nach der Präparation wurden die Schichten optisch, elektrisch, morphologisch und strukturell charakterisiert. Dazu wurden Verfahren wie UV-Vis-NIR-Spektroskopie, Schichtwiderstandsmessgerät, AFM, SEM, Ramanspektroskopie und Ellipsometrie angewendet.

Integration in Solarzellen: Schichten wurden sowohl als Einzelschicht auf Glassubstraten abgeschieden als auch integriert in den Solarzellen-Schichtstapel verwendet. Zur Charakterisierung der Solarzellen konnte ein Solarsimulator sowie weitere optische und elektrische Charakterisierung eingesetzt werden.

Modellierung: Die aus der Charakterisierung gewonnenen Erkenntnisse wurden in optische und elektrische Modelle eingepflegt. Für die optische Modellierung wurde das Programm CODE verwendet, für die elektrische AFORS-HET. Aus der Modellierung lassen sich weitere Schlüsse zu den Schichteigenschaften ziehen und darstellen, in welcher Weise Schichteigenschaften und Schichtstapel elektrisch und optisch angepasst werden müssen, um die gewünschten Zelleigenschaften zu erreichen. Im Kreislauf des iterativen Vorgehens schließt sich daher an die Modellierung wieder die nächste Deposition an.

Projektteam

Das DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme wurde 2007 als NEXT Energy gegründet und ist seit 2017 Teil des DLR mit über 170 MitarbeiterInnen in Oldenburg und Stuttgart. Das Institut kann auf über 10 Jahre Erfahrung in Forschung und Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien und im speziellen im Bereich der Photovoltaik zurückblicken. Der Arbeitsgruppe Sektorenkopplung Gebäude steht eine breite Ausstattung an Anlagen und Methoden zur Deposition und Charakterisierung von Solarzellen und dünnen Schichten zur Verfügung. Eine Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, sowie erfolgreich beendete und laufende Projekte im Bereich der Herstellung und Charakterisierung von Dünnschicht solarzellen bestätigen die Expertise zur Durchführung des Vorhabens. Die Arbeitsgruppe stellt ein Expertenteam dar mit allein 14 Veröffentlichungen zu Solarzellen mit Germanium-Nanoabsorber, welche in dieser Arbeitsgruppe

entwickelt wurden, sowie Anwendungen mit spektral selektiven Kontakten. Um die Flexibilität der Nanoabsorber-Solarzelle optimal auszunutzen, ist ein präzises optisches Modell ausschlaggebend. Dazu wird in unserer Arbeitsgruppe seit Jahren das Programm CODE eingesetzt. Um die elektrischen Eigenschaften der Solarzelle abzubilden, kann das Programm AFORS-HET genutzt werden, welches in unserer Arbeitsgruppe bereits erfolgreich für Solarzellen mit Nanoabsorber verwendet wurde.

Arbeitsschritte und Meilensteine

Das Projekt wurde in drei Teilaufgaben strukturiert, die sich – weitgehend – grundlegenden Aspekten der Herstellung, der ästhetischen Erscheinung und der Anwendbarkeit der PV-Verglasung widmen.

Teilaufgabe 1: Untersuchung von gesputterten Germanium-Nanoabsorber-Solarzellen

Hier war das Ziel der Ersatz des schwer skalierbaren PECVD-Prozesses zur Abscheidung des Ge-Nanoabsorbers durch einen industrietauglichen Inline-Sputterprozess. Dazu wird der Parameterraum des Sputterprozesses auf Haupteinflussgrößen untersucht, um die Mikrostruktur aus dem PECVD-Prozess zu reproduzieren. Parallel zu den Arbeiten an der Einzelschicht erfolgt die Integration in die Solarzelle, die Charakterisierung dieser und die elektrische Modellierung. Die Teilaufgabe besteht aus zwei Arbeitspaketen:

AP1.1: Herstellungsverfahren Sputterdeposition

In AP1.1 erfolgte die Präparation der Schichten im Labor, zunächst für eine Referenzzelle mit PECVD-Prozessen und darauffolgend per Sputterdeposition.

AP1.2: Charakterisierung und elektrische Modellierung

In AP1.2 wurde die Charakterisierung der Schichten und Solarzellen aus AP1.1 durchgeführt und mit der elektrischen Modellierung begleitet, um eine zielgenaue Erforschung des Sputterprozesses in AP1.1 zu ermöglichen.

Teilaufgabe 2: Farbneutralität und Transmission

Hier war das Ziel, durch Anpassung der Schichten im Zellstapel und ihrer geschickten Anordnung die Transmission und Farbneutralität der Solarzelle zu optimieren. Zunächst wurde auf Basis des Referenzprozesses mit PECVD-Verfahren gearbeitet und später die gesputterten Schichten im Optimierungsprozess mitberücksichtigt. Analog zu TA1 teilt sich TA2 in zwei Arbeitspakete.

AP2.1: Entwicklung optischer Zelleigenschaften

In AP2.1 erfolgte die Deposition von Einzelschichten und Solarzellen im Labor ausgehend von den existierenden PECVD-Prozessen mit dem Ziel einer möglichst transparenten und farbneutralen Solarzelle.

AP2.2: Optische Charakterisierung und Modellierung

Die Charakterisierung der Schichten und Solarzellen aus AP2.1 wurde in AP2.2 umgesetzt. Anhand der so gewonnenen Daten konnten optische Simulationen verwendet werden, um das optimale Zelldesign zu erforschen.

Teilaufgabe 3: Anwendungen und Szenarien

Hier war das Ziel die Wirtschaftlichkeit der Technologie zu bewerten und alternative Anwendungen zu skizzieren sowie die möglichen Auswirkungen auf das Stadtklima darzustellen.

AP3.1: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

AP3.1 befasst sich mit der Wirtschaftlichkeit der Technologie und klärt, welcher Wirkungsgrad für die Anwendungsfelder Fassadenfenster, Dachfenster, sonstige Verglasungen erreicht werden muss, um eine monetäre und energetisch positive Bilanz zu erreichen.

AP3.2: Alternative Anwendungen & Auswirkungen auf Stadtklima

Hier wird geklärt, wie die Technologie in anderen Bereichen einer Stadt wie z.B. zur

Überdachung von Plätzen und Parkflächen eingesetzt werden kann und wie dabei das Klima im Außenraum beeinflusst werden könnte.

Teilaufgabe 4: Verwertung und Transfer der Ergebnisse

AP4.1: Dissemination

Hier werden alle Aktivitäten zur Verbreitung der Erkenntnisse und Ergebnisse gebündelt. Dies umfasst die Publikation von Artikeln in wissenschaftlichen Zeitschriften, die Teilnahme an Fachkongressen und das Ausrichten eines Workshops mit Teilnehmern aus der Fachbranche.

Meilensteine

Diese allgemeinen Ziele werden in folgenden konkreten, SMARTEN Meilensteinen abgebildet:

#	Meilensteine	AP	Monat
MS1	Charakterisierungsmethodik anhand Referenzprozess etabliert	AP1.2	12
MS2	Funktionierende Zelle mit gesputtertem Ge-Absorber	AP1.1, AP1.2	24
MS3	Erhöhte Transmission und Farbneutralität durch angepassten Schichtstapel in der Solarzelle mit > 1% Effizienz	AP2.1, AP2.2	24

Projektverlauf

Vorbereitende Arbeiten und Methoden zum Germaniumsputtern

Im Rahmen des Projektes wurde zunächst das benötigte Germanium-Sputtertarget beschafft. Hierzu wurden Kontakte in der Industrie genutzt, um Informationen über Verfügbarkeit und Preise sowohl für Rohrtargets als auch für Planarsputtertargets einzuholen. Germanium stellt ein für einen Sputterprozesse bekanntes, aber eher selten genutztes Material dar. Vor allem die Fertigung als Rohrtarget wurde als aufwendig, beziehungsweise ungewöhnlich beschrieben und wäre nur mit einem erheblichen Aufschlag möglich gewesen. Weiter können im Rahmen dieser Forschung die Hauptvorteile eines Rohrtargets, die deutlich höhere Standzeit, nicht ausgespielt werden. Denn es findet keine industrielle Massenproduktion statt und damit ist, aus industrieller Sicht, der Materialbedarf eher klein. Deswegen wurde sich für ein Germaniumplanartarget entschieden. In Bezug auf das Material allgemein muss auch die eventuelle teilweise Abhängigkeit von Zulieferern aus China und Russland erwähnt werden. [4][5] Letztendlich konnte ein geeignetes Planarsputtertarget aus Germanium bezogen, welches für die ausstehenden Versuche verwendet wurde. Die Abbildung 6 zeigt ein Foto des Germaniumtargets.



Abbildung 6 Foto des Germaniumplanarsputtertargets.

Für die Glassubstrate als Trägermaterial wurde nach einem Auswahlprozess Glas vom Typ Schott D263 T ECO mit einer Dicke von 1 mm ausgewählt. Dies erfolgte nach Vergleich verschiedener Glassorten hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Eignung für die geplanten Depositionsschritte. Das Schott D 263 T ECO zeichnet sich durch seinen Down-draw-Fertigungsprozess aus. Dabei handelt es sich um kein Floatglass, welches auf einem Zinnbad schwimmt, so dass das Glas keine spezielle zinnkontaminierte Seite aufweist und ein symmetrischer Aufbau vorliegt. Weiter handelt es sich um Weißglas und es weist damit keine grünlichen Farbeindrücke auf. Zudem ermöglicht der Hersteller den direkten Zuschnitt auf kundenspezifische Größen, was den weiteren Forschungsarbeiten entgegenkam.

Germanium weist im Gegensatz zu dem üblicherweise in Sonnenschutzverglasungen verwendeten Silber eine geringere Sputter-yield-Rate auf. Für übliche Energien von Argonionen ist diese für Germanium ungefähr halb so groß. [6] Damit ergibt sich eine Deposition mit höherem Zeitbedarf.

Germanium stellt als Rohstoff aktuell eine strategisch kritische Ressource dar. Neue Impulse ergeben sich durch eine mögliche Verwendung in Feststoffbatterien. Das könnte den weltweiten Bedarf erhöhen und sich negativ auf den Germaniumpreis auswirken. Ein stark erhöhter Germaniumbedarf könnte aber einen Abbau auch für westliche Produzenten attraktiv erscheinen lassen und eine Abhängigkeit von China oder Russland reduzieren. [7]

Die wesentlichen Anlagen zur Schichtdeposition waren die Sputteranlage Vistaris 600 von Singulus Technologies für die Germaniumbeschichtung. In dieser wurde das beschriebene Germaniumplanartarget eingesetzt. Weiter wurde als PECVD-Anlage eine CS400PS von Von Ardenne eingesetzt. Diese wurde für die Deposition von Germanium aus PECVD-Prozessen eingesetzt sowie für die Deposition von dotierten und undotierten Siliziumschichten. Weiter wurde die CS400PS in einer weiteren Prozesskammer auch für das Sputtern von Silberkontaktflächen verwendet.

Für die Charakterisierung der erzeugten Schichten kamen ein Dektak XT Profilometer von Bruker zur Schichtdickenbestimmung, ein Cary 6000 UV-Vis-NIR Spektralphotometer für optische Messungen, ein Raman-Spektrometer zur Untersuchung charakteristischer Streuprozesse, ein Rasterkraftmikroskop zur Oberflächenanalyse sowie ein Sonnensimulator zur Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Solarzellen (IV-Kurve) zum Einsatz.

Prozessentwicklung

Die Sputterdeposition von Germanium erfolgte im Rahmen des Projekts mit der Vistaris 600 Sputteranlage von Singulus Technologies. Diese Anlage ist als Inline-System mit einer vertikalen Anordnung der Sputtertargets und einer ebenfalls vertikalen Probenpositionierung konzipiert. Die eigentliche Abscheidung erfolgt während einer definierten, kontinuierlichen Fahrbewegung des Probencarriers vor dem Target. Diese Art von Beschichtungen und Aufbau ist vergleichbar mit Anlagen, wie sie auch für industrielle Produktionen eingesetzt werden. Für die Targetmaterialien stehen innerhalb der Prozesskammer flexible Einbaupositionen für sowohl Rohrtargets als auch Planartargets zur Verfügung, wodurch zahlreiche Materialkombinationen und Prozessvarianten realisierbar sind.

Es können unterschiedliche Betriebsmodi eingesetzt werden. Dazu kann das Germaniumtarget auf einem Planartargetplatz mit einem DC-Plasmagenerator eingesetzt werden. Dieser unterstützt auch einen gepulsten DC-Betrieb. Weiter kann es alternativ auf einem Planartargetplatz mit einem RF-Plasmageneratoren genutzt werden. Dieser unterstützt alternativ auch Hochleistungsimpulsmagnetronspütern (HiPIMS). Die Einstellungen am Plasmagenerator gehören zu den wichtigen Parametern, welche das Verhalten während der Deposition, sowie die Eigenschaften der entstehenden Schicht nach der Deposition beeinflussen. Die Leistung des Plasmagenerators lässt sich steuern, um vornehmlich unterschiedliche Wachstumsraten zu erzielen. Ein weiterer bedeutender Parameter ist die Temperatur: Die Vistaris 600 verfügt über mehrere separat beheizbare Zonen, sodass Substrattemperaturen von über 200°C gezielt eingestellt werden können.

Zusätzlich spielt die präzise Steuerung der Fahrbewegung des Carriers eine Rolle. Die Anzahl der Vorbeifahrten an den Targets und die Fahrgeschwindigkeit beeinflussen die endgültige Schichtdicke und deren Gleichmäßigkeit. Auch die eingeleiteten Prozessgase können gesteuert werden. Es stehen verschiedene Gase (Argon, Sauerstoff, Stickstoff und ein Argon-Wasserstoff-Gemisch) zur Auswahl, wobei der Zufluss jedes einzelnen Gases unabhängig über separate Massendurchflussregler steuerbar ist. Über die Flussmenge kann auch direkt der Gasdruck in der Prozesskammer beeinflusst werden, welcher wiederum auch indirekt über die Drehzahl der Turbomolekularpumpen beeinflusst werden kann.

Im Rahmen der Prozessentwicklung wurden für das Sputtern von Germanium unterschiedliche Parameterkombinationen systematisch getestet, um einerseits stabile und reproduzierbare Beschichtungsprozesse zu etablieren und andererseits den Einfluss der jeweiligen Einstellungen auf Wachstum, Morphologie und optische Eigenschaften der Germaniumschichten zu untersuchen.

Neben den Sputterprozessen kam auch die PECVD-Anlage CS400PS von Von Ardenne zum Einsatz, insbesondere für die Abscheidung von Silizium- und Germaniumschichten. Hierbei findet die Schichtdeposition in horizontaler Orientierung statt. Mit der CS400PS ist die Herstellung sowohl undotierter als auch gezielt n- oder p-dotierter Siliziumschichten (mittels Bor- oder Phosphordotierung) und von Germaniumschichten möglich. Darüber hinaus kann in einer separaten Prozesskammer derselben Anlage Silber als Kontaktmaterial mittels Sputterns abgeschieden werden.

Charakterisierung Germaniumschichten

Am Massendurchflussregler für Argon, welches das hauptsächliche Sputtergas darstellt, können Flussraten zwischen 2 sccm und 1200 sccm eingestellt werden. Für ein DC-Plasma ist es ab einer Flussrate von kleiner gleich 30 sccm Argon nicht mehr möglich, das Plasma zu zünden. Ab einer

Flussrate von ungefähr 50 sccm Argon ist es verlässlich möglich, das Plasma zu zünden und ein dauerhaftes Sputtern aufrechtzuerhalten. Der dabei entstehende Druck während der Deposition beträgt ungefähr $0,79 \cdot 10^{-3}$ mBar. Bei dem maximalen Argonfluss von 1200 sccm Argon ergeben sich keine Probleme in Bezug auf die Plasmazündung oder Aufrechterhaltung des Plasmas. Der dabei erreichte Druck in der Prozesskammer beträgt ungefähr $14,9 \cdot 10^{-3}$ mBar.

Um noch höhere Prozessdrücke in einem reinem Argonplasma aufrechtzuerhalten, kann die Drehzahl beziehungsweise Frequenz der Turbopumpen verringert werden. Dadurch verringert sich auch deren Pumprate, was zu einer Druckerhöhung führt. Durch eine Verringerung der Frequenz auf 265 Hz kann bei einem Argonfluss von 544 sccm ein Vakuumkammerdruck von $28 \cdot 10^{-3}$ mBar erreicht werden. Auch bei diesem Druck ist ein Zünden des Plasmas und dessen Aufrechterhalten möglich.

Wachstumsgeschwindigkeit

Da die finale Dicke des Ge-Absorbers voraussichtlich nur ca. 5 nm betragen wird, ist eine sehr exakte Bestimmung der Schichtwachstumsgeschwindigkeit notwendig. Aufgrund der technischen Eigenschaften der Inline-Sputteranlage ist jedoch nur eine diskrete Anzahl an Vorbeifahrten am Targetmaterial möglich. Die Anzahl an Vorbeifahrten sollte entsprechend hoch sein, um mit mehr oder weniger Vorbeifahrten leicht dickere oder dünnere Schichten erzeugen zu können. Daher wurde eine vergleichsweise geringe Sputterleistung von 500 W gewählt. In der Abbildung 7 ist für eine Fahrgeschwindigkeit von 2,5 m/min die Schichtdicke als Funktion der Anzahl an Vorbeifahrten dargestellt. Es findet sich ein linearer Zusammenhang: Schichtdicke =

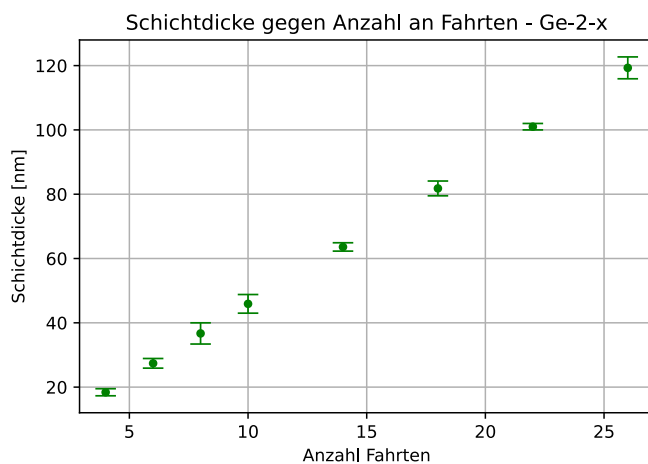


Abbildung 7: Schichtdicke gegenüber der Anzahl an Vorbeifahrten am Targetmaterial bei einer Sputterleistung von 500 W, sowie einer Fahrgeschwindigkeit von 2,5 m/min.

$(4,58 \pm 0,2)$ nm pro Pass. Damit kann folglich für jede beliebige Anzahl an Vorbeifahrten die erwartete Schichtdicke berechnet werden.

Homogenität

Es wurde die Dickenverteilung auf der Carrierfläche bestimmt. Der Sputterbereich umfasst eine Fläche von 30 cm mal 30 cm. Um Unterschiede besser zu erkennen, wird mit einer großen Anzahl von 26 Vorbeifahrten gearbeitet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 dargestellt. Es kann im Rahmen der Messgenauigkeit dieser Messung das Schichtwachstum auf dem Carrier als homogen angenommen werden.

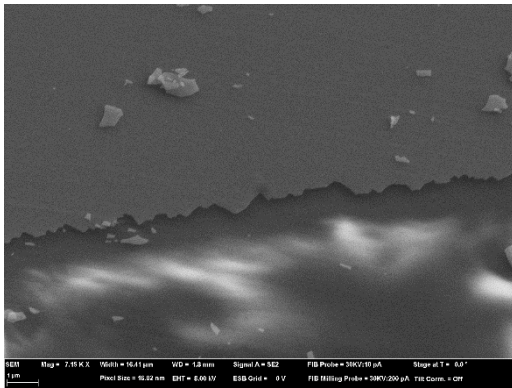
Position auf dem Carrier	Schichtdicke [nm]
oben-rechts	$117,4 \pm 2,6$
unten-rechts	$115,8 \pm 3,6$
unten-links	$117,0 \pm 1,3$
unten-rechts	$116,3 \pm 2,3$
mittig	$119,3 \pm 1,8$

Tabelle 1: Gemessene Schichtdicke für verschiedene Substrate derselben Abscheidung mit verschiedenen Positionen auf dem Carrier, bei einer Sputterleistung von 500 W und 26 Vorbeifahrten am Targetmaterial.

Carrier, bei einer Sputterleistung von 500 W und 26 Vorbeifahrten am Targetmaterial.

Morphologie

Mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie (REM) können bei passenden Betrachtungswinkeln sowohl Schlüsse über die Schichtdicke als auch die Rauheit, beziehungsweise Schichthomogenität gezogen werden. Die Abbildung 8 zeigt die REM-Aufnahme einer Germaniumbruchkante. Die Probe



hat eine Soll-Dicke von 18,2 nm. Im oberen Bildbereich ist Germanium zu sehen, im unteren Bereich ist Glas zu sehen. Es ist gut zu erkennen, dass die Germaniumschicht geschlossen ist und keine bedeutsame Rauheit aufweist. Die erkennbaren Objekte sind Splitter vom Brechen der Probe.

Abbildung 8: Rasterelektronenmikroskopiebild der Bruchkante einer Germaniumprobe. Im oberen Bildbereich ist die Germaniumprobe und im unteren Bildbereich das Glassubstrat zu sehen.

Sputterdruck

Im Verlauf der Teilaufgabe 1 sollen die Haupteinflussgrößen des Sputterprozesses untersucht werden. Einen zentralen Aspekt stellt der Druck in der Sputterkammer während des Sputterns dar. Der Druck

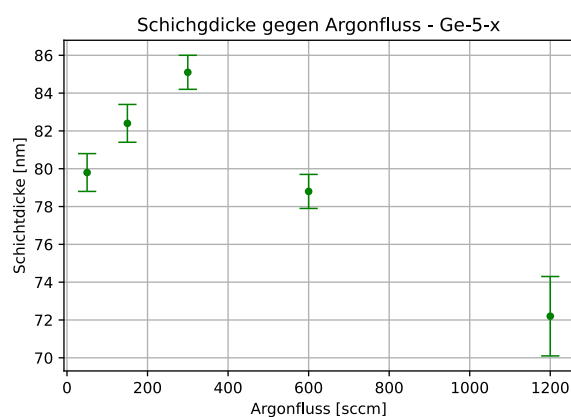


Abbildung 9: Druck- bzw. Argonflussabhängigkeit der Schichtdicke

wird indirekt über den Argonfluss gesteuert. In einem ersten Experiment wurde der Einfluss des Ar-Flusses auf die Schichtdicke untersucht. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 9 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass in Bezug auf die verwendeten Gasflüsse, bei einem Argonfluss von 300 sccm die größte Depositionsrate erreicht wird. Weiter wird deutlich, dass bei sehr großen Gasflüssen die Depositionsrate abfällt, da zunehmend die Germaniumionen an Argonionen gestreut werden und das Substrat nicht direkt erreichen. Für zukünftige Experimente wird standardmäßig ein Argonfluss von 300 sccm verwendet.

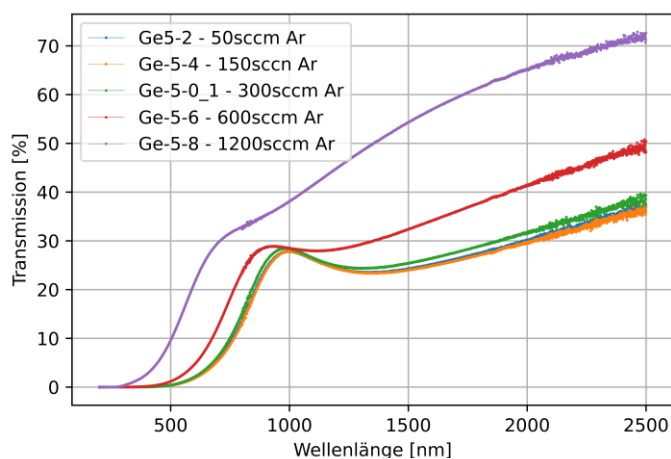


Abbildung 10: Druck- bzw. Argonflussabhängigkeit der Transmissionsspektren

Der Druck in der Sputterkammer kann neben der Depositionsrate auch weitergehenden Einfluss auf die Schichteigenschaften haben, und aufgrund der halbleitenden Eigenschaften von Germanium sind diese Effekte sehr wahrscheinlich in den optischen Eigenschaften zu erkennen. Die Transmissionsspektren der Versuche mit variierendem Druck sind in Abbildung 10 dargestellt. Es zeigen sich ab einem Argonfluss von 600 sccm Veränderungen, welche sich bei einem Argonfluss

von 1200 sccm nochmals verstärken. Im Detail steigt der Transmissionsgrad über den gesamten gemessenen Wellenlängenbereich an. Die zugrundeliegenden Ursachen, sowie weitere, zum Beispiel elektrische Folgen daraus müssen in weiteren Experimenten untersucht werden. Außerdem erscheint aufgrund des Transmissionsspektrums die Probe, welche unter einem Argonfluss von 1200 sccm entstanden ist, in einem leichten Rotton. Diese Veränderungen im Transmissionsspektrum können eventuell gezielt verwendet werden, um eine farbneutrale Gesamttransmission der Solarzelle zu erreichen.

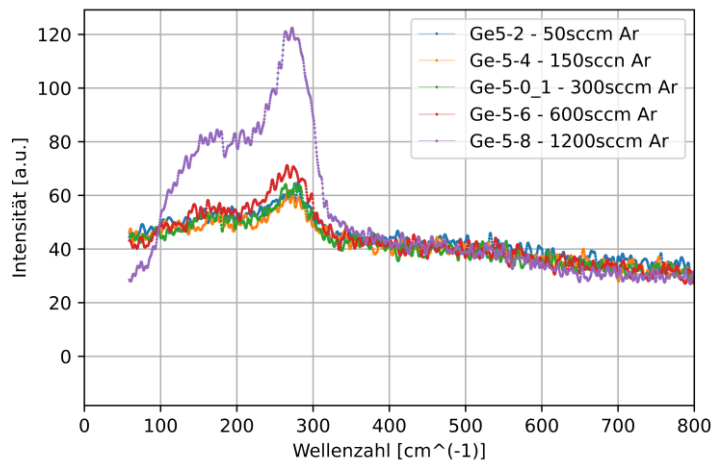


Abbildung 11: Druck- bzw. Argonflussabhängigkeit der Ramanspektren.

im Bereich von 200 1/cm bis 300 1/cm minimal an. Die Ramanaktivität, der Probe mit einem Argonfluss von 1200 sccm steigt für Wellenzahlen im Bereich von 100 1/cm bis 300 1/cm sehr stark an. Bei niedrigen Argondrücken scheint die Kristallinität der Ge-Schichten also stabil und ändert sich erst bei Argondrücken oberhalb von 300 sccm.

Ramanmessungen bieten eine Möglichkeit, Informationen über die Bindungsverhältnisse und somit die Kristallstruktur der Schichten zu erhalten. Es wurde die Ramanaktivität für Proben mit verschiedenen Sputterdrücken, bzw. Argondrücken beim Sputtern untersucht. Die Ramanaktivität dieser Proben ist in der Abbildung 11 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Proben, welche unter hohen Drücken gesputtert wurden, eine abweichende Ramanaktivität darstellen. Die Ramanaktivität der Probe mit einem Argonfluss von 600 sccm steigt für Wellenzahlen

Sputtergase

Für die Erzielung bestimmter Schichteigenschaften kann es notwendig werden, weitere Sputtergase zu verwenden. Dadurch kann jedoch auch die Depositionsrate beeinflusst werden. Als erstes Mischgas

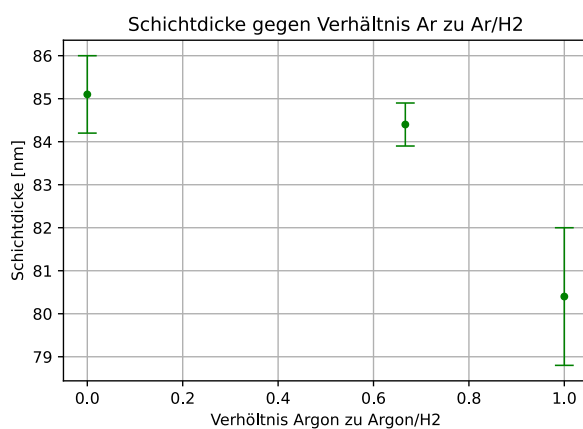
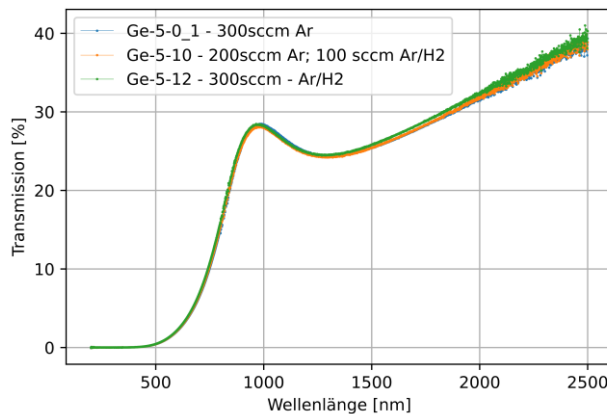


Abbildung 12: Abhängigkeit der Schichtdicke vom relativen Anteil eines 95% Argon, 5% Wasserstoff Gasgemisches am Sputtergas.

wurde 95% Argon und 5% Wasserstoff verwendet. Es wurde die Schichtdickenabhängigkeit für verschiedene Anteile dieses Gasgemisches am Gesamtfluss untersucht. Die Schichtdicken nach 18 Vorbeifahrten am Target sind in der Abbildung 12 dargestellt. Mit zunehmender Menge Wasserstoff verkleinert sich die Dicke der deponierten Schicht. Das ist mit dem geringeren Sputteryield von Wasserstoff gegenüber Argon zu begründen und muss bei der späteren Verwendung von Wasserstoff bedacht werden.

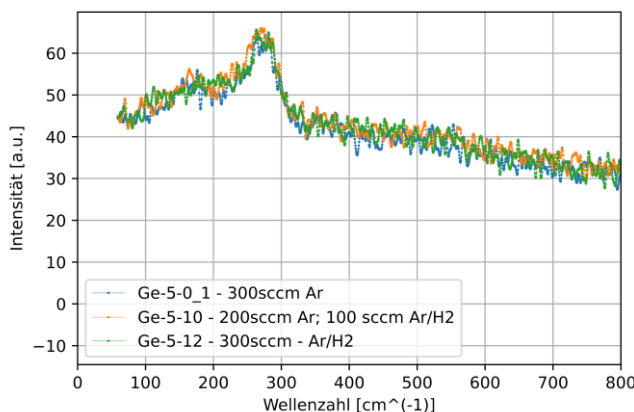
Zudem wurden die optischen Eigenschaften der Proben untersucht, bei denen das Sputtergas Argon sukzessive durch ein Gasgemisch 95% Argon + 5% Wasserstoff ersetzt wurde. Diese



Transmissionsspektren sind in der Abbildung 13 dargestellt. Wie gut zu erkennen ist, hat der zusätzliche Wasserstoff bei den untersuchten Konzentrationen keinen Einfluss auf das Transmissionsspektrum der Proben.

Abbildung 13: Abhängigkeit der Transmissionsspektren vom Gasgemisch Ar:Ar+H2.

Um einen Einfluss der Wasserstoffzugabe auf die Mikrostruktur zu untersuchen, wurden die Proben auch im Ramanspektroskop untersucht. In der Abbildung 14 sind die Ramanspektren der Proben mit



verschiedenen Anteilen bzw. Mengen Wasserstoff abgebildet. Es finden sich keine Unterschiede in den verschiedenen Spektren. Auch die Mikrostruktur der Ge-Schichten scheint also bei der Zugabe von Wasserstoff nicht modifiziert zu werden.

Abbildung 14: Abhängigkeit der Ramanspektren vom Gasgemisch Ar: N2

Mit der verwendeten Anlage ist es auch möglich, Stickstoff als Sputtergas zu verwenden. Auch hierbei soll der Einfluss auf das Transmissionsspektrum untersucht werden. Die Abbildung 15 zeigt die Transmissionsspektren von Proben, die mit Ar, N₂ oder einer Mischung aus beiden Gasen hergestellt wurden. Eine zunehmende Menge an Stickstoff hat eine große Auswirkung auf das Transmissionsspektrum und erhöht die Transmission über den gesamten Messbereich. Vermutlich entsteht dabei Germaniumnitrid.

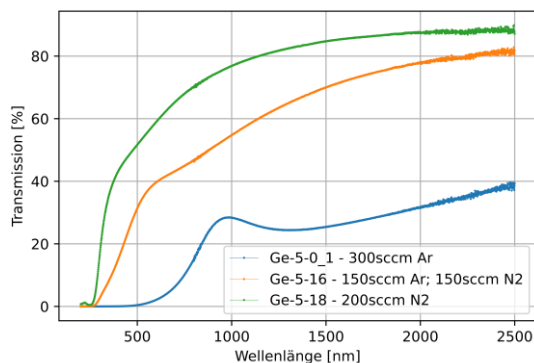


Abbildung 15: Abhängigkeit der Transmissionsspektren vom Gasgemisch Ar:N₂

Des Weiteren wurde der Einfluss der Carriergeschwindigkeit in Abbildung 16 während des Sputterprozesses untersucht. Dazu wurden Proben bei verschiedenen Carriergeschwindigkeit erstellt. Gleichzeitig wurde die Anzahl an Durchfahrten allerdings so angepasst, dass die resultierende deponierte Schichtdicke konstant gehalten wird. Mit Hilfe von Ramanmessungen wird die entstehende Mikrostruktur der Proben untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Carriergeschwindigkeit keinen messbaren Einfluss auf die Kristallinität der Proben hat.

Im Rahmen verschiedener Untersuchungen wurden Germaniumproben mit einem Lichtmikroskop betrachtet. Bei einigen Proben fanden sich dabei unerwartete Strukturen. Alle Proben, welche diese

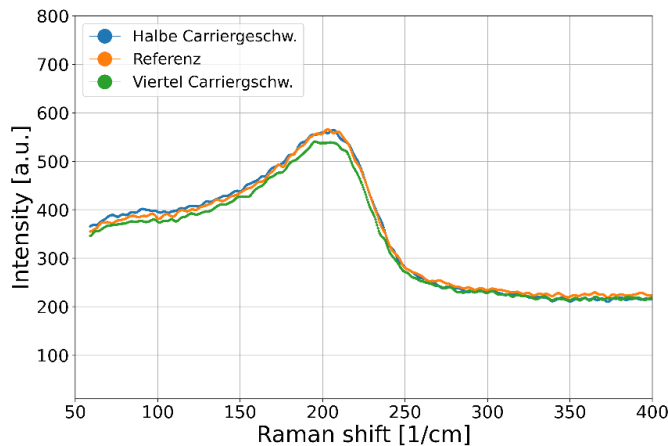


Abbildung 16: Ramanintensität von Germaniumproben, welche bei verschiedenen Carriergeschwindigkeiten gesputtert wurden.

Eigenschaften aufweisen, wurden in einem DC-Prozess mit einer Sputterleistung von 1000 W und Raumtemperatur gesputtert. Weiter weisen sowohl Proben bei einem Sputterdruck von $0,8e-3$ mBar, $4,5e-3$ mBar, als auch $20e-3$ mbar diese Strukturen auf. Nicht alle Proben, auf welche diese Bedingungen zutreffen, weisen diese Strukturen auf. Die Abbildung 17 zeigt Bilder aus einem Lichtmikroskop von zwei Proben, auf denen diese Strukturen zu sehen sind. Diese können als dreieckig geformte Strukturen, sowie als spiralförmig geformte Strukturen beschrieben werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese Strukturen durch das Sputtern von Germanium entstanden sind. Es wird weiter vermutet, dass es sich dabei allgemein um eine gewisse Kristallinität handelt. Weiter wurde diesem Phänomen nicht nachgegangen.



Abbildung 17: Sichtbare Strukturen einiger Germaniumschichten unter einem Lichtmikroskop.

Für Vergleiche mit Germaniumschichten aus bisherigen Solarzellen müssen auch Germaniumschichten mit einem PECVD Prozess abgeschieden werden. Um gezielte Schichtdicken zu erzeugen, muss die Wachstumsrate bestimmt werden. Mit dem bestehenden Prozess werden Germaniumschichten mit verschiedenen Depositionszeiten erzeugt und die Schichtdicke bestimmt. Bei diesem PECVD Prozess liegt dazwischen ein linearer Zusammenhang vor. Die Abbildung 18 zeigt die

ermittelten Messpunkte, sowie eine lineare Anpassung. Mit dieser Information können mit hoher Genauigkeit Schichten mit beliebiger Schichtdicke erzeugt werden. Dieses Verfahren ist insbesondere hilfreich, um dünne Schichten mit hoher Schichtdickenpräzision zu erzeugen, deren Dicke mit mechanischen Mitteln nur ungenau zu bestimmen wäre.

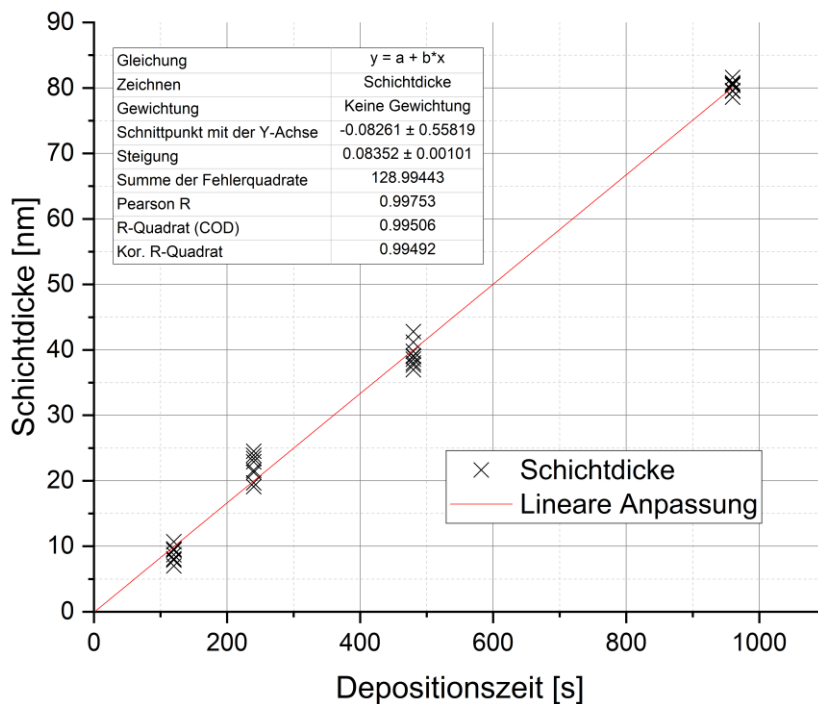


Abbildung 18 Wachstumsratenbestimmung des PECVD-Prozesses für die Deposition von Germanium. Die Schichtdicke von Proben mit unterschiedlicher Depositionszeit wird bestimmt und ein linearer Fit dazwischen durchgeführt.

Absorberentwicklung

Im Rahmen dieses Projekts soll der Absorber einer Germaniumsolarzelle mit einem Sputterprozess deponiert werden. Dazu muss ein geeigneter Sputterprozess definiert werden. Aus bisherigem Wissen existieren funktionale Solarzellen mit einem Germaniumabsorber aus einem PECVD Prozess. Die physikalischen Eigenschaften dieses Germaniumabsorbers können untersucht werden und mit Germaniumschichten aus verschiedenen Sputterprozessen mit unterschiedlichen Prozessparametern verglichen werden. Auf Basis dieser Ergebnisse wird ein Sputterprozess identifiziert, welcher Germaniumschichten mit geeigneten Eigenschaften für den Einsatz als Absorbermaterial in einer Solarzelle erzeugt.

Die Raman-Messungen ermöglichen die Bestimmung der Kristallinität der abgeschiedenen a-Ge-Schichten[8]. Ergebnisse aus der Literatur haben gezeigt, dass kristallines Germanium in den Raman-Spektren einen Peak bei 300 cm^{-1} aufweist, während für eine amorphe Germaniumschicht ein Peak bei 275 cm^{-1} zu erwarten ist. [8][9][10]

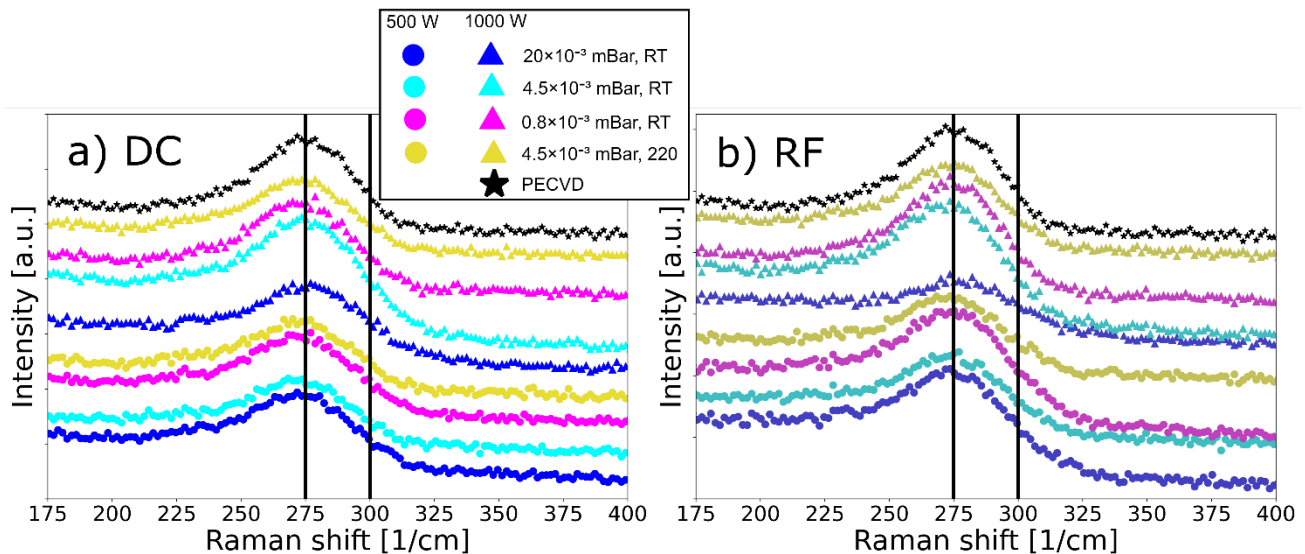


Abbildung 19: Raman-Spektren von Germanium-Proben mit verschiedenen Sputter-Bedingungen und einer PECVD-Referenz. Proben aus einem DC-Sputterprozess in a) und einem RF-Sputterprozess in b). Zusätzliche schwarze vertikale Referenzlinie für kristallines Germanium bei 300 1/cm und für amorphes Germanium bei 275 1/cm .

Abbildung 19 zeigt Raman-Messungen von Proben, die unter verschiedenen Sputterbedingungen hergestellt wurden, sowie von einer PECVD-Referenzprobe. Als zusätzliche Referenz sind die Positionen der kristallinen und amorphen Germanium-Peaks durch schwarze vertikale Linien gekennzeichnet. Die Spektren sind zur besseren Lesbarkeit vertikal verschoben. In dieser und den folgenden Abbildungen sind die Proben aus dem RF-Prozess mit einer geringeren Farbsättigung dargestellt als die Proben aus dem DC-Prozess. [10]

Alle analysierten Proben zeigen einen Peak an der Position der erwarteten Wellenzahl für amorphes Germanium bei 275 cm^{-1} . Keine der Proben zeigt einen Peak an der Position des kristallinen Germaniums bei 300 cm^{-1} . Die Kurven für alle Proben weisen keine relevanten drastischen Unterschiede auf. Dies gilt auch für die Probe, die bei einer Temperatur von 220°C gesputtert wurde und die Probe aus dem PECVD-Prozess. Die Ausnahme (blaues Dreieck) sind die a-Ge-Schichten, die durch einen Sputterprozess bei einer Abscheidungsleistung von 1000 W mit einem Druck von $20 \times 10^{-3}\text{ mBar}$ aus dem DC- und aus dem RF-Prozess abgeschieden wurden. Insbesondere die Probe aus dem RF-Sputterprozess (blaues Dreieck in Abbildung 19b) zeigt eine leichte Schulter auf der rechten Seite. Die Probe aus dem DC-Sputterprozess (blaue Dreiecke in Abbildung 19a) zeigt eine vergleichbare, aber etwas weniger ausgeprägte Schulter auf der rechten Seite. Dies deutet darauf hin, dass diese Proben eine etwas höhere Kristallinität aufweisen als alle anderen Proben.

Abgesehen von den beiden genannten Proben unterscheiden sich die Kristallinität und das Verhalten der Raman-Spektren der gesputterten Proben nicht von denen der Proben aus dem PECVD-Prozess. Dies deutet darauf hin, dass durch Sputtern eine ähnliche Mikrostruktur wie mit dem PECVD-Verfahren erreicht werden kann. Außerdem ergeben die Raman-Messungen keine Einschränkungen für die mögliche Verwendung als Absorber. [10]

Um die Oberflächenrauigkeit der abgeschiedenen Proben zu untersuchen, wurden die abgeschiedenen Proben mit einem AFM untersucht. Abbildung 20 zeigt die RMS-Rauheit eines $1 \mu\text{m}^2$ großen Abschnitts der Proben. In der Abbildung sind auch Fehlerbalken für die gemessenen Werte zu sehen.

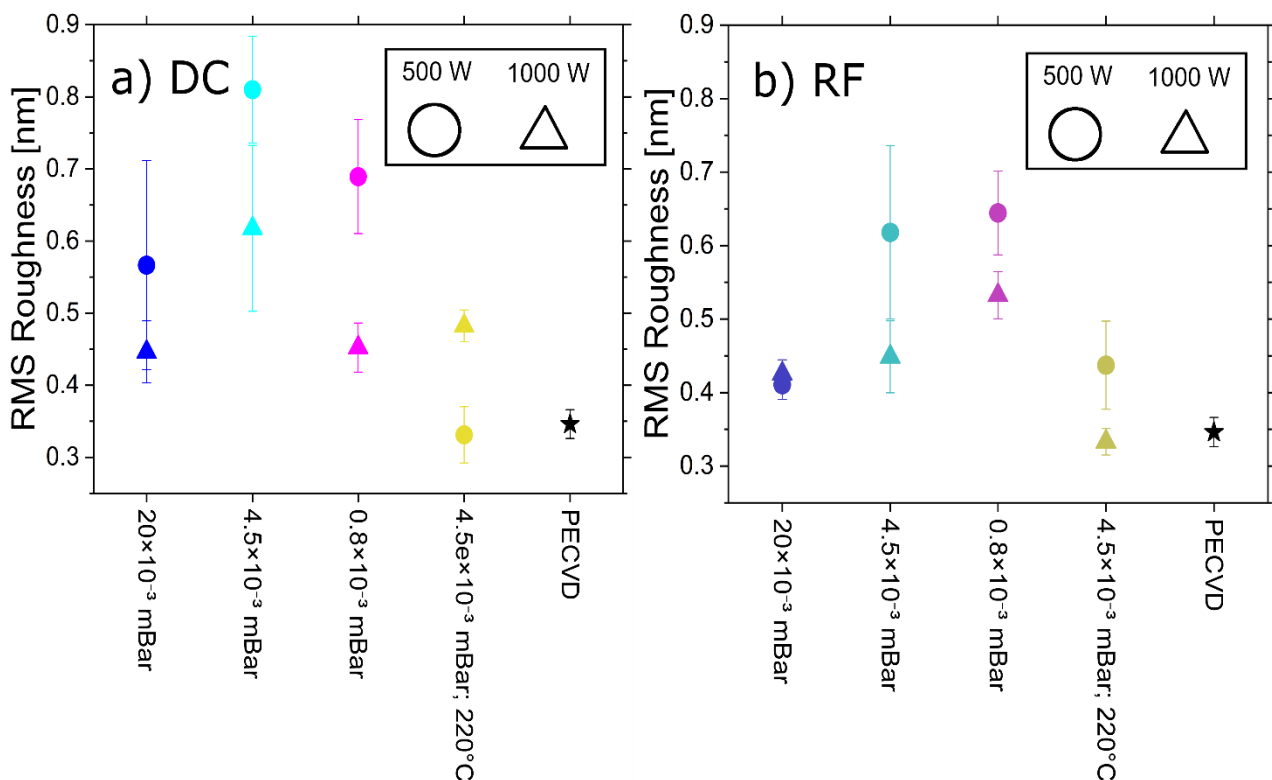


Abbildung 20: RMS-Rauheit aus AFM-Messungen von Proben mit unterschiedlichen Sputtereinstellungen aus einem DC-Prozess in a) und einem RF-Prozess in b) und PECVD-Referenz.

Diese stellen die Standardabweichung zwischen quadratischen $0,25 \mu\text{m}^2$ -Flächen innerhalb des $1 \mu\text{m}^2$ -Messbereichs dar. Die PECVD-Probe weist fast die geringste Rauheit auf. Die Proben, die bei einer Temperatur von 220°C gesputtert wurden, scheinen im Allgemeinen eine geringere Rauheit aufzuweisen als die bei Raumtemperatur gesputterten Proben. Andere gesputterte Proben weisen eine deutlich größere Rauheit auf als die bei einer Temperatur von 220°C gesputterten Proben oder die Probe aus dem PECVD-Prozess. Die Probe aus dem PECVD-Verfahren weist im Vergleich zu den gesputterten Proben eine geringe Rauheit auf. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein Sputterprozess zur Herstellung einer Schicht mit einer ähnlichen Rauheit wie beim PECVD-Prozess verwendet werden kann. Allerdings müssen dafür die Prozessparameter entsprechend gewählt werden, da sonst eine größere Rauheit entstehen kann. [10]

Die Reflexions- und Transmissionsmessungen der Proben zeigen die optischen Eigenschaften der Proben. Ein definiertes Transmissionsspektrum ist besonders wichtig für die spätere Verwendung als transparente Photovoltaik. Diese Daten werden verwendet, um die dielektrische Funktion der Materialien zu modellieren, aus der der komplexe Brechungsindex extrahiert werden kann. [10]

Abbildung 21 zeigt die Reflexions- und Transmissionsspektren der gesputterten Proben und der Probe aus dem PECVD-Prozess. Darüber hinaus wird eine modellierte dielektrische Funktion an die Messdaten angepasst. Für die Anpassung wird ein Tauc-Lorentz-Modell verwendet. Diese Anpassung wird für jede Probe einzeln durchgeführt. Die Reflexion und Transmission, die sich aus der

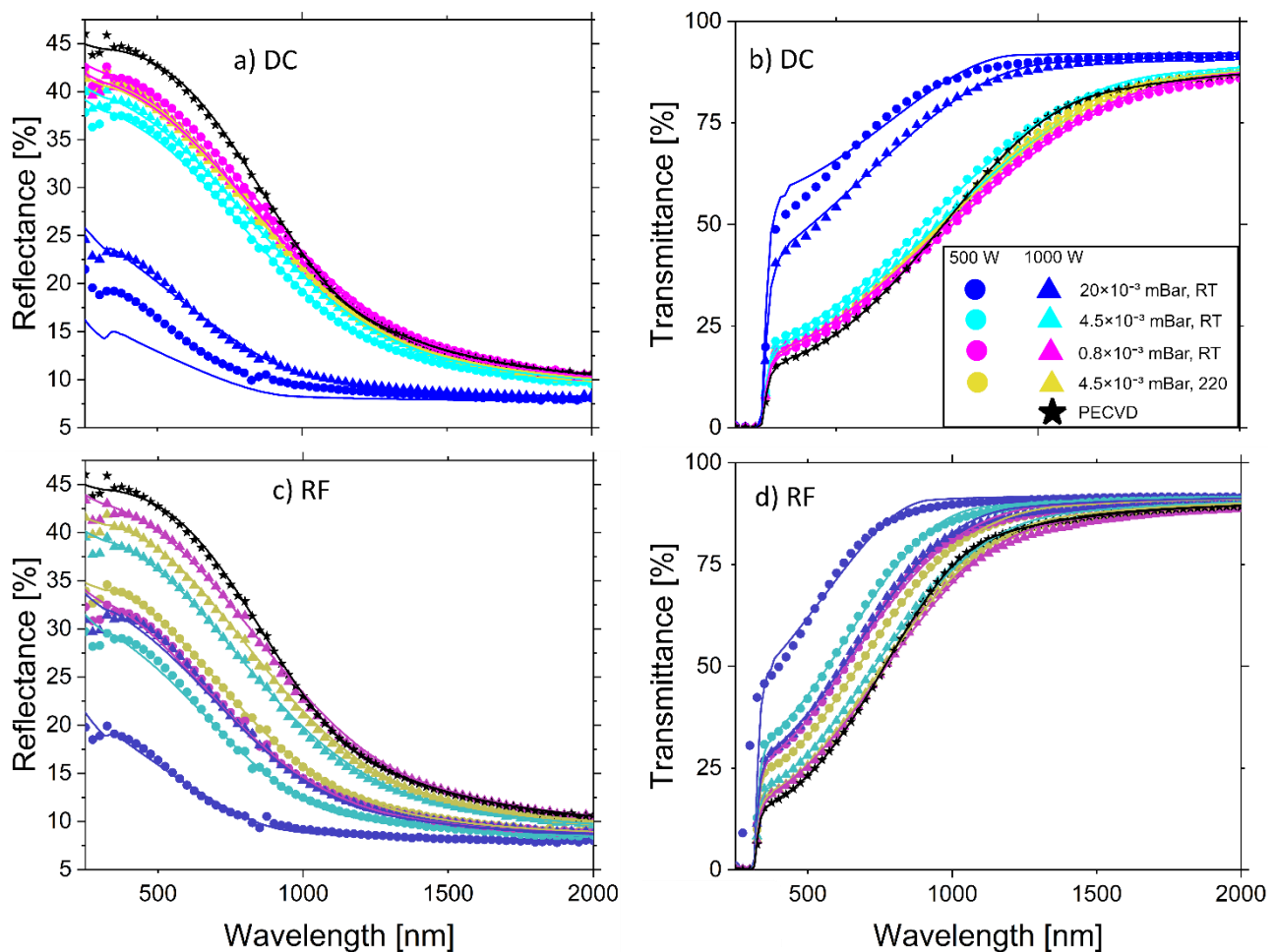


Abbildung 21: Reflexionsspektren (a) und c)) und Transmissionsspektren (b) und d)) von Proben mit unterschiedlichen Sputtereinstellungen aus einem DC (a) und b)) und RF (c) und d)) Prozess und einer PECVD-Referenz. Angepasstes Reflexions- und Transmissionsverhalten aus dem dielektrischen Fit als Linie.

angepassten dielektrischen Funktion ergeben, sind als durchgezogene Linie dargestellt.

Die Abbildung 21b) und d) zeigen einen Sprung in den Transmissionsdaten bei einer Wellenlänge von etwa 350 nm. Die Transmission fällt bei kürzeren Wellenlängen drastisch ab. Dies ist auf die deutlich reduzierte Transmission des Glases bei dieser Wellenlänge zurückzuführen. [10]

Die Probe aus dem PECVD-Verfahren zeigt im Vergleich zu den Proben aus dem DC-Verfahren und den Proben, die bei einem Sputterdruck von $0,8 \times 10^{-3}$ mbar gesputtert wurden, die höchste Reflexion. In Bezug auf die Transmission zeigen alle Proben aus dem DC-Prozess, abgesehen von der Probe aus dem Sputterprozess mit einem Sputterdruck von $0,8 \times 10^{-3}$ mbar, ein vergleichbares Transmissionsspektrum.

Unter den Proben aus dem DC-Sputterprozess zeigen die Proben aus dem Sputterprozess mit einem Sputterdruck von 20×10^{-3} mBar die mit Abstand niedrigste Reflexion und die höchste Transmission. Außerdem sind die Reflexions- und Transmissionskurven aller Proben aus dem DC-Sputterprozess mit Ausnahme der Proben aus dem Prozess mit einem Sputterdruck von 20×10^{-3} mBar stärker gruppiert als die der Proben aus dem RF-Sputterprozess. [10]

Bei den RF-Proben zeigt die Probe aus dem Sputterprozess mit einem Sputterdruck von 20×10^{-3} mBar und einer Sputterleistung von 500 W auch die mit Abstand geringste Reflexion und höchste Transmission. Die Probe aus der RF-Einstellung mit einer Sputterleistung von 1000 W und demselben Sputterdruck zeigt im Vergleich zu den anderen Proben eine geringe Reflexion und eine hohe Transmission. [10]

Die Probe mit dem niedrigsten Sputterdruck von $0,8 \times 10^{-3}$ mBar zeigt ebenfalls ein sehr ähnliches Reflexions- und Transmissionsverhalten wie die Probe aus dem PECVD-Prozess. Was das Reflexions- und Transmissionsverhalten der Proben betrifft, so zeigen die gesputterten Proben mit einem Sputterdruck von $0,8 \times 10^{-3}$ mBar und einer Sputterleistung von 1000 W die größte Übereinstimmung mit der Probe aus dem PECVD-Prozess. Dies gilt sowohl für den DC-Prozess als auch für den RF-Prozess. [10]

Die Anpassungen stimmen sehr gut mit den experimentellen Daten überein, mit Ausnahme der Proben aus dem Sputterprozess bei höchstem Druck (20×10^{-3} mBar), insbesondere derjenigen, die bei 500 W DC hergestellt wurden. Wie aus den Raman-Spektren ersichtlich ist, haben diese Proben möglicherweise eine größere Teilkristallinität, und solche Schichtsysteme können durch das gewählte Modell nur schlecht beschrieben werden. [10, 11]

Der komplexe Brechungsindex der verwendeten Materialien ist für die Verwendung als potenziell farbneutrales Fenster oder zur Erzielung eines bestimmten Transmissionsspektrums relevant. Zu diesem Zweck wird der komplexe Brechungsindex der gesputterten Proben durch Messung von T, R und Anpassung eines Modells ermittelt und mit der PECVD-Referenzprobe verglichen. [10]

Abbildung 22 zeigt den Brechungsindex und den Extinktionskoeffizienten, die sich aus den angepassten dielektrischen Funktionen für die Germaniumschichten ergeben. Dargestellt sind die Daten für die gesputterten Proben und die PECVD-Referenzprobe. Es ist das gleiche Gruppierungsverhalten wie bei den Reflexions- und Transmissionsspektren zu beobachten. Der

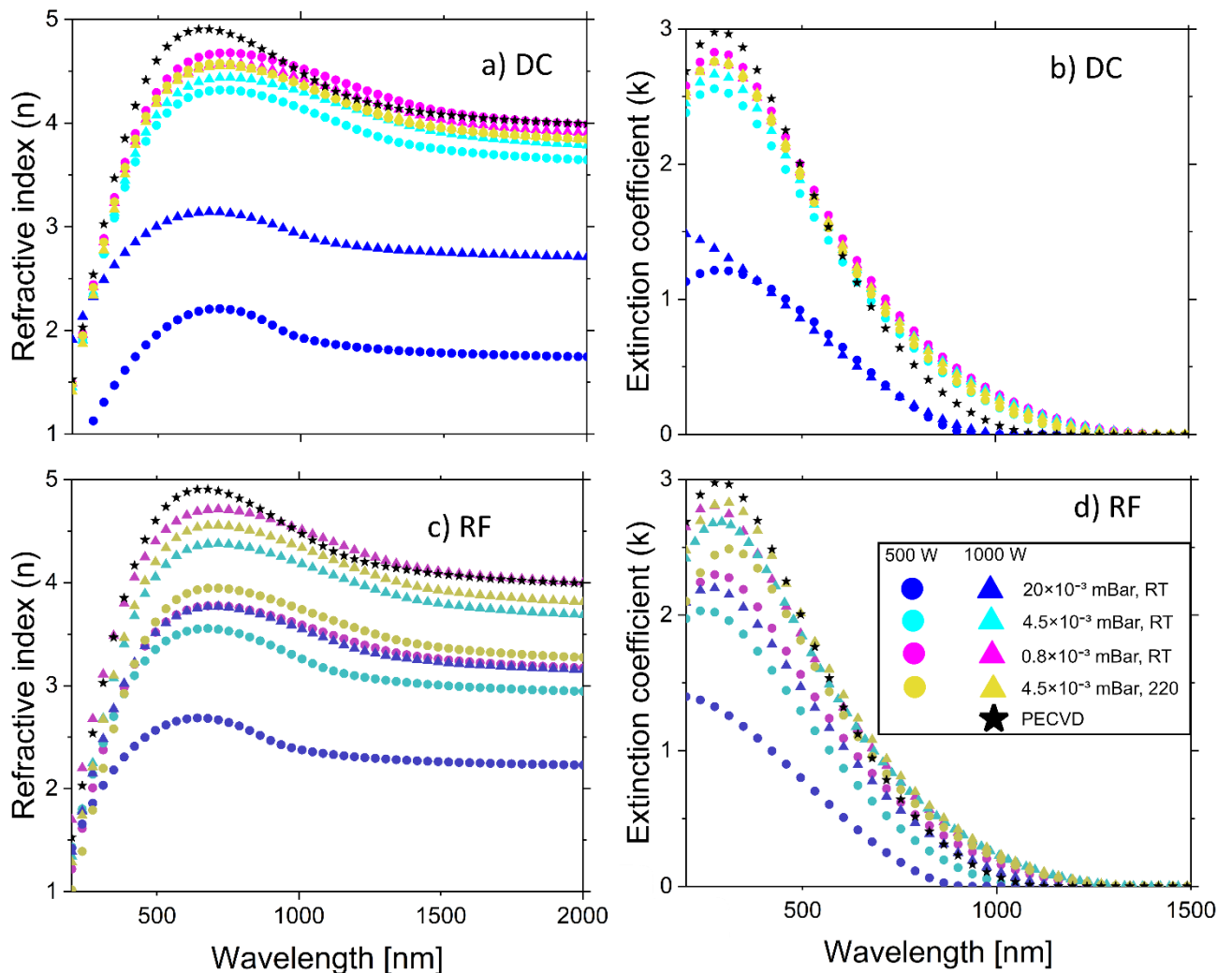


Abbildung 22: Brechungsindex (a) und (c)) und Extinktionskoeffizient (b) und d)) von Proben mit unterschiedlichen Sputtereinstellungen aus einem DC (a) und b)) und RF (c) und d)) Prozess und einer PECVD-Referenz.

Brechungsindex und der Extinktionskoeffizient der bei höchstem Druck gesputterten Proben zeigen eine deutliche Abweichung von den anderen Proben, insbesondere bei den im DC-Modus gesputterten Proben. Ihre Werte für den Brechungsindex sind im Vergleich zur Literatur für dünnes amorphes Germanium niedrig [10, 12]. Amotchkina et. al. meldeten einen Brechungsindex für Germanium, der etwa 42% höher war als die Ergebnisse der Probe, die bei höchstem Druck und einer Leistung von 500 W gesputtert wurde, und sogar etwa 110% höher als die Probe, die mit einer Leistung von 1000 W gesputtert wurde. Wie bereits erwähnt, könnte eine Teilkristallinität vorhanden sein. Mit dem DC-Sputter-Modus lassen sich bei jeder getesteten Sputter-Einstellung, abgesehen vom höchsten Druck, Brechungsindizes und Extinktionskoeffizienten erzielen, die sehr nahe an der PECVD-Referenz liegen. Mit dem RF-Sputter-Modus liegen die Ergebnisse der Heißabscheidung sowie der Abscheidung mit dem niedrigsten Druck, beide mit einer Leistung von 1000 W, relativ gesehen am

nächsten an der PECVD-Referenz und absolut gesehen ziemlich nahe daran. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in Bezug auf den Brechungsindex und den Extinktionskoeffizienten Proben abgeschieden werden können, die der PECVD-Referenzprobe nahekommen. [10]

Die optische Bandlücke des verwendeten Absorbermaterials ist besonders relevant für den Wirkungsgrad und die Leerlaufspannung einer Solarzelle. Die Bandlücke der verschiedenen Proben wurde aus dem Fit der dielektrischen Funktion extrahiert. In Abbildung 23 kann die Bandlücke der Probe aus dem PECVD-Prozess mit der Bandlücke der gesputterten Proben verglichen. [10]

Die Proben, die mit einem Druck von 20×10^{-3} mBar gesputtert wurden, zeigen die größten Bandlücken (abgesehen von der Probe, die mit 1000 W und dem RF-Modus gesputtert wurde). Diese ist auch größer als die Bandlücke der PECVD-Probe. Allerdings sind die Ergebnisse der Bandlücke der gesputterten Proben mit einem Sputterdruck von 20×10^{-3} mBar aufgrund einer schlechten Anpassungsqualität nicht vertrauenswürdig. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse dieser Proben in Abbildung 23 mit einer Klammer versehen. Auch die Anpassungsqualität für gesputterte Proben mit einem Sputterdruck von $4,5 \times 10^{-3}$ mBar und einer Sputterleistung von 500 W RF ist mittelmäßig. Alle anderen Proben zeigen eine kleinere Bandlücke als die PECVD-Probe. Ihre Anpassungsqualität ist nicht perfekt und weist kleine Abweichungen auf. Bei den gesputterten Proben führt das Sputtern mit der höheren Leistung von 1000 W immer zu einer kleineren Bandlücke als das Sputtern mit einer Leistung von 500 W. [10]

Abgesehen von den erwähnten Ausreißern haben die gesputterten Proben eine kleinere Bandlücke im Vergleich zu den PECVD-Proben. Dies zeigt Unterschiede zwischen den Proben aus dem Sputterprozess und dem PECVD-Prozess, die durch die hier getesteten Parameter nicht überwunden werden können. Dies kann zu einem unterschiedlichen Verhalten in der Solarzelle führen.

Ein möglicher Grund für die Unterschiede in der Bandlücke zwischen den gesputterten Proben und der Probe aus dem PECVD-Prozess könnte der unterschiedliche Druck während der Abscheidung sein. Die Probe aus dem PECVD-Verfahren wird bei einem Druck von 1 mBar abgeschieden. Das ist deutlich höher als bei den Proben aus dem Sputtering-Verfahren. Auch die Kristallinität der Proben kann durch den unterschiedlichen Druck während der Abscheidung beeinflusst werden. [10, 13]

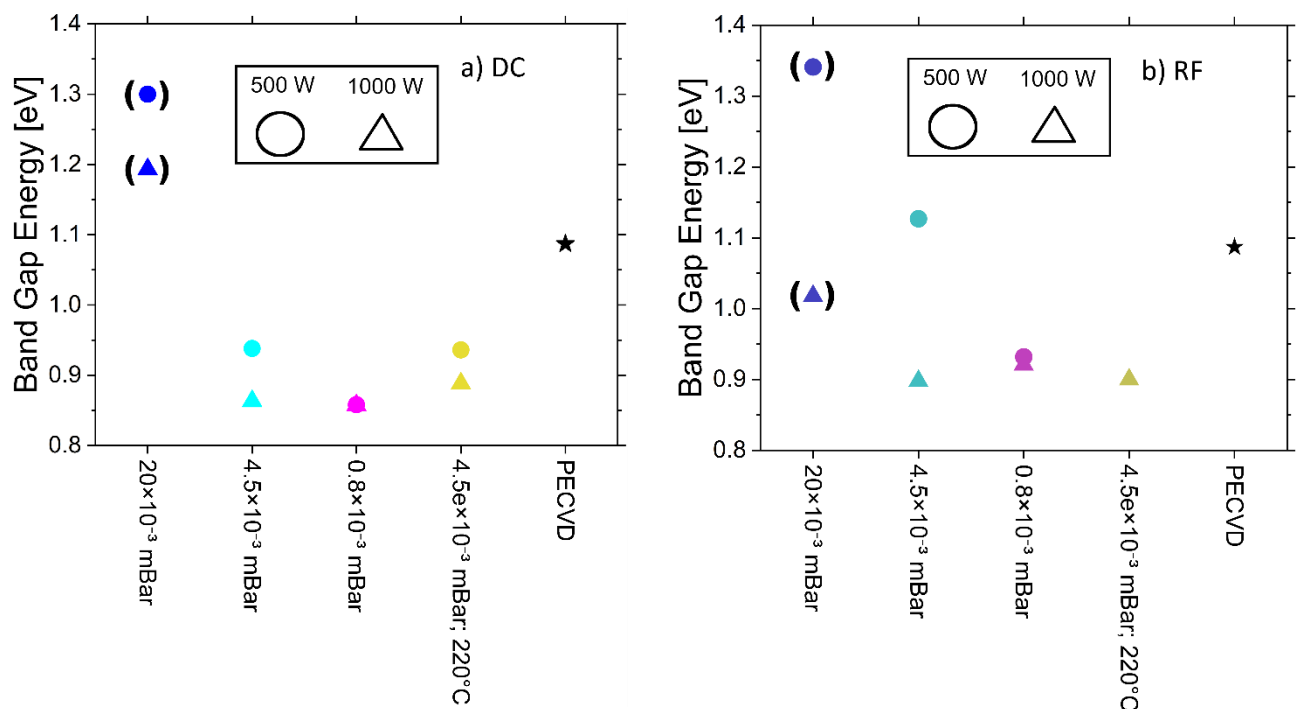


Abbildung 23: Optische Bandlücke von Proben mit unterschiedlichen Sputtereinstellungen aus einem DC-Prozess in a) und einem RF-Prozess in b) und PECVD-Referenz.

Herstellung Solarzellen und Charakterisierung

Aufgrund vorheriger Erfahrungen existieren Vorgehensweisen zur Fertigung von Solarzellen mit einem Germaniumabsorber aus einem PECVD Prozess. Allerdings wurden die Anlagen für einige Zeit gar nicht oder nicht für diesen Einsatzzweck benutzt. Eine kritische Komponente bei der Erzeugung von qualitativen Schichten in einem PECVD Prozess ist der Zustand (Konditionierung) der Prozesskammern und die Sauberkeit im Vakuumsystem. Um den Zustand der Anlagen zu prüfen, wurde in frühen Versuchen zuerst versucht, die Ergebnisse von bekannten Solarzellen mit einem PECVD Absorber zu reproduzieren. Aufgrund von schlechten Umgebungsbedingungen in der PECVD Anlage sind dabei zu Beginn üblicherweise Solarzellen entstanden, welche quasi keine Funktionalität aufwiesen. Die Abbildung 24 zeigt die IV-Kurve von 16 Solarzellen auf einem Substrat. Diese weisen grundsätzlich eine diodenähnliche Kennlinie auf, stellen aber fast keine Ausgangsleistung bereit. Mit aufeinanderfolgenden Reinigungsvorgängen und vielen weiteren Beschichtungen verbesserten sich die Bedingungen in den Prozesskammern stetig und die Ergebnisse früherer Solarzellen konnten reproduziert werden.

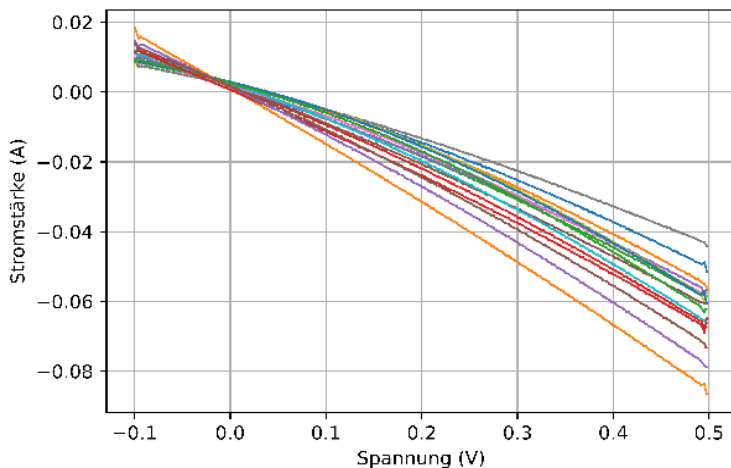


Abbildung 24: IV-Kennlinie einer Solarzelle mit einem Germaniumabsorber aus einem PECVD-Prozess. Schlechte elektrische Solarzelleneigenschaften aufgrund unpassender Depositionskammerbedingungen.

Auch die Kontaktierung von Solarzellen für die Messung von IV-Kennlinien wurde überprüft und vorbereitet. In frühen Messungen traten zum Teil Kontaktprobleme und kapazitive Effekte auf. Die Abbildung 25 zeigt die IV-Kennlinie von Solarzellen, deren Messung durch die beschriebenen Effekte gestört wurde. Um dieses Verhalten zu verbessern, wurden die Positionierung von Kontakten verbessert, Kontaktflächen gereinigt und die Elektronik überprüft. Im Rahmen dessen wurden auch verschiedene Depositionsmethoden für den Silberrückkontakt verwendet. Dabei kamen Depositionen mit einem Elektronenstrahl und Sputtern zum Einsatz. Für die weiteren Versuche wurden die Silberkontaktflächen weiterhin gesputtert, weil sich kein Vorteil durch die Elektronenstrahldeposition ergab.

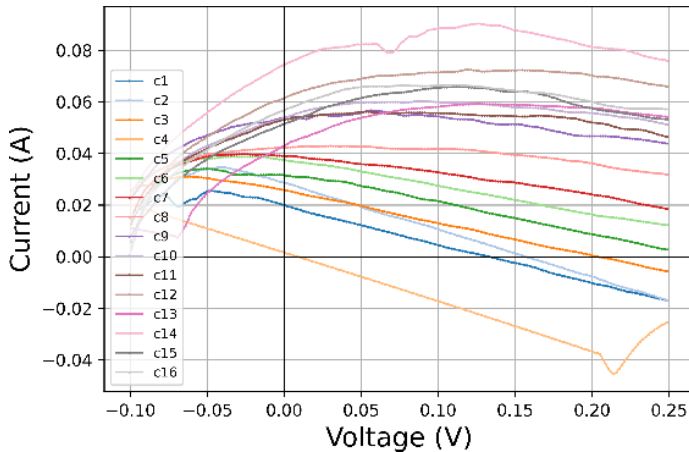


Abbildung 25: IV-Kennlinie einer Solarzelle. Kontaktierungsschwierigkeiten und Ladungseffekte verfälschen das Messergebnis.

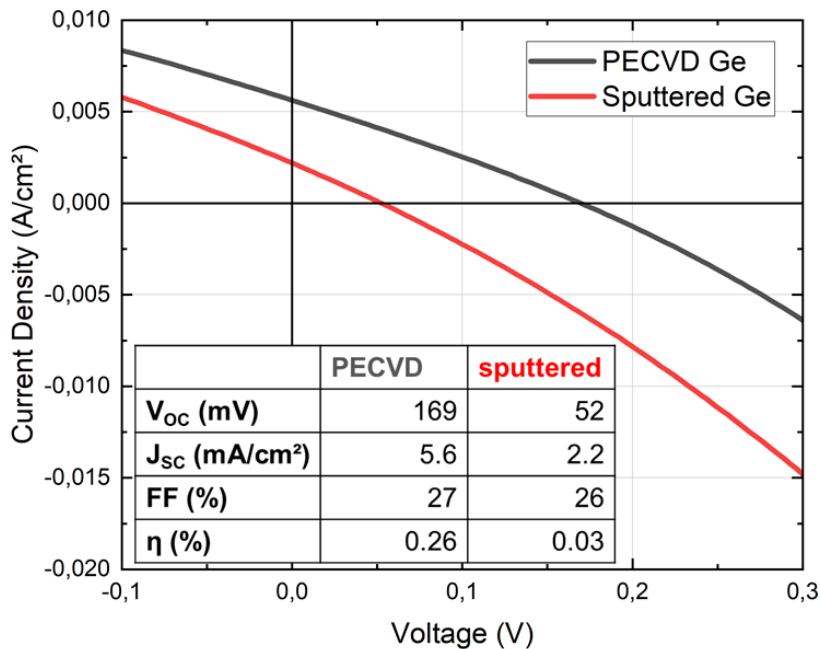


Abbildung 26: Strom-Spannungs-Kennlinie zweier Solarzellen mit Germaniumabsorber in einer frühen Iteration. Dieser wurde bei der roten Kurve gesputtert und bei der schwarzen Kurve in einem PECVD Prozess deponiert. Die Tabelle gibt die aus den Kurven extrahierten Kenngrößen an.

Die Solarzellen wurden auf Glas mit einer Größe von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ hergestellt. Eine transparente, leitfähige Oxidschicht aus ZnO:Al wurde vom Hersteller auf dem Glas vorbeschichtet. Das Glas wurde vor der ersten Abscheidung neben dem bereits abgeschiedenen ZnO:Al mit deionisiertem Wasser in einer Miele IR 6002 Spülmaschine gereinigt. Alle für die Solarzelle hergestellten Siliziumschichten wurden in einem PECVD-Prozess abgeschieden. In einem ersten Prozess wurde eine n-dotierte Siliziumschicht abgeschieden. Die n-Dotierung wurde mit Phosphin erreicht. Es wurde ein Fluss von 200 sccm Wasserstoff, 40 sccm Monosilan und 25 sccm Phosphin verwendet. Die Generatorleistung während der Abscheidung betrug 15 W. Anschließend wurde eine undotierte Pufferschicht aus a-Si:H abgeschieden. Es wurde ein Fluss von 200 sccm Wasserstoff und 40 sccm Monosilan verwendet. Die Generatorleistung während der Abscheidung betrug 15 W. Um die

Absorberschicht abzuschneiden, wurde die Probe aus dem Beschichtungssystem entnommen und in die Vistar 600 transferiert. Dabei wurde die Probe der Atmosphäre ausgesetzt. Der intrinsische Germaniumabsorber wurde mit dem beschriebenen Sputterverfahren abgeschieden. Die Probe wurde dann in die CS400PS zurückgebracht (und dabei wieder der Atmosphäre ausgesetzt). Eine weitere intrinsische und undotierte Siliziumschicht wurde dann abgeschieden. Während der Abscheidung wurde ein Fluss von 1000 sccm Wasserstoff und 2 sccm Monosilan und eine Generatorleistung von 70 W verwendet. Als letzte Abscheidung im PECVD-Verfahren wurde dann eine p-dotierte Siliziumschicht abgeschieden. Die Dotierung wurde mit Diboran durchgeführt. Es wurde ein Fluss von 1000 sccm Wasserstoff, 1,8 sccm Monosilan und 1,5 sccm Diboran verwendet. Die Generatorleistung während der Abscheidung betrug 70 W. Der Frontkontakt wurde durch mechanisches Anritzen des Schichtstapels erreicht. Für die Kontaktierung wurden Silber-Rückkontakte durch eine Maske mittels eines Sputterprozesses abgeschieden. Die Silberkontakte stellen eine elektrische Verbindung zum Rückseitenkontakt her. Hierfür wird die CS400PS verwendet, mit dem Sputterprozesse in separaten Prozesskammern durchgeführt werden können. [10]

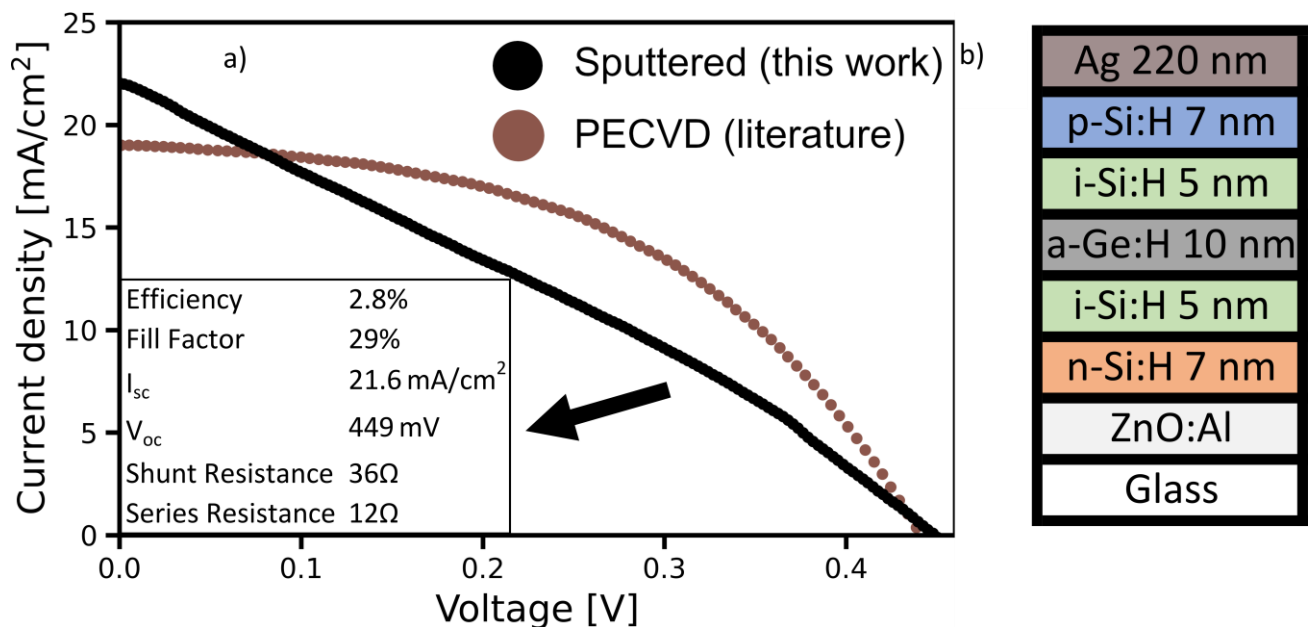


Abbildung 27: Strom-Spannungs-Kennlinien der Solarzelle mit gesputtertem Germanium-Absorber und einer Literaturreferenz mit einem PECVD-Ge-Absorber in a). Schematischer Zellstapel der Solarzelle in b).

Im Folgenden wird eine gesputterte Germaniumschicht, deren Sputterparameter auf der Grundlage der vorherigen Ergebnisse ausgewählt wurden, als Absorberschicht in einer Solarzelle getestet. Diese Solarzelle wird mit einer Solarzelle verglichen, die vollständig mit einem PECVD-Verfahren hergestellt wurde: [3, 10]

Die Transmissions- und Reflexionsmessungen zeigen, dass die bei einem Druck von $0,8 \times 10^{-3}$ mBar gesputterten Proben oder die bei einer Temperatur von 220 °C gesputterten Proben hinsichtlich der hier getesteten Eigenschaften die größte Ähnlichkeit mit der PECVD-Referenz aufweisen. Da jedoch im Hinblick auf eine industrielle Anwendung ein heißer Sputterprozess für eine Inline-Sputteranlage deutlich mehr Aufwand erfordert, wurde der heiße Prozess außer Acht gelassen. Außerdem liegt der Sputterprozess mit dem niedrigsten Druck am Rande des möglichen Prozessfensters. Bei diesem niedrigen Druck hat unser System Probleme mit der zuverlässigen Plasmazündung und mit der Stabilität des Plasmas. Daher ist es nicht für den Einsatz in einem komplexen und fehleranfälligen Gerät geeignet. Schließlich werden Gleichstrom-Plasmageneratoren in der einschlägigen Industrie hauptsächlich für das Sputtern von Metallschichten verwendet [14][11][15]. Aus diesem Grund wird

der DC-Sputterprozess mit einem mittleren Druck von $4,5 \times 10^{-3}$ mBar bei einer Ausgangsleistung von 500 W und Raumtemperatur für die Tests in einer Solarzelle ausgewählt. [10]

Die Abbildung 26 zeigt eine frühe Iteration einer Solarzelle mit gesputtertem Absorber und eine Solarzelle mit einem Absorber aus einem PECVD Prozess. Durch noch ungenügende Depositionsbedingungen in der Anlage erfüllt auch die PECVD Solarzelle nicht das gesetzte Ziel von 1% Effizienz. Weiter ist erkennbar, dass die gesputterte Solarzelle nochmals deutlich schlechter abschneidet

Abbildung 27 a) [10] zeigt die beleuchtete IV-Kurve einer späteren Solarzelle. Durch Verbesserungen der Kammerbedingungen bei dem PECVD Prozess konnte die Effizienz deutlich gesteigert werden. Eine Leerlaufspannung von 449 mV und ein Kurzschlussstrom von $21,6 \text{ mA/cm}^2$ werden mit einem Füllfaktor von 29% erreicht, was zu einem Wirkungsgrad von 2,8% führt. Abbildung 27 b) [10] zeigt einen schematischen Zellstapel der abgeschiedenen Solarzelle. Das Licht kommt von unten.

In Meddeb et. al. wird eine vergleichbare Dünnschichtsolarzelle mit einem Germanium-Absorber und einer Schichtdicke von 10 nm vorgestellt [3]. Dort wird der Absorber durch ein PECVD-Verfahren abgeschieden und die Solarzelle weist einen Wirkungsgrad von 3,98% auf. In Abbildung 27 ist diese IV-Kurve zum Vergleich auch als braune Kurve dargestellt. Ein direkter Vergleich der Zellen zeigt einen etwas höheren Kurzschlussstrom von etwa 3,46 mA für diese Arbeit. Die Leerlaufspannung ist in beiden Fällen ähnlich. Allerdings hat die hier vorgestellte Zelle einen niedrigeren Füllfaktor von 29% im Vergleich zu 48% bei Meddeb et. al. [3]. Der Grund dafür ist wahrscheinlich ein geringerer Nebenschlusswiderstand und ein höherer Serienwiderstand. [10]

Im Vergleich zu früheren Arbeiten mit einem PECVD-Prozess sind der Füllfaktor und der Wirkungsgrad niedriger. [3] Dies ist auf einen niedrigen Nebenschlusswiderstand und einen hohen Serienwiderstand zurückzuführen, die das Erreichen höherer Wirkungsgrade verhindern. Der niedrige Füllfaktor der Solarzelle mit dem gesputterten Absorber könnte mit den Grenzschichten zwischen dem Absorber und den durch einen PECVD-Prozess erzeugten Schichten zusammenhängen. Durch das Sputtern kann die darunter liegende n-dotierte Siliziumschicht beschädigt werden. Ein möglicher Test hierfür wäre die Anpassung der Sputterbedingungen mit einem geringeren Schadenspotenzial. Außerdem kam es bei der Herstellung der hier vorgestellten Zellen zu zwei nicht zu vermeidenden Vakuumunterbrechungen während der Abscheidung. Die Umgebungsluft, insbesondere Staub oder Sauerstoff, kann Schäden oder unerwünschte Veränderungen verursachen. Vakuumbrüche sollten so weit wie möglich vermieden werden, um eine Beeinflussung der Ergebnisse in nachfolgenden Experimenten zu verhindern. Die teilweise fertiggestellte Solarzelle der Atmosphäre auszusetzen, könnte ebenfalls für eine Verringerung der Effizienz verantwortlich sein. [10]

In Osterthun et. al. werden vergleichbare Solarzellen mit einem Germaniumabsorber aus einem PECVD-Prozess vorgestellt [16]. Meddeb et. al. untersuchten ebenfalls vergleichbare Solarzellen mit variablen Germanium-Absorberdicken. [3] Beide führen elektrische Modellierungen durch und stellen einen Bandversatz zwischen den i-Si:H-Schichten und dem Germaniumabsorber fest. Außerdem sind es diese Grenzflächen, an denen es in dieser Arbeit zu Vakuumunterbrechungen kam und wo der gesputterte Germaniumabsorber auf Siliziumschichten aus der PECVD trifft. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die Germanium/Silizium-Grenzfläche verbessert werden sollte, um bessere Wirkungsgrade zu erzielen. Die beschriebenen Eigenschaften könnten sich auch ändern, wenn die gesamte Solarzelle gesputtert würde, d.h. wenn es keine Grenzflächen mehr zwischen gesputterten Schichten und Schichten aus einem PECVD-Prozess gäbe. [10]

Mit der in dieser Arbeit beschriebenen Ausrüstung lassen sich diese Vakuumbrüche bei dieser Art von Solarzelle nicht vermeiden. Unter der Voraussetzung, dass das Endziel eine vollständig gesputterte Solarzelle ist, wäre diese Vakuumpause jedoch nicht mehr notwendig, da die Solarzelle die Sputteranlage nicht verlassen müsste. Außerdem ist es das langfristige Ziel, eine vollständig gesputterte transparente Dünnschichtsolarzelle zu erreichen. In einem nächsten Schritt könnte der

Transfer der ladungsträgerselektiven Schichten von einem PECVD-Prozess zu einem Sputterprozess in Angriff genommen werden. Dies könnte letztendlich zu einer vollständig gesputterten Solarzelle führen. Im Hinblick auf diese Eigenschaften scheint es jedoch generell möglich zu sein, eine Solarzelle mit einer gesputterten Absorberschicht herzustellen, die eine angemessene Leistung aufweist. Insbesondere wegen des ähnlichen Kurzschlussstroms und der ähnlichen Leerlaufspannung haben beide Zellen das Potenzial, ähnliche Wirkungsgrade zu erreichen. Außerdem verwendet die hier vorgestellte Solarzelle einen Rückkontakt aus Silber. Für die Verwendung als transparente Solarzelle müsste dieser ersetzt werden, um die Übertragung zu ermöglichen. Es wäre möglich, in Zukunft eine zusätzliche Schicht aus gesputtertem ZnO:Al zu verwenden. [10]

Es wurde mit Hilfe der Softwareumgebung AFORS-HET ein elektrisches Modell der Solarzelle erstellt, mit dem die Anpassung neuer Schichten, wie z.B. der selektiven Kontakte, unterstützt werden soll. Die Abbildung 28 zeigt ein Ergebnis der elektrischen Modellierung. Es ist die elektrische Bandstruktur einer Solarzelle mit einem 5 nm dicken PECVD Ge-Absorber dargestellt.

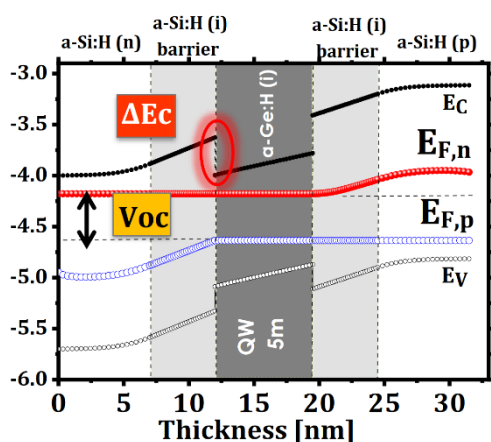


Abbildung 28: Elektrische Bandstruktur einer Solarzelle mit 5 nm dicken Germaniumabsorber.

Das Banddiagramm zeigt, dass die Solarzelle mit den vorgestellten Materialien grundsätzlich funktionsfähig ist und der Transport der Ladungsträger stattfindet. Allerdings kommt es durch Sprünge im Leitungsband am Rand der Germaniumschicht (Roter Kreis in Abbildung 28) zu einer Verringerung des Stroms und damit auch zu einer Verringerung der Effizienz.

Optische Zelleigenschaften und Farbneutralität

Im Rahmen dieses Kapitels werden optische Modellierungen verwendet um die optischen Eigenschaften von farbneutralen und transparenten Solarzellen näher zu bestimmen. Für optische Beschreibungen wird der $L^*a^*b^*$ -Farbraum verwendet. Dieser verwendet die Farbachsen a^* und b^* , sowie die Helligkeitsachse L^* . Die Abbildung 29[17] zeigt eine Darstellung der Achsen mit eingezeichneten Farbverläufen. Dieser Farbraum bietet den Vorteil, dass ein euklidischer Farbabstand

ΔE^*_{ab} , beziehungsweise ΔE^* existiert: $\Delta E^* = \sqrt{(L^*_a - L^*_b)^2 + (a^*_a - a^*_b)^2 + (b^*_a - b^*_b)^2}$. Bei gleichem Farbabstand erscheinen Farben für den menschlichen Beobachter mit gleichem Farbunterschied.

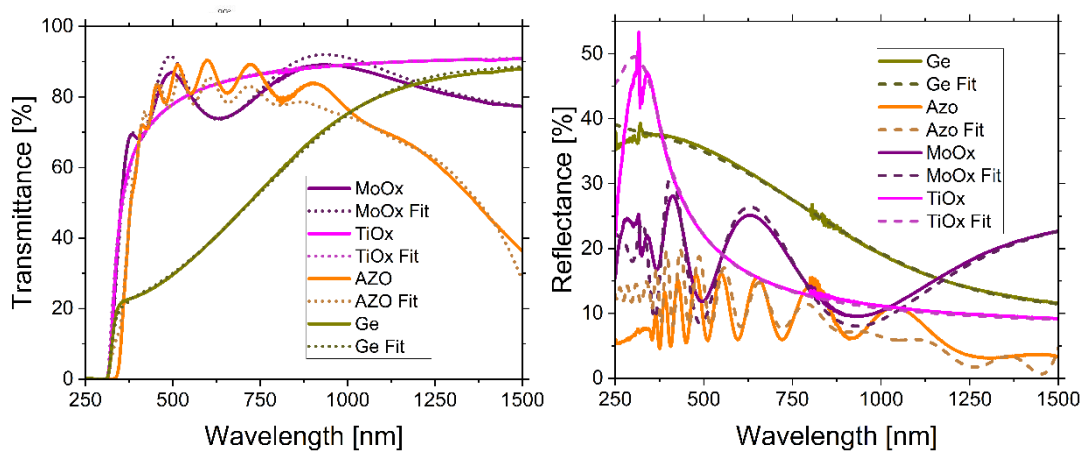


Abbildung 30: Transmissions- und Reflexionsdaten der verwendeten Materialien als durchgezogene Linien. Optischer Fit eines dielektrischen Modells für jedes einzelne Material als durchgezogene Linie.

[18] Weiter lässt sich für eine spezifische Farbe auch nur der Chromaanteil, unabhängig von der Helligkeit definieren: $C^* = C^*_{ab} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$. Bei einem $C^* = 0$, wird eine Farbe farbneutral, beziehungsweise achromatisch (oder weiß oder schwarz) erscheinen. Bei der Frage, welche

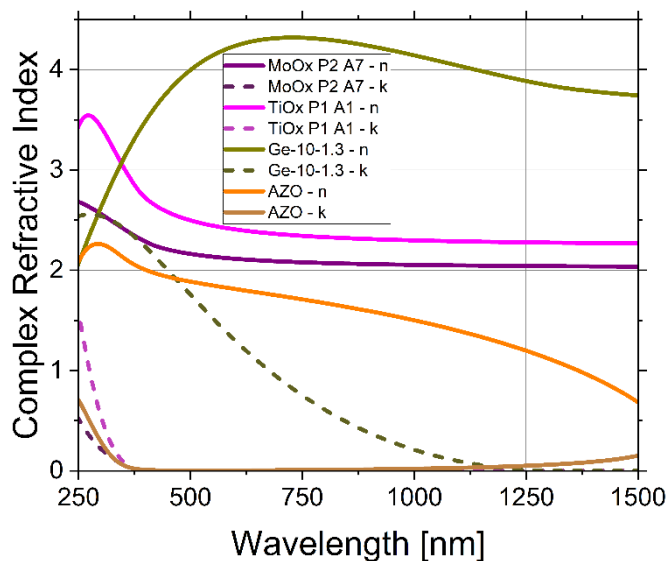


Abbildung 31: Brechungsindex als durchgezogene Linie und Extinktionskoeffizient als gestrichelte Linie der verwendeten Materialien resultierend aus dem optischen Fit der dielektrischen Funktion.

Toleranzen in Bezug auf das Chroma tolerierbar sind, damit ein Beobachter noch einen achromatischen Farbeindruck wahrnimmt, wird eine just-noticeable-difference-Schwelle von $C^* = 2,3$ angegeben. Ein Chroma von $C^* < 1$ kann als quasi unauffällig bezeichnet werden. Weiter wird der Farbwiedergabeindex (CRI) verwendet. Dieser beschreibt, inwieweit ein Lichtspektrum sich in Bezug auf die enthaltenden Spektralfarben von natürlichem Sonnenlicht unterscheidet. Wobei ein Wert von 100 dem natürlichen Sonnenlicht entspricht. Typische LED-Konsumerbeleuchtung erreicht einen Farbwiedergabeindex von mindestens 80. Ab einem Farbwiedergabeindex von 90 wird eine Beleuchtung den meisten Anforderungen, auch im kommerziellen Umfeld genügen. [18]

Für die Modellierung eines Schichtstapels für eine Solarzelle müssen zuerst die verwendeten einzelnen Schichten charakterisiert werden. Die Abbildung 30 zeigt die Transmission und Reflexion von

einzelnen Schichten der verwendeten Materialien. Durch mathematische Anpassungen von dielektrischen Funktionen lässt sich daraus der komplexe Brechungsindex der Materialien extrahieren. Die Abbildung 31 zeigt diesen komplexen Brechungsindex der verwendeten Materialien. Es ist ersichtlich, dass Germanium im Gegensatz zu den anderen Materialien einen hohen Extinktionskoeffizienten aufweist. Das ist passend für seine Funktion als Absorber. Die anderen verwendeten Materialien dagegen absorbieren wenig, womit auch nur wenig Licht an Stellen absorbiert wird, an denen es nicht zur Ladungsträgergenerierung beitragen kann. Weiter weisen MoOx und TiOx sehr ähnliche optische Eigenschaften auf. [18]

Glas	1 mm	L*	78,05
AZO	233.8 nm	a*	0,00
TiOx	4.5 nm	b*	0,00
Ge	5.2 nm	CRI	98,52
MoOx	5.4 nm		
AZO	168.4 nm		

Abbildung 32: Modellierte Solarzelle mit farbneutraler Transmission und Schichtdicken einzelner Schichtdicken auf der linken Seite. Farbwerte des transmittierten Lichts und Farbwiedergabeindex auf der rechten Seite

Daraus wird ein Schichtstapel für eine Solarzelle unter optischen Zielsetzungen modelliert. Dieser muss in Bezug auf das transmittierte Licht möglichst farbneutral, beziehungsweise achromatisch sein. Weiter muss dieser auch eine passende Transmission für den Ersatz als Sonnenschutzverglasung bieten und realistische Schichtdicken für eine funktionale Solarzelle aufweisen. Die Abbildung 32 zeigt den modellierten Schichtstapel, sowie Farbinformationen über das transmittierte Licht. Der Schichtstapel weist eine komplett achromatische Transmission und einen sehr guten Farbwiedergabeindex auf. Weiter sind die Schichtdicken geeignet für eine funktionale Dünnschichtsolarzelle. [18]

Die Abbildung 33 zeigt das transmittierte Licht als Punkt in der CIE-Normfarbtafel, sowie das transmittierte und reflektierte Licht als Spektrum. Dort zeigt sich erneut die farbneutrale Transmission. Weiter lässt sich aus den Transmissionsdaten erkennen, dass in Bezug auf den sichtbaren Bereich des Lichts eine passende Transmission für den Ersatz als Sonnenschutzverglasungersatz vorliegt.

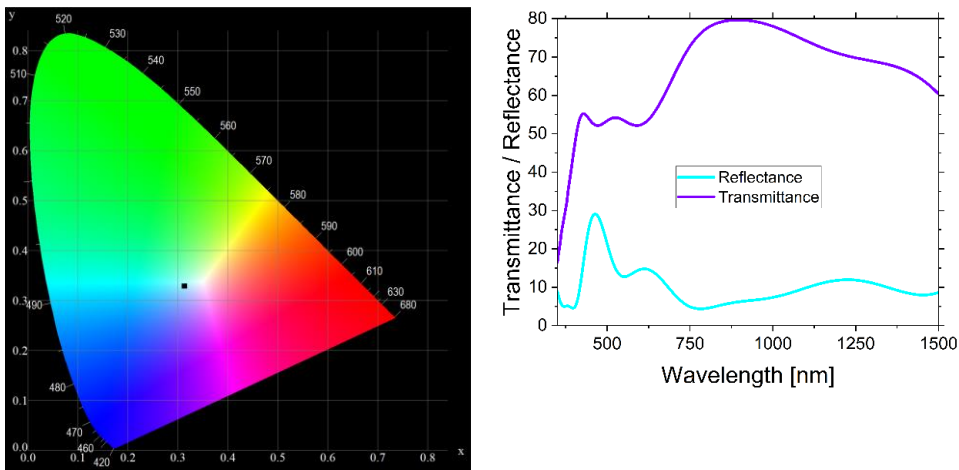


Abbildung 33: Modellierter Farbwert des transmittierten Lichts der farbneutralen Solarzelle in der CIE-Normfarbtabelle auf der linken Seite. Modellierte Transmissions- und Reflexionsdaten der Solarzelle auf der rechten Seite

Die Abbildung 34 zeigt die Transmissionsmessung der Probe. Die durchgezogene violette Linie stellt die modellierte Transmission dar, während die gestrichelte Linie die gemessene Transmission der Probe zeigt. Das gemessene Spektrum stimmt im Allgemeinen gut mit dem modellierten Transmissionsspektrum überein. Abweichungen von bis zu 10 Prozentpunkten treten im sichtbaren Spektralbereich auf, insbesondere um 500 nm. Das transmittierte Licht ist dabei leicht in Richtung Grün und Gelb verschoben. [18]

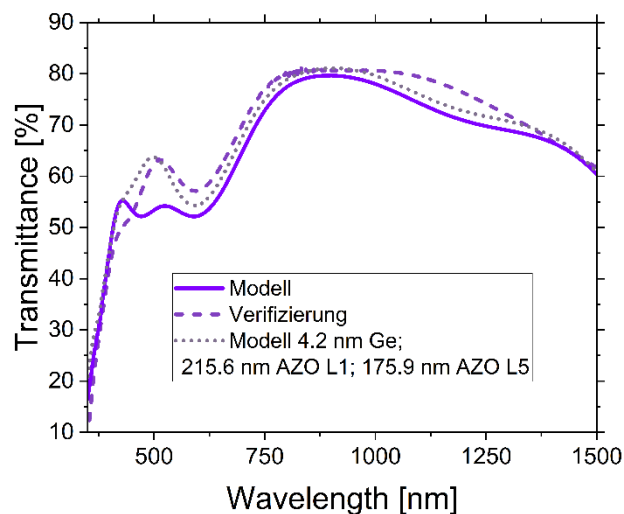


Abbildung 34: Experimentelle Deposition des modellierten Schichtstapels und gemessene Transmission als gestrichelte Linie. Modellvorhersage als durchgezogene Linie. Auf das experimentelle Ergebnis angepasste Modell als gepunktete Linie.

Zur Bestimmung der Ursache dieser Abweichungen wurden die einzelnen Schichtdicken innerhalb des Modells angepasst, sodass das resultierende Spektrum besser mit der Messung übereinstimmt (gepunktete Linie in Abbildung 34). Aus diesem Vorgehen lässt sich schließen, dass die Abweichungen höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen sind, dass die Zielschichtdicken der Germanium- und AZO-Schichten während der Abscheidung nicht mit ausreichender Genauigkeit erreicht werden konnten. Die gepunktete Linie in Abbildung 34 zeigt die modellierte Transmission eines Schichtstapels mit angepassten Schichtdicken. Dabei wurde die Dicke der oberen AZO-Schicht um 18,2 nm reduziert, die der Germaniumschicht um 1,0 nm verringert und die der unteren AZO-Schicht um 7,5 nm erhöht. Das angepasste Modell reduziert die maximale Abweichung auf etwa 3

Prozentpunkte relativ zu den Messdaten. Das Modell bildet die Realität gut ab und kann für weitere Untersuchungen im Folgenden verwendet werden. [18]

Die Abbildung 35 zeigt ein Foto des experimentellen Schichtstapels. In Bezug auf den visuellen Eindruck erscheinen Objekte hinter der Probe farbneutral. Das transmittierte Licht weist einen Chromawert von $C^* = 7,4$ auf. [18]



Abbildung 35: Foto des experimentellen Schichtstapels auf einem quadratischem Glassubstrat mit einer Kantenlänge von 10 cm.

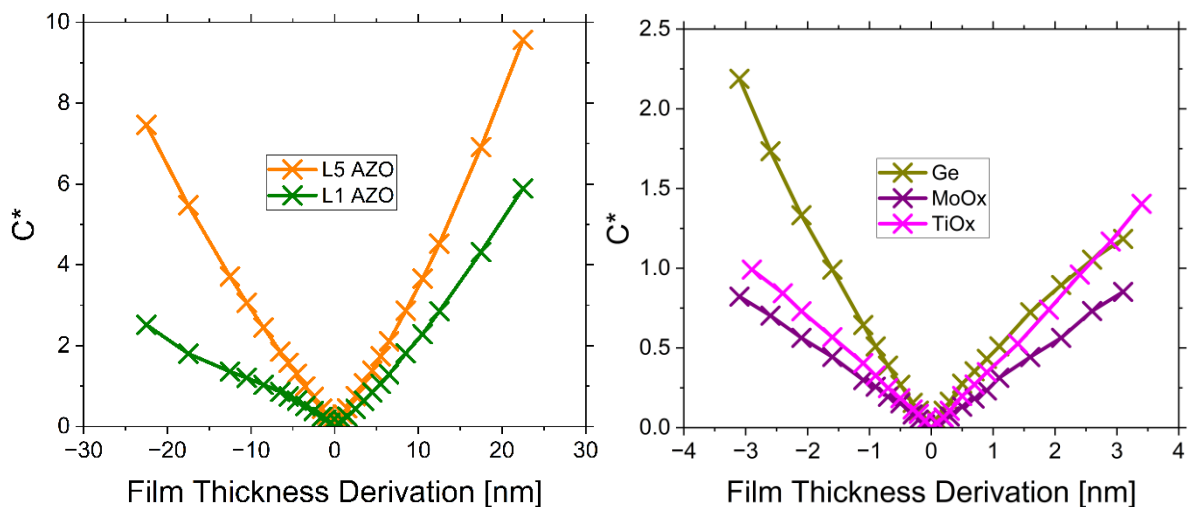


Abbildung 36 Chroma beziehungsweise Chromaänderung der Transmission bei Änderung einer einzelnen Schicht des Solarzellenschichtstapels mit absoluten Änderungen der Schichtdicke.

Die Farbneutralität des transmittierten Lichts ist eine zentrale Voraussetzung für den Ersatz der Sonnenschutzbeschichtungen. Daher zeigt Abbildung 36 das Chroma C^* sowie den Farbwiedergabeindex (CRI) des transmittierten Lichts in Abhängigkeit davon, wie stark die Dicke einer einzelnen Schicht von der Referenzdicke abweicht. [18]

Dieselbe absolute Änderung der Schichtdicke in unterschiedlichen Schichten beeinflusst Chroma und CRI in unterschiedlichem Ausmaß. Für das Chroma ist der Zusammenhang mit der Schichtdickenänderung für alle Schichten nahezu linear. Die Steigung der Kurve stellt die Empfindlichkeit des Chroma gegenüber Dickenänderungen der jeweiligen Schicht dar. Negative Dickenänderungen der Germaniumschicht haben den stärksten Einfluss. [18]

Die Abbildung 38 stellt den Einfluss auf das Chroma bei relativen Abweichungen von einzelnen Schichten dar. Relative Änderungen stellen konstante Abweichungen in der Produktion eventuell

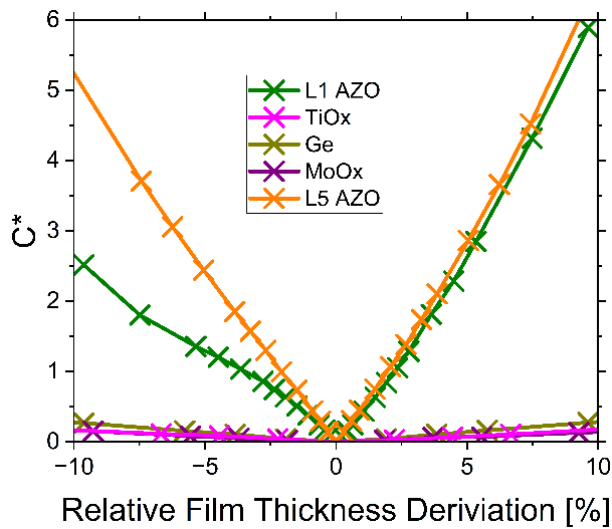


Abbildung 38 Chroma, beziehungsweise Chromaänderung der Transmission bei Änderung einer einzelnen Schicht des Solarzellenschichtstapels mit relativen Änderungen der Schichtdicke.

besser dar. In dieser Darstellung weisen die AZO-Schichten den größten Einfluss auf. Das ist bedingt durch Interferenz in diesen Schichten. [18]

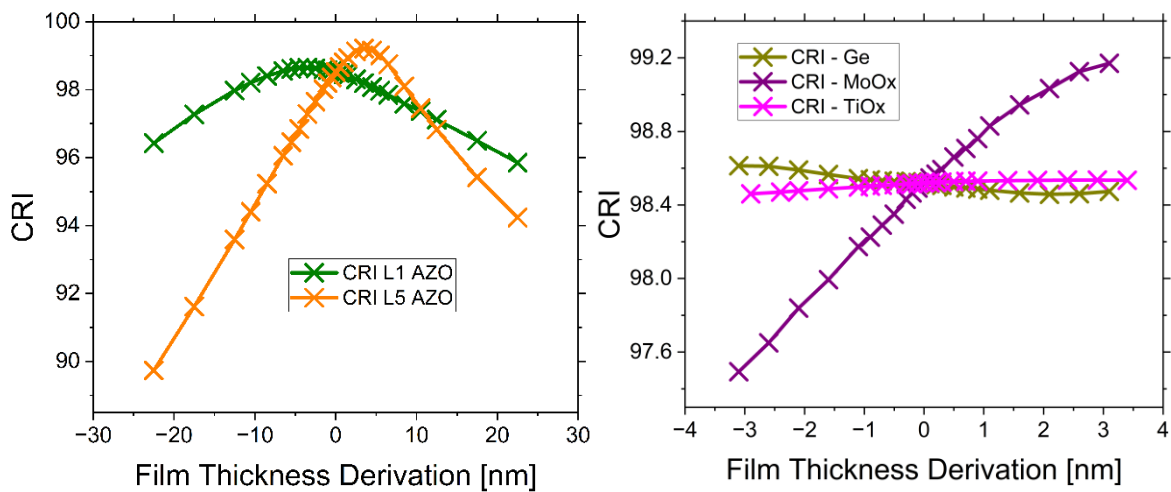


Abbildung 37 Farbwiedergabeindex der Transmission bei Änderung einer einzelnen Schicht des Solarzellenschichtstapels mit absoluten Änderungen der Schichtdicke

Über alle untersuchten Bedingungen hinweg fällt der Farbwiedergabeindex (CRI) in der Abbildung 37 zu keinem Zeitpunkt signifikant unter 90. Somit stellt ein unzureichender CRI selbst bei Abweichungen der einzelnen Schichtdicken kein Problem für potenzielle Anwendungen dar. Auffällig ist, dass der CRI sowohl für beide AZO-Schichten als auch für die MoOx-Schicht ein Maximum aufweist, wobei dieses Maximum nicht mit dem Punkt der Farbneutralität zusammenfällt. Im Gegensatz dazu haben Änderungen der Dicke der Germanium- und TiOx-Schichten nahezu keinen Einfluss auf den CRI. Dies ist überraschend angesichts der sehr ähnlichen komplexen Brechungsindizes von MoOx und TiOx. Dennoch wirken sich Dickenvariationen bei diesen beiden Materialien deutlich unterschiedlich auf den CRI aus. [18]

Für eine industrielle Produktion ist es nicht ausreichend, Abweichungen der Schichtdicke nur für eine einzelne Schicht isoliert zu betrachten. Vielmehr können mehrere Schichten gleichzeitig von ihren Zielschichtdicken abweichen. Zur Untersuchung dieses Falls zeigt Abbildung 39 Falschfarb-Skalarfeldplots des Chroma C* des transmittierten Lichts (in a) und c)) sowie des Farbwiedergabeindex (in b) und d)) als Funktion gleichzeitiger Abweichungen der Schichtdicken von TiOx und Germanium (in a) und b)) sowie von TiOx und MoOx (in c) und d)). [18]

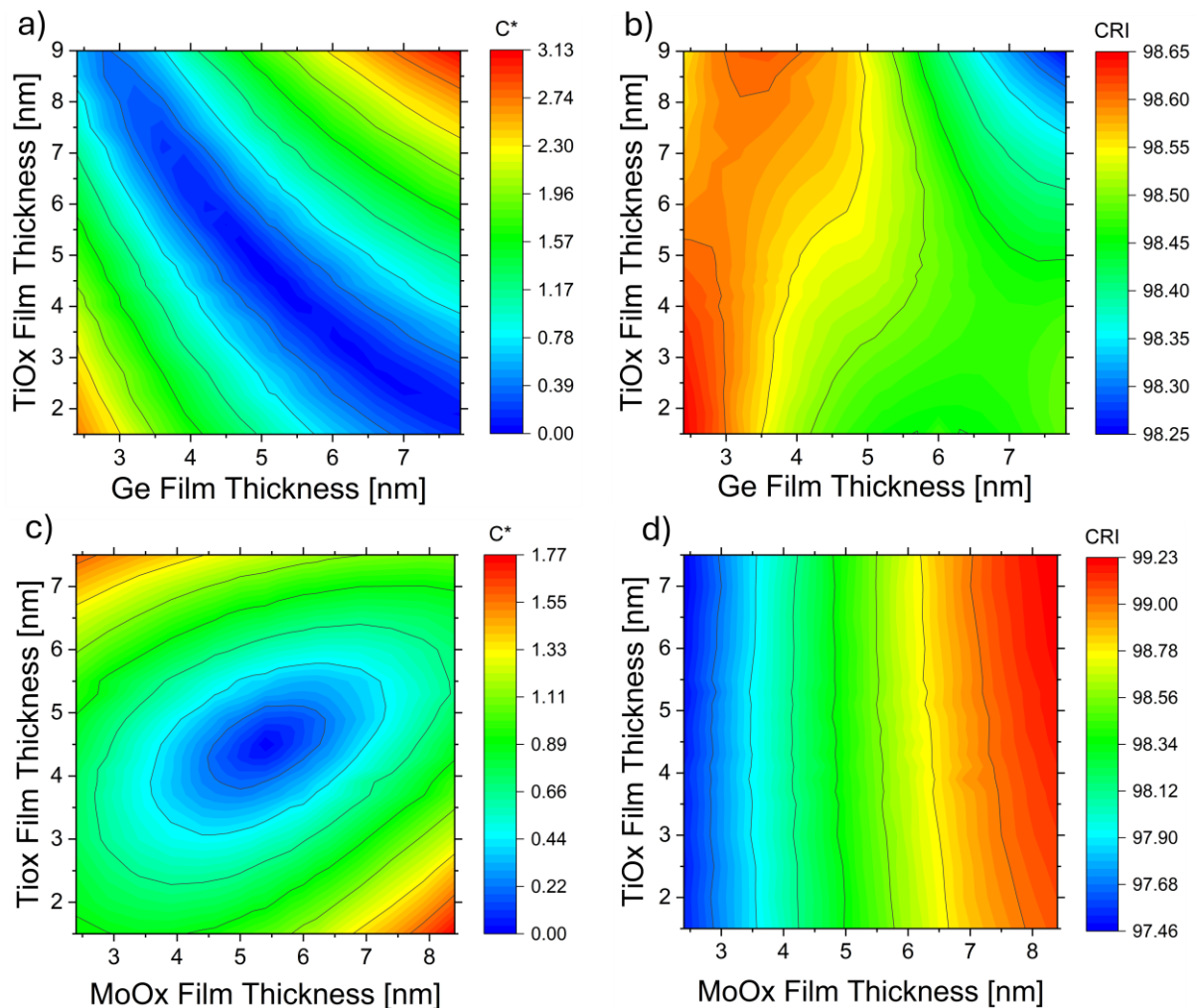


Abbildung 39 Chromazität in a) und c) und Farbwiedergabeindex in b) und d). Jeweils als Falschfarbenskalarfeldplot für die Dickenänderung von TiOx und Ge in a) und b) und TiOx und MoOx in c) und d) und jeweils mit eingezeichneten Isolinien.

Abbildung 39 a) zeigt einen gekrümmten Bereich, in dem eine geringe Chroma erreicht wird. Innerhalb dieses Bereichs der TiO_x- und Germanium-Abweichungen kompensieren sich die chromatischen Verschiebungen, sodass eine nahezu farbneutrale Transmission resultiert. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 39 c) einen ovalförmigen Bereich geringen Chromas, wobei Abweichungen der TiO_x- oder MoO_x-Schicht von der optimalen Dicke das Chroma erhöhen und eine gegenseitige Kompensation nicht möglich ist. Die Hauptachse dieses Ovals verläuft von unten links nach oben rechts, was darauf hinweist, dass bei gegebenen Abweichungen ein geringeres Chroma erzielt wird, wenn das Dickenverhältnis von TiO_x zu MoO_x beibehalten wird. Angesichts der ähnlichen komplexen Brechungsindizes von TiO_x und MoO_x im sichtbaren Spektralbereich hätte erwartet werden können, dass die Beibehaltung der Gesamtschichtdicke das Chroma besser erhält als die Beibehaltung seines Dickenverhältnisses; tatsächlich wird jedoch das Gegenteil beobachtet. [18]

Abbildung 39 b) zeigt den CRI in Abhängigkeit von Abweichungen der TiO_x- und Germanium-Schichtdicken. Die Gesamtvariation beträgt lediglich 0,4, wobei alle Werte oberhalb von 98 liegen, was auf keinen praktisch relevanten Einfluss hinweist. Abbildung 39 d) zeigt den CRI in Abhängigkeit von Abweichungen der TiO_x- und MoO_x-Schichtdicken. Der CRI ist weitgehend unempfindlich gegenüber Änderungen der TiO_x-Dicke, während eine Reduktion der MoO_x-Dicke den CRI leicht verringert; dennoch bleibt der CRI im gesamten untersuchten Bereich über 97. [18]

Insgesamt zeigen Chroma und CRI bei gleichzeitigen Abweichungen mehrerer Schichtdicken ein gekoppeltes Verhalten: Abhängig von der Kombination können sich Abweichungen kompensieren, teilweise ausgleichen oder gegenseitig verstärken. Für die untersuchten Abweichungen erweist sich der CRI als relativ robust gegenüber Dickenvariationen und bleibt bei kleinen Abweichungen voraussichtlich oberhalb von 95, sodass keine sichtbare Beeinträchtigung zu erwarten ist. [18]

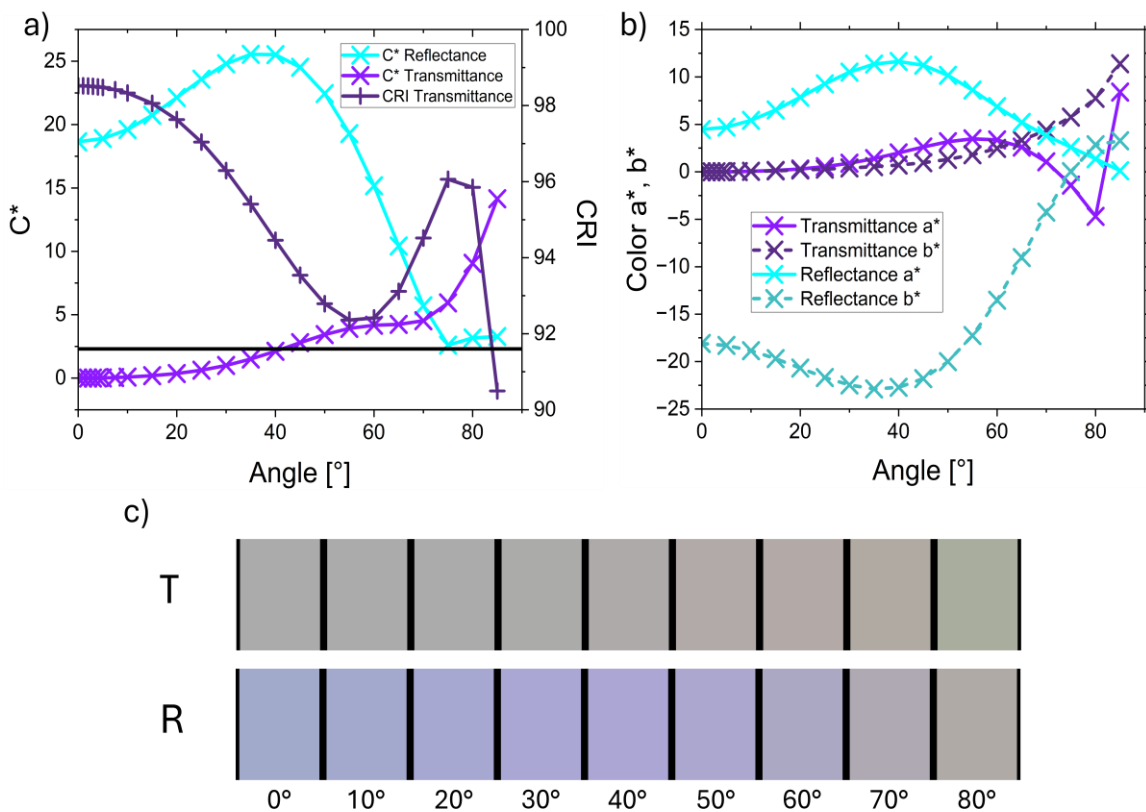


Abbildung 40 Chroma, beziehungsweise Chromaänderung, Farbwert und Farbwiedergabeindex der Transmission und Reflexion unter verschiedenen Winkeln in a) und b). Echtfarbdarstellung der Transmission und Reflexion unter verschiedenen Winkeln in c).

Für Fensteranwendungen muss das winkelabhängige Chroma in Transmission und Reflexion berücksichtigt werden. An Gebäuden trifft nur ein kleiner Anteil des einfallenden Lichts senkrecht auf die Oberfläche, und mit der Bewegung der Sonne muss die Transmission über einen weiten Bereich von Einfallswinkeln hinweg funktionieren. Zur Bewertung der Farbneutralität im Innenraum ist daher das Chroma des transmittierten Lichts als Funktion des Einfallswinkels zu untersuchen. Ebenso nimmt ein externer Beobachter die winkelabhängige Farbe des reflektierten Lichts in Abhängigkeit von der Blickrichtung wahr. [18]

Zur Untersuchung dieses Verhaltens zeigt Abbildung 40 a) das Chroma des reflektierten und transmittierten Lichts sowie den Farbwiedergabeindex des transmittierten Lichts in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, wobei 0° einem senkrechten Lichteinfall entspricht. Abbildung 40 b) zeigt die a^* - und b^* -Werte für Reflexion und Transmission in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, und Abbildung 40 c) stellt Farbdarstellungen des transmittierten und reflektierten Lichts bei verschiedenen Winkeln für ein festes $L^* = 70$ dar. [18]

Das Chroma des transmittierten Lichts bleibt bis zu einem Einfallswinkel von etwa 41° unterhalb der Schwelle der gerade noch wahrnehmbaren Farbabweichung und überschreitet diese selbst bei Winkeln bis 70° nur geringfügig. Somit ist das transmittierte Licht für die meisten praxisrelevanten Einfallswinkel ausreichend farbneutral. Für die Transmission zeigt Abbildung 40 b), dass a^* und b^* von 0 bis auf etwa 2,5 bei Winkeln bis 60° ansteigen, was einer Verschiebung von neutralen Farbtönen hin zu einem leicht warmen, orangefarbenen Ton entspricht und den Großteil der relevanten Einfallswinkel abdeckt. Bei steileren Winkeln sinkt a^* bei 80° auf -5 , während b^* auf 8 ansteigt, was bedeutet, dass der Rotanteil abnimmt und der Gelbanteil zunimmt. Abbildung 40 c) veranschaulicht

dieses Verhalten. Die Transmission erscheint bis etwa 40° bis 50° im Wesentlichen neutral, bei größeren Winkeln leicht gelblich/orange und bei 80° leicht grünlich. [18]

Über den gesamten untersuchten Einfallswinkelbereich hinweg bleibt der Farbwiedergabeindex des transmittierten Lichts hoch und erreicht bei etwa 60° ein Minimum von ungefähr 92; alle übrigen simulierten Punkte liegen oberhalb von 90. Der CRI ist somit unabhängig vom Einfallswinkel durchgehend sehr gut. Im Gegensatz dazu variiert das Chroma des reflektierten Lichts deutlich mit dem Winkel. Bis zu einem Einfallswinkel von etwa 40° steigt es leicht von rund 17 auf 25 an und fällt anschließend für größere Winkel bis 70° auf etwa 2,5 ab. Infolgedessen können winkelabhängige Farbstiche in der Reflexion sichtbar werden, insbesondere wenn mehrere Winkel gleichzeitig betrachtet werden. [18]

Zur Charakterisierung der reflektierten Farbe zeigt Abbildung 40 b) die a^* - und b^* -Werte. Für kleine Winkel bis 40° steigt a^* von 5 auf 10 an, während b^* von -17 auf -25 abfällt, was auf eine blaudominierte Farbgebung mit einer leichten warmen (rötlichen) Komponente hinweist. Bei größeren Winkeln nähern sich sowohl a^* als auch b^* bei 80° dem Nullwert an, sodass die Reflexion zunehmend achromatisch bzw. grau erscheint. Abbildung 40 c) bestätigt dies visuell: Bis etwa 50° oder 60° ist ein leichter Blaustich erkennbar, bei steileren Winkeln wird das Erscheinungsbild neutraler. [18]

Dieses Verhalten ist für Gebäudeanwendungen gut geeignet, da eine nahezu neutrale Reflexion bevorzugt wird und ein leichter Blaustich allgemein als akzeptabel gilt. Wichtig ist zudem, dass keine abrupten Farbverschiebungen bei kleinen Winkeländerungen auftreten, wodurch fleckige Farbzonen auf der Fassade vermieden werden. [18]

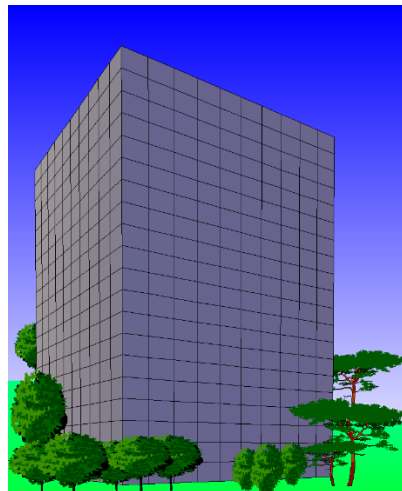


Abbildung 41 Modellerte Darstellung eines Gebäudes unter verschiedenen Winkeln, welches mit der farbneutralen Photovoltaik ausgestattet ist.

Reflektierte Farben lassen sich anschaulich durch eine grafische Darstellung vermitteln. Abbildung 41 zeigt eine simulierte Ansicht eines Gebäudes, dessen Fassade vollständig mit der vorgeschlagenen transparenten Photovoltaik verkleidet ist. Diese Fassadenvisualisierung stellt mehrere Fassadensegmente gleichzeitig bei unterschiedlichen Betrachtungs- und Einfallswinkeln dar. Die reflektierte Farbe wird unter Berücksichtigung der korrekten Winkelabhängigkeit berechnet, und das Rendering reproduziert das zuvor abgeleitete Verhalten. Es sind keine ausgeprägten Farbverschiebungen erkennbar, und die Fassade erscheint homogen, was die praktische Anwendbarkeit unterstützt. [18]

Die Frontansicht, die nahezu bei senkrechtem Lichteinfall betrachtet wird, weist einen leichten Blaustich auf, während die linke Gebäudeseite, die unter steileren Winkeln gesehen wird, deutlich grauer und neutraler erscheint. Diese visuellen Eindrücke stimmen mit den in Abbildung 40 diskutierten winkelabhängigen Trends überein. [18]

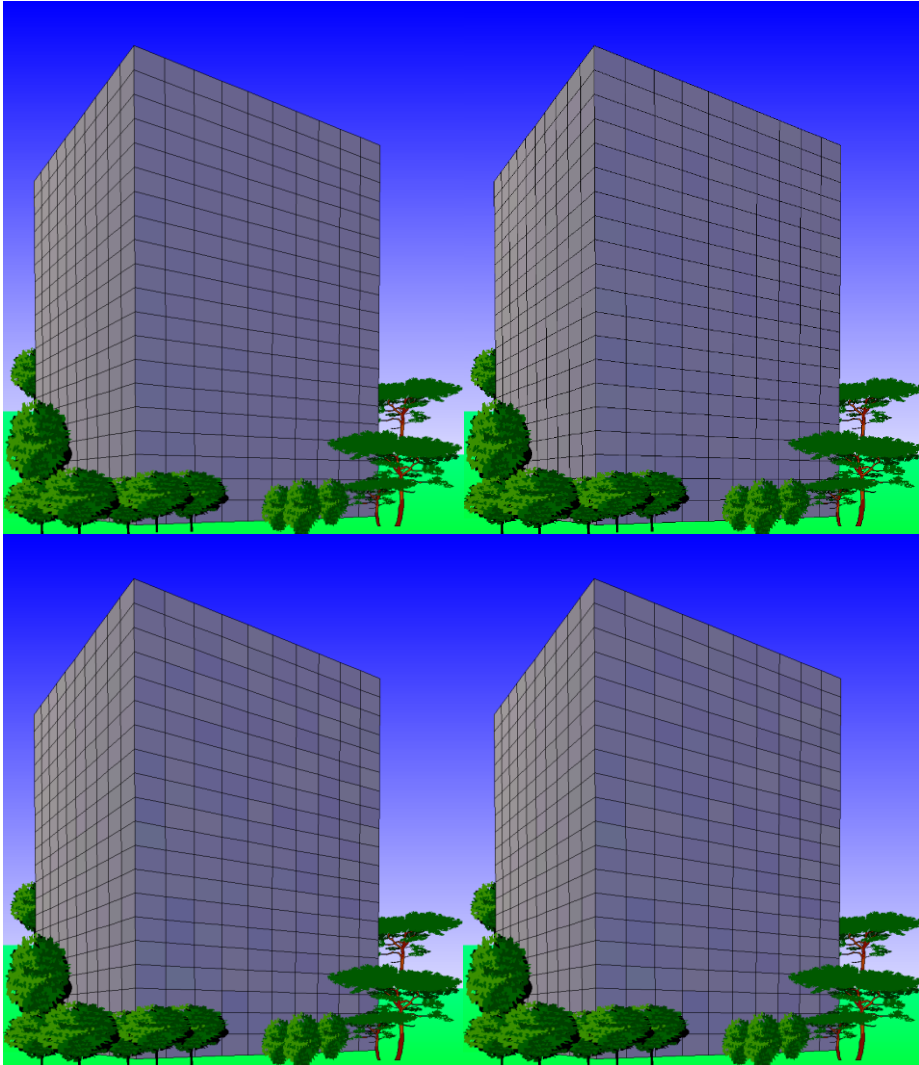


Abbildung 42 Modellerte Darstellungen eines Gebäudes unter verschiedenen Winkeln, welches mit der farbneutralen Photovoltaik ausgestattet ist. Die Schichtdicke jeder einzelnen Schicht unterliegt unabhängig voneinander zufälligen, relativen, gleichverteilten Abweichungen von 1% (oben links), 2% (oben rechts), 3% (unten links) und 5% (unten rechts).

Abschließend veranschaulicht Abbildung 42 den Einfluss gleichzeitiger Abweichungen mehrerer Schichten auf das Erscheinungsbild der Reflexion. Analog zu Abbildung 41 zeigt sie optische Renderings eines Hochhauses mit mehreren transparenten photovoltaischen Fassadenelementen. Für jede Schicht des Schichtstapels werden unabhängige, gleichverteilte, zufällige Abweichungen angesetzt: $\pm 1\%$ (Abbildung 42 a)), $\pm 2\%$ (Abbildung 42 b)), $\pm 3\%$ (Abbildung 42 c)) und $\pm 4\%$ (Abbildung 42 d)). [18]

Bei steilen Betrachtungswinkeln (linke Gebäudeseite) sind keine sichtbaren Effekte zu erkennen; die Fassade bleibt in allen Fällen von Abbildung 42 a) bis d) gleichmäßig grau, ohne wahrnehmbare Unterschiede zwischen den einzelnen Elementen. Die Frontansicht, die unter flacheren Winkeln betrachtet wird, zeigt in Abbildung 42 a) ebenfalls keine Farbunterschiede. Im Gegensatz dazu weist Abbildung 42 d) ausgeprägte Unterschiede zwischen den einzelnen Elementen auf, wodurch ein

schachbrettartiges Erscheinungsbild entsteht. Abbildung 42 c) zeigt ähnliche, jedoch etwas weniger ausgeprägte Variationen, während Abbildung 42 b) lediglich minimale, kaum sichtbare Unterschiede aufweist und nahezu homogen erscheint. [18]

Für praktische Anwendungen sind die in Abbildung 42 c) und d) sichtbaren Unterschiede nicht akzeptabel, während die fehlende Sichtbarkeit von Unterschieden in Abbildung 42 a) unproblematisch ist. Die kaum wahrnehmbaren Unterschiede in Abbildung 42 b) scheinen die Akzeptanzgrenze zu markieren. Um sichtbare äußere Farbunterschiede zu vermeiden, sollten zufällige Abweichungen der Schichtdicken pro Schicht knapp unter $\pm 2\%$ gehalten werden. Dies steht im Einklang mit den Spezifikationen für konventionelles Sonnenschutzglas. [18]

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Wirtschaftlichkeit der PV-Sonnenschutzverglasung und klärt unter anderem, welcher Wirkungsgrad für unterschiedliche Anwendungsfelder wie Fassadenfenster, Dachfenster und sonstige Verglasungen erreicht werden muss, um eine monetäre und energetisch positive Bilanz zu erreichen.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stellt klassischerweise die Kosten einer Technologie dem Nutzen gegenüber. Im Folgenden sollen die zusätzlichen Kosten im Vergleich zu denen einer klassischen Fassade abgeschätzt werden und der Nutzen der Technologie dargestellt werden.

Kosten einer PV-Sonnenschutzfassade im Vergleich zu einer klassischen Fassade

Da die Technologie der PV-Sonnenschutzverglasung vor allem klassische Sonnenschutzfassaden ersetzen bzw. teilweise ersetzen soll, sollten die Kosten der PV-Funktionalität als zusätzliche Kosten den Kosten der klassischen Fassade gegenübergestellt werden. Dazu zwei Beispiele aus der Welt der Glasfassaden.



Abbildung 43: Montage einer vorgehängten Glasfassade,
Quelle: HASKAMP GmbH & Co. KG

In Abbildung 43 ist eine vorgehängte Glasfassade im Aufbau zu sehen. Diese Fassadenelemente bilden die äußere Haut des Gebäudes und dienen vor allem dem Wetterschutz. Die Elemente können über mehrere Stockwerke reichen und viele Quadratmeter überdecken. Die Elemente werden vorgefertigt angeliefert und auf der Baustelle durch Fachleute montiert. Eine zweite Ebene, die evtl. sogar lastabtragend ausgeführt ist und ebenfalls Verglasungselemente enthält, wird geschossweise vorher oder von innen installiert. Die Sonnen- bzw. Hitzeschutzfunktionalität wird in der äußeren vorgehängten Fassade realisiert.

Die Abbildung 44 zeigt die Montage eines integralen Fassadenmoduls. Hier sind die äußere Wetterschutzverglasung und die innere Verglasung bereits in einem geschosshohen Element zusammengefasst. Diese Elemente enthalten manchmal auch schon Teile der TGA, wie z.B. Lüftung und Heizung. Die Sonnen- bzw. Hitzeschutzfunktionalität ist wie bei der vorgehängten Fassade in der äußeren Glas-Ebene realisiert.



Abbildung 44: Montage einer integralen Fassadenelements, Quelle: HASKAMP GmbH & Co. KG

Diese beiden Beispiele sollen zeigen, dass Glasfassaden aus komplexen Elementen aufgebaut werden und daher einen bedeutenden Anteil zu den Gesamtkosten eines entsprechenden Gebäudes beitragen. Bei der PV-Sonnenschutzverglasung kommt zu diesen bereits bestehenden Kosten nur ein vergleichsweise geringer Aufschlag hinzu. Die zusätzlichen Kosten setzen sich zusammen aus den Kosten der Solar-Beschichtung (die Kosten der wegfallenden Schichten bleiben hier unberücksichtigt), den Kosten für eine Zellstreifen-Strukturierung und Kontaktierung sowie Kosten für Verkabelung und Leistungselektronik.

Kosten Solar-Beschichtung

Die Kosten „bottom-up“ abzuschätzen macht an dieser Stelle wenig Sinn, da bei allen Großtechnischen Anlagen die Grenzkosten vor allem von der Auslastung einer Produktionslinie abhängen und sich somit einer exakten technisch-physikalischen Beschreibung entziehen. Was an dieser Stelle möglich und sinnvoll erscheint, ist eine untere Schranke abzuschätzen, indem die bekannten Kosten gängiger Glasbeschichtungen als Vergleich herangezogen werden. Die am weitesten verbreitete Beschichtung im

Bereich der Architekturverglasung ist die „low-e“ Wärmeschutzbeschichtung, wie sie in allen modernen Verglasungen auf ein oder zwei Scheiben pro Fenster vorkommt. Diese Beschichtung besteht aus einem Schichtstapel mit einer Reihe von Materialschichten, wobei eine wenige Nanometer dünne Silberschicht dabei die Funktionalität ausbildet. Sie ist umgeben von Träger- und Schutzschichten, sowie Schichten zur spektralen Anpassung der optischen Eigenschaften. Durch die extrem produktive Serienfertigung mittels In-line-Sputteranlagen und der sehr geringen Silberschichtdicke, konnten für die low-e-Beschichtung Kosten von ca. 2-3 €/m² erreicht werden. Ähnlich niedrige Kosten können für den in diesem Projekt entwickelten Schichtstapel angenommen werden. Die Germaniumschicht ist ebenso nur wenige Nanometer dick, die weiteren Schichten bestehen aus kostengünstigen Metalloxiden und die Zelle wird in ihrer finalen Variante auf den großtechnischen In-line-Sputteranlagen hergestellt.

Kosten Zellstreifen-Strukturierung und Kontaktierung

Um den von der Solarbeschichtung generierten Strom nutzen zu können, wird es nötig sein, Glassubstrate mit transparenten Metalloxydelektroden zu nutzen. Dabei ist Aluminium dotiertes Zinkoxid ein weit verbreiteter Standard und Gläser werden großtechnisch mit nasschemischen Prozessen beschichtet. Zudem müssen Zellstreifen mit Laser-Verfahren strukturiert und monolithisch verschaltet werden, so dass die Spannung pro Modul eine entsprechende Größe erreicht und die Verluste durch Serienwiderstände minimiert werden. Diese Prozesse sind für die gängigen Dünnschicht-PV-Module (a-Si, CIGS und CdTe) sehr weit entwickelt und großtechnisch eingesetzt worden, so dass an dieser Stelle auch eine untere Schranke der Grenzkosten aufgrund der früheren Modulkosten abgeschätzt werden kann.

Kosten Einbindung Hausenergiesystem

Die Kosten der Einbindung in ein Hausenergiesystem umfassen vor allem die Kosten der Verkabelung der Module und die Kosten für die Leistungselektronik. Je nach Auslegung der Fassade können evtl. Kabel genutzt werden, die für Lüftung und Sensorik vorhanden sind. Ansonsten sollte angenommen werden, dass sich die Kosten analog zu opaken PV-Installationen verhalten.

Ertragsprognose

Der Solarertrag einer Anlage bestehend aus Dachfenstern und der einer Fassadenanlage unterscheidet sich in erster Linie aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung der PV-Verglasung. Bei Dachfenstern und Skylights ist die PV-Verglasung horizontal bzw. evtl. leicht geneigt ausgerichtet. Bei der Fassade ist die PV-Verglasung horizontal ausgerichtet und, je nach Fassade, in eine Himmelsrichtung orientiert. Im Folgenden ist der Ertrag mit dem Modellierungstool PVGIS für zwei Standorte, Frankfurt am Main (F) und Barcelona (B) jeweils für die horizontale Ausrichtung und für die vertikale Ausrichtung mit den vier Orientierungen Süd, West, Ost und Nord gezeigt. Die Erträge sind jeweils mit blauen Balken als Monatssummen in Kilowattstunden für eine Anlagengröße von einem Kilowatt dargestellt was der üblichen Angabe in kWh/kW_p entspricht. In orangefarbenen Balken ist zudem jeweils die gesamte solare Einstrahlung pro Quadratmeter auf die Fläche mit entsprechender Ausrichtung dargestellt.

Frankfurt am Main

Für Frankfurt am Main ist der Ertrag der horizontalen Ausrichtung in Abbildung 45 dargestellt. In Bezug auf die untersuchten Richtungen ist hier der größte solare Gesamtertrag zu erwarten. Im Jahresverlauf ist mit den größten Monatssummen in den Sommermonaten um die Sommersonnenwende zu rechnen. In den Wintermonaten rund um die Wintersonnenwende ist der Ertrag wie zu erwarten deutlich geringer.

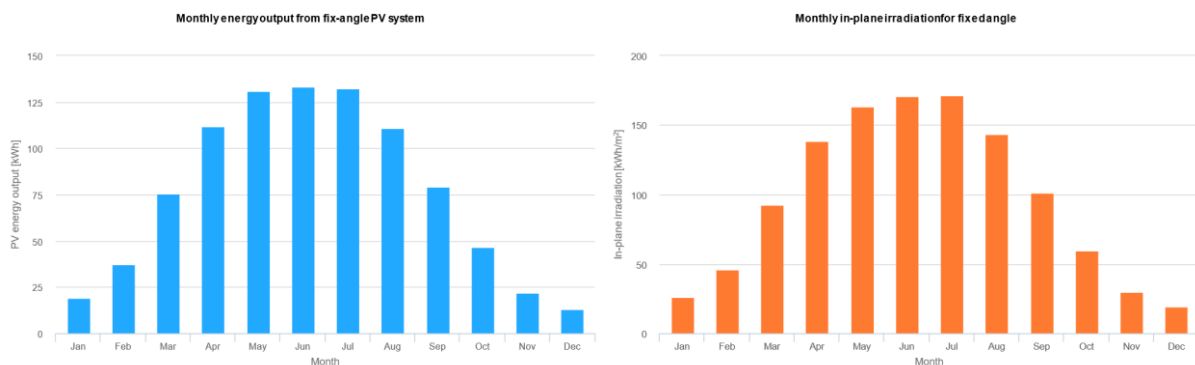


Abbildung 45: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_p pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für horizontal ausgerichtete Photovoltaik in Frankfurt am Main.

Der Ertrag der vertikalen Ausrichtung mit der Orientierung Süd ist in Abbildung 47 dargestellt. Im Vergleich zur horizontalen Ausrichtung ergibt sich ein anderes Bild. Der Jahresertrag ist auch hier groß, verteilt sich jedoch deutlich anders auf die Monate. Über das Jahr gesehen ergibt sich ein relativ ausgeglichener solarer Ertrag. Dies ist durch die sehr steil einfallende Sonne im Sommer und den deutlich frontaleren Einfall in den Wintermonaten zu verstehen. Dadurch wird der ansonsten übliche jahreszeitliche Verlauf ausgeglichen. Dennoch sind etwas größere Monatserträge im Bereich der Äquinoktien zu erwarten.

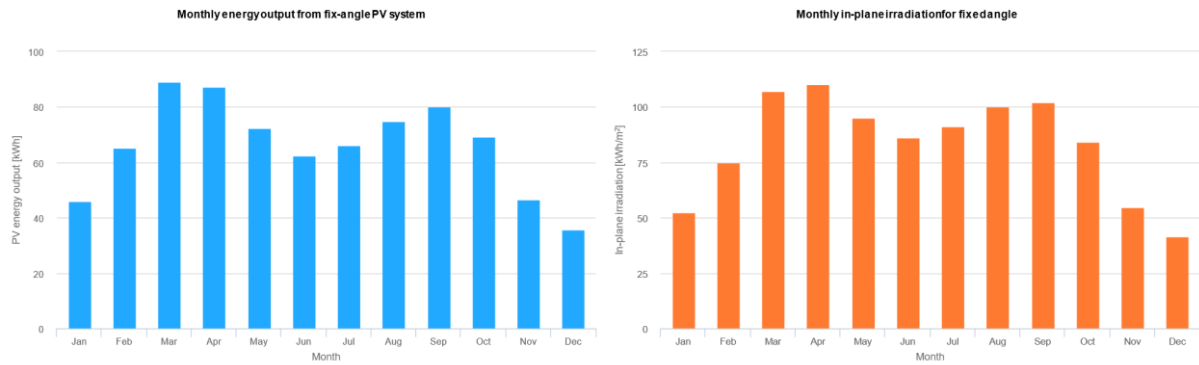


Abbildung 47: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_P pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für vertikale Photovoltaik mit südlicher Ausrichtung in Frankfurt am Main.

Der Ertrag der vertikalen Ausrichtung mit der Orientierung West ist in Abbildung 46 dargestellt. Hier ergibt sich ein ähnlicher Jahresverlauf wie bei horizontaler Orientierung der Photovoltaik, mit einem ausgeprägten Minderertrag in den Wintermonaten und den größten Monatserträgen im Bereich der Sommersonnenwende. Der Gesamtertrag für diese Orientierung beträgt ca. 55% des Ertrags einer horizontalen Montage.

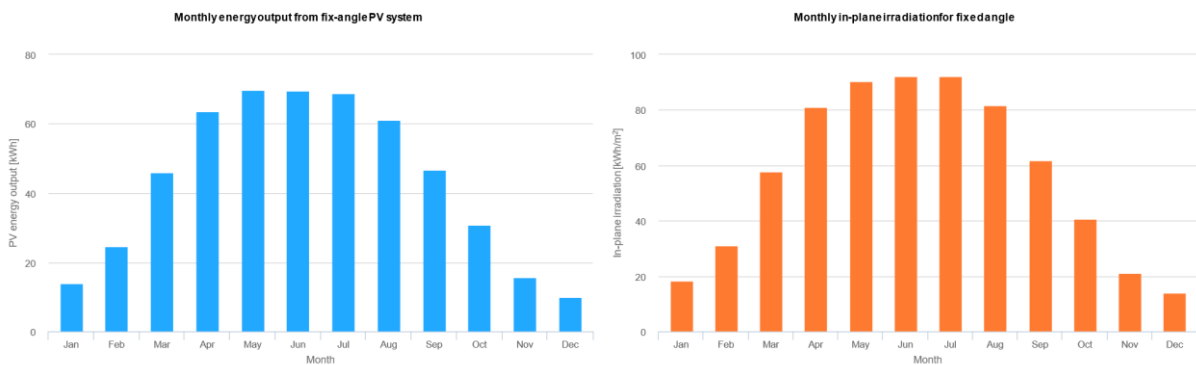


Abbildung 46: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_P pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für vertikale Photovoltaik mit westlicher Ausrichtung in Frankfurt am Main.

Der Ertrag der vertikalen Ausrichtung mit der Orientierung Ost ist in Abbildung 48 dargestellt. Hier ergibt sich ein ähnlicher Jahresverlauf wie bei der westlichen Orientierung mit jedoch leicht geringeren solaren Erträgen.

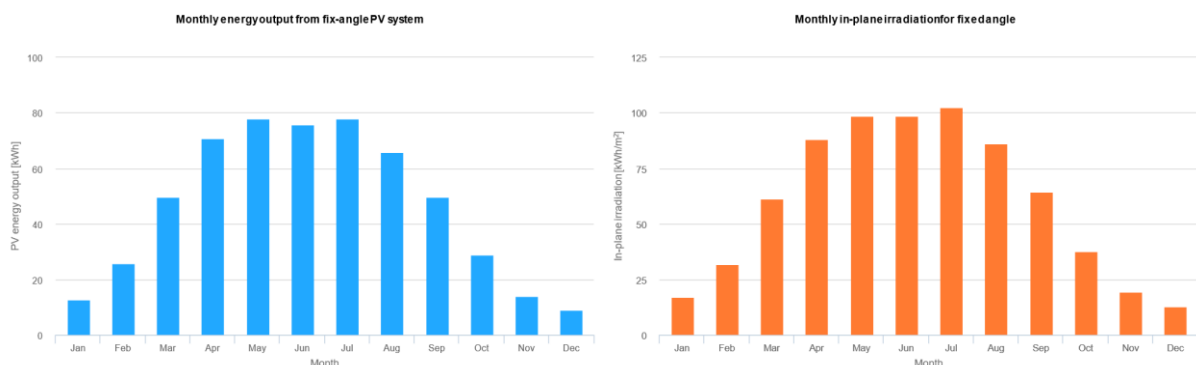


Abbildung 48: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_P pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für vertikale Photovoltaik mit östlicher Ausrichtung in Frankfurt am Main.

Der Ertrag der vertikalen Ausrichtung mit der Orientierung Nord ist in Abbildung 49 dargestellt. Hier ist der solare Ertrag im Vergleich zu einer horizontalen oder südlich ausgerichteten vertikalen Montage drastisch reduziert. Der größte Ertrag ist im Bereich der Sommersonnenwende zu erwarten.

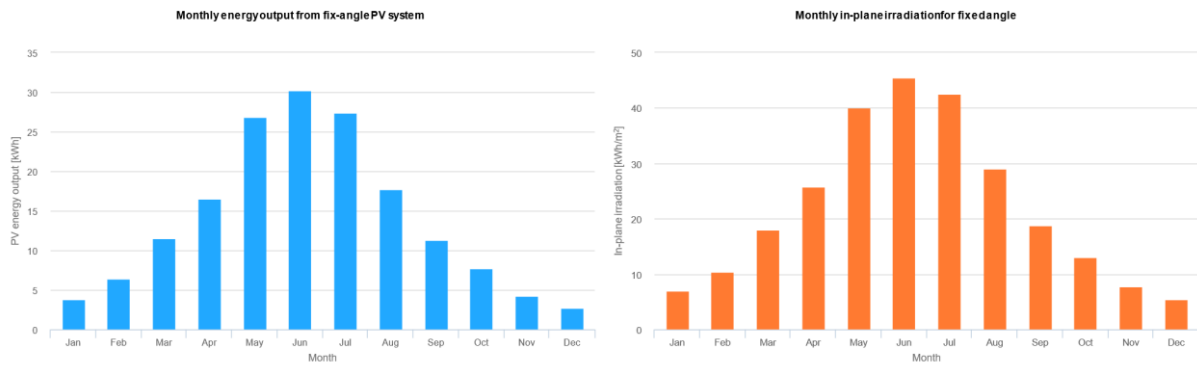


Abbildung 49: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_p pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für vertikale Photovoltaik mit nördlicher Ausrichtung in Frankfurt am Main.

Barcelona

Für Barcelona ist der Ertrag der horizontalen Ausrichtung in Abbildung 50 dargestellt. Aufgrund der südlicheren Lage ist im Gegensatz zu Frankfurt ein schwächer ausgeprägter jahreszeitlicher Verlauf zu erkennen. Insgesamt ist mit einem größeren Ertrag zu rechnen.

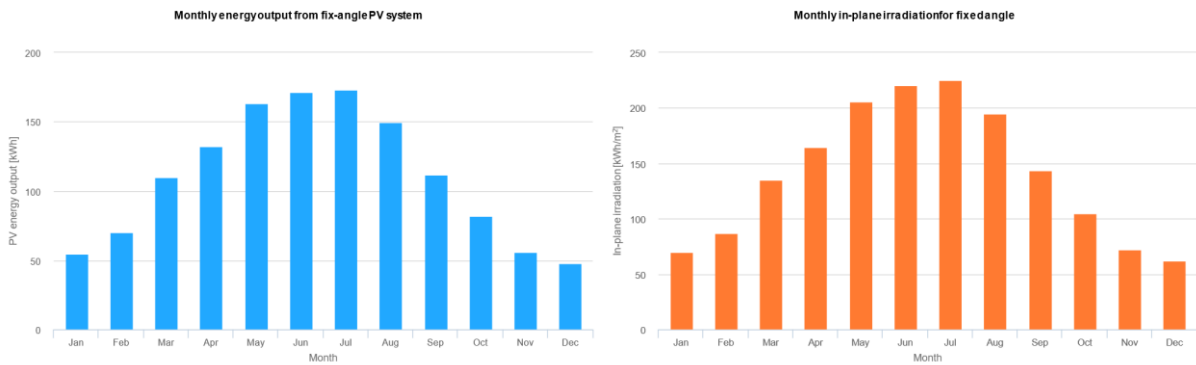


Abbildung 50: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_p pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für horizontal ausgerichtete Photovoltaik in Barcelona (Spanien).

Der Ertrag der vertikalen Ausrichtung mit der Orientierung Süd ist in Abbildung 51 dargestellt. Auch für diese Ausrichtung ist ein größerer Ertrag im Gegensatz zu Frankfurt zu erwarten. Der jahreszeitliche Verlauf ist aufgrund der südlicheren Lage etwas verändert und die höchste Einstrahlung auf die Südfassade ergibt sich um die Wintersonnenwende und die Geringste um die Sommersonnenwende.

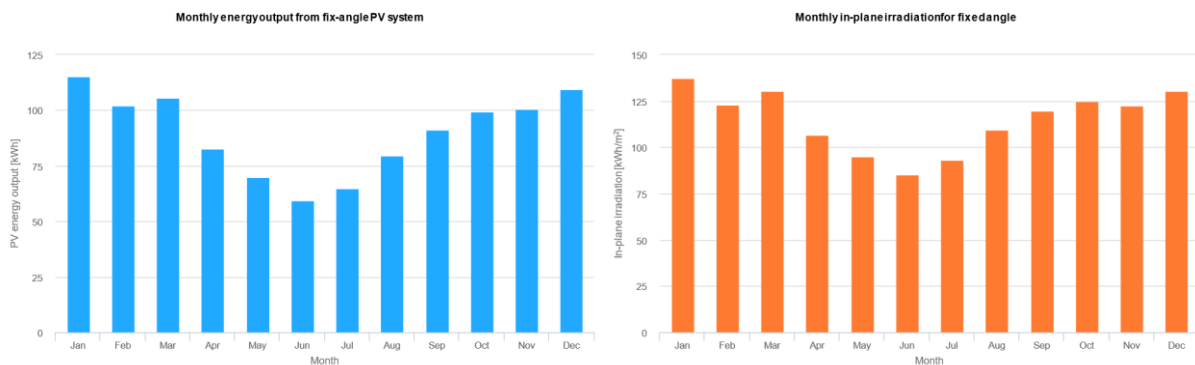


Abbildung 51: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_p pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für vertikale Photovoltaik mit südlicher Ausrichtung in Barcelona (Spanien).

Der Ertrag der vertikalen Ausrichtung mit der Orientierung West und Ost ist in Abbildung 53 bzw. Abbildung 52: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_P pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für vertikale Photovoltaik mit östlicher Ausrichtung in Barcelona (Spanien). dargestellt. Für die westlich und östlich ausgerichtete Photovoltaik ergibt sich in Barcelona ein deutlich schwächer ausgeprägter jahreszeitlicher Verlauf im Vergleich zu Frankfurt. Vor allem um die Wintersonnenwende ist aufgrund der erhöhten Einstrahlung mit größeren Erträgen zu rechnen.

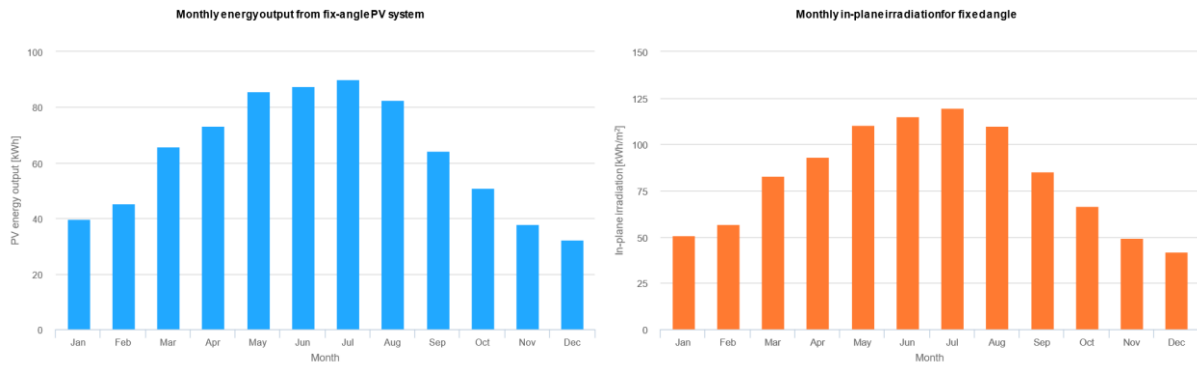


Abbildung 53: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_P pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für vertikale Photovoltaik mit westlicher Ausrichtung in Barcelona (Spanien).

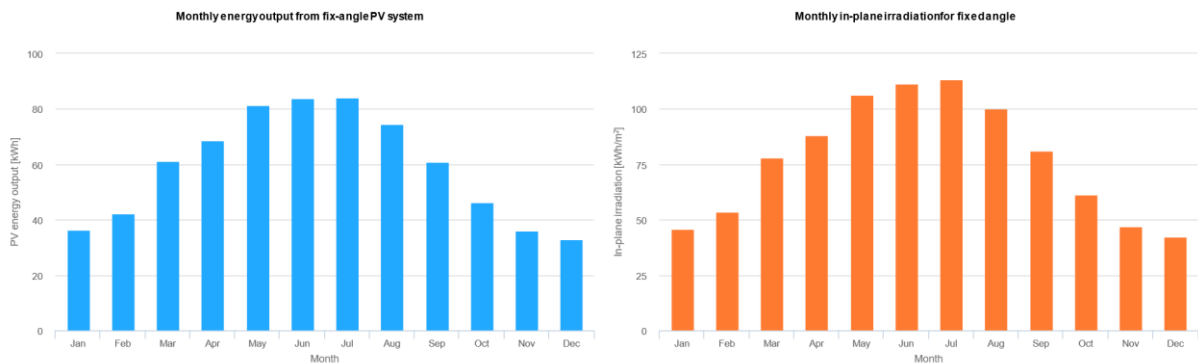


Abbildung 52: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_P pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für vertikale Photovoltaik mit östlicher Ausrichtung in Barcelona (Spanien).

Der Ertrag der vertikalen Ausrichtung mit der Orientierung Nord ist in Abbildung 58 dargestellt. Für die nördliche Ausrichtung ist in Barcelona der Ertrag ähnlich zu dem in Frankfurt, da hier vor allem diffuses Licht zum Ertrag beiträgt.

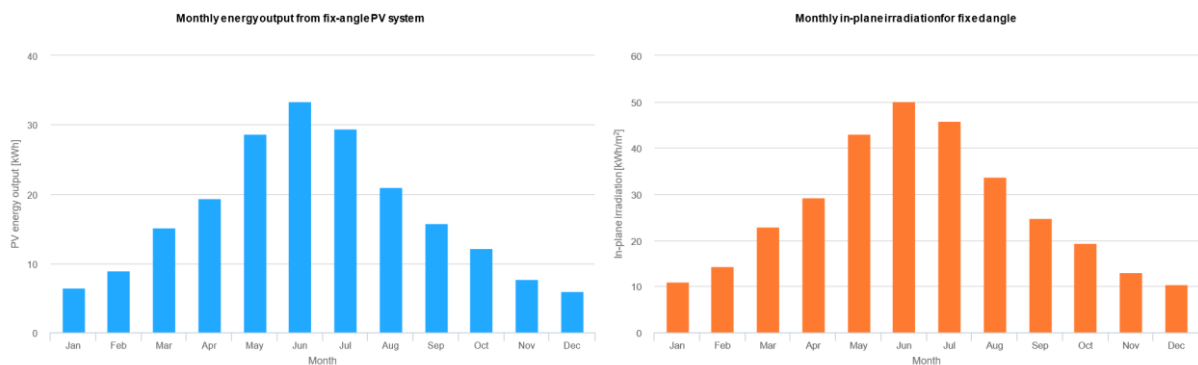


Abbildung 54: Erwarteter solarer Ertrag in kWh/kW_P pro Monat und solarer Energieeintrag pro Fläche pro Monat für vertikale Photovoltaik mit nördlicher Ausrichtung in Barcelona (Spanien).

Zeitlicher Verlauf der Einstrahlung

Frankfurt am Main

Aufgrund immer stärkerer Durchdringung von erneuerbaren Kapazitäten im Stromnetz und aufgrund von smarten Energie-Management-Systemen wird der Wert von elektrischer Leistung zukünftig vermutlich vom Einspeiseort und der Tageszeit abhängen. Daher sind im Folgenden die zeitlichen Verläufe der Einstrahlung auf die oben bereits betrachteten Ausrichtungen und Orientierungen für die zwei Orte Frankfurt am Main und Barcelona dargestellt. Es ist jeweils die über einen Monat gemittelte solare Einstrahlung pro m^2 dargestellt; Gesamteinstrahlung in dunkelrot, direkte Einstrahlung in hellrot, diffuse Strahlung in orange und Gesamteinstrahlung ohne Wettereffekte in hellblau.

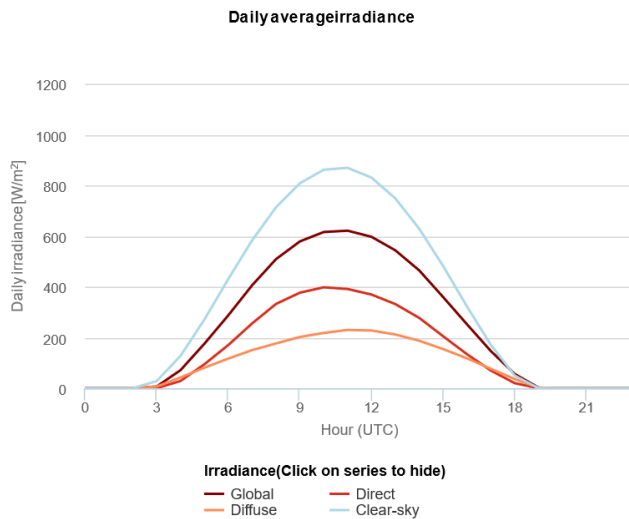


Abbildung 55: Mittlere Einstrahlung auf horizontale Verglasungen für Frankfurt am Main im Juni.

In Abbildung 55 ist die mittlere Einstrahlung auf horizontale Verglasungen für Frankfurt am Main im Juni dargestellt. Ein relativ großer Anteil der Globalstrahlung kommt durch diffuse Strahlung zustande. Die lange Tageslänge im Sommer aufgrund des Breitengrads sorgt für viele Stunden mit potentiell gutem Ertrag. Es ist eine deutliche Verringerung der Globalstrahlung aufgrund von Wettereffekten zu erkennen, da es immer auch Tage mit teilweiser oder kompletter Bewölkung gibt.

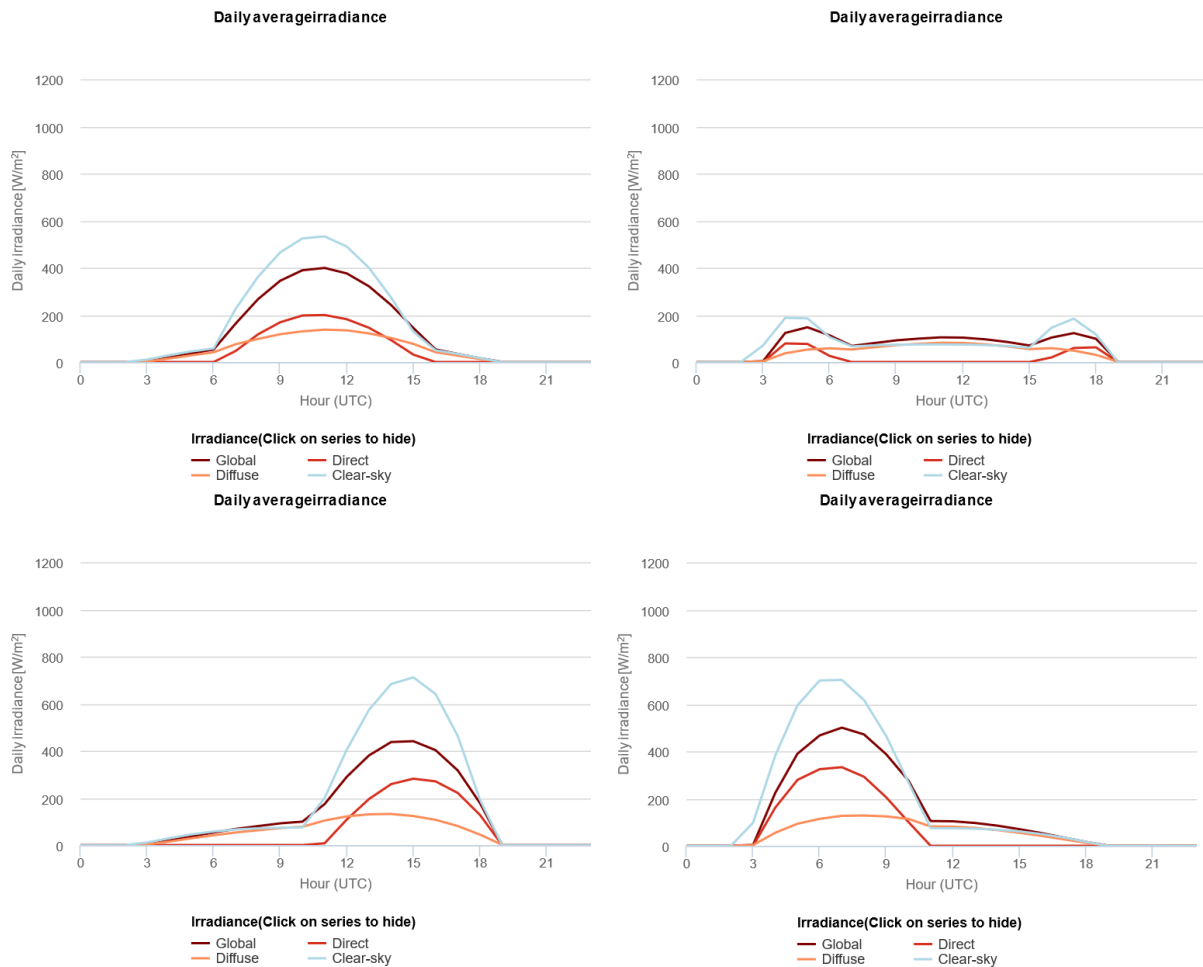


Abbildung 56: Mittlere Einstrahlung auf vertikale Verglasung in Ausrichtung Süd oben links, Nord oben rechts, West unten links und Ost unten rechts für Frankfurt am Main im Juni.

In Abbildung 56 ist die mittlere Einstrahlung auf vertikale Verglasung in den vier Ausrichtungen Süd, Nord, West und Ost für Frankfurt am Main im Juni dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zur horizontalen Ausrichtung mit bedeutend geringeren Erträgen zu rechnen ist (~66%). Die Einstrahlung auf die Südfassade wird zeitlich gesehen sehr gut durch Einstrahlung am Morgen auf die westliche und am Abend auf die östliche Fassade abgebildet. Eine direkt nach Norden ausgerichtete Fassade zeigt wenig Potential.

In Abbildung 57 ist die mittlere Einstrahlung auf horizontale Verglasungen für Frankfurt am Main im Dezember dargestellt. Die stark verringerte Einstrahlung im Dezember im Vergleich zu Juni ist von PV-Dachanlagen bekannt und durch die sehr flach stehende Sonne, kurze Tageslänge und oft starke Bewölkung zu erwarten.

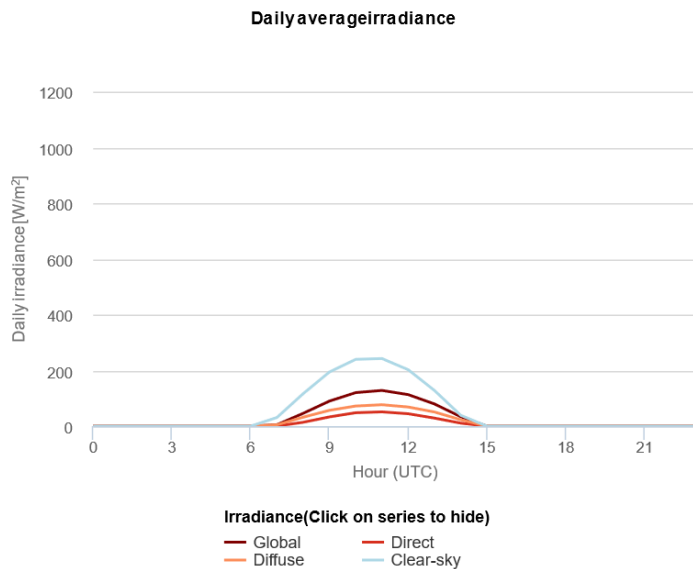


Abbildung 57: Mittlere Einstrahlung auf horizontale Verglasungen für Frankfurt am Main im Dezember.

In Abbildung 58 ist die mittlere Einstrahlung auf vertikale Verglasung in den vier Ausrichtungen Süd, Nord, West und Ost für Frankfurt am Main im Dezember dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die nach Süden Ausgerichtete Fassade an klaren Tagen einen deutlich größeren Ertrag verspricht, als eine horizontal ausgerichtete Anlage (Clear-sky Einstrahlung). Auch hier ist durch die Wettereffekte allerdings weniger Globalstrahlung vorhanden. Durch die veränderte Tageslänge gibt es keine (direkte) Einstrahlung auf die nördlich ausgerichtete Fassade und damit fast keinen Ertrag. Zudem ist ein relativer großer Wetter-Einfluss auch auf westlich und östlich ausgerichtete Fassaden zu erkennen. Diese erhalten sehr wenig Einstrahlung.

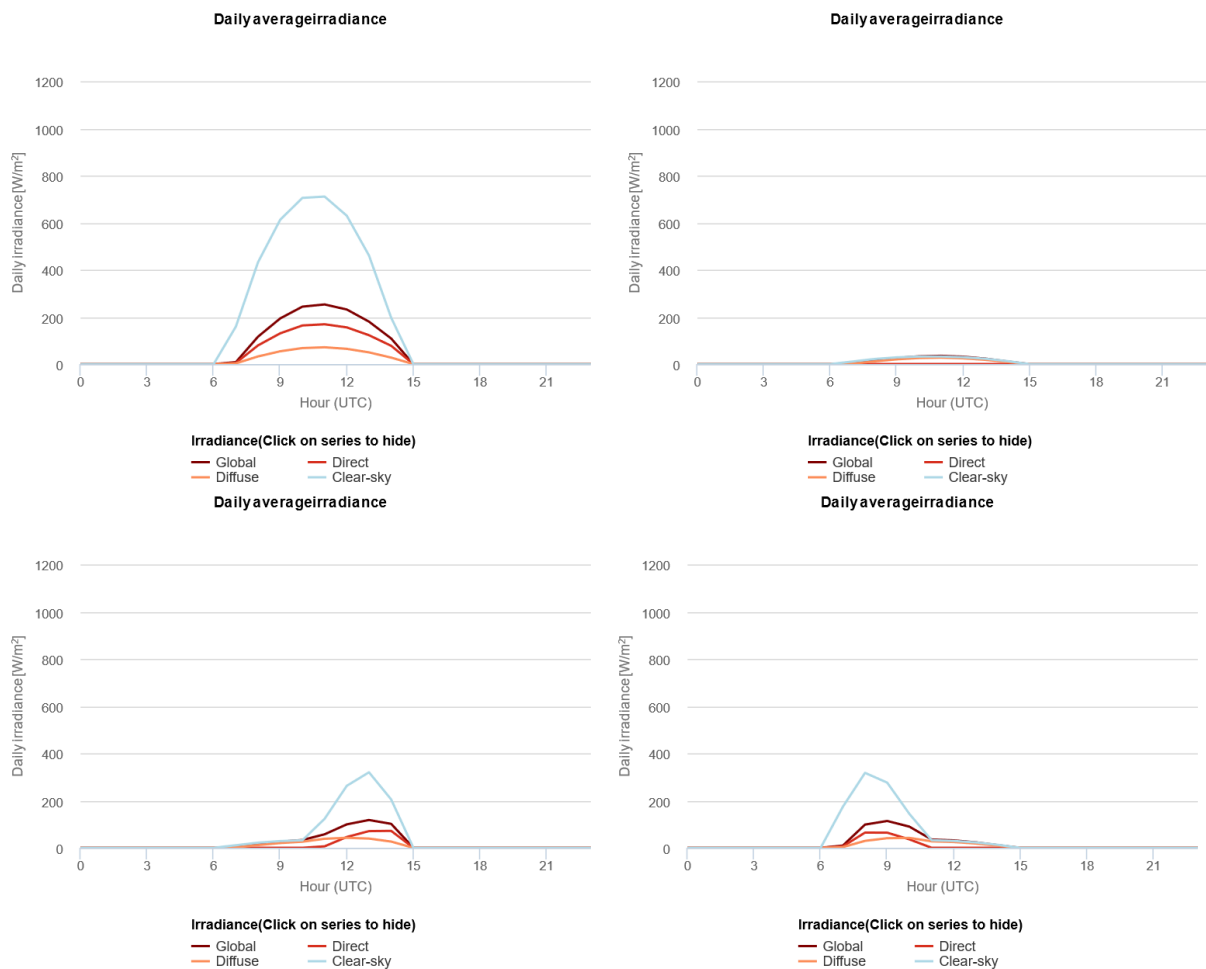


Abbildung 58: Mittlere Einstrahlung auf vertikale Verglasung in Ausrichtung Süd oben links, Nord oben rechts, West unten links und Ost unten rechts für Frankfurt am Main im Dezember.

Barcelona

In Abbildung 59 ist die mittlere Einstrahlung auf horizontale Verglasungen für Barcelona im Juni dargestellt. Die kürzere Tageslänge im Vergleich zu Frankfurt mindert das Potential in den Randbereichen im Sommer. Die größere maximale Einstrahlung ist deutlich in den globalen und clear sky Daten zu erkennen. Wie zu erwarten gibt es einen geringeren Wettereinfluss auf die Globalstrahlung als in Frankfurt.

In Abbildung 60 ist die mittlere Einstrahlung auf vertikale Verglasung in den vier Ausrichtungen Süd, Nord, West und Ost für Barcelona im Juni dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es einen deutlich kleineren Wettereinfluss als in Frankfurt im Juni gibt und trotz weiter südlichem Sonnenaufgang und Sonnenuntergang deutlich mehr Einstrahlung für westlich und östlich ausgerichtete Fassaden im Vergleich zu Frankfurt zustande kommt.

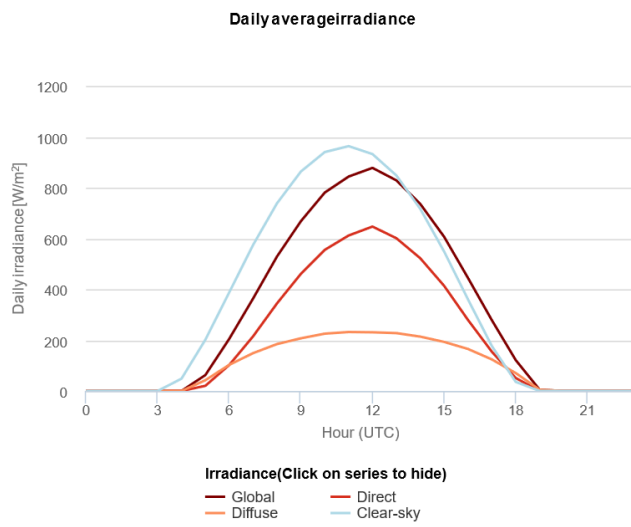


Abbildung 59: Mittlere Einstrahlung auf horizontale Verglasungen für Barcelona im Juni.

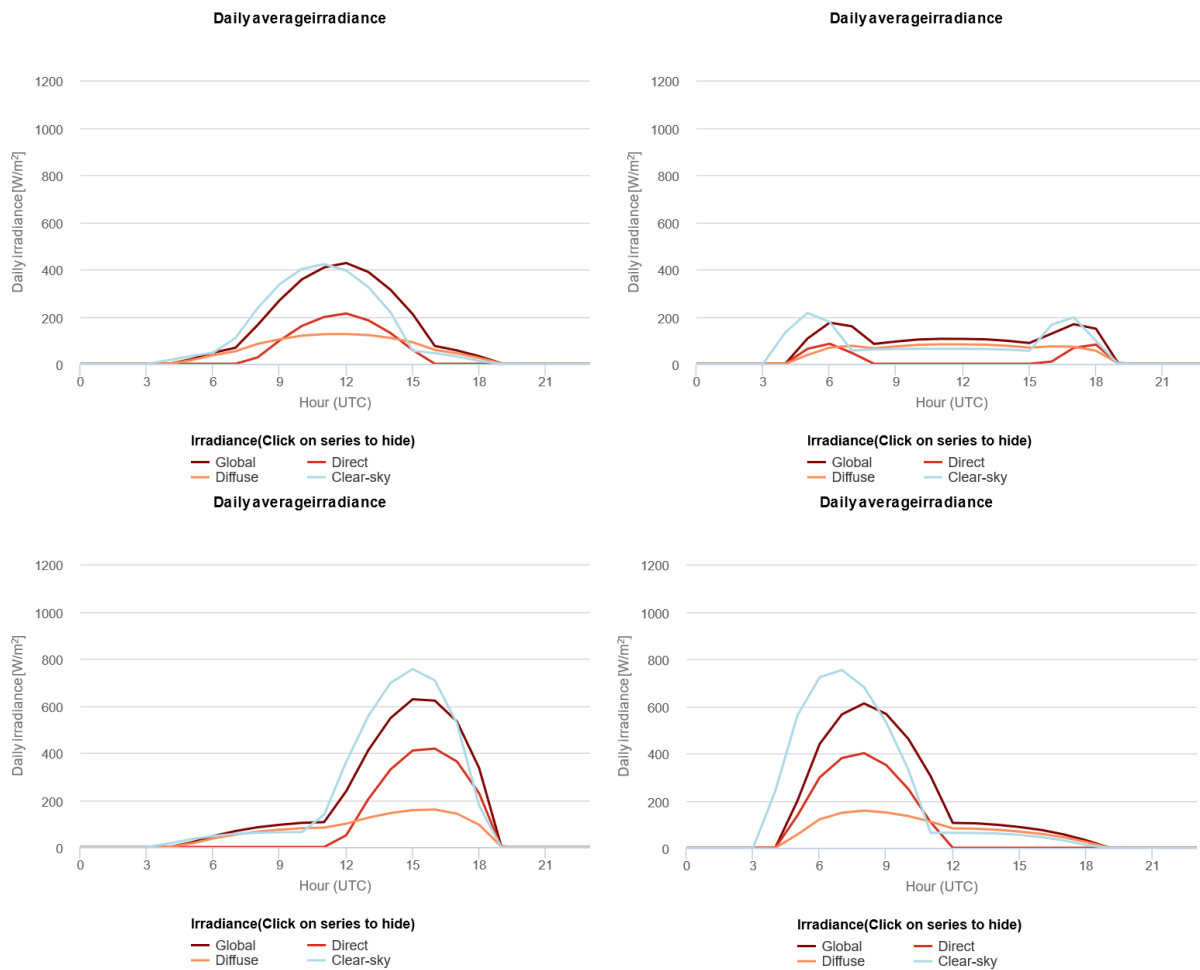


Abbildung 60: Mittlere Einstrahlung auf vertikale Verglasung in Ausrichtung Süd oben links, Nord oben rechts, West unten links und Ost unten rechts für Barcelona im Juni.

In Abbildung 61 ist die mittlere Einstrahlung auf horizontale Verglasungen für Barcelona im Dezember dargestellt. Im Vergleich zu Frankfurt am Main ist mit ungefähr doppelt so viel Einstrahlung zu rechnen. Zudem ist der Ertrag durch die deutlich längere Tageslänge aufgewertet. Dennoch ist auch hier im Dezember mit einem verminderten Ertrag für die horizontal ausgerichtete Anlage im Vergleich zu Juni zu erwarten.

In Abbildung 62 ist die mittlere Einstrahlung auf vertikale Verglasung in den vier Ausrichtungen Süd, Nord, West und Ost für Barcelona im Dezember dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit der nach Süden orientierten Fassade sogar mit einem größeren Ertrag zu rechnen ist als im Juni. Durch die kürzere Tageslänge ist der Ertrag auf einen kleineren Zeitraum verteilt. Weiterhin gibt es auch hier deutlich verminderte Einstrahlung für westlich und östlich ausgerichtete Fassaden und keine direkte Einstrahlung auf nördlich ausgerichtete Fassaden.

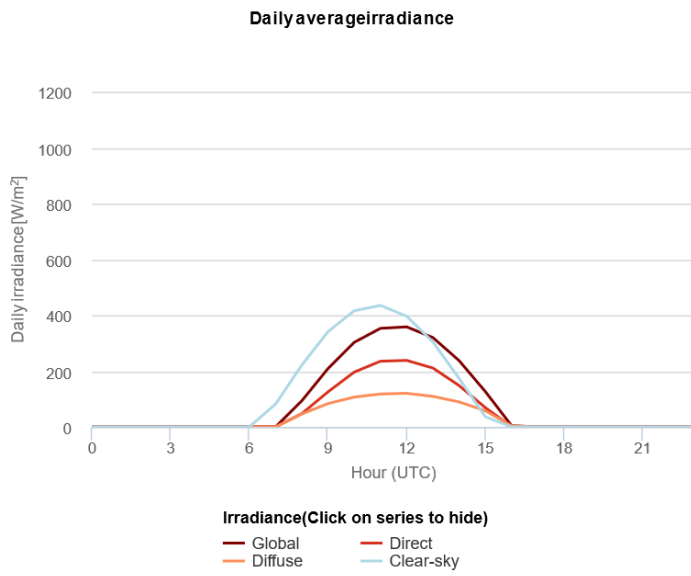


Abbildung 61: Mittlere Einstrahlung auf horizontale Verglasungen für Barcelona im Dezember.

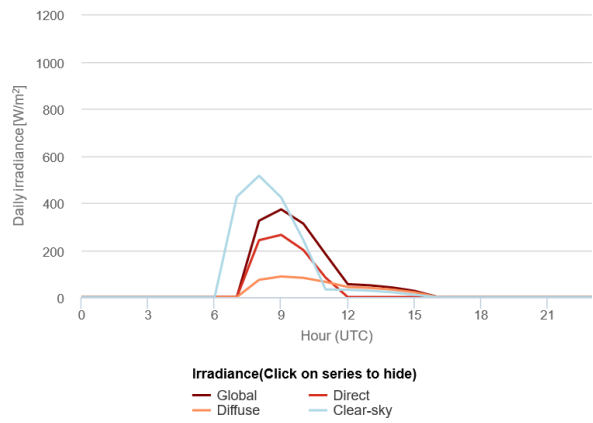
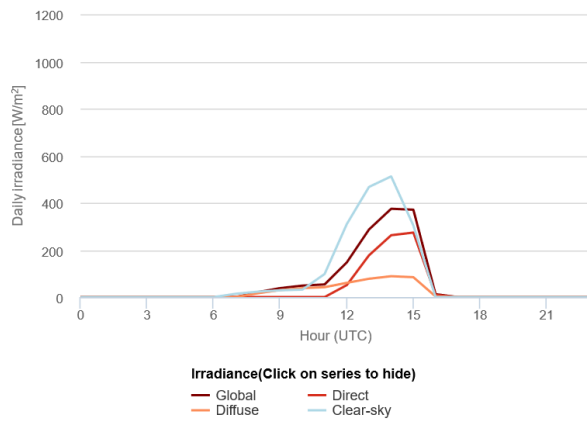
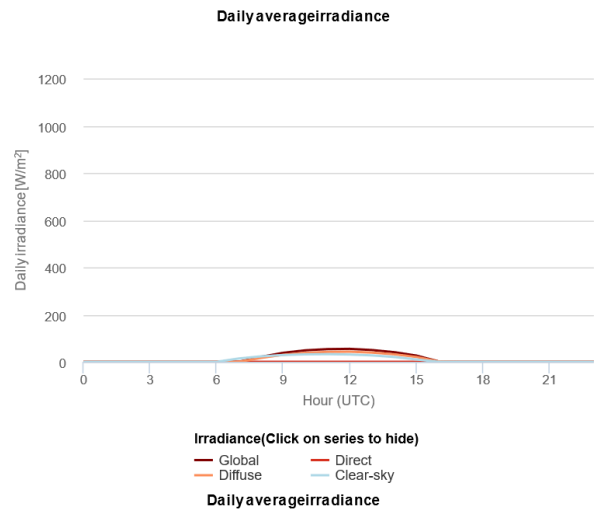
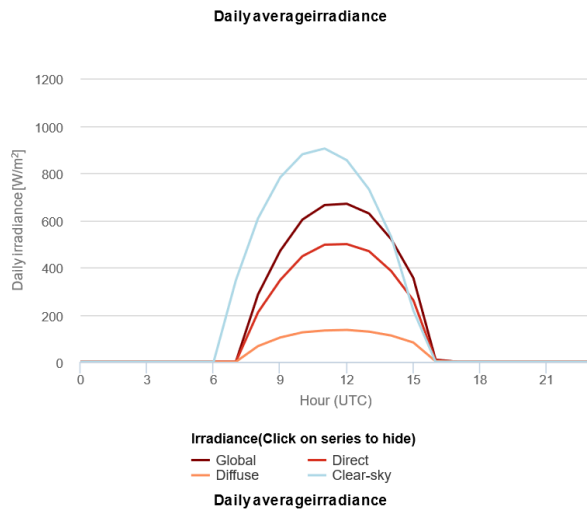


Abbildung 62: Mittlere Einstrahlung auf vertikale Verglasung in Ausrichtung Süd oben links, Nord oben rechts, West unten links und Ost unten rechts für Barcelona im Dezember.

Einfluss von Verschattung in dicht bebauten urbanen Gebieten

Für die oben dargestellten solaren Erträge wurde als Horizont nur die natürliche Topographie

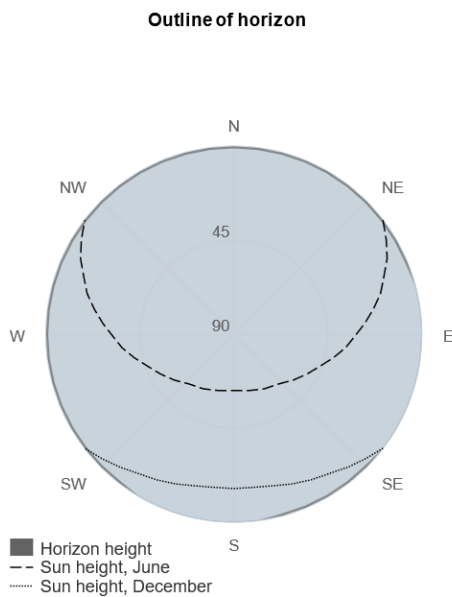


Abbildung 64: Horizonthöhe und Verlauf der Sonnenhöhe im Juni und Dezember für Frankfurt am Main. Für die Horizonthöhe werden nur natürliche Hindernisse berücksichtigt.

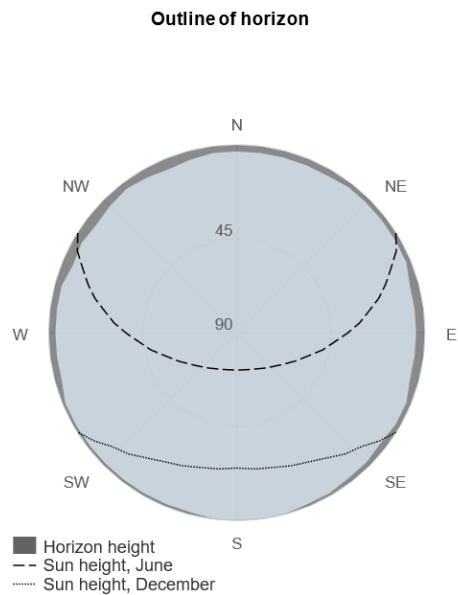


Abbildung 63: Horizonthöhe und Verlauf der Sonnenhöhe im Juni und Dezember für Barcelona (Spanien). Für die Horizonthöhe werden nur natürliche Hindernisse berücksichtigt.

angenommen, d.h. ein völlig freistehendes Gebäude. Somit ist im Fall Frankfurt nur ein minimaler Einfluss durch natürliche Hindernisse, welche die Sonneneinstrahlung behindern, zu erkennen (siehe Abbildung 64). In Barcelona (siehe Abbildung 63) ist der Einfluss im Poldiagramm besser zu erkennen, jedoch mit wenigen Grad über dem Horizont auch völlig irrelevant.

Relevanter sind die Verschattungen durch benachbarte Gebäude, die je nach Standort vor allem die unteren Stockwerke sehr massiv beeinflussen. Daher ist eine Ertragsprognose für jeden Standort mit einem entsprechend angepassten Verschattungs-Horizont nötig. In urbanen Zentren sollte davon ausgegangen werden, dass sich für einzelne Fassaden oder das gesamte Gebäude der Ertrag durch die Verschattung durch umliegende Gebäude vor allem für die unteren Stockwerke sehr stark reduziert.

Auswirkungen auf das Stadtklima

Auswirkung der Hauptanwendung

Die in diesem Projekt untersuchten PV-Beschichtungen sollen mittelfristig die Entwicklung einer PV-Sonnenschutzverglasung ermöglichen, die die gängigen Sonnenschutzverglasungen in großen vollverglasten Fassaden ersetzt. Aus den folgenden Überlegungen kann abgeleitet werden, dass sich dabei die Auswirkungen auf das Stadtklima nicht signifikant ändern. Das Konzept der neuartigen Beschichtung besteht ja darin, die passive Absorberschicht der klassischen Sonnenschutzverglasung durch eine aktive PV-Absorberschicht zu ersetzen. In beiden Fällen wird ein Teil des eingestrahnten Sonnenlichts absorbiert, so dass sich die Innenräume nicht so stark aufheizen. Der Unterschied liegt nur darin, dass bei der neuartigen Verglasung ein - vergleichsweise kleiner - Anteil dieses absorbierten Lichts in Strom umgewandelt wird. Der verbleibende weitaus größere Anteil wird wie bei den klassischen Sonnenschutzverglasungen in Wärme umgewandelt und über natürliche Konvektion an der Außenseite der Fassade abgeführt. Die Details der Auswirkungen auf die Erwärmung der Umgebungsluft liegen dabei also mehr in den Details der Fassadengestaltung und wie diese die Konvektion beeinflussen als in der Art der Absorberschicht.

Alternative Anwendungen

Nach dieser Betrachtung des Hauptanwendungsfeldes der PV-Sonnenschutzverglasung kommt schnell die Frage nach alternativen Anwendungen auf, die das Stadtklima positiv beeinflussen könnten. Üblicherweise kann in einem urbanen Umfeld zwischen dem umfriedeten Raum und dem öffentlichen Raum unterschieden werden. Den umfriedeten Raum bilden alle Grundstücke, die in den Außenbezirken teilweise locker und in den Innenstädten meistens sehr dicht bebaut sind. Die Bebauung umfasst dabei Gebäudetypen mit unterschiedlicher Nutzung wie z.B. Wohnhäuser, Einzelhandel & Gewerbe, Bürogebäude, Industriebauten, Lagerhallen und Parkhäuser. Der öffentliche Raum ergibt sich aus allen Verkehrswegen, also Wegen, Straßen, Wasserstraßen und Schienen, sowie den Grünflächen, Parkanlagen, Wasserflächen und Plätzen.

Welche Räume besonders von Hitze betroffen sind, zeigen Auswertungen des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR. Die Abbildung 65 zeigt Mittelwerte der Oberflächentemperaturen mittags in den Sommermonaten Juni, Juli und August in den Jahren 2013 bis 2024 für den Großraum Berlin. Es ist gut zu erkennen, wie sich die Grünflächen von den bebauten und

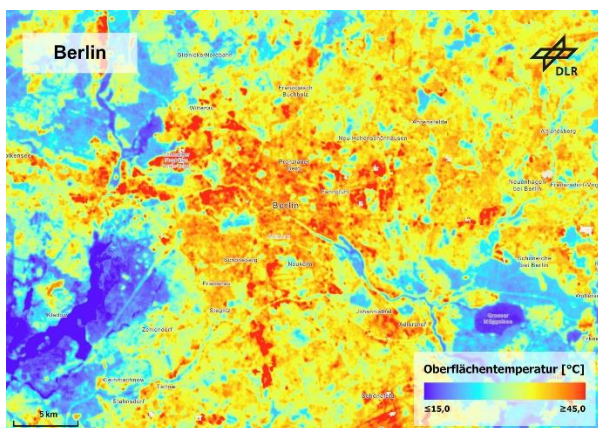


Abbildung 65: Mittlere Oberflächentemperatur des Großraums Berlin, DLR (CC BY-NC-ND 3.0)

den freien Flächen wie z.B. dem ehemaligen Flughafen Tegel absetzen. Grünflächen sind dabei deutlich kühler und freie Flächen deutlich wärmer als der Durchschnitt. Bei den bebauten Flächen fällt auf, dass es einige gibt, die ähnlich hohe Temperaturen zeigen, wie die freien Flächen. Dabei scheinen vor allem der Begrünungsgrad durch Bäume eine entscheidende Rolle zu spielen.

Aus diesen Erkenntnissen ließe sich ableiten, dass die Beschattung von urbanen Flächen (Plätze, Verkehrsflächen, Parkplätze sowie Dächer von Industrie- und Lagerhallen) mittels Photovoltaikmodulen das Stadtklima in

Hitzeperioden positiv beeinflussen kann. Leider ist diese Hypothese inzwischen widerlegt worden. Zum Teil kann sogar eine stärkere Aufheizung beobachtet werden. Die Tatsache, dass hier – kontraintuitiv – eine Verschattung nicht zu einer geringeren Aufheizung führt, liegt vor allem an zwei Effekten. Zum einen wird mit zunehmender Photovoltaikbelegung eine Fläche wie z.B. ein Hallendach mit mittlerer Albedo zu einer deutlich dunkleren Fläche, die damit weniger Sonnenlicht

direkt zurück in das All reflektieren kann. Der zweite Effekt ist die lokal veränderte Luftbewegung und damit evtl. reduzierte Verdunstung. Es kann festgehalten werden, dass die Auswirkungen von Photovoltaikmodulen im urbanen Raum nicht intuitiv abgeschätzt werden können und gegebenenfalls eine aufwendige Modellierung notwendig ist. Diese Modelle sollten zumindest den Effekt der Albedo, Luftbewegungen und Verdunstung berücksichtigen.

Was bleibt an sinnvollen Einsatzgebieten neben den Fassaden übrig?

Parkplatzüberdachungen

Zweifellos sorgen Parkplätze, die mit PV-Modulen überdacht werden dafür, dass die darunter



geparkten Fahrzeuge sich deutlich weniger stark aufheizen. Dies verringert sofort den Hitzestress der Nutzer bei der Weiterfahrt und schont zudem die Fahrzeuge. Für eine solche Überdachung eignen sich die verfügbaren Lösungen mit Glas-Glas-PV-Modulen auf Basis von Si-Wafern, wie sie in Abbildung 66 dargestellt sind. Dabei sind die Waferzellen oftmals „auf Lücke“ gesetzt, so dass ein kleiner Anteil des Lichts durchdringen kann. Anders als in einer Fassade, wo die Nutzer freie Sicht erwarten, ist dieses Schachbrettmuster im Anwendungsfall Parkplatz-Überdachung völlig akzeptiert.

Abbildung 66: PV überdachter Parkplatz [19]

PV-Module in Kombination mit Gründächern

Wie oben bereit angesprochen hat die gesteigerte Verdunstung durch Grünflächen und Bäume eine sehr große Wirkung auf die Temperatur in urbanen Räumen. Viele Städte legen daher schon seit vielen Jahren großen Wert auf die Begrünung von Flachdächern. Dabei kann auch eine Kombination mit Photovoltaikmodulen realisiert werden, wie in Abbildung 67 dargestellt ist. Dabei kann die durch die Verdunstung reduzierte Lufttemperatur sogar zu einer Leistungssteigerung der PV-Module führen.



Abbildung 67: Kombiniertes Grün- & PV-Dach. [20]

Dissemination

Als Vorhaben der Kategorie „Grundlagenforschung“ ist die Verwertung der Ergebnisse des „PV-SoGla“-Vorhabens in erster Linie in wissenschaftlicher Form erfolgt. Für das DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme ergibt sich durch die Durchführung des Vorhabens eine Erweiterung der Reputation des Instituts und ein Erkenntnisgewinn für Folgeprojekte; nach dem erfolgreichen Abschluss des Vorhabens strebt das DLR ein weiteres Projekt zur Vervollständigung der Device-Entwicklung, Skalierung, Testung und Integration der Technologie als wirtschaftliche Verwertung mit Partnern aus der Industrie an.

Um die Ergebnisse aus dem Vorhaben sowohl Fachleuten wie auch einem breiteren Publikum nahezubringen, wurden sie einerseits in Form wissenschaftlicher Artikel in Fachjournalen publiziert: Ruskaup et al. (2025) [10] fasst die wesentlichen Ergebnisse aus dem Kapitel *Absorberentwicklung* zusammen; Ruskaup et al. (2026) [18] berichtet von den Ergebnissen aus dem Kapitel *Optische Zelleigenschaften und Farbneutralität*. Des Weiteren war das Vorhaben am DLR in eine Doktorarbeit eingebunden, die auch über das Projektende hinaus weiteren Forschungsfragen bzgl. der Realisierung einer vollständig gesputterten Solarzelle nachgeht. Hier ist eine weitere Veröffentlichung zur Prozessentwicklung der ladungsträgerselektiven Schichten geplant.

Andererseits wurden die Ergebnisse des Vorhabens auf der der Weltleitmesse der Glasbranche, der „glasstec 2024“, verbreitet. Die „glasstec“ ist mit über 30 000 Besuchern aus mehr als 125 Ländern der zentrale Treffpunkt der internationalen Glasbranche und versammelt unter anderem die Experten im Bereich Glasveredlung und spezieller: Sonnenschutzverglasung. Der Besuch diente der Knüpfung

von Kontakten zu Industriepartnern für ein potentielles Nachfolgeprojekt. Die Projektergebnisse wurden in einem Vortrag im Rahmen der „glass trends sessions“ präsentiert, die zum Ziel haben, das Branchen-Know-how aus Theorie und Praxis zu bündeln. Um die Dissemination der Projektergebnisse auf nationaler Ebene noch zu steigern, wird darüber hinaus im Oktober 2026 ein Webinar zum „PV-SoGla“-Projekt im Rahmen der „Glas-Akademie“ des Bundesverbandes Flachglas stattfinden.

Ergebnisse

Im Rahmen dieses Projekts wurden erfolgreich Germanium-Absorberschichten mit unterschiedlichen Prozessparametern mittels Sputterdeposition hergestellt und umfassend charakterisiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich durch gezielte Variation der Sputterparameter funktionale Schichten mit für photovoltaische Anwendungen geeigneten optischen und elektrischen Eigenschaften erzeugen lassen. Aufbauend auf einem bekannten Germaniumabsorber aus einem PECVD-Prozess wurde ein entsprechender Sputterprozess entwickelt und beschrieben, der einen funktionalen Germaniumabsorber für den Einsatz in einer Dünnschichtsolarzelle ermöglicht.

Zur experimentellen Validierung wurde ein gesputterter Germaniumabsorber in einer Silizium-Dünnschichtsolarzelle eingesetzt. Mit dieser Demonstratorzelle konnte eine photovoltaische Effizienz von über 1% erreicht werden, womit die grundsätzliche Eignung des gesputterten Absorbers für photovoltaische Anwendungen experimentell nachgewiesen wurde.

Darüber hinaus wurden weitere Materialien in Form von Molybdänoxid und Titanoxid untersucht, die für den Einsatz in einer vollständig gesputterten und transparenten Dünnschichtsolarzelle als selektive Kontaktmaterialien geeignet sind. Auf Grundlage dieser Materialcharakterisierung wurde eine transparente Dünnschichtsolarzelle modelliert, wobei der Fokus auf der Farbneutralität lag. Es konnte ein Schichtstapel identifiziert werden, der sowohl funktionale Eigenschaften als auch eine farbneutrale Transmission aufweist. Auf Basis dieses Modells wurden umfangreiche Untersuchungen der Transmissions- und Reflexionseigenschaften durchgeführt. Zusätzlich wurden die Grenzen des Designs hinsichtlich möglicher Schichtdickenabweichungen analysiert, um Aussagen über die Robustheit des Konzepts gegenüber prozessbedingten Toleranzen treffen zu können.

Ergänzend wurden die Auswirkungen der entwickelten Technologie auf ökonomische Aspekte sowie auf das urbane Mikroklima betrachtet. Dies schließt Abschätzungen möglicher Energieerträge bei gebäudeintegrierten Anwendungen mit ein. Die erzielten Ergebnisse werden im Rahmen von peer-reviewed wissenschaftlichen Publikationen sowie Fachvorträgen der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Schlussworte

Dieses Projekt hat die Möglichkeit ausgelotet, auf Basis von sehr dünnem Germanium eine Beschichtung zu etablieren, die in Sonnenschutzverglasungen dazu führt, dass das absorbierte Licht zum Teil in Strom und nicht ausschließlich in Wärme umgewandelt wird. Dadurch könnten große Glasfassaden zu einem Teil der Energieversorgung von Gebäuden beitragen; vor allem zu Zeiten, wenn Klimaanlage viel elektrische Leistung brauchen. Diese neue Art der Sonnenschutzverglasung kann die etablierte glasveredelnde Industrie nur anbieten, wenn zwei grundlegende Hürden überwunden werden. Erstens müssen alle Beschichtungen, auch die elektrooptisch aktiven, durch die etablierte Technik des Magnetronsputterns erfolgen. Zweitens müssen die resultierenden Glasscheiben ein farbneutrales Erscheinungsbild haben.

Diese beiden Ziele wurden in zwei Teilaufgaben verfolgt, begleitet von zwei Teilaufgaben, die sich mit möglichen alternativen Anwendungen und der Verbreitung der Ergebnisse befassen.

In Teilaufgabe 1 konnte durch Untersuchung der gesputterten Schichten der Germanium-Nanoabsorber-Solarzellen begleitet von elektrischer Modellierung gezeigt werden, dass

Sputterdeposition als Herstellungsverfahren sowohl für den Absorber, als auch die Kontaktschichten eine realistische Route darstellt. Der Parameterraum der Sputterprozesse wurde auf Haupteinflussgrößen untersucht und eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die zeigen konnte, dass die nötige Genauigkeit bei der Einhaltung der individuellen Schichtdicken mit aktueller Fertigungsgenauigkeit möglich ist.

In Teilaufgabe 2 konnte zudem durch gezielte Entwicklung der optischen Zelleigenschaften begleitet von optischer Modellierung gezeigt werden, dass Farbneutralität und Transmission gewährleistet werden können, so dass die neue Art Sonnenschutzverglasung auf allgemeine Akzeptanz trifft.

Nun bleibt abschließend zu bewerten, wie diese Technologie weiter zur Marktreife kommen kann. Es konnte gezeigt werden, dass die zwei kritischen Hürden für die Beschichtung, Farbneutralität und Fertigbarkeit auf bestehenden Anlagen der Glasindustrie, zu überwinden sind. Die Aussichten auf einen voll gesputterten Schichtstapel sind gut. Das ultra-dünne Ge bildet dabei das Kernelement und somit die „Enabling Technology“. Durch die extrem geringe Schichtdicke gelingt der Schritt auf die Sputterdeposition und die Puffer- und Dotier-Schichten können voraussichtlich durch den Einsatz selektiver Kontakte umgangen werden, die wiederum auch gut per Sputtertechnik herzustellen sind. Die Farbneutralität kann mit den voraussichtlich nötigen Schichtdicken gewährleistet werden und die Schichtdickensensitivität ist nach Maßstäben der Glasindustrie unkritisch.

Was fehlt ist ein Schema zur Zellstrukturierung, wie es bei allen Dünnschicht-Photovoltaik-Modulen eingesetzt wird. Laserprozesse die eine Strukturierung leisten können sind jedoch etabliert und produktiv. Sogar ein Dekorieren der durch die Strukturierung unweigerlich entstehenden Streifenoptik ist mit etablierter Drucktechnik denkbar. Zudem wäre eine Kombination mit Vogelschutz-Mustern denkbar.

Einsatzgebiete der Technologie können neben großen Glasfassaden auch Dachfenster und Oberlichter sein, aber auch Überdachungen im urbanen Raum. Hier ist jedoch nicht mit einer netto kühlenden Wirkung zu rechnen. Autos, die im Schatten parken, bleiben aber vor Überhitzung geschützt. Die PV-Sonnenschutzverglasung kann somit ein globales Produkt der Glasindustrie für die Großstädte der Welt werden.

Literatur

- [1] Estormiz. "The glass facade of the Oulu City Library." [Online.] Verfügbar: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Oulu_City_Library_20140208_02.JPG
- [2] H. Meddeb, K. Gehrke und M. Vehse, "Optical design and bandgap engineering in ultrathin multiple quantum well solar cell featuring photonic nanocavity," *Progress in Photovoltaics*, Jg. 33, Nr. 1, S. 170–183, 2025, doi: 10.1002/pip.3802.
- [3] H. Meddeb *et al.*, "Quantum confinement-tunable solar cell based on ultrathin amorphous germanium," *Nano Energy*, Jg. 76, S. 105048, 2020, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105048.
- [4] *What are Gallium and Germanium and which countries are producers?* Reuters, 2023. Zugriff am: 3. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reuters.com/markets/commodities/where-are-strategic-materials-germanium-gallium-produced-2023-07-04/>
- [5] D. Bird, "Germanium: China in Control, But New Production Coming in the West," RFC Ambrian, Apr. 2025.
- [6] W. Kiyotaka, A. Hideaki, H. Tomonobu, M. Tomoaki, M. Tomoyoshi und T. Kikuo, *Handbook of sputter deposition technology: Fundamentals and applications for functional thin films, nano-materials and MEMS*, 2. Aufl. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2012.
- [7] R. Shang *et al.*, "A comprehensive review of solid-state lithium batteries: Fast Charging characteristics and in-operando diagnostics," *Nano Energy*, Jg. 142, S. 111232, 2025, doi: 10.1016/j.nanoen.2025.111232.
- [8] P. Klement, C. Feser, B. Hanke, K. v. Maydell und C. Agert, "Correlation between optical emission spectroscopy of hydrogen/germane plasma and the Raman crystallinity factor of germanium layers," *Appl. Phys. Lett.*, Jg. 102, Nr. 15, 2013, Art. Nr. 152109, doi: 10.1063/1.4802028.
- [9] J. H. Parker, D. W. Feldman und M. Ashkin, "Raman Scattering by Silicon and Germanium," *Phys. Rev.*, Jg. 155, Nr. 3, S. 712–714, 1967, doi: 10.1103/PhysRev.155.712.
- [10] N. Ruskaup, K. Gehrke, S. Heise, M. Vehse und C. Agert, "Optoelectronic properties of sputtered germanium absorbers used in ultrathin film photovoltaics," *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Jg. 43, Nr. 6, 2025, Art. Nr. 063407, doi: 10.1116/6.0004801.
- [11] J. Ebisawa und E. Ando, "Solar control coating on glass," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, Jg. 3, Nr. 4, S. 386–390, 1998, doi: 10.1016/S1359-0286(98)80049-1.
- [12] T. Amotchkina, M. Trubetskov, D. Hahner und V. Pervak, "Characterization of e-beam evaporated Ge, YbF₃, ZnS, and LaF₃ thin films for laser-oriented coatings," *Appl. Opt.*, Jg. 59, Nr. 5, A40, 2020, doi: 10.1364/AO.59.000A40.
- [13] R. Baghdad *et al.*, "Deposition of nanocrystalline silicon thin films: Effect of total pressure and substrate temperature," *Thin Solid Films*, Jg. 516, Nr. 12, S. 3965–3970, 2008, doi: 10.1016/j.tsf.2007.07.190.
- [14] G. Beister *et al.*, "Advanced layer systems and coating techniques for large-area glass coatings by means of high-rate sputtering," *Glastech. Berichte*, Jg. 66, S. 175–183, 1993, doi: 10.34657/13994.
- [15] M. Arbab, "Sputter-Deposited Low-Emissivity Coatings on Glass," *MRS Bull.*, Jg. 22, Nr. 9, S. 27–35, 1997, doi: 10.1557/S0883769400033972.
- [16] N. Osterthun, H. Meddeb, N. Neugebohrn, K. Gehrke und M. Vehse, Hg., *Electron selective TiO_x contact for ultrathin amorphous germanium solar cells*, 49. Aufl. IEEE, 2022, doi: 10.1109/PVSC48317.2022.9938668.
- [17] X-Rite und Pantone, *A Guide to Understanding Color*.
- [18] N. Ruskaup, K. Gehrke, S. Heise und M. Vehse, "Color rendering of semi-transparent fully sputtered germanium solar cells: a sensitivity study," *Optics express*, Jg. 34, Nr. 5, S. 7701–7714, 2026, doi: 10.1364/OE.587861.
- [19] Flicker02. "Solar car park shade structure in Australia by PV Structures." [Online.] Verfügbar: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar-Car-Park-PV-Structures.jpg>
- [20] J. Aloha. "Greenwich Village School." [Online.] Verfügbar: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GREEN_ROOF_PS_41_-007.jpg