

JUGEND FORSCHT - PHYSIK



PROJEKTBERICHT

Herstellung, Optimierung und Untersuchung von lumineszierenden Solarkonzentratoren

TOM BÄRSCHNEIDER
LORIS LINKE
CONSTANTIN MOECKE

Betreut von
Herr Dr. Thomas Kaiser, Schülerforschungszentrum Gera
Frau Dr. Christina Walther, Schülerforschungszentrum Jena

Saalfeld (Thüringen), Januar 2021

Abstract In diesem Projektbericht stellen wir theoretische Grundlagen und praktische Ausführungen von lumineszierenden Solarkonzentratoren (LSC) vor. Hierfür haben wir die Luminophore in einer dünnen Schicht auf dem Wellenleiter angebracht und im Anschluss die entstandenen Konzentradorplatten untersucht und ausgewertet. Diese Platten haben unterschiedliche Modifikationen mit variierten Merkmalen wie Schichtdicke, Stapelung der Platten, Spiegeleinsatz und beidseitiges Bestreichen der Platte.

Unser Ziel ist während der Experimente die Materialkosten möglichst niedrig zu halten, weshalb wir auf preiswerte Komponenten wie den Farbstoff DCM (4-dicyanomethylene-2-methyl-6-p-dimethylaminostyryl-4H-pyran), PMMA (Polymethylmethacrylat) als Wellenleitmaterial, Toluol als Lösungsmittel und preisgünstige Solarzellen zurückgreifen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
1.1. Was möchten wir untersuchen?	4
1.2. Warum lumineszierende Solarkonzentratoren?	4
1.3. Aktueller Stand der Forschung und Wissenschaft	5
1.3.1. Funktionsweise eines LSC	5
1.3.2. Wahl der Luminophore	5
1.3.3. Bewertung eines LSC	6
2. Vorgehensweise, Materialien und Methoden	8
2.1. Herstellung der Konzentradorplatten	8
2.1.1. Materialien	8
2.1.2. Voruntersuchungen	8
2.1.3. Herstellung der Prototypen	9
2.2. Messung und Untersuchung der Platten	11
2.2.1. Experimentiergeräte	11
2.2.2. Messungen	11
3. Ergebnisse	12
3.1. Wahl des Solarmoduls	12
3.2. Die Solarkonzentradorplatten	12
3.2.1. Einfache Platte	12
3.2.2. Optimierungen	12
4. Ergebnisdiskussion	15
4.1. Grundlegende Erkenntniszusammenfassung der Optimierungen	15
4.2. Systematische Verbesserungsmöglichkeiten der LSC-Platten	15
4.3. Messunsicherheiten	16
4.4. Möglichkeiten für eine fortführende Untersuchung und offene Fragen	16
5. Fazit	17
A. Anhang	19
A.1. Mikroskopie-Fotografien	19
A.2. Unterstützungsleistungen und Erarbeitungsorte	20

1. Einleitung

Wir werden in den nächsten Jahrzehnten vor einige Probleme gestellt, mit deren Lösung wir uns bereits heute befassen müssen. Ein Beispiel dafür ist das zunehmende Bevölkerungswachstum und die damit einhergehende Urbanisierung der Gesellschaft, sowie der steigende Energiebedarf der Menschheit. Lumineszierende Solarkonzentratoren scheinen ein kleines, allerdings nicht unbedeutendes Puzzleteil auf dem Weg zu einer klimafreundlichen Zukunft zu sein. Doch was steckt hinter der vielversprechenden Idee, die von einigen Wissenschaftlern als eine verbreitete Möglichkeit der Energiegewinnung in der Zukunft gehalten wird?

1.1. Was möchten wir untersuchen?

Im Laufe unserer Abhandlung möchten wir auf Grundlage anderer Forschungen, theoretischen Begutachtungen und eigenen Experimenten beurteilen, wie luminescent solar concentrators (LSC) bzw. lumineszierende Solarkonzentratoren am besten zu konstruieren sind und dabei stets auf besonders preisgünstige Materialien und Mittel zurückgreifen. Wir wollen mehrere Modelle mit unterschiedlichen Eigenschaften herstellen, um in Anschluss durch Messungen herauszufinden, welche Merkmale sich als sinnvoll und effizient herausstellen.

1.2. Warum lumineszierende Solarkonzentratoren?

In den letzten Jahren wurden sehr viele Anstrengungen unternommen um herkömmliche Solarsysteme an unsere heutigen Bedürfnisse zu adaptieren. Doch diese besitzen einige Nachteile wenn man versucht, sie in urbane Gebiete einzubinden. Zum einen sind die Solarmodule häufig sehr massiv und schwer, zudem farblich nicht besonders ansprechend (schwarz oder dunkelblau) und die Form ist nicht sehr variabel (meist rechteckige Flächen). Diese Faktoren erschweren Architekten die Integration in städtische Gebiete massiv, und das obwohl Gebäudewände eine sehr große, potentielle Solarnutzfläche bereitstellen. Es wurden auch einige Versuche unternommen, die Nachteile auszubessern und dennoch an der klassischen Solartechnik festzuhalten. Dies könnte beispielsweise durch dünne Filme auf den Solarmodulflächen, die bestimmte Wellenlängen reflektieren und damit den Schein eines farbigen Solarmoduls erwecken sollen, erreicht werden. Daraus resultiert allerdings meistens eine eingeschränkte Effizienz der Systeme. Auch andere Solarkonzentratorarten bieten mehr oder weniger große Nachteile, bspw. das aufwändige und teure Nachführen der Sonnenbahn oder schlechte Performance in diffusem Sonnenlicht. Und an diesen Nachteilen punkten die LSCs: Sie sind zum einen sehr preiswert herzustellen, da die Arbeitsschritte nicht übermäßig komplex sind und durchaus maschinell übernommen werden könnten (Beattie u. a. 2012). Des Weiteren bieten sie viele architektonische Möglichkeiten und setzen dem Anwender dabei kaum Grenzen was Form, Farbe, Transparenz und Integration anbelangt, da sie zusätzlich extrem leicht sind. Was sie weiterhin für die städtische Anwendung qualifiziert ist die gute Performance in diffusem Licht, was in Großstädten vermehrt durch Autos, Häuserwände usw. auftritt (Carrascosa, Unamuno und Agullo-Lopez 1983; Goetzberger 1978; Tosun 2015). Insgesamt ist der Wirkungsgrad niedriger als bei herkömmlichen Solarsystemen, doch die massiven Vorteile der Integration und des Preises überwiegen in manchen Anwendungsbereichen denen der herkömmlichen Systeme. Besonders hier sollte man abwägen, auf welchen Standort und welche Fläche zur Stromgewinnung abgezielt wird. Während großflächige Solarparks besser

mit herkömmlichen PV-Systemen ausgestattet werden sollten, bietet sich der LSC in städtischen oder großstädtischen Gebieten sehr an.

1.3. Aktueller Stand der Forschung und Wissenschaft

1.3.1. Funktionsweise eines LSC

In der nebenstehenden Abbildung 1 ist eine einfache, flache Ausführung des LSC zu sehen, bei dem der transparente Wellenleiter mit Luminophoren dotiert ist. Photonen treffen auf die Platte und werden durch die Luminophore absorbiert und als Fluoreszenz emittiert. Dabei unterscheidet sich die emittierte Wellenlänge je um die Stokes-Verschiebung von der absorbierten. Ein großer Teil der emittierten Photonen wird durch Totalreflexion innerhalb des Wellenleiters gehalten und zu den Plattenrändern gebrochen. Diese Ränder sind entweder mit Solarzellen oder wahlweise (wie in unseren Experimenten) mit Spiegeln ausgestattet, sodass die Lichtenergie in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Ein Unterschied zwischen unserem Modell und dem der nebenstehenden Abbildung 1 ist, dass bei uns die Luminophore nicht im Wellenleiter sondern als dünne Schicht auf dem Wellenleiter aufgebracht ist. Eine Schwachstelle dieser Anwendung ist allerdings, dass es nicht selten zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Luminophore kommt.

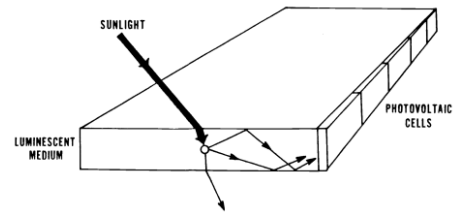


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines LSCs
(vgl. Friedman 1981, S. 890)

1.3.2. Wahl der Luminophore

Luminophore spielen eine Schlüsselrolle innerhalb des LSC. Sie sorgen dafür, dass nach dem Absorptionsprozess auch die Emission erfolgt und das Licht im Wellenleiter transportiert wird. Ein wichtiges Merkmal ist dabei die Stokes-Verschiebung, die sich maßgeblich in der Bewertung der Entropie und damit der Konzentration C widerspiegelt, wobei mit der Photonenenergie während der Absorption e_2 und der Emission e_1 , der Boltzmannkonstante k sowie der Temperatur T_0 , gilt:

$$C \approx \frac{e_2^3}{e_1^3} \exp \frac{e_1 - e_2}{k \cdot T_0} \quad (1)$$

Zusammenfassend stellen Debije und Verbunt (2012) folgende Merkmale eines effektiven Luminophores zusammen:

- breites Absorptionsspektrum
- große Stokes-Verschiebung (keine oder nur kleine Überlappungen im Absorptions- und Emissionsspektrums)
- hohe Lumineszenzeffizienz (Quantenausbeute)
- emittierte Photonen müssen von PV-Zelle umgewandelt werden können
- Löslichkeit

Seit Beginn der Forschung an LSCs werden vor allem organische Farben als Luminophore eingesetzt, da sie die meisten oben stehenden Merkmale in sich vereinen. Der von uns ausgewählte organische Farbstoff DCM (4-dicyanomethylene-2-methyl-6-p-dimethylaminostyryl-4H-pyran) hat ein relativ breites Absorptionsspektrum, eine große Stokes-Verschiebung von ca. 169 nm, wobei kaum Überlappungen auftreten (s. Abbildung 2). Weiterhin besitzt er eine gute Quantenausbeute von $\approx 80\%$ (Batchelder, Zewall und Cole 1981; Drake u. a. 1982), wohingegen die niedrige Photostabilität als Nachteil gegenüber anderer Farbstoffe ausgelegt werden kann.

Außerdem ist ein großer Nachteil von organischen Farben, dass sie nur einen begrenzten Absorptionsbereich haben. Um diesem Effekt entgegenzuwirken ist es durchaus denkbar, dass mehrere Farben mit unterschiedlichen Absorptionsspektren in verschiedenen LSC-Schichten eingesetzt werden könnten, wodurch allerdings die Transparenz eingeschränkt, aber auch beeinflusst werden könnte.

1.3.3. Bewertung eines LSC

Konzentrationsverhältnis: Ein wichtiger Punkt bei der Beschreibung eines LSC ist der „geometric gain“ G_{geom} , welcher das Konzentrationsverhältnis zwischen Plattenoberfläche $A_{\text{Oberfl.}}$ und Plattenrändern A_{Seiten} mit

$$G_{\text{geom}} = \frac{A_{\text{Oberfl.}}}{A_{\text{Seiten}}} \quad (2)$$

beschreibt (vgl. Batchelder, Zewall und Cole 1981, S.3744).

Critical cone loss: Unter Anwendung des Snelliusschen Brechungsgesetzes lässt sich ein kritischer Winkel berechnen, welcher bei Überschreitung zu Totalreflexion führt und damit das Licht im Wellenleiter transportiert wird. Dieser kritische Winkel ist definiert als

$$\vartheta_c = \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \right), \quad (3)$$

wobei n der Brechungsindex von PMMA ($n_{\text{PMMA}} = 1,49$) ist. Mit Hilfe des Winkels ϑ_c lässt sich durch die von Friedman (1981, S. 889), Debije und Verbunt (2012, S.14) aufgestellte Gleichung der Anteil der Totalreflexionsverluste (engl.: total critical cone loss) L berechnen:

$$L = 1 - \cos \vartheta_c \quad (4)$$

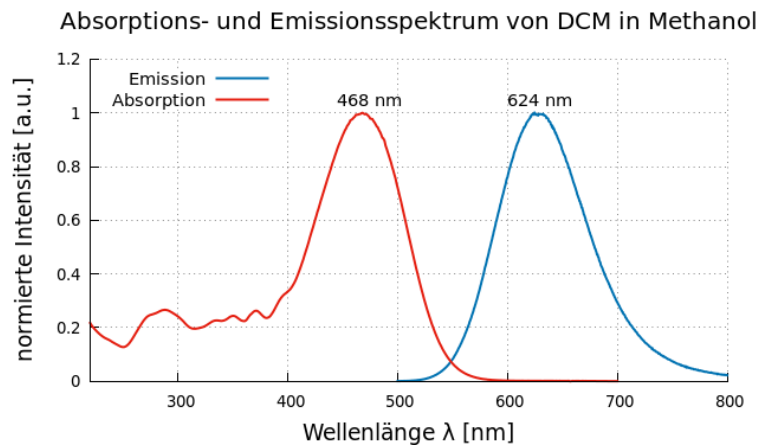


Abbildung 2: Absorptions- und Emissionsspektrum von DCM in Methanol.

Erstellt nach Daten von Taniguchi, Du und Lindsey (2018) & Taniguchi und Lindsey (2018), normiert auf 1.

Kombiniert man beide Gleichungen, so gelangt man zu

$$L = 1 - \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Das Ergebnis gibt die prozentualen Verluste im Wellenleiter beim Übergang in Luft an.

Gesamtsystemeffizienz: Um die Wirkungsweise eines Solarkonzentrators zu bewerten und zu beurteilen gibt es mehrere unterschiedliche Ansätze in der Fachliteratur. Während einige Forscher auf den Wirkungsgrad zurückgreifen, stellt Friedman (vgl. 1981, S. 890) eine Formel zur sogenannten Gesamtsystemeffizienz auf:

$$\eta = \frac{J_m \cdot V_m \cdot a_e \cdot D}{I_i \cdot a_p \cdot a_c} \quad (6)$$

J_m	max. Stromstärke
V_m	max. Spannung
a_e	Randfläche der Platte
D	Unterschied der Leistung zwischen Plattenrand und Plattenmitte
I_i	in das System eingegebene Leistung
a_p	Photovoltaikzellenfläche
a_c	Plattenoberfläche

Im Laufe unserer Abhandlung werden wir uns hauptsächlich auf die Gesamtsystemeffizienz beziehen, da sie mehrere Aspekte im Vergleich zum Wirkungsgrad einbezieht, welcher auch stärker von der Qualität der außen angebrachten Solarzellen abhängig ist.

2. Vorgehensweise, Materialien und Methoden

2.1. Herstellung der Konzentradorplatten

2.1.1. Materialien

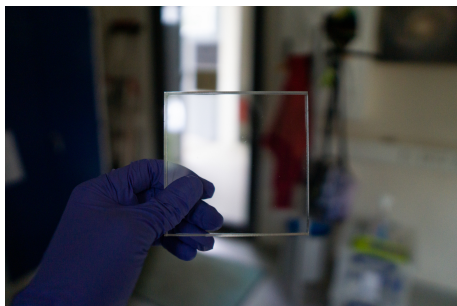


Abbildung 3: unbestrichene PMMA-Platte

Zum Bau der Platten nutzten wir zunächst **PMMA** (Polymethylmethacrylat) als Wellenleiter, was sich vor allem durch die glasähnlichen Eigenschaften anbietet, allerdings auch weitere Vorteile gegenüber Glas mit sich bringt, wie eine höhere Transmission und niedrigeren Brechungsindex n (wichtig für critical cone loss; siehe Gleichung 5). Das PMMA wurde vor den Experimenten in $10\text{ cm} \cdot 10\text{ cm} \cdot 0,8\text{ cm}$ große Platten geschnitten, die als Grundmaterial für unseren LSC dienen.

Des Weiteren benötigten wir den Farbstoff **DCM** (4-dicyanomethylene-2-methyl-6-p-dimethylaminostyryl-4H-pyran) welcher sich durch die unter Abschnitt 1.3.2 beschriebenen Vorteile auszeichnet. Der Kostenpunkt hierbei lag bei $42,30\text{ €}$ für 250 mg .

Da PMMA nur gegenüber wenigen Lösungsmittel unbeständig ist, nutzten wir **Toluol**. Auch um zu einee gesättigte Farbstoff Lösung herzustellen eignet es sich.

Außerdem benötigten wir diverse Laborgerätschaften wie Pipetten (darunter auch eine Eppendorfpipette), Bechergläser, Heizrührer, Abzug und Spatel. Für die Voruntersuchungen haben wir zudem Platten mit dem Farbstoff Nilrot angefertigt, sowie die Löslichkeit von PMMA in Aceton getestet.

2.1.2. Voruntersuchungen

PMMA auflösen

Um eine PMMA-Toluol-Lösung herzustellen die eine passende Viskosität zum aufstreichen auf die Platten aufweist, versuchten wir zunächst ein $0,736\text{ g}$ leichtes PMMA-Prisma in Toluol aufzulösen. Als dieses Vorgehen nicht den gewünschten Erfolg erzielte, da die Reaktion zu langsam verlief, nutzten wir die vom SFZ Jena bereitgestellte Standbohrmaschine um einige PMMA-Raspeln aus Verschnittresten der PMMA-Platten herauszubohren. Im Anschluss lösten wir $0,96\text{ g}$ der PMMA-Raspel in 10 ml Toluol auf. Diesen Prozess unterstützten wir mit einem Heizrührer auf 40 °C und 110 Umdrehungen pro Minute. Da die entstandene Lösung zum einen zu dickflüssig war und außerdem noch ungelöste PMMA-Reste im Becherglas hinterblieben waren, fügten wir nochmals 10 ml Toluol hinzu. Mit Hilfe einer Eppendorf-Pipette verteilten wir 1 ml der entstandenen PMMA-Toluol-Lösung auf eine PMMA-Platte mit abgeklebten Seitenrändern von 1 cm .



Abbildung 4: Lösevorgang von PMMA in Toluol auf dem Heizrührer

Aus der ersten Voruntersuchung konnten wir zu folgenden Erkenntnissen für unsere weitere Forschung gelangen:

- Die PMMA-Reste mussten zum Auflösen klein und im Verhältnis zum Volumen eine große Oberfläche aufweisen, deshalb haben wir die Raspeln einer Standbohrmaschine genutzt.
- Man benötigt ein Verhältnis von 20 ml Toluol auf 1 g PMMA um eine Lösung herzustellen, die eine passende Viskosität aufweist, sowie nahezu alle PMMA-Reste löst.
- Für eine ausreichende Schichtdicke sollte ca. 1 ml der entstandenen Lösung auf die PMMA-Platte aufgetragen werden.

Anreichern der PMMA-Toluol-Lösung mit Farbe

Mit der fertigen PMMA-Toluol-Lösung führten wir daraufhin einige Experimente unter Nutzung des Testfarbstoffes Nilrot durch, um herauszufinden, wie viel Farbe wir benötigen um eine transparente aber dennoch genug absorbierende Lösung herzustellen. Dazu führten wir schrittweise Nilrot der Lösung hinzu, bis diese leicht rosafarben wurde. Diese neue Lösung verteilten wir auf einer Platte und es zeigte sich, dass insgesamt zu wenig Farbstoff beigemischt wurde, da die Platte nahezu transparent war. Dieses Problem lies sich allerdings mit einer doppelten Schichtdicke, d.h. 2 ml PMMA-Toluol-Nilrot Lösung teilweise beheben.

Während der Voruntersuchungen mit Nilrot entstanden 2 Platten:

- einschichtig bestrichen
- zweischichtig bestrichen

2.1.3. Herstellung der Prototypen

Mit dem Wissen der Voruntersuchungen konnten wir im Anschluss die LSC-Platten unter Benutzung des Farbstoffes DCM herstellen.

Herstellung einer DCM-Toluol-Lösung Da der Farbstoff pulverartig ist, mussten wir zunächst das DCM in Toluol auflösen. Während unserer Rechercharbeiten konnten wir keine Angaben zur Löslichkeit von DCM in Toluol finden, weshalb wir zunächst 10 ml Toluol auf 50 mg Farbe mischten. Hierbei entstand eine übersättigte Lösung, deshalb stellten wir durch erneutes Filtern eine gesättigte Lösung mit ca. 30 ml Toluol auf 50 mg DCM her. Außerdem mussten wir das DCM mit Toluol mischen, da sich die Farbschicht mit der PMMA-Platte verbinden sollte, um so die Totalreflexion zu ermöglichen.

Vermischen der DCM-Toluol-Lösung mit der PMMA-Toluol-Lösung Um eine gleichmäßige, rot-orange Lösung zum Auftragen auf die PMMA-Platten herzustellen, reicherten wir unter Zuhilfenahme eines Heizrührers mit 40 °C und 100 Umdrehungen pro Minute, die PMMA-Toluol-Lösung schrittweise mit je 0,5 ml der DCM-Toluol-Lösung an. Das Ergebnis war ein Mischverhältnis von 3:2 zwischen der DCM-Toluol- und PMMA-Toluol-Lösung.

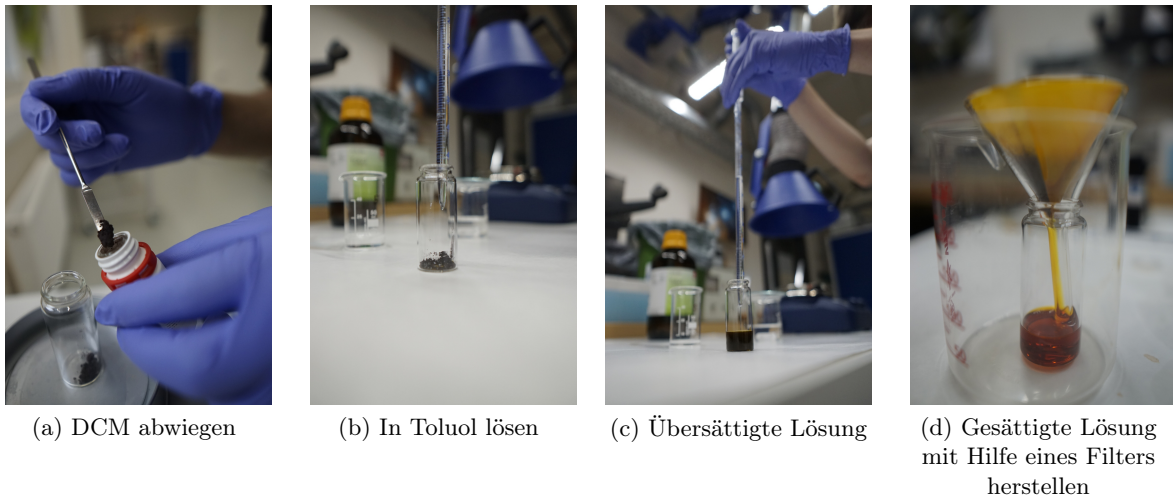


Abbildung 5: Herstellung einer gesättigten DCM-Toluol-Lösung

Auftragen der DCM-PMMA-Toluol-Lösung auf die PMMA-Platten Auch hier konnten wir das Wissen aus den Vorbetrachtungen anwenden, in dem wir 1 ml der Lösung mit Hilfe einer Eppendorfpipette auf der Platte verteilen. Damit die Lösung nicht an den Plattenrändern herunterläuft, sondern ein klarer Rand entsteht, klebten wir auf der Plattenoberseite der PMMA-Platten einen je 1 cm breiten Rand mit transparentem Klebeband an. Um während der Messungen herauszufinden, welche Platteneigenschaften sich als effektivste Möglichkeit herausstellten, erstellten wir Platten mit folgenden besonderen Charakteristika:

1. einschichtig bestrichen
2. zweischichtig bestrichen
3. dreischichtig bestrichen
4. vierschichtig bestrichen
5. fünfschichtig bestrichen
6. beidseitig bestrichen, einschichtig
7. 2 Platten geschichtet, beide einschichtig bestrichen, Toluol als Verbindungsmittel
8. 2 Platten geschichtet, beide einschichtig bestrichen, DCM-Lösung als Verbindungsmittel
9. gesättigte DCM-Toluol-Lösung, einschichtig bestrichen

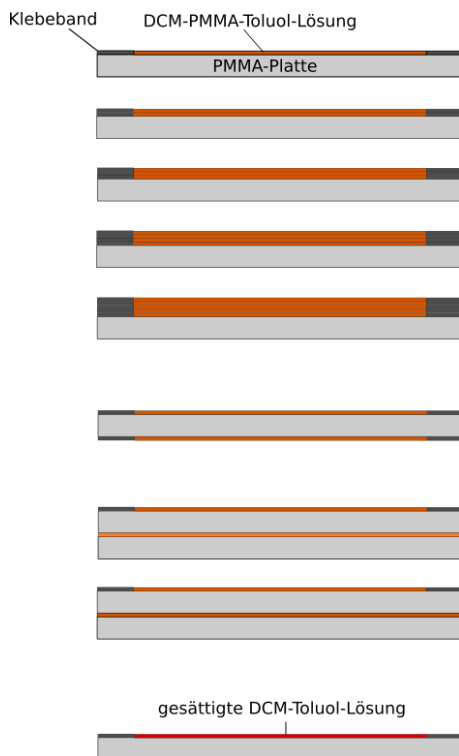


Abbildung 6: Konstruktionsmodifikationen der Platten

2.2. Messung und Untersuchung der Platten

Nachdem die Platten über einen Zeitraum von zwei Wochen trockneten, konnten wir mit unseren Messungen fortfahren. Dazu stellte uns die LICHTWERKSTATT JENA einen Solarsimulator zur Verfügung, mit Hilfe dessen wir unsere LSC-Platten testeten.

2.2.1. Experimentiergeräte

Für unsere Untersuchungen unter dem Solarsimulator benötigten wir neben eines Spektrographes außerdem Solarmodule, intransparentes Klebeband, Spiegel und ein Multimeter zum Messen der durch das PV-Modul bereitgestellten Spannung U und Stromstärke I .

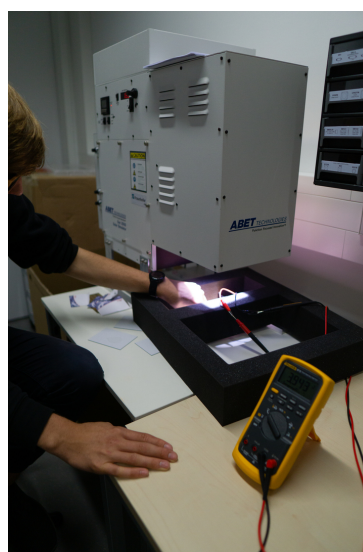
2.2.2. Messungen

Der Vergleich des Spektrums des Solarsimulators mit dem der Sonne mit Hilfe eines Spektrographes zeigte, dass der Simulator das Spektrum hinreichend genau widerspiegelt. Uns standen vier einfache und preiswerte Solarmodule ($\approx 8\text{€} / \text{Stück}$) zur Verfügung, welche Außenmaße von $6\text{ cm} \cdot 11\text{ cm}$ aufwiesen. Da wir für unsere Messungen nur ein Modul benötigten, charakterisierten wir alle vier und nutzten das Modul, welches die höchste Leistung unter dem Simulator erreichte. Wir entschieden uns beabsichtigt für günstige Module, da wir uns, wie in der Einleitung erwähnt, zum Ziel setzten, einen möglichst preiswerten LSC zu bauen und zu testen. Da die Außenmaße der PV-Module nicht der Größe der Plattenränder entsprach, klebten wir mit intransparentem Klebeband die überschüssigen Teile des Moduls ab, bis kaum noch Photonen durch das Klebeband gelangen konnten.

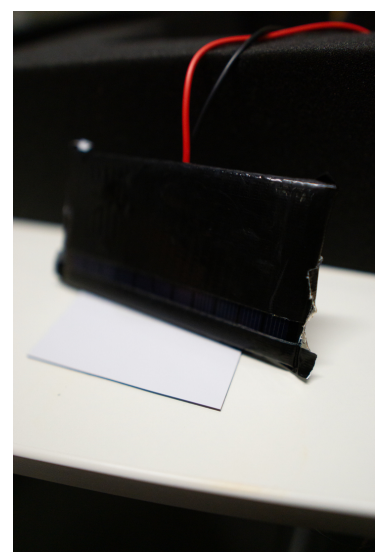
Im Laufe des Messvorgangs legten wir die einzelnen LSC-Platten unter den Solarsimulator und hielten das abgeklebte Solarmodul an je einen Rand des LSCs. Um mögliche Unregelmäßigkeiten auszuschließen und am Ende einen repräsentativen Mittelwert zu erhalten, wiederholten wir die Messdurchgänge mehrmals. Des Weiteren starteten wir auch eine Messreihe, in der wir an verschiedenen Ecken der Platten Spiegel anbrachten.



(a) Sonnenspektrum analysieren



(b) Messungen unter dem Solarsimulator



(c) Abgeklebte Solarzelle

Abbildung 7: Messvorgang

3. Ergebnisse

3.1. Wahl des Solarmoduls

Bei dem Vergleich zwischen den vier Solarmodulen fällt zunächst auf, dass eines eine $\approx 15\%$ schlechtere Leistung bereitstellte als die anderen Modelle. Dieser Versuch schloss herstellungsbedingte Unregelmäßigkeiten der Solarmodule aus.

Nach unseren Experimenten mussten wir feststellen, dass Spannung und Stromstärke der von uns genutzten Solarzelle um circa 4% gesunken sind, was unserer Einschätzung nach durch die Temperaturdifferenzen, die im Zusammenhang mit dem Solarsimulator entstanden sind, zu begründen ist.

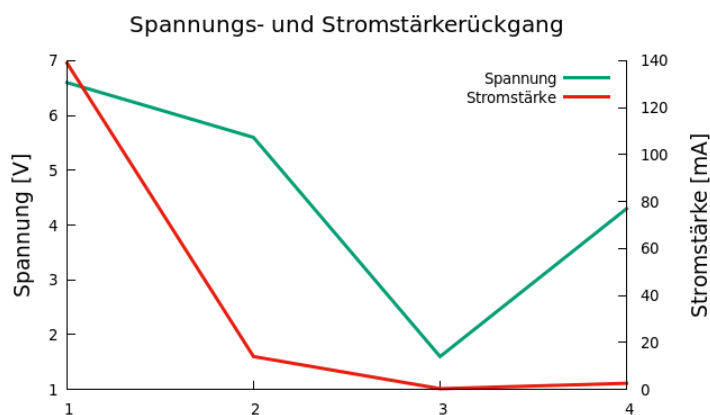


Abbildung 8: Die Entwicklung der Spannung bei verschiedenen Bezugspunkten: (1) nicht abgeklebt, direkte Einstrahlung. (2) abgeklebt, direkte Einstrahlung. (3) indirekte Einstrahlung ohne LSC. (4) abgeklebt, indirekte Einstrahlung durch LSC.

Nach dem Abkleben und in verschiedenen Stellungen zum einfallenden Solarsimulatorlicht, ergibt sich der in Abbildung 8 zu sehende Spannungsrückgang.

Wichtig bei der Einordnung unserer Ergebnisse ist, dass man die gemessenen Spannungen (bzw. Stromstärken) nicht mit Bezugspunkt 1 oder 2 auf der nebenstehenden Abbildung 8 vergleichen kann, da diese Werte durch eine unbeklebte bzw. direkt unter dem Solarsimulator liegende Solarmodule hervorgerufen werden. Viel bedeutender ist der Unterschied zwischen Bezugspunkt 3 und 4.

3.2. Die Solarkonzentratorplatten

3.2.1. Einfache Platte

Die unoptimierte Platte mit einer konzentrierten Stromstärke von $I_{LSC} = 2,6 \text{ mA}$ und einer Spannung von $U_{LSC} = 4,1 \text{ V}$ erreicht damit eine Gesamtsystemeffizienz von 0,7% (siehe auch Abbildung 11, S. 14). Wenn man die Leistung bei Einsatz der einfachen Platten mit der ohne LSC vergleicht fällt auf, dass die Leistung mit LSC-Platte um das fast 9-Fache steigt. Das wird auch in Abbildung 8 deutlich.

3.2.2. Optimierungen

Beschichtung Abbildung 9 zeigt, dass sich kaum eine Veränderung beim Erhöhen der Schichtdicke einstellt. Es lässt sich daraus ableiten, dass das einmalige auftragen der Farbe durchaus ausreicht und das dabei die Luminophore nahezu alle Photonen der Wellenlänge absorbieren, was darauf schließen lässt, dass sich der Farbstoff DCM für die Anwendung gut eignet, da er die Merkmale eines effizienten Luminophors (Unterunterabschnitt 1.3.2, S. 5) widerspiegelt.

Außerdem wird bei diesem Optimierungsschritt deutlich, dass eine einzige doppelseitig bestrichene Platte die höchste elektrische Leistung erzielen kann. In diesem Fall ist die Stromstärke um über 40 % gestiegen und die Gesamtleistung um über 50 %.

Eine geringere Leistung lieferte die Platte mit der gesättigten DCM-Lösung ohne PMMA-Zusatz, was vor allem der ungleichmäßigen Verteilung (15b, S. 19) und der Tatsache, dass weniger Toluol und damit Verbindungsstoff zwischen Platte und Farbe vorhanden war¹, zu verdanken ist.

Wir sehen allerdings im Diagramm, dass diese Werte von den mehrschichtigen, also gestapelten Platten übertroffen werden.

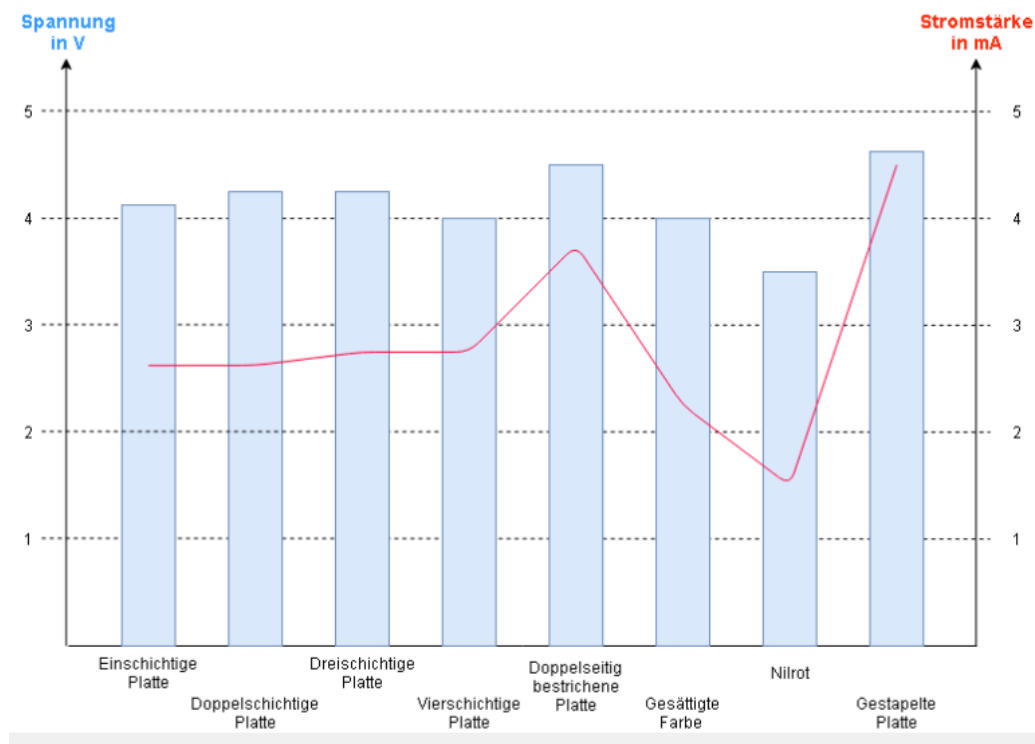


Abbildung 9: Spannung und Stromstärke unter den Optimierungspunkten Beschichtung und gestapelte Platten

Gestapelte LSCs Um die Platten miteinander zu verbinden, haben wir zum einen Toluol und zum anderen die DCM-Toluol-Lösung als Verbindungsmittel genutzt. Die Ergebnisse sind, wie in Abbildung 9 zu sehen, viel höher als bei der nicht optimierten Platte und sogar höher als die der doppelseitigen. Das liegt zum einen daran, dass wir die doppelte Solarzellenfläche nutzen, da die mehrschichtigen Platten höher sind. Diese Aussage lässt sich aber mit Blick auf die Gesamtsystemeffizienz² negieren, da sie bei 1,4 % liegt. Die Begründung für diese gute Performance könnte durch die Übergänge begründet sein, die eine doppelte Möglichkeit für Totalreflexion bilden. Allerdings ist es beim Stapeln der Platten zu Luft einschließen und Bläschenbildung zwischen den Platten gekommen (siehe 13b und Abbildung 14, S. 19).

¹unebene und verunreinigte Flächen stören die Totalreflexion

²Die Gesamtsystemeffizienz bezieht auch die Randfläche und PV-Fläche mit ein, weshalb sie im Vergleich zum Wirkungsgrad als repräsentativer gilt.

Spiegel Die Idee hinter dem Einsatz von Spiegeln besteht darin, dass sie an den Seiten ohne PV-Zellen angebracht werden, sodass keine Photonen aus diese Seiten gelangen können, sondern zurück in die Platte reflektiert werden. Vor allem am Beispiel Nilrot wird deutlich, dass Spiegel sehr viel bewirken können (siehe auch Abbildung 10).

Bei einem Spiegel, der auf der gegenüberliegenden Seite der Solarzelle angebracht wurde, steigt die Leistung um über 120% an. Bei den anderen Plattenarten ist dieser Anstieg mit 36% und 67% auch sehr beachtlich. Bei der Ausrüstung von zwei weiteren Seiten ist steigt die Leistung nochmals um durchschnittlich 14%.

Dennoch lässt sich die Auswirkung bei der Gesamtsystemeffizienz nicht erkennen, da durch das Anbringen der Spiegel auch die Randflächen kleiner werden. Im Gegenteil: Die Gesamtsystemeffizienz sinkt sogar im Vergleich zu den anderen (siehe auch Abbildung 11), allerdings lässt sich der Preis des Systems durch Spiegel senken.

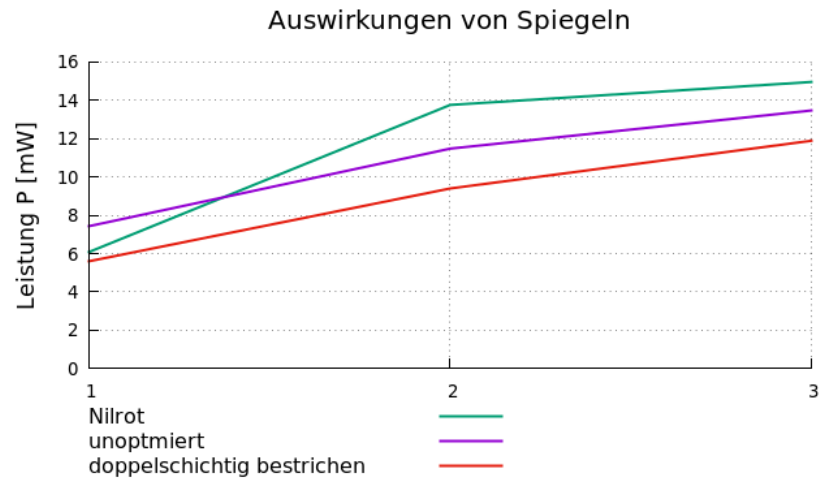


Abbildung 10: Messergebnisse mit Spiegeln: (1) ohne Spiegel. (2) mit einem Spiegel. (3) mit drei Spiegeln.

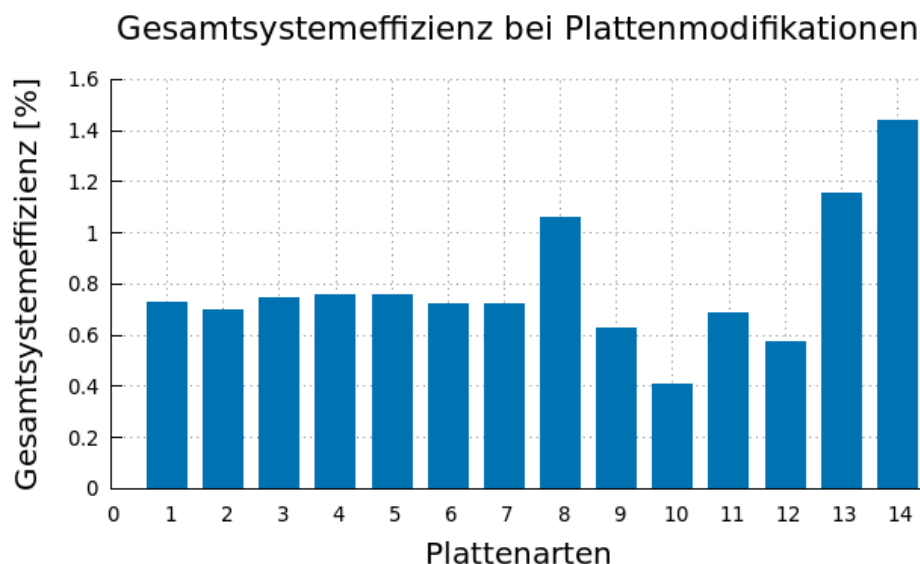


Abbildung 11: Gesamtsystemeffizienz anhand einer Plattenmodifikationen: (1,2) einschichtig bestrichen. (3,4) doppelschichtig bestrichen. (5) dreischichtig bestrichen. (6) vierschichtig bestrichen. (7) fünfschichtig bestrichen. (8) oben und unten bestrichen. (9) ungesättigte DCM-Lösung. (10) Nilrot. (11) Nilrot mit einem Spiegel. (12) doppelschichtig bestrichen, m. Spiegel. (13) doppelte Platte. (14) doppelte Platte umgedreht.

4. Ergebnisdiskussion

4.1. Grundlegende Erkenntniszusammenfassung der Optimierungen

Auf die Frage, welche Optimierung sich am meisten lohnen würde, gibt es verschiedene Ansätze und Antworten. Zum einen ist es vom Preis abhängig, d.h. es lohnt sich natürlich am meisten, wenn an jede Seite der Platte ein Solarmodul angebracht wird, allerdings resultiert daraus ein erhöhter Preis für das System. Eine preiswertere Alternative dazu bilden Spiegel, die einen guten Kompromiss zwischen Effizienz und Preis herstellen. Mehrschichtiges Auftragen der Farbschicht lohnt sich, zumindest bei DCM, kaum und die Nutzung der gesättigten DCM-Lösung bringt sogar Leistungseinbußen mit sich. Gestapelte Platten können sich sowohl mit, als auch ohne Spiegel bewähren, sind allerdings um einiges breiter, schwerer und es werden mehr Solarzellen für die Ränder benötigt. Die Gesamtsystemeffizienz spiegelt hierbei zwar mehrere Aspekte der Bewertung wieder, dennoch bleiben einige unbeachtet (bspw. Qualität bzw. Wirkungsgrad der PV-Zelle). Es muss vor allem klar sein, was die preislich und effizienten Anforderungen an das System sein sollen, um zu bewerten, was sich tatsächlich lohnt und was nicht.

4.2. Systematische Verbesserungsmöglichkeiten der LSC-Platten

Aufstrichdicke Da wir kein Laborgerät zum gleichmäßigen Aufstreichen der Farbe hatten, sind die Schichtdicken der Farbe auf den Platten ungleichmäßig verlaufen und es sind leichte Schichtdickenunterschiede und Farbverläufe zu erkennen. Zwar ist überall 1 ml der PMMA-DCM-Lösung aufgetragen worden, dennoch ist durch das möglicherweise schiefe Lagern die Farbe verlaufen. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass durch diese Unregelmäßigkeiten die Totalreflexion nicht so effizient auftritt, da sie durch raue Oberflächen oder unterschiedliche Schichtdicken durchaus negativ beeinflusst werden kann. Wir denken allerdings nicht, dass dieser Fakt unsere Ergebnisse maßgeblich verändert hat, dennoch ist es bei manchen Platten ein Schönheitsfehler, den wir das nächste mal besser vermeiden würden.

Ränder Um die Farbe in einer gleichmäßigen Schicht aufzutragen und verlaufen zu lassen, haben wir an den Rand jeder Platte eine 1 cm breite Klebebandschicht angebracht. Zum einen ist bei einigen Platten die Farbe unter das Klebeband gelaufen (siehe 16b, S. 20), weshalb teilweise kein genauer Farbbrand auszumachen ist. Zum anderen hat diese Konstruktion den Nachteil, dass wir statt mit der eigentlichen Plattengröße von 10 cm · 10 cm, mit einer Nutzfläche von 8 cm · 8 cm rechnen mussten.

PMMA Rückstände Trotz des leichten Erhitzens und der Drehbewegung des Magnetrührers ist es uns nicht gelungen das PMMA vollständig aufzulösen. Es waren bei jeder Lösung kleine Raspeln vorhanden (siehe Abbildung 17, S. 20), die sich zum einen auf die Zusammensetzung der Stammlösung auswirken, zum anderen möglicherweise auch das genaue Abmessen mittels der Eppendorfpipette beeinflussen. Dieser Fehler könnte beachtliche Auswirkungen auf unser Messergebnis haben, da durch die PMMA-Rückstände die Totalreflexion gestört worden sein könnte.

Löslichkeit der Farbe Da wir die Löslichkeit der Farbe durch unsere Recherchen nicht herausfinden konnten, haben wir mit Hilfe eines Filters aus der übersättigten, eine gesättigte Lösung hergestellt. Durch dieses Vorgehen konnten wir im Endeffekt nicht genau sagen, wie viel Farbstoff in der Stammlösung gelöst ist.

4.3. Messunsicherheiten

Temperaturabhängigkeit Nachdem wir die ausgewählte Solarzelle vor und nach den durchgeführten Messungen charakterisiert haben, ist uns aufgefallen, dass ein durchaus markanter Leistungsabfall vorhanden ist. Da die Messzeit von ca. 3 Stunden für den teilweisen Verschleiß nicht ausreicht, gehen wir davon aus, dass diese Verschlechterung auf die Temperaturdifferenzen zurückzuführen ist.

Abgeklebtes Solarmodul Wir haben die Fläche des Moduls, die nicht am Rand des LSC anliegt, mit mehreren Schichten schwarzem Klebeband abgeklebt. Zum einen ist es möglich, dass trotz unserer Tests zur Lichtdurchlässigkeit, Solarsimulatorstrahlung durch das Klebeband gelangt sein könnte. Vor allem bei Anwendung der Spiegel ist es möglich, dass es zu Abweichungen kommt. Des Weiteren entspricht die freie Fläche nicht exakt die den Maßen der Ränder des LSC. Mit so minimalen Abweichungen, lässt sich allerdings annehmen, dass das Ergebnis nicht außerordentlich beeinflusst wurde.

Versuchsaufbau Messung Der Versuchsaufbau der Messung konnte unter dem Solarsimulator nicht als statischer Aufbau erfolgen, wodurch leichte Abweichungen durch das Anhalten des Solarmoduls oder dem Winkel zum Sonnensimulator nicht auszuschließen sind. Wir konnten diesen Fehler allerdings durch mehrere Messdurchgänge minimieren.

4.4. Möglichkeiten für eine fortführende Untersuchung und offene Fragen

Obwohl wir mit unseren Forschungsergebnissen durchaus zufrieden sind, herrscht in dem Gebiet rund um LSC noch Forschungsbedarf. Eine Frage, die während unserer Untersuchungen offen geblieben ist: Wie wirkt sich die Gesamtgröße der Platte auf das Endergebnis aus. Klar ist, dass die der Wirkungsgrad des gesamten Systems sinkt, da die Wahrscheinlichkeit, dass die Photonen durch die Totalreflexion in der Platte gehalten werden ebenfalls sinkt. Dieser Faktor wird in der Gleichung zur Gesamtsystemeffizienz (s. Gleichung 6, S.7) durch das D widerspiegelt. Möglicherweise stellt es sich als effizienter heraus, nur kleine, abgetrennte Cluster zu bauen und diese im Anschluss zu einer größeren Fläche zusammenzusetzen, wie es in Abbildung 12 zu sehen ist.

Des Weiteren bleibt die Frage offen, inwiefern es sich lohnt, mehrschichtige Platten mit unterschiedlichen Farben herzustellen, die jeweils ein Solarzellentyp am Rand angebracht haben, die eben diese absorbierte und nach der Stokes-Verschiebung emittierte Welllänge mit hoher Effizienz

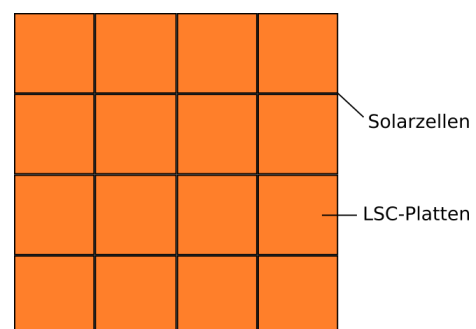


Abbildung 12: Für die großflächige Anwendung von LSC könnte eine Cluster-Struktur nötig sein. Diese birgt den Nachteil, dass schwarze Rahmen durch die Anbringung der Solarzellen zu sehen sind.

in elektrische Energie umwandeln können. Mit Hilfe dieser Methode könnte eine um möglicherweise sehr viel höhere Gesamtsystemeffizienz nach Gleichung 6 erreicht werden. Außerdem könnte mittels verschiedener Farbschichten eine individuelle Transparenz der Scheiben erreicht werden. Der Nachteil hierbei ist, dass die Preise für die Platten durch den Einsatz mehrerer verschiedener Solarmodule enorm ansteigen würden, weshalb der große Vorteil einer preisgünstigeren Alternative verblasen würde.

5. Fazit

Alles in allem sind wir sehr zufrieden mit unseren Forschungsergebnissen. Wir denken, dass wir mit relativ geringen Materialkosten ($< 80 \text{ €/m}^2$) ein sehr gutes Ergebnis erzielen konnten: Wenn man unsere beste Solarkonzentratorscheibe auf 1 m^2 strecken würde, würden in Bestzeiten $2,3 \text{ W/m}^2$ entstehen. Das scheint im Gegensatz zu den herkömmlichen Solarsystemen mit durchschnittlich 100 W/m^2 nicht viel, doch zum einen überwiegen in einigen Anwendungsbereichen die architektonischen, in anderen die preislichen Vorteile³ und zum anderen konnten wir ohne jegliche maschinelle Hilfe oder extrem aufwendige oder komplexe Arbeitsschritte mehrere Platten herstellen. Wenn LSCs industriell hergestellt werden würden, würden einige der Fehler, die unser Ergebnis negativ beeinflusst haben nicht passieren können und der Preis könnte weiter nach unten gedrückt werden.

Es ist allerdings auch selbstverständlich, dass nicht jeder Anwendungsbereich für lumineszierende Solarkonzentratoren sinnvoll ist. Die Effizienz großflächiger Solaranlagen in Äquatorialnähe werden LSCs wahrscheinlich auch in Zukunft nicht erreichen können. Sie sollten vielmehr als eine Ergänzung zu Solarsystemen verstanden werden, die ohne großen preislichen Aufwand zusätzlichen Strom produzieren. Was spricht also dagegen, dass flächendeckend Hochhausfenster als LSCs gestaltet und ausgestattet werden?

³Wie unter 1.2 S. 4 beschrieben.

Literatur

- Batchelder, J.S., A.H. Zewall und T. Cole (1981). „Luminescent solar concentrators. 2: Experimental and theoretical analysis of their possible efficiencies“. In: *Applied Optics* 20.21, S. 3687–3814.
- Beattie, Neil u. a. (2012). „A low cost Luminescent Solar Concentrator“. In: *Photovoltaic Science Applications and Technology PVSAT-8*. Northumbria Photovoltaics Applications Centre, Northumbria University. URL: http://nr1.northumbria.ac.uk/6450/1/PVSAT-8_033_Paper_Beattie_v3.pdf.
- Carrascosa, M., S. Unamuno und F. Agullo-Lopez (1983). „Monte Carlo simulation of the performance of PMMA luminescent solar collectors“. In: *Appl. Opt.* 22.20, S. 3236–3241. URL: <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-22-20-3236>.
- Debije, Michael G. und Paul P. C. Verbunt (2012). „Thirty Years of Luminescent Solar Concentrator Research: Solar Energy for the Built Environment“. In: *Advanced Energy Materials* 2.1. Germany, S. 12-35.
- Drake, J. M. u. a. (1982). „Organic dyes in PMMA in a planar luminescent solar collector: a performance evaluation“. In: *Appl. Opt.* 21.16, S. 2945–2952. URL: <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-21-16-2945>.
- Friedman, Peter S. (1981). „Luminescent solar concentrators“. In: *Optical-Engineering(United States)* 20.6. Toledo, Ohio, S. 887-892.
- Goetzberger, A. (1978). „Fluorescent solar energy collectors: Operating conditions with diffuse light“. In: *Applied Physics* 16, S. 399.
- Taniguchi, Masahiko, Hai Du und Jonathan S. Lindsey (2018). „PhotochemCAD 3: Diverse Modules for Photophysical Calculations with Multiple Spectral Databases“. In: *Photochemistry and Photobiology* 94.2, S. 277–289. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/php.12862>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/php.12862>.
- Taniguchi, Masahiko und Jonathan S. Lindsey (2018). „Database of Absorption and Fluorescence Spectra of >300 Common Compounds for use in PhotochemCAD“. In: *Photochemistry and Photobiology* 94.2, S. 290–327. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/php.12860>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/php.12860>.
- Tosun, Tugce (2015). „Luminescent solar concentrator“. In: *SPOOL* 2.1. Netherland, S. 21-23. URL: <https://journals.open.tudelft.nl/spool/article/view/946>.

A. Anhang

A.1. Mikroskopie-Fotografien

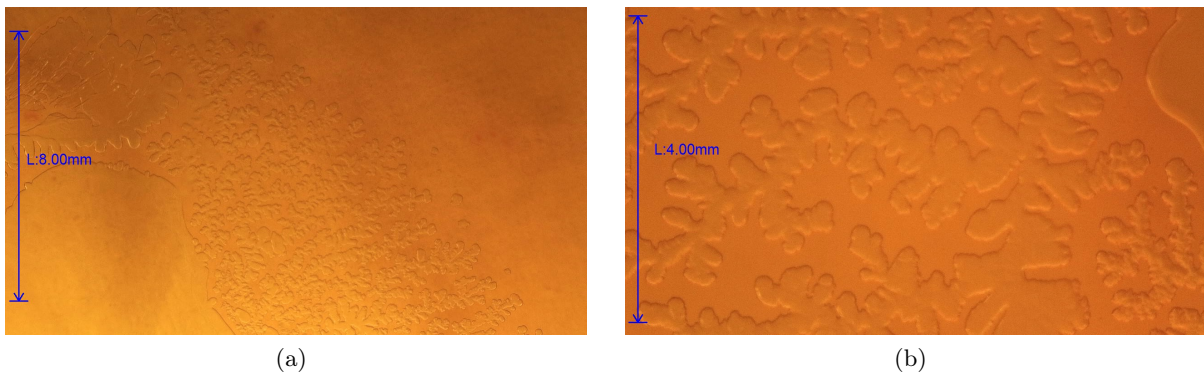


Abbildung 13: Lufteingüsse bei gestapelten Platten

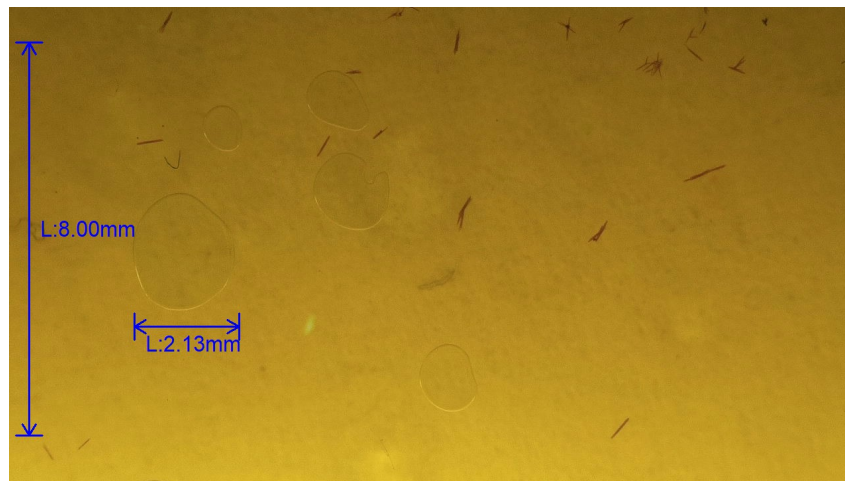


Abbildung 14: Luftblasen zwischen gestapelten Platten

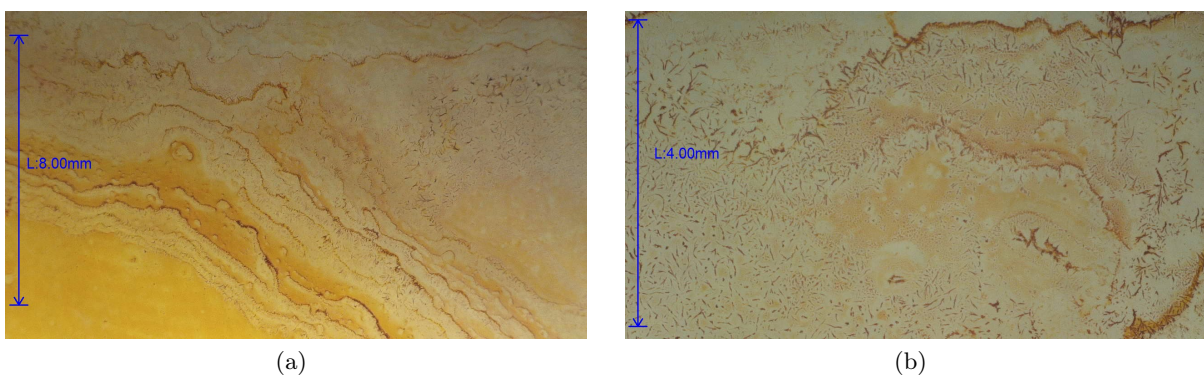


Abbildung 15: Reine DCM-Toluol-Lösung

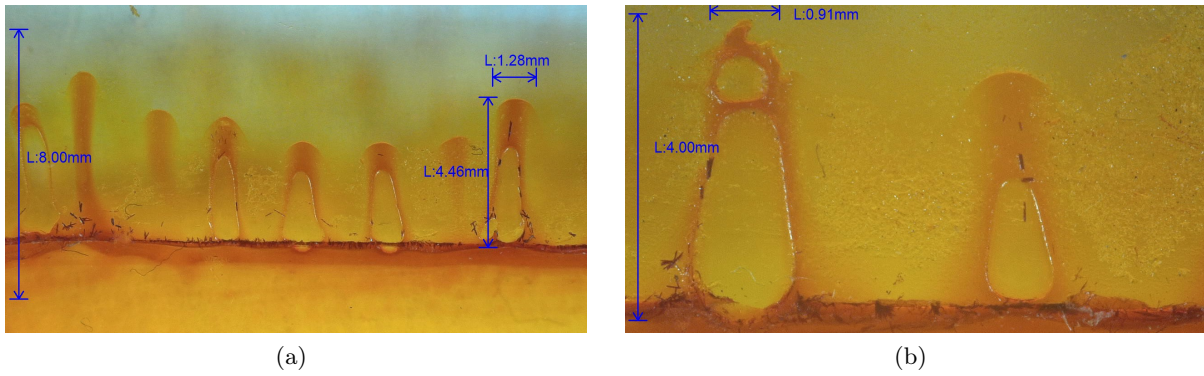


Abbildung 16: Plattenrand nach entfernen des Klebebandrandes

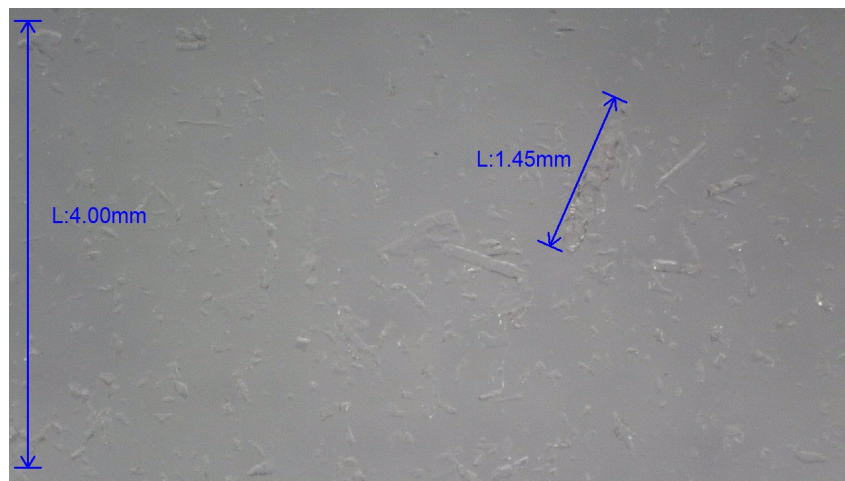


Abbildung 17: PMMA-Reste auf Nilrot-Platte

A.2. Unterstützungsleistungen und Erarbeitungsorte

THOMAS KAISER, Leiter des Schülerforschungszentrums Gera, sowie dem SCHÜLERFORSCHUNGSZENTRUM GERA.

Unterstützung bei Bau- und Messvorgang, finanzielle Unterstützung, Beschaffung der Materialien, Vermittlung zur LICHTWERKSTATT JENA und zu Frau Walther.

CHRISTINA WALTHER, Leiterin des Schülerforschungszentrums Jena.

Begleitung des Baus und Materialbeschaffung.

GEMEINSCHAFT DES HEINRICH-BÖLL-GYMNASIUMS SAALFELD

Freistellungen und Unterstützung.

LICHTWERKSTATT JENA. Messungen unter dem Solarsimulator.

SCHÜLERFORSCHUNGSZENTRUM JENA. Voruntersuchungen und Bau der Solarkonzentratorplatten, finanzielle Unterstützung.

Diese Abhandlung wurde mit \LaTeX verfasst. Für die Erstellung von Graphiken und plotten wurde Inkscape und gnuplot verwendet.