

# Konzentrator-Photovoltaik mit der FLATCON®-Technologie

Dr. Werner Platzer  
Fraunhofer Institut für Solare Energiesystem (Fraunhofer ISE)  
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg  
Tel. +49-761-4588-0, Fax: . +49-761-4588-9000  
email: werner.platzer@ise.fraunhofer.de

## Einleitung

Eine der größten Herausforderungen unserer Gesellschaft für die nächsten Jahrzehnte stellt die Sicherung einer nachhaltigen und umweltverträglichen Energieversorgung dar. Eine Fortschreibung des derzeitigen Energiesystems ist im höchsten Grade problematisch. Zum einen stellen die fossilen und nuklearen Energieträger aufgrund ihrer Endlichkeit eine immer knapper werdende Ressource dar. Zum anderen hat die Klimaforschung der letzten Jahrzehnte gezeigt, dass ein Ausstoß von Verbrennungsrückständen in die Atmosphäre, insbesondere von CO<sub>2</sub>, nicht ohne Folgen für das Weltklima bleibt.[ 1]

Aus diesem Grunde wurde vom wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung für Globale Nachhaltigkeit (WBGU) eine nachhaltige globale Transformationsstrategie entwickelt. Dieses basiert auf dem massiven Ausbau der regenerativen Energien in Form von Sonne, Wind, Wasser und Biomasse, sowie in gewissem Umfang einer Steigerung der Energieproduktivität. Auf die Aufrechterhaltung der riskanten Kernenergie kann langfristig (ab etwa 2040) verzichtet werden. Der Anteil der Energieträger Gas, Öl und Kohle kann bereits 2050 auf weniger als 50% reduziert werden.[ 2]

Die Photovoltaik bildet ebenso wie die solarthermische Großkraftwerke eine wichtige Stütze innerhalb dieser Lösungsansätze und stellt eine vielversprechende Technologie dar, um unsere Stromversorgung langfristig absichern und umweltverträglich zu gestalten zu. Die Photovoltaik ist eine Form der regenerativen Energiegewinnung, bei der Licht direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Bei der Umwandlung von Sonnenenergie in Strom mittels Solarzellen werden elektrische Ladungsträgerpaare durch auftreffendes Licht getrennt. [ 3]

Parallel zu einem, über Jahre hinweg zweistelligen Wachstum, sind die Preise für Solarmodule stetig gesunken, mit getragen durch eine staatliche Förderung in vielen Ländern. Wie alle regenerativen Energien, mit Ausnahme großer Wasserkraftanlagen, kann auch die Photovoltaik heute jedoch noch nicht in wirtschaftlicher Hinsicht mit konventionellen Energieträgern konkurrieren. Das primäre Ziel bei der Weiterentwicklung der PV-Technologie stellt somit eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit dar. Der Photovoltaik wird dabei ein großes Kostenreduktionspotenzial für die nächsten Jahrzehnte zugesprochen.[ 4]

Den größten Anteil bei der Herstellung von Photovoltaik-Modulen nehmen die Kosten für die Herstellung der Solarzellen ein. Daher besteht ein umfassendes Kostenreduktionspotenzial für Solarmodule in der Senkung des Anteils der Zellkosten an den Modulkosten. Momentan ist jedoch der Solarmarkt charakterisiert durch die weltweite temporäre Knappheit des Siliziums.

Nicht zuletzt aus diesen Gründen heraus wird deshalb seit vielen Jahren an Ansätzen mit konzentrierter Solarstrahlung gearbeitet. Das Prinzip dieser Photovoltaik-Technologie besteht darin, dass höchst effiziente Solarzellen in einem einfachen und kostengünstigen Aufbau unter hoher solarer Konzentration betrieben werden. Generell unterscheidet man zwei- und dreidimensional konzentrierende Systeme. Zweidimensionale Konzentration bezeichnet die Konzentration der Solarstrahlung auf eine Linie, bei dreidimensionale Konzentration wird die Solarstrahlung wie mit einem Brennglas auf einen Punkt konzentriert. Linsen oder Spiegelsysteme konzentrieren dabei das Sonnenlicht um einen Faktor 10 bis 1000. Dies birgt den Vorteil, dass die Fläche der in der Herstellung zwar kostenintensiven, aber hocheffizienten Tandem- oder Multispektralzellen, aufgrund der Bündelung der Sonnenenergie, auf eine geringe Fläche minimiert werden kann. Damit reduziert sich die benötigte Fläche an teurem Zellmaterial.

Um die Konzentrationstechnologie auf dem Photovoltaik-Markt etablieren zu können, sind zwei entscheidende Grundvoraussetzungen zu erfüllen.

- Die Technologie der Konzentration-Photovoltaik muss in einem Maße ausgereift sein, dass die Funktionsfähigkeit der Konzentration-Module über einen Zeitraum von 20-25 Jahren ohne großen Wartungsaufwand garantiert werden kann.

- Es muss ein Marktpreis erzielt werden können, der unter dem von konventionellen Solarflachmodule liegt.

Weltweit sind mehrere Unternehmen mit der Entwicklung und dem kommerziellen Vertrieb verschiedenster Konzepte von Konzentratoren-PV-Systemen befasst. In den USA sind dies die Firmen Amonix, SolFocus, Entech und Pyron [ 6], in Australien Solar Systems [ 7]. In Europa arbeiten Isoton [ 8] und die deutsche Concentrix Solar GmbH [ 13] mit hochkonzentrierenden Photovoltaikmodule auf der Basis von III-V-Solarzellen.

## Darstellung der Flatcon-Technologie

Die Bezeichnung FLATCON steht für »Fresnel Lens All-glass Tandem Cell Concentrator«. Die FLATCON-Technologie wurde im Laufe der letzten Jahre am Fraunhofer ISE entwickelt [ 9 – 12] und wird von der Spin-Off-Firma Concentrix Solar GmbH [ 13] bis zur Serienreife gebracht und in den Markt eingeführt. Eine Pilotfertigung wird derzeit aufgebaut. Das FLATCON System ist ein dreidimensional konzentrierendes System, das zunächst auf einen Konzentrations-Faktor von 500 ausgelegt wurde, aber sich prinzipiell auch für höhere Konzentrationen eignen würde.

Das FLATCON-Modul besteht im Wesentlichen aus einem geschlossenen Glas-Kasten, an dessen Oberseite Fresnel-Linsen das Sonnenlicht 500-fach konzentrieren und auf die an der Unterseite angebrachten Hochleistungszellen lenken (siehe Abbildung 1). Die einzelnen Fresnel-Linsen haben eine Fläche von 4 x 4 cm<sup>2</sup> die verwendete Solarzelle hat einen Durchmesser von etwa 2 mm.

>> ABB1

Die genau im Brennpunkt positionierte Solarzelle wandelt das durch die Fresnel-Linse konzentrierte Sonnenlicht in elektrische Energie um. Besonders hohe Wirkungsgrade können durch die Verwendung von Tandem- oder Tripel-Solarzellen erreicht werden. Hierbei werden Solarzellen aus verschiedenen Halbleitermaterialien übereinander gestapelt. Jede der drei Solarzellen einer Tripel-Zelle ist dann für die Umwandlung eines bestimmten Teils des Farbspektrums der Sonne verantwortlich. Somit können Zellwirkungsgrade über 35% erreicht werden. Zum Einsatz kommen hier Verbindungshalbleiter aus Elementen der III. und V. Hauptgruppe des Periodensystems: Galliumindiumphosphid, Galliumarsenid und Germanium. Hergestellt werden III-V-Solarzellen in einem einzigen Prozess. Bisher werden in den Modulen Tandemsolarzellen aus  $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{P}/\text{Ga}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{As}$  mit einem Wirkungsgrad von nahezu 30% @ 300xAM1.5d [ 10] eingesetzt. Um die Ausnutzung des Solarspektrums noch weiter zu steigern, wurden kürzlich am Fraunhofer ISE Tripelsolarzellen auf der Basis von  $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{P}/\text{Ga}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{As}/\text{Ge}$  entwickelt, die Wirkungsgrade über 35% @ 500xAM1.5d erzielen [ 14].

>> ABB2

In einem Modul werden mehrere Linsen-Zell-Einheiten zusammengefasst. Momentan typische Modulgrößen beinhalten 48 Zellen auf einer Fläche von etwa 18 cm x 34 cm. Die FLATCON<sup>TM</sup>-Module benötigen auf Grund der sehr kleinen Zellflächen, die auf Kupferträgern auf der rückwärtigen Glasplatte sitzen, keine aktive Kühlung. Die Konzentratoren-Module werden zweiachsig der Sonne nachgeführt, damit der Brennpunkt der Linse jederzeit den aktiven Bereich der Solarzelle trifft.

FLATCON-Module werden am Fraunhofer ISE seit mehreren Jahre mit Hilfe eines Freifeld-Teststandes vermessen. So lassen sich real erreichbare Modulwirkungsgrade bestimmen und Langzeiterfahrungen gewinnen [ 15]. Für FLATCON-Module mit Tandemsolarzellen wurden dabei unter realen Betriebsbedingungen maximale Wirkungsgrade von 22,7% gemessen [ 10]. Über Monate gemittelte Messungen zeigen einen Wirkungsgrad von knapp 20% [ 15]. Durch eine gut aufeinander abgestimmte Auslegung des Gesamtsystems lassen sich mit den neu entwickelten Tripel-Solarzellen mit 35% Wirkungsgrad weitere Steigerungen im Modulwirkungsgrad erreichen. Die FLATCON<sup>®</sup> - Technologie bietet damit das Potential Modulwirkungsgrade von 25% bis 28% zu erzielen.

>> ABB3

Die Leistung eines Moduls liegt im Bereich von 15-20 Watt, was für die wenigsten Anwendungen ausreichend sein dürfte. Ein FLATCON-System besteht aus einer Vielzahl von einzelnen Modulen, die auf

einer Nachführeinheit (Tracker) installiert sind. Der Tracker dient dazu, die Module der Sonne nachzuführen. Dies ist für die konzentrierende PV erforderlich, da sonst der Brennpunkt der Linse nicht mehr genau den aktiven Bereich der Solarzelle trifft. Daher werden hier auch hohe Anforderungen an die Nachführgenauigkeit im Bereich von einem halben Grad gestellt.

Die Leistung einzelner Systeme wird in Zukunft 5 – 15 kW betragen. Einzelne Systeme sollen zu ganzen Kraftwerken mit 100 kW bis einige MW gebündelt werden (siehe Abbildung 4), um in sonnenreichen Ländern kostengünstigen Solarstrom für die Einspeisung in das öffentliche Stromnetz zu erzeugen. Der Begriff »Balance Of System« (BOS) bezeichnet hier die Komponenten, die notwendig sind, um den von den Modulen produzierten Strom für den entsprechenden Anwendungszweck aufzubereiten wie z.B. Wechselrichter, Steuerung, etc; außerdem Installationsteile wie Kabel und Stecker.

>>ABB4

## Konzentrierende Optik mit Fresnellinsen

In diesem Abschnitt soll die konzentrierende Optik und deren Vermessung detaillierter dargestellt werden. Die wesentliche Komponente der Optik ist eine auf die Rückseite des eisenarmen Deckglases aufgebrachte Fresnellinse. Bei Fresnellinsen gibt es verschiedene Ansätze für die geometrische Zerlegung der Oberfläche einer abbildenden Linse – so können beispielsweise die Facetten äquidistant, aber ungleich hoch, gewählt werden, oder sie werden mit gleicher Zahnhöhe und unterschiedlichem Facettenabstand gefertigt (s. Abbildung 5). Bei der solaren Konzentration ist wesentlich nicht die perfekte Abbildung der Sonnenscheibe, sondern die möglichst gleichmäßige Intensitätsverteilung der Sonnenstrahlung auf der Solarzelle. Optimiert man die Linsengeometrie mit diesem Ziel, erhält man nichtabbildende Fresneloptiken [ 16]. Als einfache Annäherung kann man die Linse mit geraden Prismenflanken konstruieren, sofern die Periode der Linse und damit die Krümmungsänderung klein ist.

>>ABB5

Die geometrische Konzentration einer Fresnel-Optik ergibt sich als

$$C_g = \frac{A_F}{A_{SZ}} \quad (1)$$

wobei  $A_F$  die Fläche der Fresnellinse und  $A_{SZ}$  die Solarzellenfläche ist. Aus physikalischen Gründen erhält man bei punktkonzentrierenden Systemen mit dem Öffnungshalbwinkel der Sonne von 4,8 mrad oder 0,28° eine thermodynamisch maximal mögliche Konzentration von 45000, real kann man mit Fresnellinsen etwa 1500 erreichen.

Die Qualität der Konzentrationsoptik lässt sich charakterisieren als Produkt von geometrischer Optik und optischer Effizienz

$$C_{opt} = C_g \cdot h_{opt} \quad (2)$$

Systeme mit einer optischen Effizienz von weniger als 80% machen wenig Sinn. Die optische Effizienz wird beispielsweise beeinträchtigt durch Lichtstreuung und Kantenverrundungen.

## Fresnellinsendesign

Fresnellinsen bieten durch ihre Segmentierung der brechenden Oberflächen eine Materialeinsparung im Vergleich zur normalen abbildenden Linse. Weitere Vorteile sind die geringere spektrale Dispersion auf Grund der kürzeren Strahlengänge. Fresnellinsen können prinzipiell einfach aus transparenten Kunststoffen durch Prägeverfahren hergestellt werden.

Dabei sind folgende Anforderungen zu beachten. Der Brechungsindex beeinflusst das Design der Fresnellinse über die Brechkraft. Der transparente Kunststoff sollte möglichst stabil gegenüber der (durch eine Glasscheibe bereits reduzierte) UV-Strahlung sein. Zudem sollte wenig Lichtstreuung im Volumenbereich der Linse auftreten.

Für die Linsenfertigung wurde aus diesen Gründen am Fraunhofer ISE ein transparentes Silikon ausgewählt. Mittels einer ebenfalls aus Silikon bestehenden Matrize wird die Fresnel-Struktur in einen

Silikonfilm geprägt, der auf der Frontglasplatte aufgebracht ist. Die Vorteile umfassen unter anderem hohe UV-Beständigkeit und die Prozesszuverlässigkeit, als Nachteile gelten die lange Trocknungszeit und die hohen Rohstoffkosten für Silikon.

Hier wird parallel einfallendes Licht an der Prismenstruktur zum Fokus gebrochen. Jeder dieser Prismenwinkel ist dabei genau über die Fokusslänge definiert. Diese Fokusslänge sollte – als Richtlinie – den Radius der Fresnellinse nicht überschreiten. Dadurch wird bei gegebenem Abstand auch die Größe und damit die geometrische Konzentration beschränkt.

>>ABB6

Der Fokus wird dabei über den Prismenwinkel  $\alpha$  der Fresnelstrukturen bestimmt. Dieser lässt sich nach folgenden Gleichungen ermitteln [ 17]:

$$n \sin \mathbf{a} = \sin \mathbf{b} \quad (3)$$

$$\tan \mathbf{f} = \frac{L}{f} \quad (4)$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{a} + \mathbf{f} \quad (5)$$

Wenn in Gleichung (3)  $\beta$  eingesetzt wird, führt dies zu folgendem Ausdruck für den Prismenwinkel:

$$\tan \mathbf{a} = \frac{\sin \mathbf{f}}{n - \cos \mathbf{f}} \quad (6)$$

der mit Gleichung (4) erweitert werden kann:

$$\tan \mathbf{a} = \frac{L}{f} \frac{\cos \mathbf{f}}{n - \cos \mathbf{f}} \quad (7)$$

Bei dem in Abbildung 6 gezeigten Design wurde die Prismenbreite konstant gehalten, weshalb die Höhe der einzelnen Prismen variiert. Es ist aber auch möglich die Linse mit gleich bleibender Dicke, bei variabler Breite der einzelnen Prismen, zu konstruieren.

Besonders nachteilig wirkt sich gerade bei großflächigen refraktiven Systemen die auf geringe Modulbautiefen optimierte Fokusslänge aus. Der große Einfallswinkel auf die Prismenflanken führt zu erhöhter Reflexion, die aus dem großen Einfallswinkel resultierende starke Brechung an den Prismenflanken führt zu chromatischen Abbildungsfehlern. Aufgrund der Dispersionskurve des verwendeten Linsenmaterials kommt es bei kleineren Wellenlängen zu einem Anstieg des Brechungsindex. Die bei gleichem Einfallswinkel stärkere Lichtbrechung hat zur Folge, dass sich die Fokusslänge verkürzt und somit der Brennpunkt auf der Solarzellenebene wieder aufgeweitet ist. Ein Anteil der energieintensiven kurzwelligeren Strahlung kommt deshalb außerhalb der Solarzellenfläche an und kann nicht mehr genutzt werden. Der Brennpunkt hat daher eine geometrische Ausdehnung, die bei der Zellgröße der Solarzelle berücksichtigt werden muss.

Bei der Designwellenlänge von 625 nm wird das Licht auch des sonnennahen Zirkumsolarbereiches auf die Solarzellenfläche abgebildet. Die Brennweite entspricht dem Abstand von Linse und Zelle im Modul. Durch die Dispersion variiert allerdings die Brennweite bei unterschiedlichen Wellenlängen. Dies kann durch eine Vergrößerung der Solarzellenfläche auf den maximalen Brennfleck aufgefangen werden. Auch

die Nachführgenauigkeit des Trackers muss berücksichtigt werden, damit der Brennfleck zu keinem Zeitpunkt aus der Zelfäche herauswandert.

## Vermessung

Eine in FLATCON-Modulen zum Einsatz kommende Linsenplatte besteht aus 48 Fresnel-Linsen mit einer Größe von 40x40 mm<sup>2</sup>. Zur Vermessung dieser Linsenplatten wurde am Fraunhofer ISE ein Labormessstand aufgebaut, der folgende Eigenschaften aufweist:

- Homogene LED-Lichtquelle durch Diffusor-Optik
- Drei Messwellenlängen (RGB)
- Paralleles Licht für Linsengrößen bis 6cm Durchmesser
- 2-Achsiges Positioniersystem
- CMOS-Kamera zur Brennpunktaufnahme mit hohem Dynamikumfang

>>ABB7

Die jeweils zu vermessende Fresnel-Linse wird in der Messeinrichtung durch eine Verfahrenseinheit unter einer parallelen Lichtquelle positioniert. Mittels eines CMOS-Sensors wird die Strahlungsverteilung der Fresnel-Linse digitalisiert und mit Analysesoftwaretools ausgewertet.

Mit der Indoor-Messeinrichtung ist es möglich, verschiedene, optionale Herstellungsverfahren bewerten zu können. Im Produktionsprozess wird die Messeinrichtung zur Qualitätssicherung eingesetzt, um die Änderung von Prozessparametern erkennen zu können. So ist es uns nun möglich einen technologisch und ökonomisch optimalen Herstellungsprozess und eine qualitativ hochwertige Fertigung der Fresnel-Linsen zu entwickeln.

Die relativ günstige CMOS-Kamera erlaubt jedoch keine kalibrierte Vermessung von Brennfleck und Streulicht. Es wird nur die Intensitätsverteilung des Brennflecks relativ verglichen mit dem einer guten Referenzlinse. Um eine absolute Messung über den großen Dynamikbereich zu ermöglichen, wird derzeit ein Umbau vorgenommen, bei dem eine CCD-Kamera mit Mehrfachbelichtung eingesetzt werden soll. Abbildung 7 zeigt den Aufbau mit dem Verfahrtschiff und eingelegter Linsenplatte.

Ansteuerung und Kamerabildauswertung wurden in LABVIEW programmiert. Abbildung 8 gibt die Intensitätsverteilung des Brennflecks als Screenshot des Messprogrammes wieder. In Abbildung 9 erkennt man qualitativ die Dispersion der Linse durch die unterschiedlichen Größen des Brennflecks im Vergleich zu einem 2mm großen Kreis (schwarzer Kreis). Während das rote Licht innerhalb des Kreises liegt, fällt ein Teil des blauen Lichtes außerhalb.

>>ABB8

>>ABB9

## Sekundäroptiken

Momentan werden bei den FLATCON™-Modulen keine Sekundäroptiken eingesetzt. Solche Sekundärkonzentratoren können jedoch durchaus sinnvoll sein um folgende Eigenschaften des Systems zu beeinflussen:

- Verbesserung des optischen Wirkungsgrades
- Erhöhung der Toleranz gegenüber Nachführfehlern des Trackers
- Erhöhung der geometrischen Konzentration in Kombination mit größeren Fresnellinsen und / oder kleineren Zellgrößen

Im folgenden wird auf die Verbesserung der Toleranz gegenüber Nachführfehlern Wert gelegt. Dabei dient die Sekundäroptik dazu, ggf. neben die Zelle fallende Strahlung noch auf die Zellfläche umzuleiten. Mit einem sog. CPC (Compound Parabolic Concentrator, s. [ 20]) ist dies machbar. Ein eindimensionaler CPC ist ein idealer Konzentrator, der alle Strahlung innerhalb eines Akzeptanzwinkelbereichs auf die Ausgangsapertur abbildet, während Strahlen außerhalb dieses Bereichs reflektiert werden. Bei einem

rotationssymmetrischen CPC ist dies nicht mehr ideal der Fall, trotzdem dient er als Ausgangspunkt für unsere Überlegungen.

Als fixe Ausgangsgröße ist die Ausgangsapertur der Sekundäroptik festgelegt, die dem Durchmesser der momentan eingesetzten Solarzelle in den FLATCON® Modulen entspricht. Die minimale Eingangsapertur, die die Sekundäroptik auf jeden Fall aufweisen muss, kann über das Randstrahlprinzip [ 20], Fresnellinse - Zelle bestimmt werden. Dazu wird eine Tangente an eine Ecke der Linse und an den Rand der Solarzelle gelegt, die als äußerster Strahl das fokussierte Strahlbündel begrenzt. Über Winkelfunktionen kann nun der Strahldurchmesser bei gewünschter Höhe ermittelt werden.

Innerhalb dieses geometrischen Rahmens wurden nun CPCs mit Akzeptanzwinkeln von 15° – 60° konstruiert. In Abbildung 10 sind die konstruierten dreidimensionalen CPCs mit Akzeptanzwinkeln von 15° - 60° bei gleicher Ausgangsapertur zu sehen.

>> ABB10

Aufgrund von diesen geometrischen Voruntersuchungen wird das Feld der CPCs für die anschließende Simulation eingegrenzt. Die CPCs mit Akzeptanzwinkeln größer 45° kommen aufgrund der zu kleinen Eingangsapertur, die nur etwas über dem Solarzellendurchmesser liegt und damit keine wesentliche Verbesserung der Winkelakzeptanz erwarten lässt, nicht in Betracht. CPCs die mit einem Akzeptanzwinkel kleiner 25° konzipiert wurden, haben ein ungünstiges Aspektverhältnis sowie eine Volumenzunahme die sich bei einer späteren Produktion negativ auf die Materialkosten auswirkt (siehe Abbildung 11).

Abbildung 12 zeigt dass der durch das Randstrahlprinzip ermittelte Durchmesser der Eingangsapertur größer ist, als das fokussierte Strahlbündel der Fresnellinse.

>>ABB11

>>ABB12

Zur Ermittlung welche dieser Geometrien nun das beste Ergebnis liefert, werden diese nacheinander in einem Optik-Simulationsprogramm (nicht-sequentieller Raytracer OPTICAD [ 21]) gerechnet.

## Modellierung und Optimierung

Für eine möglichst realistische Simulation des Konzentratorsystems, muss dieses in der Raytracing-Software nachgebildet werden. Anhand der Randparameter des FLATCON® Systems werden Lichtquelle (Sonne), Linsenträger (Glasscheibe), Fresnellinse, Detektor-Fläche und der zu untersuchende CPC samt zugehöriger Materialeigenschaften) definiert..

Um die Komplexität des Systems möglichst gering und die Simulationsgeschwindigkeit hoch zu halten, wurden außer der Fresnel-Reflexion an den Flächen von Linse und CPC keine weiteren optischen Verluste in der Rechnung berücksichtigt. Die in der Realität aufgrund nicht idealer Flächen und Volumina auftretende Volumenabsorption und Streuung im Material, sowie die Totalreflexionsverluste an den Grenzflächen, sind zunächst als gering anzunehmen, so dass sie in den Rechnungen vernachlässigt werden. Als Ergebnis erhält man Strahlengänge und Intensitätsverteilungen auf Detektorflächen (hier: Solarzelle).

Abbildung 13 zeigt einen Strahlengang im CPC, der Verdeutlichung halber mit sehr wenig Strahlen.

>>ABB13

Abbildung 14 zeigt das modellierte Konzentratorsystem mit Lichtquelle, Blende, Glasscheibe, Fresnellinse, CPC und Detektor in OptiCAD®.

>>ABB14

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass durch die CPC-Konzentratoren einmal die Homogenität der Ausleuchtung der Solarzelle deutlich gesteigert werden konnte (Abbildung 15). Durch die größere Eingangsaperturfläche erhöht sich auch die optische Effizienz bei schräg einfallenden Strahlen bzw. bei Nachführfehlern der Trackereinheit. Fällt so beispielsweise die optische Effizienz ohne Sekundärkonzentrator bereits bei 0.4° Einfallswinkel um 5% ab, so wird durch CPCs mit 30-45° Akzeptanzwinkel dieser Winkel auf über 1° ausgedehnt werden.

Auch die unterschiedliche Dispersion der Fresnellinse wird natürlich durch einen Sekundärkonzentrator aufgefangen.

Es wird zu klären sein, ob sich der Einsatz von Sekundärkonzentratoren nach Anpassung anderer Parameter wie z.B. Solarzellengröße und Zellgrid sich auch wirtschaftlich positiv auswirken kann.

>>ABB15

## **Ausblick und Zusammenfassung**

Um den Markteinstieg der aussichtreichen FLATCON-Systeme zu vollziehen, wurde die Firma Concentrix Solar GmbH Anfang des Jahres 2005 als Spin-off aus dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg gegründet. Ausgehend vom heutigen Entwicklungsstand entwickelt die Concentrix Solar GmbH die FLATCON® - Technologie zu einem industriellen Serienprodukt weiter. Sie baut eine automatisierte Fertigungslinie für Konzentration-PV-Module auf und realisiert parallel erste Pilotsysteme als Prototyp-Projekte. Im Jahr 2007 werden die ersten großen Kraftwerksinstallationen im Zielmarkt Spanien installiert und ab 2008 wird die Technologie im industriellen Maßstab kommerziell verfügbar sein.

## **Danksagung**

Dieser Übersichtsartikel basiert auf einer langen Reihe von Arbeiten von vielen Mitarbeitern aus dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, insbesondere aus den Arbeitsgruppen „III-V-Solarzellen“ unter der Leitung von Dr. Andreas Bett sowie meiner Arbeitsgruppe „Lichttechnik und Solare Konzentration“. Ohne den unermüdlichen Einsatz des ehemaligen Kollegen Hansjörg Lerchenmüller, der heute Geschäftsführer der Concentrix-Solar GmbH ist, wäre diese Firma wohl nicht gegründet worden und die Markteinführung der FLATCON™-Systeme nicht soweit vorangeschritten.

Dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit ist an dieser Stelle deutlich für die finanzielle Unterstützung zu danken, die es über Projektmittel für die Entwicklung dieser Technologie bereitgestellt hat und immer noch bereitstellt.

## Literatur

- [ 1] Quaschnig, V.: Globales Klimaexperiment - Die Rolle der Energiewirtschaft bei der Verringerung der weltweiten Kohlendioxidemissionen, erschienen in: BWK - Das Energiefachmagazin, 05/2003, S.38-41.
- [ 2] Wiss. Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), "Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit", ISBN 3-540-40160-1, Sprinter-Verlag Berlin Heidelberg (2003)
- [ 3] A. Goetzberger, B. Voß, J. Knobloch, „Sonnenenergie: Photovoltaik“, ISBN 3519132141, **Verlag:** Teubner Verlag; Auflage: 2 (1997)
- [ 4] Nitsch, J., Rösch, F., Stuttgart, Karlsruhe, 2001, S. 11.
- [ 5] K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, et al., Proc. 19<sup>th</sup> European PVSC, Paris, Juni 2004, p. 2495-2498
- [ 6] USA-Konzentrator-Firmen:  
[www.amonix.com](http://www.amonix.com), [www.entechsolar.com](http://www.entechsolar.com), [www.pyronsolar.com](http://www.pyronsolar.com), [www.solfocus.com](http://www.solfocus.com)  
-
- [ 7] Australien Konzentrator-Firma: [www.solarsystems.com.au](http://www.solarsystems.com.au)
- [ 8] V. Diaz, J-L. Alvarez, J. Alsonos, et al, Proc. 19<sup>th</sup> European PVSC, Paris, Juni 2004, p. 2525-252, s.a. [www.isofoton.com](http://www.isofoton.com)
- [ 9] A.W. Bett, F. Dimroth, M. Hein, et al. Proc. 29<sup>th</sup> IEEE PVSC, New Orleans, 2002, p. 844-847.
- [ 10] A.W. Bett, C. Baur, F. Dimroth, et al., "FLATCON™-Modules: Technology and Characterisation", Proc. WCPEC-3, Osaka, Japan, 2003, p. 634-637.
- [ 11] A.W. Bett, F. Dimroth, S.W. Glunz, et al. Proc. 19<sup>th</sup> European PVSC, Paris, 2004, p. 2488-2491
- [ 12] [www.flatcon.de](http://www.flatcon.de)
- [ 13] [www.concentrix-solar.de](http://www.concentrix-solar.de)
- [ 14] F. Dimroth, C. Baur, A.W. Bett, M. Meusel, G. Strobl, „3-6 junction photovoltaic cells for space and terrestrial concentrator applications“, Proc. of 31<sup>st</sup> IEEE PVSC; Floria, January 2005
- [ 15] G. Siefer, A.W. Bett, „Experimental comparison between the power outputs of FLATCON modules and silicon flat plate modules“, Proc. of 31<sup>st</sup> IEEE PVSC; Floria, January 2005
- [ 16] R. Leutz, A. Suzuki, A. Akisawa, T. Kashiwagi, „Developments and designs of solar engineering Fresnel lenses“, Proceedings Symposium on Energy Engineering (SEE 2000), Vol.2, 759-765, ISBN 1567001327, 9-13 January, Hong Kong(2000)
- [ 17] R. Leutz, A.S., Nonimaging Fresnel Lenses: Optical Sciences, Springer.
- [ 18] V. Bisch, Dielektrische Sekundäroptiken für zweistufige Konzentratoren in der Photovoltaik, Diplomarbeit Hochschule Ravensburg/Weingarten (2006)
- [ 19] S. Wendlandt, Aufbau eines Indormessstandes zur Bestimmung der Strahlungsverteilung im Fokuspunkt von Fresnel-Linsen, Bachelorarbeit, FWTH Berlin (2005)
- [ 20] Welford, W.T., Winston,R, *High Collecting Non Imaging Optics* 1989, San Diego, CA: Academic Press Inc.



[ 21] [www.optocon.de](http://www.optocon.de)

[ 22] H. Lerchenmüller, A.W.Bett, G. Siefer, F. Dimroth, G. Willeke, "FLATCON™ Konzentration-PV-Technologie", 20. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 9.-11. März 2005, Kloster Banz

# Beschriftung Abbildungen

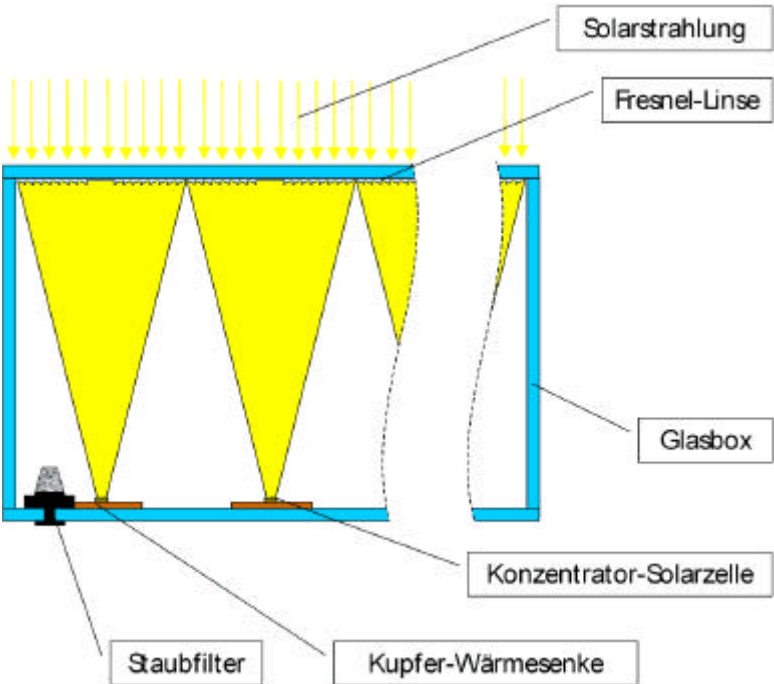


Abbildung 1: Funktionsweise der FLATCON-Technologie

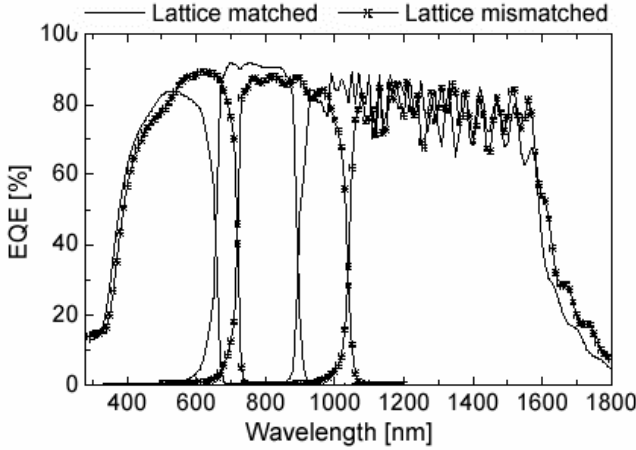


Abbildung 2: Quanteneffizienz Tripelsolarzelle [ 14]



Abbildung 3: FLATCON-Module auf dem Messstand des Fraunhofer ISE in Freiburg

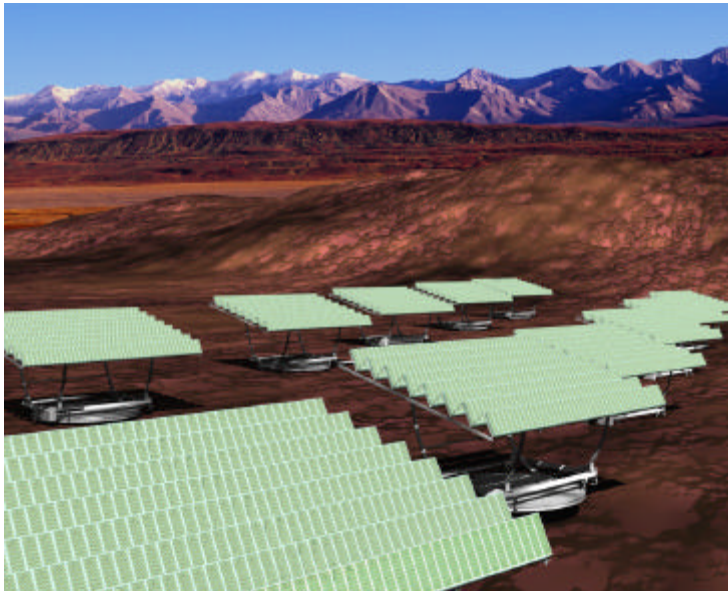


Abbildung 4: Visualisierung eines PV-Kraftwerks bestehend aus einer Vielzahl von Trackern, die jeweils mit mehreren hundert Modulen ausgerüstet sind.

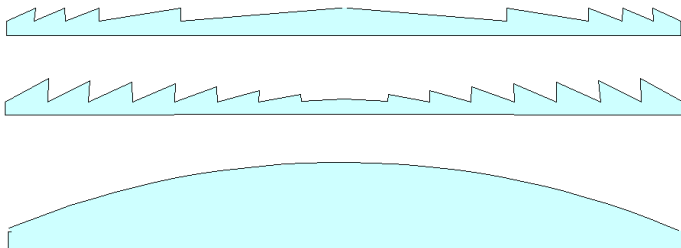


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Fresnellinse (nicht maßstäblich)

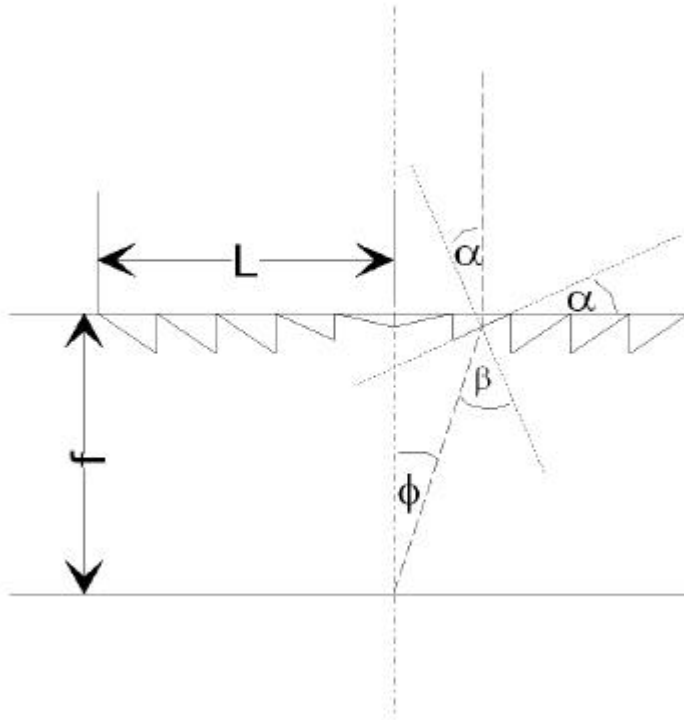


Abbildung 6: Konstruktion einer Fresnellinse. Der Fokuspunkt wird über den Prismenwinkel  $\alpha$  der Fresnelstrukturen bestimmt.

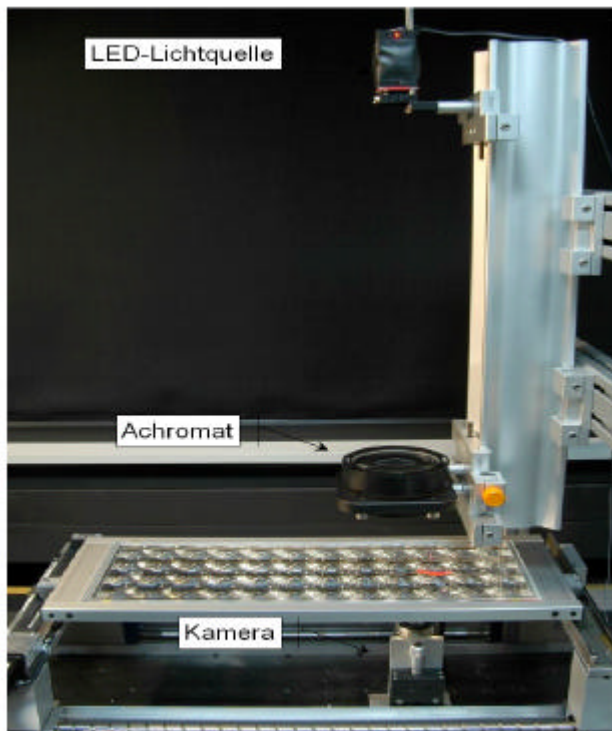


Abbildung 7: Foto des Indoor-Messeinrichtung für die Vermessung von Modulabdeckungen mit Fresnellinsen

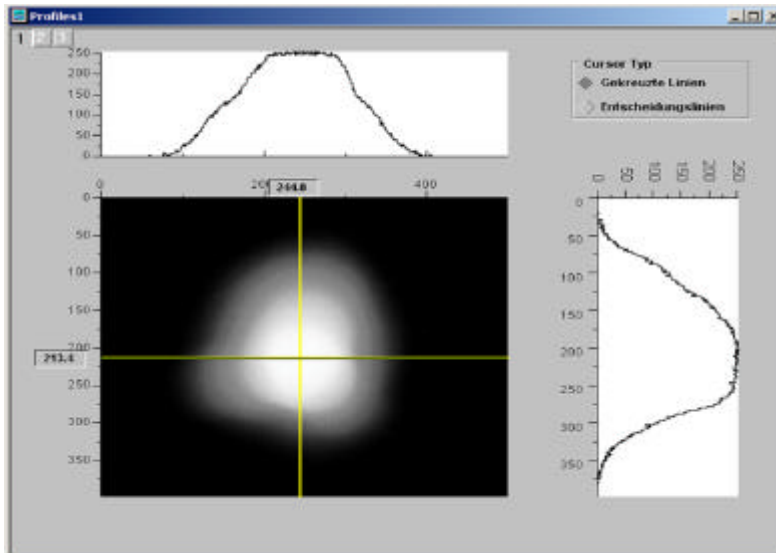


Abbildung 8: Screenshot der LABVIEW-Oberfläche der Messeinrichtung mit Intensitätsverteilung im Brennpunkt sowie Schnittfunktionen

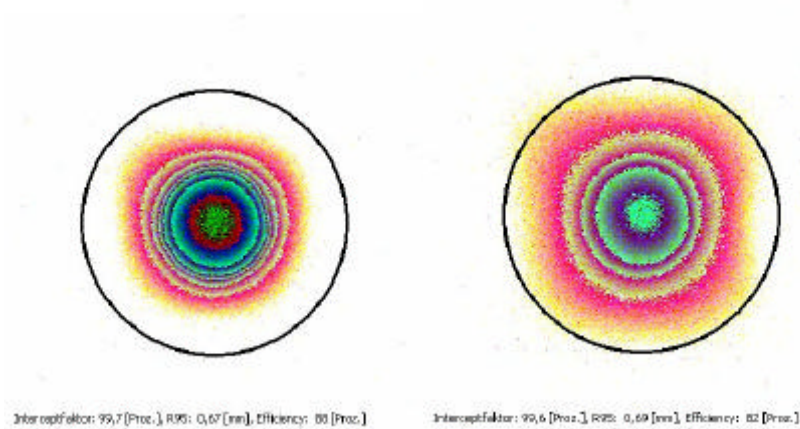


Abbildung 9: Farbcodierter Intensitätsverteilung des Brennpflecks bei zwei verschiedenen Wellenlängen (rechts  $\lambda = 625\text{nm}$  rot, links  $\lambda = 460\text{nm}$  blau)

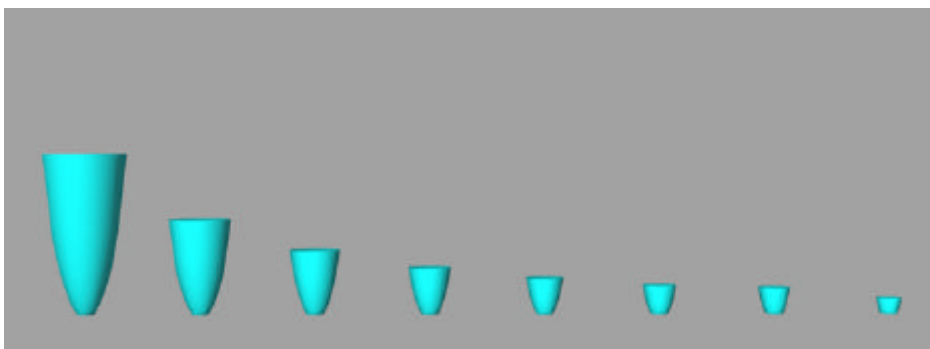


Abbildung 10: CPCs mit Akzeptanzwinkeln von  $15^\circ - 60^\circ$  (von links nach rechts) bei identischer Ausgangsapertur.

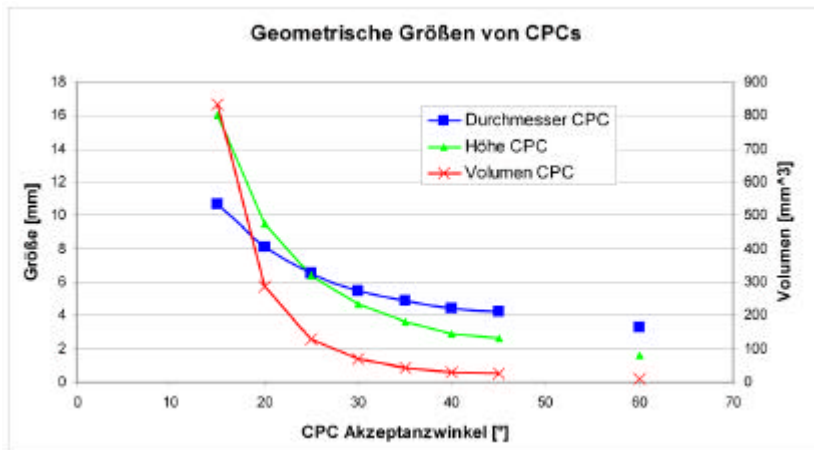


Abbildung 11: Geometrische Größen von CPCs. Die CPCs mit Akzeptanzwinkel größer 45° kommen aufgrund der zu kleinen Eingangsapertur, die nur etwas über dem Solarzellendurchmesser liegt, nicht in betracht. CPCs die mit einem Akzeptanzwinkel kleiner 25° konzipiert wurden, haben ein ungünstiges Aspektverhältnis und eine Volumenzunahme die sich bei einer späteren Produktion negativ auf die Materialkosten auswirkt

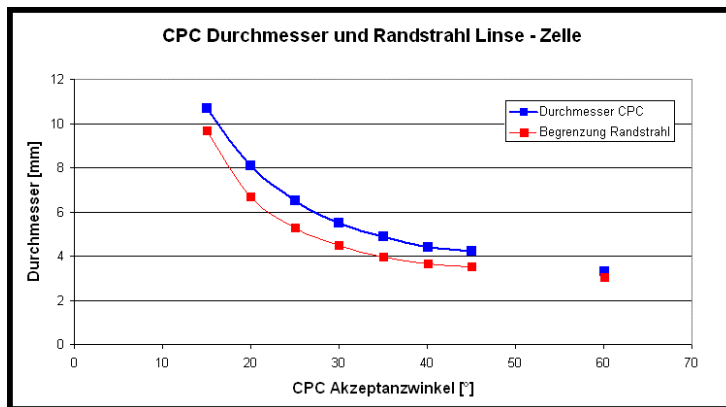


Abbildung 12: Begrenzung durch Randstrahlprinzip. Der Durchmesser der Eingangsapertur ist größer, als das fokussierte Strahlbündel der Fresnellinse

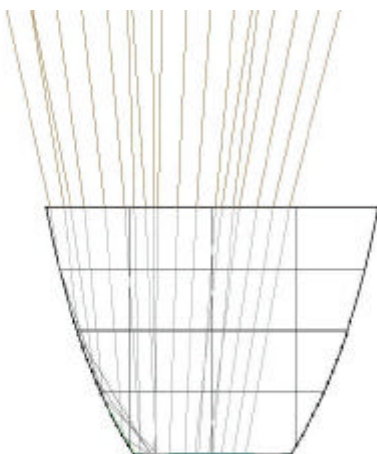


Abbildung 13: Strahlengang im CPC. Der Strahl wird zur senkrechten Normalenachse hin gebrochen und erhöht somit den Akzeptanzbereich in dem die Totalreflexionsbedingung gilt.

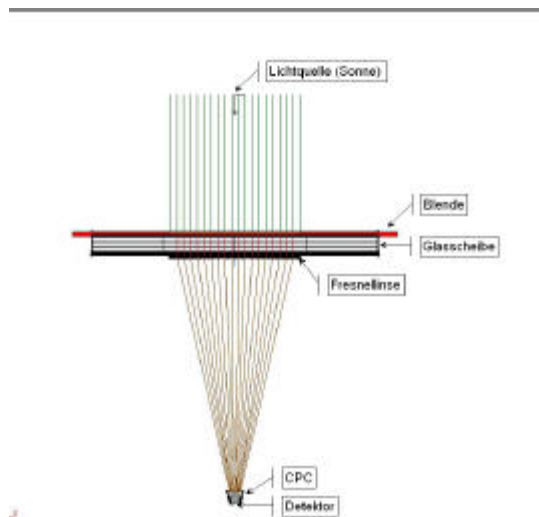


Abbildung 14: Das Konzentratorsystem mit CPC in OptiCAD mit Strahlengang.

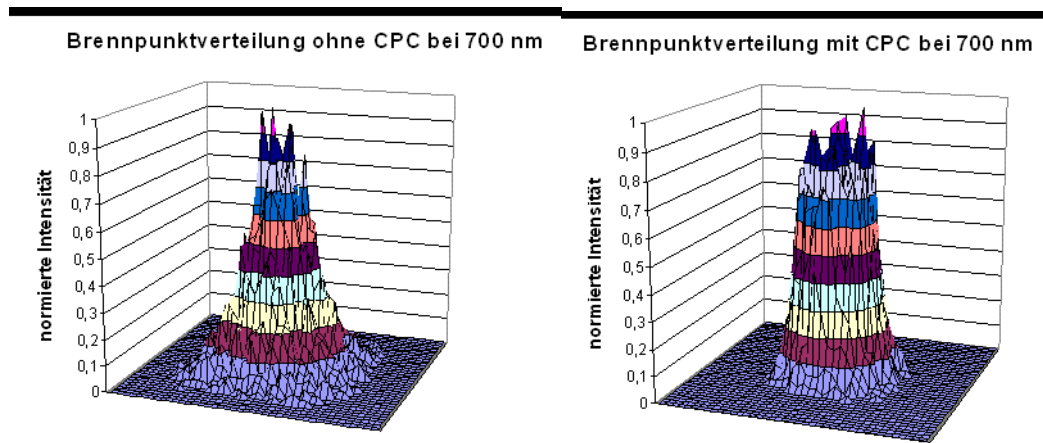


Abbildung 15: Intensitätsverteilung im Brennpunkt auf der Solarzelle (auf das Maximum Normiert). Es ist zu erkennen, dass der CPC das Licht besser konzentriert (steilere Flanken) und es im Maximum zu einer homogeneren Verteilung kommt