

# e!MISSION.at

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

29. 07. 2014

# Stratos – Stratified Solar Collector

838638

## e!MISSION.at - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	1. Ausschreibung e!MISSION.at
Projektstart	01. 03. 2014
Projektende	31. 03. 2014
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	12+1 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	AIT – Austrian Institute of Technology
AnsprechpartnerIn	Dipl.-Ing. Dr. Florian Hengstberger
Postadresse	Giefinggasse 2, 1210 Wien
Telefon	+43 (0) 50550-6609
Fax	+43 (0) 50550-6679
E-Mail	<a href="mailto:florian.hengstberger@ait.ac.at">florian.hengstberger@ait.ac.at</a>
Website	<a href="http://www.ait.ac.at">www.ait.ac.at</a>

# Stratos – Stratified Solar Collector

**Autor:**

Dipl.-Ing. Dr. Florian Hengstberger

# 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung .....	5
3	Inhaltliche Darstellung .....	7
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	19
5	Ausblick und Empfehlungen .....	20
6	Kontaktdaten .....	21

## 2 Einleitung

Um das zukunftssträchtige Gebiet der industriellen Prozesswärme im Bereich zwischen 100 und 250 °C (Mitteltemperaturbereich) für die Solarthermie zu erschließen, sind günstige Kollektoren mit hohen Wirkungsgraden notwendig. Stark konzentrierende Systeme (Parabolrinnen, Fresnel-Kollektoren) haben zwar geringe thermische Verluste, setzen aber nur die Direktstrahlung um, und sind aufgrund der aufwendigen Nachführung teuer. Deshalb wird gerade der Ansatz verfolgt, günstigere Kollektoren ohne Nachführung zu entwickeln und den geforderten Wirkungsgrad durch eine Verringerung der Konvektionsverluste zu erreichen. Untersucht werden zurzeit CPC-Kollektoren, konvektionsblockierende Folien oder Edelgasfüllungen. Alle diese Konzepte versuchen aber nur die Konvektion abzuschwächen. Die eigentliche Ursache, die die Konvektion treibt, bleibt aber stets erhalten: der heiße Absorber liegt tiefer als die kalte Glasabdeckung.

In dieser Sondierung wird ein radikal neues Kollektorkonzept zur vollkommenen Unterdrückung der Konvektion untersucht: durch den Einsatz nichtabbildender Optik soll die Strahlung im Kollektor so umgelenkt werden, dass der heiße Absorber höher als die kalte Glasabdeckung liegt. Die Umkehrung des Temperaturgradienten nimmt der Konvektion ihre treibende Kraft. Simulationsrechnungen aus der Literatur<sup>1</sup> zeigen, dass in solchen Fällen eine stabile Schichtung (Stratifikation) der Luft entstehen kann und der konvektive Wärmeverlust auf den Wert der reinen Gaswärmeleitung einbricht. Ohne Konvektion verhält sich die Luft wie ein sehr gutes Isoliermaterial, was den Wirkungsgrad eines solchen Kollektors sehr stark erhöhen wird.

Voruntersuchungen des AIT haben bereits gezeigt, dass es einfache Spiegel- und Absorbergeometrien gibt, die dieses Prinzip erfüllen und gleichzeitig optisch hoch effizient sind. Dies eröffnet die Möglichkeit einen Kollektor mit hohem Wirkungsgrad zu bauen, der Prozesswärme mit hoher Effizienz bereitstellen kann und trotzdem einfach konstruiert ist. Darüber hinaus kann der Kollektor so gefertigt werden, dass ein mechanisch stabiler Isolierwerkstoff gleichzeitig als Isolierung und als Träger von Spiegel und Absorber sowie als Gehäuse fungiert. Dies erlaubt eine einfache und kostengünstige Konstruktion mit hohem Vorfertigungsgrad. Da der Kollektor vertikal aufgestellt werden kann, ist er zudem perfekt für die Integration in eine Fassade geeignet.

Obwohl es starke Hinweise (Voruntersuchungen, Literatur) für die Funktion eines solchen Kollektors gibt, muss die Machbarkeit dieses schätzenswerten Konzepts erst durch detaillierte thermische Simulationen rechnerisch bewiesen werden. Ziel dieser Sondierung ist es, Indikatoren zu erarbeiten, um die technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Konzepts für ein nachfolgendes Forschungsprojekts zu bewerten.

Da eine aussagekräftige Beurteilung aber nur an einer Geometrie erfolgen kann, die thermisch und optisch schon nahe am Optimum liegt, muss diese zuerst mit einem Optimierungsverfahren automatisiert gesucht werden. Nach der Berechnung der Wirkungsgradkurve liefern Systemsimulationen

---

<sup>1</sup> A. Bairi, „Nusselt-Rayleigh correlations for design of industrial elements: Experimental and numerical investigation of natural convection in tilted square air filled enclosures“, Energy Conversion and Management, vol. 49, pp. 771–782, 2008.

das Potential, dass dieses Konzept zur Effizienzsteigerung hat. Um die Wirtschaftlichkeit der Konstruktion zu bewerten, werden ein geeigneter Isolierwerkstoff und ein Fertigungsverfahren recherchiert und die Kosten in Relation zu konkurrierenden Systemen gestellt.

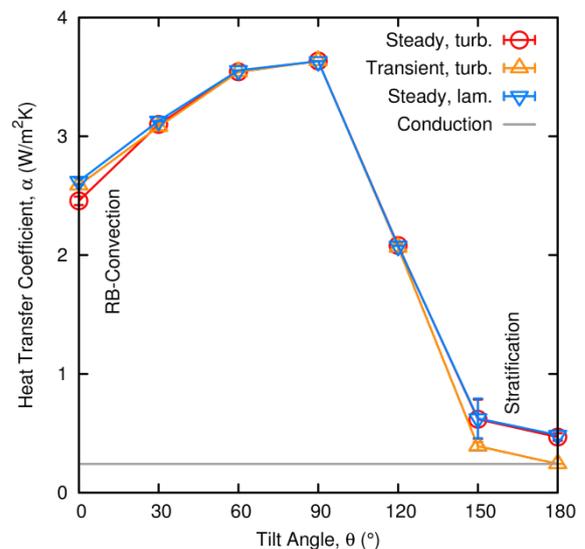
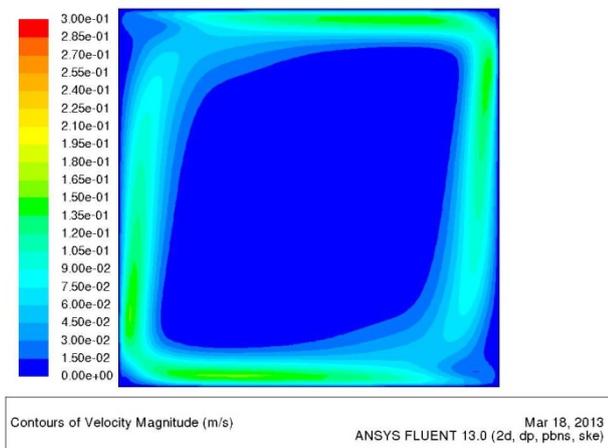
Alle Ergebnisse, die im Laufe dieser Sondierung erzielt werden, werden vorrangig an die Österreichische Kollektorindustrie kommuniziert, mit der Absicht das angestrebte Projekt der Industriellen Forschung vorzubereiten, in dem ein Demonstrator eines thermisch geschichteten Kollektor experimentell untersucht wird.

### 3 Inhaltliche Darstellung

#### Thermische CFD Simulationen in 2D

Dieses Arbeitspaket beinhaltet den Großteil der Forschungsarbeit mit den schwierigsten Aufgabenstellen: Den Einfluss der Geometrie auf die thermischen Verluste zu verstehen und eine optimierte Geometrie automatisch zu finden, die thermisch und optisch effizient ist.

Um diese Ziele zu erreichen wurden umfangreiche thermische CFD-Simulationen in 2D mit ANSYS Fluent durchgeführt. Zuerst wurde Simulationen an einer einfachen Box durchgeführt, um die Ergebnisse aus der Literatur<sup>2</sup> zu reproduzieren und um ein möglichst einfaches Simulationssetting zu finden. Tests ergaben nur geringfügige Unterschiede zwischen laminarer und turbulenter Rechnung (kleine Strömungsgeschwindigkeiten) sowie zwischen stationärer und transienter Rechnung (siehe Abbildung 1). Die Simulationen wurden daher später immer laminar und stationär durchgeführt. Ein generelles Problem bei diesen Simulationen ist, dass die Auftriebskräfte für die natürliche Konvektion bewusst stark verringert werden, wodurch die treibende Kraft für die Strömung abnimmt. Vor allem bei symmetrischen Problemen (heiße Fläche normal zur Gravitation) entstanden dadurch Konvergenzprobleme. Hier erwies sich ein Dreiecksgitter stabiler als ein Gitter aus Quadraten.

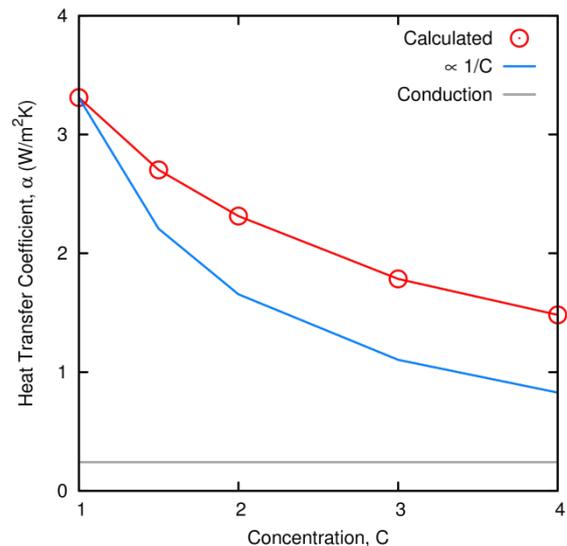
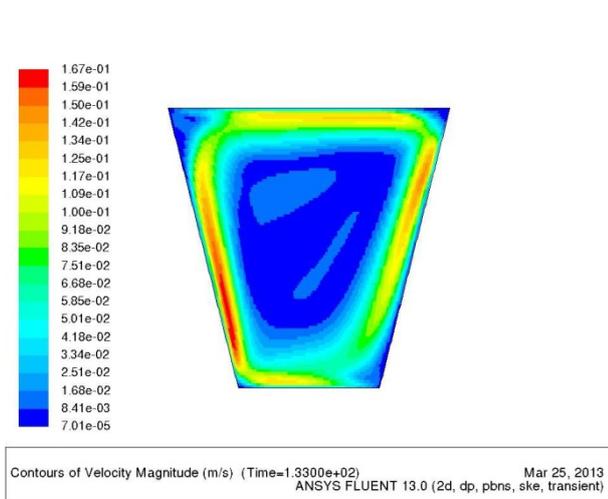


**Abbildung 1** Vergleich der CFD-Modelle. Testrechnungen an einem Modellfall (Box mit gegenüberliegender heißer und kalter Fläche) zeigen nur geringe Unterschiede zwischen stationären und transienten Rechnungen sowie zwischen Simulationen mit und ohne Turbulenzmodell. Ist die heiße Fläche oben, stellt sich eine thermische Schichtung (Stratifikation) ein und der Wärmeübergangskoeffizient bricht auf den der reinen Gaswärmeleitung ein.

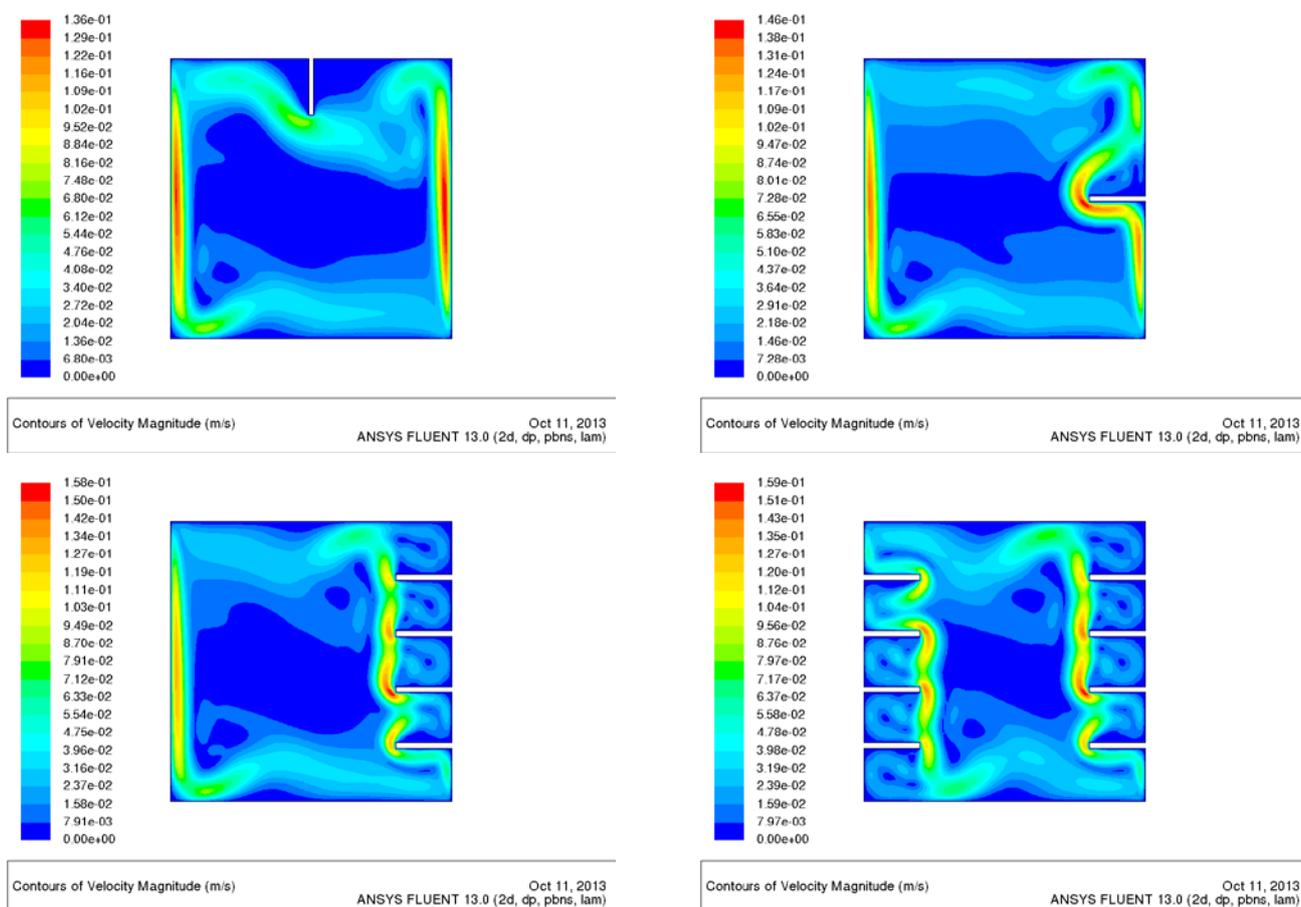
In einem ersten Anlauf wurde viele unterschiedliche Geometrievarianten in ANSYS Gambit erstellt, um einen groben Überblick über die grundlegenden Effekte zu haben. Es wurden folgende Varianten untersucht:

<sup>2</sup> A. Bairy, „Nusselt-Rayleigh correlations for design of industrial elements: Experimental and numerical investigation of natural convection in tilted square air filled enclosures“, Energy Conversion and Management, vol. 49, pp. 771–782, 2008.

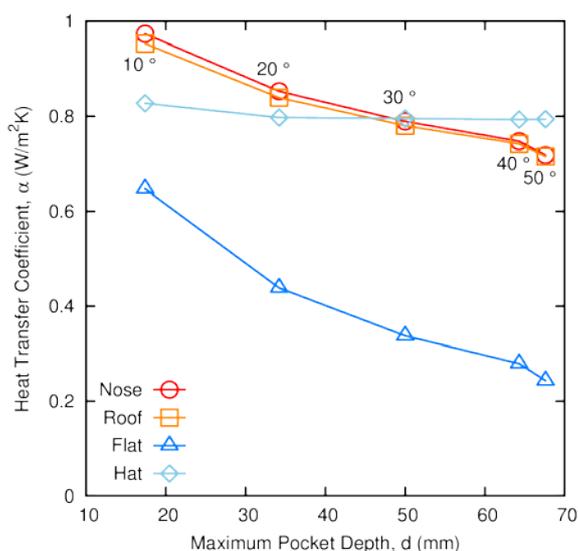
- *Reduktion der heißen Absorberfläche:* Die Verluste fallen nicht (wie naiv erwartet) proportional zur Konzentration (siehe Abbildung 2). Eine Reduktion der heißen Fläche wird also durch eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten teilweise wieder kompensiert (was auch die experimentellen Erfahrungen, die in MasterCPC gemacht wurden, widerspiegelt). Eine hohe Konzentration ist daher sicher nicht das Hauptziel der Optimierung. Die Konzentration ist für den angestrebten Akzeptanzwinkel von  $\theta_a = 30^\circ$ , bei dem der Kollektor kann in unseren Breiten stationär betrieben werden kann, ist auch nicht mehr sehr hoch ( $C = 1/\sin(\theta_a) = 2$ ).
- *Abstand der heißen von einer kalten Fläche:* Die Distanz zur kalten Fläche ist weitgehend egal für die Konvektionsverluste. Daher muss der Absorber nicht unbedingt weit weg von der Glasabdeckung sein.
- *Einbau von Leitblechen:* Die Strömung durch Einbauten gezielt umzulenken (siehe Abbildung 3) hatte kein nennenswerten Effekt auf den Wärmeübergangskoeffizient. Zudem ergeben sich große Schwierigkeiten für die optische Effizienz, da die Leitplatten zwangsläufig auch das einfallende Licht blockieren.



**Abbildung 2** Strömungsfeld und Wärmeübergang für eine konzentrierende Geometrie. Der Wärmeübergang sinkt nicht wie erwartet indirekt proportional zur Konzentration. Eine Konzentration der Strahlung auf eine kleinere Absorberfläche ist daher nicht unbedingt wichtig.



**Abbildung 3** Einbau von Leitblechen zur Verhinderung der Konvektion. Verschiedenste Varianten zur Unterdrückung der Konvektion durch Leitbleche haben sich als wirkungslos erwiesen: die natürliche Konvektion ist so kaum aufzuhalten.



**Abbildung 4** Einfluss der Absorbergeometrie und Position. Die CFD Simulationen zeigen, dass es besonders günstig ist, wenn der Absorber in einer Kavität versteckt ist („Flat“). Wenn auch die senkrechten Wände der Kavität absorbieren („Hat“), geht wieder Effizienz verloren.

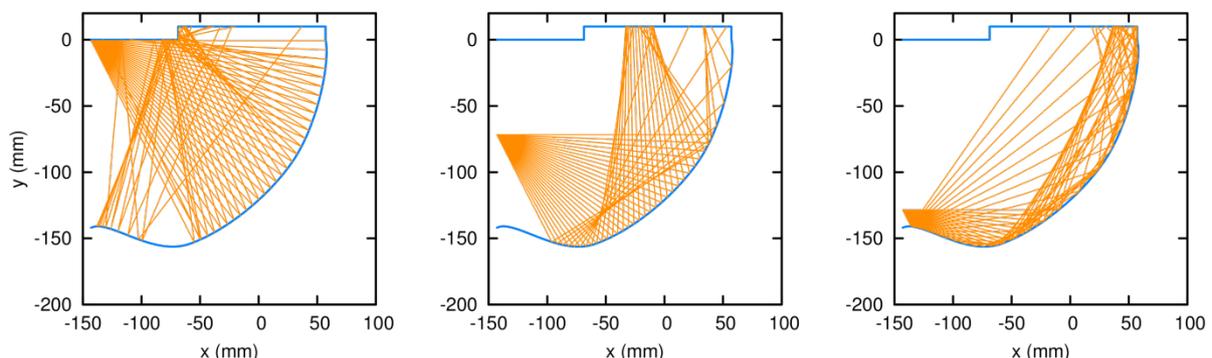
Im Zuge weitere Simulationen stellte sich heraus, dass die Ausrichtung des Absorbers wichtig ist. Deshalb wurden gezielt viele Simulationsreihen an einem einfachen Modell mit verschiedensten Absorber-Geometrie gerechnet. Hierbei wurde zuerst Richtung und Anstellwinkel des Absorbers geändert. Es zeigte sich, dass eine 90 °-Ausrichtung (Absorber normal zur Gravitation) besonders günstig ist, da hier die Auftriebskräfte direkt zur Wand hin zeigen und von dieser abgefangen werden. Weitere Simulationen zeigen, dass es besser ist, den Absorber in einer Kavität zu verstecken.

Dadurch waren die Anforderungen, die aus den thermischen CFD-Simulationen an den Optimierer entstanden, festgelegt:

1. Der Absorber muss horizontal (normal zur Gravitation) stehen.
2. Der Absorber sollte in einer Kavität versteckt sein.
3. Eine hohe Konzentration ist nicht unbedingt erforderlich.
4. Der Abstand des Absorbers vom Spiegel ist nicht besonders kritisch.
5. Der Spiegel muss so geformt sein, dass er die einfallende Strahlung in einem Winkelbereich von 0 bis 60 ° möglichst effizient auf den Absorber abbildet.
6. Der Absorber sollte größtmöglichen Abstand zum Spiegel haben, um einen Wärmeübertrag auf den Spiegel der nächste Ebene zu reduzieren. (Der Kollektor wird ja periodisch in der Höhe fortgesetzt).

### Beschreibung des Optimierungsverfahrens

Die simulierten Geometrien sind Modellgeometrien, die noch Spielraum für Optimierungen hinsichtlich der thermischen und optischen Effizienz haben. Da es eine Vielzahl von möglichen Abänderungen gibt, bedarf es eines automatischen Suchalgorithmus, der eine bestehenden Geometrie nach bestimmten Kriterien, die aus den thermischen Simulationen folgen (siehe oben), weiter optimiert.

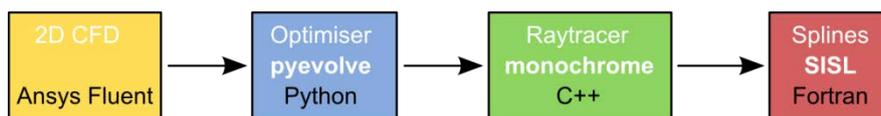


**Abbildung 5** Funktion des Raytracers. Die Geometrie ist durch Freiformkurven in 2D beliebig wählbar. Die Absorption der einzelnen Flächen wird berücksichtigt, um die Effizienz für verschiedene Einfallswinkel, den sogenannten Incidant Angle Modifier (IAM), zu berechnen.

Kern des Optimierungsverfahrens ist ein selbstgeschriebener Raytracer (siehe Abbildung 5), der sicherstellt, dass die Geometrie auch optisch effizient ist. Da dieser Raytracer oft aufgerufen wird und

daher schnell laufen muss, wurde er getrennt in C++ implementiert. Für die zeitkritischste Aufgabe, die Suche nach dem Schnittpunkt des Lichtstrahls mit der Geometrie, wurde nach einigen Tests die Fortran-Bibliothek SISL<sup>3</sup> des SINTEF verwendet. Mit ihr können Freiformkurven auf der Basis von Punkten und Ableitungen beschrieben werden. Die Punkte werden durch ein kubisches Hermitsches Polynom interpoliert und als B-Spline repräsentiert.

Es wurde ein horizontaler Absorber, der in einer Kavität versteckt, ist verwendet. Seine Tiefe und Distanz zum Glas ist durch einen Eckpunkt parametrisiert. Von dem Spiegel sind die Steigungen an den beiden Enden sowie die Höhe von zwei Punkten auf dem Spiegel frei wählbar. Zusätzlich ist die Spannung der Kurve einstellbar. Mit diesen Parametern können bereits eine große Anzahl von Geometrien beschrieben werden. Die Anforderungen aus den thermischen Simulationen wurden mit Hilfe dieser Parameter und den Resultaten des Raytracings (siehe unten) zu einer Kostenfunktion zusammengefasst. Die Anzahl der Freiheitsgrade wurde dabei bewusst gering gehalten. Eine höhere Anzahl führt leicht zu Redundanzen (eine sehr ähnliche Geometrie kann mit einem vollkommen anderen Parametersatz beschrieben werden) und ist die beste Garantie für Konvergenzprobleme.



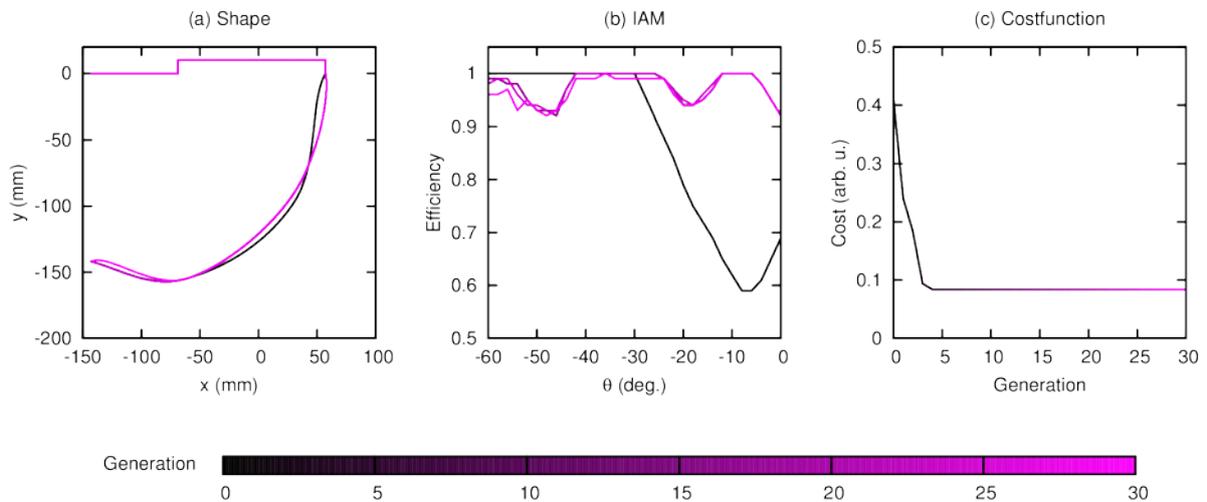
**Abbildung 6** Toolchain des Optimierers. Die zeitkritischste Aufgabe (schneiden der Lichtstrahlen mit der Freiformkurve des Spiegels) erledigt eine bewährte Fortran-Bibliothek. Der Raytracer, der die optische Effizienz für die Kostenfunktion auswertet, ist in C++ geschrieben. Der genetische Algorithmus selbst braucht wenig Zeit und ist in Python implementiert.

Um den richtigen Optimierer auszuwählen, war es notwendig einige (zeitintensive) Tests durchzuführen. Die gradientenbasierten Verfahren von Genopt<sup>4</sup> verirren sich schnell in lokalen Minima. Die Parameter der globalen Optimierer dieses Programms waren sehr schwer einzustellen. Versuche mit genetischen Algorithmen waren letztendlich vielversprechender und Aufgrund der vorhandenen Implementierung in der Sprache Python und der einfachen Parallelisierung viel die Wahl auf die freie Bibliothek pyevolve<sup>5</sup>. Die Toolchain des Optimierungsverfahrens ist in Abbildung 6 dargestellt.

<sup>3</sup> <http://www.sintef.no/Informasjons--og-kommunikasjonsteknologi-IKT/Anvendt-matematikk/Fagomrader/Geometri/Prosjekter/The-SISL-Nurbs-Library/SISL-Homepage/>, 2014.

<sup>4</sup> <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/>, 2014.

<sup>5</sup> <http://pyevolve.sourceforge.net/>, 2014.



**Abbildung 7** Evolution der Geometrie. Der entwickelte Algorithmus sucht automatisiert nach einer optimalen Lösung und bewertet die Geometrie mit einer Kostenfunktion, die Raytracing und die Resultate der thermischen CFD-Simulationen beinhaltet. Die optimierte Geometrie ist optisch hocheffizient (IAM > 95 % für fast alle Winkel).

Die Kostenfunktion für den Optimierer aufzustellen gestaltete sich als schwieriger als vermutet, da unterschiedlichste Einflüsse relative zueinander quantifiziert werden müssen. Die relativen Gewichte mussten von Hand eingestellt werden, um den Optimierer auf die (augenscheinlich richtige) Fährte zu bringen. Hier mussten auch klare Abstriche gemacht werden, da manche Forderungen miteinander nicht vereinbart werden können. Eine möglichst tiefe Kavität widerspricht sich mit einer hohen optischer Effizienz, da, um das einfallende Licht auf den höher liegenden Absorber zu leiten, auch der Spiegel gleichzeitig nach unten rutschen muss. Bei einer periodischen Fortsetzung der Struktur kommen sich dann Absorber und Spiegel so nahe, dass ein nicht mehr zu vernachlässigender Energieübertrag durch Wärmeleitung in der Isolierung stattfindet.

Dieses Problem wurde gelöst, indem zuerst die optische Effizienz bei fixer Höhe der Kavität optimiert wurde. Die thermische Trennung wurde dann in der optimierten Geometrie durch einen zusätzlichen Abstand sichergestellt, der aber die optische Effizienz reduziert (siehe unten).

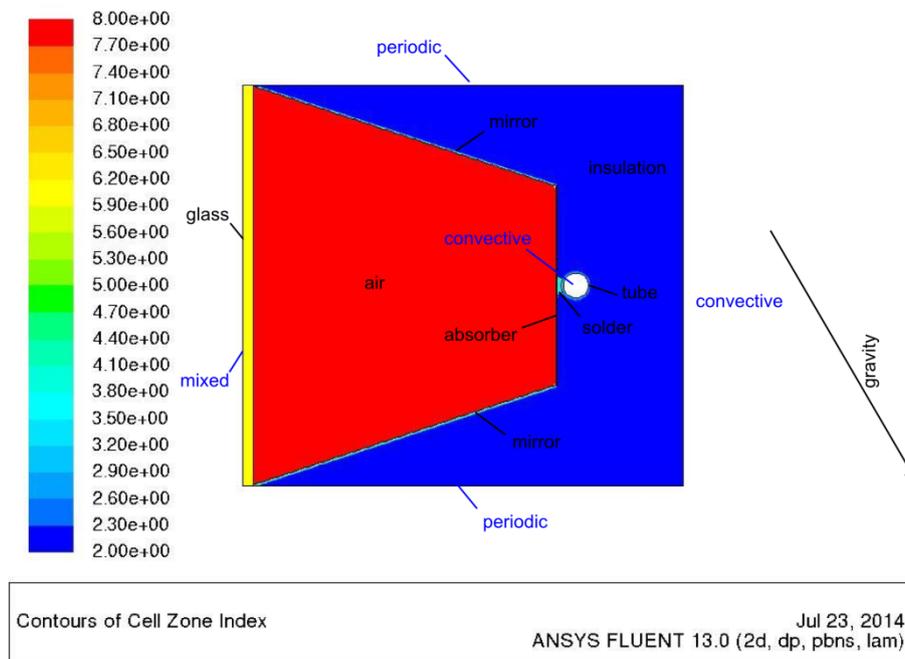
#### *Berechnung der Effizienz des Kollektors*

Die Effizienz des Kollektors wurde aufbauend auf den CFD-Modellen und der optimierten Geometrie durchgeführt. Die errechnete Größe war die thermische Leistung, die bei einer bestimmten Temperatur des Fluides, noch durch erzwungene Konvektion im Rohr abtransportiert wird. Als konkurrierende Wege stehen der auf den Absorber einfallenden Energie die Verluste über natürliche Konvektion über die Luft im Kollektor und die Wärmeleitungsverluste durch die Isolierung und entlang des Spiegels zu Verfügung. Die einfallende Strahlung wurde entsprechend der Apertur und der Absorption in Glas, Spiegel und Absorber korrigiert. Auch der Austausch von Wärmestrahlung innerhalb des Kollektors wurde im Modell berücksichtigt. Die Effizienz des Kollektors ergibt sich aus dem Verhältnis von der gesamten auf den

Kollektor eingefallenen Strahlungsleistung und der durch das Fluid abtransportierten thermischen Leistung.

In die abschließenden Simulationen gingen bereits die Ergebnisse der Materialrecherche ein. So wurde ein sehr dünner Aluminiumspiegel simuliert, um die Wärmeleitung entlang des Spiegels möglichst zu reduzieren, und es wurde bereits die Wärmeleitfähigkeit eines PUR/PIR-Hartschaums (siehe unten) verwendet.

Um eine rein auf Simulationen beruhende Vergleichsbasis zu haben, wurde auch ein einfacher CPC-Kollektor simuliert (siehe Abbildung 8). Er hat eine Akzeptanzwinkel von  $\pm 30^\circ$  (Konzentration  $C = 1/\sin(30^\circ) = 2$ ), sodass auch dieser Kollektor bei transversaler Aufstellung in unseren Breiten nicht nachgeführt werden muss. Der Referenz-CPC-Kollektor muss dazu um  $30^\circ$  gekippt werden. (In den Simulationen wird die Gravitation gedreht. Die Auswertung der Effizienz ist analog zu oben.

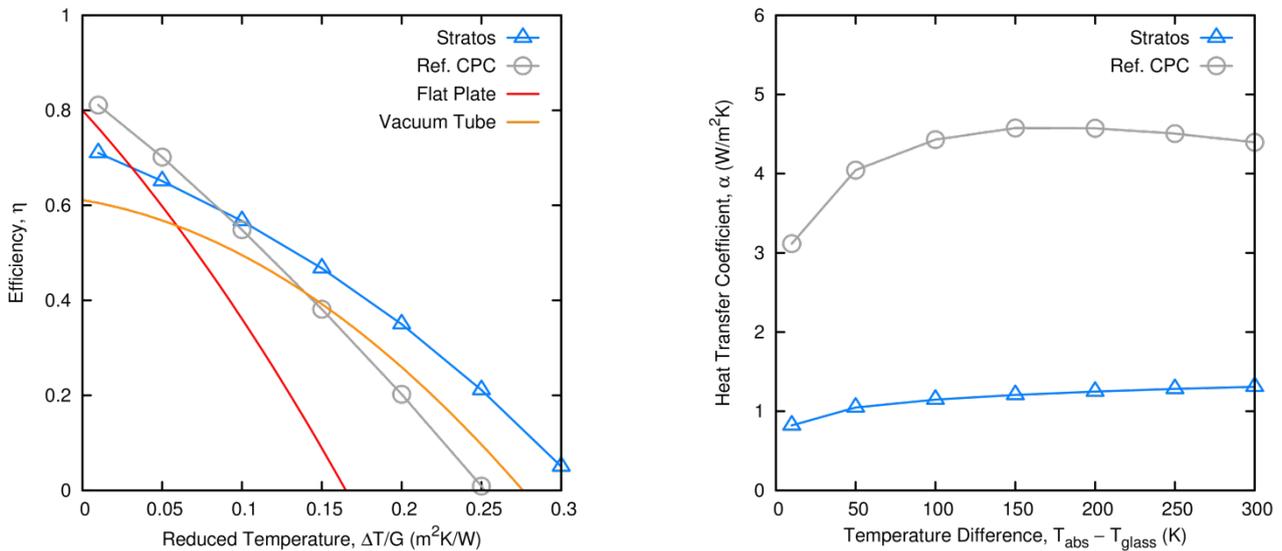


**Abbildung 8** Referenz CPC-Kollektor. Um eine simulatorische Vergleichsbasis zu haben, wurde ein Referenz-CPC Kollektor mit einer Konzentration von  $C = 2$  simuliert.

### Berechnung der Wirkungsgradkennlinie

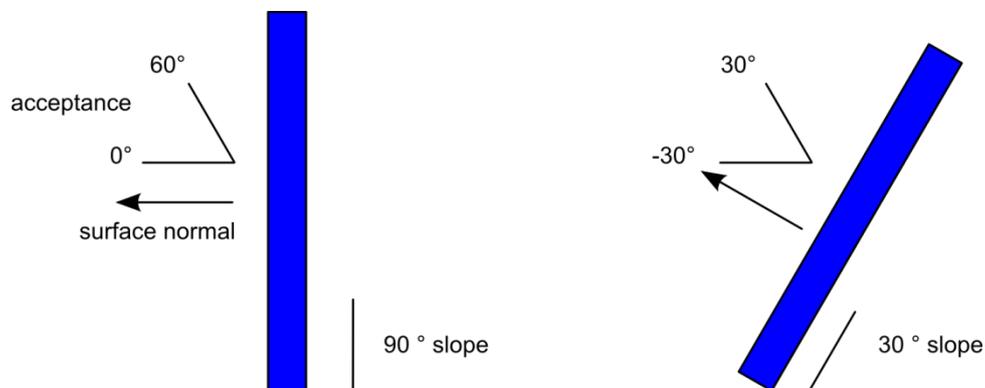
Die Simulationen wurde für eine Reihe von Fluid-Temperaturen im beabsichtigten Anwendungsbereich durchgeführt. Die Ergebnisse sind als Funktion der reduzierten Temperatur für eine Einstrahlung von  $1000 \text{ W/m}^2$  in Abbildung 9 dargestellt. Der Vergleich zum dem einfachen CPC-Kollektor als Referenzfall zeigt, dass das hier verfolgt Konzept deutlich bessere Performance bei hohen Temperaturen liefert. Dass der Stratos-Kollektor vom reinen CPC bei tiefen Temperaturen überhaupt übertriften wird, liegt an der geringeren optischen Effizienz, die durch die Trennung von Spiegel und Absorber entsteht. Als Vergleich dazu ist die Wirkungsgradkennlinie eines Flachkollektors und eines CPC-Kollektors gezeigt. Die simulierte Effizienz des Stratos-Kollektors ist vergleichbar zu der eines Vakuumröhrenkollektors. Hier

muss allerdings erwähnt und betont werden, dass die Effizienzkurve, die eines gemessenen Kollektors ist.



**Abbildung 9** Vergleich des Wirkungsgrades mit anderen Kollektortypen. Rechnerisch ist der Wirkungsgrad des STRATOS-Konzepts wesentlich höher als der des Vergleichs-CPCs. Der gerechnete Wirkungsgrad ist ähnlich der gemessenen Kennlinie einer Vakuumröhre.

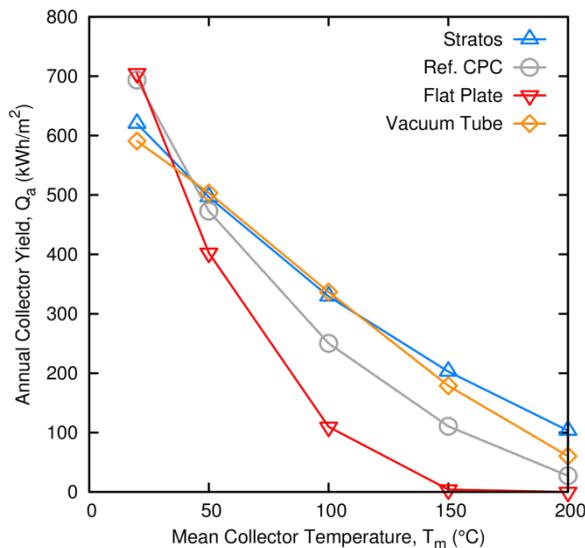
Die wesentlich bessere Performance des Stratos-Konzepts wird auch in einer Auswertung des Wärmeübergangskoeffizienten deutlich: er wird auf ein Viertel reduziert. (Beim CPC galt die größere Fläche, das Glas, als Bezugsfläche.) Der überraschend hohe Konvektionsverlust im CPC deckt sich qualitativ mit den Erfahrungen aus dem Projekten MasterCPC. Die wesentlich bessere Performance des STRATOS-Konzepts zeigt, dass dieses Konzept dem CPC überlegen ist. Wenn Spiegel eingesetzt werden, dann also nicht, um die Absorberfläche geringfügig zu konzentrieren, sondern besser, um den Absorber gut zu positionieren.



**Abbildung 10** Aufstellung des Kollektors. Der STRATOS-Kollektor verhält sich genauso wie ein gekippter CPC mit symmetrischer Akzeptanz.

*Simulation der Anlagenperformance*

Aussagekräftiger als eine reine Wirkungsgradkennlinie ist die Simulation der Anlagenperformance des Kollektors. Sowohl für die Fassadenintegration als auch für die Aufstellung auf einem Dach gibt es keine anderen Einschränkung als für normale CPC-Kollektoren: Ein senkrecht stehender Kollektor mit einer Akzeptanz von 0 bis 60 ° verhält sich (durch die eingebaute Optik) genau so, wie ein Kollektor mit symmetrischer Akzeptanz von – 30 bis 30 ° und einem Aufstellwinkel von 60 ° (siehe Abbildung 10).



**Abbildung 11** Jährlicher Kollektorsertrag für verschiedene Anwendungstemperaturen. Obwohl nicht die gesamte diffuse Strahlung umgesetzt werden kann, hat das STRATOS-Konzept für Anwendungen im Mitteltemperaturbereich einen mit einer Vakuumröhre vergleichbaren Jahresertrag.

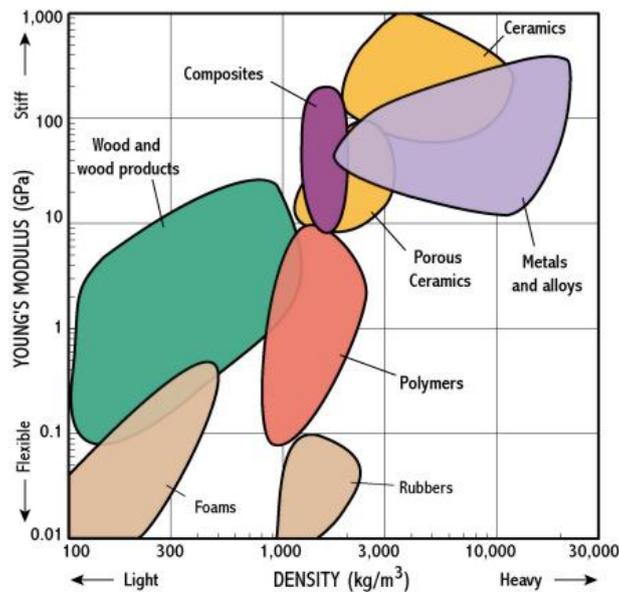
*Anlagenperformance in zwei Szenarien*

Mit Hilfe eines TRNSYS-Modells wurde die Jahresperformance in Abhängigkeit von der Kollektoreintrittstemperatur in einem einfachen System ermittelt, bei dem die gesamte Leistung (sofern positiv) über das Jahr aufsummiert wird. Um sich nicht für zwei willkürlich Temperaturniveaus bei Szenarien Wohnbau und Industrieanwendung festlegen zu müssen, wurde nicht zwei sondern insgesamt fünf Eintrittstemperaturen simuliert um den gesamten Anwendungsbereich zu erfassen. Es zeigt sich, dass das Stratos-Konzept nach diesen ersten Abschätzungen in einem weiten Temperaturbereich mit einer Vakuumröhre konkurrieren kann. Bei Temperaturen über 200 °C ist der Ertrag aber schon sehr gering, sodass vermutlich nicht der gesamte angestrebte Temperaturbereich bis 250 °C mit hoher Effizienz abgedeckt werden kann.

*Wirtschaftlichkeit des Kollektors*

Gleichzeitig mit dem neuen technischen Konzept zur Konvektionsverhinderung wurde auch ein neues Konstruktionsprinzip nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Der neue Ansatz besteht darin, dass die Isolierung des Materials auch mechanische Aufgaben übernimmt (Gehäuse, Halten von einzelnen Komponenten.) Dazu ist ein günstiges Material notwendig, dass nicht nur geringe Wärmeleitfähigkeit hat, sondern auch sehr steif und fest ist.

Da zusätzlich eine hoher Vorfertigungsgrad angestrebt wird und das Kollektorkonzept auf einem präzise geformten Spiegel aufbaut, der genau in Position gehalten werden muss, muss das stabile Isoliermaterial auch maschinell mit geringer Toleranz (< 1 mm) formbar sein. Deshalb muss auch ein geeignetes Fertigungsverfahren existieren, mit dem der Isolierwerkstoff günstig in Form gebracht werden kann.



**Abbildung 12** Ashby-Plot der Dichte und Elastizität verschiedener Materialklassen. Schäume bitte geringe Dichten und geringe Wärmeleitfähigkeiten. Hartschäume haben auch akzeptable Elastizitätswerte.<sup>6</sup>

Die Recherchetätigkeit, die unternommen wurden, um ein solches Material ausfindig zu machen, beruhen auf einer Internetsuche und bei den aussichtsreichen Kandidaten zusätzlich auf Telefoninterviews mit den Herstellern. Schäume sind hier die erste Wahl, da sie geringe Dichte und geringe Wärmeleitfähigkeit bei akzeptablen Elastizitätswerten haben (siehe Abbildung 12). Leider fallen viele Schäume aufgrund ihrer geringen Dauergebrauchstemperatur sofort aus, obwohl sie gute mechanische Eigenschaften und leicht bearbeitet werden können. Als gangbarer Weg haben sich (vor allem auch aufgrund der Erfahrung im Projekt Isolar) im Laufe der Recherche PUR/PIR-Schäume herausgestellt.

#### *Material, Fertigungsverfahren und Kosten*

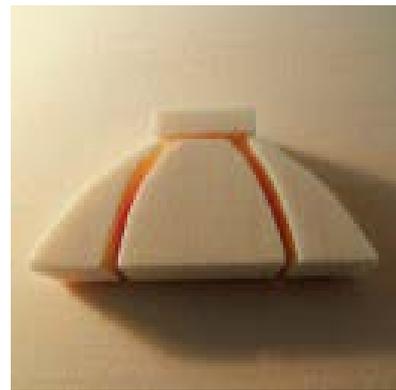
PUR/PIR-Schäume sind mögliche Kandidaten für die angestrebte Konstruktion, in der die Isolierung auch mechanische Aufgaben übernimmt. Ihre Eigenschaften können über einen weiten Bereich eingestellt werden und hängen im Wesentlichen von der Dichte, Struktur (offen- und geschlossenzellig), und Chemie (PUR/PIR-Anteil) des Materials ab.

<sup>6</sup> [http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/physics/str-tough\\_article/](http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/physics/str-tough_article/), 2014.

Exemplarisch soll der „Puren High Temperature Rigid Foam“<sup>7</sup> als Teil einer vielseitigen Produktfamilie dargestellt werden, die auch von mehreren anderen Herstellern abgedeckt werden kann. Der Schaum besitzt folgende physikalische Eigenschaften:

- Gute Dauergebrauchstemperatur: bis 200 °C
- Kurzzeitig bis 250 °C stabil
- Exzellente niedrige Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0.023 - 0.027 \text{ W/mK}$
- Geringe Dichte:  $\rho = 37 - 42 \text{ kg/m}^3$
- Geringe Elastizität:  $E > 200 \text{ MN/m}^2$
- Gute Biegefestigkeit:  $\sigma > 250 - 300 \text{ MN/m}^2$
- Geschlossenzellig und daher diffusionsdicht

Einfache Abschätzungen (Biegebalkentheorie) ergaben, dass dieses Material leichte Komponenten wie den Spiegel auch bei geringen Materialstärken von etwa 1 cm noch sicher tragen und genau in Position halten kann. Um auch den Absorber, der bei Stagnation sicher über 250 °C heiß wird, aufzunehmen, ist aber noch eine zusätzlich dünne Isolierschicht eines beständigeren Materials notwendig.



**Abbildung 13** Anwendungen von PUR/PIR-Schäumen. Diese Materialien werden bereits zur Isolierung von Fernwärmeleitungen verwendet und können mechanisch gut bearbeitet werden (Schneiden, Fräsen, Thermoformen).

PUR/PIR Schäume können vielfältig bearbeitet werden (siehe Abbildung 13). Als Fertigungsverfahren stehen Schneiden, Fräsen und auch Thermoformen zu Verfügung. Diese Schäume können gut geklebt, kaschiert und lackiert werden.

PUR/PIR Schäume sind Massenprodukte, die bereits im großen Stil zur thermischen Isolation verwendet werden. Sie sind jetzt schon in bestimmten Anwendungen wie z. Bsp. für Fernwärmeleitungen (siehe Abbildung 13) wirtschaftlich zu anderen thermischen Isolationsmaterialien konkurrenzfähig und werden auch in anderen Industriezweigen (Automotive, Luftfahrt, Bau) in großem Stil eingesetzt. Der Kollektor wird durch den Einsatz eines PUR/PIR-Schaumes sicher nicht unwirtschaftlich teuer. Es sind nur geringe Materialmehrkosten zu erwarten.

<sup>7</sup> <http://en.puren.com/industry/high-temperature-rigid-foam/>, 2014.

Insgesamt sind PUR/PIR-Hartschäume also sehr interessante Kandidaten für den Einsatz in Kollektoren bei höheren Temperaturen, da sie eine hohe Festigkeit bei geringer Wärmeleitfähigkeit bieten und flexibel geformt werden können.

## 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Thermische CFD-Simulationen an einer Vielzahl von verschiedenen vereinfachten Geometrien zeigten, welche Maßnahmen notwendig sind, um die gewünschte Abschaltung der natürlichen Konvektion und die damit einhergehende thermische Schichtung zu erreichen: Dazu ist es – wie anfangs vermutet – unbedingt notwendig, dass die heiße Absorberschicht über der kalten Glasabdeckung liegt, um den Naturumlauf stark einzuschränken. Zusätzlich ist aber nicht nur die Lage, sondern auch die Ausrichtung des heißen Absorbers wichtig. Dieser sollte horizontal ausgerichtet sein, sodass direkt am Absorber keine Auftriebskräfte parallel zur heißen Fläche entstehen.

Durch diese beiden Maßnahmen kann die Konvektion global (Verhinderung des Umlaufs) und lokal (Verhinderung der Auftriebskräfte direkt am Absorber) sehr stark reduziert werden. Besonders effektiv ist es, den Absorber in einer Kavität zu verstecken (siehe Abbildung 4). Die natürliche Konvektion an der Glasfront ist hingegen unvermeidbar, da diese Fläche senkrecht bleiben muss. Andere Maßnahmen, wie etwa der Einbau von Leitblechen zur gezielten Umlenkung der Konvektion, haben sich in den Simulationen als wirkungslos erwiesen.

Durch die Kopplung eines einfachen Raytracers an ein Optimierungsverfahren konnten automatisiert eine Geometrie gesucht werden, die nicht nur die thermischen Bedingungen, die aus den CFD-Simulationen entstanden sind, erfüllt, sondern auch optisch effizient ist. Allerdings muss die Lichteintrittsfläche des Kollektors etwas verkleinert werden, um eine Kavität herzustellen und diese auch noch vom darüber liegenden Spiegel thermisch zu trennen. Insgesamt ergibt sich mit den Absorptionsverlusten in Glas, Spiegel und Absorber selbst eine akzeptable optische Effizienz von etwa 75 %. Eine geringfügige Konzentration der Strahlung (Absorber kleiner als Eintrittsöffnung) ist zwar möglich, sie spielt aber für die thermischen Verluste kaum eine Rolle (siehe Abbildung 2).

Im Vergleich zu einem einfachen CPC-Modell als Referenzfall ergab sich eine eindrucksvolle Reduktion des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (siehe Abbildung 9). Für CPC-Kollektoren ist die geometrische Verhinderung der Konvektion also eine sehr effektive Maßnahme. Die rechnerische thermische Performance ist – nach diese ersten Abschätzungen – im Temperaturbereich zwischen 100 und 200 °C vergleichbar zu einer gemessenen Wirkungsgradkurve einer Vakuumröhre. Auch der jährliche Kollektorsertrag ist in einfachen Anwendungsfällen ähnlich zu der einer Vakuumröhre (siehe Abbildung 11). Über 200 °C ist der Wirkungsgrad des Kollektors gering.

Ein geeignetes Konstruktionsmaterial, das zwei Funktionen (thermische Isolierung und mechanische Stabilität) gewährleisten kann und mit hohen Dauergebrauchstemperaturen kompatibel ist existiert bereits (PUR/PIR-Hartschaum). Spezielle Varianten des Schaums können vielfältig automatisiert geformt und bearbeitet werden. Das Material ist vergleichbar teurer wie andere zurzeit verwendete Isoliermaterialien.

## 5 Ausblick und Empfehlungen

Aufgrund der Erfahrungen, die in dieser Sondierung gemacht wurden, empfehlen wir folgende weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten:

- *Entwicklung eines thermisch geschichteten Solarkollektors:* Die Bewertung des Kollektorkonzepts auf Basis von Simulationen ist positiv. In einem nächsten Schritt müssen mehrere Kollektoren auf Basis der optimierten Geometrie gebaut werden, um experimentelle Leistungsdaten zu gewinnen und um zu prüfen, ob die Versprechungen, die das Konzept in den Simulationen gemacht haben, in der Praxis auch halten kann.
- *Bau von Kollektoren, die ein mechanisch bearbeitbares Isoliermaterial einsetzen:* Das Konzept ein Isoliermaterial zu verwenden, dass gleichzeitig auch mechanische Eigenschaften übernimmt, kann für verschiedenste Kollektoren genutzt werden. Der nächste Schritt wäre zu untersuchen, welche Kostenreduktion durch dieses Konzept für welchen Kollektortypen entstehen würde und die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Materials genauer festzulegen. Schlussendlich sollten auch hier Kollektoren gebaut und vermessen werden, die dieses Konzept umsetzen.
- *Entwicklung von thermischen Speichern für Mitteltemperaturanwendungen:* Nur in Kombination mit leistungsfähigen thermischen Speichern, die den Mitteltemperaturbereich gut abdecken können, sind neue Anwendungen für diese Kollektortypen möglich. Daher muss die Untersuchung neuer thermischer Speicher (z. Bsp. Phasenwechselmaterial-Speicher oder thermochemische Speicher) unbedingt forciert werden.

## 6 Kontaktdaten

ProjektnehmerIn (Institution)	AIT – Austrian Institute of Technology
AnsprechpartnerIn	Dipl.-Ing. Dr. Florian Hengstberger
Postadresse	Giefinggasse 2, 1210 Wien
Telefon	+43 (0) 50550-6609
Fax	+43 (0) 50550-6679
E-Mail	<a href="mailto:florian.hengstberger@ait.ac.at">florian.hengstberger@ait.ac.at</a>
Website	<a href="http://www.ait.ac.at">www.ait.ac.at</a>