

# Optimierung Solarthermischer Kraftwerke durch Kopplung von SOFiSTiK mit Optikanalysesoftware

Bernd Zwingmann, schlaich bergemann und partner

Christof Husenbeth, schlaich, bergemann und partner

Wolfgang Schiel, schlaich bergemann und partner

## Zusammenfassung:

Solarthermische Kraftwerke unterliegen einem ständigen Entwicklungsprozess, der die Grundlage für die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellen Kraftwerkstechnologien darstellt. In diesem Beitrag wird beschrieben, wie durch die Anwendung von SOFiSTiK eine Optimierung von solarthermischen Kraftwerken durchgeführt werden kann. Die Herstellung der Schnittstellen zwischen FEM- und Optikanalysesoftware ist die Basis für ein Optimierungsprogramm, das eine automatisierte Optimierung der strukturellen Parameter ermöglicht und damit zu einem wichtigen Bestandteil im Entwurfsprozess wird.

## Summary:

Concentrating solar power plants require continuous research and development in order to improve their efficiency and competitive ability with conventional power plants. In this paper, a new method of using SOFiSTiK for the optimization of solar concentrators is described. The optimization tool with interfaces that connect structural and ray tracing software enables the automated optimization of structural parameters during the design process.



**Abbildung 1: Infinia PowerDish mit Gore-Facetten und der Parabolrinnenkonzentrator Eurothrough**

# 1 EINLEITUNG

Die Entwicklung solarthermischer Kraftwerke zur Erzeugung elektrischer Energie ist seit Bürogründung ein wichtiger Bestandteil der Arbeit von schlaich bergemann und partner. Im Wettbewerb mit den konventionellen Energieerzeugern wie Kohle-, Gas- und Atomkraftwerken verbessern die Ingenieure ständig die Effizienz und damit die Wettbewerbsfähigkeit der solarthermischen Kraftwerke.

Jeder Entwurfsprozess ist ein iterativer Optimierungsprozess, der von der Erfahrung des entwerfenden Ingenieurs geleitet zu einem funktionierenden und zumeist effizienten Tragwerk führt. Bei solarthermischen Kraftwerken ist die Optimierung jedes einzelnen Bauteils erforderlich, da die Strukturkosten maßgeblich die Stromgestehungskosten beeinflussen.

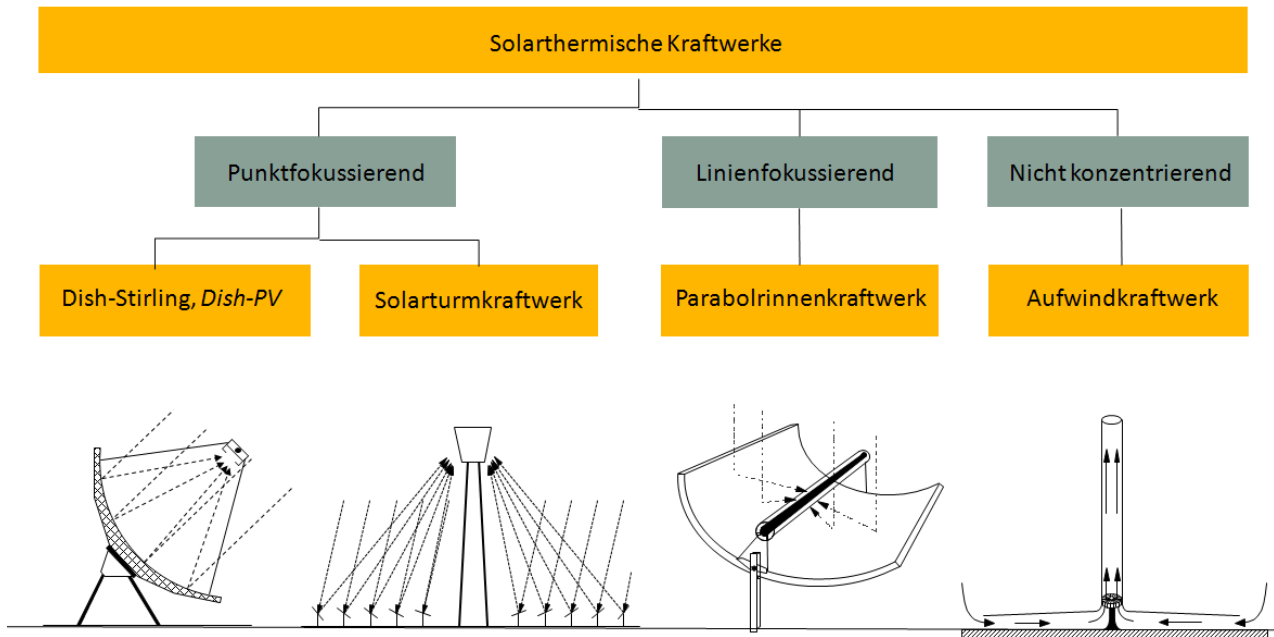
Durch die Verbindung von SOFiSTiK mit Optikanalysesoftware ist es gelungen, ein Optimierungsprogramm zu entwickeln, mit dem strukturelle Parameter automatisch optimiert werden können. Die Ergebnisse aus dem numerischen Optimierungsprozess fließen in den Tragwerksentwurf ein und ermöglichen, die Effizienz solarthermischer Kraftwerke zu steigern.

# 2 GRUNDLAGEN

## 2.1 *Solarthermische Kraftwerke*

Solarthermische Kraftwerke nutzen die Wärme der Sonne um elektrischen Strom zu erzeugen. Die verschiedenen Technologien können anhand der Art der Konzentrierung der Sonneneinstrahlung unterschieden werden. Die linien- und punktfokussierenden Systeme sind optische Geräte, die die Sonnenstrahlung im Fall der punktfokussierenden Kraftwerke bis 40000-fach konzentrieren. Sie werden mit hoher Präzision gefertigt und betrieben, so dass sie dem Sonnenstand tagsüber exakt folgen können.

Der Konzentrator ist der Teil der Anlage, der die Sonnenstrahlen reflektiert und konzentriert. Die reflektierende Oberfläche besteht meist aus verspiegeltem, gekrümmtem Glas. Die vom Konzentrator gebündelte Sonneneinstrahlung wird von einem Receiver aufgenommen und an ein Wärmeträgermedium abgegeben. Das Wärmeträgermedium in Form von Gas, thermischem Öl oder flüssigem Salz führt die Sonnenwärme einer Wärmekraftmaschine zur Erzeugung elektrischer Energie zu.



**Abbildung 2: Einteilung solarthermischer Kraftwerke**

Im Falle der Turm- und Parabolrinnenkraftwerke wird Wasserdampf erzeugt und eine Dampfturbine mit angeschlossenem Generator betrieben, wie es auch bei konventionellen Kraftwerken Standard der Technik ist. Ausgestattet mit einem thermischen Speicher sind solarthermische Kraftwerke in der Lage, Tag und Nacht Strom zu produzieren.

## 2.2 Modellierung und Strukturanalyse mit SOFiSTiK

Die Berechnung von Schnittgrößen und Verformungen an solarthermischen Anlagen erfolgt üblicherweise mit SOFiSTiK [1]. Die Modellierung als Texteingabe im Teddy ermöglicht die Verwendung von Variablen und Schleifen, die eine schnelle Anpassung des Modells ermöglichen. Beim Entwurf steht der Prozess der Energieerzeugung und nicht das Tragwerk im Vordergrund, so dass es regelmäßig zu Änderungen der Achsen und Abmessungen kommt, um den Konzentrator an die jeweiligen klimatischen und technischen Randbedingungen anzupassen.

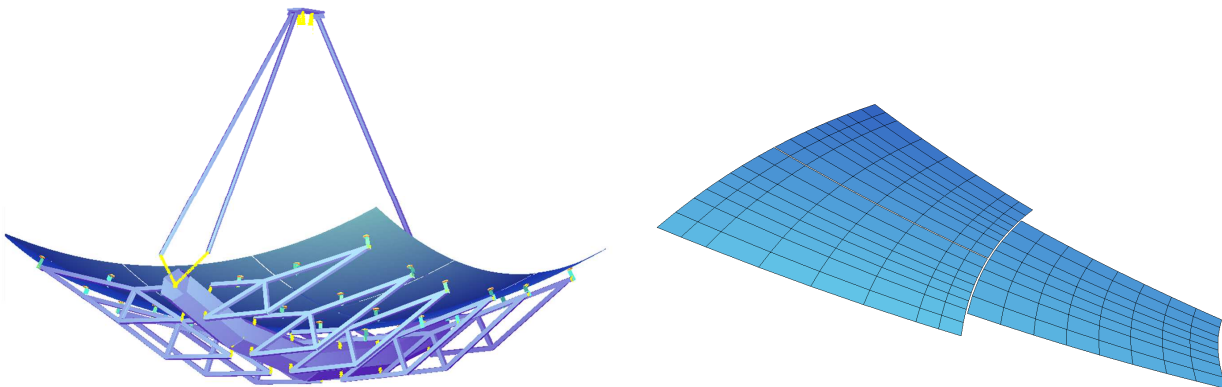
In der Teddy-Eingabedatei können Änderungen der Tragwerksgeometrie durch Anpassung von Variablen schnell umgesetzt werden, so dass ein neues Modell nach wenigen Arbeitsschritten zur Verfügung steht. Bei diesem Vorgehen ist die Wahl der Variablen und Nummerierung bei der ersten Erstellung des Modells von entscheidender Bedeutung, so dass auf die verschiedenen noch unbekannt Änderungen flexibel reagiert werden kann. Da der Konzentrator dem Sonnenstand folgt, kommt der Variable Bewegungswinkel eine besondere Rolle zu. Er beschreibt, in welchem Winkel der Konzentrator in der zu bemessenden Situation zum Zenit ausgerichtet ist. Eine Eingabedatei beginnt, ähnlich dem folgenden Beispiel, meist mit einer Vielzahl von definierten Parametern.

```

!#!Kapitel Variablen
#define f = 7.6           $ FOKUSLÄNGE [m]
#define w = 45           $ BEWEGUNGSWINKEL [°]
#define r = 1.2 2.5 4.1 $ RADIEN DER FACETTEN [m]
#define n = 8 12        $ ANZAHL DER FACETTEN PRO RING [ ]
#define t = 0.004       $ DICKE DER SPIEGELELEMENTE [m]

```

Die reflektierende Oberfläche des Konzentrators wird mit Quadelementen modelliert. Um einen regelmäßigen Netzaufbau zu erreichen, wird SOFIMSHA verwendet. Die Verformung der Spiegeloberfläche durch Eigengewicht und Wind ist ein wichtiges Kriterium zur Charakterisierung der Effizienz der Anlage.

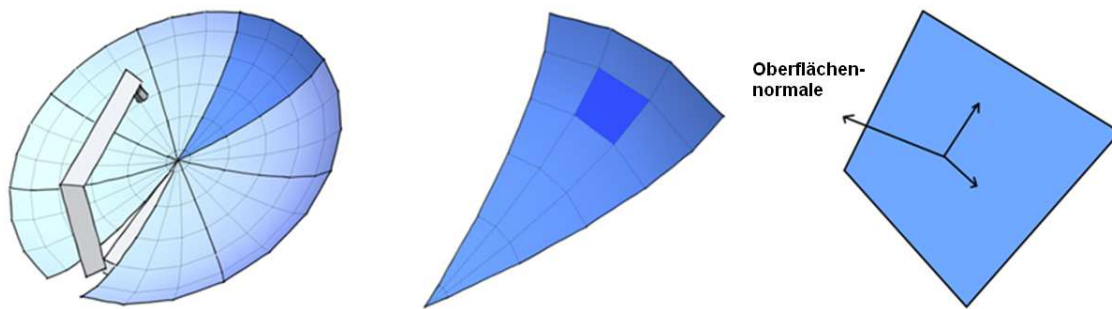


**Abbildung 3: FE-Modell eines Konzentrators und Netzaufteilung einer Spiegeloberfläche**

### 2.3 Raytracing und optischer Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Solarthermischen Kraftwerks setzt sich aus den Teilwirkungsgraden der Kraftwerksbestandteile zusammen. Der Wirkungsgrad des Konzentrators hängt von der Menge und die Verteilung der Energie ab, die den Receiver erreicht. Die optische Qualität eines Konzentrators wird während des Entwurfsprozesses durch die Optikanalyse ermittelt, bei der das Raytracing verwendet wird.

Mit Hilfe des Raytracings wird der tatsächliche Weg der Sonnenstrahlen von der Sonne über den Konzentrator bis zum Receiver verfolgt. Die Energiedichteverteilung auf der Receiveroberfläche wird aus dem Integral aller auftreffenden Sonnenstrahlen ermittelt. Aus der Energiedichteverteilung können wichtige Aussagen über die optische Qualität gemacht werden. Das sind beispielsweise die maximale Energiedichte, der Energiedichtegradient und die Energieverluste.



**Abbildung 4: Dish-Konzentrator, Gore-Facette und diskretisiertes Flächenelement**

Beim Raytracing wird die Oberfläche des Konzentrators diskretisiert und die Elemente durch ihre Oberflächennormale und ihren Flächeninhalt ersetzt. Die Neigung der Oberflächennormale bestimmt den Verlauf eines Strahls mit der auf der Elementoberfläche reflektierten Energie. Als Optikanalysesoftware wird CIRCE [2] verwendet. Die Diskretisierung der Spiegelfläche erfolgt bereits in SOFiSTiK mittels der Netzeinteilung in Finite Elemente.

Abweichungen im Strahlenverlauf entstehen durch die Ausdehnung der Sonnenscheibe, die Imperfektionen von Spiegeloberfläche und Spiegelkontur, sowie durch die Verformung der Spiegeloberfläche aus Belastung. Eigengewicht und Windlasten verursachen in den verschiedenen Betriebssituationen Verdrehungen der Oberflächennormalen der diskretisierten Elemente und lenken die reflektierten Strahlen ab. Die Abweichungen vom theoretischen Strahlenverlauf verschlechtern die optische Qualität der Konzentrators.

## 2.4 Optimierung

Ein Optimierungsprozess handelt es sich generell um die Suche des globalen Extremwertes einer Zielfunktion. Die Zielfunktion beschreibt die zu optimierende Größe in Abhängigkeit der Entscheidungsvariablen. Während des Optimierungsprozesses werden die Entscheidungsvariablen variiert, so dass die Zielfunktion einen Extremwert erreicht. Das Vorgehen bei der Variation der Variablen wird über das Optimierungsverfahren charakterisiert. Die Extremwertsuche ist immer die Suche nach einem Minimum. Wird vom Optimierungsproblem ein Maximum gefordert, wird die entgegengesetzte oder inverse Zielfunktion verwendet.

Optimierungsprobleme mit mehreren Entscheidungsvariablen sind komplexe Aufgaben, deren numerischer Aufwand exponentiell mit der Anzahl der Variablen steigt. Bei steigender Anzahl der Variablen und steigender Nichtlinearität der Zielfunktion sinkt gleichzeitig die numerische Stabilität. Der Verlauf der Zielfunktion ist im Allgemeinen unbekannt. Für hochgradig nichtlineare Probleme der Strukturmechanik können iterative Optimierungsmethoden wie das Downhill-Simplex-

Verfahren [4] oder Gradientenmethoden verwendet werden. Zufallsmethoden wie die Monte-Carlo-Simulation oder Evolutionsstrategien sind ebenfalls geeignet. Das Downhill-Simplex-Verfahren ist ein einfaches Optimierungsverfahren für nichtlineare Probleme, das sich durch seine hohe Robustheit auszeichnet. Es ist als Funktion *fminsearch* in Programmsystem MATLAB [3] vordefiniert.

Als Zielfunktion für einen Solarkonzentrator kann beispielsweise die Gesamtenergie auf dem Receiver oder die Gleichmäßigkeit der Energiedichteverteilung verwendet werden. Die Entscheidungsvariablen sind Eingabeparameter der Struktur wie beispielsweise die Anzahl und der Abstand von Befestigungspunkten, Bauteildicken und Steifigkeiten.

Nebenbedingungen beschränken die Werte der Entscheidungsvariablen. Die Ungleichungen der Nebenbedingungen müssen von den Entscheidungsvariablen erfüllt werden, damit der zugehörige Funktionswert der Zielfunktion zulässig ist. Typische Nebenbedingungen sind das Einhalten von maximalen Dicken, minimalen Abständen oder der maximal zulässigen Spannung.

### 3 OPTIMIERUNG SOLARTHERMISCHER KRAFTWERKE

#### 3.1 *Motivation*

Das Ziel der Optimierung solarthermischer Kraftwerke ist die Steigerung ihrer Effizienz und die damit verbundene Reduzierung der Stromgestehungskosten für Solarstrom. Moderne Solarkraftwerke müssen hocheffizient sein, um mit konventionellen Anlagen konkurrieren zu können, die einen Entwicklungsvorsprung von mehr als 100 Jahren haben. Mit den Methoden der Finiten Elemente und der numerischen Optimierung stehen Werkzeuge zur Verfügung, die den Entwurf von optimierten Tragwerksstrukturen erleichtern. Bei steigenden Preisen für konventionelle Energieträger und gleichzeitiger ständiger Verbesserung der Solarkraftwerke ist die Grid Parity, also gleicher Preis für konventionellen Strom und Solarstrom nur eine Frage der Zeit.

#### 3.2 *Ablauf des Optimierungsprozesses*

Die drei Hauptbestandteile des Optimierungsprozesses sind die Tragwerksanalyse, die Optikanalyse und die Anwendung des Optimierungsverfahrens. Die Tragwerksanalyse erfolgt mit SOFiSTiK unter Angabe der Werte der zu variierenden Parameter. Die Tragwerksantwort in Form von Verformungen wird an CIRCE übermittelt und die Energiedichteverteilung auf dem Receiver bestimmt. Die Optimierungsmethode berechnet den Wert der Zielfunktion aus der CIRCE-Ausgabe und ermittelt die neuen Werte für die Entscheidungsvariablen, solange kein Optimum erreicht ist. Im Allgemeinen ist eine Vielzahl von Optimierungszyklen notwendig, um das Optimum zu finden.



**Abbildung 5: Ablauf des Optimierungsprozesses**

Der Optimierungsprozess wird von einem MATLAB-Programm gesteuert, das das Optimierungsverfahren (*fminsearch*) beinhaltet, die notwendigen Informationen zwischen den SOFiSTiK und CIRCE austauscht und die beiden Programme jeweils zum gegebenen Zeitpunkt startet. Die Zielfunktion und die dazugehörigen Nebenbedingungen sind ebenfalls im MATLAB-Programm definiert, so dass es den Optimierungsprozess überwacht und gegebenenfalls beendet.

Der Befehl in MATLAB zum Starten von SOFiSTiK mit der dazugehörigen Eingabedatei lautet `system(['C:\Programme\SOFiSTiK\2010\ANALYSIS_25\sps.exe ' ['Eingabedatei.dat']]);`

und die Optimierungsfunktion *fminsearch* wird mit `[x_optimiert] = fminsearch(ZIELFUNKTION, x_startwert);` gestartet.

### 3.3 Schnittstellen zwischen den Programmen

Für den automatisierten Ablauf des Optimierungsprozesses ist ein Austausch von Informationen zwischen den Programmen notwendig. Die verwendeten Programme SOFiSTiK und CIRCE verfügen über die Möglichkeit der Datenaus- und eingabe mittels ASCII-Dateien. Im Folgenden wird nur auf den Informationsaustausch mit SOFiSTiK eingegangen.

Die Entwurfsvariablen werden an SOFiSTiK über einen Eintrag in die Teddy-Datei übergeben. Dafür wird der Anfang der Datei mit den aktuellen Werten der Parameter überschrieben. Im nachfolgenden Beispiel werden 3 Variablen belegt, die später in der Datei verwendet werden, um die Bauteilgeometrie zu bestimmen.

```

+PROG AQUA
STO#var1 0.15
STO#var2 0.97
STO#var3 0.56
  
```



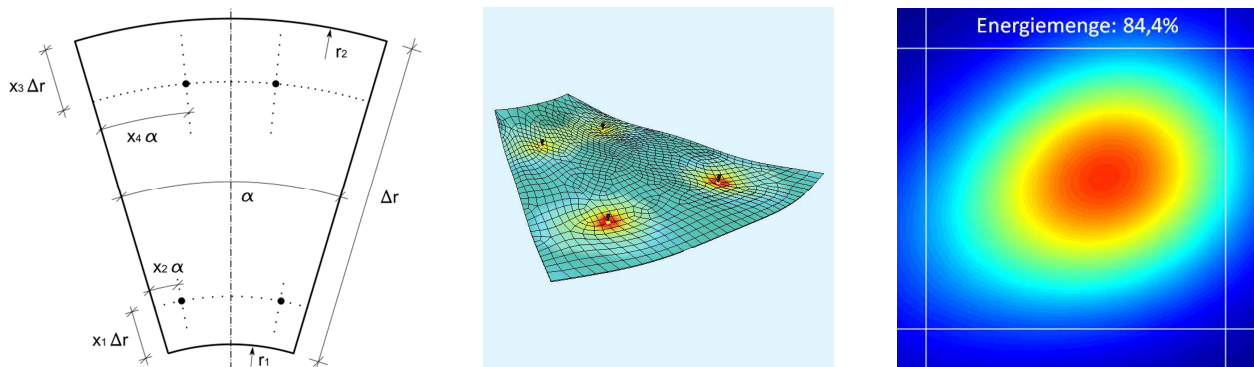
Am Ende der Teddy-Datei befindet sich ein Abschnitt, der die Database ausließt und die Werte der Quads-Eckknoten, der Knotenkoordinaten und der Verschiebungen in die Ist-Ausgabedatei schreibt. Als Beispiel ist die Ausgabe der Knotenkoordinaten dargestellt.

```
@KEY NODE
LET#CDB_IER 0
LOOP
  LET#10 @NR, @XYZ, @(XYZ+1), @(XYZ+2)
  IF (#CDB_IER<2) & (#10<>0)
    TXE (#10,10)  (#11*1000,20.8)  (#12*1000,20.8)  (#13*1000,20.8)
  ENDIF
ENDLOOP #CDB_IER<2
```

Mit den Angaben aus der .Ist-Ausgabedatei werden die Oberflächennormalen der Quad-Elemente berechnet und neben anderen Eingabewerten an CIRCE übermittelt.

#### 4 BEISPIEL

Das Verfahren wird an einem Beispiel erläutert. Eine Gore-Facette aus verspiegeltem Floatglas ist auf 4 Punkten gelagert. Die Lage der Auflagerpunkte ist mittels der 4 Variablen  $x_1$  bis  $x_4$  vom Rand aus definiert.



**Abbildung 6: Optimierungsproblem einer Gore-Facette mit 4 Auflagerpunkten**

Die Facette ist so ausgerichtet, dass die reflektierten Sonnenstrahlen den Receiver treffen. Wird die Facette durch Eigengewicht belastet, verformt sich die Oberfläche. Ein Teil der Strahlung verfehlt die Receiverfläche, so dass nur 84,4% der reflektierten Sonnenenergie tatsächlich den Receiver erreichen.

Eine Zielfunktion wird definiert, dass die am Receiver ankommende Energiemenge maximal werden soll. Zu Beginn der Optimierung werden alle Entscheidungsvariablen mit 0,25 vordefiniert, das



heißt, dass sich die Auflagerpunkte bei einem Viertel des Öffnungswinkels und einem Viertel der radialen Länge der Facette vom Rand entfernt befinden. Beim Start der Optimierung werden die Entscheidungsvariablen in die SOFiSTiK Eingabedatei geschrieben. SOFiSTiK wird ausgeführt, die Facette mit den neu definierten Auflagerpunkten modelliert und die Verformung unter Eigengewicht ermittelt. Die Modellgeometrie und die Ergebnisse der Knotenverschiebung werden an CIRCE übermittelt, das die Energiedichteverteilung anhand der verformten Geometrie bestimmt.

Die ankommende Energiemenge wird als Flächenintegral der Energiedichteverteilung über die Receiverfläche ermittelt. Mit der Energiemenge als Funktionswert der Zielfunktion für die momentanen Werte der Entscheidungsvariablen wird ein neuer Vektor von Entscheidungsvariablen entsprechend des Downhill-Simplex-Verfahren bestimmt. Ein neuer Optimierungsschritt beginnt. Als Zielfunktion wird die inverse Zielfunktion verwendet, da es sich um die Suche nach einem Maximum handelt,

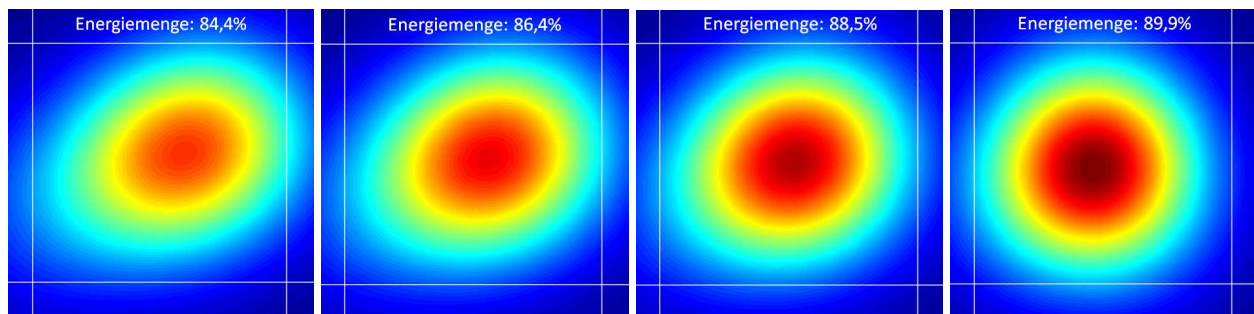


Abbildung 7: Darstellung der Energiedichteverteilung für ausgewählte Optimierungsschritte

Das Optimierungsproblem konvergiert hier bereits nach wenigen Berechnungsschritten. Der Maximalwert der Energiemenge von 89,9% der Reflektierten Energie wird für die Entscheidungsvariablen  $x = [0,2431 \ 0,2577 \ 0,2344 \ 0,2596]$  erreicht.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Entwicklung und ständige Verbesserung von Solarthermischen Kraftwerken sind Aufgaben, die zum Portfolio von schlaich bergemann und partner gehören. Der computergestützte Entwurf von Tragwerken bietet die Möglichkeit, Optimierungsprozesse bereits in den Entwurfsprozess zu integrieren. Mit der Kopplung von SOFiSTiK mit CIRCE über ein MATLAB-Programm ist es gelungen, den Prozess der Strukturoptimierung zu automatisieren und dem entwerfenden Ingenieur ein mächtiges Werkzeug zur Verfügung zu stellen. Die optische Qualität von Solarkonzentratoren kann durch die Optimierung verbessert und damit die Effizienz von solarthermischen Kraftwerken gesteigert werden.

Das dargestellte Vorgehen bei der Optimierung ist nicht auf Solarkonzentratoren beschränkt. Auch andere Tragwerke mit variablen Parametern können mit Hilfe automatisierter numerischer Optimierungsprozesse optimiert werden, beispielsweise um Material zu sparen. Die Anwendung des Vorgehens auf andere Fragestellungen des Tragwerksentwurfs ist eine mögliche nächste Aufgabe.

## 6 LITERATUR

- [1] *SOFiSTiK AG Oberschleissheim; SOFiSTiK: Basics. 2010*
- [2] *Romero, V.J.; CIRCE2/DEKGEN2: A Software Package for Facilitated Optical Analysis of 3-D Distributed Solar Energy Concentrators. Sandia Report SAND91-2238, 1994*
- [3] *The MathWorks Inc; MATLAB & Simulink: Release notes for R2010a. 2010*
- [4] *Nelder, A. Mead R.; A simplex method for function minimization. Computer Journal, 7 (1965) 308-313*