

# Simulation und Optimierung von Lichtleitern

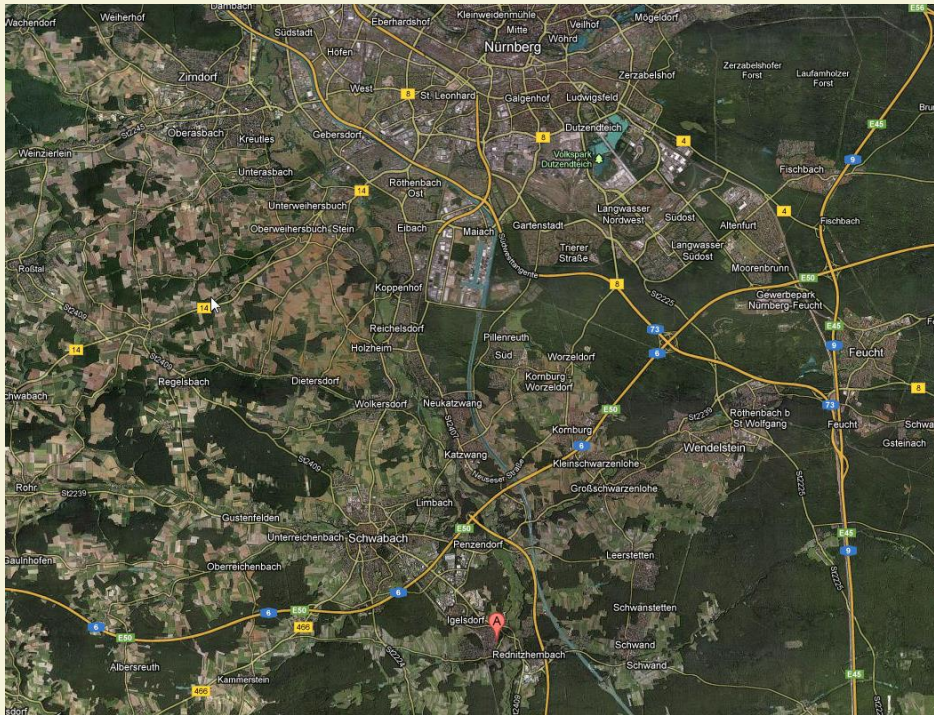
Bernhard Michel

# Übersicht

- Hembach Photonik – Kurzvorstellung
- Lichtleiter – Allgemeines
- Modellierung von Lichtleitern in Raytracingsoftware
- Beispiel: Optimierung eines linearen Lichtleiters
- Designgrenzen

# Hembach Photonik

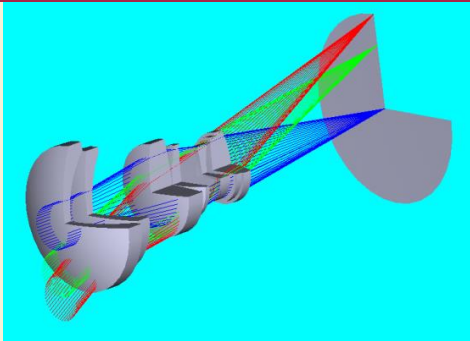
- Optikentwicklung,
- Analyse und Software
- Seit Januar 2011



- Firmensitz:  
Rednitzhembach bei  
Nürnberg
- Zurzeit 5 Mitarbeiter

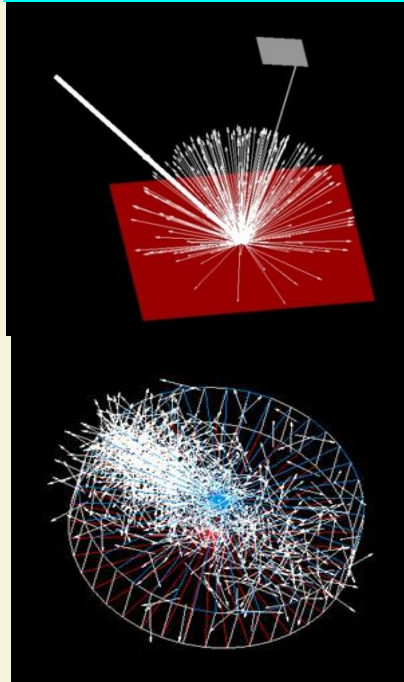
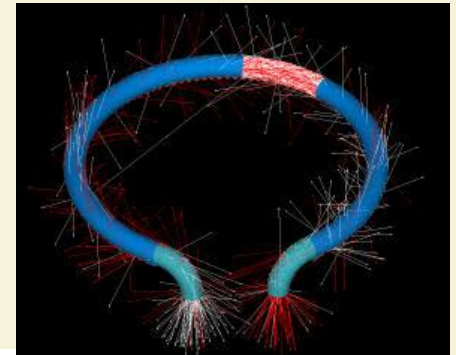
Hembach **Photonik**

# Hembach Photonik – Arbeitsgebiete



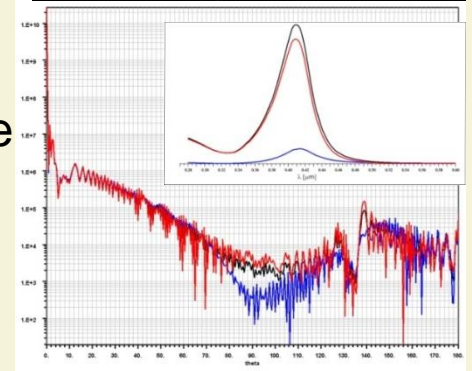
Abbildende  
Optik

Beleuchtungsoptik



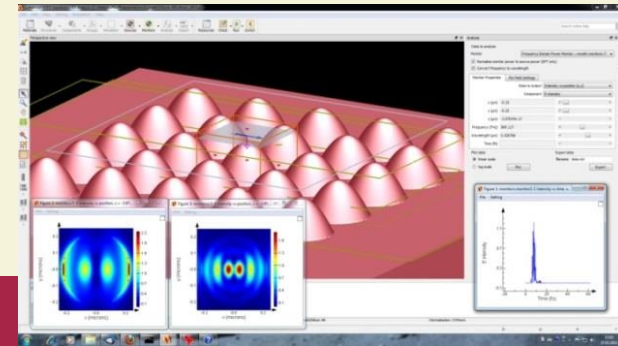
Störlichtanalyse

Kundenspezifische  
Software



Lichtstreuung

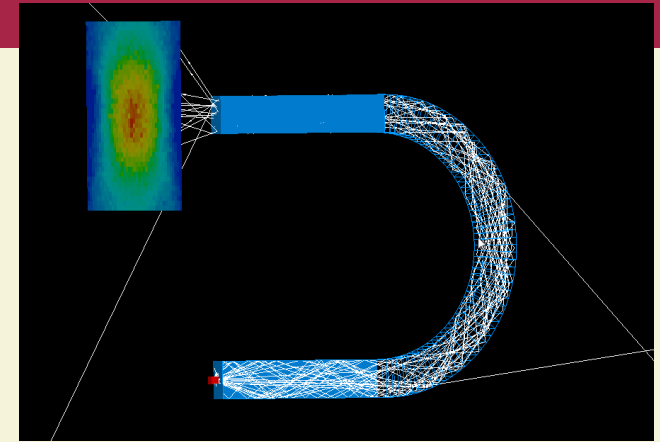
Software für  
Photonik  
(Lumerical)



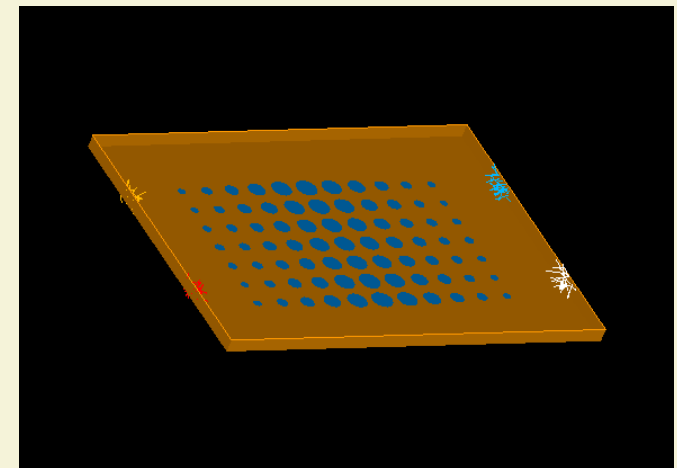
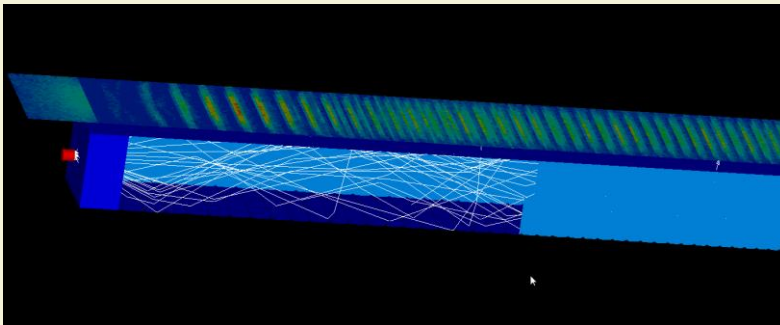
# Lichtleiter – Allgemeines

- Nicht-abbildendes optisches Bauteil, meist aus Kunststoff
- Aufgaben: Lichttransport, Lichtverteilung und Homogenisierung
- Grundprinzip: Totalreflexion

Licht-  
transport



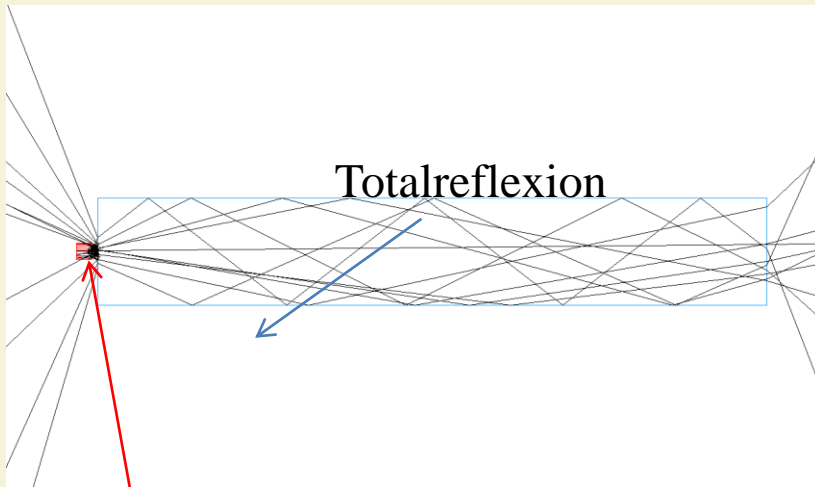
Licht-  
verteilung  
und  
Homo-  
genisierung



Hembach **Photonik**

# Grundprinzip von Lichtleitern: Totalreflexion

- Wechselwirkungen innerhalb des Lichtleiters: Totalreflexion
- Einkoppel/-Auskoppelstrukturen zur Unterbrechung der Totalreflexion



Brechung „zum Lot hin“; maximaler Winkel im Lichtleiter =  $\alpha_{crit}$

Kritischer Winkel:

$$\alpha_{crit} = \text{asin}(1/n)$$

n: Brechungsindex

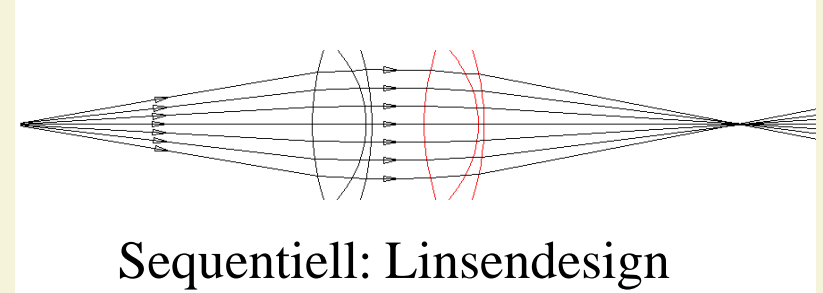
PMMA:  $\alpha_{crit} \approx 42^\circ$  ( $n = 1.49$ )

Polykarbonat:  $\alpha_{crit} \approx 39^\circ$  ( $n = 1.59$ )

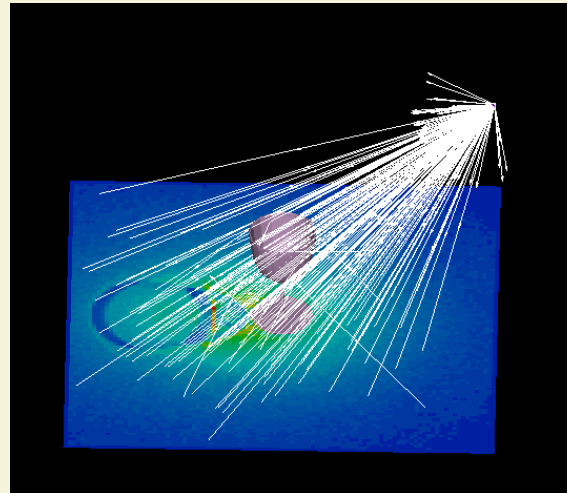


# Simulationismethode für Lichtleiter: nichtsequenzielles Raytracing

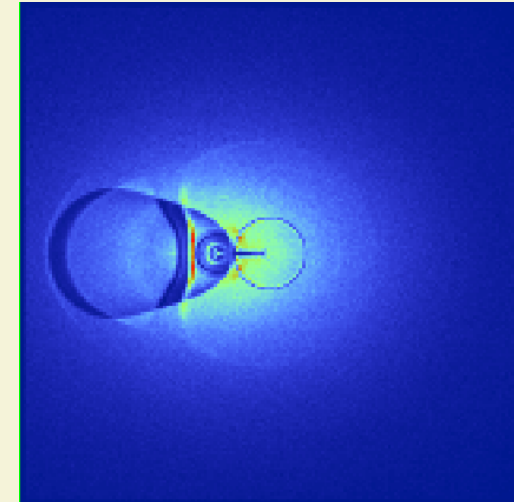
- **Raytracing (Strahlverfolgung):** Simulation der Lichtausbreitung in einem optischen System durch Strahlen
- **Sequentiell:** Strahlen treffen Objekte in einer vordefinierten Reihenfolge
- **Nicht-sequentiell:** die Reihenfolge der Objekte, die von einem Strahl getroffen werden, ist nicht fest vorgegeben. Besonders wichtig bei: Beleuchtungssystemen, Streu- bzw. Falschlichtanalyse.
- **Lichtleiterdesign nur mit nichtsequenziellen Raytracing möglich**



Sequentiell: Linsendesign



Nicht-sequentiell:  
Beleuchtungssysteme



Beispiel: ASAP

Hembach **Photonik**

# Kommerzielle Raytracer im Überblick

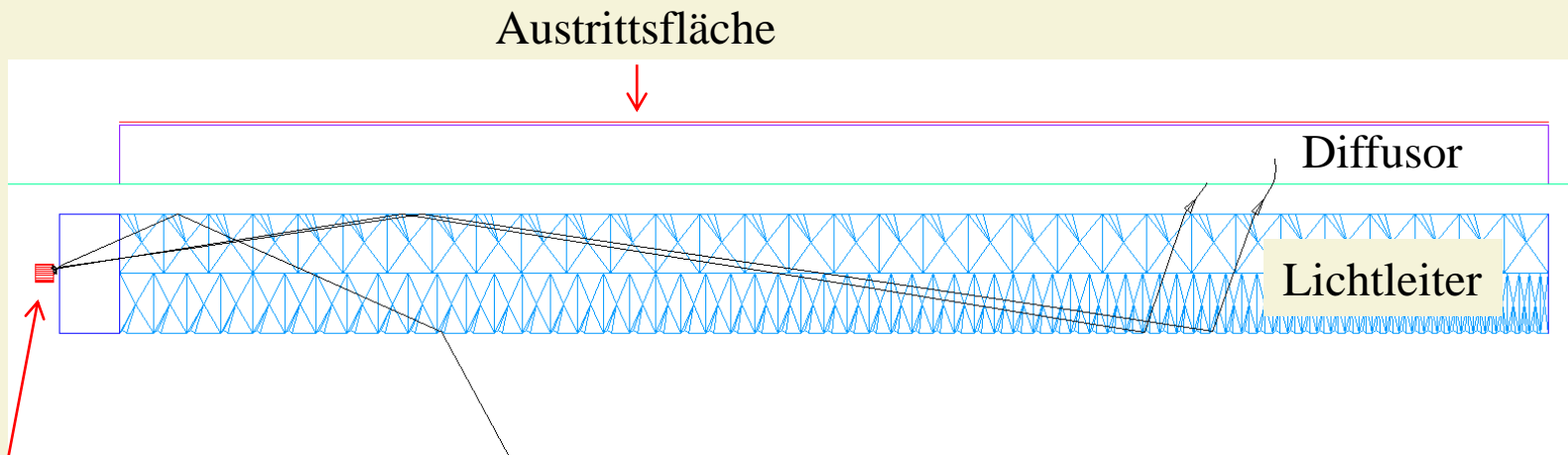
Software	Hersteller	Bemerkung
ASAP	Breault Research Organization	
APEX	Breault Research Organization	integriert in SolidWorks
FRED	Photon Engineering	
LambdaSpect	fx64	integriert in Inventor
LightTools	Synopsis	
LucidShape	Brandenburg	
OpTaLix	Optenso	Sequenziell/nichtsequenziell
OptiCAD	OptiCAD Corporation	
OptisWorks	Optis	integriert in SolidWorks
Photopia	LTI Optics	
Simulux	Infotec	
SPEOS	Optis	
SPEOS CAA V5 based	Optis	integriert in Catia V5
Spray W.Theiss	Hard- and Software	
TracePro	Lambda Research	
ZEMAX	Radiant ZEMAX	Sequentiell/nichtsequenziell



# Anforderungen an einen nicht-sequenziellen Raytracer

- Möglichst umfassende, physikalisch korrekte Modelliermöglichkeiten: (Doppel-)Brechung, Streuung im Volumen und an Oberflächen, Rauigkeit, ...
- Möglichst umfassende/flexible Geometriemodellierung
- Bibliotheken von Lichtquellen
- Gute Anbindung an CAD-Welt
- Parametrisierbarkeit des Systems
- Umfangreiche Analysemöglichkeiten: Photometrische und Radiometrische Größen, Kolorimetrie, Pfadanalyse etc.
- Automatisierbarkeit; wichtig für Optimierungsaufgaben

# Beispiel: Linearer Lichtleiter



LED

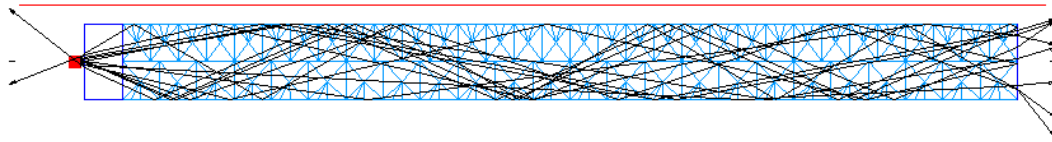
Optimierung mit Software ASAP (Breault Research Organization).

Optimierungsziele:

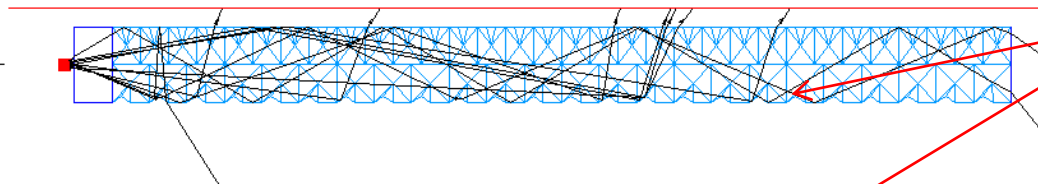
- Homogene Leuchtdichte bei senkrechter Betrachtung
- Hohe Effizienz

OPTIMIERUNG bedeutet: Kompromiss schließen zwischen Homogenität und Effizienz!

# Auskoppelstrukturen zur Unterbrechung der Totalreflexion

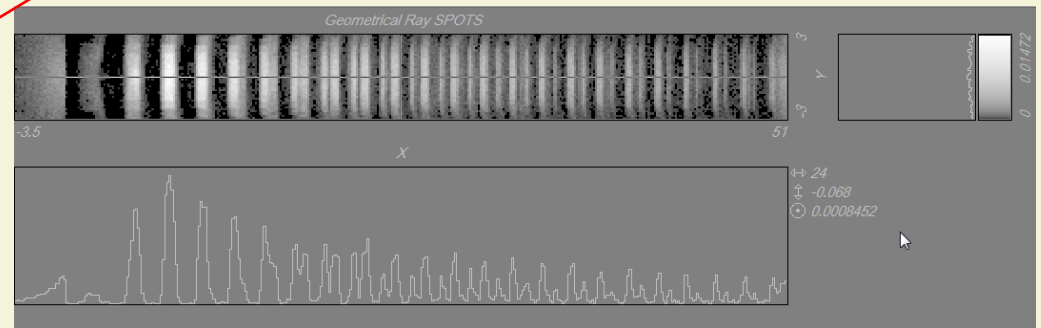
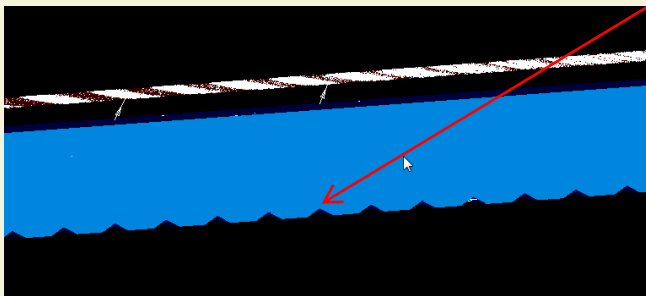


Keine seitlichen Auskoppelstrukturen: Licht „geht durch“; kein Licht auf Austrittsfläche!



Prismen zur Licht-Auskoppelung; Licht kann zur Seite austreten

Lichtverteilung längs Lichtleiter (ohne Diffusor)



Effizienz ca. 42%

Hembach **Photonik**

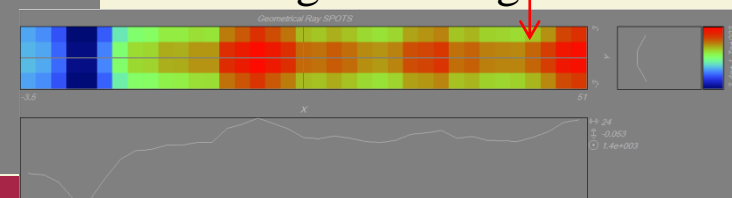
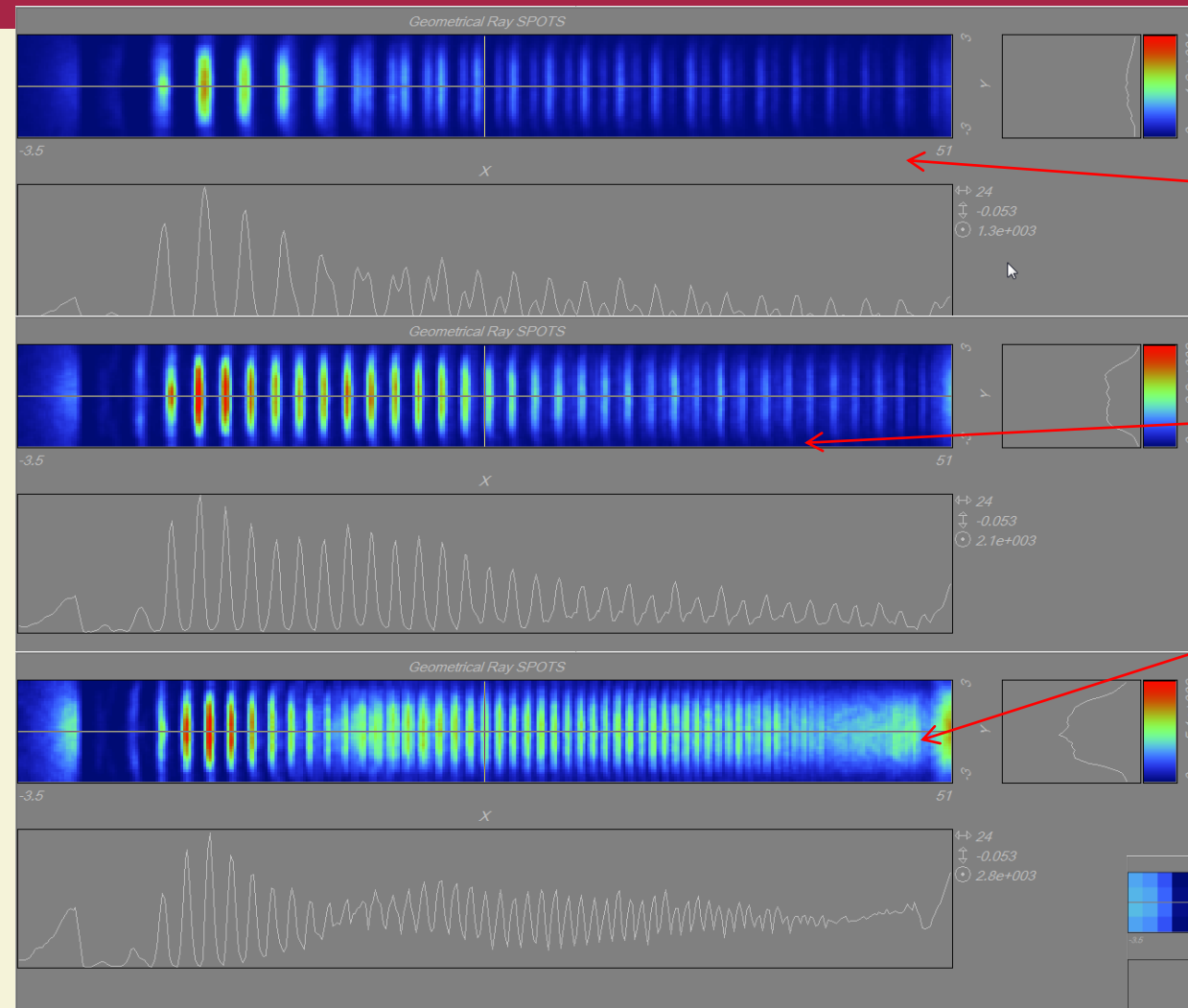
# Manuelle Optimierung

Beleuchtungstärke am Ausgang  
Start: gleichmäßige grobe Strukturen: zuviel Licht koppelt am Anfang aus

Geringere Strukturichte, kleinere Strukturen: etwas gleichmäßiger

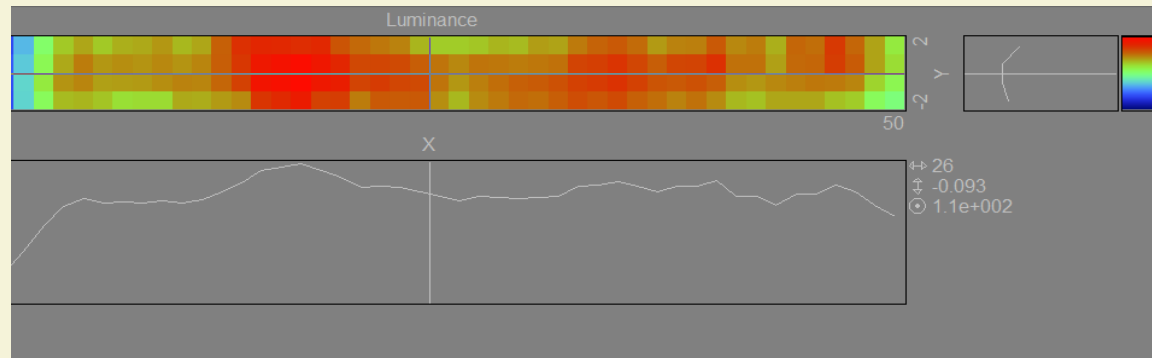
Variable Strukturichte: noch gleichmäßiger

Diffusor zur weiteren Homogenisierung



# Automatische Optimierung

- Idee:
  - Erstelle ein parametrisiertes Modell des Lichtleiters
  - Parameter: Abstand der Sägezähne, Anstellwinkel, etc. etc. => oft viele Parameter
  - Variiere Parameter mit geeigneten Optimierungsalgorithmen
- Herausforderungen:
  - Möglichst flexible Parametrisierung
  - Wahl einer angepassten Gütefunktion
  - Rechenzeit
- Resultat: gute Homogenität und Effizienz

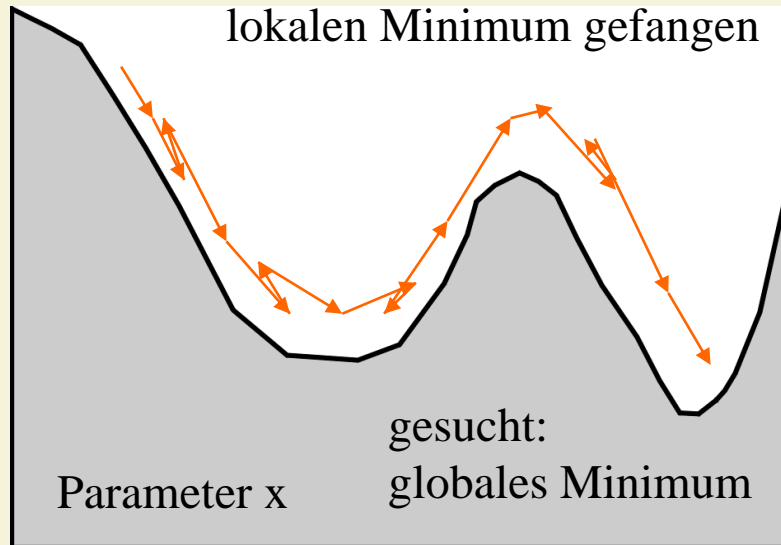


# Numerische Optimierung: Simulated Annealing

## Darstellung des Prinzips in einer Dimension

- Idee: Simulation der Erstarrung einer Schmelze bei sinkender Temperatur  $T$
- Parameter  $x$  wird mit einer zufälligen Schrittweite variiert
- Neuer Wert wird immer angenommen, wenn es “bergab” geht , manchmal (abhängig von der Temperatur) aber auch, wenn es “bergauf” geht.
- Je höher die Temperatur, umso wahrscheinlicher werden Schritte bergauf akzeptiert.
- Bei sehr hoher Temperatur wandert  $x$  durch den ganzen Parameter-raum. Je niedriger die Temperatur, umso eher bleibt  $x$  in einem lokalen Minimum gefangen

Güte-  
funktion  
 $f(x)$



Bemerkungen:

- Temperatur  $T$  ist eine reine Modellgröße, keine “wirkliche” Temperatur
- Vorteil der Methode:  $x$  kann sich aus einem lokalen Minimum “befreien” und in das nächste Minimum wandern; so kann ein globales Minimum erreicht werden.
- Nachteil: sehr viele Iterationen nötig



Zum Thema „Automatisierung“  
Artikel in der Zeitschrift Photonik (Mai 2012)

Optiksoftware

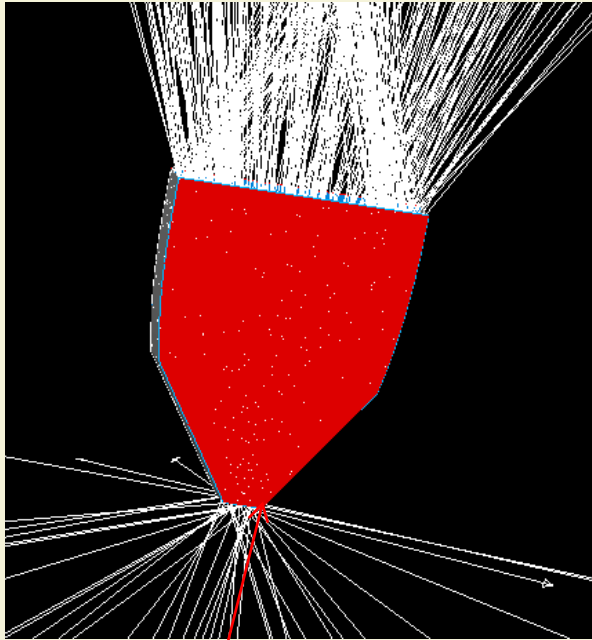
# Kopplung von Raytracern mit Spezialsoftware

Bernhard Michel, Monika Kroneberger, Robert Hermann,  
Hembach Photonik GmbH, Rednitzhembach

Die Entwicklung optischer Systeme basiert heute oft auf Strahlverfolgung mit kommerziellen Raytracing-Programmen. Über ihre grafischen Benutzeroberflächen können Standardaufgaben einfach und effizient gelöst werden. Bei komplexeren Aufgabestellungen kann der Nutzer auf integrierte Skriptsprachen zurückgreifen. Maximale Flexibilität für kreative Raytracing-Lösungen sowie für die Automatisierung von Design und Analyse erhält man jedoch, indem man die Software über die dafür vorgesehenen Schnittstellen mit spezialisierten Programmen, Skript-Routinen und dynamischen Link-Bibliotheken koppelt.

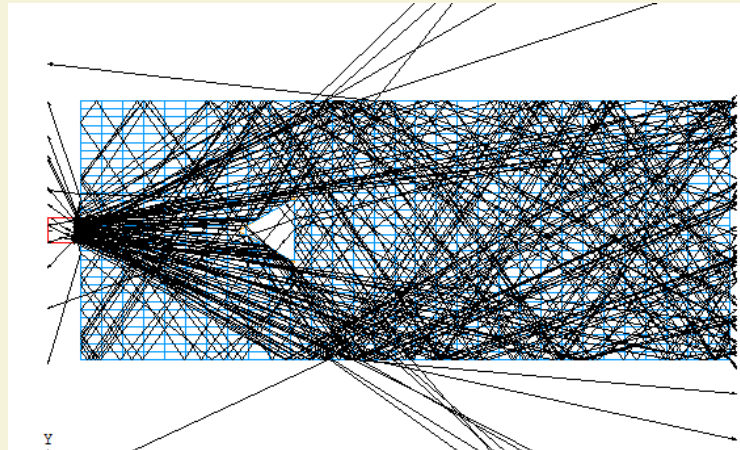
Hembach **Photonik**

# Lichtleiter – weitere Ansätze zur Lichtlenkung

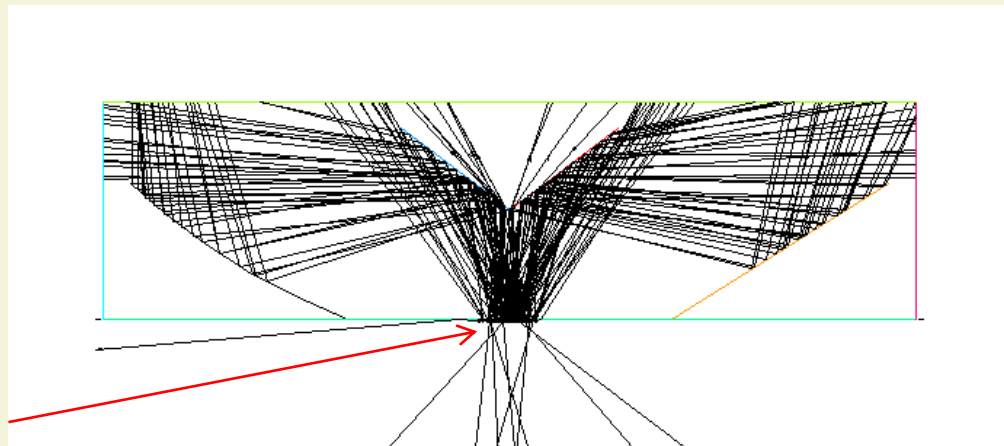


Lichtlenkung über Kegelschnitte -- hier gekippte Parabeln (CPC)

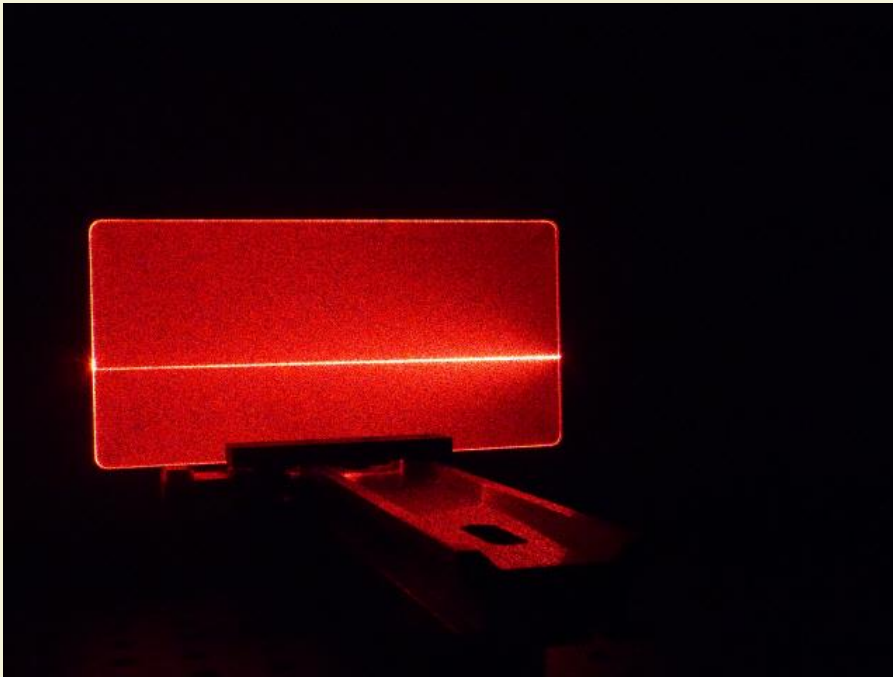
„Tailoring“ – ausgehend von einer als Punktquelle idealisierten LED



Dreiecke zur seitlichen Lichtlenkung



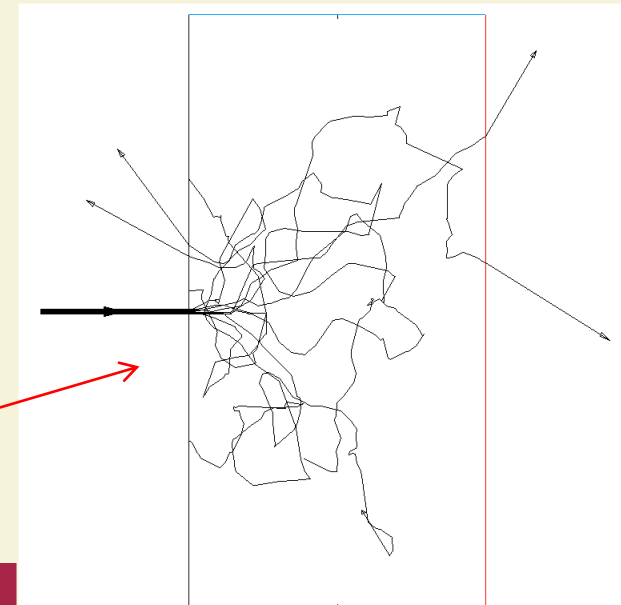
# Auskoppelung von Licht über Streuung – diffuse Lichtleiter



Hier: LD24 (Evonik) –  
relativ schwach  
streuendes Material, seitliche  
Beleuchtung mit HeNe-Laser.

Liefert recht homogene  
Leuchtdichte, ganz ohne  
Auskoppelstrukturen

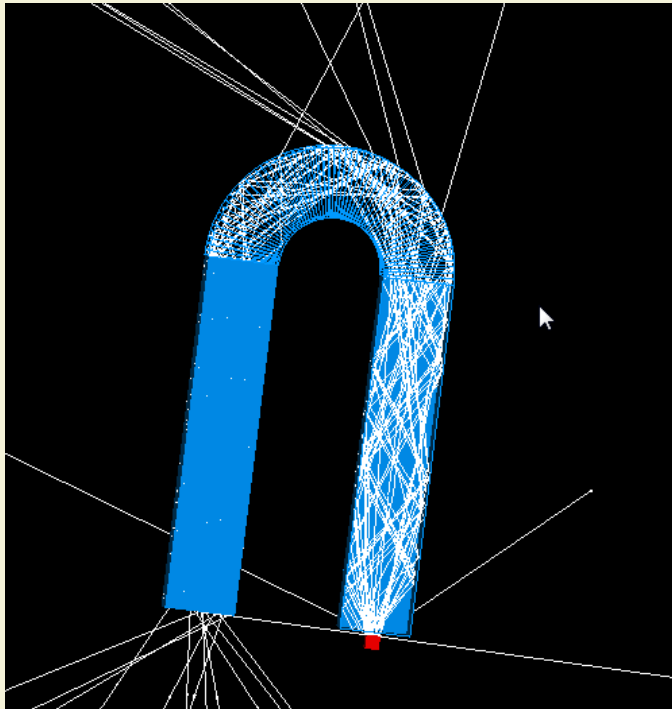
Simulation der Lichtstreuung  
im Raytracer



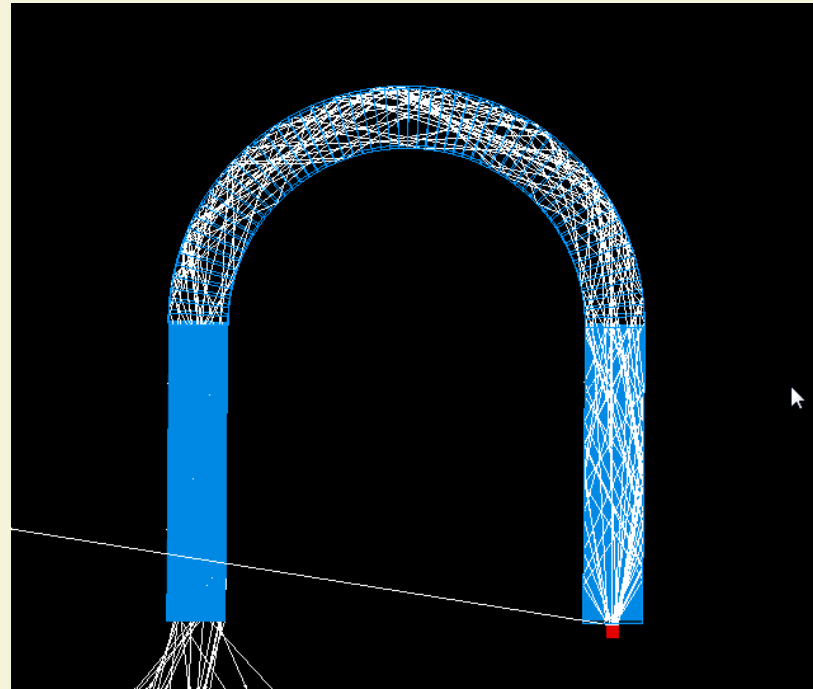
# Designgrenze: Totalreflexion

- Licht wird nur geleitet, wenn der kritische Winkel überschritten wird. Zu „enge Kurven“ sind daher nicht möglich.
- Daher ist eine Mindestgröße für den Lichtleiter nötig.

Zu eng => „Leck“ im Lichtleiter



Krümmungsradius ausreichend



# Designgrenze: Etendue G (=Lichtleitwert)

- Vereinfacht: „ $G=A\Omega$  – Regel“ -- Produkt aus Fläche und Raumwinkel eines Strahlenbündels bleibt bei der Ausbreitung konstant\*)

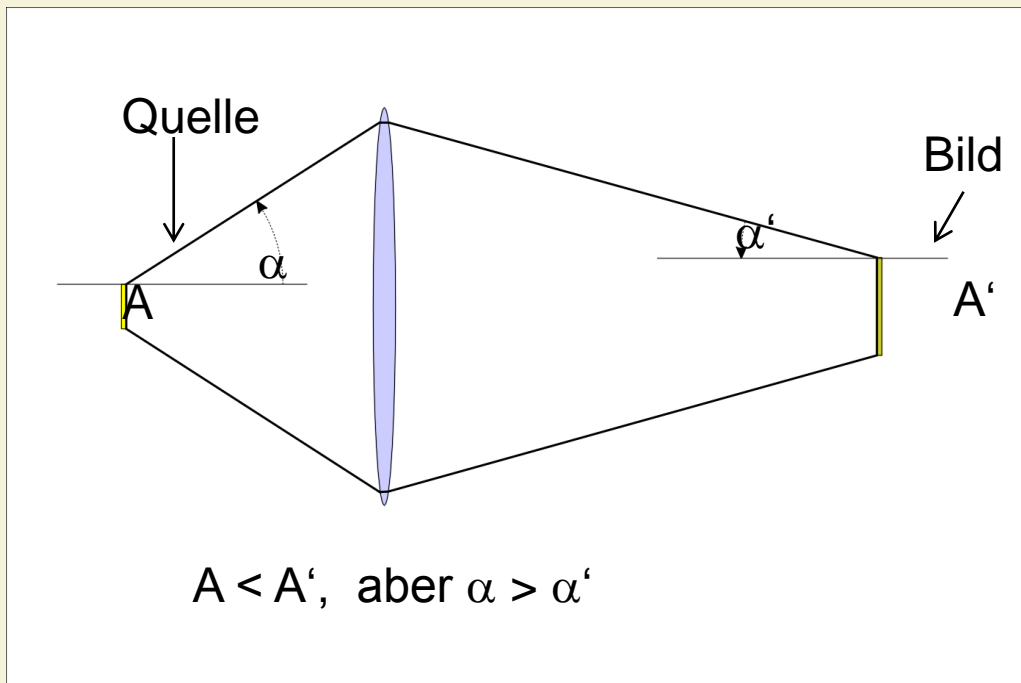
Genauer:

$$dG = n^2 \cos \theta \, da \, d\Omega$$

( $n$ : Brechungsindex,  $\theta$ : Winkel zur Normalen,  $da$ : Flächenelement,  $d\Omega$ : Raumwinkelement)

Konsequenz für Lichtleiter:

- 1) Mindestquerschnitt erforderlich
- 2) Oft zusätzliche Homogenisierung der Leuchtdichte durch Diffusor nötig!



\*) oder wird größer, wenn Lichtstreuung vorliegt



# Designgrenze: Rechenzeit

Selbst wenn ein Design prinzipiell machbar ist, ist oft die notwendige Simulationszeit eine praktische Grenze, insbesondere, wenn die Leuchtdichte des Lichtleiters optimiert werden soll.

- Für die genaue Berechnung der Leuchtdichte sind oft sehr viele Strahlen (1 Milliarde und mehr) nötig – Rechenzeiten betragen dann viele Stunden
- Für automatische Optimierung sind oft hunderte oder tausende Iterationen nötig.

⇒ gesamte Simulationszeit Wochen oder Monate!

Lösungsansätze:

- Vereinfachte Simulation oder Bewertung des Lichtleiters (Simulation ohne Diffusor, Berechnung der Beleuchtungsstärke anstatt der Leuchtdichte, ...); Problem: Fehler sind schwer abschätzbar; man braucht „Glück“ oder sehr viel Erfahrung
- Schnellere Simulationen: Hochgradige Parallelisierung, zum Beispiel auf Grafikkarte



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Hembach Photonik GmbH  
Dr. Bernhard Michel  
Finkenstr. 1-3  
91126 Rednitzhembach  
Tel: 0 91 22 – 88 99 49 0  
[bm@hembach-photonik.de](mailto:bm@hembach-photonik.de)