

Simulation und Optimierung von Lichtleitern

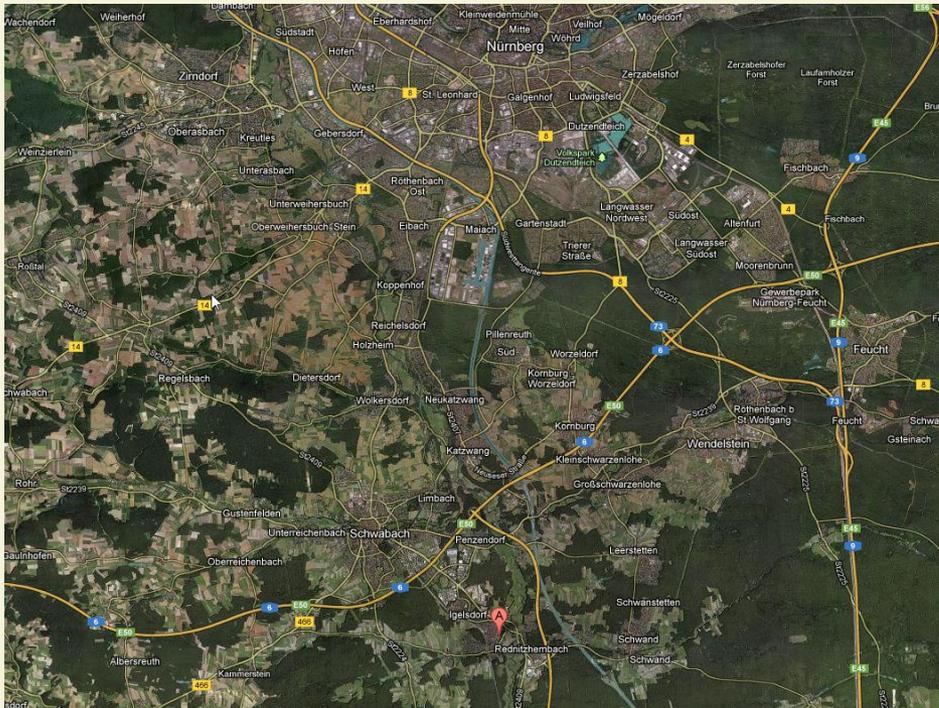
Bernhard Michel

Übersicht

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

Hembach Photonik

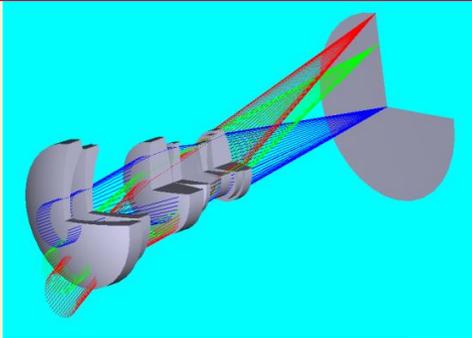
- Optikentwicklung,
- Analyse und Software
- Seit Januar 2011



- Firmensitz:
Rednitzhembach bei
Nürnberg
- Zurzeit 5 Mitarbeiter

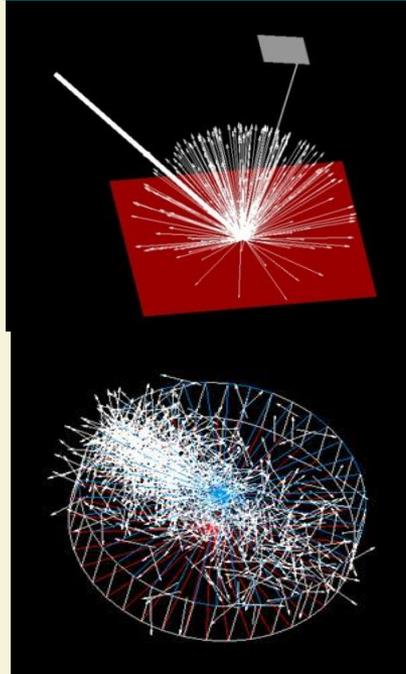
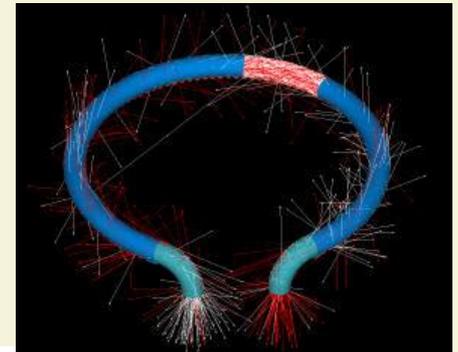
Hembach **Photonik**

Hembach Photonik – Arbeitsgebiete



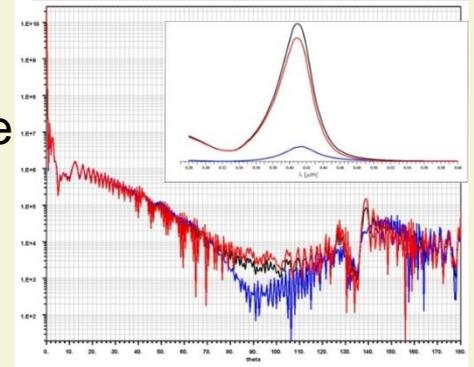
Abbildende
Optik

Beleuchtungsoptik



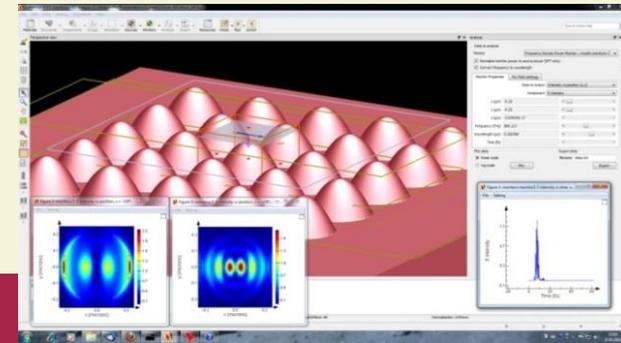
Störlichtanalyse

Kundenspezifische
Software



Lichtstreuung

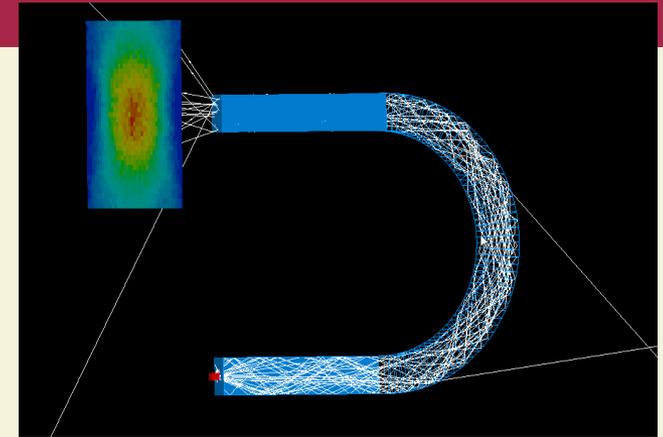
Software für
Photonik
(Lumerical)



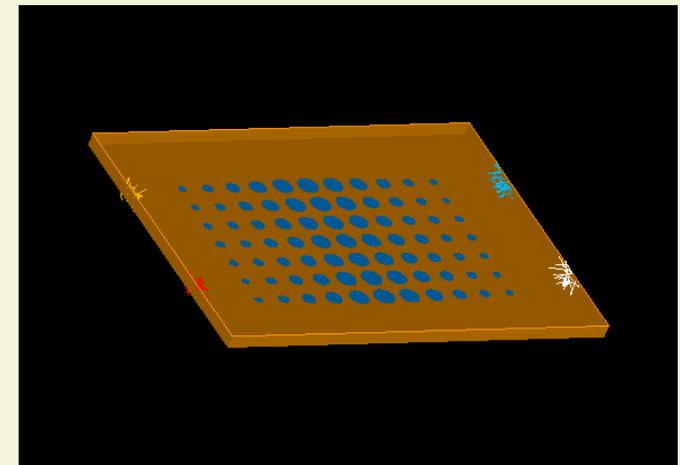
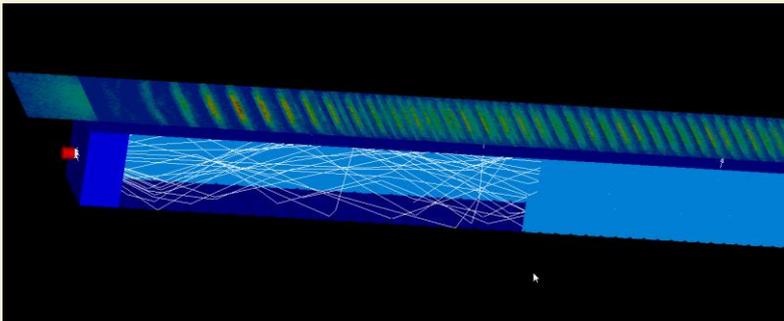
Lichtleiter – Allgemeines

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

Licht-
transport



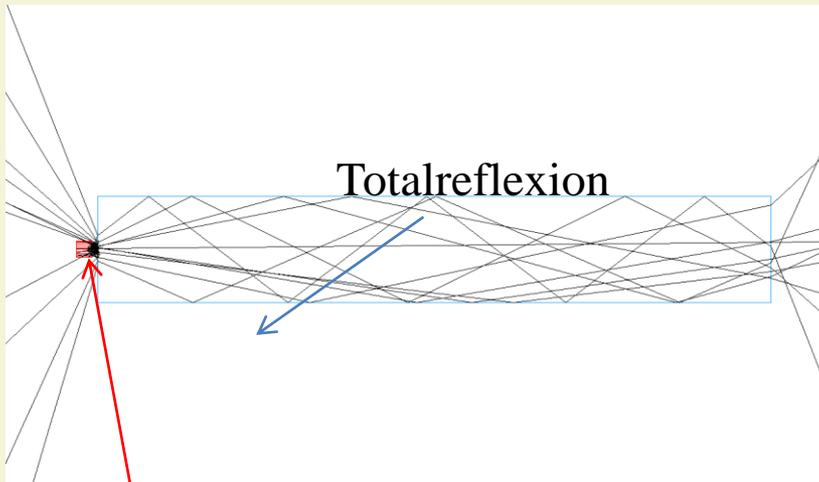
Licht-
verteilung
und
Homo-
genisierung



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 = α_{crit}

Kritischer Winkel:

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

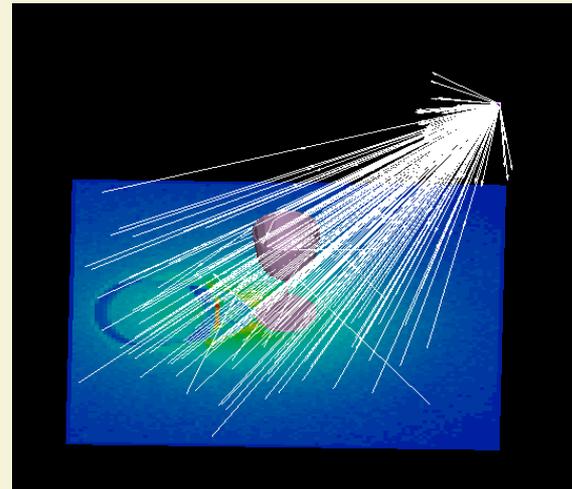
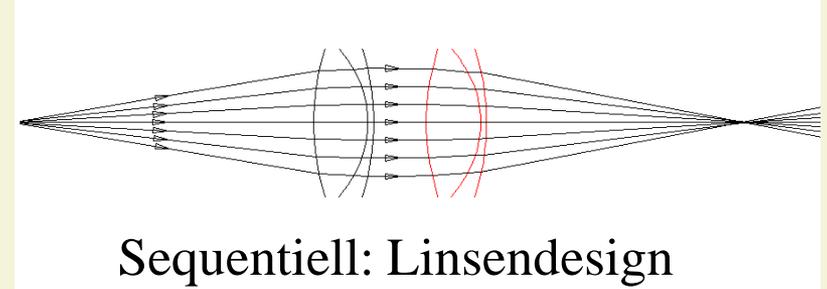
n: Brechungsindex

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

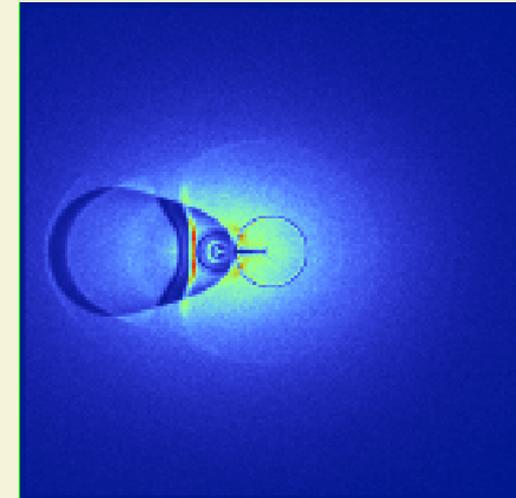
Polykarbonat: $\alpha_{crit} \approx 39^\circ$ ($n = 1.59$)

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**



**Nicht-sequentiell:
Beleuchtungssysteme**



Beispiel: ASAP

Hembach **Photonik**

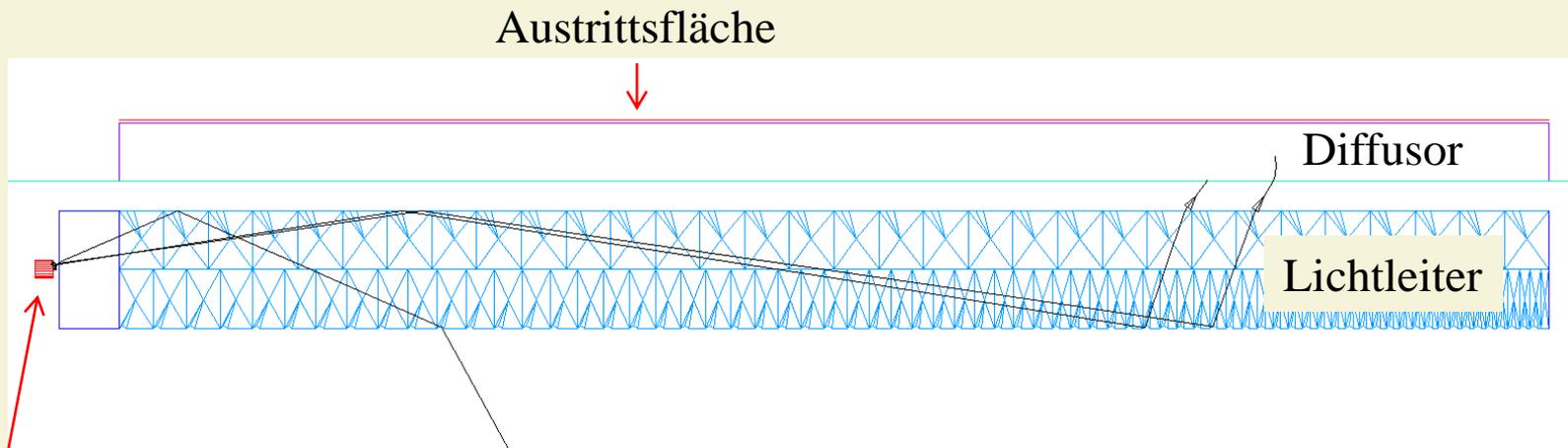
Kommerzielle Raytracer im Überblick

| 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

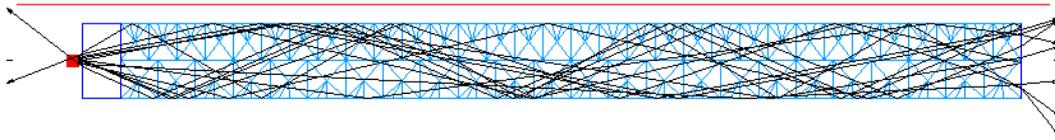
Optimierung mit Software ASAP (Breault Research Organization).

Optimierungsziele:

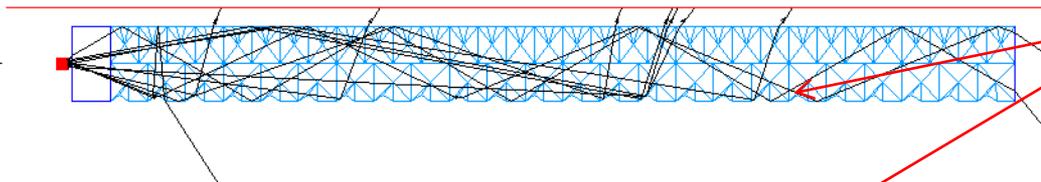
- Homogene Leuchtdichte bei senkrechter Betrachtung
- Hohe Effizienz

OPTIMIERUNG bedeutet: Kompromiss schließen
zwischen Homogenität und Effizienz!

Auskoppelstrukturen zur Unterbrechung der Totalreflexion

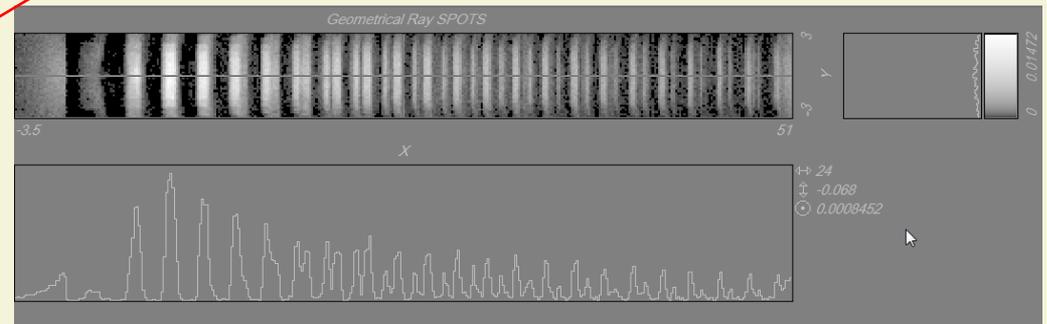
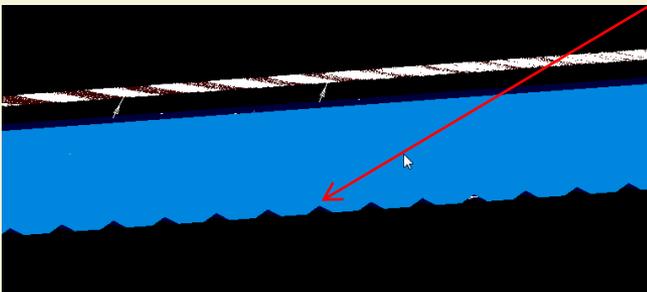


Keine seitlichen Auskoppelstrukturen: Licht „geht durch“; kein Licht auf Austrittsfläche!



Prismen zur Licht-Auskoppelung; Licht kann zur Seite austreten

Lichtverteilung längs Lichtleiter (ohne Diffusor)



Effizienz ca. 42%

Hembach **Photonik**

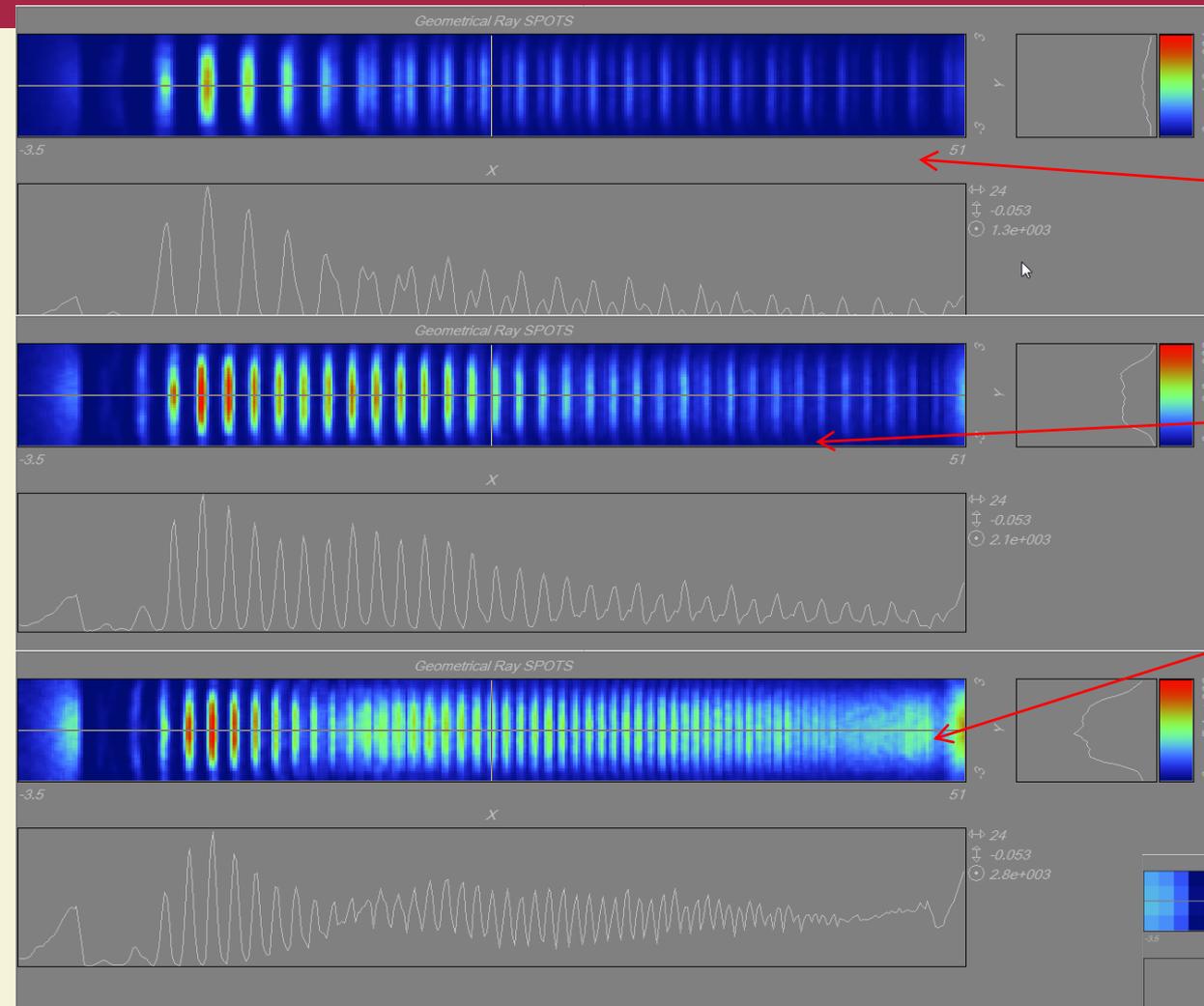
Manuelle Optimierung

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

Geringere Strukturichte, kleinere Strukturen: etwas gleichmäßiger

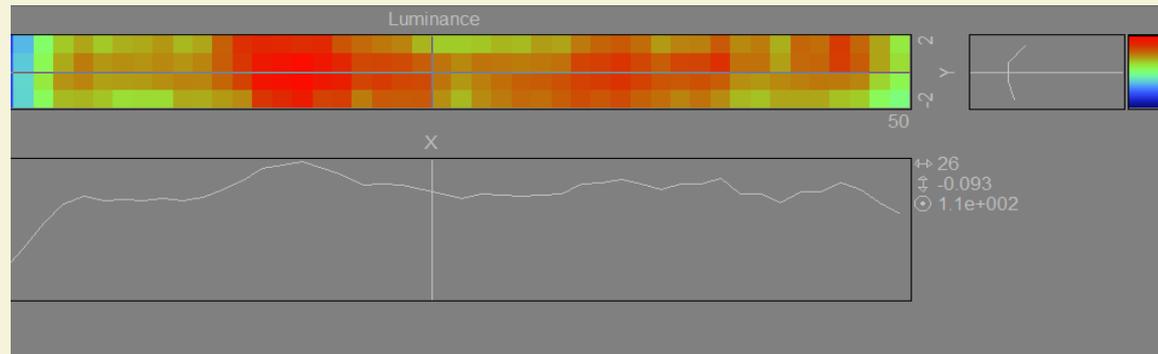
Variable Strukturichte: noch gleichmäßiger

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

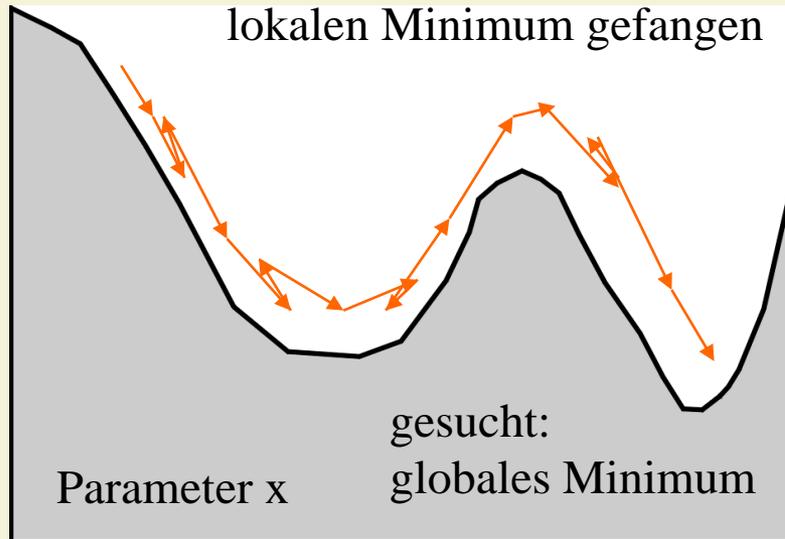


Numerische Optimierung: Simulated Annealing

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:

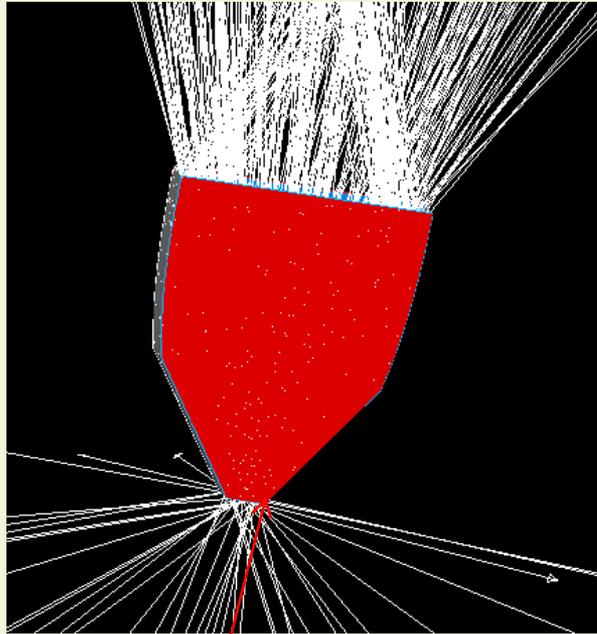
- Temperatur T ist eine reine Modellgröße, keine “wirkliche” Temperatur
- Vorteil der Methode: x kann sich aus einem lokalen Minimum “befreien” und in das nächste Minimum wandern; so kann ein globales Minimum erreicht werden.
- Nachteil: sehr viele Iterationen nötig

Kopplung von Raytracern mit Spezialsoftware

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

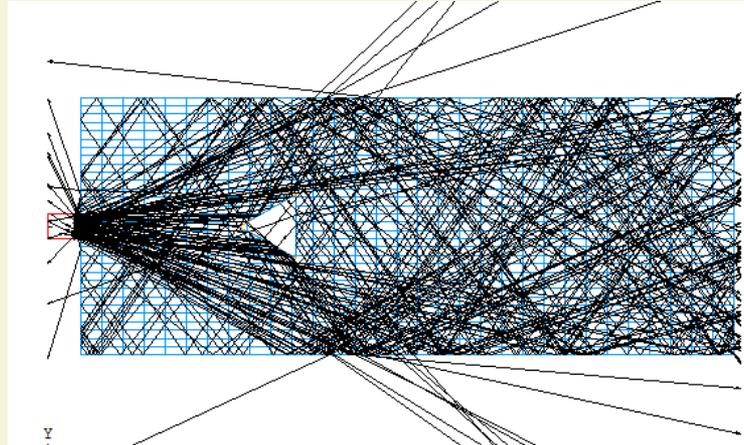
Die Entwicklung optischer Systeme basiert heute oft auf Strahlverfolgung mit kommerziellen Raytracing-Programmen. Über ihre grafischen Benutzeroberflächen können Standardaufgaben einfach und effizient gelöst werden. Bei komplexeren Aufgabestellungen kann der Nutzer auf integrierte Skriptsprachen zurückgreifen. 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.

Lichtleiter – weitere Ansätze zur Lichtlenkung

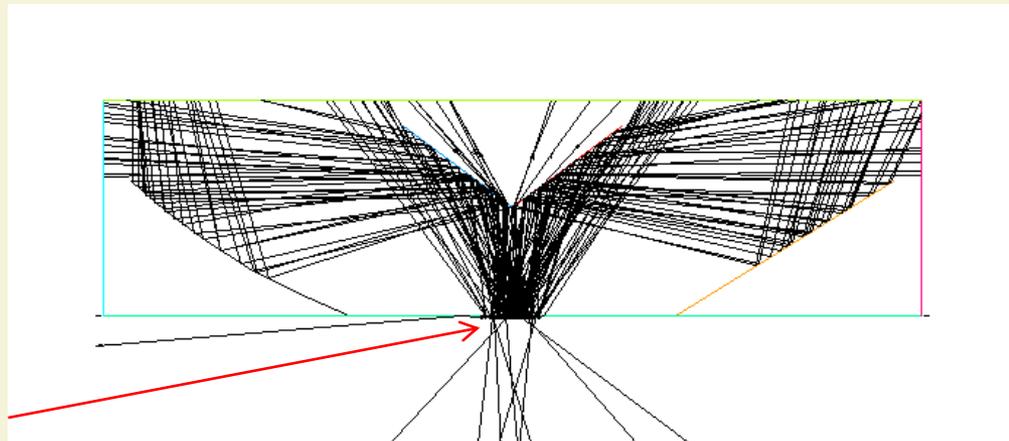


Lichtlenkung über Kegelschnitte -- hier gekippte Parabeln (CPC)

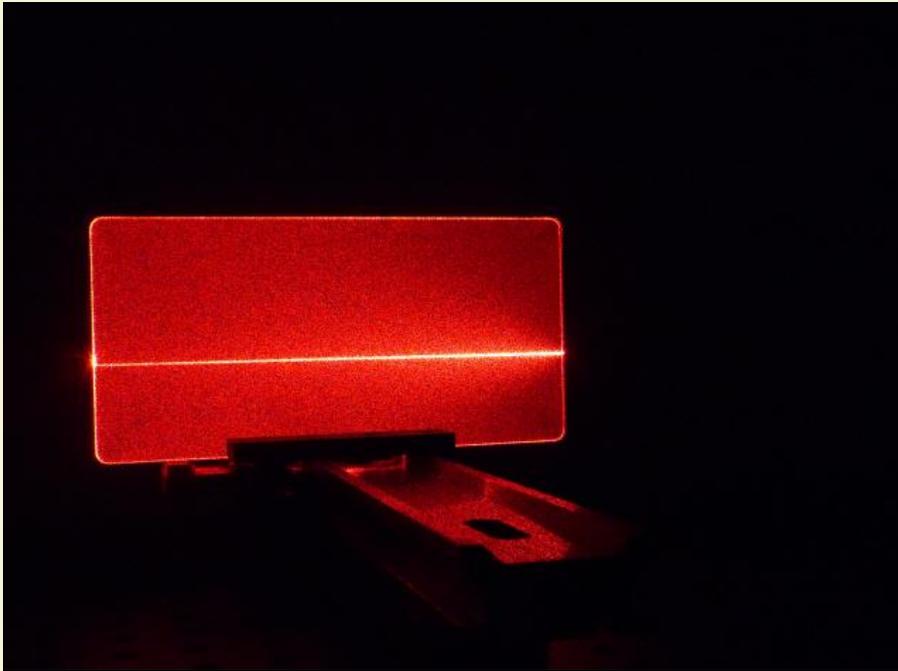
„Tailoring“ – ausgehend von einer als Punktquelle idealisierten LED



Dreiecke zur seitlichen Lichtlenkung



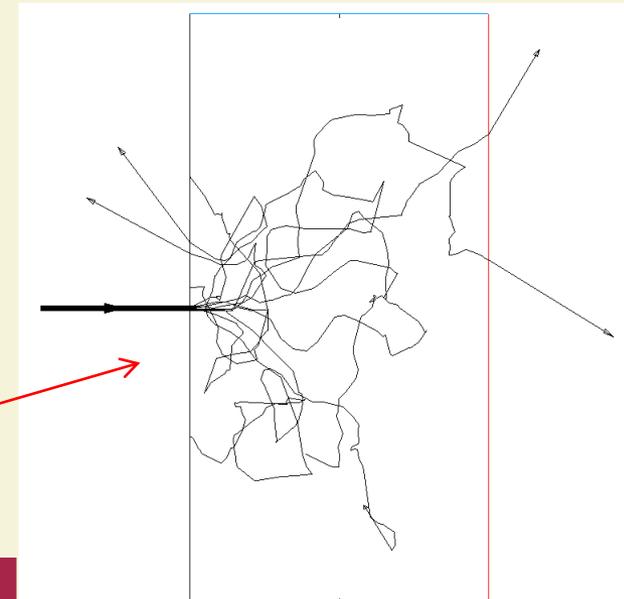
Auskoppelung von Licht über Streuung – diffuse Lichtleiter



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

Liefert recht homogene
Leuchtdichte, ganz ohne
Auskoppelstrukturen

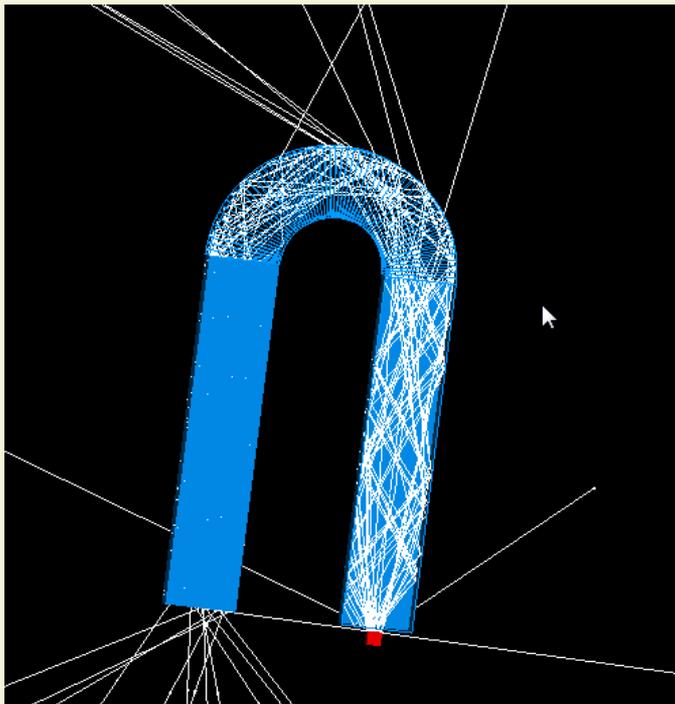
Simulation der Lichtstreuung
im Raytracer



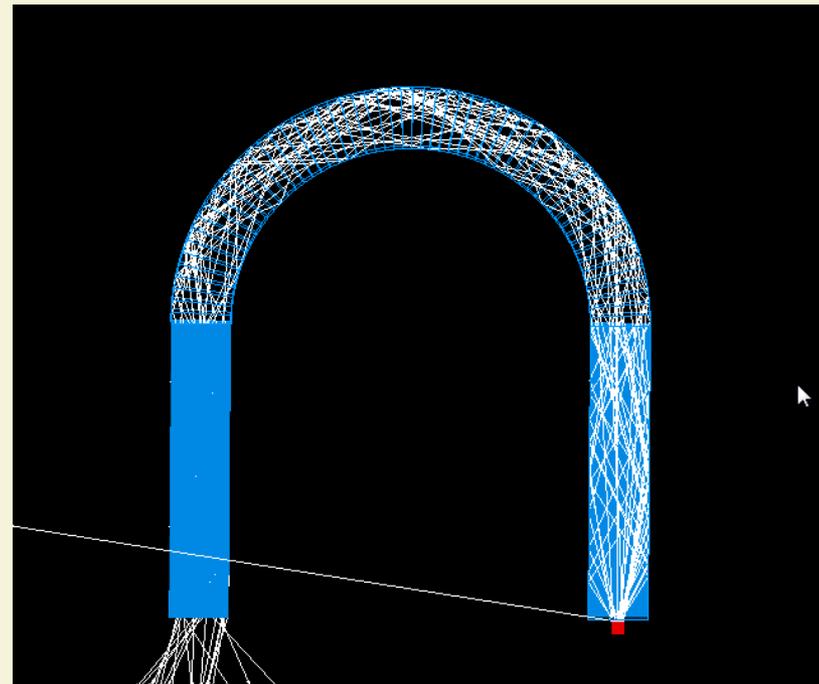
Designgrenze: Totalreflexion

- 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*)

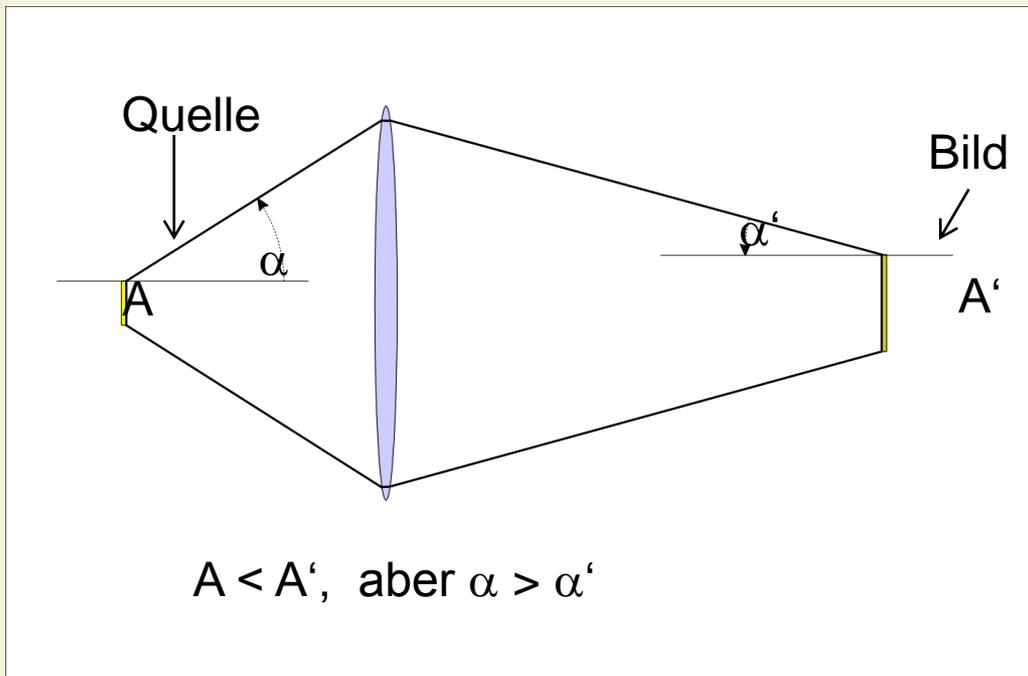
Genauer:

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

(n : Brechungsindex, θ : 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

Hembach **Photonik**