

Licht- und Displaytechnik

von

Uli Lemmer

Karl Manz, Dieter Kooß

Karsten Klinger, André Domhardt

Wintersemester 2008/2009

Ankündigung für Freitag, den 13.02.2009

Führung und Besichtigung des künstlichen Himmels
im Fachgebiet ***Bauphysik und technischer Ausbau***
der ***Fakultät Architektur***

**Treffpunkt: 10:45 Uhr direkt nach VL-Ende
am LTI-Hörsaal**

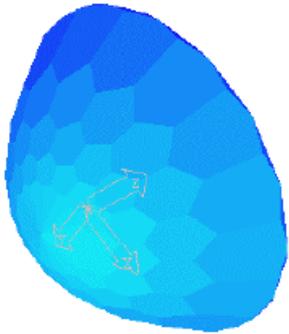
Optikdesign mittels Simulationssoftware

André Domhardt

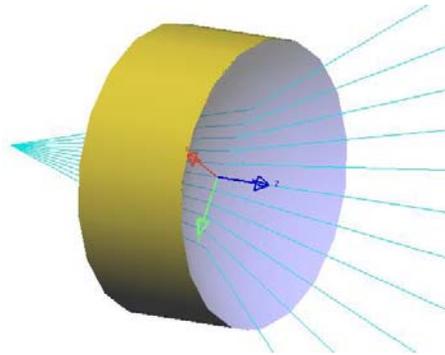
Wintersemester 2008/2009

Anwendung überall, wo Licht umgelenkt/umverteilt werden muss

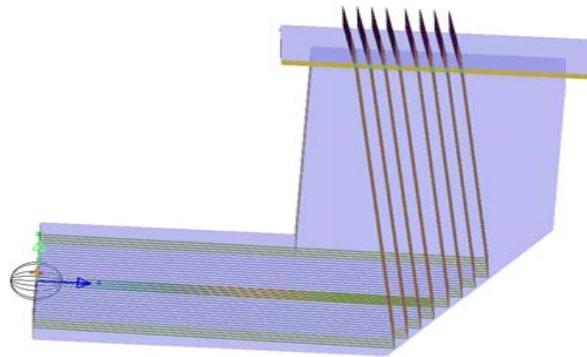
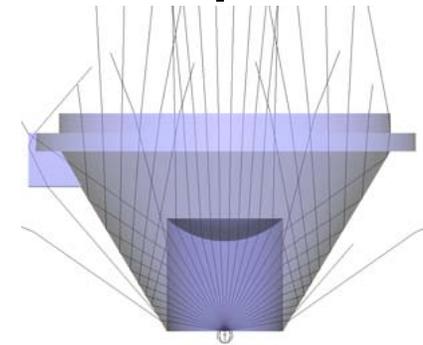
Reflektoren



Linsen



TIR-Optiken



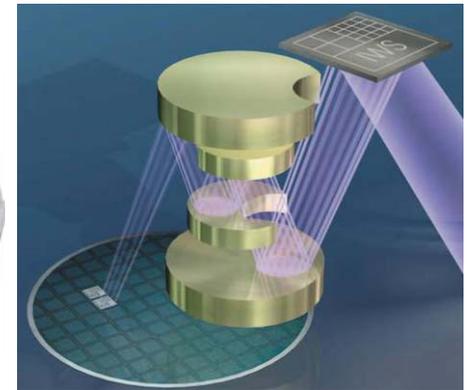
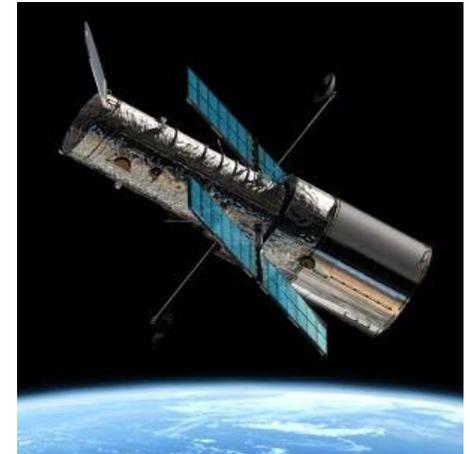
Lichtleiteroptiken

Unterteilung des Begriffes „Optik“

← **Optik**

abbildende Optik

z.B. Brille
Mikroskop
Teleskop
Fotoapparat
optische Lithographie



Optikdesign zwingend erforderlich,
um ***Abbildungsfehler*** zu vermeiden
bzw. zu minimieren.

Unterteilung des Begriffes „Optik“

Optik



nichtabbildende Optik

z.B. Allgemeinbeleuchtung
Solarkonzentratoren
Scheinwerfer
Operationsleuchten
Fassadenbeleuchtung
(Lichtarchitektur)



Optikdesign zur **Effizienzsteigerung** und **Lichtumverteilung**,
Abbildungsfehler unbedeutend

Optikdesign im Bereich der

abbildenden Optik:

Modellieren eines optischen Systems zur **Erzeugung von *Abbildern*** der Originalobjekte

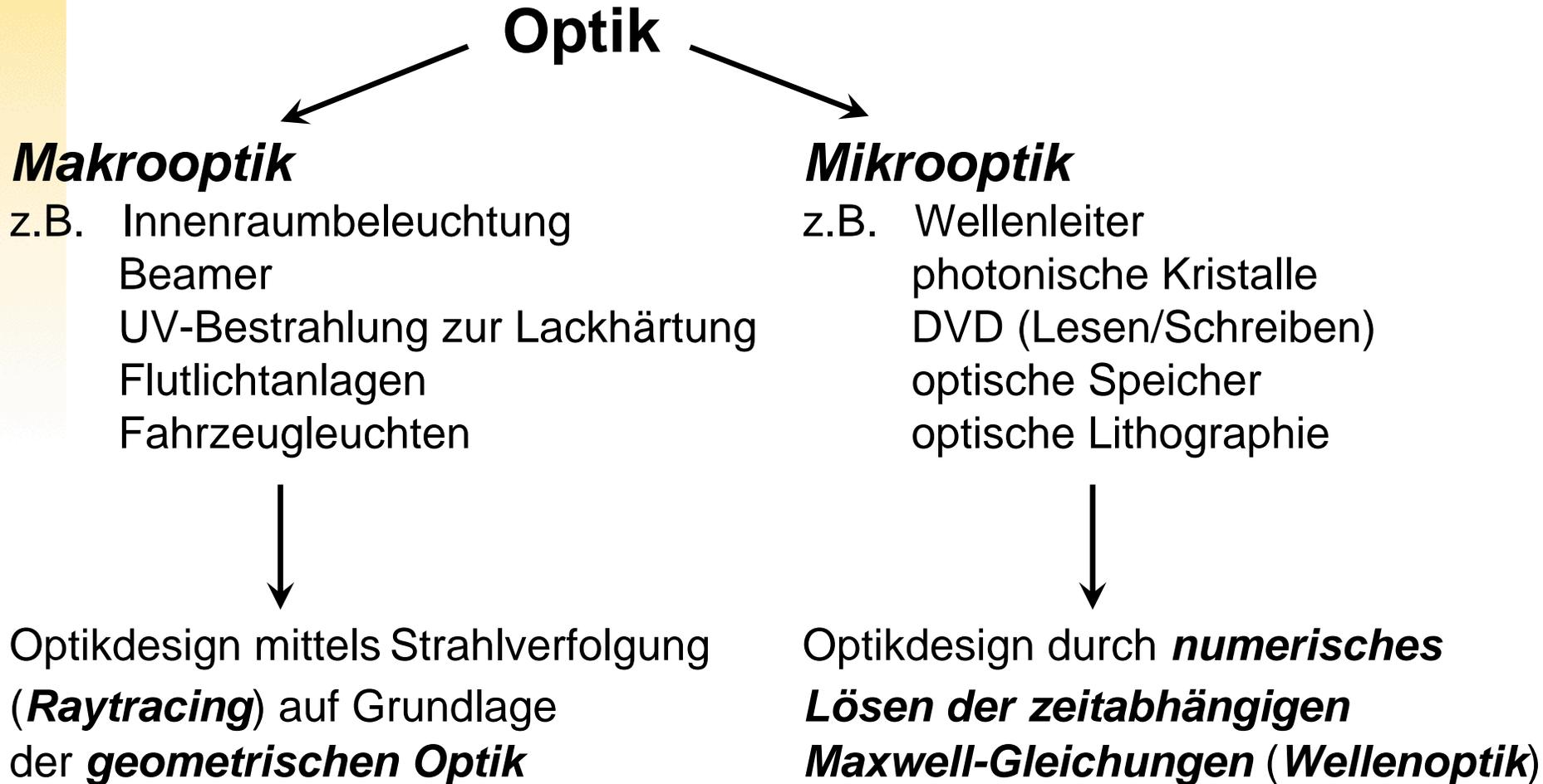
nichtabbildenden Optik:

Modellieren eines optischen Systems zur **Erzeugung einer *gewünschten Lichtverteilung*** bei gegebener Lichtquelle

Unterteilung des Begriffes „Optik“

- Viele optische Phänome (z.B. **Refraktion, Diffraktion, Interferenz, Kohärenz, ...**) lassen sich mit den **Maxwell-Gleichungen** beschreiben.
- Theoretisch: Lösung der Maxwell Gleichungen (analytisch, numerisch)
→ **alle Informationen**
- Praktisch: Nicht für alle Systeme können die Maxwell-Gleichungen gelöst werden!
- Analytisch sind nur **paraxiale Systeme** „gutmütig“
→ Simulation

Unterteilung des Begriffes „Optik“



Licht als *elektromagnetische Welle*:

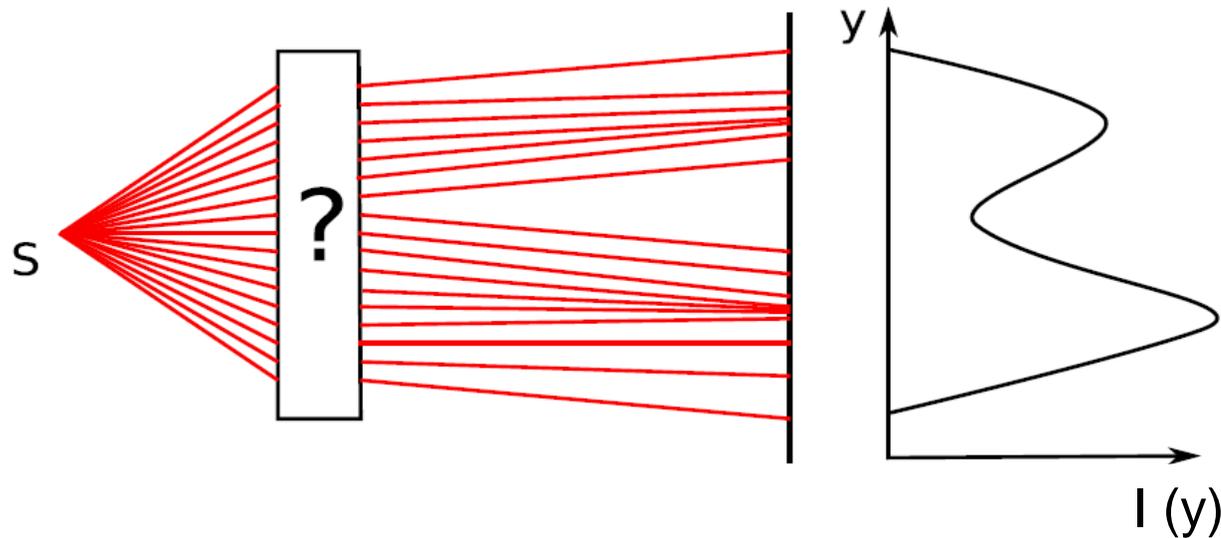
- Transversalwelle, Wellenlänge, Amplitude, Phase
- Wellenfrontkonzept
- Huygenssches Prinzip
- ***Interferenz***
- ***Polarisation***
- ***Beugung***
- ***Farbe***

- **Maxwell-Solver** diskretisieren den Raum (und die Zeit)
- **Gittergröße** muss etwa **10x kleiner** sein, als kleinstes Systemgröße
- **Systemgröße Lichtwellenlänge** extrem klein (**380-780 nm**), daher nur Mikro- und Nanosysteme zu berechnen
 - nicht alle Systeme und Probleme lassen sich simulativ effizient und komplett beschreiben.
- Aber: Nicht alle Effekte (Diffraktion, Interferenz, ...) sind in jeder System-/ Problemklasse relevant!

- Näherung: **Welleneigenschaften vernachlässigt**
- Licht durch **idealisierte Strahlen** approximiert (Strahlenoptik)
- gültig, wenn charakteristische Größe des Systems **10 x größer als Lichtwellenlänge**
- an Grenzflächen **Brechung, Reflexion, Strahlaufweitung**
- nur **qualitative Ergebnisse**, keine Aussagen über Quantität
- Grundlage für Berechnung von **Abbildungseigenschaften**
- **Grundlage für Strahlverfolgung** (Raytracing)

Beleuchtungsdesignanforderungen

- effiziente Erzeugung der gewünschten Lichtverteilung auf einer Oberfläche (z.B. homogen oder auch winkelabhängig)



- **Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte, Lichtstärke**
- **Farbwiedergabeindex, Blendung,**

Beleuchtungsdesign

Bestimmen der ***notwendigen Kombination von Lichtquellen und optischen Komponenten***, sowie deren ***Positionierung***, um eine ***gewünschte Lichtverteilung*** zu erhalten.

Dazu dienen Beleuchtungsdesign-Programme im Allgemeinen als Hilfsmittel.

- Auswahl entsprechender ***Leuchtmittel***

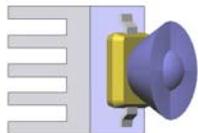


Arbeitsschritte

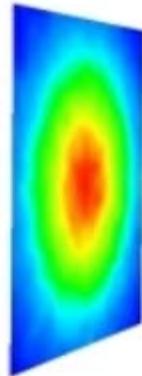
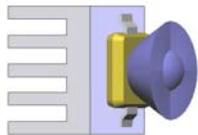
- Auswahl entsprechender **Leuchtmittel**
- Anordnen im vorgegebenen **Bauraum**, Wärmeabfuhr beachten



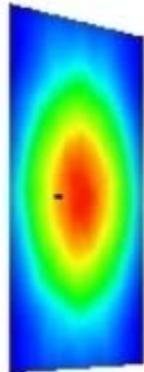
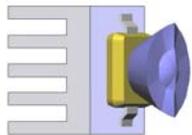
- Auswahl entsprechender **Leuchtmittel**
- Anordnen im vorgegebenen **Bauraum**, Wärmeabfuhr beachten
- **optische Anordnung** erstellen (Linsen, Reflektoren,...)



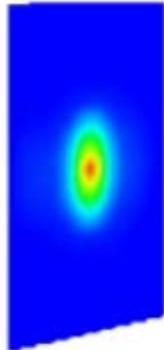
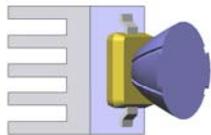
- Auswahl entsprechender **Leuchtmittel**
- Anordnen im vorgegebenen **Bauraum**, Wärmeabfuhr beachten
- **optische Anordnung** erstellen (Linsen, Reflektoren,...)
- Kreislauf: **Simulation, Analyse, Redesign**



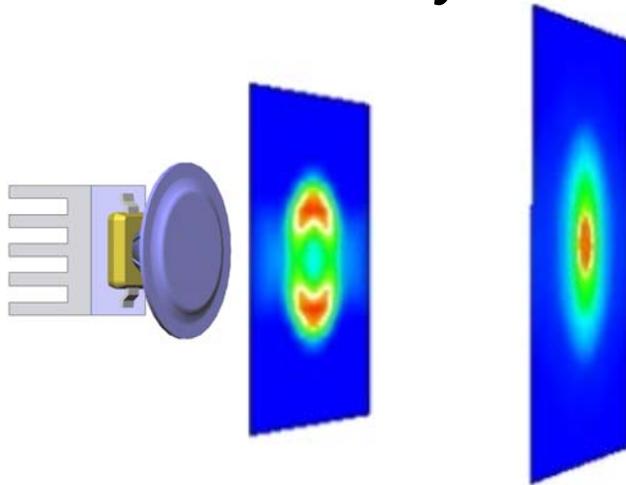
- Auswahl entsprechender **Leuchtmittel**
- Anordnen im vorgegebenen **Bauraum**, Wärmeabfuhr beachten
- **optische Anordnung** erstellen (Linsen, Reflektoren,...)
- Kreislauf: **Simulation, Analyse, Redesign**

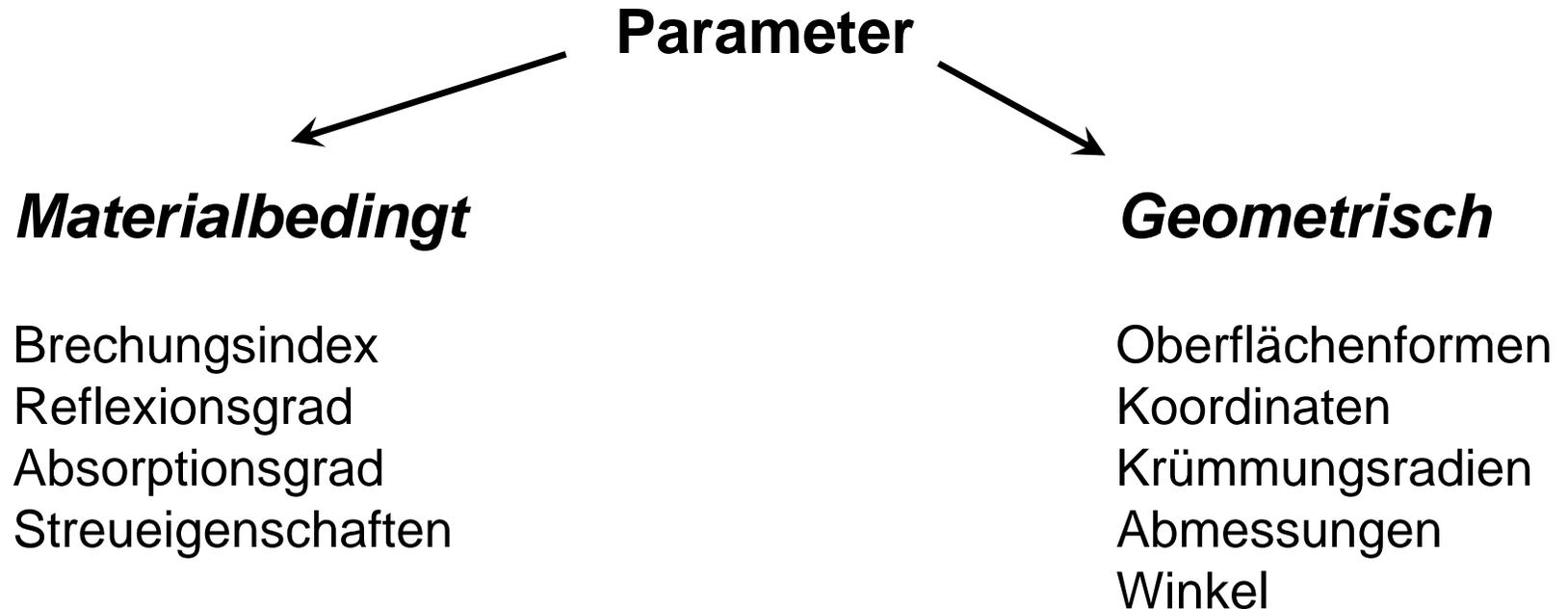


- Auswahl entsprechender **Leuchtmittel**
- Anordnen im vorgegebenen **Bauraum**, Wärmeabfuhr beachten
- **optische Anordnung** erstellen (Linsen, Reflektoren,...)
- Kreislauf: **Simulation, Analyse, Redesign**



- Auswahl entsprechender **Leuchtmittel**
- Anordnen im vorgegebenen **Bauraum**, Wärmeabfuhr beachten
- **optische Anordnung** erstellen (Linsen, Reflektoren,...)
- Kreislauf: **Simulation, Analyse, Redesign**
- **Abschlussanalyse**





Merkmale nichtabbildendes Optikdesign

- Häufig komplexe Aufgabenstellungen aufgrund von:
 - vielfältigen **Geometrien**
 - verschiedenartigen **Zielgrößen**
 - **physikalischer Oberflächeneigenschaften**
- Exakte Lösungen existieren meistens nicht
→ **approximative Lösungen**
- **Problemabhängige Lösungsverfahren**,
keine etablierten Standardmethoden

17. Jhd. - 1970-er:

- **Näherungsformeln** → nur einfache Geometrien
- handgerechnete und gezeichnete **Strahlverläufe in 2D**
- **Systemeffizienzen gering**
- **Rotation und Translation** der 2D-Ergebnisse, da die Herstellungsverfahren nur dies zuließen
- Materialien **optische Gläser** und **Reflektoren**

1970-er bis Anfang der 1990-er:

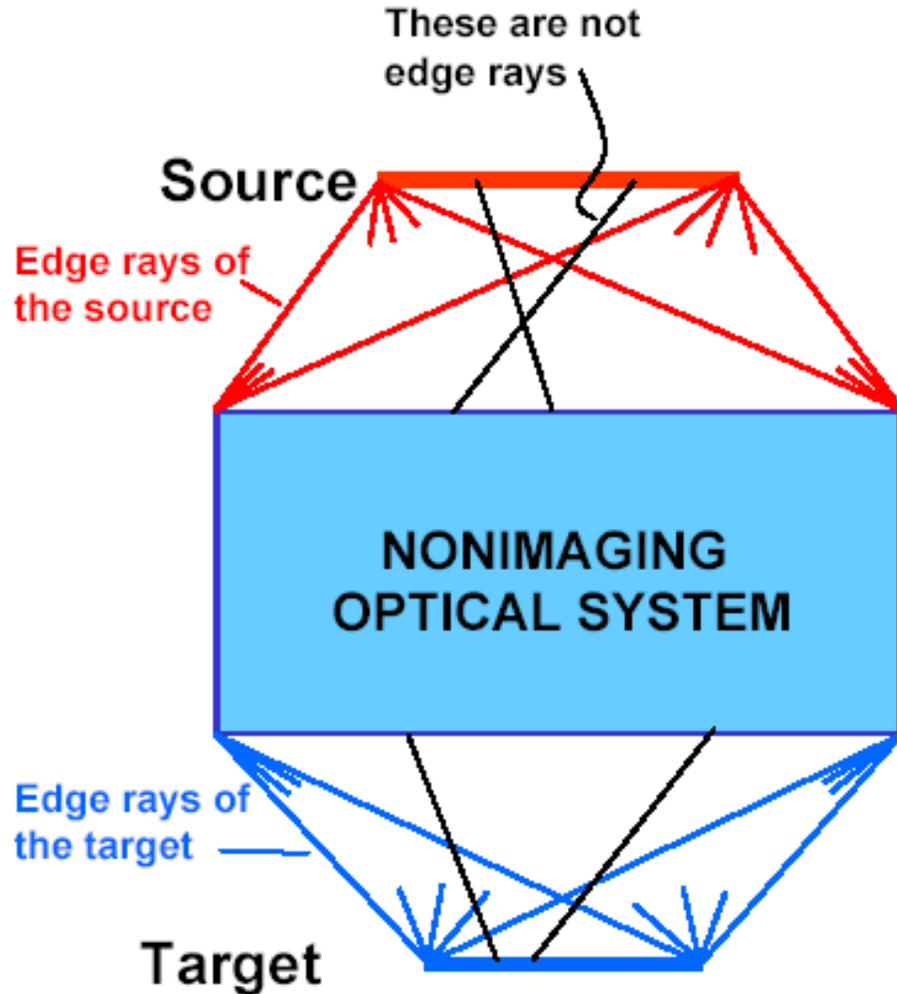
- Einführung Lochkartencomputer, später erste PC's
- beschleunigte und veränderte bisherige Arbeitsweise
→ **Programmieren** statt „Zeichnen“
- **Automatische Berechnung** von Strahlverläufen
- größere Vielfalt an handhabbaren **Oberflächentypen**,
weiterhin Einschränkung durch Herstellungstechniken
- **gesteigerte Effizienzen**
- 1982: **1. Optiks simulationsprogramm** (ASAP)

1990-er bis heute:

- Vielzahl an Optiks simulationsprogrammen
(**Computer Aided Lighting - CAL**)
- **Learning by Doing** mittels CAL
- neue, erst durch CAL praktikable Ansätze
- **3D Freiformflächen** (Splines)
- **große optische Effizienzen** möglich
- fortgeschrittene Fertigungsverfahren,
z.B. **Spritzgießen** optischer Kunststoffe

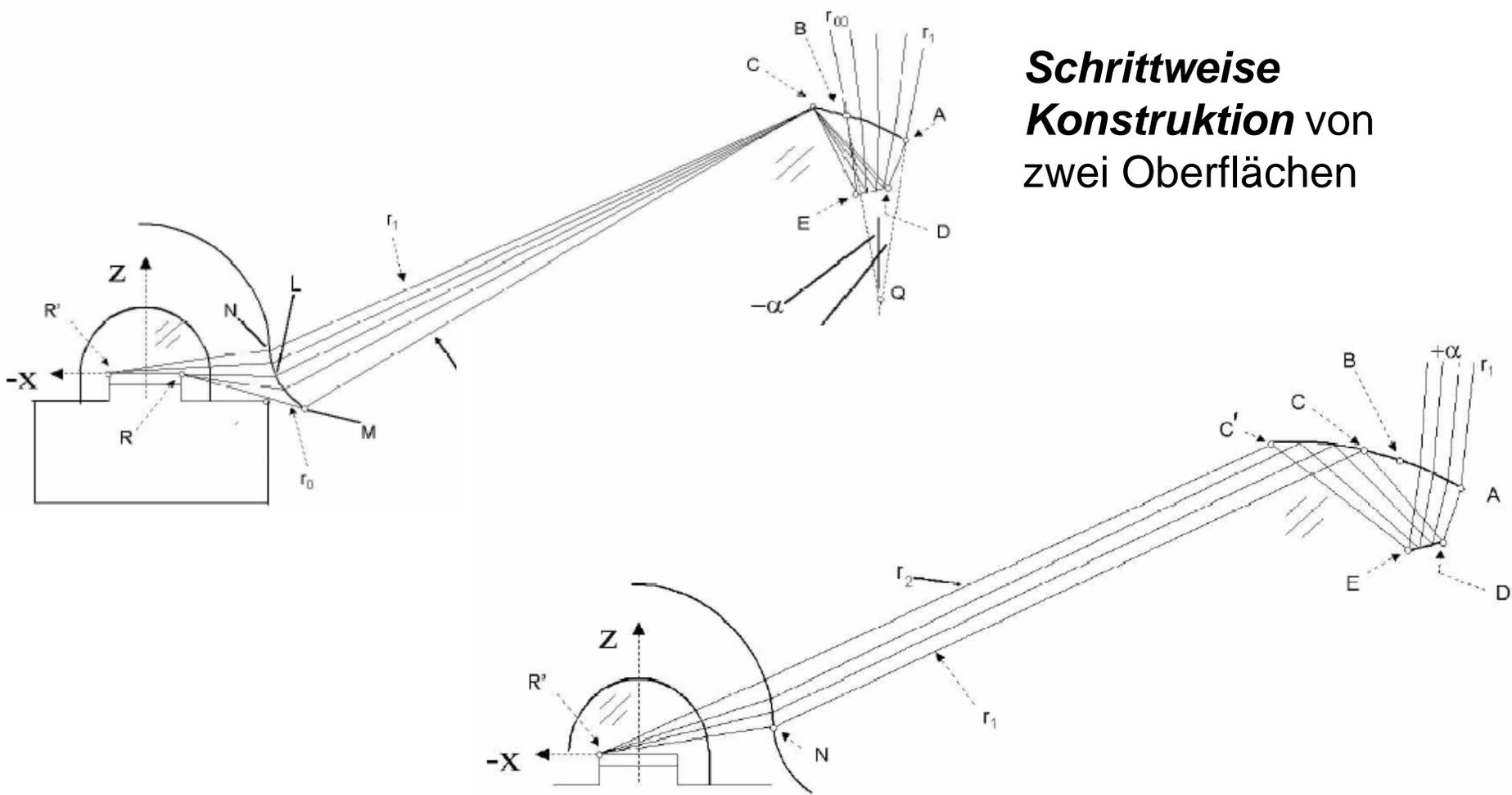
Computergestützte analytische Herangehensweise:

- Design mittels ***einiger, weniger Strahlen in 3D***
- nur ***analytisch beschreibbare optische Flächen***
- ***analytische Lösungen*** für (ver)einfach(t)e
Aufgabenstellungen (z.B. Solarkonzentratoren)



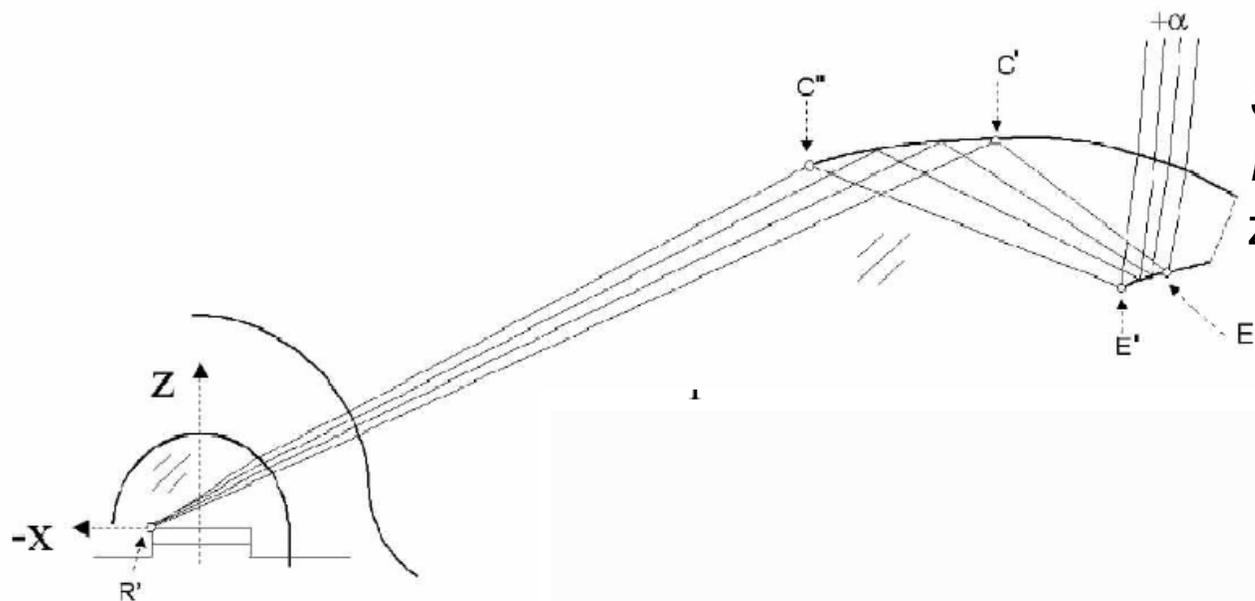
Die Strahlung der Quelle wird dann vollständig auf die Zielfläche umverteilt, wenn die ***Randstrahlen der Quelle in die Randstrahlen der gewünschten Zielverteilung transformiert*** werden.

(www.lpi-llc.com)

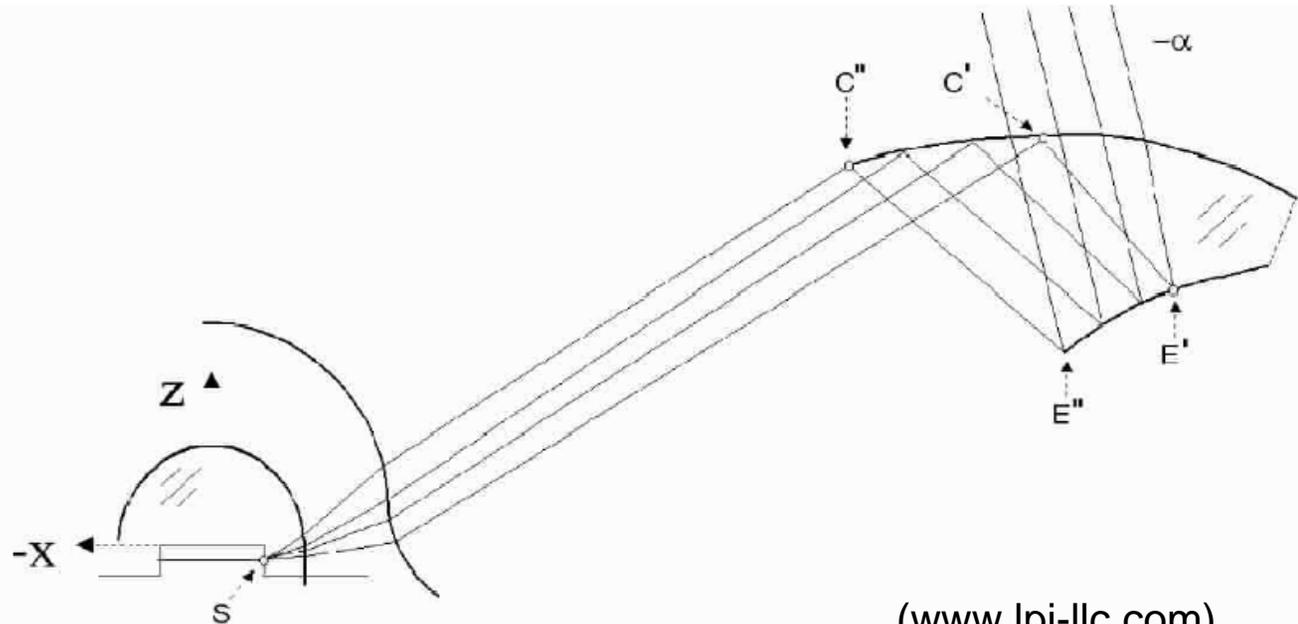


**Schrittweise
Konstruktion** von
zwei Oberflächen

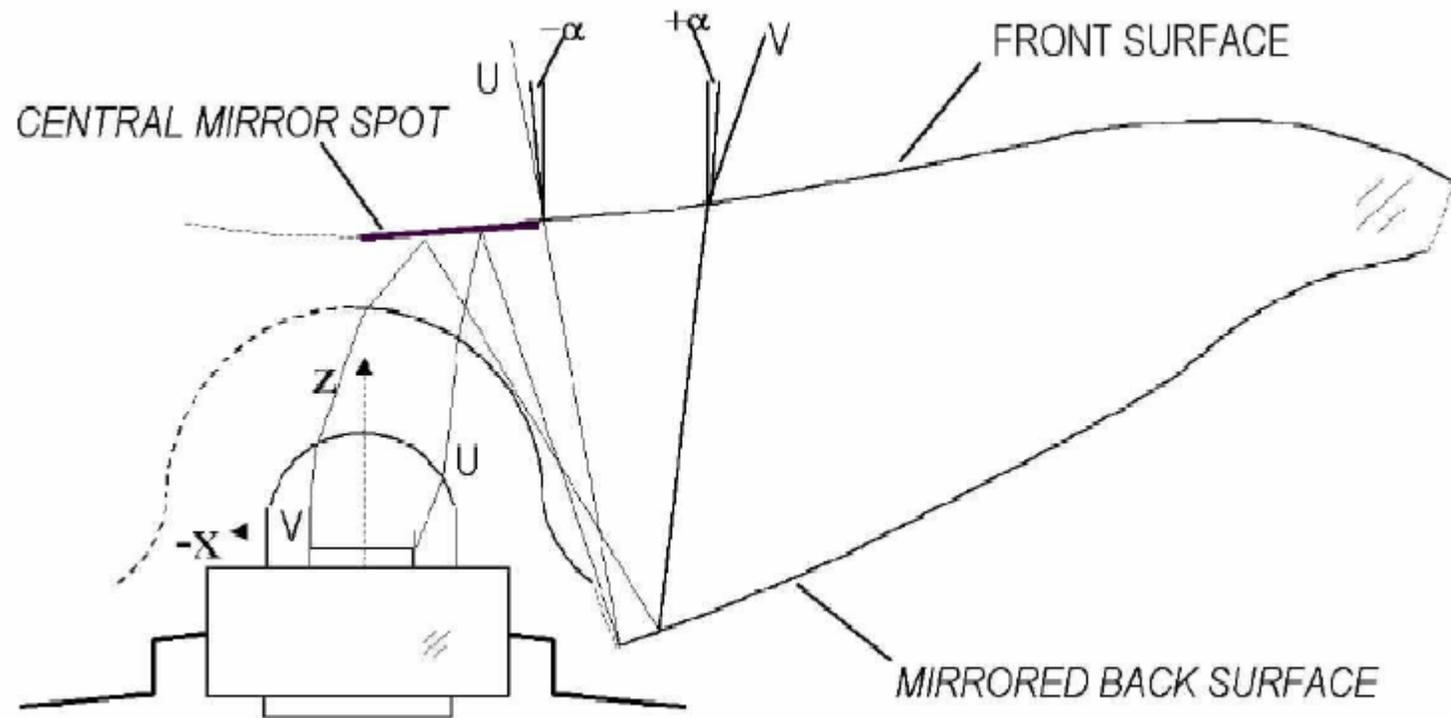
(www.lpi-llc.com)



**Schrittweise
Konstruktion** von
zwei Oberflächen



(www.lpi-llc.com)



(www.lpi-llc.com)

Herangehensweise:

- ***optische Konzepte in 3D*** schnell modellier- und überprüfbar
- ***Versuch-und-Irrtum*** ein Mittel der Wahl, gut um sich am Beginn dem Ziel zu nähern, doch langatmiger Weg zum Optimum
- ***Optimierung einzelner optischer Parameter***, z.B. hinsichtlich Konzentration in einem Punkt bzw. gleichmäßiger Ausleuchtung

Herangehensweise:

- für praxisrelevante Lichtverteilungen:
„richtige“ = **automatische Optimierung**,
setzt **Erfahrung** oder jede Menge Zeit voraus,
individuelle Implementierung, mittels Standardalgorithmen
- prinzipiell **3D-Freiformflächen** heute
rechentechnisch modellierbar und herstellbar,
jedoch fehlendes mathematisches Modell zum Design

Optikdesign in der Praxis

- Problemdefinition (**Beleuchtungsaufgabe**, gewünschte Lichtverteilung)
- **optisches Know How** des Designers
- Vorstellung von der prinzipiellen Anordnung (**Startdesign**)
- Erstauswertung
- **Optimierung** nach **Parametrisierung**
oder
Versuch–und–Irrtum–Methode
- **Abschlussanalyse**

Beleuchtungsdesign-Programme

- verschiedene Ansätze ***schnell und kostengünstig*** überprüfbar
- Änderungen im System und deren Auswirkungen
- ***Entwurf, Simulation, Analyse***
- ***virtuelles Prototyping***

Warum?

- keine Oberflächen in ***optischer Qualität*** mittels Rapid-Prototyping-Verfahren
- schneller und billiger als realer Prototypenbau
- ideal für die Versuch–und–Irrtum–Methode

LEDs in Kfz-Signalleuchten

- neue Stylingmöglichkeiten
- geringe Einbautiefen möglich
- ideale Lichtquellen für flache Kfz-Leuchten



Lichtleitstäbe (www.bmw.de)



Matrixanordnung (www.audi.de)

Sicherung der Qualität automobiler Beleuchtungssysteme durch die Regelwerke der *Economic Commission for Europe* (ECE)

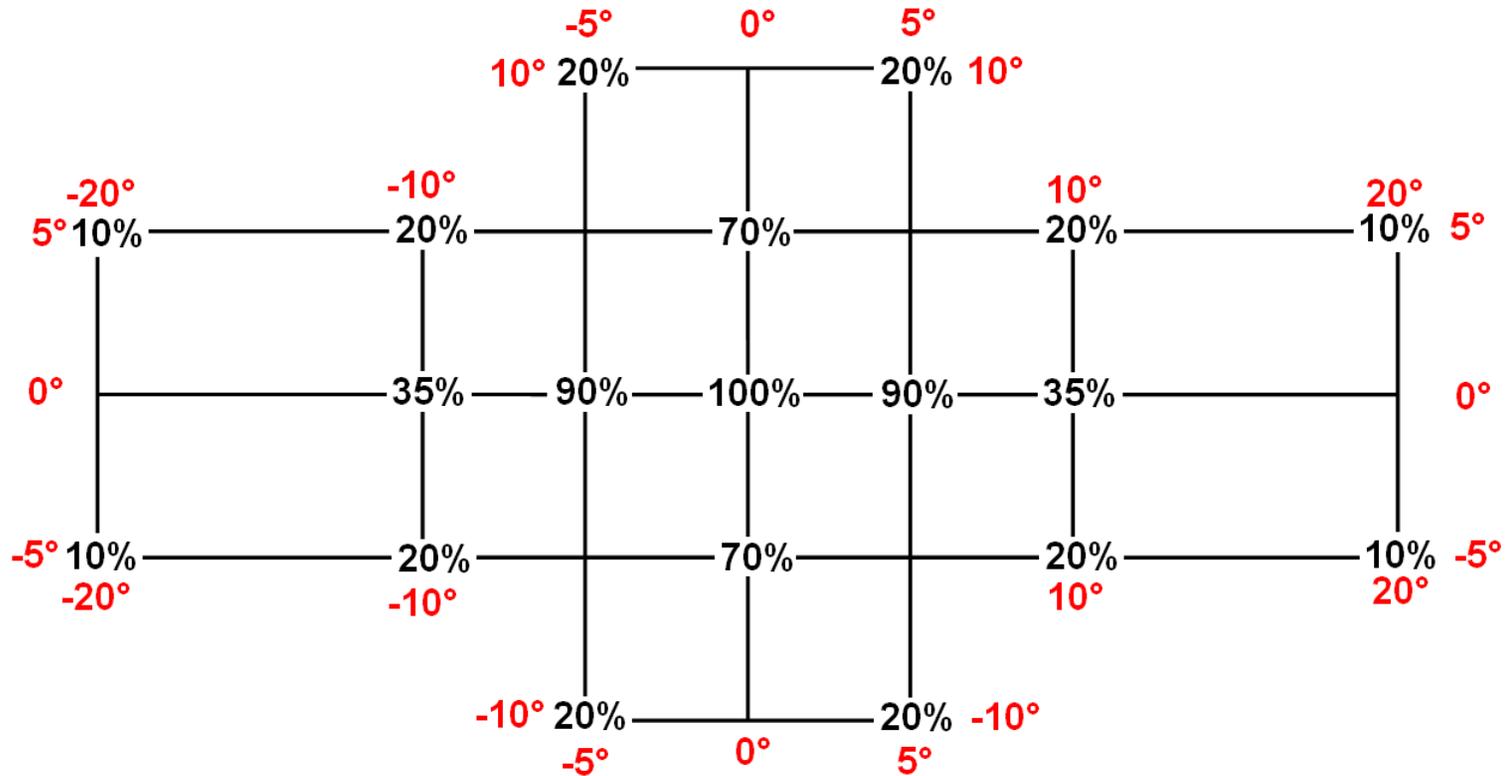
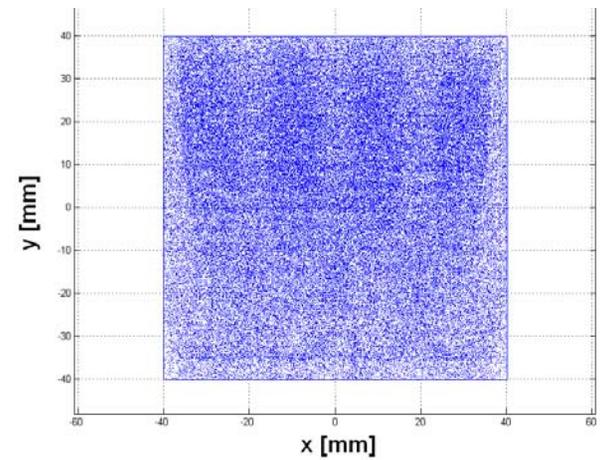
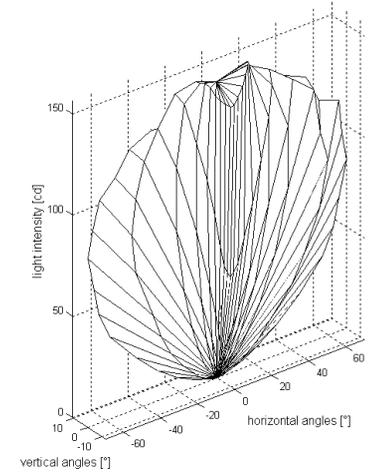
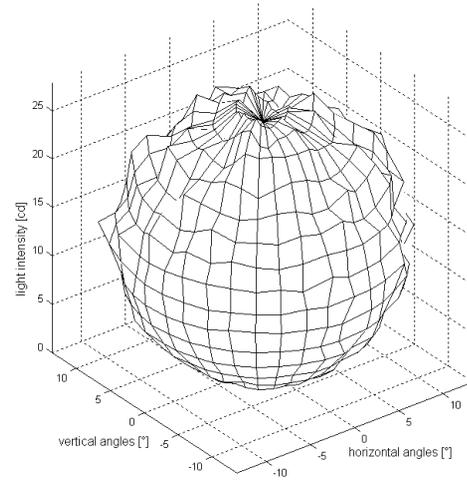
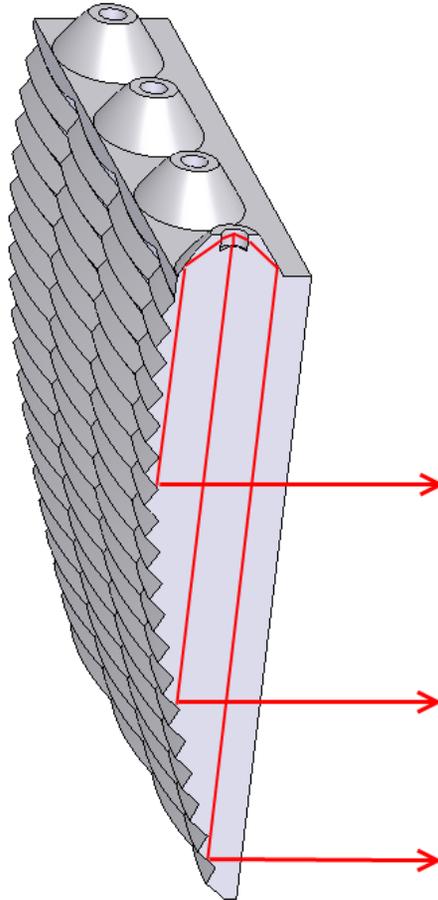
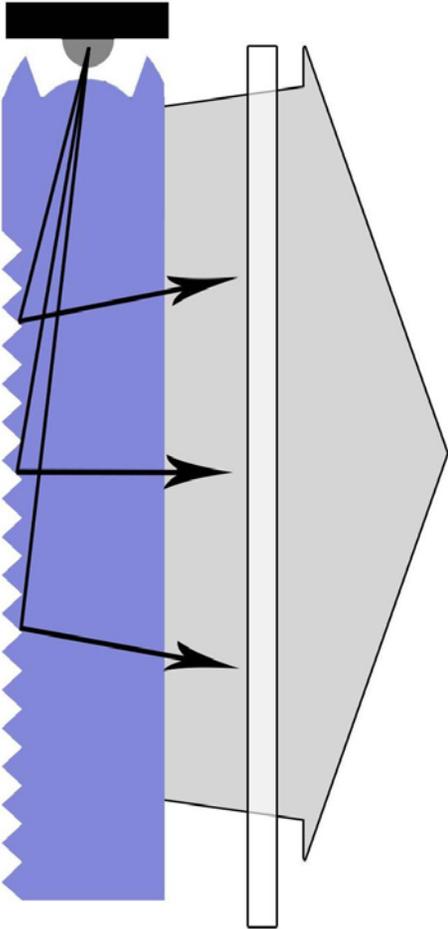


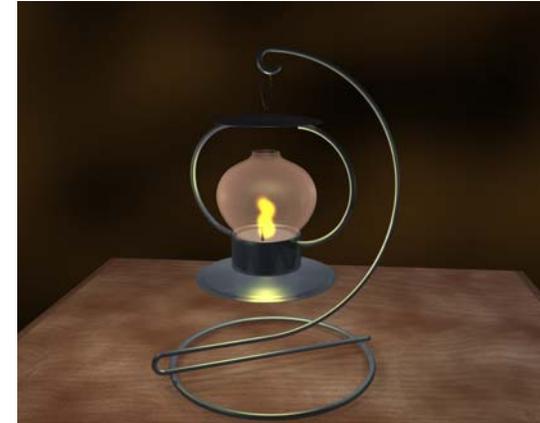
Abbildung: Messschema zur Einstellung und Vermessung von KFZ-Leuchten



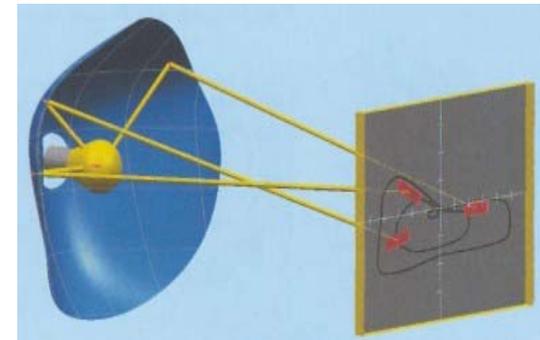
Raytracing/Strahlverfolgung

- Oberbegriff für Algorithmen der 3D-Computergraphik
- Berechnung von Lichtverteilungen
- basiert auf **Grundlagen der geometrischen Optik**

- Beleuchtungsdesign: **Forward Raytracing**
- Entwicklungsprozess beschleunigt und vereinfacht
- bedarf der Erfahrung des Optikdesigners



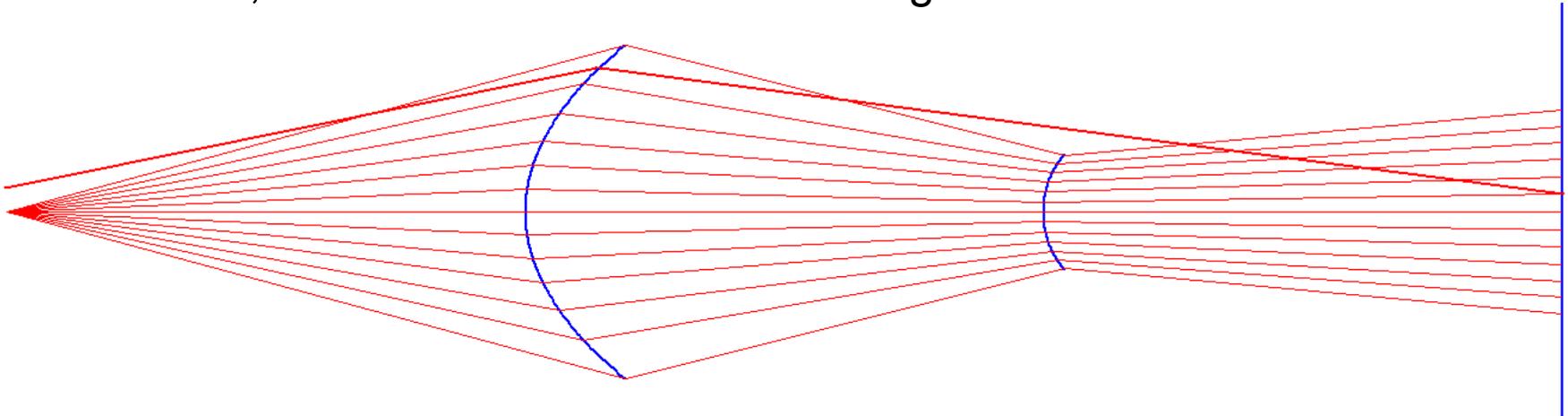
(www.wikipedia.de)



(www.l-lab.de)

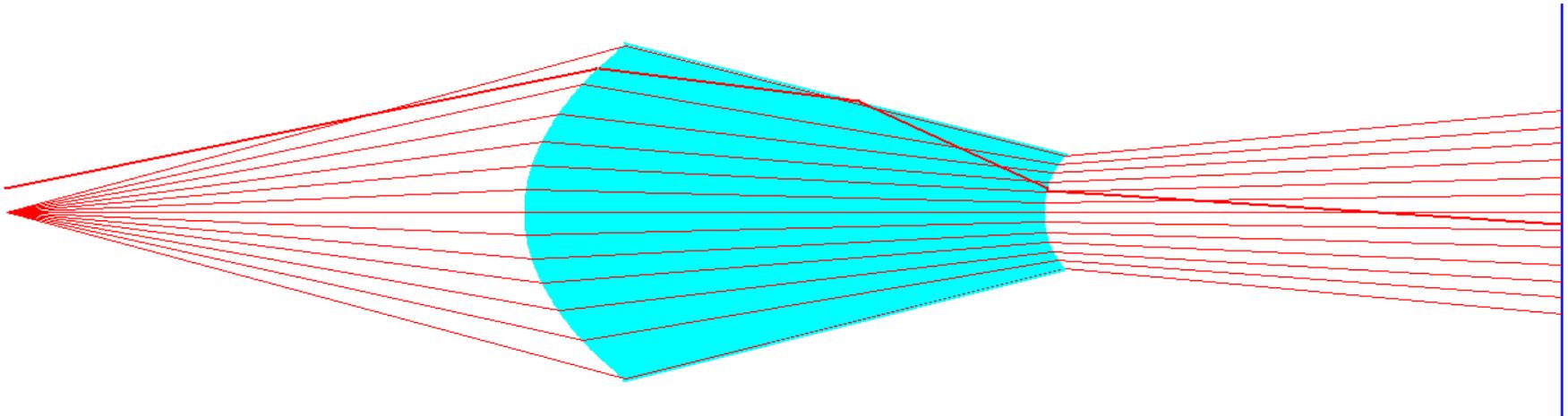
Flächenorientierte Strahlverfolgung

- optische Komponente als Abfolge **optischer Oberflächen** modelliert
- **Schnittpunkttest** mit diesen Flächen
- **Änderung des Brechungsindex** bei Flächendurchtritt
- Fehler, falls Strahl nicht durch alle vorgesehenen Flächen verläuft



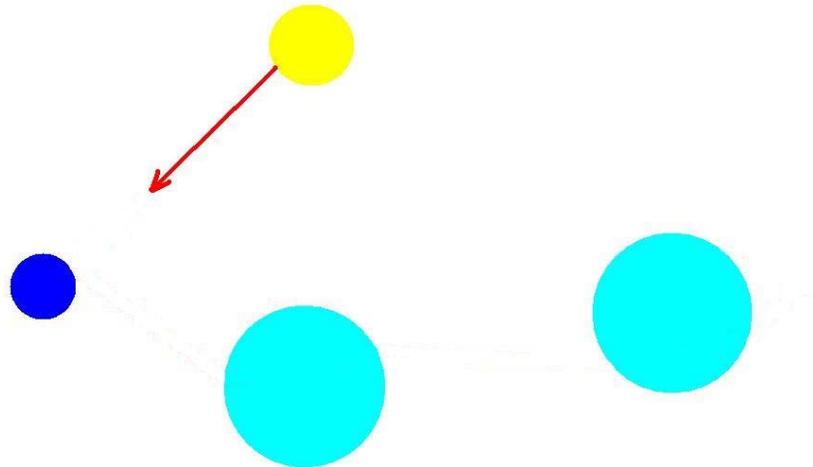
Volumenorientierte Strahlverfolgung

- Komponente als **optisch aktiver Körper** modelliert
- Schnittpunkttest mit begrenzenden Flächen des Körpers
- Änderung des Brechungsindex bei Ein-/Austritt aus Körper

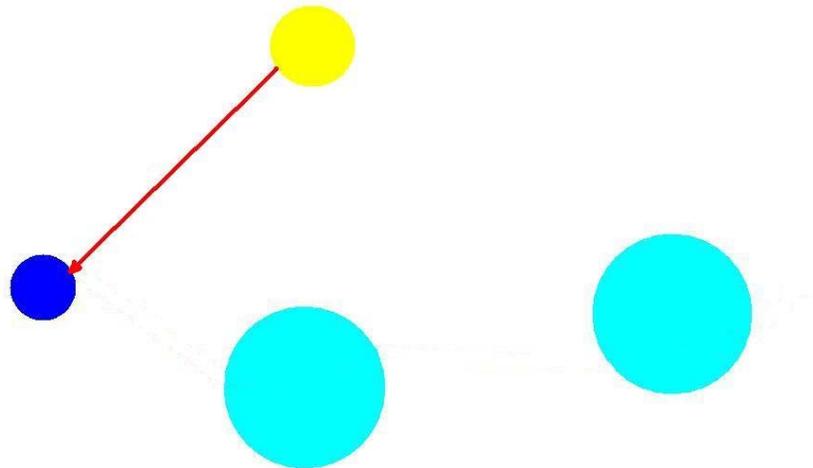


Funktionsprinzip

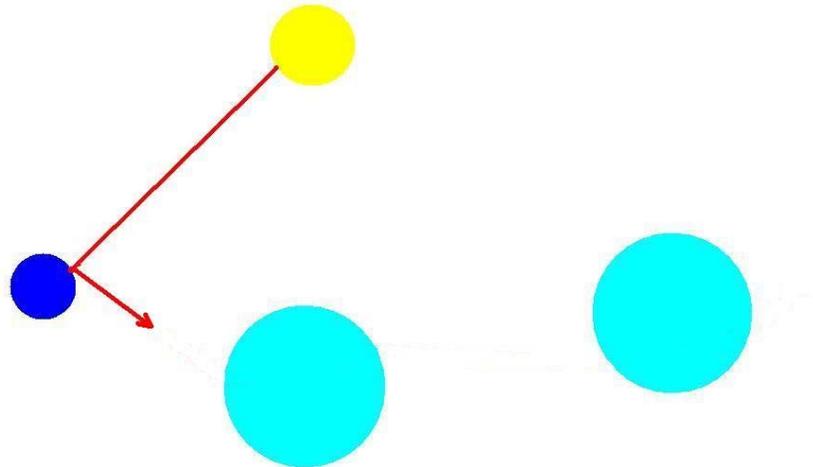
Strahl: Datenstruktur mit *Anfangspunkt* (Lichtquelle) *und Richtung* der Halbgeraden im Raum



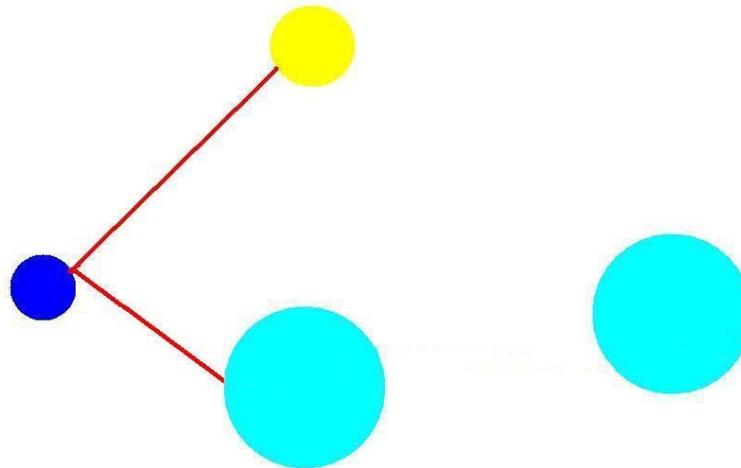
Schnittpunkt des Strahls ***mit nächster optischen Fläche*** gesucht



Richtungsänderung entsprechend den optischen Gesetzen bestimmt



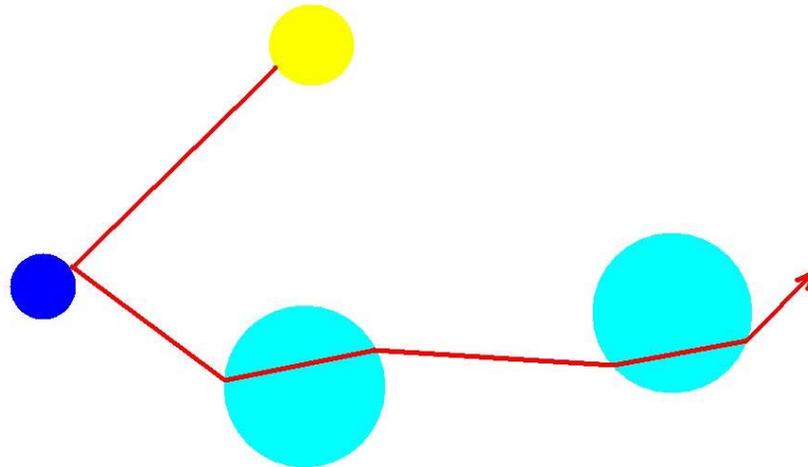
nächster Schnittpunkt mit optischer Fläche gesucht



Raytracing/Strahlverfolgung

Wiederholung dieser Schritte

Abbruch, wenn Strahl auf **absorbierende Fläche oder Empfänger** trifft



Weg des Strahls durch System bekannt

Raytracing



sequentielles Raytracing

Reihenfolge der Flächen auf welche der Strahl trifft ***vorher bekannt***

für abbildende Systeme

Verfolgung einiger hundert Strahlen genügt



Nichtsequentielles Raytracing

Reihenfolge der Flächen auf welche der Strahl trifft ***vorher nicht bekannt***

i.d.R. für nichtabbildende Systeme

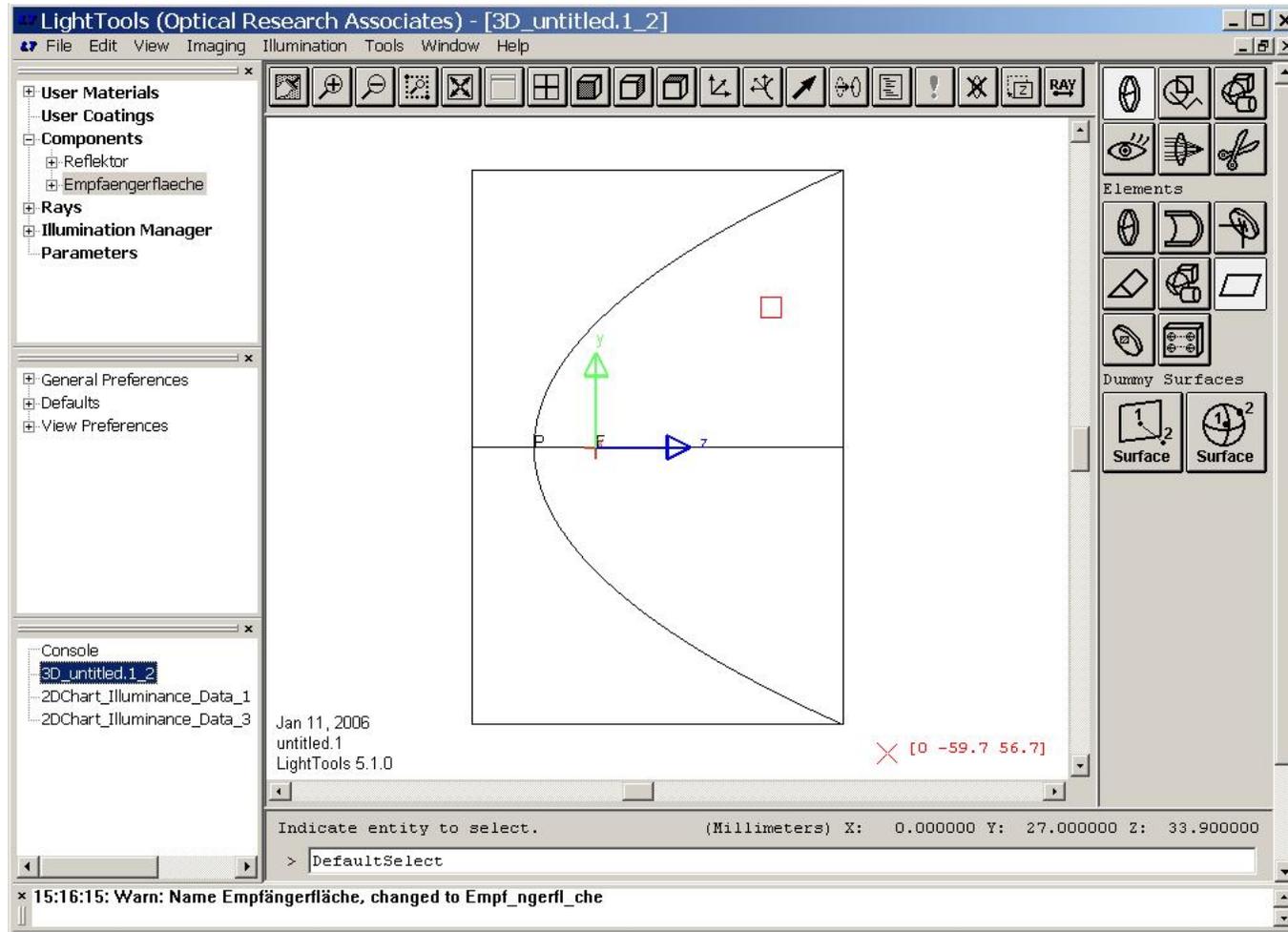
Verfolgung einiger hunderttausender bis mehrere Millionen Strahlen notwendig

- Optisches System aus **3D-Elementen** aufbauen (z.B. Import von CAD-Systemen)
- Volumen und Oberflächen mit **optischen Eigenschaften** belegen (Brechung, Reflexion, Absorption, Beschichtung, Streuung)
- **Lichtquellen** sind Ausgangspunkte **statistisch verteilten Strahlen** (räumliche -, spektrale Verteilung, „**Monte Carlo**“)
- Reihenfolge in der ein Strahl Objekte passiert, muss nicht bekannt sein (im Gegensatz zur Simulation opt. Abb. Systeme)
- Berechnung aus Anzahl **auftreffender Strahlen** und ihrer **zugehörigen Lichtleistung**
- Simulationsergebnisse: **Beleuchtungs-/Lichtstärken** auf **Empfängerflächen** und im **Fernfeld**
- **Statistischer Fehler** wird mit steigender Anzahl von Strahlen kleiner

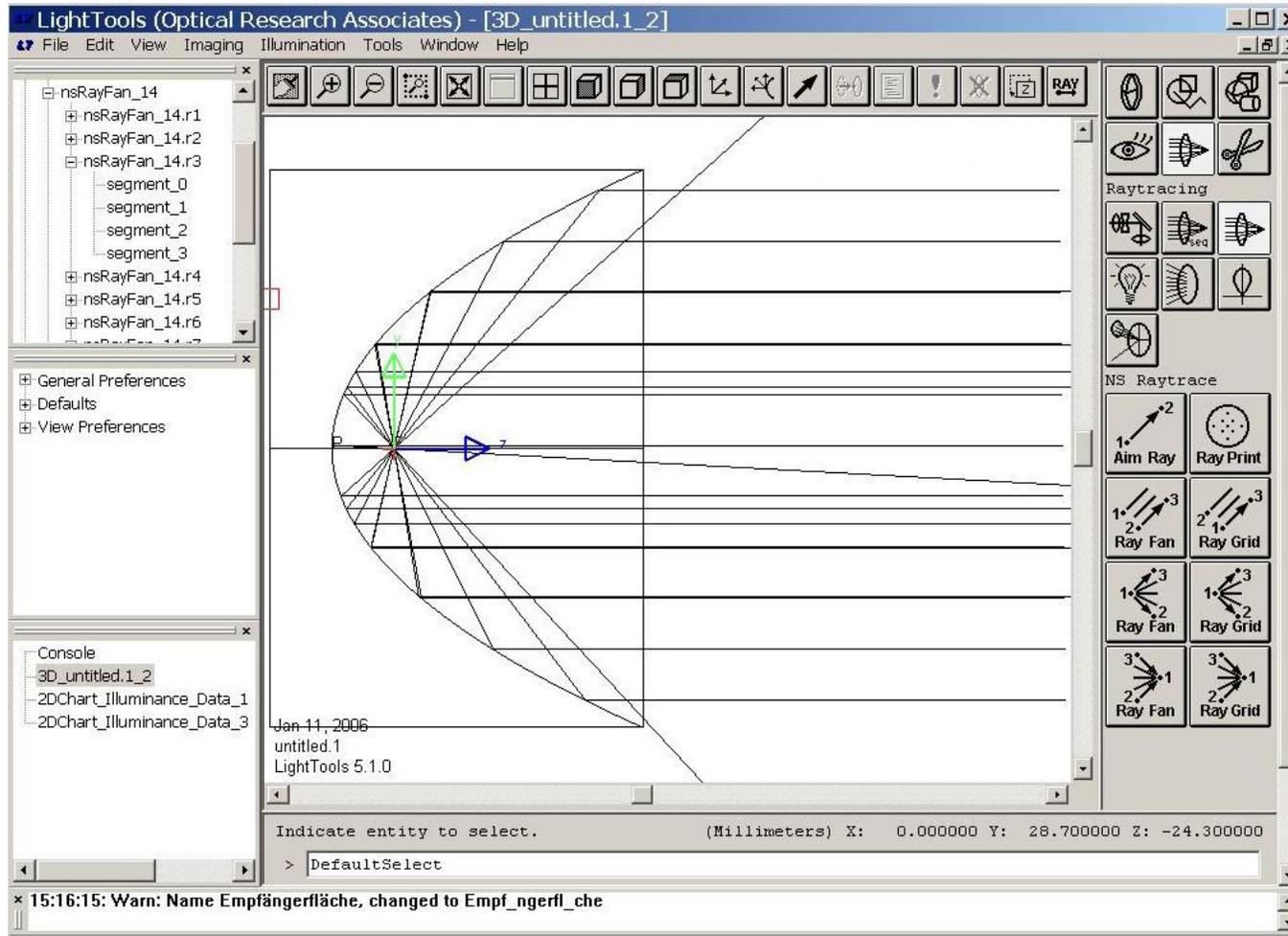
Ziel

- möglichst realistische Modellierung
- möglichst homogene Ausleuchtung einer runden Fläche (Durchmesser 100mm) in definiertem Abstand (300mm)
- weitere Schritte sind die Anpassung des Reflektors an bestimmte Ausleuchtungsgeometrien (iterativer Prozess)

Definition eines Paraboloid-Reflektors



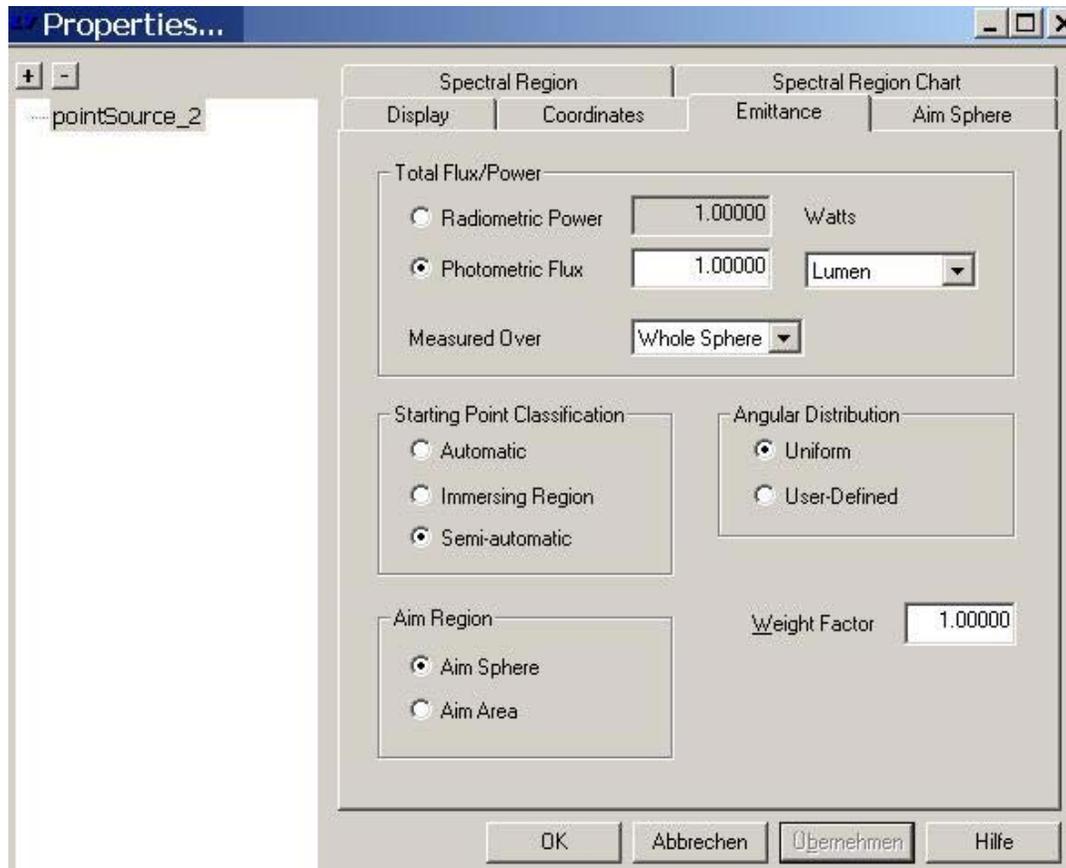
Überprüfung mit Hilfe von Teststrahlen



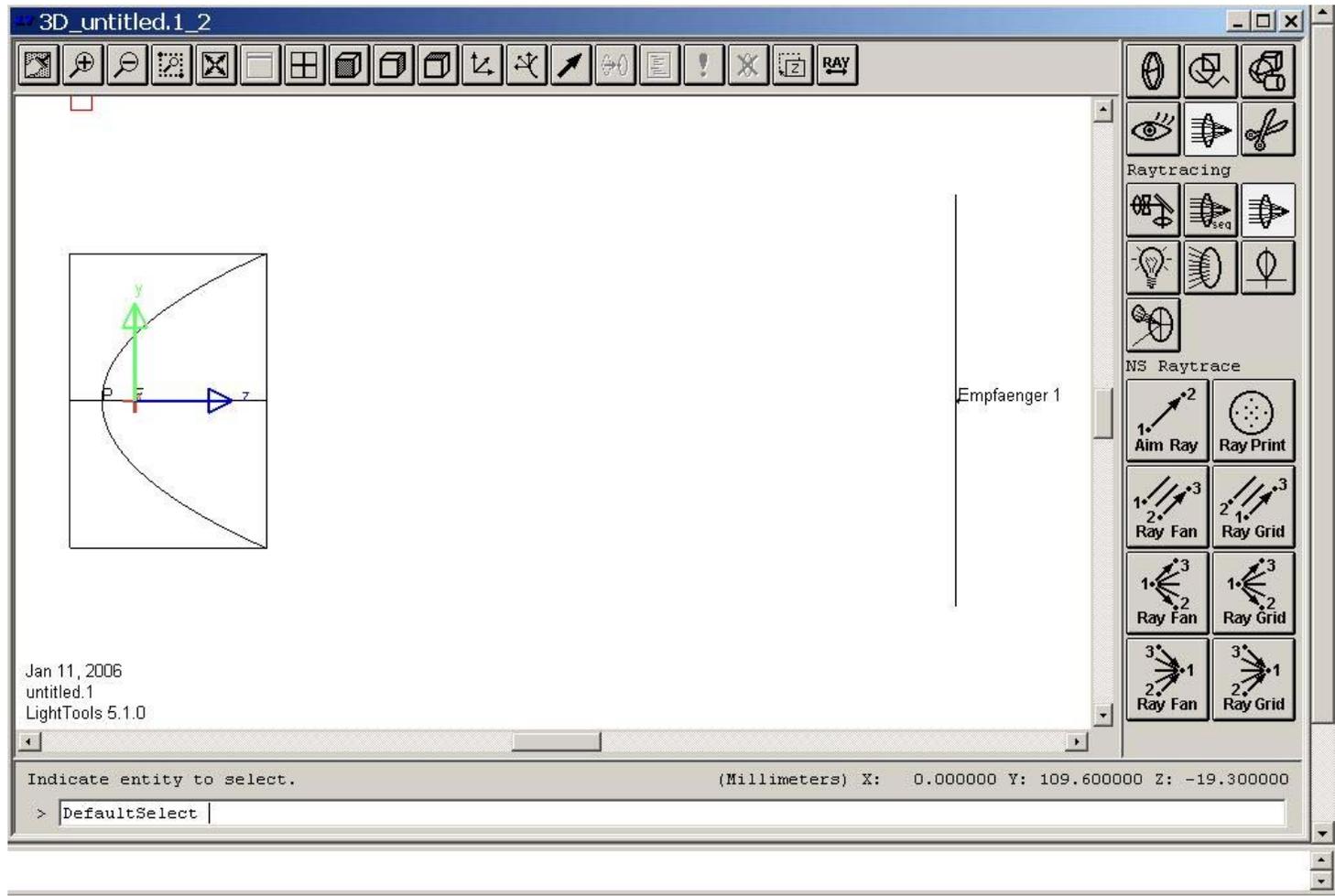
Beispiel - Design eines Reflektors

Lichtquelle einfügen, ideale Punktlichtquelle mit 1 Lumen

Lichtstrom, Abstrahlung in den Vollraum

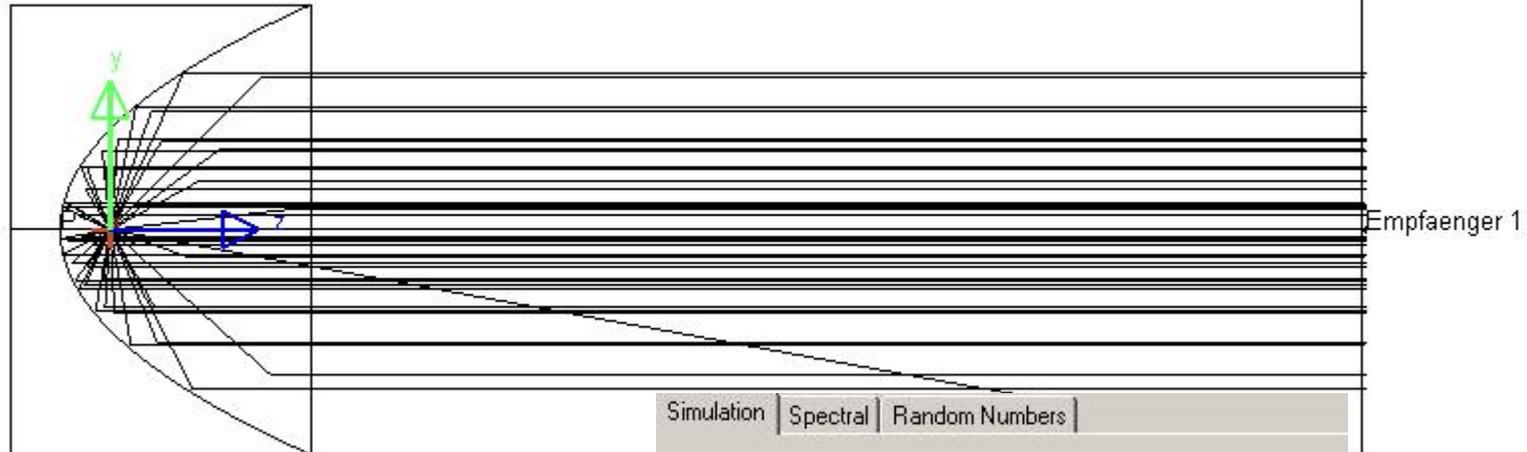


Empfängerfläche definieren und Empfänger einfügen



Beispiel - Design eines Reflektors

Vorabkontrolle: ein Raytrace-Durchlauf mit nur wenigen Strahlen



Simulation | Spectral | Random Numbers

Ray Trace Info

Total Rays to Trace

Rays Currently Traced

Relative Ray Power Threshold

Preview Rays Show Ray Report

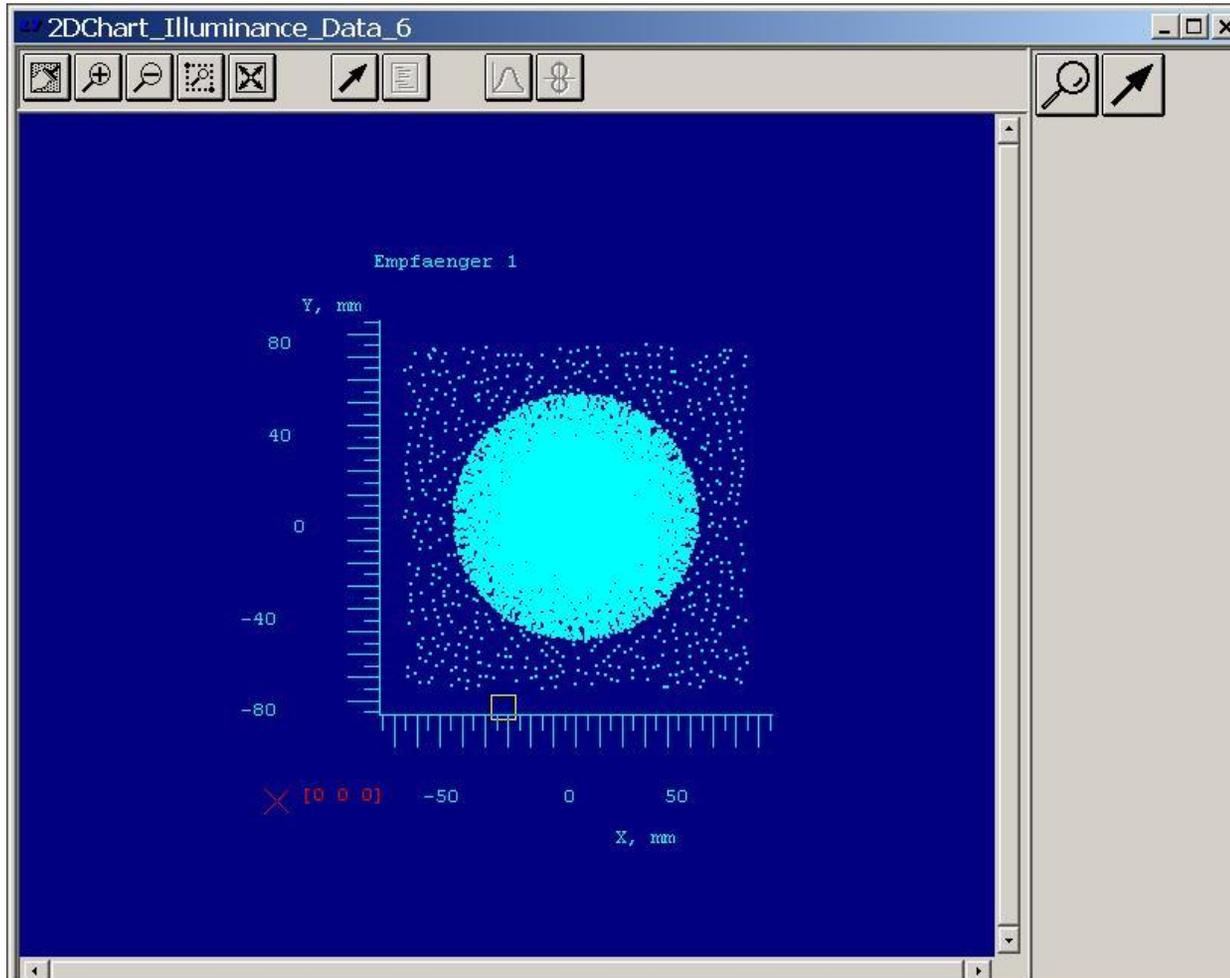
Update Info

Update Results After

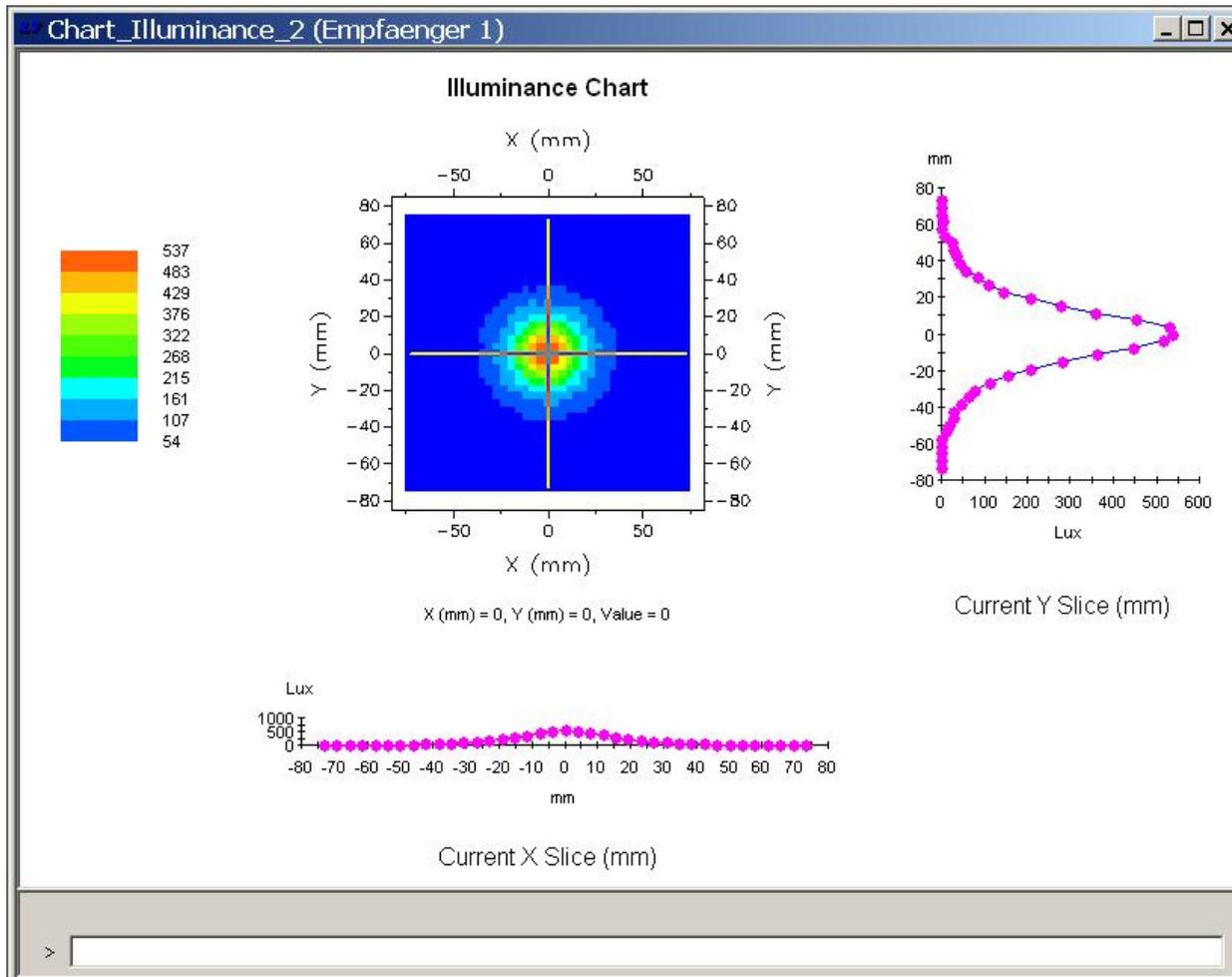
Update Interval

Beispiel - Design eines Reflektors

Ergebnisdarstellung der Vollsimulation, Auftreffpunkte



Ergebnisdarstellung der Vollsimulation, Beleuchtungsstärke



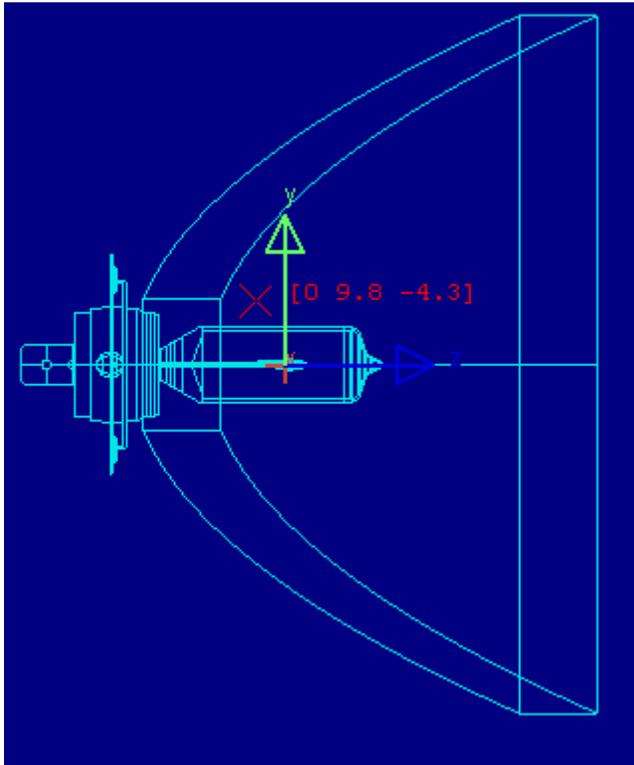
Ergebnisdarstellung der Vollsimulation, numerische Werte

The screenshot shows a 'Properties...' dialog box with a tree view on the left and a data panel on the right. The tree view shows a hierarchy: 'Empfänger 1' containing 'Meshes' (with sub-items 'illuminanceMesh_5' and 'intensityMesh_6') and 'Empfängerflaeche'. The data panel has tabs for 'Properties', 'Results', and 'Raw Data'. The 'Results' tab is active and displays the following numerical values:

Property	Value	Unit
Error Estimate at Peak	5.02	%
Number of Samples	42607	
Illuminance		
Min	0.00000	Lux
Max	536.74399	Lux
Average	37.87289	Lux
Total Flux		
Units	Lumen	
Incident	0.85214	Lumen
Absorbed	0.00000	Lumen
Distribution Position and Extent		
Centroid		Standard Deviation
X	-0.00108 mm	Sigma X
Y	-0.00226 mm	Sigma Y
		19.15029 mm
		19.15119 mm

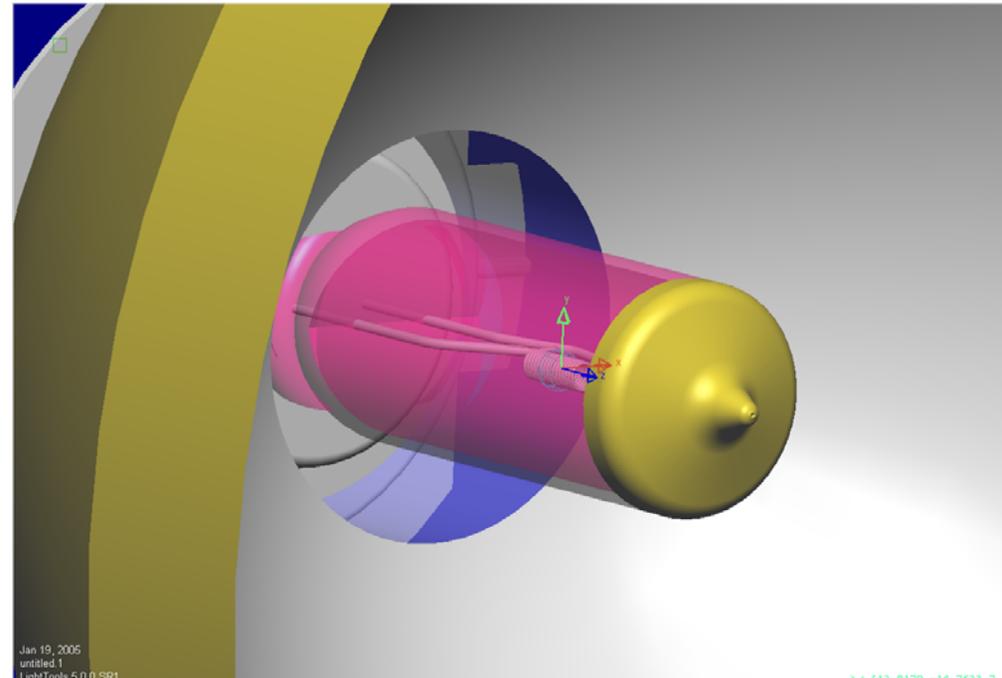
Buttons at the bottom: OK, Abbrechen, Übernehmen, Hilfe.

Beispiel – Reflektor mit realer Lichtquelle

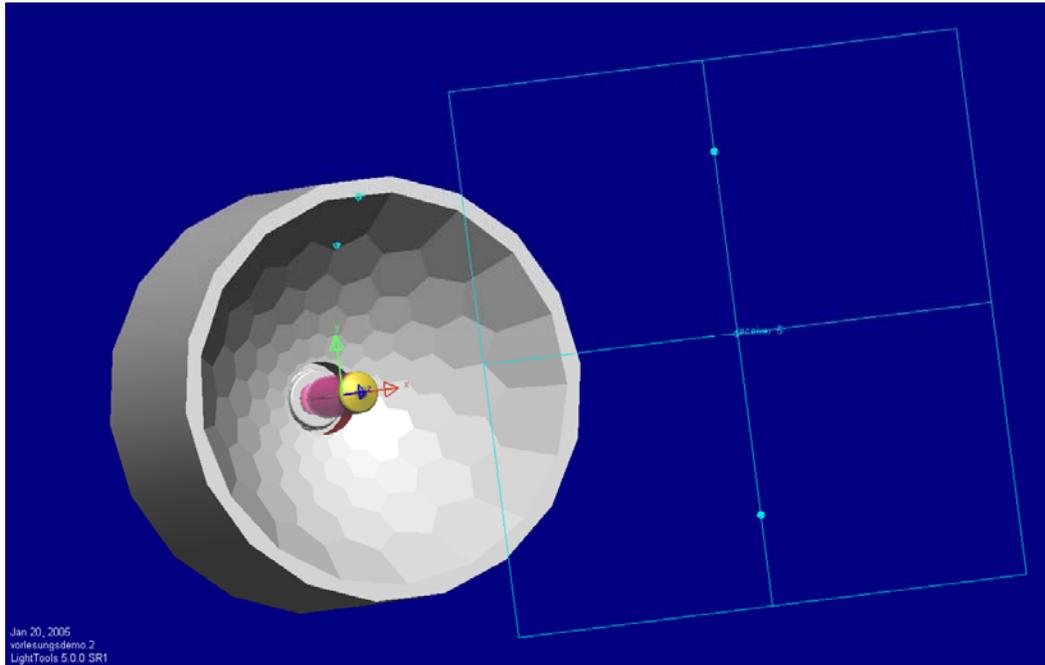


H7-Lampe mit Glühwendel
als Lichtquelle

Modellierung realer Lichtquellen auf
CAD-Basis und Abstrahlcharakteristik



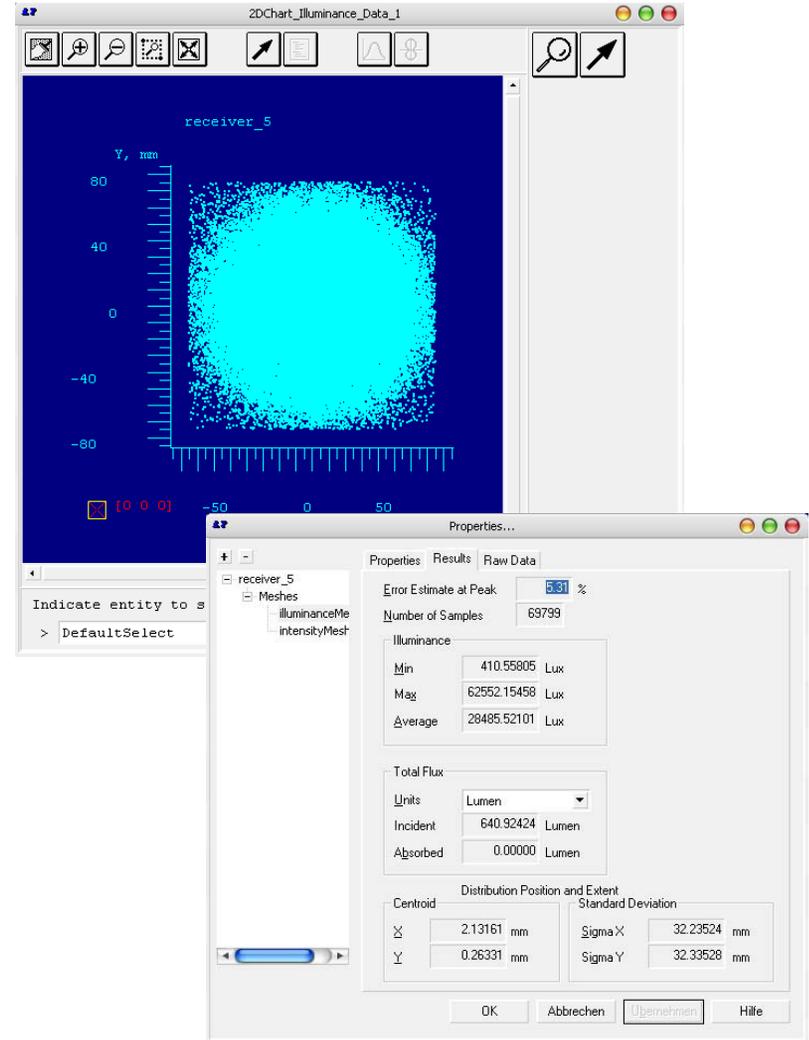
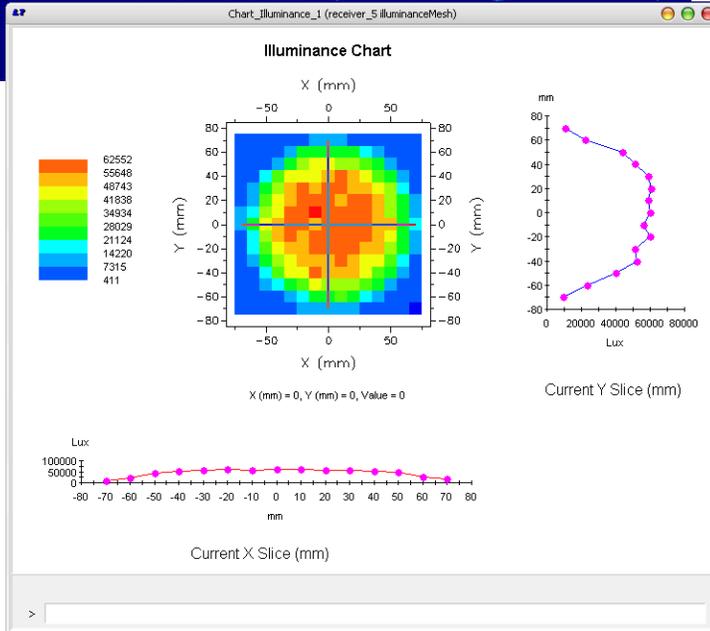
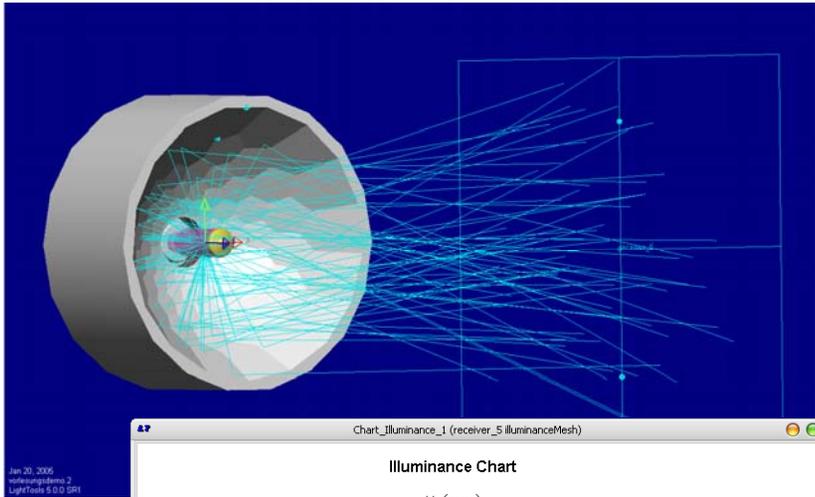
Lighttools-Utility nutzt Programmierbarkeit der Software in VisualBasic zur automatisierten Erstellung facettierter Reflektoren nach Zielvorgaben



The screenshot shows the LightTools software interface. At the top, there is a menu bar with 'Set' and 'User' options. Below it is a tree view of the software's components, with 'Faceted Reflectors' selected. A tooltip for 'Faceted Reflectors' is visible, stating: 'Faceted Reflectors: Creates faceted reflectors. Supports plunger/extrusion options. Allows trace individual facets.' Below the tree view is a 'Run Application' button. The main window displays a 3D model of a reflector and an 'Information log' panel. The 'Reflector Geometry' panel is active, showing the following settings:

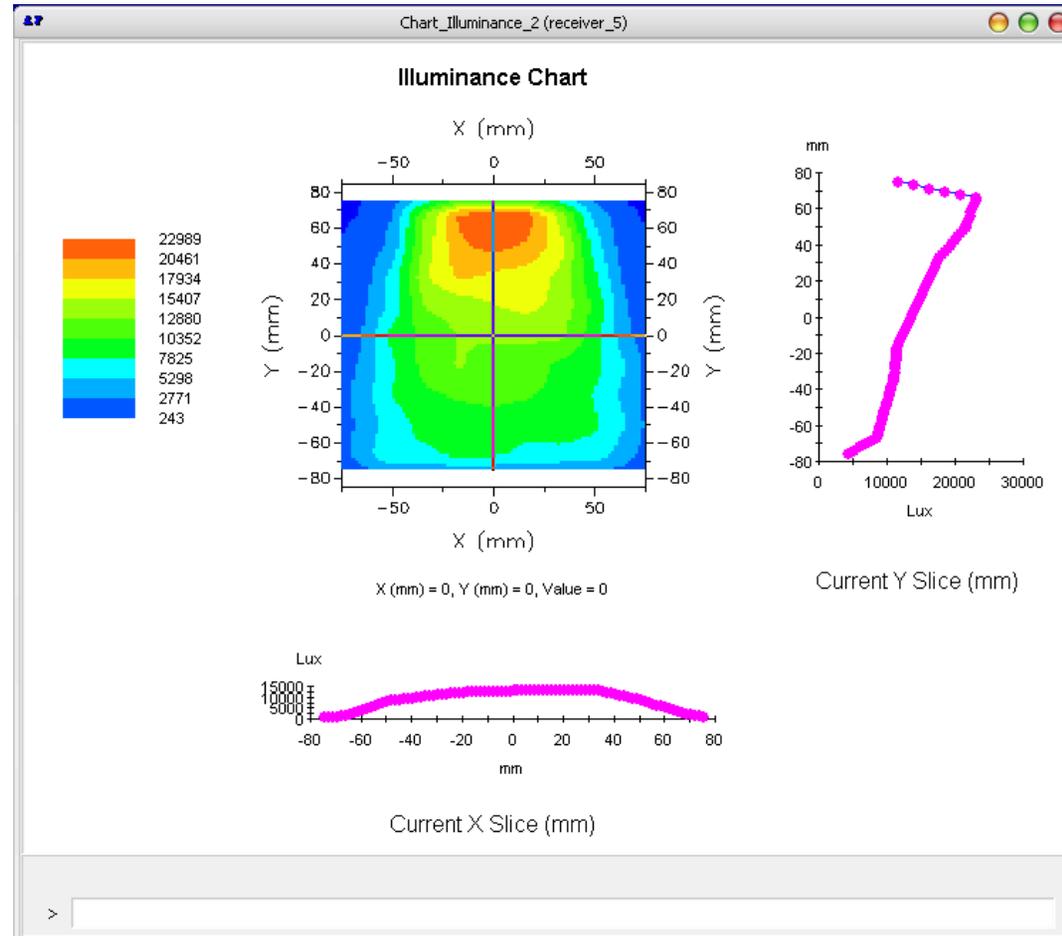
- Reflector Type: Plunger
- NumWedges (0=auto): 0
- Rim Radius: 53
- Hole Radius: 10
- Rim Angle: 60
- Name: IrefReflector
- Repair reflector
- Performance Specs:
 - Target Z: 300
 - Target Half Size: 50
 - Target Image Aspect: 1
 - Uniformity Vs Flux/ler
- Plunger Trim Options: Hexagonal (selected), All wedges have same width AND every other row rotated 1/2 facet.
 - Vary Width in A Row
 - Width Knob: 2
 - Spiral Knob: 1
- Extruded Trim Options: Trimmed Wedge (selected), Create a single extruded wedge and trim.
 - Union Wedges
 - Extrusion Depth: 110

The bottom of the interface shows the date '1/19/2005' and time '6:32 PM'.



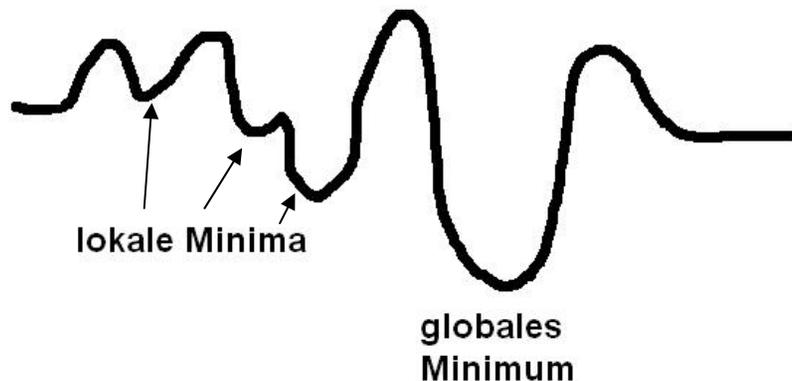
Weitere Schritte – z.B. geänderte Beleuchtungssituation

Simulation einer Scheinwerferneigung durch Drehung der Empfängerfläche um 80 Grad gegen die Vertikale

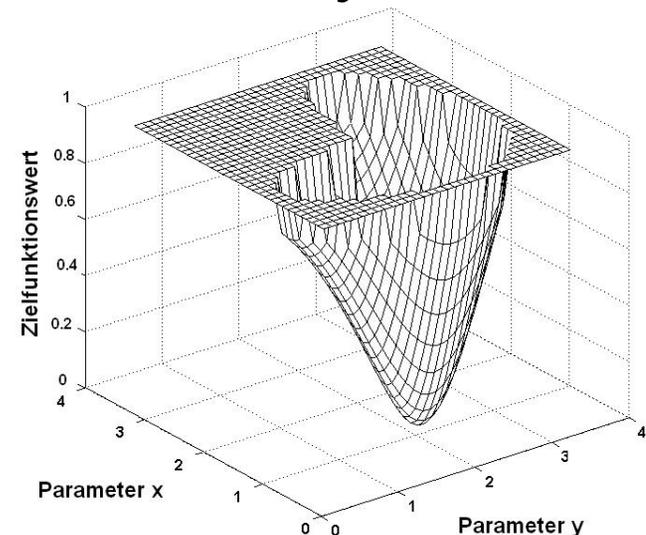


Ziel: Finden der *optimalen Parameter eines optischen Systems* (z.B. Reflektor- oder Linsenkontur) zur Erzielung einer gewünschten Strahlungsverteilung aus einer gegebenen Lichtquelle

Optimierung ist eine automatisierte Suche nach der Parameterkombination, die die *höchste Güte des Systems* liefert.

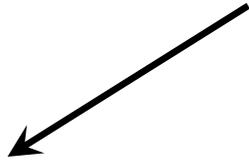


Eindimensionale Zielfunktion



Zweidimensionale Zielfunktion

Optimierungsverfahren



lokale Optimierung

Gradientenverfahren

Goldener Schnitt

Sekantenverfahren

Newton-Verfahren

Levenberg-Marquardt-Verfahren



globale Optimierung

Bergsteigeralgorithmus

Metropolisalgorithmus

Schwellenakzeptanz

simulierte Abkühlung

Vorgehensweise:

- **Modellierung** der Lichtquelle und eines Startsystems mit geeigneter **Parametrisierung**
- Definition einer **Zielfunktion** aus den strahlungsphysikalischen Vorgaben der gewünschten Zielverteilung
- **Nebenbedingungen** (z.B. Bauraum) festlegen, Symmetrien nutzen
→ Rechenzeitverkürzung
- **Iterative Verbesserung** des Startsystems zur Minimierung der Zielfunktion
- nach jedem Durchlauf wird der neue Wert der Zielfunktion mit dem vorherigen Wert verglichen
- Iteration bis **Abbruchkriterium** erfüllt ist
(z.B. maximale Anzahl der Iterationen erreicht,
Änderung des Zielfunktionswertes kleiner als Vorgabe)

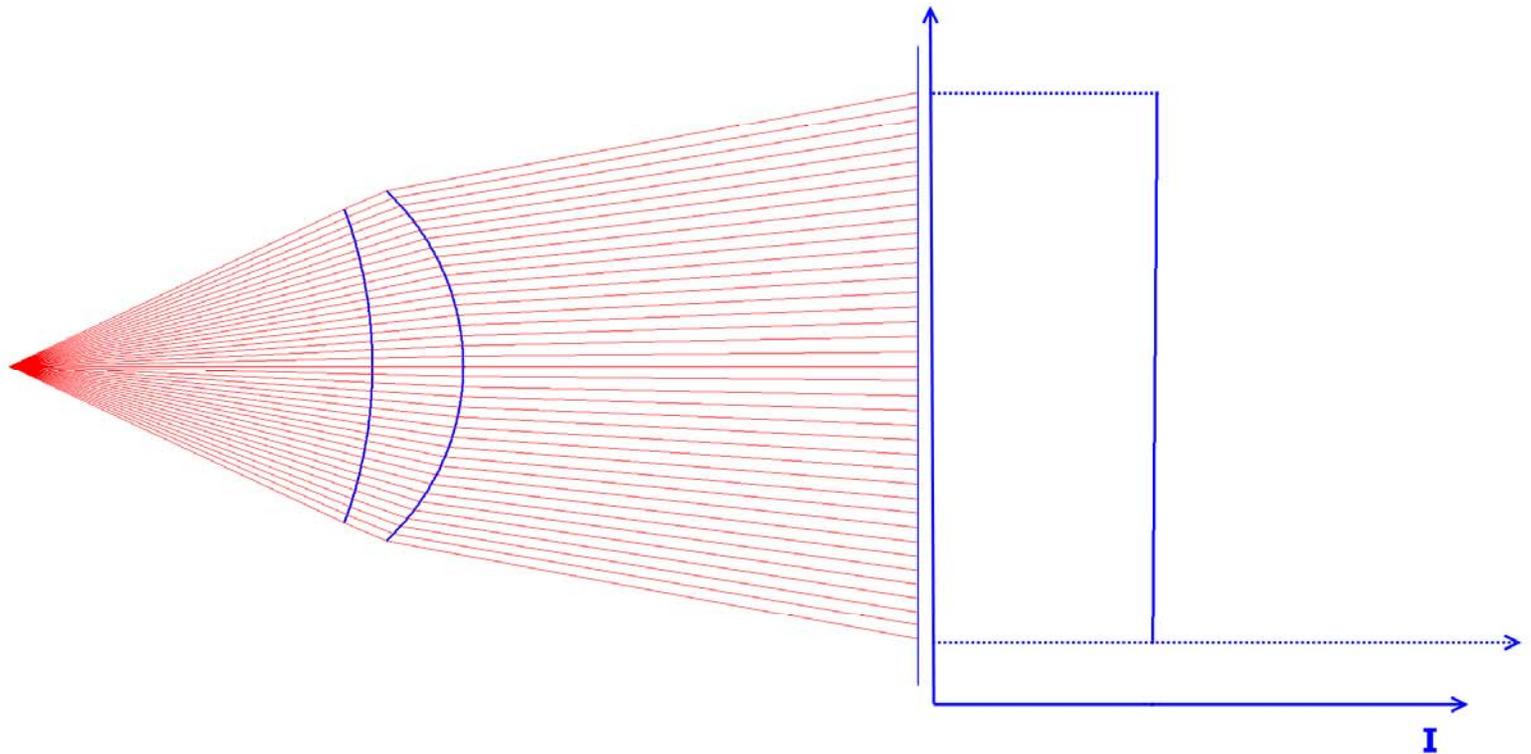
Vorteile:

- **Beliebige Lichtquellenmodellierung**, keine Einschränkung auf Punktlichtquellen
- **Freie** Wahl der optischen Komponenten mit geeigneter **Parametrisierung**
- **Freie Definition der Zielfunktion** aus strahlungsphysikalischen Größen

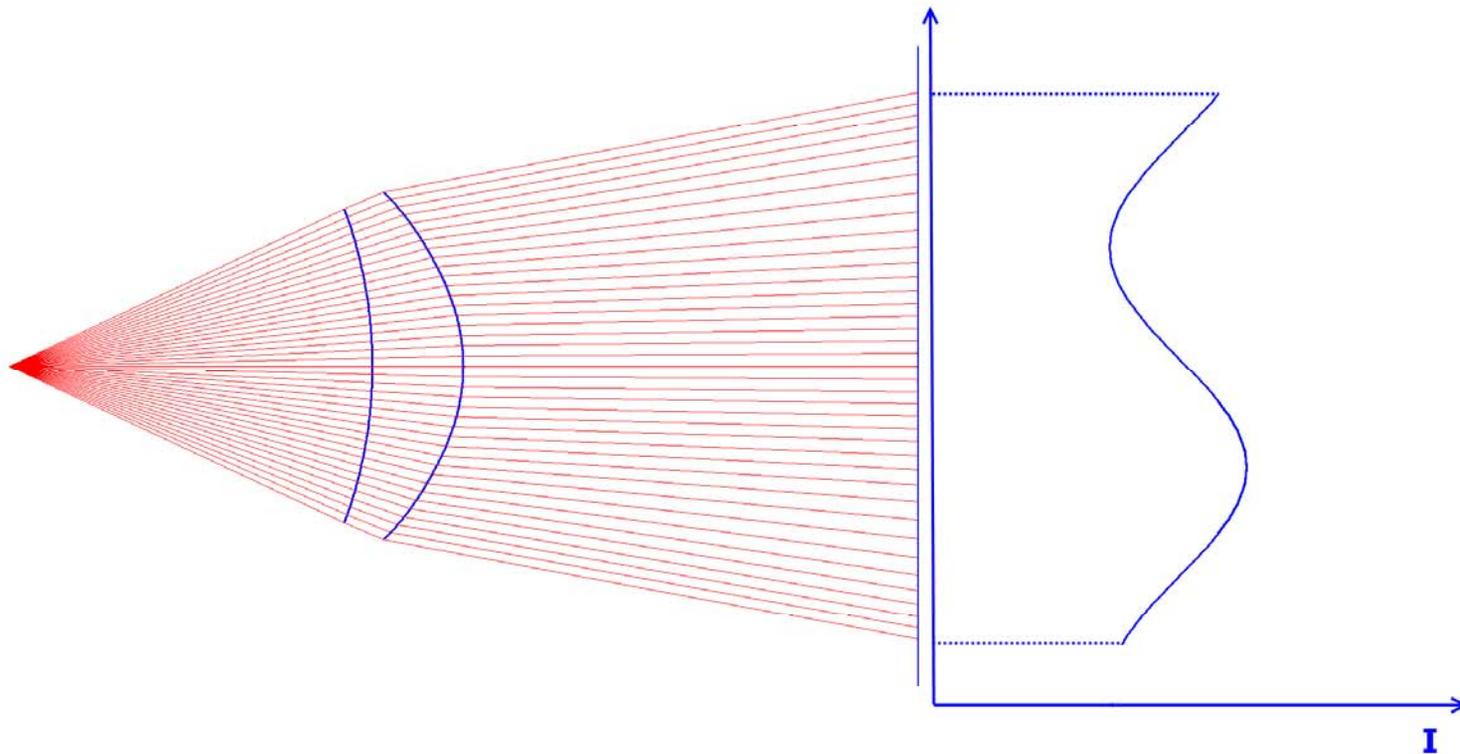
Nachteile:

- **Lange Rechenzeiten** bei Verwendung von deterministischen Verfahren (zufallsgenerierte Lichtquelle, hohe Strahlanzahl zur Reduktion des statistischen Fehlers)
- **Konvergenzprobleme** des iterativen Optimierungsverfahrens bei ungeeigneter Parametrisierung der optischen Komponenten oder ungeeigneter Zielfunktion.

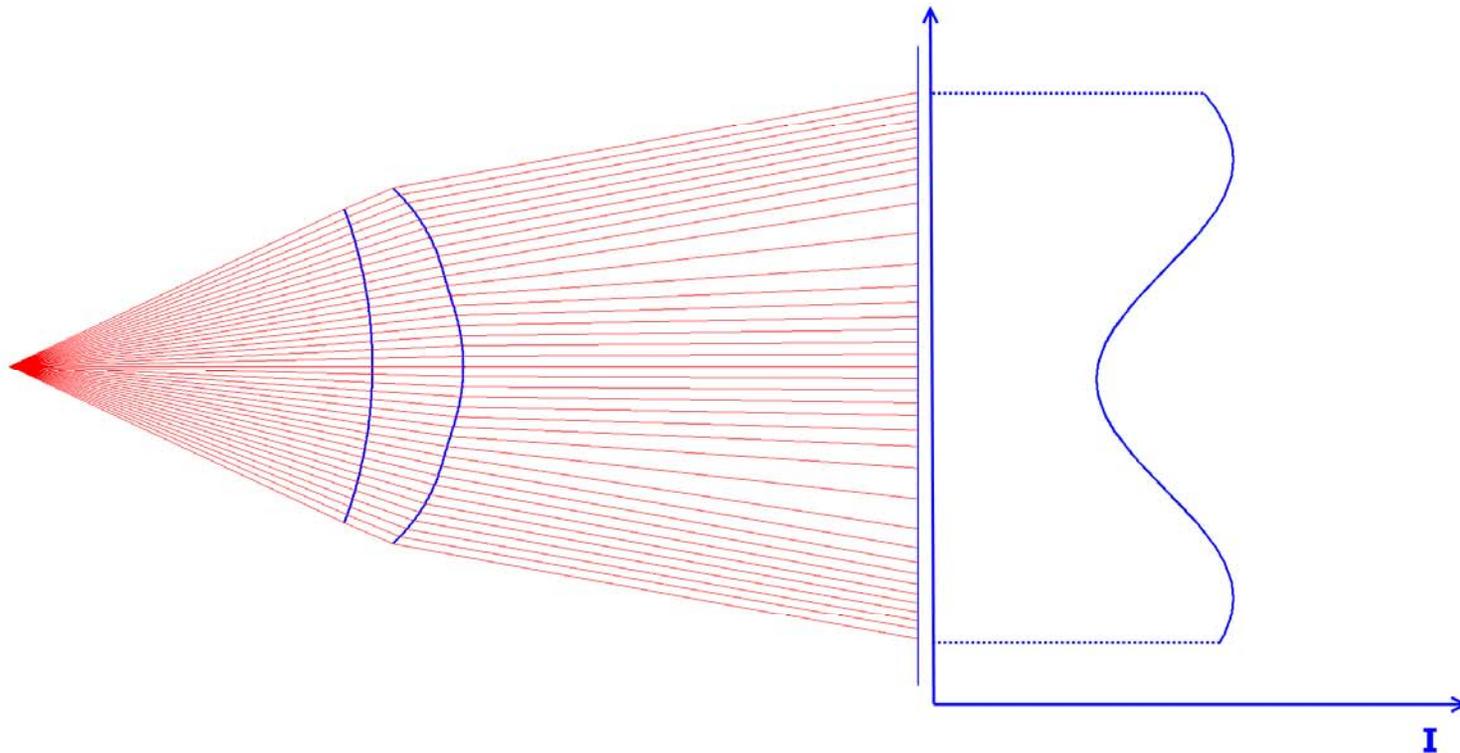
Variation ausgesuchter Flächenparameter



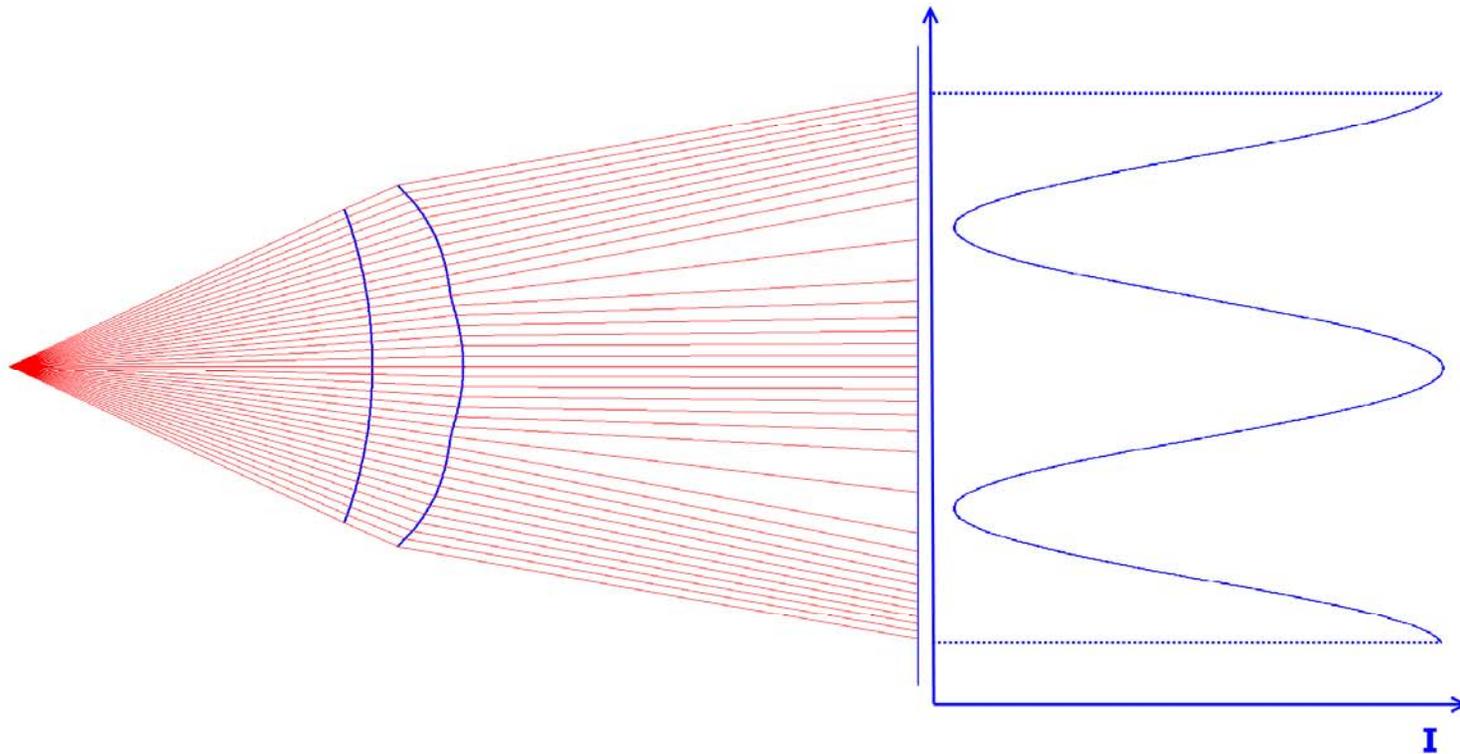
Variation ausgesuchter Flächenparameter



Variation ausgesuchter Flächenparameter

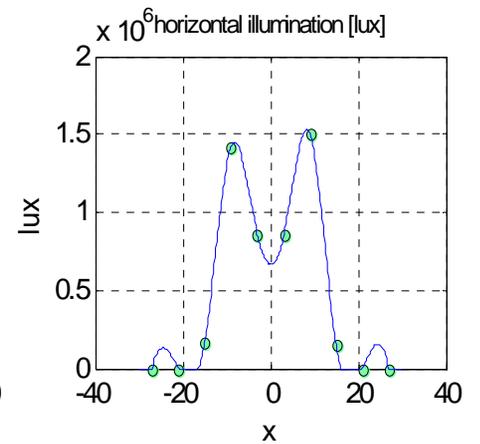
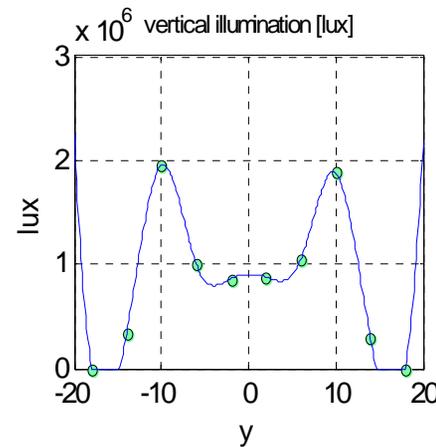
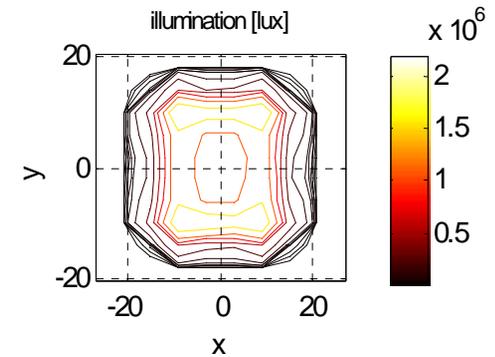
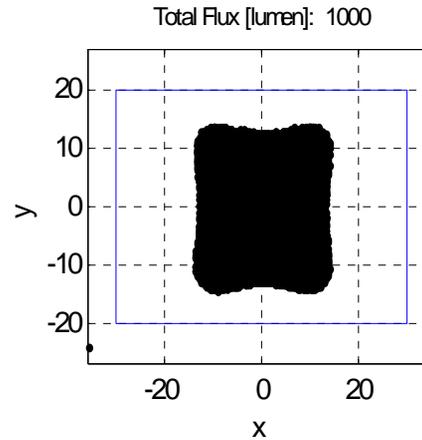
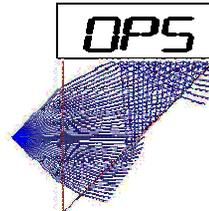
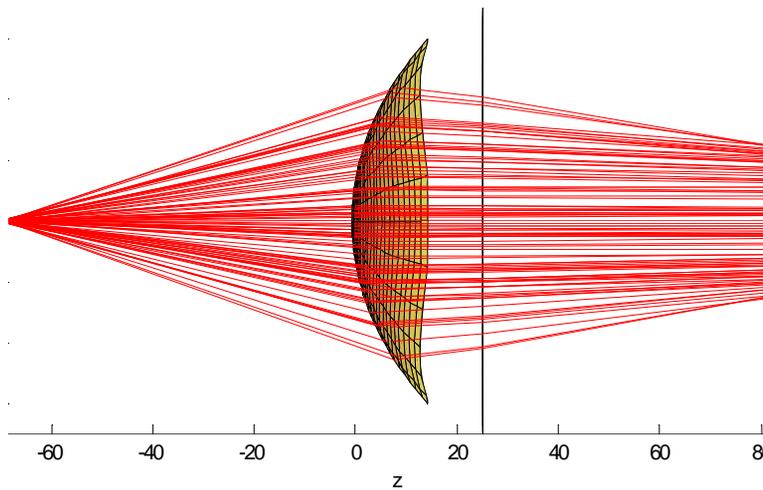


Variation ausgesuchter Flächenparameter

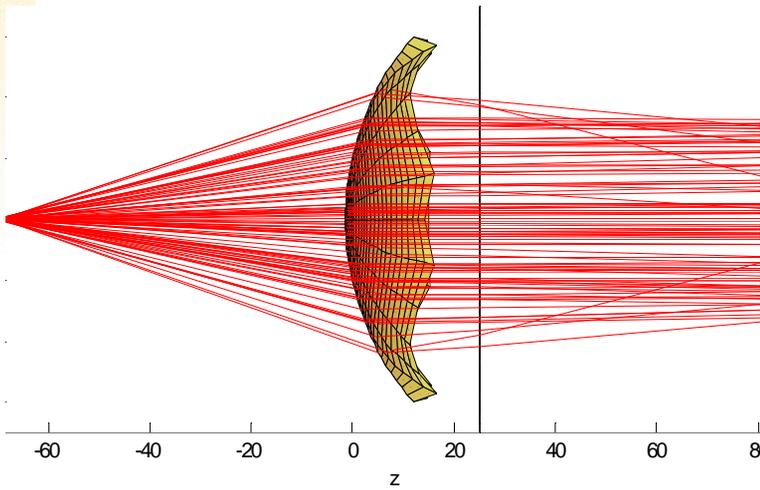
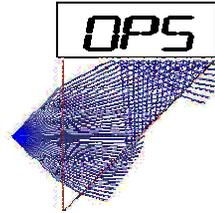


Beispiel: Optimierung einer Lichtverteilung

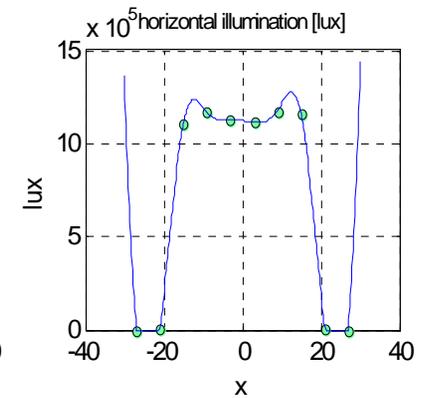
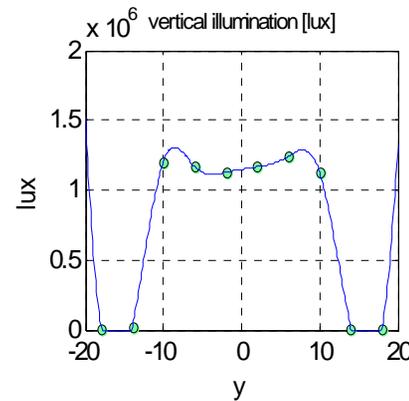
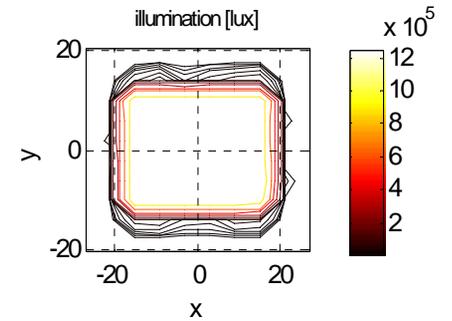
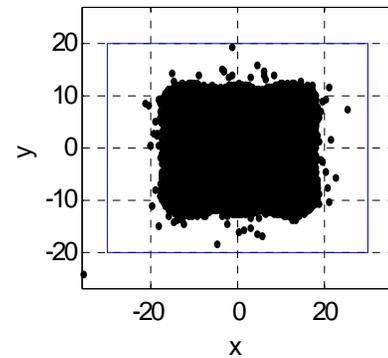
Startsystem

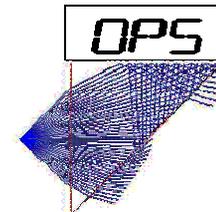


Ergebnis



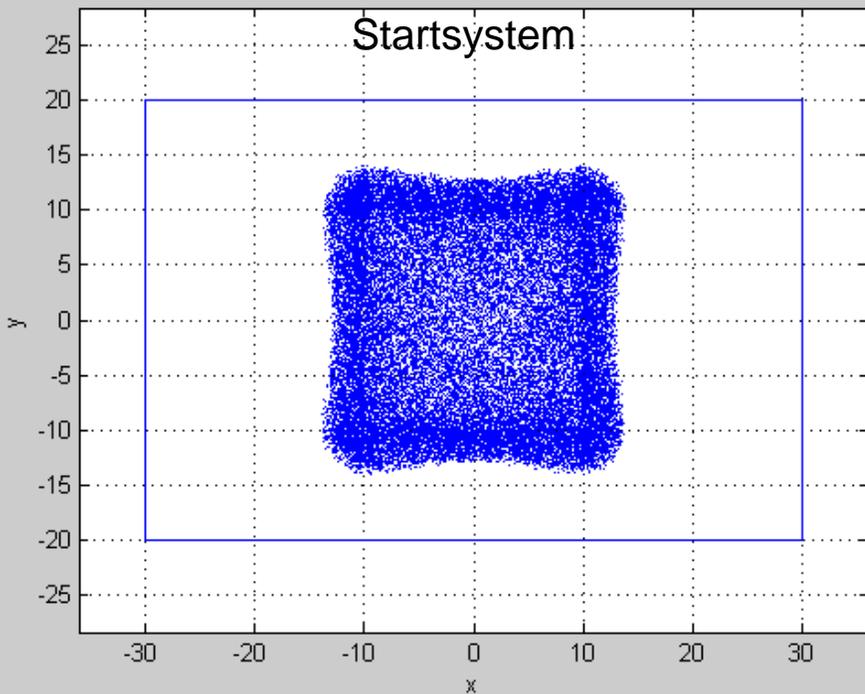
Total Flux [lumen]: 999.85





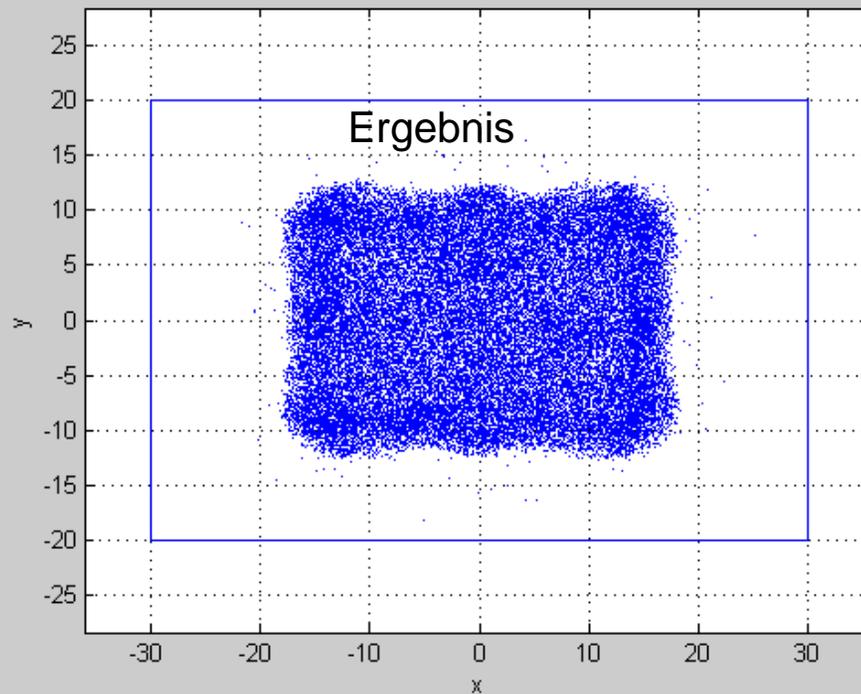
Total Flux [lumen]: 1000

Startsystem



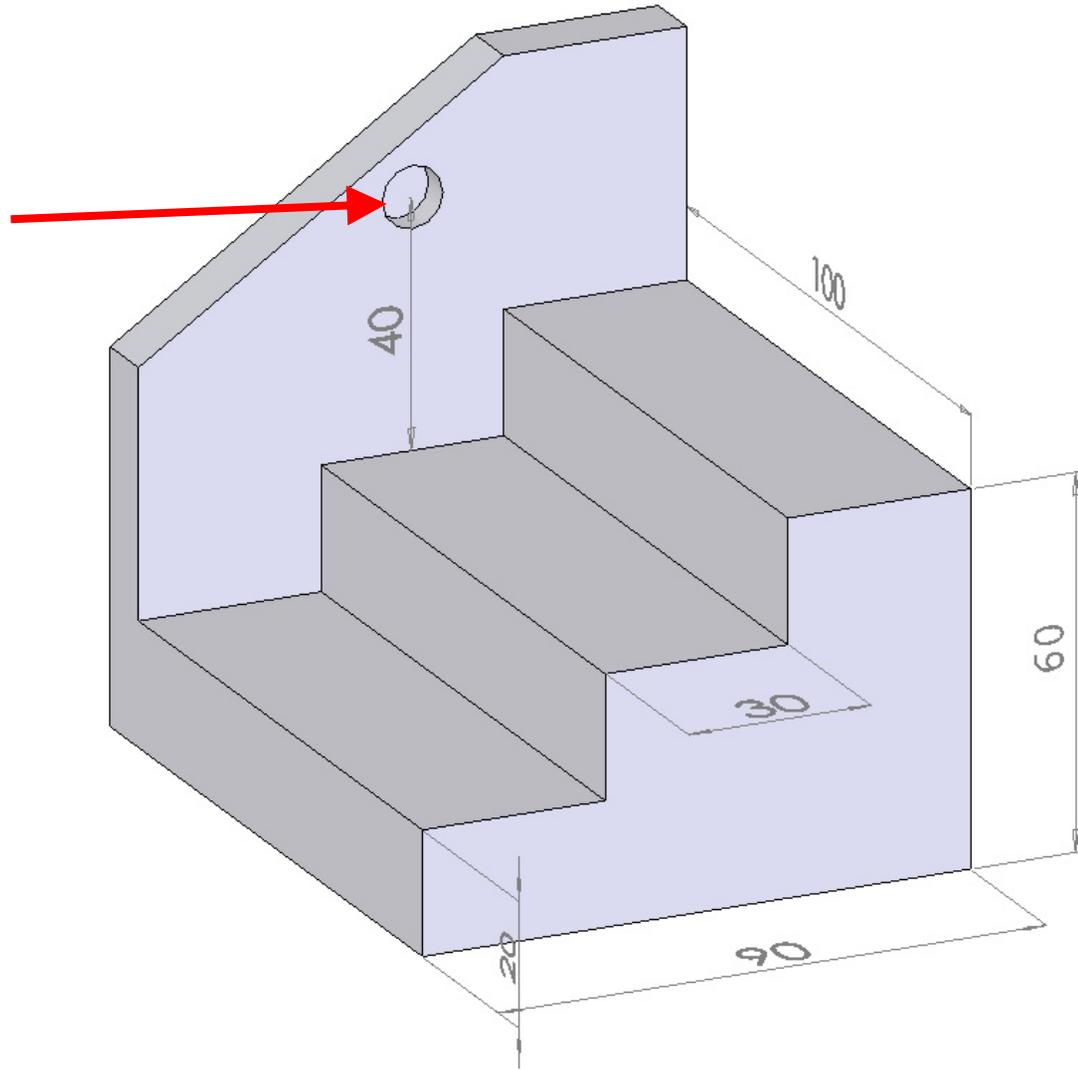
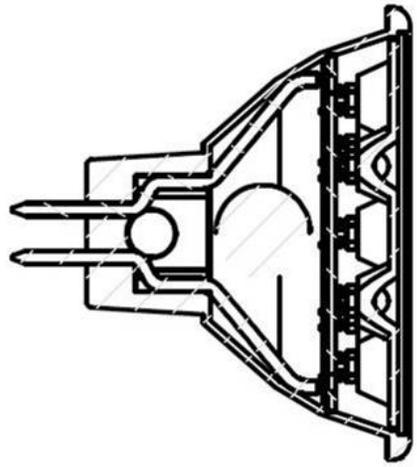
Total Flux [lumen]: 999.85

Ergebnis



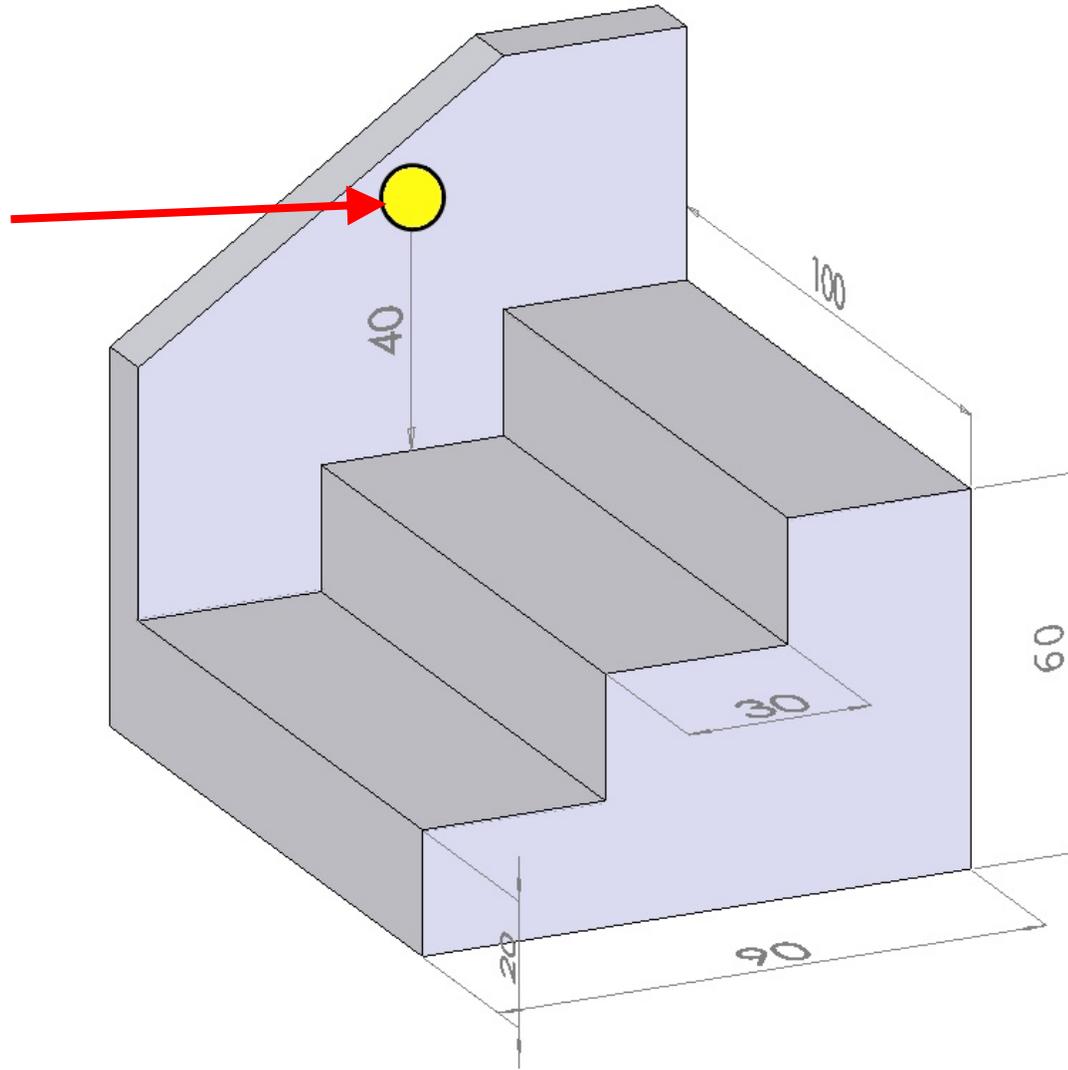
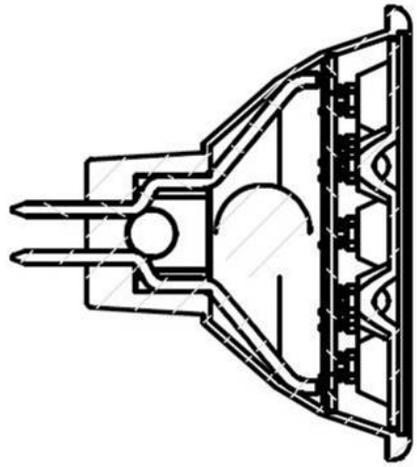
LTI LED-Treppenstufenbeleuchtung

Lichttechnisches Institut



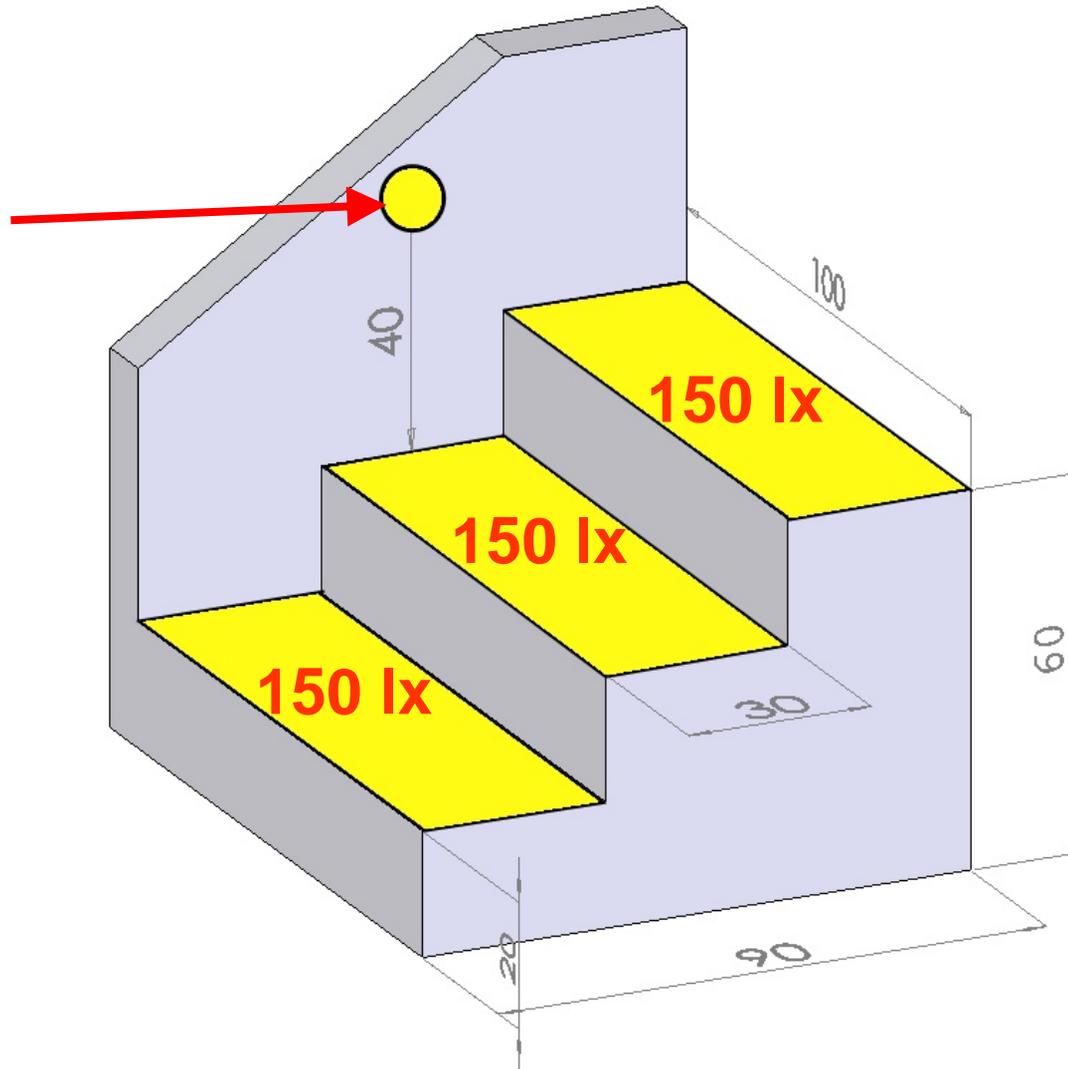
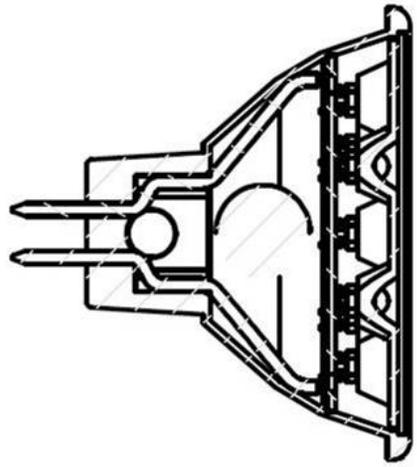
LTI LED-Treppenstufenbeleuchtung

Lichttechnisches Institut



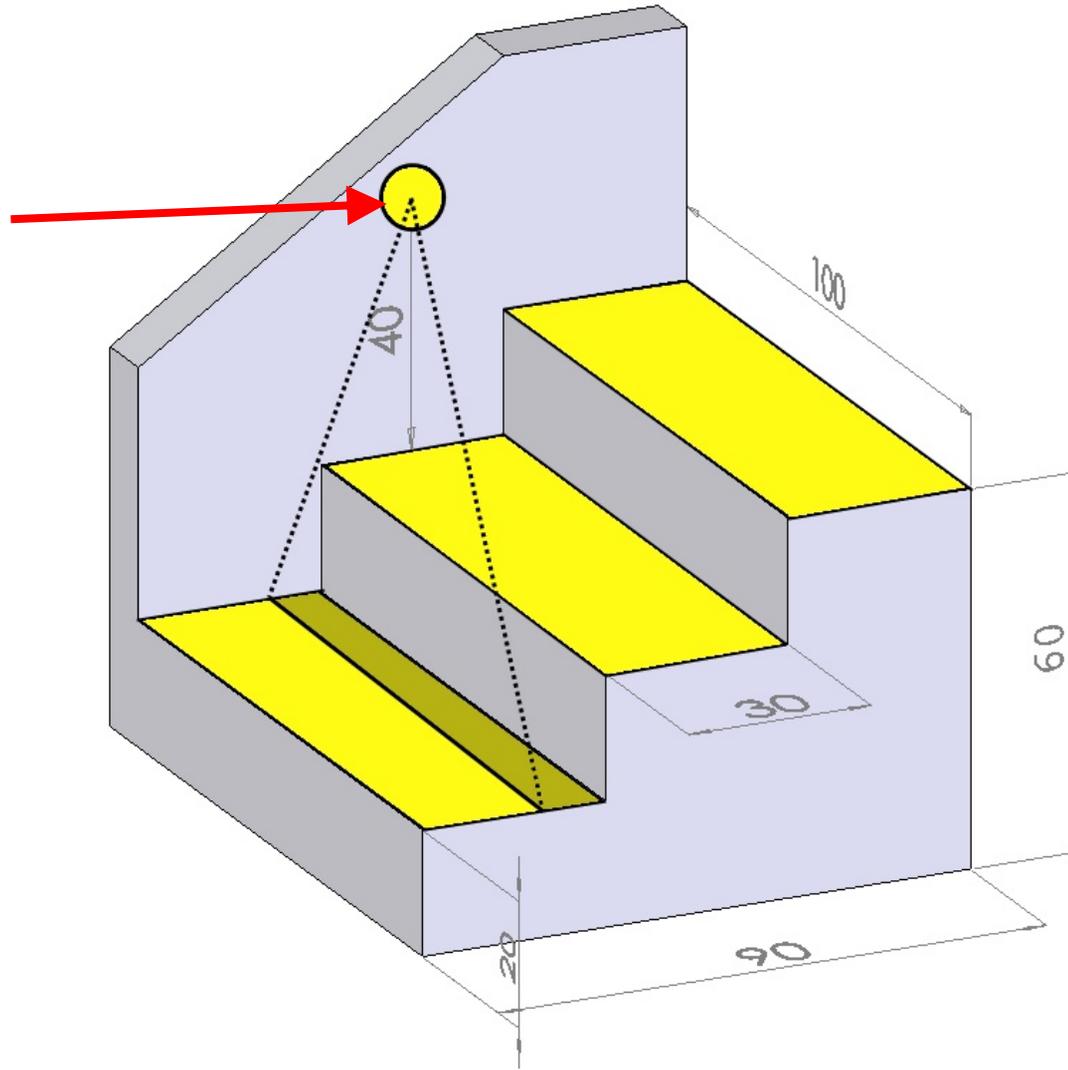
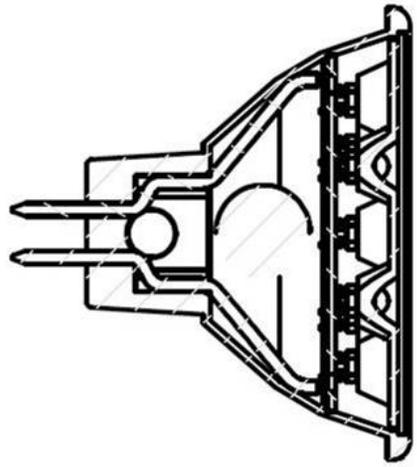
LTI LED-Treppenstufenbeleuchtung

Lichttechnisches Institut



LTI LED-Treppenstufenbeleuchtung

Lichttechnisches Institut



Vorteile:

- Stufen der Gangway wesentlich besser ausgeleuchtet als bisher
- LED-Spot preiswerter und langlebiger
- geringerer Installationsaufwand
- Beleuchtung von einer Seite ausreichend,
→ daher Platzersparnis

Berechnung Anzahl der benötigten LEDs

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

$$\Phi = E \cdot A = 150lx \cdot 3 \cdot (0,3m \cdot 1m) = 135lm$$

Bei 50 lm pro LED, benötigt man den Lichtstrom von 2,7 LEDs, also drei LEDs.

Einzukalkulierende Verlustmechanismen

- **Fresnelverluste** (Faustregel: 4% pro Ein-/Austritt in/aus Medium)
- **Transmissionsverluste** im Material
- **Streuverluste** innerhalb des Materials
- Streuverluste aufgrund der Beschaffenheit der Oberflächen
- Lichtstromrückgang durch Erwärmung der LED