Auslegung von TIR Optiken für ausgedehnte Lichtquellen

Dr. Florian Hudelist
DIOPTIC GmbH
19.10.2016

13. Treffen des Arbeitskreises
LED Beleuchtungstechnik

Inhalt

1. Problemstellung
2. Maßberechnungsalgorithmus für Punktquellen
3. Effekte von ausgedehnten Quellen
4. Optimierung einer TIR Optik auf ausgedehnte Lichtquellen
5. Auftretende Störeffekte
6. Weiterführende Beispiele

Fragestellung der Beleuchtungsoptik

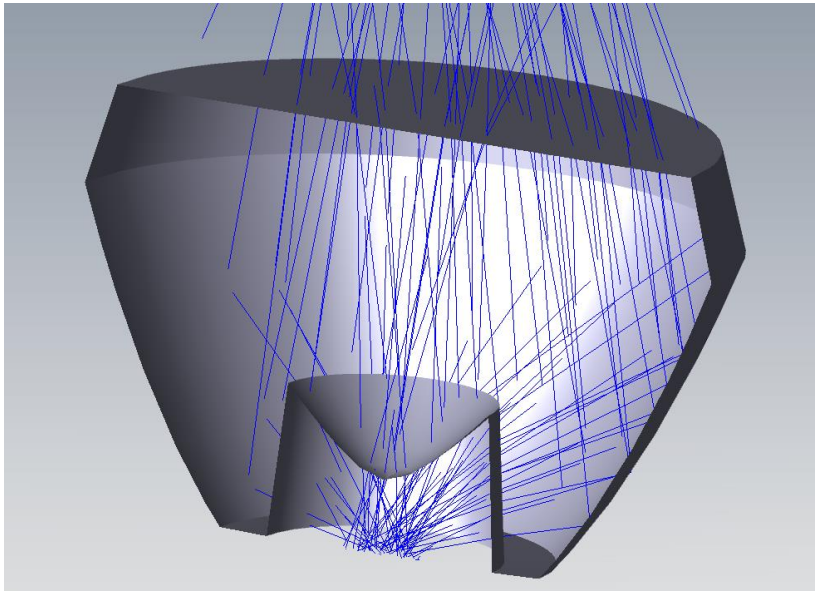
Lehrbuch:

Wie lenke ich Licht von einer Lichtquelle auf eine Fläche mit einer bestimmten Helligkeitsverteilung?

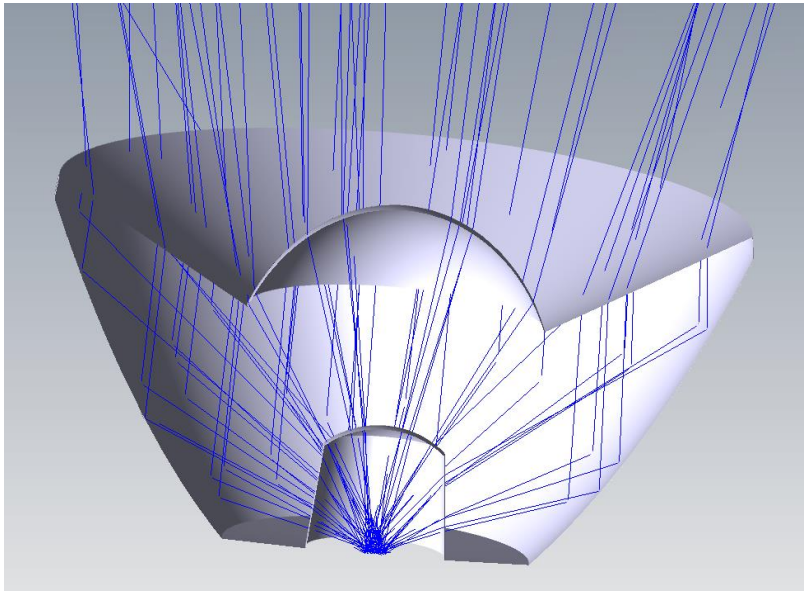
Problem in der Realität:

Wie lenke ich **alles Licht** einer LED mit **ausgedehntem Chip** auf eine **kleine Fläche** mittels einer möglichst **kleinen Optik** die im Spritzguss **fertigbar** ist

Beispiele von TIR Optiken

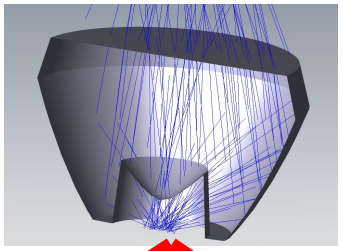


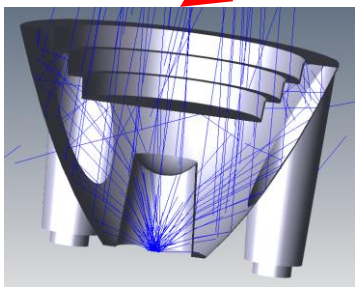
TIR Modul mit flacher Lichtaustrittsfläche



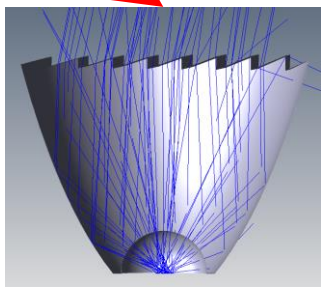
TIR Modul mit optisch aktiver Lichtaustrittsfläche

Vor- und Nachteile der Kollimatorgeometrien

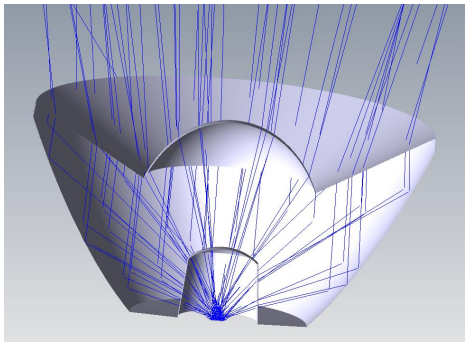




Optimiert für Spritzguss



Strukturen auf Austrittsfläche, z.B. Fresnel für off-axis Projektion



- Im Mittelteil des Kollimators verteilt sich die Brechkraft auf zwei Oberflächen
- Größere Mittellinse besser für starke Fokussierung
- Volumenverteilung ggf. besser für Spritzguss

TIR Design

- Ein TIR Kollimator besteht aus einer Linse im Mittelteil und einem auf Totalreflexion basierenden Außenteil
  ➔ 100% Lichtsammeleffizienz (- Fresnelverluste)
- Der Innen- und Außenteil dürfen sich nicht gegenseitig stören
- Berechnung basiert auf der Maßberechnungsmethode von Freiformoptiken für Punktquellen von André Domhardt (Dissertation 2013)
- Vorgehen:
  1. Berechne welcher Strahl der Lichtquelle auf welchen Punkt in der Detektorebene treffen soll
  2. Berechne den TIR Teil des Kollimators sowie die innere Linse, basierend auf der im ersten Schritt berechneten Strahlzuordung
  3. Erzeuge ein CAD Modell des Kollimators

Maßberechnungsmethode

1. Strahlzuordnung:

$$\iint_0^{\phi^*,\theta^*} I(\theta,\phi)d\Omega = \int_0^{r^*} E(r)dr$$

$$\frac{du}{d\theta} = \frac{I(\theta)\cdot\sin(\theta)}{E_d(r)\cdot r}$$

➔ Lichtflusserhaltung: Der Abgestrahlte Lichtfluss entspricht dem Lichtfluss auf dem Detektor

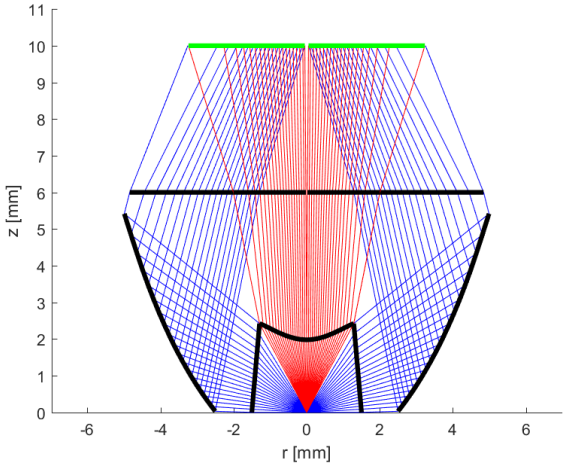
2. Berechnung der Freiformoberfläche:

$$\vec{n}(\theta)\cdot\frac{dK_{opt(\theta)}}{d\theta} = 0$$

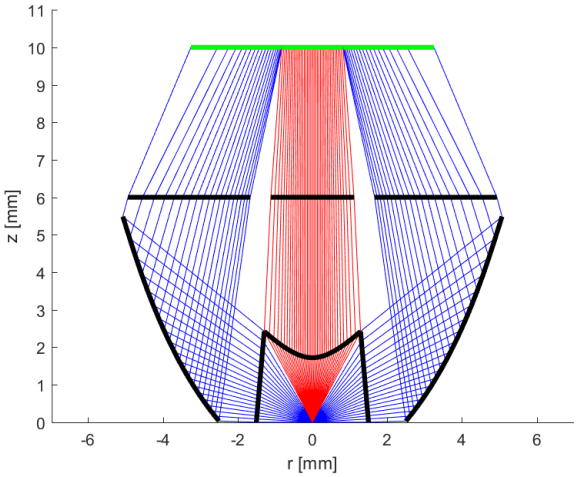
$$\frac{dr}{d\theta} = -\frac{\vec{n}_{opt}(\theta)}{\vec{n}_{opt}\cdot\vec{q}(\theta)}\cdot\left(\vec{r}\cdot\frac{d\vec{q}}{d\theta}+\frac{dP_q}{d\theta}\right)$$

➔ Der Normalenvektor ist immer senkrecht zur Oberfläche

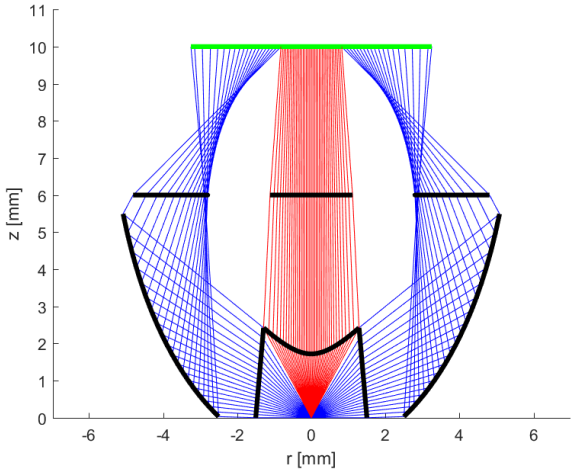
Strategien für das Raymapping



Beide Kollimatorteile erzeugen den gesamten Spot



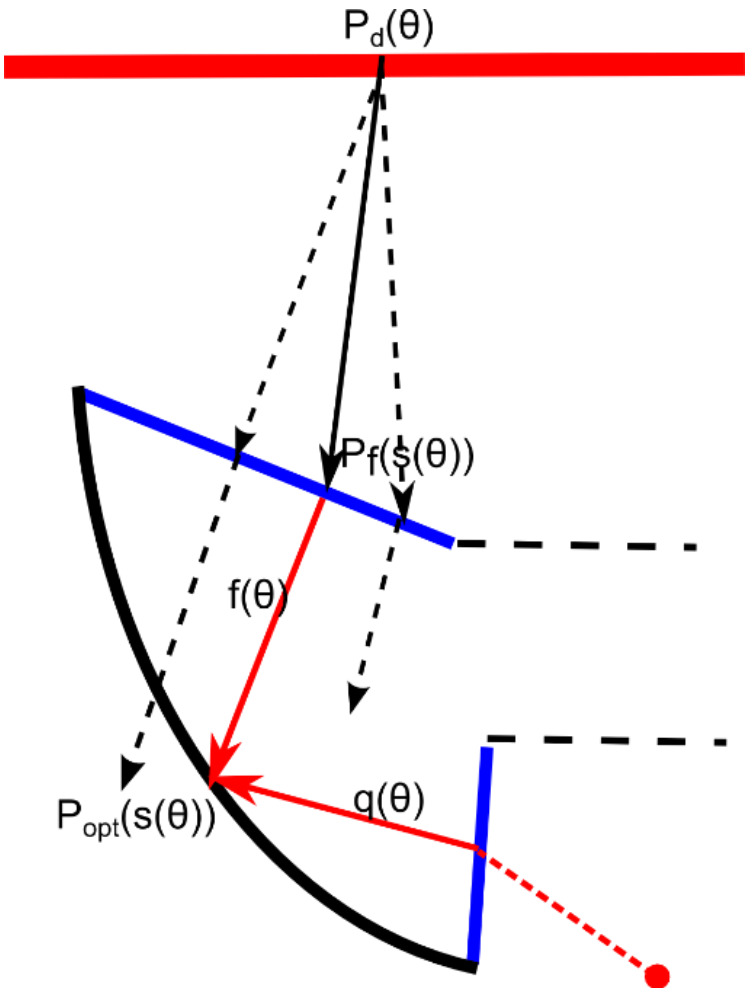
Ring und Kreisscheibe



Strahlen des äußeren Teils kreuzen sich

Skizze zur Veranschaulichung der DGL Lösung

- In jedem Schritt der DGL Lösung ist der Punkt $P_{opt}(\theta)$ bekannt (festgelegt durch die Randbedingung im ersten Schritt)
- Innerhalb der DGL wird der zugehörige Normalenvektor gesucht
- Damit kann nun $\frac{dr}{d\theta}$ berechnet werden woraus der Punkt der Freiformfläche für den nächsten Punkt berechnet werden kann



Ausgedehnte Quellen

- Der hier vorgestellte Algorithmus beruht auf der Annahme einer punktförmigen Quelle
- Mit der Maßberechnung einer einzelnen Oberfläche lassen sich die Effekte einer endlich ausgedehnten Quelle nicht direkt kompensieren.
- Auftretende Probleme bei der Einführung einer realen Lichtquelle:
  1. Je größer die Lichtquelle, desto geringer die erreichbare Kantensteilheit
  2. Aufgrund der Étendueerhaltung kann das Licht nicht beliebig stark fokussiert werden
  3. Quadratische Chips, Bondingdrähte etc. brechen die Rotationssymmetrie

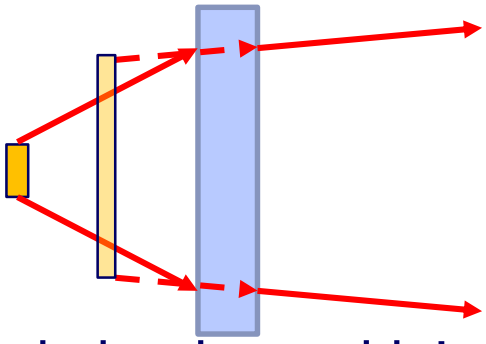
Étendue von Ausgedehnten Quellen

- Die Etendue einer Lichtquelle berechnet sich durch:

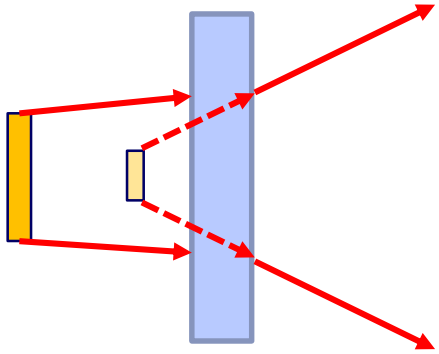
$$E = \iint I(\theta, x, y)\, n^2\, dA \cos(\theta)\, d\omega$$

- Die Etendue kann verstanden werden als das **Produkt aus der numerischen Apertur NA und der Spotgröße**
- Die Etendue ist eine **Erhaltungsgröße**, sie kann nicht verkleinert werden

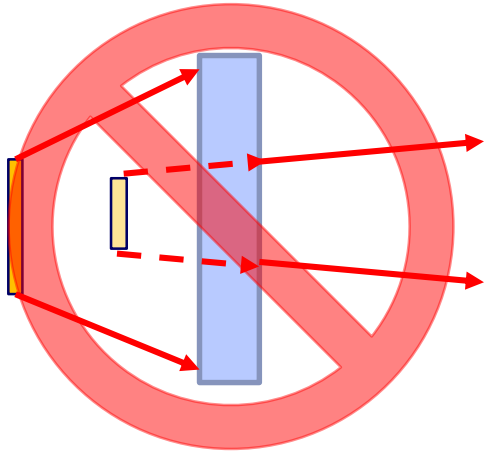
➔ In einer **verlustfreien** Optik können nicht Winkelspektrum und Spotgröße gleichzeitig verkleinert werden



Winkelspektrum kleiner,
Effektive Quelle größer

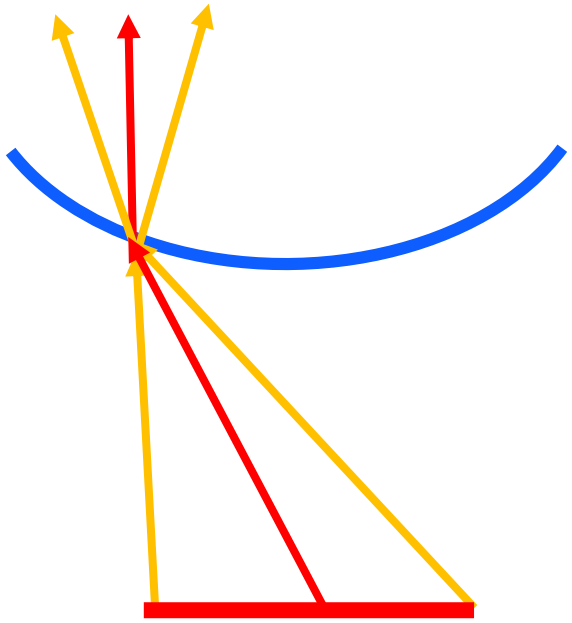


Winkelspektrum größer,
Effektive Quelle kleiner



Problem: Auftreffwinkel wird ein Winkelspektrum

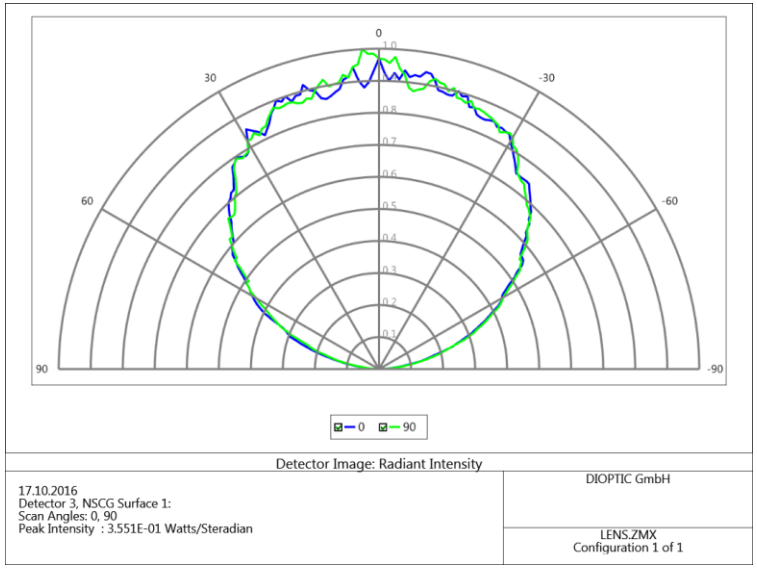
- An jedem Punkt der Oberfläche treffen Strahlen aus unterschiedlichen Richtungen auf
- Es ist nicht möglich, mit einer Oberfläche alle Strahlen in die gewünschte Richtung zu lenken

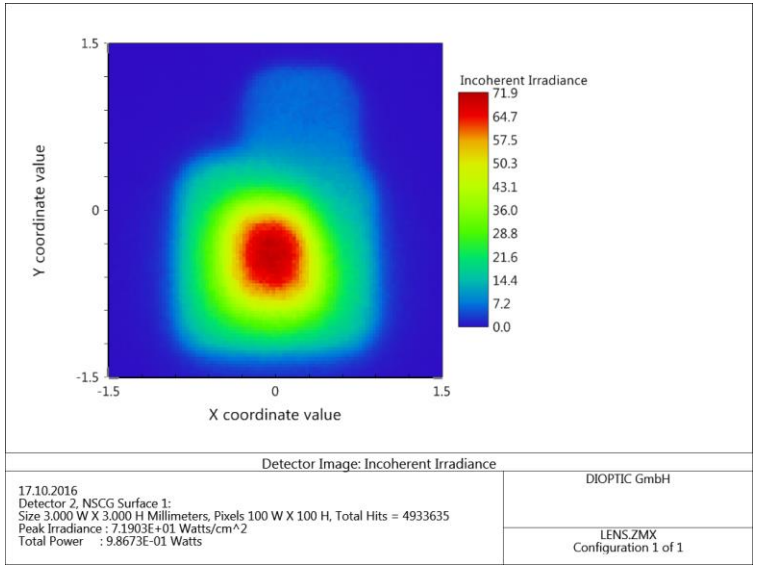


➔ Scharfe Konturen und Intensitätsflanken werden unscharf

Möglicher Lösungsansatz: Simultane Berechnung von 2 Oberflächen (SMS Methode)

Beispiel: OSRAM KW DLMS31





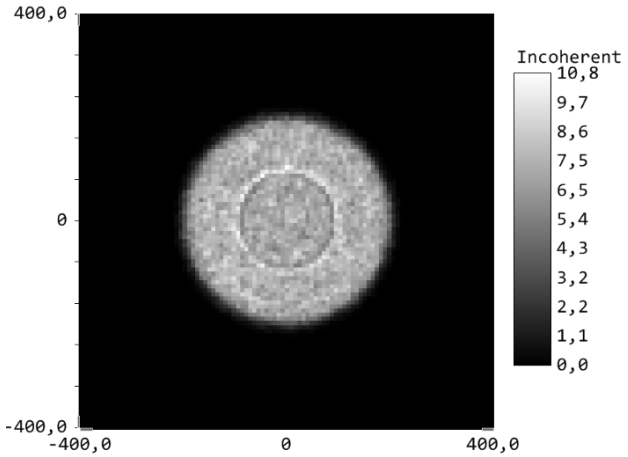
- Abstrahlcharakteristik ähnlich wie Lambert Strahler. Kann genau so im Design berücksichtigt werden
- Licht emittierende Fläche asymmetrisch und leicht rechteckig
  ➔ Für eine korrekte Optimierung müssen Nahfelddaten der LED vorhanden sein

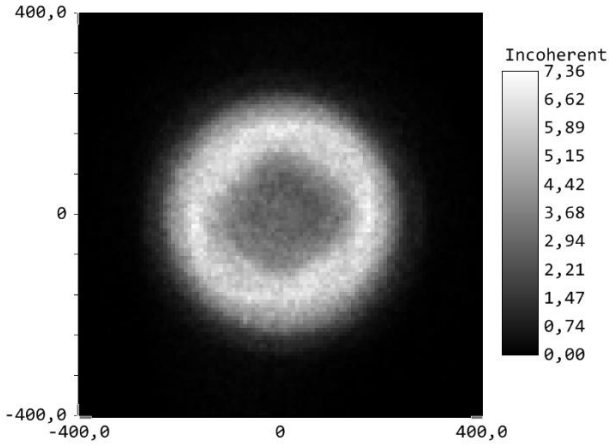
Was ist das Problem mit ausgedehnten Quellen?

Punktquelle

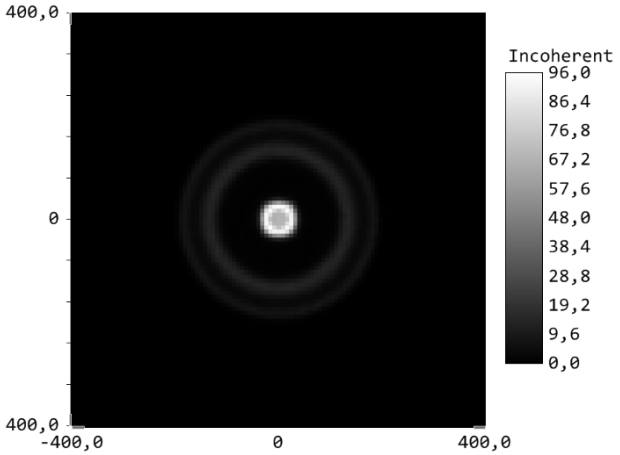
LED Quelle

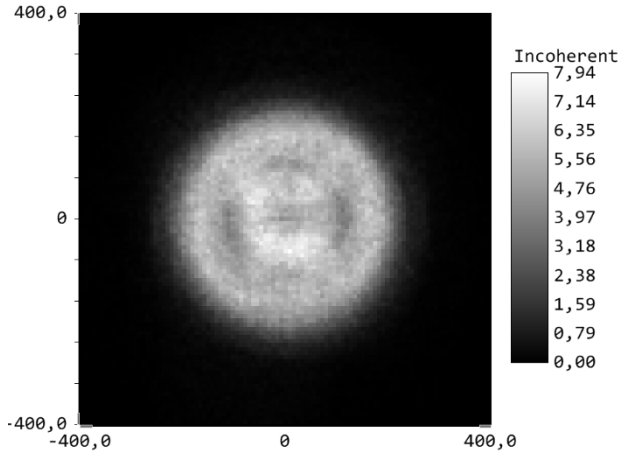
Optimierung für Punktquelle





Optimierung für LED





Optimierung für ausgedehnte Quellen

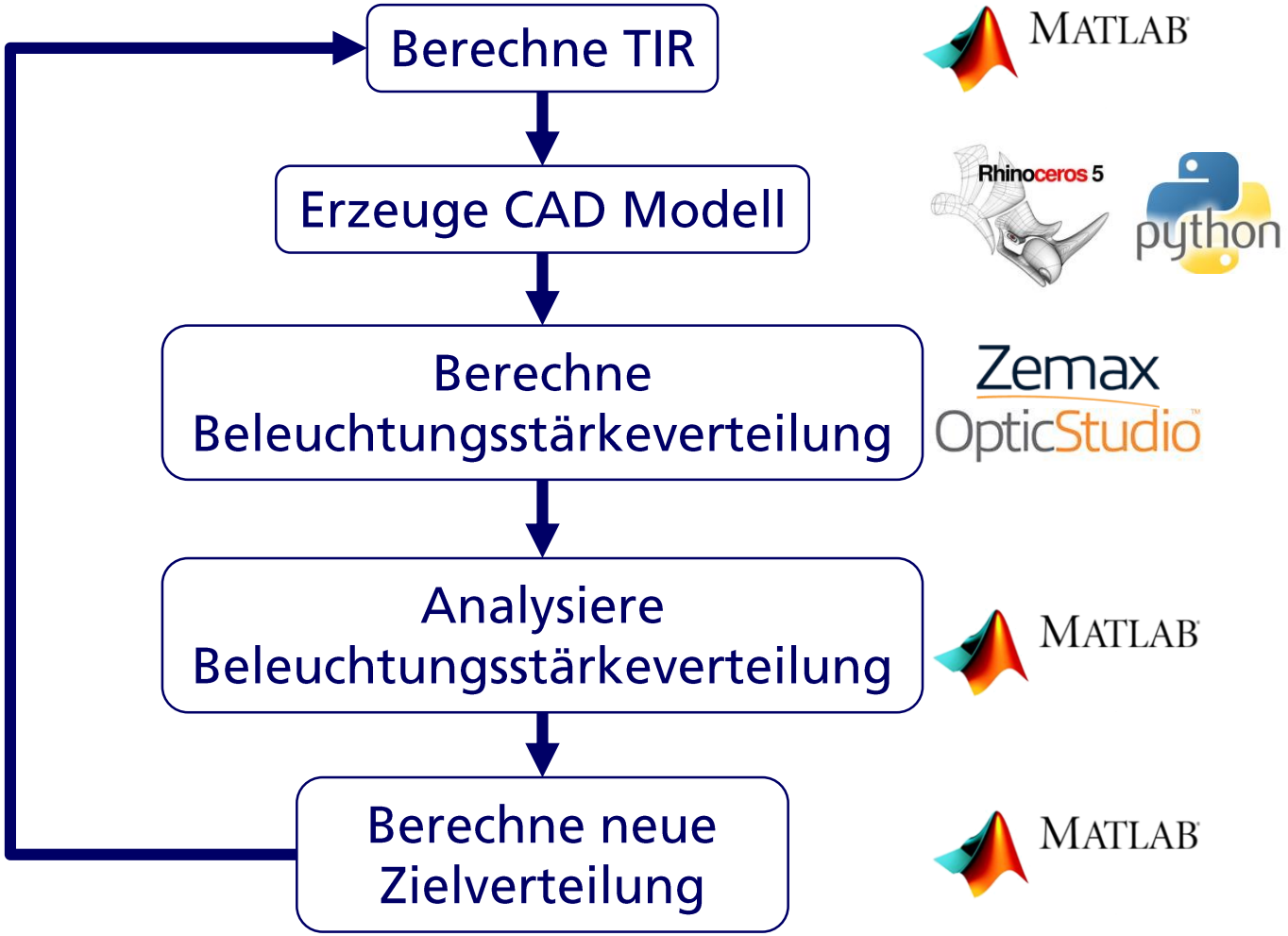
- Die Optimierung eines TIR Kollimators auf eine ausgedehnte, reale Quelle erfolgt mittels eines iterativen Prozesses in dem die Zielverteilung angepasst wird

- Eine einfache aber effektive Methode um die Zielverteilung zu optimieren:

$$I_{target}^{n+1} = I_{target}^{n} \cdot \left[\frac{I_{target}^{0}}{I_{simulated}^{n}} \right]^{2}$$

➔ Dort wo es zu dunkel ist, wird die Zielintensität erhöht, dort wo es zu hell ist, wird die Zielintensität verringert

Umsetzung der Optimierung bei DIOPTIC



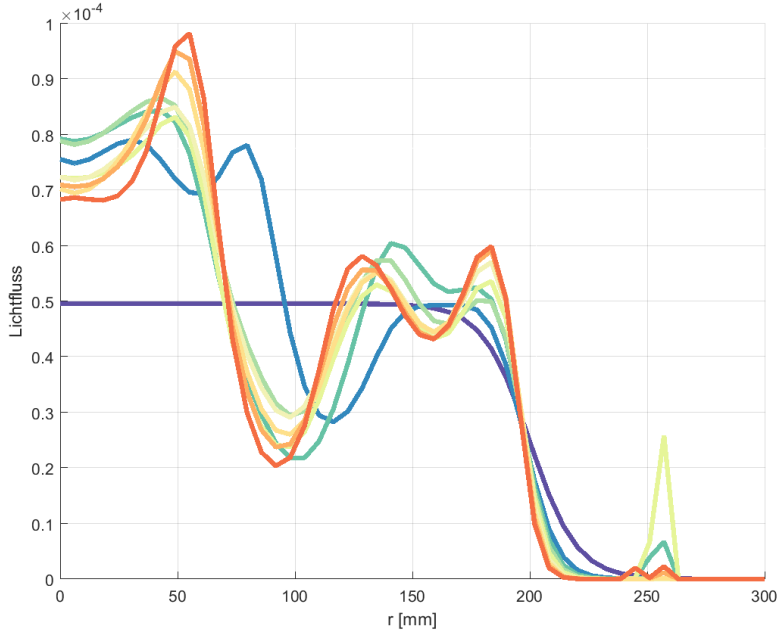
Beispiel einer Optimierung für eine reale LED 1/2

Es soll ein Kollimator mit folgenden Parametern ausgelegt werden:

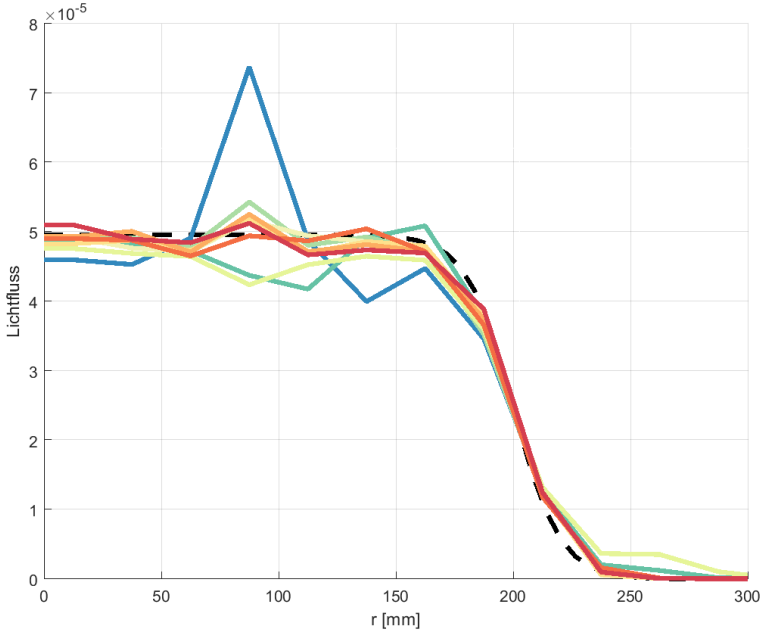
- Spotentfernung bei 750 mm
- Flat Top mit Radius 200 mm
- Chip: 1mm x 1mm Lambert Emitter
- Größe des Kollimators < 30 mm

Beispiel einer Optimierung 2/2

Vorgegebene Zielverteilung

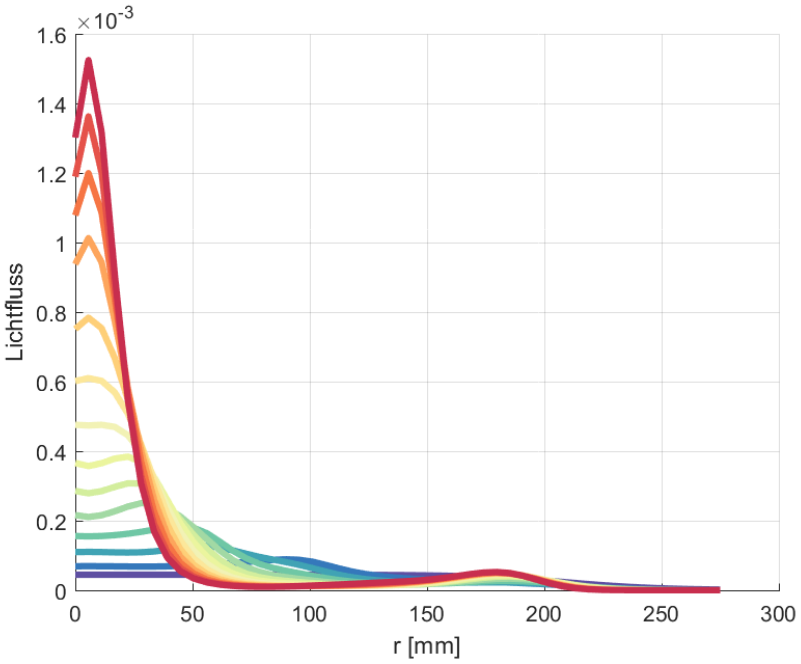


Simulierte Zielverteilung

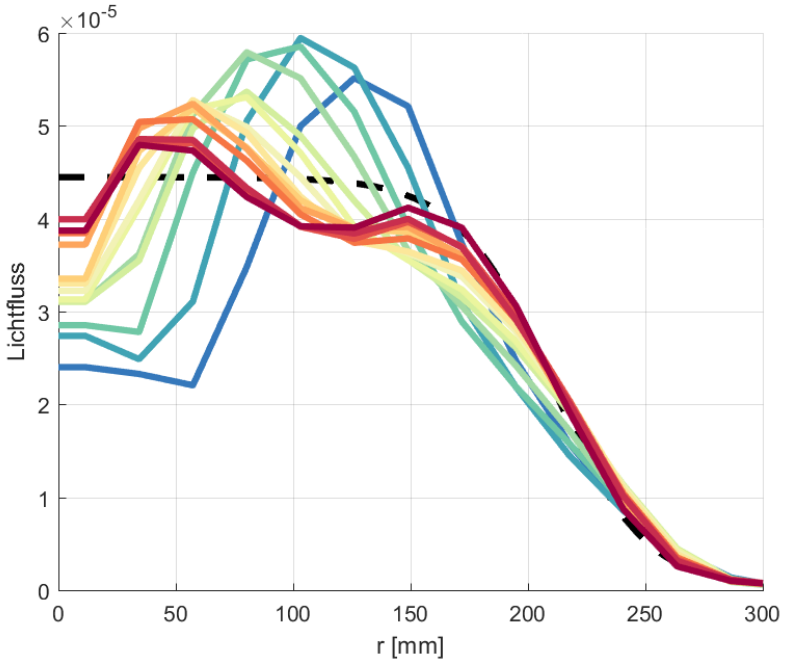


Optimierung für einen Chip mit 2 mm Kantenlänge

Vorgegebene Zielverteilung



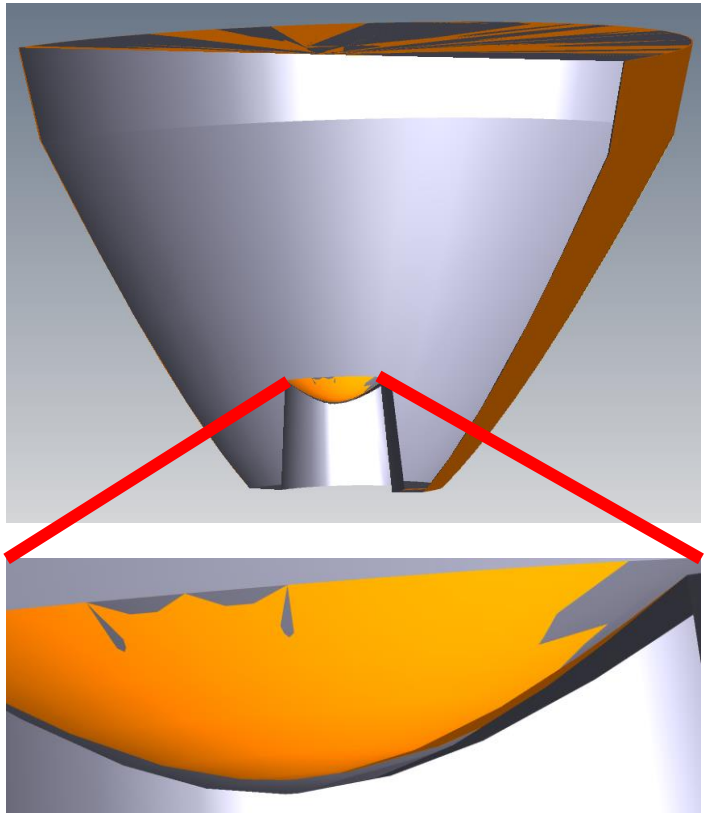
Simulierte Zielverteilung



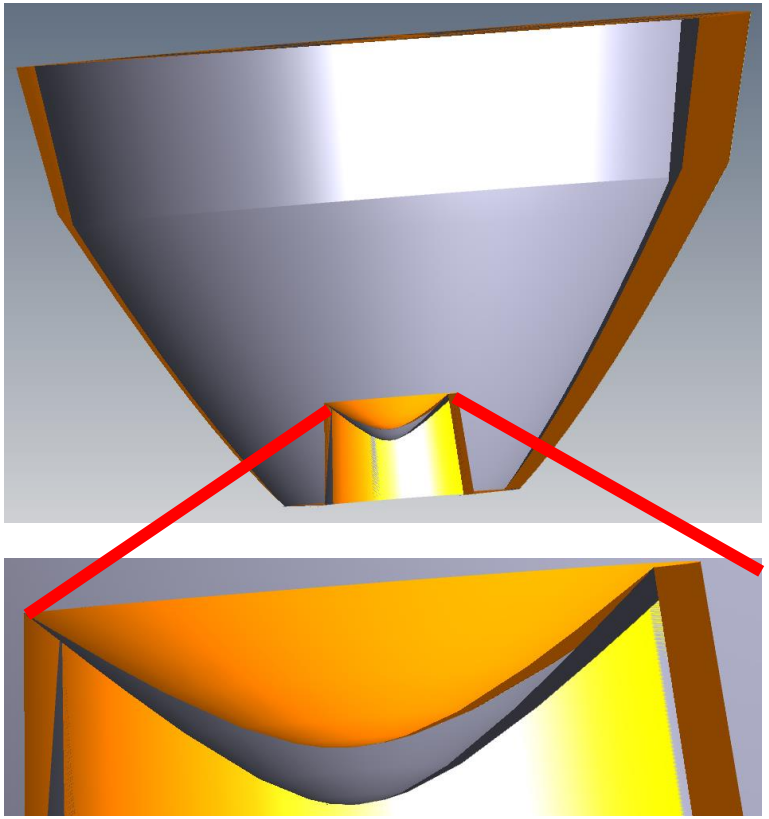
➔ Je größer der LED Chip, desto schwieriger das Erreichen der Zielbeleuchtungsverteilung

Vergleich Startsystem und optimiertes System

Chipgröße 1 mm x 1 mm



Chipgröße 2 mm x 2 mm

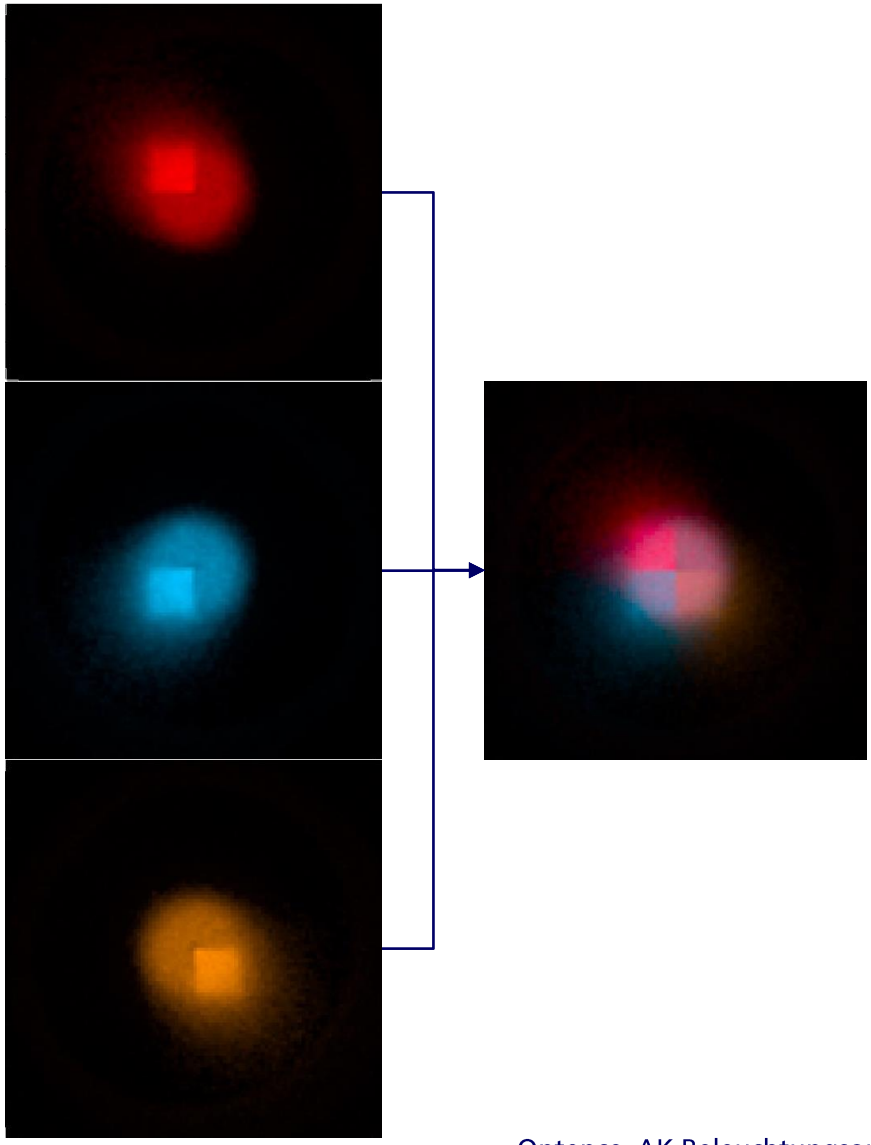


Auftretende Probleme beim Design einer TIR Optik

1. Abbildung des Chips durch zu starke Fokussierung
2. Sekundäre Strahlwege
3. …

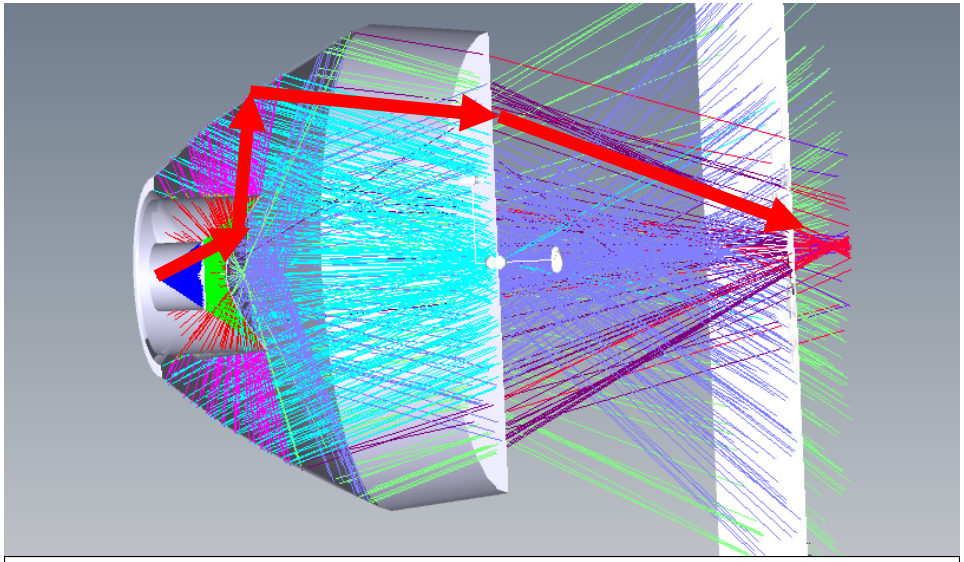
Abbildung des LED Chips und Farbmischung

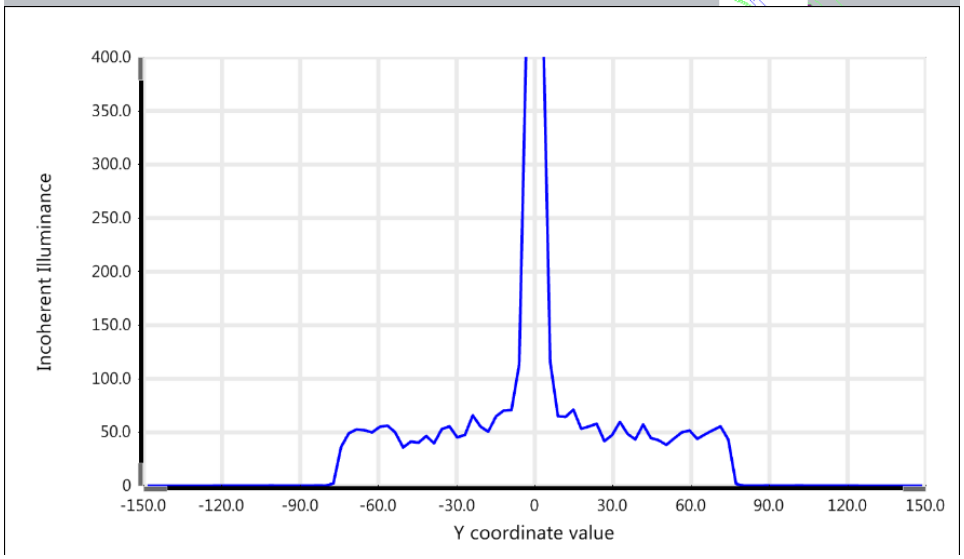
- Bei einer starken Fokussierung entsteht eine Abbildung des LED Chips
- In diesem Fall werden die einzelnen Farben unzureichend gemischt
- Mögliche Lösungen:
  - Größerer Kollimator
  - Mehrere Kollimatoren dir zueinander rotiert sind
  - Lichtmischstab vor die LED Chips



Zusätzlicher, nicht mit einberechneter Strahlpfad

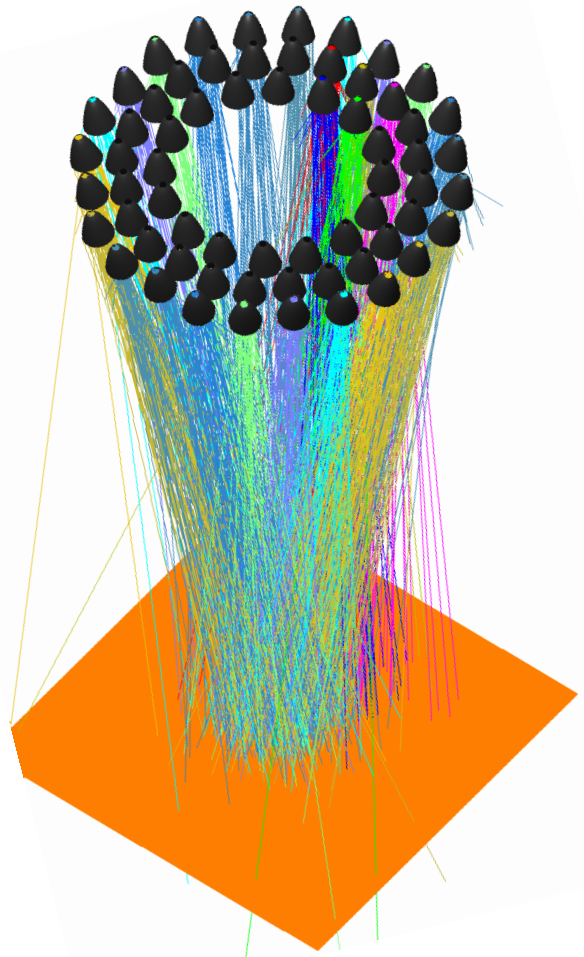
- Strahlen werden an der Linse reflektiert und gehen in den TIR Teil
- Im schlimmsten Fall entsteht ein zusätzlicher Fokuspunkt oder ein heller Ring
- Mögliche Lösungen:
  - TIR Optik ohne flache Lichtaustrittsfläche
  - Antireflexbeschichtung
  - Kompensation durch optimierte Zielverteilung





Ringleuchte bestehend aus vielen Einzelkollimatoren

- Für viele Anwendungen werden LED Arrays verwendet um die benötigte Beleuchtungsstärke zu erreichen
- Hierfür werden die Optikmodule automatisch in Zemax geladen, positioniert und ausgerichtet
- Die Optimierung der Kollimatoren erfolgt nun über einen mehrstufigen Prozess
- **Mehr dazu in der Live Demo**



Zusammenfassung

- Eine Berechnungsmethode für TIR Kollimatoren basierend auf Punktquellen wurde eingeführt
- Effekte, die aufgrund von ausgedehnten Quellen auftreten, wurden besprochen
- Die Optimierung von TIR Kollimatoren für ausgedehnte Quellen wurde besprochen und anhand eines Beispiels veranschaulicht

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!