

# Quantitative Analyse von Falschlicht -- Methoden zur Vermeidung von Undersampling

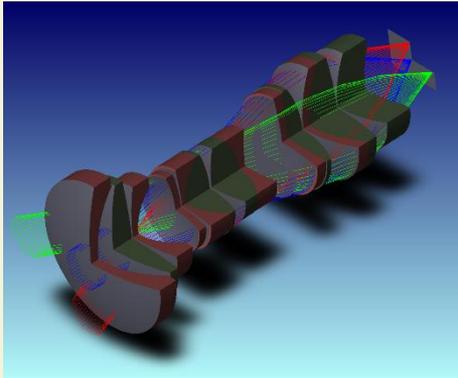
Bernhard Michel, Piotr Sakowicz, Melanie Jahny, Bernd Harand  
Hembach Photonik GmbH

118. Jahrestagung der DGaO in Dresden, 09.06.2017

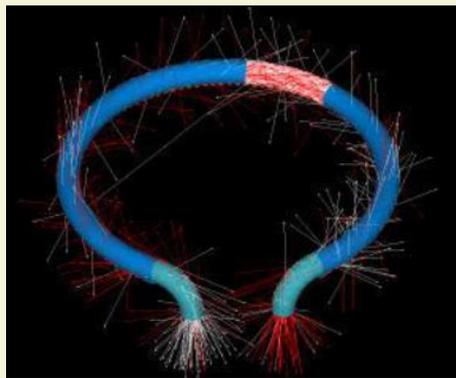
# Hembach Photonik GmbH

## Geschäftsfelder

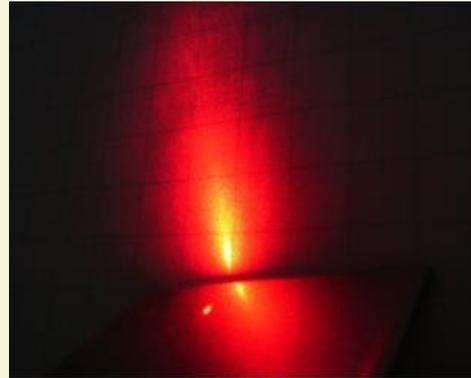
Abbildende Optik



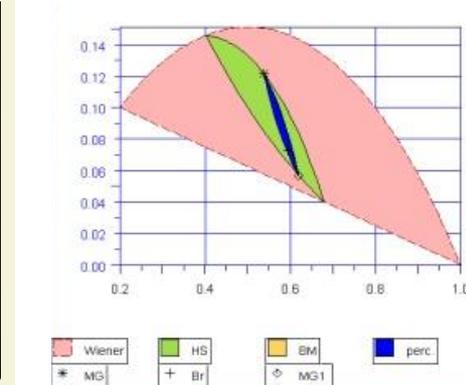
Beleuchtungsoptik



Falschlichtanalyse



Softwareentwicklung

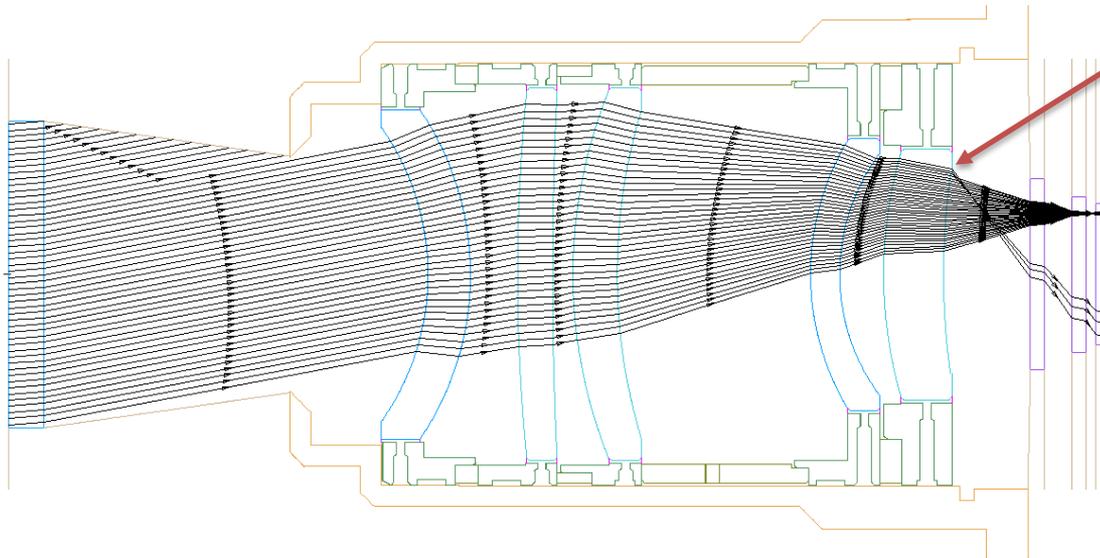


Kleines innovatives Ingenieurbüro in der Nähe von **Nürnberg**  
Zurzeit acht Mitarbeiter: Physiker, Mathematiker, Ingenieure  
Optikdesign & -analyse im Kundenauftrag, Optiksoftware

Hembach **Photonik**

# Falschlicht (=Störlicht)

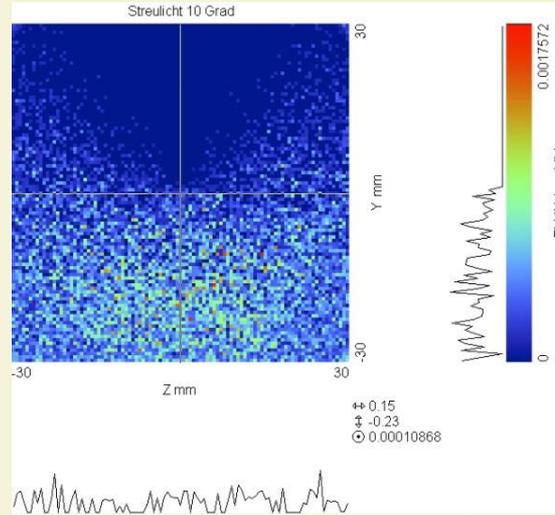
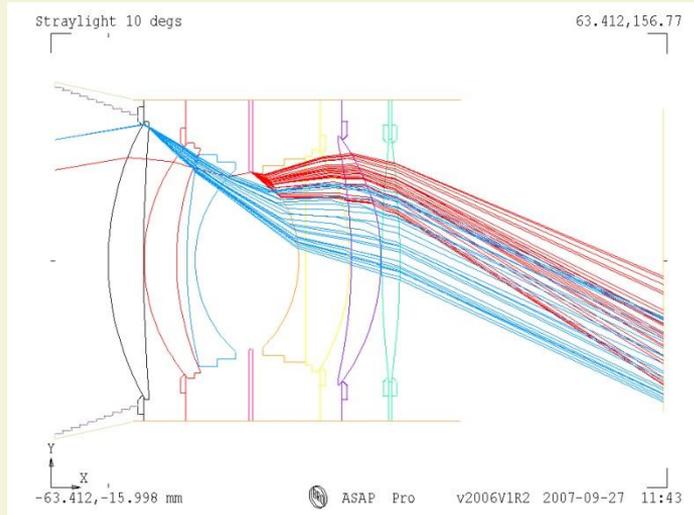
- Falschlicht ist unerwünschtes Licht, das in ein optisches System gelangt, im Gegensatz zum Nominallicht, für das das System ausgelegt wurde.



Typisch für Falschlicht:

- Pfade sind „unwahrscheinlich“
- Nur wenige Strahlen „finden“ die Falschlichtpfade
- => Radiometrische Auswertung ist mit großen Fehlern behaftet!
- Tricks notwendig für Falschlichtanalyse

# Falschlichtursache: Lichtstreuung

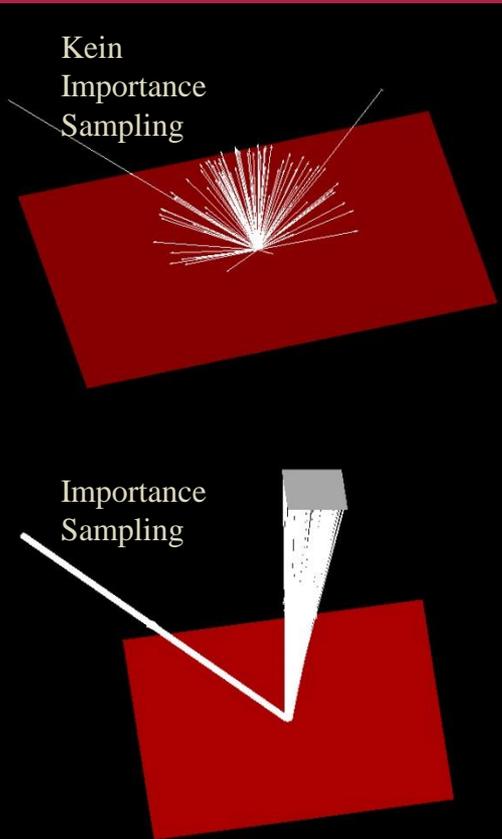


Beispiel:  
Lichtstreuung von Linsen-  
fassung

Liefert meist diffuses Hinter-  
grundsignal in Sensorebene.

Simulation mittels Monte-  
Carlo-Raytracing

# Streulicht & Undersampling

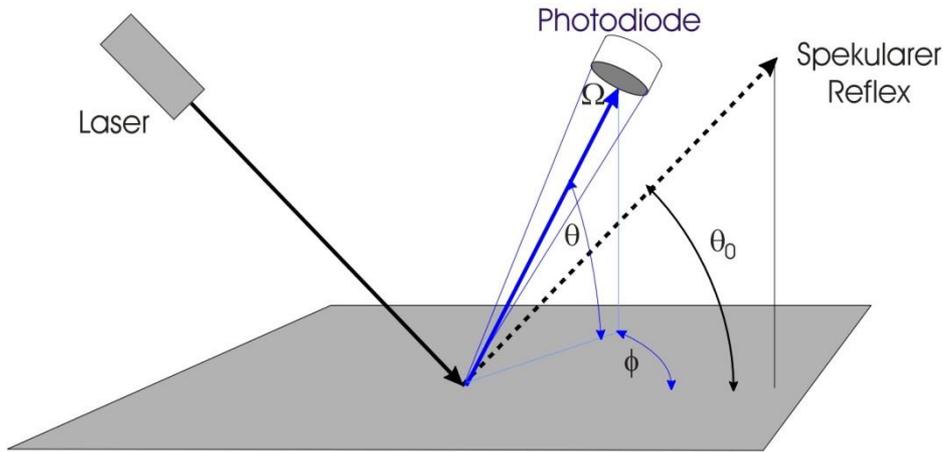


„Brute Force“-Methode: Streuung in alle Richtungen mit vielen Sekundärstrahlen. Führt fast immer zu Undersampling-Problemen, da nur die wenigsten Strahlen die Sensorebene treffen!

Importance Sampling: erzeuge nur Strahlen, die in vorgegebene Richtungen gehen (zum Beispiel auf ein Objekt zu oder dessen Bild); Löst viele, aber nicht alle Undersampling-Probleme

... aber es gibt noch ein anderes Undersampling-Problem, das mit der BSDF zusammenhängt ...

# Lichtstreuung von einer Oberfläche– die BSDF (Bi-directional Scatter Distribution Function)



Prinzipieller Messaufbau

Beschreibt Lichtstreuung in Abhängigkeit vom Einfalls- und Streuwinkel

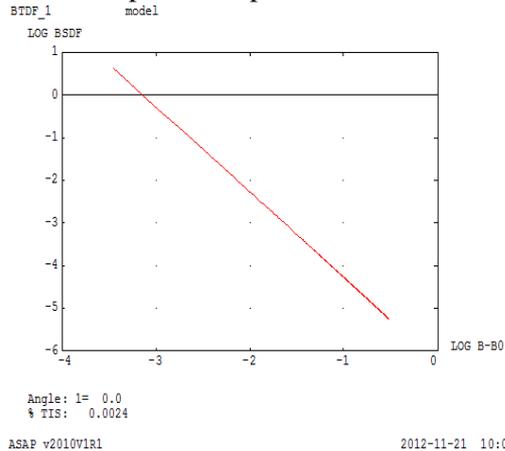
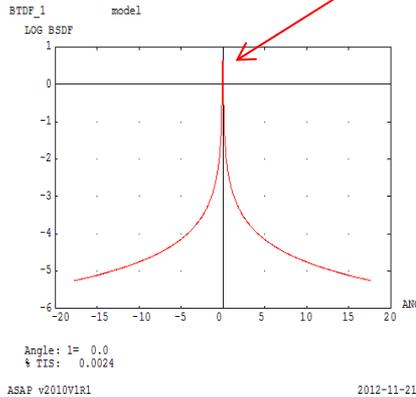
Bei Reflexion: BRDF  
bi-directional reflectance distribution function

Bei Transmission: BTDF  
bi-directional transmittance distribution function

Oft starke Überhöhung der Streuung nahe der spekularen Richtung.

# BSDF – Oberflächenrauigkeit

Extrem scharfe Spitze um spekularen Reflex



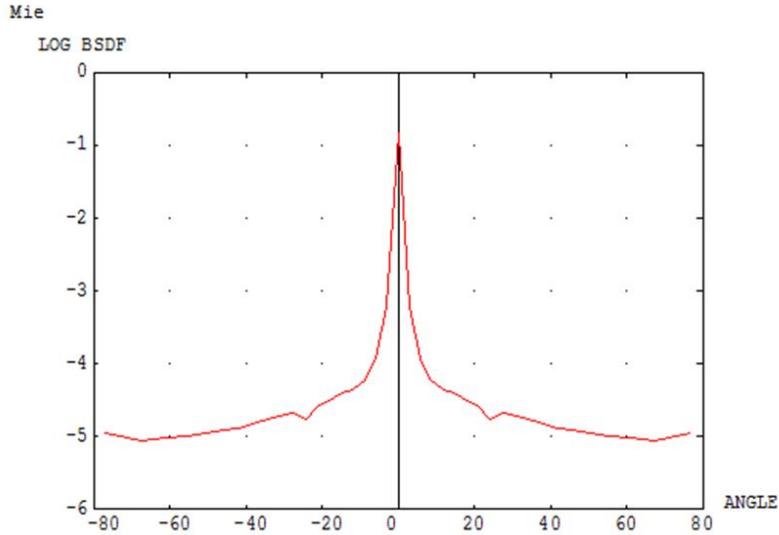
BTDF für senkrechten Einfall,  
Logarithmisch skaliert;  
Variation über 8 Größenordnungen!

Doppelt logarithmische Darstellung  
Log BTDF als Funktion von  
Log Streuwinkel (in rad)

-3 entspricht  $0.057^\circ$

- Optische Quarzoberfläche, Wellenlänge  $0.3\mu\text{m}$ , RMS Rauigkeit= $0.5\text{nm}$
- Beachten Sie den Dynamikbereich von ca. 8 Größenordnungen!
- Streuung in einen sehr engen Winkelbereich ( $<1^\circ$ ) um die spekulare Richtung konzentriert

# BSDF – Kontamination mit Partikeln



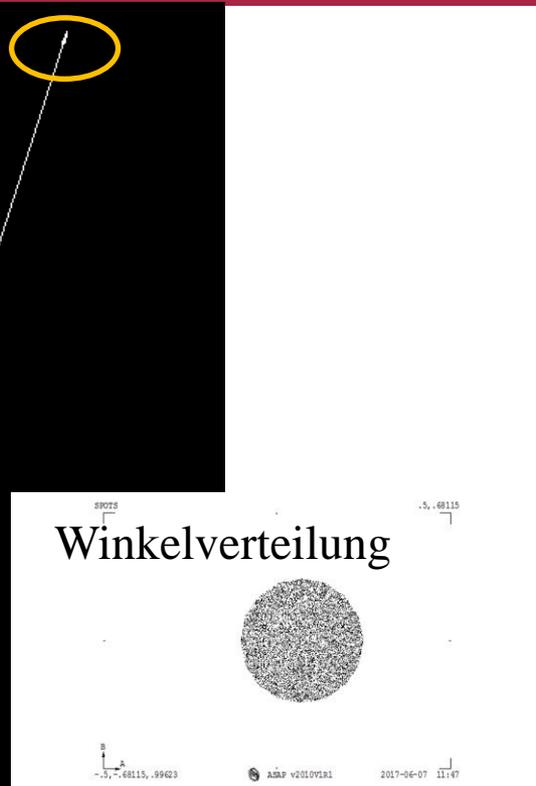
Angle: 1= 0.0  
% TIS: 0.0443

ASAP v2010V1R1

2012-11-21 11:55

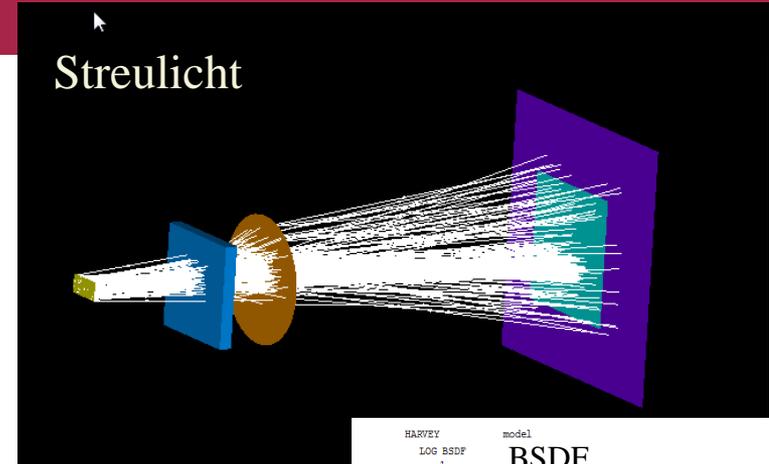
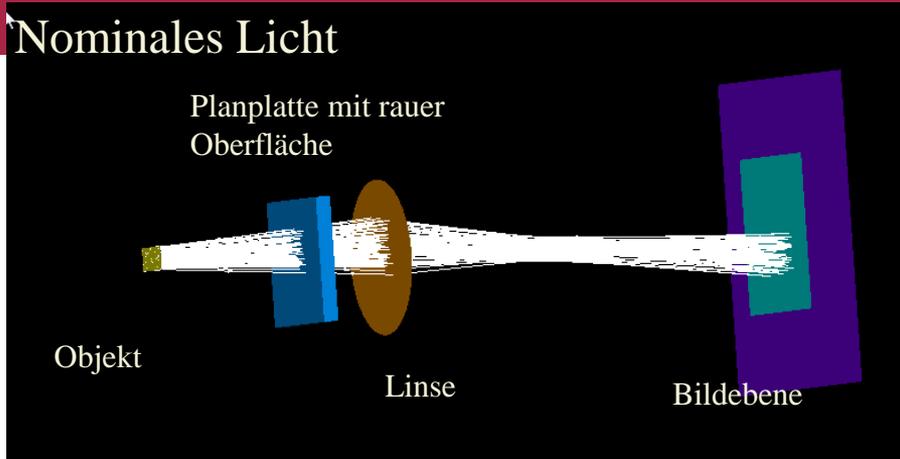
- Mie-Streuung
- Winkelverteilung und Dynamik ähnlich wie bei Rauigkeit
- Je größer die Partikel, desto spitzer ist der Peak um die spekulare Richtung.
- Wie bei Rauigkeit stört Streulicht vor allem für Lichtquellen im Sichtfeld des Instruments (“in-field-stray light”) und erzeugt einen “Halo” um das nominale Licht

# Wie modelliert Optiksoftware die BSDF?

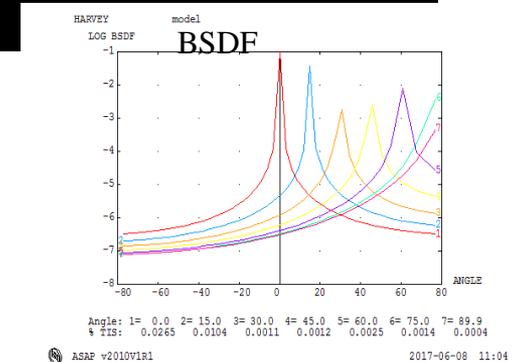


- Für den Vortrag nur relevant: BSDF-Modellierung in Kombination mit Importance Sampling (weil man ohne Letzteres fast nie auskommt!)
- ASAP (und ZEMAX, möglicherweise auch andere):
  - zuerst werden im Winkelraum gleichverteilte Strahlen „gewürfelt“, die in die Importance Richtung zeigen.
  - Danach wird jeder Strahl gemäß der BSDF in gewichtet (so genanntes „Flux weighting“)
- Problem: wenige Strahlen erhalten einen extrem hohen Strahlfluss, entsprechend der Dynamik der BSDF

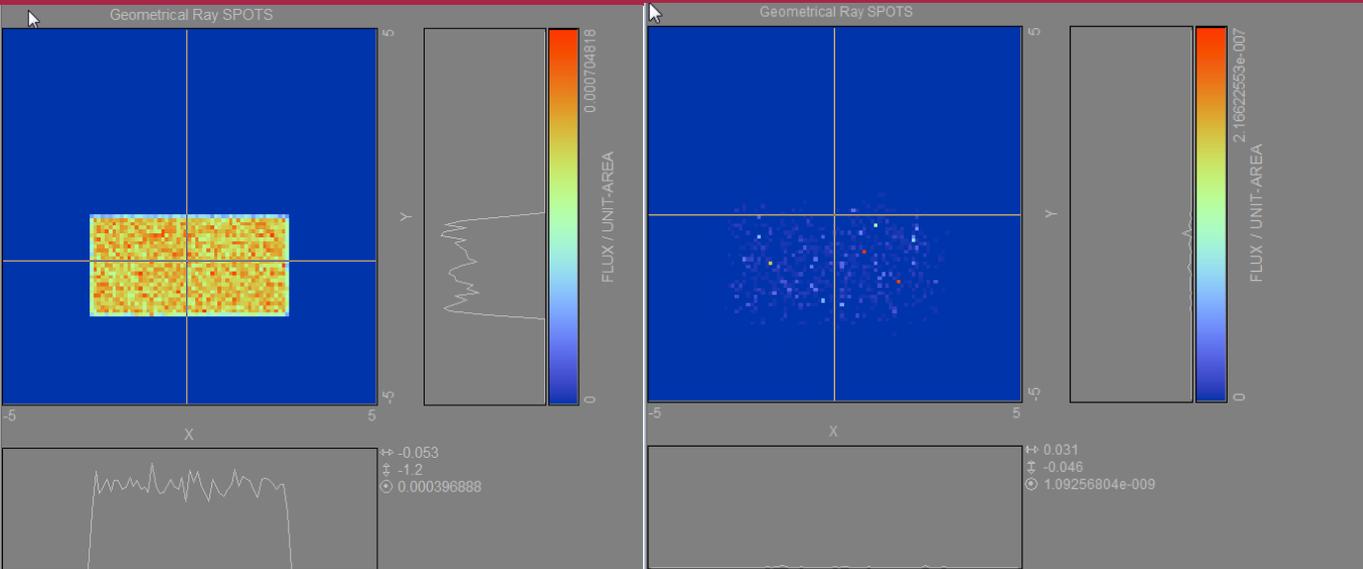
# Beispiel „in-field“-Streuung



Rechteckige Fläche wird durch eine (paraxiale) Linse auf einen Sensor abgebildet. Zwischen Objekt und Linse befindet sich eine raue Fläche.



# Ergebnis



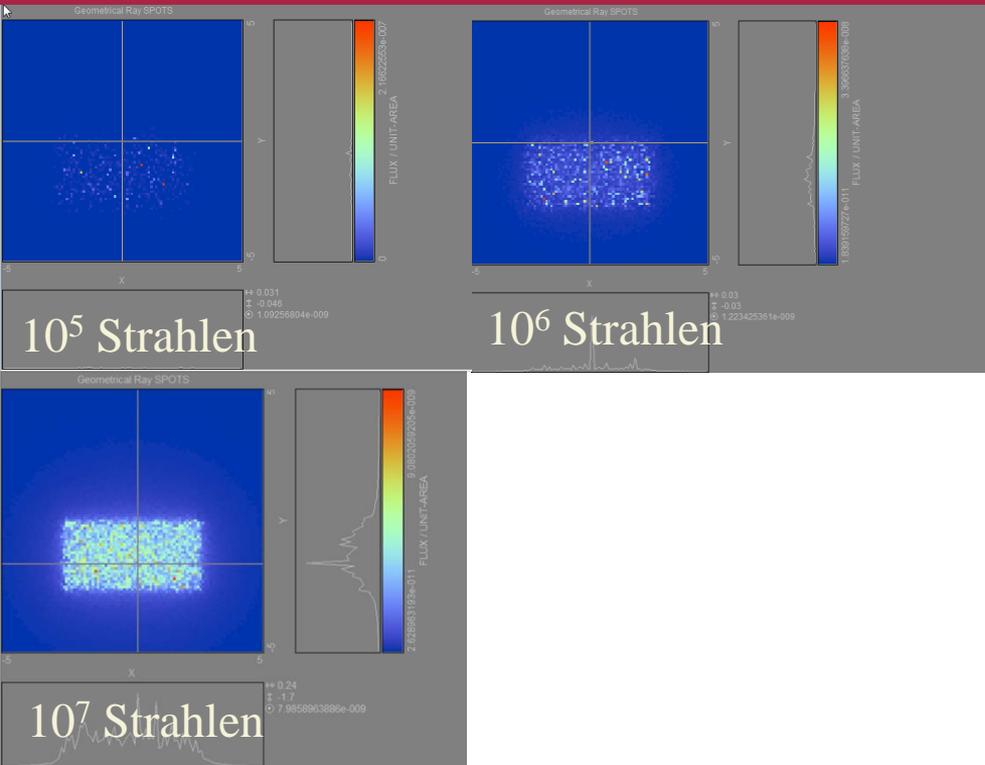
Nominales Licht

Streulicht ( $10^5$  Strahlen)

Bestrahlungsstärke, Insbesondere die maximale Bestrahlungsstärke Streulichts kann nicht sinnvoll ausgewertet da einzelne Strahlen die Verteilung dominieren.

Helfen mehr Strahlen in der Simulation?

# Mehr Strahlen?

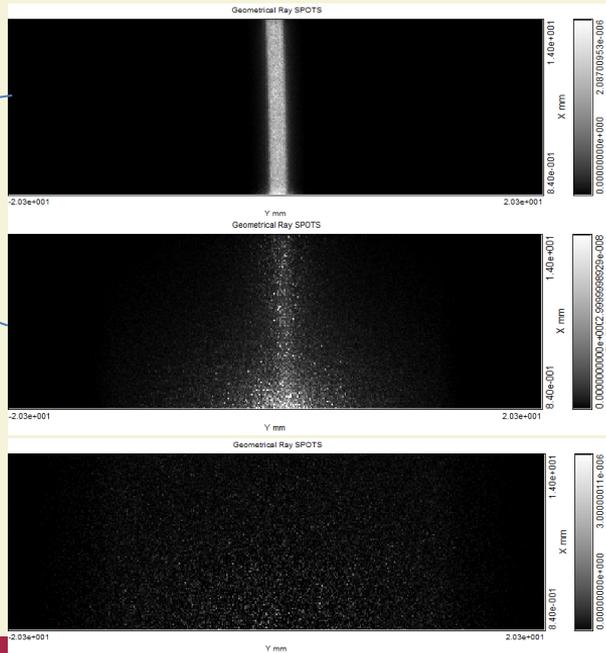
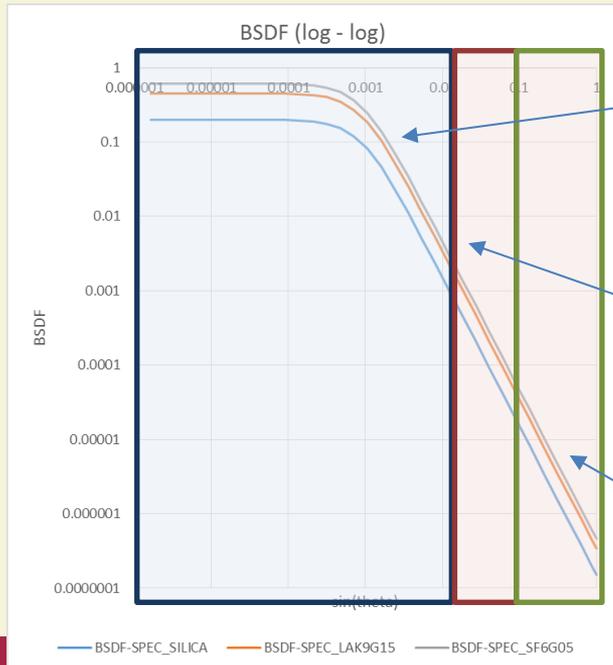


Mehr Strahlen lösen das Problem nicht! Je mehr Strahlen verwendet werden, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass „extreme“ Strahlen mit sehr hohem Fluss auftreten. Eine Stabilisierung des Ergebnisses tritt bei praktisch vertretbaren Strahlenzahlen nicht ein!

=> Wir brauchen eine andere Lösung

# Ansatz 1: Streumodell in Ringe aufteilen und für jeden Ring separat simulieren

- Vorteil: direkt in Software (ASAP) umsetzbar
- Nachteil: funktioniert nur gut für „in-field“-Streulicht

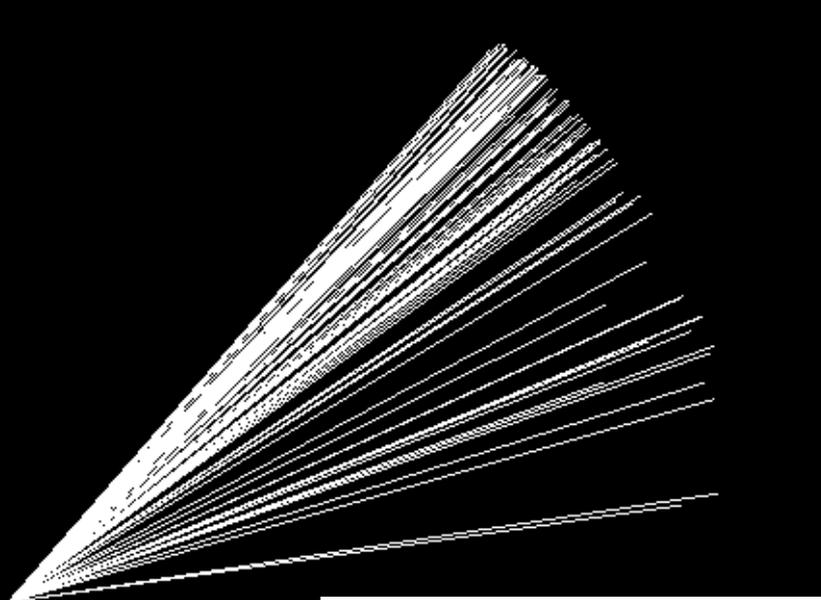


Kleine Winkel 0-0.5°:  
Nahe beim nominalen Licht

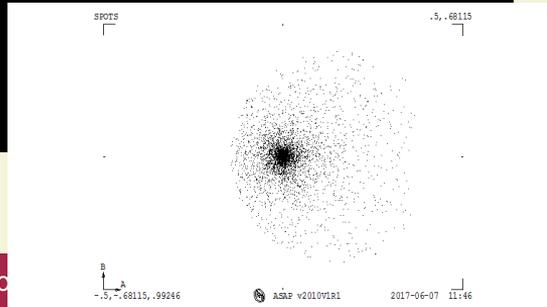
Mittlere Streuwinkel 0.5°-5°:

Große Streuwinkel 5°-180°:

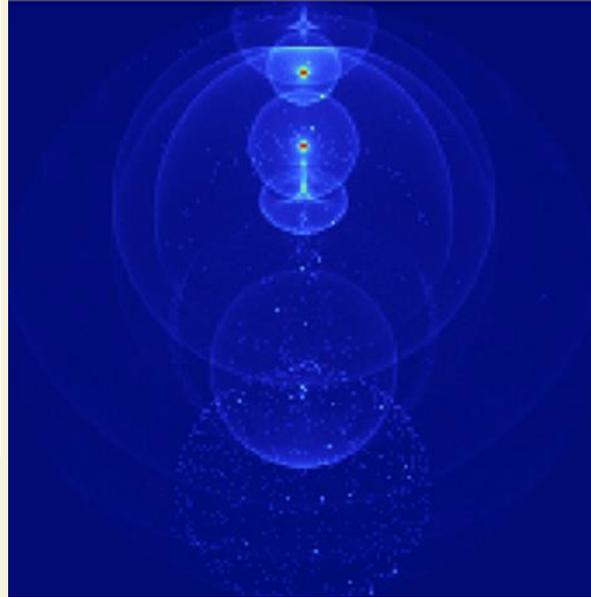
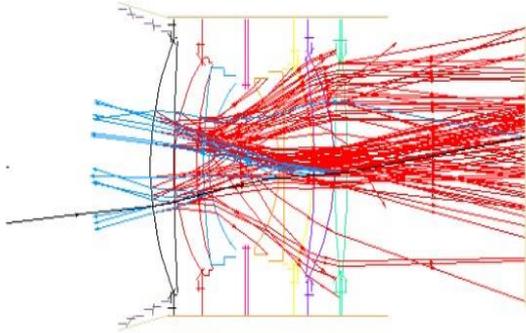
# Ansatz 2: „Ray density weighting“



- Alle Sekundärstrahlen haben ungefähr den gleichen Fluss
- Es werden mehr Strahlen in die Richtungen mit hoher BSDF ausgesendet.
- Vorteil: löst das Problem mit Strahlen mit extremen Fluss
- Nachteil: muss in externer Software implementiert werden.
- Funktioniert (bisher) noch nicht für alle BSDFs
- Effiziente Softwarelösung erfordert trickreiche Implementierung (Kombination verschiedener statistischer Methoden)



# Falschlichtursache: Reflexe (Geister)

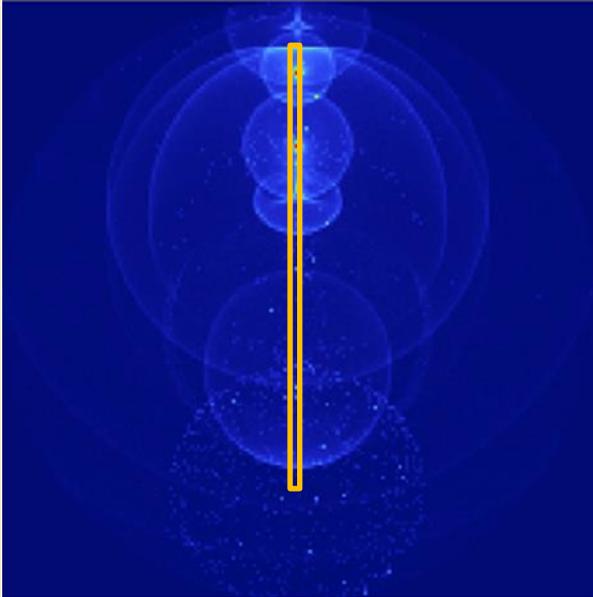


Beispiel:  
Zweifachreflexion von Licht  
an Linsenflächen

Erzeugt of ausgeprägte  
Strukturen mit Hotspots  
in der Sensorebene

Simulation deterministisch;  
das heißt: kein Importance  
Sampling möglich.

# Geisteranalyse



Probleme mit Undersampling ergeben sich zum Beispiel:

- Wenn Geister nur in einem sehr kleinen Bereich der Bildebene ausgewertet werden sollen, beispielsweise dem Spalt eines Spektrometers
- Wenn überhaupt nur wenige Strahlen zur Verfügung stehen, zum Beispiel Geister in Kombination mit Lichtstreuung

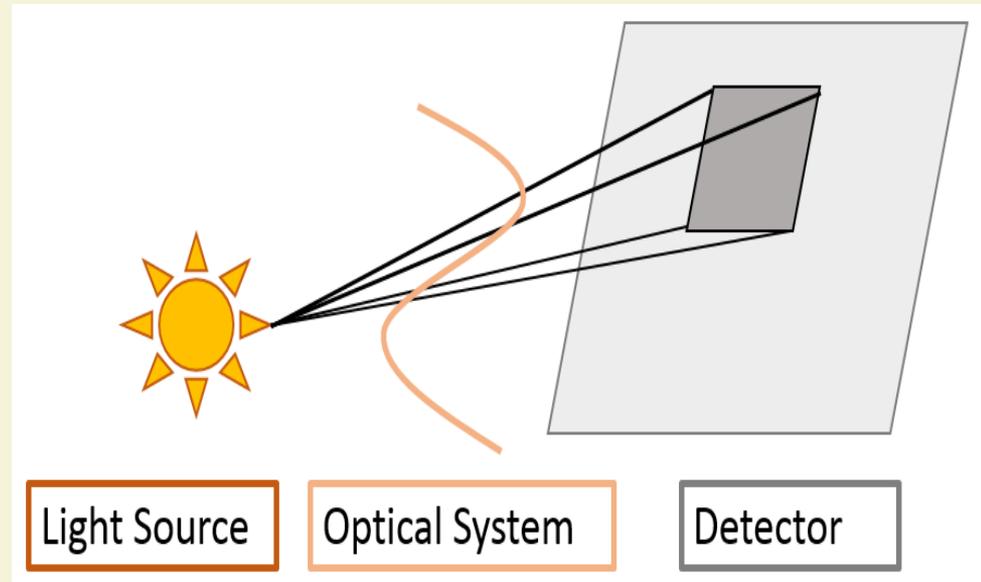
Oft bleiben nur ein paar Strahlen übrig und die Bewertung der Bestrahlungsstärke der Geister ist dann praktisch unmöglich.

# Lösungsansatz: differenzielles Raytracing

Raytracing von infinitesimalen Strahlenbündeln

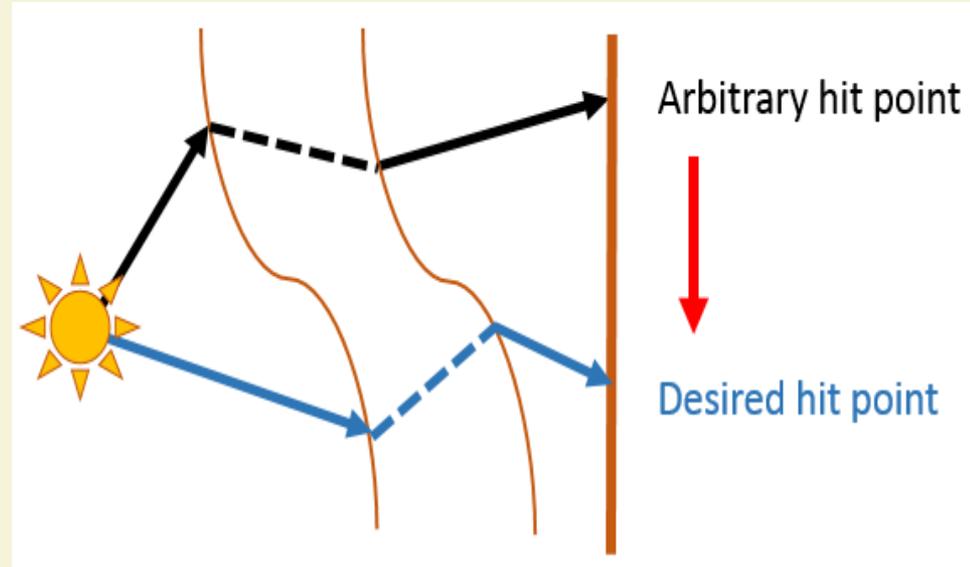
Dies ermöglicht:

- Exakte Radiometrie
- Strahlen auf dem Detektor zu bewegen (Strahlvariation)

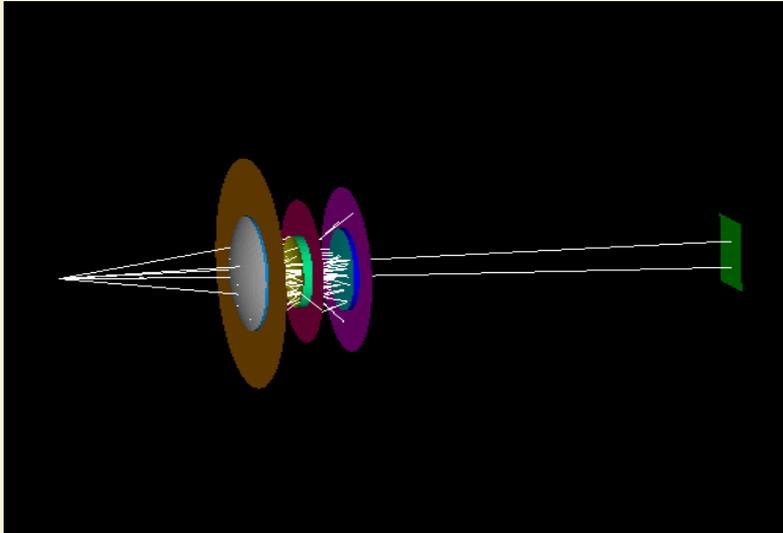


# Strahlvariation

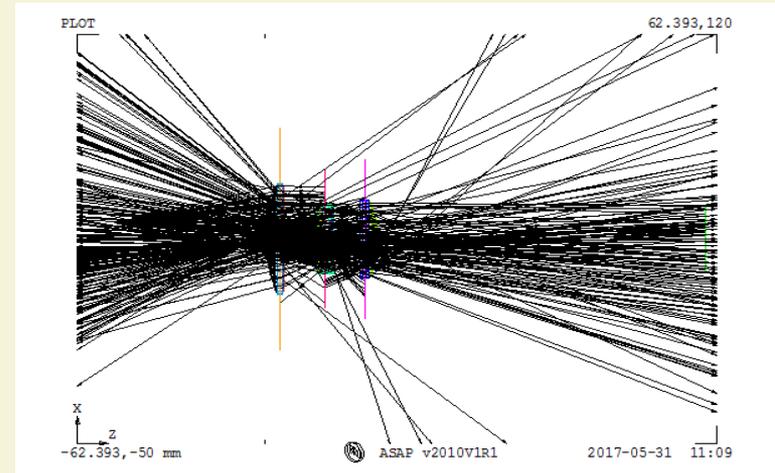
- Strahl kann zu den Punkten auf der Sensorebene bewegt werden, an denen wir uns für eine Auswertung interessieren (zum Beispiel zum Spalt eines Spektrometers)
- Variation verwendet die in den Strahlenbündeln enthaltene differenzielle Information



# Beispiel: Geister in Cooke-Triplet



- der Punktlichtquelle bei  $(5, 0, -40)$
- 100000 Strahlen
- Detektor: 201x201 Pixel



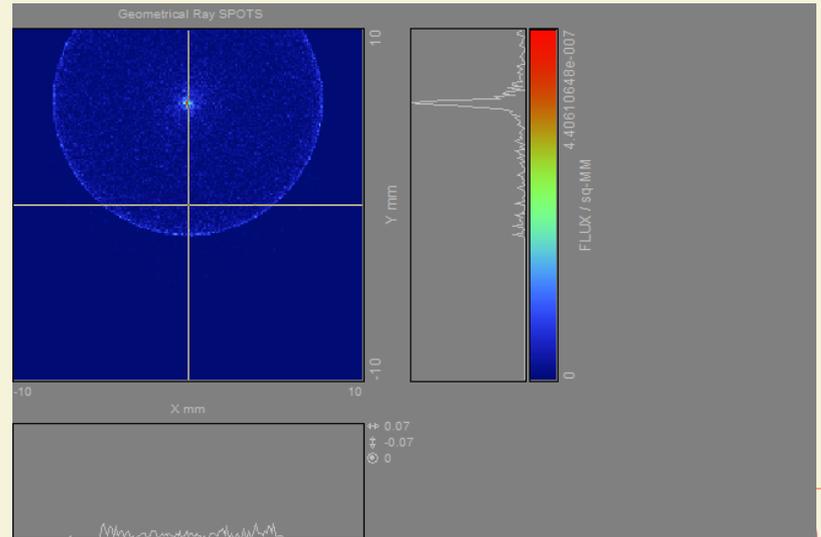
ASAP: Normales Raytracing

# Auswertung in ASAP

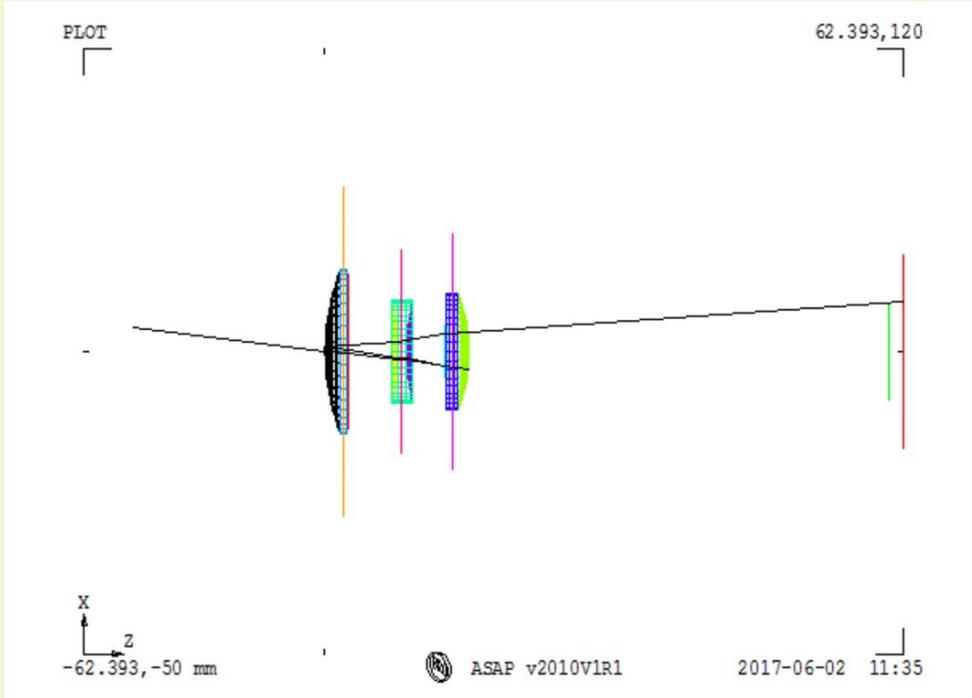
## Strahlenpfade in ASAP

Path	Rays	SumTOTA	Percent	Hits	Curr	Prev	Split/Scatter ...		
3	24725	3.43E-04	35.48	-17	13	10	1.100	10.100	0.000
4	9226	1.94E-04	20.07	-9	13	10	2.100	5.100	0.000
7	5370	1.13E-04	11.68	-9	13	10	6.100	9.100	0.000
15	3476	7.52E-05	7.79	-9	13	10	1.100	2.100	0.000
6	4405	7.40E-05	7.67	-13	13	10	1.100	6.100	0.000
5	1986	3.72E-05	3.86	-11	13	10	1.100	5.100	0.000
8	1525	2.56E-05	2.65	-13	13	10	5.100	10.100	0.000
13	1239	1.92E-05	1.99	-15	13	10	1.100	9.100	0.000
14	977	1.83E-05	1.90	-11	13	10	6.100	10.100	0.000
17	727	1.57E-05	1.63	-9	13	10	9.100	10.100	0.000
18	664	1.03E-05	1.07	-15	13	10	2.100	10.100	0.000
9	8150	8.86E-06	0.92	-10	13	10	5.100	6.100	0.000
16	381	7.76E-06	0.80	-9	13	10	5.100	6.100	0.000
10	371	6.98E-06	0.72	-11	13	10	2.100	6.100	0.000
12	390	6.78E-06	0.70	-13	13	10	2.100	9.100	0.000
11	267	5.02E-06	0.52	-11	13	10	5.100	9.100	0.000
1	177	3.61E-06	0.37	-9	13	10	6.100	0.000	
2	1879	1.74E-06	0.18	-14	13	10	2.100	9.100	0.000

Reflexion an erster und letzter Linsenfläche ergibt diesen Geist; dieser soll nun differenziell berechnet werden!



# Problematik: Kaustik

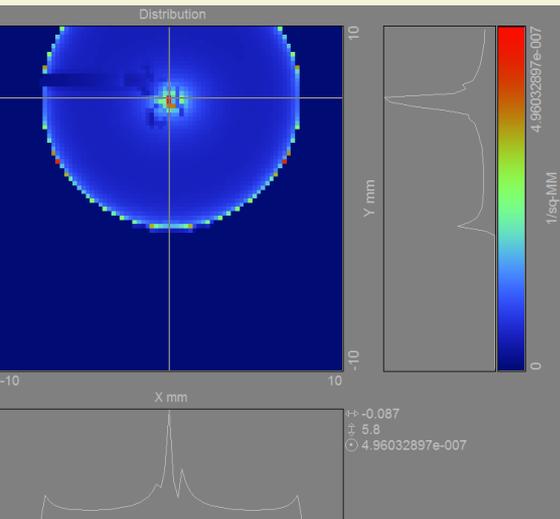


Bei Variation des Startwinkels wechselt der Strahl die Richtung => Kaustik.

Beim differentiellen Raytracing wird dies (automatisch) berücksichtigt und es ergeben sich so zwei verschiedene Äquivalenzklassen von Strahlen (vor und nach dem Wendepunkt), die getrennt analysiert werden müssen.

# Beispiel Cooke-Triplet

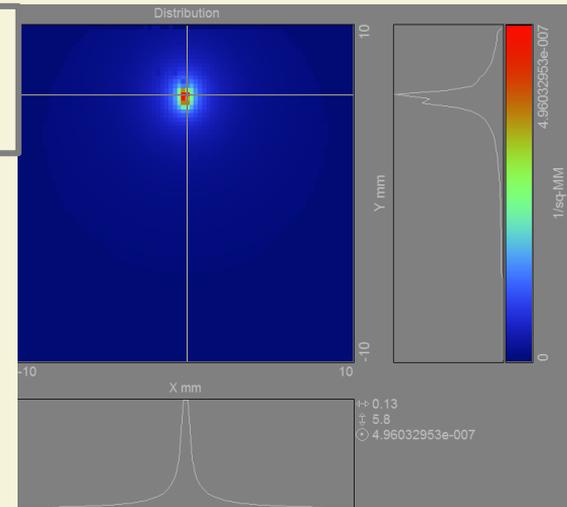
- Beide Strahlen starten in der Punktlichtquelle bei (5, 0, -40)
- Die erste Äquivalenzklasse hat Startrichtung (0.0, 0.0, 1.0)
- Die zweite Äquivalenzklasse hat Startrichtung (-0.23, 0.0, 0.97)



Von Äquivalenzklasse 2 erzeugte Bestrahlungsstärke auf dem Detektor

Von Äquivalenzklasse 1 erzeugte Bestrahlungsstärke auf dem Detektor

Bestrahlungsstärke ist *exakt!*  
Allerdings: „Löcher“ in der Verteilung,  
da der Algorithmus noch nicht überall konvergiert!



# Fazit

- Undersampling ist eines der Hauptprobleme bei der radiometrischen Auswertung von Falschlicht
- Bei Streulicht kann dieses Problem in vielen Fällen durch so genanntes Ray Density Weighting abgemildert werden.
- Undersampling bei Geistern kann durch differenzielles Raytracing vermieden werden.

# SILA – Software für Lichtstreuung

```
File Python Help
* C:\Users\lba\Desktop\Covestro\New\Release\Examples\Beispiel_HG_1.py

##### Henyey-Greenstein Modellbeispiel
##### 15.05.2017

from math import *

RT.Reset()

RT.SampleSizeX = 40.0
RT.SampleSizeY = 40.0
RT.SampleSizeZ = 3.0

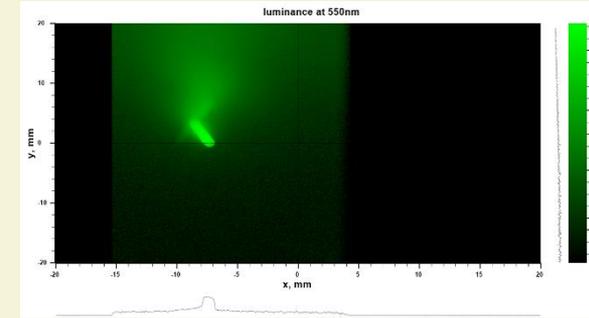
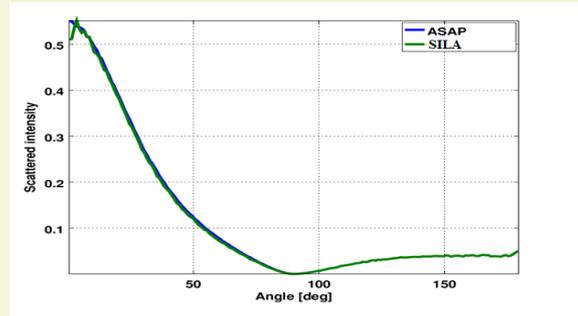
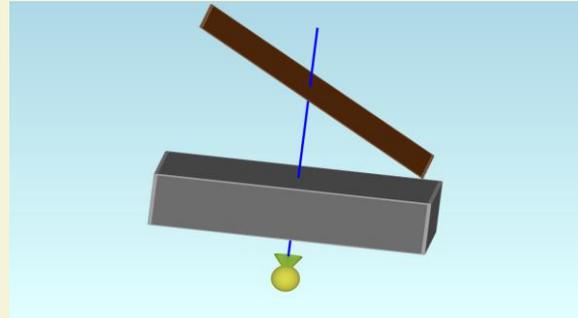
RT.Wavelength = 550.0
RT.Model = Model.HG

##### Starke Vorwärtsstreuung
RT.G = 0.97

RT.MediumRefractiveIndex = 1.59
RT.MediumAbsorptionCoefficient = 0.0

##### Niedriger Streuungskoeffizient (weniger Streuung).
RT.ScatteringCoefficient = 0.01
RT.AbsorptionCoefficient = 0.0

RT.Run()
RT.DisplayConsole()
---- Wavelength 550nm
---- Absorption coefficient 0
---- Scattering coefficient 0.01
---- Host absorption coefficient 0
---- Host real refractive index 1.59
Ray tracing started ...
--- 1000000 out of 2000000 time=00:00:03.5378185
```



- Beliebige optische Systeme
- Volumen- und Oberflächenstreuung
- Differenzielles Raytracing
- Zurzeit in Entwicklung bei Hembach Photonik



