

# Simulation und Vermessung von Optischen Diffusoren

Matthias Brinkmann\*, Uwe Langbein\*\*

\* Hochschule Darmstadt, Fachbereich Mathematik und Naturwissenschaften,  
Studienbereich Optotechnik und Bildverarbeitung

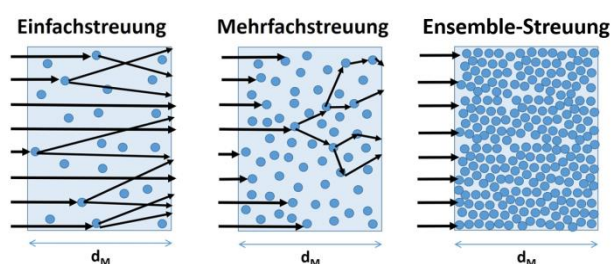
\*\* Hochschule Rhein-Main, Fachbereich Ingenieurwissenschaften, i.R.,  
Studienbereich Angewandte Physik und Medizintechnik

[mailto: matthias.brinkmann@h-da.de](mailto:matthias.brinkmann@h-da.de)

An optischen Diffusoren unterschiedlicher Zusammensetzung wurden winkelabhängige Streumessungen durchgeführt und die Ergebnisse mit den Vorhersagen der Lorenz-Mie-Theorie und optischen Simulationsrechnungen im Bereich der Mehrfachstreuung verglichen. Die gemessenen Streuspektren resultieren aus einem Zusammenspiel verschiedener Brechungs- und Beugungseffekte.

## 1 Einführung

Optisch „reine“ Materialien und „glatte“ Oberflächen spielen in der abbildenden Optik eine große Rolle, insbesondere für die Mikroskopie und die Fernbeobachtung. Daneben benötigt man aber auch diffusive Materialien und optisch „raue“ Oberflächen, um Licht in seiner räumlichen und Winkel-Verteilung zu homogenisieren. In diesem Beitrag beschäftigen wir uns nur mit sogenannten Volumendiffusoren [1].



**Abb. 1:** Illustration der Streu-Regime: Einfachstreuung, Mehrfachstreuung und Ensemble-Streuung.

Als variable Parameter dieser Materialien gelten insbesondere die Streupartikel-Eigenschaften: Größe, Form, Index, Dispersion, Absorption und die optischen Eigenschaften des Matrix-Materials: Index, Dispersion und Absorption. Aufgrund der Streupartikel-Konzentration  $\eta$  und des Streuquerschnitts  $\sigma$  ergibt sich die mittlere freie Weglänge  $l_m = 1/(\eta \cdot \sigma)$ . Ist  $l_m$  deutlich kleiner als die Probendicke  $d_M$ , so befindet man sich im Bereich der Einfachstreuung. Ist  $l_m$  vergleichbar zu  $d_M$ , findet Mehrfachstreuung statt. Für  $l_m \ll d_M$  wird das Licht nicht mehr singulär an einzelnen Partikeln gestreut sondern an einem Partikel-Ensemble. Zur Modellierung der optischen Eigenschaften diffusiver Materialien im Einfachstreu-Regime ist das Simulationstool MiePlot [2] des britischen Autors Philip Laven hervorragend geeignet.

## 2 Lorenz-Mie-Theorie und MiePlot

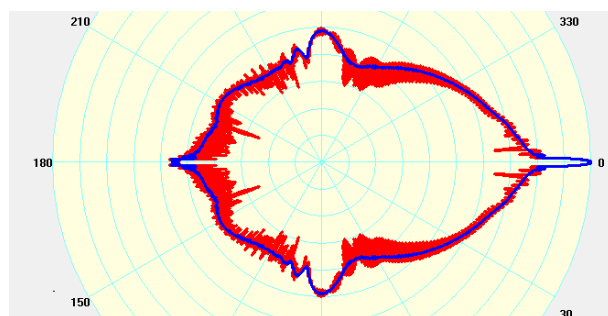
In MiePlot [2] wurde u.a. die exakte Lorenz-Mie-Theorie [3] implementiert, die die Streuung ebener

DGao-Proceedings 2020 – <http://www.dgao-proceedings.de> – ISSN: 1614-8436 – urn:nbn:de:0287-2020-P005-9

Wellen an radialsymmetrischen Streuzentren beschreibt und auf einer strengen Lösung der Maxwell-Gleichungen beruht.

Der Primäralgorithmus von MiePlot setzt ein einzelnes radialsymmetrisches Streuzentrum mit dem Durchmesser  $d_P$  voraus, dessen komplexer Brechungsindex  $\tilde{n}_P = n_P(\lambda) + j\alpha_P(\lambda)$  über verschiedene Dispersionsmodelle festgelegt werden kann.  $\tilde{n}_P$  darf sich radial ändern,  $\tilde{n}_P = \tilde{n}_P(r)$ , sowohl stufenweise als auch stetig.

An diesem Streuzentrum wird eine einfallende, linear polarisierte Welle der Wellenlänge  $\lambda$  gestreut. Die Intensität des Streufeldes lässt sich polarisationsselektiv über dem gesamten Streuwinkel von  $180^\circ$  berechnen. Damit wird sowohl Vorwärts- als auch Rückwärtsstreuung erfasst, s. Abb.2, rote Kurve. Da sich der reelle Brechungsindex des Umgebungsmediums  $n_M = n_M(\lambda)$  ebenfalls variieren lässt, ist auch die Simulation von Hohlkugeln und Luftblasen im Medium möglich.



**Abb. 2:** Inkohärente Streuung einer von links einfallenden unpolarisierten ebenen Welle ( $\lambda=0,55\mu\text{m}$ ) an einem in einer Polymermatrix ( $n_M=1,45$ ) eingeschlossenem Ensemble von Glaskugeln ( $n_P=1,60$ ); Rot:  $d_P = 20\mu\text{m}$ ; Blau:  $d_P=16-24\mu\text{m}$  (normalverteilt), Polarplot in log. Skalierung.

MiePlots volle Leistungsfähigkeit kommt zum Tragen, wenn die inkohärente Streuung an einem Ensemble von Streuzentren mit vorgebarbarer Größenverteilung  $\{d_P\}$  simuliert werden soll, s. Abb.2, blaue

Kurve. Desgleichen lassen sich Streuspektren berechnen, die sich bei einer polychromatischen Beleuchtung ausbilden, deren Spektrum frei definierbar ist.

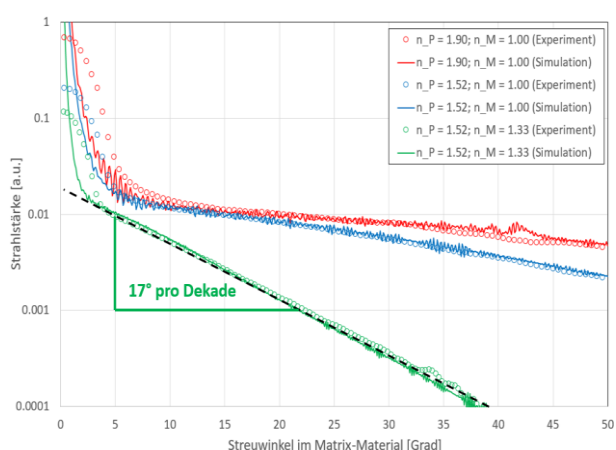
### 3 Streuexperimente

Wir verwenden zwei Messapparaturen für die Bestimmung der Streueigenschaften scheibenförmiger Diffusorproben: Beim ersten Experiment wird das Licht eines OL490 Monochromators (Optronic Laboratories Inc.) durch eine Optik auf  $\pm 5^\circ$  kollimiert, durch die Diffusorprobe gelenkt und danach die Winkelverteilung des gesamten Halbraums in Vorwärtsrichtung mit einer Imaging Sphere (Radiant Imaging Inc.) vermessen. Hiermit lässt sich das nach vorne gestreute Licht vom ungestreuten „trennen“ und dessen gesamte Winkel-Verteilung und -Anisotropie bestimmen. Bei der zweiten Apparatur handelt es sich um ein Zweiachsgoniometer in Kombination mit Lasern, um die Kleinwinkelstreuung mit einer Winkelauflösung von  $0.05^\circ$  zu untersuchen [4].

Vermessen werden sowohl kommerziell erhältliche Volumendiffusoren, von denen normalerweise die Zusammensetzung unbekannt ist, als auch Laborproben, bei denen Mikro-Glasperlen in Wasser, in Kunstharz oder auch „an Luft“ präpariert werden.

### 4 Ergebnisse und Diskussion

Abb. 3 zeigt die Ergebnisse dreier von uns präparierter Proben, die sich im Brechungsindex  $n_M$  des Wirtsmaterials (Matrix) sowie im Brechungsindex  $n_P$  der sphärischen Streuzentren (Partikel) unterscheiden. Die Durchmesser der Partikel genügen einer Normalverteilung mit einer Standard-Abweichung von 10% um den Mittelwert  $d_P = 120\mu\text{m}$ ; Wellenlänge des Messlichts  $\lambda = 580\text{nm}$ .

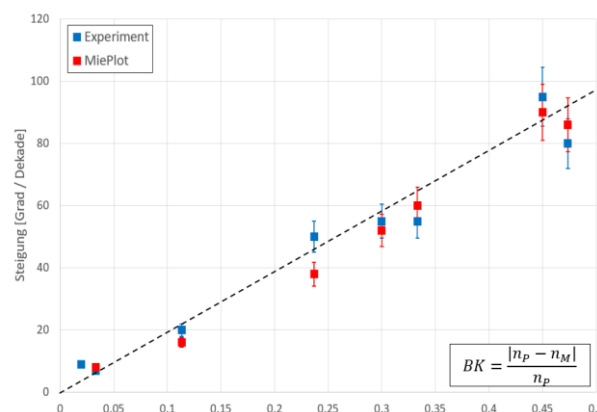


**Abb. 3:** Vermessung und Simulation der Strahlstärke entlang der Streukegel dreier Diffusorproben stimmen sehr gut überein.

Das zentrale Maximum aller Kurven ist i.w. Beugungseffekten geschuldet, während die fast gerad-

linigen Flanken durch Brechungseffekte an der Kugelflächen-Geometrie erzeugt werden. Zwischen der Steilheit der Flanken (gemessen in Grad pro Dekade Strahlstärkendifferenz) und der Brechkraft der als Kugellinsen wirksamen Partikel besteht nämlich ein direkt proportionaler Zusammenhang, s. Abb. 4. Als Maß für die Brechkraft  $BK$  wird dabei die auf den Partikeldurchmesser normierte inverse Brennweite verwendet:

$$BK = \frac{|n_P - n_M|}{n_P}$$



**Abb.4:** Sowohl die Simulation als auch die Messungen zeigen einen de facto linearen Zusammenhang zwischen der Brechkraft und der Flankensteilheit der Strahlstärkekurven: Zunehmende Brechkraft führt zu schlankeren Streukegeln.

In weiteren Versuchen haben wir Proben mit hoher Partikelkonzentration im Mehrfach-Streubereich vermessen und mit numerischen Ray-Tracing-Simulationen erfolgreich verglichen [4].

### 5 Fazit und Ausblick

Unsere Messungen bestätigen, dass sich das Streuverhalten von optischen Diffusoren im Regime der Einfachstreuung hervorragend mit dem Tool MiePlot simulieren lässt. Zur Simulation von Mehrfachstreuung sind Ray-Tracing-Tools erforderlich.

Eine detaillierte Untersuchung des beugungsbestimmten Zentrums des Streukegels steht noch an, ebenso wie die Polarisation des Streulichts. Zudem lässt eine Analyse des rückgestreuten Lichtkegels eine Reihe interessanter Struktureffekte erwarten.

### Literatur

- [1] M. Brinkmann et al.: Optical Materials and Their Properties, Springer Handbook of Lasers and Optics (2012), S. 253-399.
- [2] <http://philiplaven.com/mieplot.htm> (15.07.2020)
- [3] Gustav Mie: Beiträge zur Optik trüber Medien, *Annalen der Physik Folge 4*, Bd. 25, 1908, S. 377–445.
- [4] Details unter: <https://fbmn.h-da.de/~brinkmann/wiki/index.php/Main/Streuung> (15.07.2020)