

Vermessung und Modellierung der Kleinwinkelstreuung an 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>

An sphärischen Partikeln mit Durchmessern im Bereich der Lichtwellenlänge, eingebettet in ein optisch transparentes Matrix-Material, sind weiterführende Streu-Messungen und Auswertungen durchgeführt worden. Neben der winkelabhängigen Intensitätsverteilung in Transmission und Reflexion liegt ein weiterer Schwerpunkt auf Effekten bei kleinen Streuwinkeln. Die experimentellen Ergebnisse werden mit den Vorhersagen der Lorenz-Mie-Theorie zur elastischen Licht-Streuung an sphärischen Partikeln verglichen.

1 Einführung

Optische Volumen-Diffusoren bestehen in vielen Fällen aus einem transparenten Matrixmaterial (beispielsweise Kunststoff, Glas aber auch Wasser oder Luft) mit der Brechzahl n_M , in welchem (häufig) sphärische Partikel der Größe d_P und der Brechzahl n_P homogen verteilt sind (mit der Volumenkonzentration c_P). Eine genauere Beschreibung der diesbezüglichen geometrischen und optischen Zusammenhänge findet sich bereits unter [1].

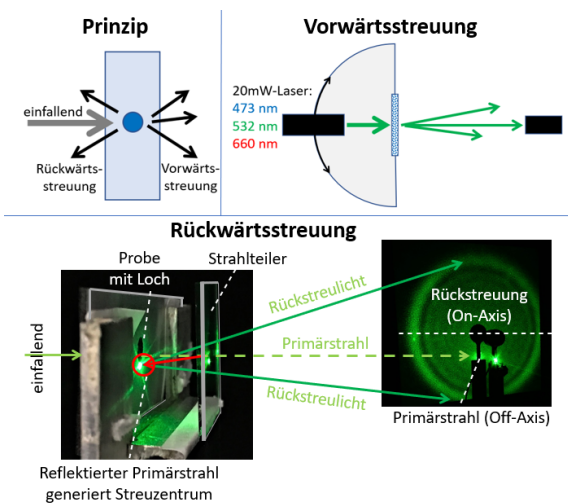


Abb. 1 Prinzip und experimentelle Realisierung zur Bestimmung des in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung gestreuten Lichts.

2 Numerische und Experimentelle Verfahren

Die Software MiePlot [2] ist zur numerischen Berechnung der Vorhersagen aus der Lorenz-Mie-Theorie verwendet worden. Diesbezügliche Details sind bereits in [1] vorgestellt worden.

Die experimentellen Aufbauten zur Vermessung der Vor- und Rückwärtsstreuung sind in Abb. 1 dargestellt. Hierzu wurde ein selbstgebautes Photo-Goniometer verwendet, bei dem die Probe und der jeweilige Laser (Wellenlängen 473, 532 und 660 nm) in 0.05° -Schritten um eine vertikale Achse gedreht werden können. In ca. 700 mm Entfernung befindet

sich ein ortsfester Photodetektor mit angepasster Eintrittsblende. Auf diese Weise kann die winkelabhängige Intensitätsverteilung des Streulichts aufgenommen werden. Hinter dem Detektor befindet sich zusätzlich eine (ebenfalls ortsfeste) Mattscheibe, auf der die gesamte winkelabhängige Lichtverteilung dargestellt wird.

Während bei der Bestimmung der Streuverteilung in Vorwärtsrichtung der Laserstrahl von links kommend durch die Probe läuft und anschließend auf den Photodetektor fällt, ist bei der Rückwärtsstreuung folgender „Trick“ angewendet worden, um die normalerweise bei kleinen Streuwinkeln auftretende Abstimmung der Strahlung durch den Laser zu vermeiden:

Von links kommend tritt der Laserstrahl zunächst durch ein Loch in der Probe hindurch und trifft dahinter auf einen leicht geneigten Strahlteiler (eine Glasscheibe). Ein gewisser Anteil (ca. 8%) wird nach links zurückreflektiert und trifft (aufgrund der leichten Neigung des Strahlteilers) auf die Probe. Die von dort (nach rechts) zurückgestreute Strahlung passiert erneut den Strahlteiler und gelangt zum Photodetektor (bzw. fällt auf den Schirm). Auf diese Weise kann mit dem Aufbau (auch) die zurückgestreute winkelabhängige Lichtverteilung aufgezeichnet werden, und zwar ohne die Abschattung durch den Laser und ohne den Einfluss des (ungestreuerten) Primärstrahls zu erleiden.

In dieser Arbeit sind sphärische Partikel zweier verschiedener Glasmaterialien (Material A: $n_P = 1.52$ und Material B: $n_P = 1.91$) untersucht worden. Für Material A stehen die beiden Durchmesser $d_P = 60$ und $100 \mu\text{m}$ zur Verfügung. Die Streuperlen von Material B weisen ebenfalls einen Durchmesser von $60 \mu\text{m}$ auf, wobei hier der Hersteller als Spezifikation „40-60 μm “ angibt. Eigene mikroskopische Untersuchungen ergeben jedoch, dass sowohl bei Material A als auch B dieser (kleinere) Durchmesser sehr nahe bei $60 \mu\text{m}$ liegt ($\pm 2 \mu\text{m}$).

Als Matrix-Material ist in dieser Arbeit nur Luft ($n_M = 1$) verwendet worden, wobei die Streuperlen auf einer Glasscheibe fixiert worden sind.

3 Ergebnisse und Diskussion

Abb. 2 stellt einen Vergleich zwischen den Messergebnissen bei Vorwärtsstreuung (Punkte) und den Vorhersagen der Mie-Theorie dar. Das obere Diagramm zeigt die Ergebnisse bei Material A ($n_P = 1.52$) für zwei Partikelgrößen (60 und 100 μm). Im unteren Diagramm sind für $d_P = 60 \mu\text{m}$ die Auswertungen für zwei Laser-Wellenlängen (473 und 660 nm) gegenübergestellt.

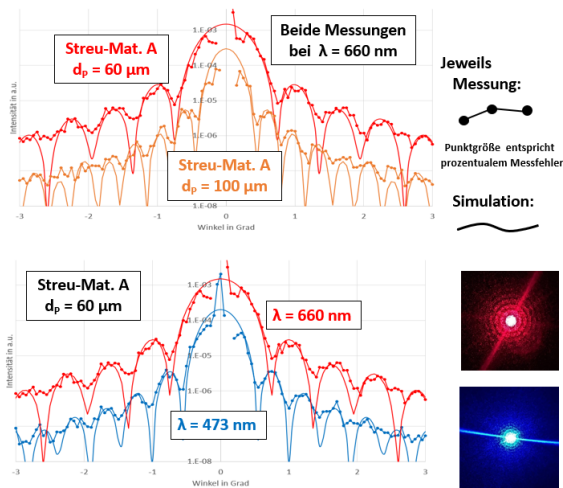


Abb. 2: Vergleich der Messergebnisse in Vorwärtsstreuung (Punkte) mit den Vorhersagen der Mie-Theorie für verschiedene Partikeldurchmesser (oben) und verschiedene Laser-Wellenlängen (unten).

In allen Fällen erkennt man eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen den experimentellen Resultaten und den theoretischen Vorhersagen.

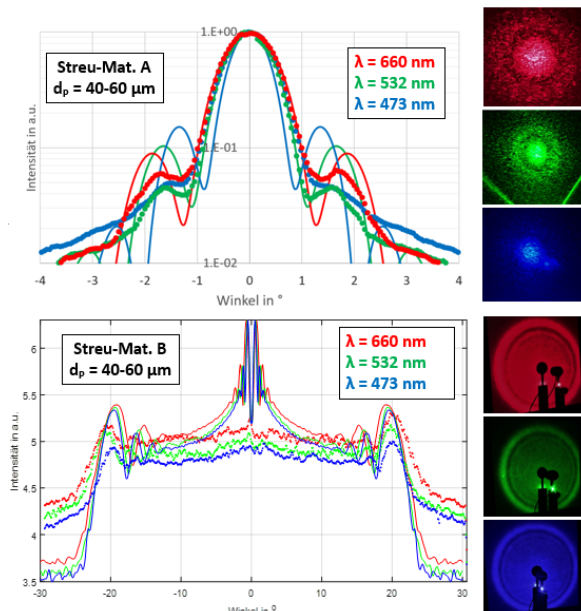


Abb. 3 Vergleich der Messergebnisse in Rückwärtsstreuung (Punkte) mit den Vorhersagen der Mie-Theorie für Material A ($n_P = 1.91$, oben) und B ($n_P = 1.52$, unten) bei gleichem Durchmesser von 60 μm (Herstellerangabe: 40-60 μm) und verschiedenen Laser-Wellenlängen (unten).

Abb. 3 stellt einen Vergleich zwischen den Messergebnissen bei Rückwärtsstreuung (Punkte) und den Vorhersagen der Mie-Theorie dar. Das obere Diagramm zeigt die Ergebnisse für Material A ($n_P = 1.91$, $d_P = 60 \mu\text{m}$) jeweils für die drei verwendeten Wellenlängen. Im unteren Diagramm sind für Material B ($n_P = 1.52$, $d_P = 60 \mu\text{m}$) die Auswertungen für drei Laser-Wellenlängen gegenübergestellt.

Man erkennt ebenfalls eine hohe Übereinstimmung zwischen den Messungen und den theoretischen Vorhersagen. Allerdings fehlt bei den Messungen zu Material B ($n_P = 1.52$) die theoretisch vorhergesagte Peakstruktur bei kleinen (Rückwärts-)Streuwinkeln ($-5^\circ \dots +5^\circ$). Diese Diskrepanz ist momentan noch nicht eindeutig geklärt. Eine mögliche Ursache kann darin liegen, dass (anders als in der theoretischen Rechnung) der Laser nicht nur eine einzige Streuperle trifft sondern simultan ein Ensemble von ca. 20-40 benachbarten Perlen, die eine gewisse lokale Anordnung zueinander haben. Eventuell interferiert das rückgestreute Licht dieser Partikel miteinander (destruktiv oder konstruktiv), was dazu führen könnte, dass die gemessene Peakstruktur erheblich von der theoretisch vorhergesagten abweicht.

Tatsächlich kann man in einigen Fällen auf der Mattscheibe in der Nähe von 0° ein gewisses Lichtmuster erkennen, welches auf Interferenz-Effekte hindeutet (siehe Abb. 4).

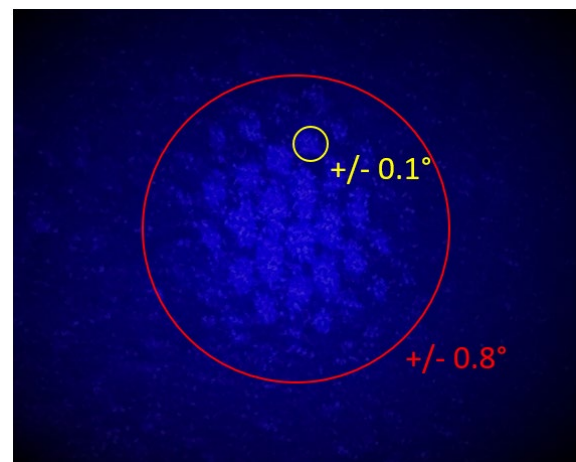


Abb. 4 Beobachtetes Lichtmuster bei 0° auf der Mattscheibe in Rückstreuung für Material B ($n_P = 1.52$).

Hierzu sind jedoch weiterführende Analysen und Untersuchungen notwendig.

Literatur

- [1] M. Brinkmann, U. Langbein: „Modellierung und Vermessung von Optischen Diffusoren“ in: *Proceedings der 121. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Angewandte Optik*, G. Häusler (Hrsg.), <http://www.dgao-proceedings.de/>, P5 der 121. Jahrestagung (2020)
- [2] Software MiePlot: <http://philiplaven.com/mieplot.htm> (12.10.2021)