

# Hocheffiziente Simulation von Mehrfachstreuungsprozessen auf Basis der Mie-Theorie für die optische Sensorik

Simon Streicher\*, Ronald Kampmann\*\*, Stefan Sinzinger\*\*, Oliver Kalthoff\*

\*Medizinische Informatik, Hochschule Heilbronn

\*\*Fachbereich Technische Optik, Technische Universität Ilmenau

<mailto:simon.streicher@hs-heilbronn.de>

Wir stellen eine Methode vor, wie die Lichtausbreitung in Medien effizient berechnet werden kann. Hierzu setzen wir programmierbare Grafikprozessoren ein. Die Simulation wird anhand experimenteller Messergebnisse an unterschiedlich streuenden Diffusoren validiert.

## 1 Einleitung

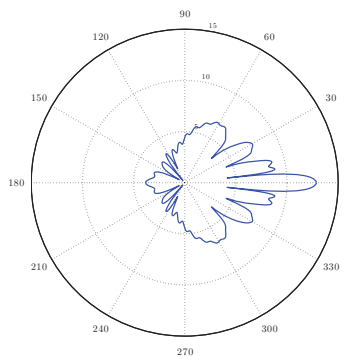
Die theoretische Beschreibung der Lichtausbreitung durch streuende Medien ist für zahlreiche Anwendungsgebiete von der Medizintechnik bis zur Beleuchtungstechnik von großem Interesse. Ein Ausgangspunkt hierfür ist die Mie-Theorie[1], die die Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit sphärischen Streuzentren beschreibt. Der Durchmesser der Streuzentren ist bei unseren Betrachtungen vergleichbar mit der Wellenlänge des einfallenden Lichts. Es existieren verschiedene Algorithmen, mit denen die Streuparameter und Streufunktionen berechnet werden können. Wir präsentieren eine Lösung, die mit einstellbarer Winkelabtastrung ( $0.0001^\circ$  -  $1^\circ$ ) sowie einer beliebigen Eingangsfeldverteilung (ideale Lasermoden, experimentelle Messdaten, etc.) die Ausgangsverteilung eines frei definierbaren Streukörpers berechnen kann. Eine rein CPU (Central Processing Unit) basierte Lösung ist selbst bei Multithreading Programmierung sehr zeitaufwändig. Aus diesem Grund setzen wir programmierbare Grafikprozessoren (GPU = Graphics Processing Unit) ein. Hierbei kann die Rechenzeit bei exakter Rechnung gegenüber einer CPU signifikant verkürzt werden. Die Ergebnisse der Simulation werden anschließend mit Resultaten geeigneter Streulichtexperimente validiert.

## 2 Methodik

In der Simulation werden einzelne Photonen durch ein spezifisches Medium propagiert. Als Parameter können hierbei die Wellenlänge des Lichts, der Durchmesser, die Konzentration im streuenden Medium, der Brechungsindex der Streuzentren sowie des Mediums gewählt werden. Zusätzlich kann eine beliebige Freiform als Strahlprofil des einfallenden Lichts gewählt werden.

Mit Hilfe der Mie-Theorie werden die Streufunktionen der einfallenden elektromagnetischen Strahlung berechnet. Anhand der Partikelkonzentration und des Wirkungsquerschnitts kann die mittlere freie Weglänge eines Partikels im spezifischen Medium

bestimmt werden [2]. Abbildung 1 zeigt die der Simulation zu Grunde liegende Streuverteilung, dargestellt als logarithmischer Polar-Plot. Diese berechnet sich aus den Parametern  $\lambda = 532nm$ , Brechungsindex Medium = 1.000292 (Luft), Brechungsindex Streuzentrum = 1.42 (Quarzglas), sowie dem Durchmesser der Streuzentren =  $4\mu m$ .



**Abbildung 1** Logarithmische Darstellung der Streuverteilung einer ebenen Welle (unpolarisiert) an einem sphärischen Partikel ( $n = 1$ ) in Quarzglas.

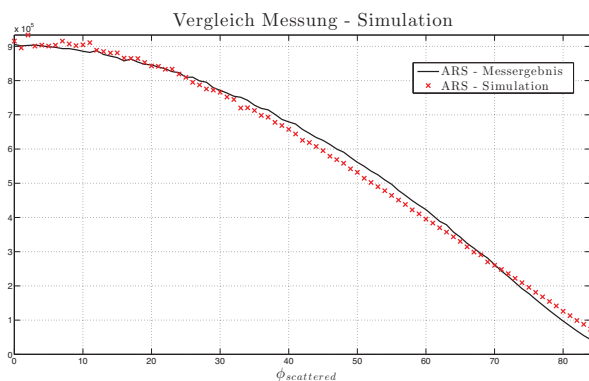
Aus dieser Streuverteilung wird eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion berechnet und anschließend auf die GPU übertragen. Diese ändert sich im Verlauf der Simulation nicht. Im Folgenden wird durch parallele Programmierung die GPU dazu verwendet, Photonen so lange durch das optische Element zu propagieren, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Die Photonen werden anhand eines Intensitätsprofils des Laserstrahls in das Medium injiziert. Es ist möglich, jede beliebige Intensitätsverteilung innerhalb der Software routine zu verwenden. Sobald ein Photon in das Streumedium eingetreten ist und ein neuer Streuprozess stattgefunden hat, wird seine Position in Kugelkoordinaten berechnet. Dabei geben Polar- und Azimutwinkel die Flugrichtung an. Die Strecke zwischen zwei Streuzentren wird anhand des Lambert-Beer-Gesetzes ermittelt. [3] Dieser Schritt wird solange wiederholt, bis das Abbruchkriterium erreicht ist. Dies ist erreicht, wenn ein Photon die Probe (in diesem Fall einen Zylinder) durch den Deckel, den Mantel oder den Boden verlässt.

Die Abbruchkriterien sind an die Probenenergonomie anpassbar. Diese wird in der Simulation abgebildet. Die Probe hat einen Durchmesser von 15mm sowie eine Höhe von 2mm. Hierbei handelt es sich um eine Probe aus Silikatglas, in welcher Streuzentren aus Luft eingeschlossen sind. Die restlichen Parameter entsprechen den am Anfang des Absatzes beschriebenen Parametern.

### 3 Ergebnisse

Die Proben wurden mit Hilfe eines leistungsfähigen Streulichtmessplatzes (Albatross TT [4]) vermessen. Hierbei wurde jeweils die Probe in Transmission und Reflektion vermessen. Die Winkelauflösung für Polar- und Azimutwinkel wurde für Experiment und Simulation auf  $1^\circ$  festgelegt. Die in Abbildung 2 dargestellte Streucharakteristik (Transmission) deckt sich sehr gut mit den Simulationsergebnissen. Die hohe Übereinstimmung auch bei weiteren Experimenten von weniger streuenden Proben verifizieren die Simulation.

Die GPU-Implementierung basiert auf NVIDIA Cuda. Hierzu wurde die mittlerweile in das SDK integrierte Bibliothek Thrust verwendet. Als Hardware, auf welcher die Simulation ausgeführt wird, wird eine GeForce TITAN eingesetzt. Diese zeichnet sich durch 2688 Cuda Kerne sowie 6 GB Speicher aus.



**Abbildung 2** Vergleich zwischen Messexperiment und Simulation. Verglichen wird das „Angular resolved scattering“ (ARS).

Die Thrust Library wurde verwendet, da die Erzeugung von Zufallszahlen auf der GPU, welche einen sehr hohen Einfluss auf die zeitliche Dauer und Korrektheit der Simulation hat, hierdurch ermöglicht wird. Zufallszahlen lassen sich, wie viele Beispiele aus der Fachliteratur zeigen, relativ leicht und auch in großer Anzahl erzeugen. Da jedoch zur Ausführungszeit der Simulation nicht bekannt ist, wie viele Streuvorgänge ein Photon durchlaufen wird, ist es nicht möglich, zu bestimmen wie viele Zufallszahlen man exakt für alle Photonen eines Simulationslaufs benötigt. Somit müssen die Zufallszahlen genau dann zur Verfügung stehen, wenn ein Streuvorgang stattfindet. Dies ist im Falle einer CPU-Ausführung unkritisch, arbeiten jedoch 2688

Rechenkerne parallel, stellt dies eine nicht triviale Herausforderung an den Programmierer dar.

Probenhöhe	0,5mm	1mm	2mm
Probindurchmesser	15mm	15mm	15mm
CPU	11,015s	24,167s	50,975s
GPU	27,45s	33,38s	43,85s
Faktor	~ 401	~ 723	~ 1162

**Tabelle 1** Vergleich Ausführungszeit

Die in Tabelle 1 beschriebenen Zeiten beziehen sich auf die reine Simulationszeit der Photonen durch ein Medium. Der massive Geschwindigkeitsvorteil der GPU-basierten Simulationsroutine ist schon bei vergleichsweise dünnen Proben deutlich und nimmt bei Zunahme der Probendicke oder der Partikelkonzentration weiter zu.

### 4 Diskussion und Ausblick

Wir konnten zeigen, dass die GPU Implementierung für eine Probe mit 0.5mm Dicke um bis zu 1162 mal schneller ist als eine in Matlab implementierte, parallele CPU Version. Durch die Unabhängigkeit der Photonen voneinander ist die Propagation durch ein streuendes Medium ideal parallelisierbar. Dies ermöglicht eine parallele Ausführung der Berechnungen in mehreren Threads, wobei hier die hohe Anzahl der Rechenkerne moderner GPUs ausgenutzt werden kann.

Allerdings gilt zu beachten, dass im vorliegenden Beitrag eine reine GPU Implementierung mit dem Computeralgebrasystem Matlab verglichen wurde. Die GPU Implementierung ist in C++ mit CUDA Erweiterung implementiert, somit handelt es sich um eine kompilative Sprache. Matlab ist eine interpretative Skriptsprache, welche deutlich langsamer in der Ausführung ist.

Die GPU Implementierung der Simulationssoftware ermöglicht es nun auch, komplexere Systeme zu modellieren und in kürzerer Zeit exakt zu simulieren.

### Literatur

- [1] G. Mie, „Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen,“ *Annalen der Physik* **330**(3), 377–445 (1908).
- [2] C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles* (John Wiley & Sons, 2008).
- [3] S. Streicher, R. Kampmann, S. Sinzinger, and O. Kalt-hoff, „Efficient and precise simulation of multiple Mie scattering events using GPGPUs,“ *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXI* (2013). URL <http://dx.doi.org/10.1117/12.2003799>.
- [4] A. Finck, T. Herfurth, S. Schröder, A. Duparré, and S. Sinzinger, „Characterization of optical coatings using a multisource table-top scatterometer,“ *Applied Optics* **53**(4), 259–269 (2014).