

# Rauscharmes photonisches Instrument zur Streulichtmessung

Steffen Reichel\*, Karlheinz Blankenbach\*, Andreas Reber\*, Yunus Sertkaya\*

\*Hochschule Pforzheim, Tiefenbronner Str. 65, D-75175 Pforzheim

<mailto:steffen.reichel@hs-pforzheim.de>

Die Messung von Streulichteigenschaften von Oberflächen oder Körpern kann zum gezielten Lichtdesign verwendet werden. Aufgrund des kleinen Signalpegels des Streulichtes wird eine elektrische Signalaufbereitung im Goniophotometer benötigt. Diese Arbeit präsentiert Ergebnisse der Entwicklung eines präzisen Goniophotometers mit einem rauscharmen Verstärker.

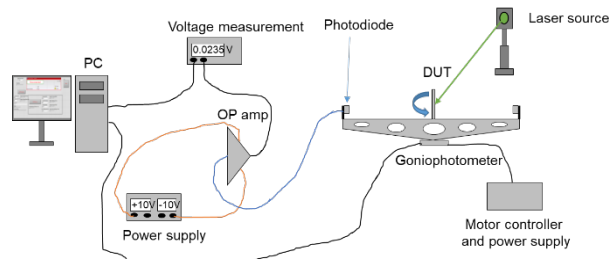
## 1 Einführung

Die Streulichteigenschaften von Oberflächen und Körpern kann zum Lichtdesign für beispielsweise autonome Fahrzeuge verwendet werden. Dazu ist die Charakterisierung von Streulicht mit einem Goniophotometer notwendig.

Aufgrund des kleinen Signalpegels des Streulichtes muss die photometrische Erfassung und elektrische Signalaufbereitung eines Goniophotometer sehr rauscharm sein. Dies betrifft vor Allem die gleichzeitige Erfüllung mehrerer Eigenschaften: Messung im reflexionsarmen Dunkelraum, stabile Lichtquelle (Laserdiode) mit sehr konstanter Stromquelle, Einhaltung der photometrischen Grenzentfernung, geringstes Rauschen der Photodiode und ihres Signalverstärkers, „gute“ Kalibrierung der Photodiode (inklusive Verstärker) und automatische Datenakquisition. Wir stellen unsere Ergebnisse unter Beachtung dieser Punkte vor, um ein rauscharmes automatisiertes photonisches Instrument zu erhalten.

## 2 Prinzipieller Aufbau

Die Streulichtmessung benutzt ein Goniophotometer dessen prinzipieller Aufbau in [1] und [2] beschrieben ist. Unser Goniophotometer ist voll automatisiert und Computer gesteuert (inkl. Ansteuerung und Datenakquise). Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau mit den notwendigen Datenkabeln und der Stromversorgung.



**Abb. 1** Goniophotometer mit Datenkabeln, Stromversorgung und Computer Steuerung (PC).

Das Streulicht wird von einer rauscharmen Photodiode (S1226-18BK mit 2 pA Dunkelstrom) detektiert

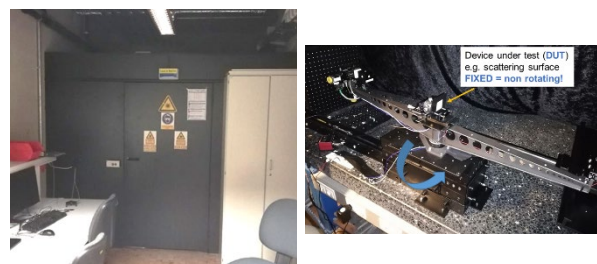
und mit Hilfe eines Transimpedanzverstärkers verstärkt und als eine Spannung gemessen. Mit einer Kalibrierung (Details in [1]) kann die Spannung einer optischen Leistung zugeordnet werden. Gegenwärtig hat das photonische Instrument einen Dynamikbereich von nahezu 10 Dekaden und eine Genauigkeit, d.h. Streuung der Messwerte (2 Standardabweichungen) von weniger als 0,08 % um den Mittelwert [1], [3].

## 3 Aspekte eines präzisen photonischen Instrumentes zur Streulichtmessung

Aufgrund des kleinen Signalpegels des Streulichtes muss der Goniophotometeraufbau die folgenden Punkte berücksichtigen:

1. Aufbau im reflexionsarmen Dunkelraum und ohne Streulichtquellen (wie z.B. Messgerätedisplays)
2. Stabile Lichtquelle (Laser) und stabile Stromversorgung für diese
3. Einhaltung der photometrischen Grenzentfernung
4. Rauscharme Photodiode und rauscharmer Verstärker mit stabiler Spannungsversorgung
5. Automatische Datenakquise

Abb. 2 zeigt unseren reflexionsarmen Dunkelraum und den Goniophotometeraufbau.



**Abb. 2** Dunkelraum von außen (links) und Goniophotometeraufbau (rechts) auf Granitbank sowie dunklem Teppich zur Reduktion von Schwingungen und Streulicht.

Durch Einhaltung der photometrischen Grenzentfernung kann die systematische Messabweichung  $\Delta$  aufgrund des flachen Detektors reduziert werden. Es gilt [4]:

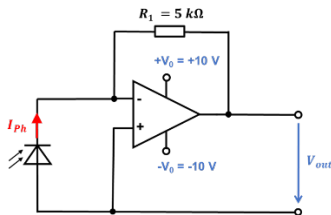
$$\Delta = \frac{1}{1+(d/a)^2} \quad (1)$$

In unserem Fall ergibt sich für eine Laserfleckweite von  $a \leq 5,0 \text{ mm}$ , einer Armlänge  $d = 500,0 \text{ mm}$  eine maximale Abweichung von  $\Delta = 9,99 \cdot 10^{-5}$ , die daher vernachlässigt werden kann.

#### 4 Photodiodenverstärker

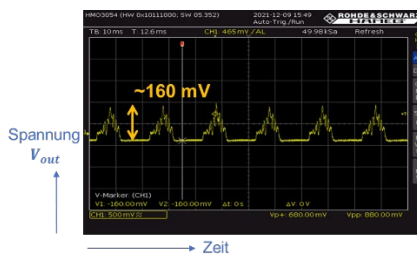
Der Strom der Photodiode  $I_{Ph}$  wird mit einem Transimpedanzverstärker verstärkt (Abb. 3) und es gilt:

$$V_{out} = -R_1 \cdot I_{Ph} \quad (2)$$



**Abb. 3** Transimpedanzverstärker mit Operationsverstärker (OPV) AD8065 empfohlen als Photodiodenverstärker, beschränkt auf  $R_1 < 10 \text{ M}\Omega$  Rückkoppelwiderstand.

Die Spannung  $V_{out}$  wird mit einem Voltmeter vollautomatisch gemessen. Detaillierte Messungen dieser Spannung zeigten ein 50 Hz Netzbrummen im Signal (Abb. 4).



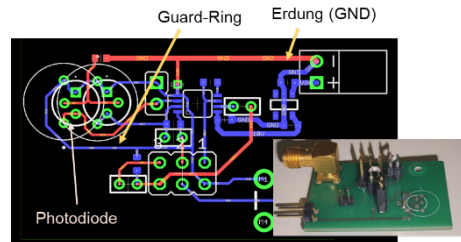
**Abb. 4** Oszilloskop-Bild von  $V_{out}$  ( $R_1 = 8,2 \text{ M}\Omega$ ).

Für noch genauere Messungen ist allerdings eine Reduktion dieses Netzbrummens und weiterer Rauschquellen notwendig. Größere Untersuchungen offenbarten die Quellen dieser Brummspannung: die Spannungsversorgung der elektrischen Motoren für den Drehtisch und Einkopplungen über lange Kabel. Durch geschirmtes Kabel und einem neuen OPV low noise Design konnte dies weiter reduziert werden. Das Netzbrummen wirkt wie ein Gleichspannungs-Offset der einfach subtrahieren werden kann.

#### 5 Entwicklung eines rauscharmer Photodiodenverstärkers

Als erste Maßnahme wurde der OPV getauscht zu dem ADA4622, der auch Rückkoppelwiderstände von  $R_1 > 10 \text{ M}\Omega$  erlaubt. Dieser hat ein geringes Eigenrauschen durch eine J-FET Eingangsstufe (und damit auch ein geringer Eingangsstrom), eine gerin-

gere Bandbreite (1,8 MHz) und eine bessere Anstiegszeit. In Versuchen zeigten ein Eingangstiefpass und ein Subtrahierer (Gleichspannungs-Offset-Kompensation) als Decoupler keine Effekte. Als sehr gute Maßnahmen zur Rauschspannungsreduktion erwiesen sich: Platzierung einer eigenen Spannungsversorgung des OPVs auf die Platine (reduziert Einkopplung von Störspannungen), ein Guard-Ring zum Schutz der Photodiode gegen Störgrößen, Schirmung der Schaltung mit einem metallischen Gehäuse und die Erdung der Platine und des Gehäuses (Abb. 5).



**Abb. 5** Platine mit Erdung und deren Testaufbau.

Durch diese Maßnahmen konnte die Rauschspannung deutlich reduziert werden: von  $\sim 160 \text{ mV}$  auf unter  $5 \text{ mV}$  auch für hohe Rückkoppelwiderstände und damit große Verstärkungen, siehe Abb. 6.



**Abb. 6** Oszilloskop-Bild der Spannung  $V_{out}$  mit deutlich reduzierter Rauschspannung für  $R_1 = 500 \text{ M}\Omega$ .

Durch diese großen Rückkoppelwiderstände sind nun Verstärkungen  $V$  von  $V \sim 100\,000$  möglich – dies bei deutlich geringeren Rauschspannungen. Zum Vergleich: vorher war die Verstärkung limitiert auf  $V = \frac{8,182 \text{ M}\Omega}{5,010 \text{ k}\Omega} \approx 1633$ .

#### Literatur

- [1] S. Reichel, K. Blankenbach, A. Reber, "Development and improvement of a photonics instrument for light scattering metrology", *Proc. SPIE 12008*, (5 March 2022); doi: 10.1117/12.2608504
- [2] J. Stover, *Optical Scattering Measurement and Analysis*, (SPIE Press 2012).
- [3] Reichel, S., et al, "Improved Light Scattering Characterization by BSDF of Automotive Interior and 3D Printed Materials," *Proc. SPIE 11693*, 1169311 (2021).
- [4] H. J. Hentschel, „Licht und Beleuchtung“, (Hüthig Verlag 2001).