

# Untersuchung der Einflussfaktoren auf die hochgenaue Messung der Modulationstransferfunktion von Objektiven beim Einsatz von Kameradetektoren

Melissa Schenker\*, Michael Schulz\*, Manuel Stavridis\*\*, P. Erichsen\*\*\*

\*Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

\*\*Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Abbestraße 2-12, 10587 Berlin

\*\*\*Trioptics GmbH, Wedel

<mailto:melissa.schenker@ptb.de>

In der PTB wurde eine Referenzanlage zur Messung der Modulationstransferfunktion (MTF) von Objektiven entwickelt. Die Modellierung der Anlage in einem virtuellen Experiment gibt Aufschluss über die Sensitivität der MTF gegenüber Justier- und Achsenfehlern. Zusätzlich wird der Einfluss des Kameradetektors untersucht.

## 1 Einführung

Motiviert durch das in den letzten Jahren stark gestiegene Interesse seitens der Industrie, wird in diesem Projekt die metrologische Basis für hochgenaue und rückgeführte Messungen der Modulationstransferfunktion (MTF) von Kameraobjektiven für die Industrie geschaffen. Dazu wurde in der PTB eine MTF-Referenzanlage realisiert, mit der eine Messunsicherheit von 0,01 ( $k=2$ ) angestrebt wird.

Der Aufbau der Referenzanlage wurde bereits im vergangenen Jahr vorgestellt [1]. In der aktuellen Konfiguration basiert sie auf der Messung der Linienspreizfunktion (LSF) des Prüflings durch Kameraerkennung. Eine Modellierung der Referenzanlage wird genutzt, um den Unsicherheitsbeitrag der mechanischen Komponenten und der Justage auf das Messergebnis abzuschätzen. Ein weiterer Beitrag zur Messunsicherheit ist durch das nicht ideale Detektorverhalten gegeben, welches ebenfalls untersucht und simuliert wird, um in das Modell mit eingebunden zu werden.

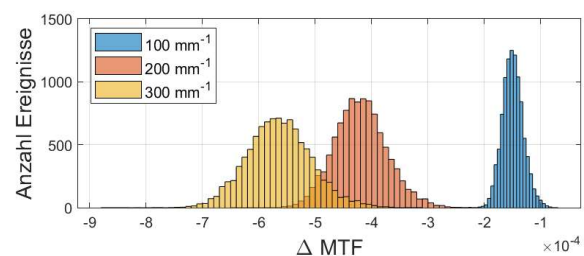
## 2 Modellierung der MTF-Referenzanlage

Die Modellierung der MTF-Referenzanlage erfolgt mit dem in der PTB entwickelten Simulationstool SimOptDevice [2]. Dabei handelt es sich um eine MATLAB-Bibliothek, die objektorientierte Programmierung mit optischem Ray Tracing verbindet. Die optischen Komponenten, die Linearachsen zur Positionierung des Detektors in der Bildebene sowie die Drehachse für die Realisierung verschiedener Einfallswinkel auf den Prüfling werden im Modell berücksichtigt.

Bei dem virtuellen Experiment wird aus den Ray Tracing - Daten die Intensitätsverteilung in der Bildebene des Prüflings berechnet und über eine Fourier Transformation die MTF ermittelt. Abhängig vom Prüfling kann die Intensitätsverteilung geometrisch aus dem Spot-Diagramm, oder unter

Berücksichtigung von Beugungseffekten auf Basis des Huygensschen Prinzips, berechnet werden.

Im Rahmen von Monte-Carlo Studien werden, innerhalb von festgelegten Toleranzen, zufällige Positionsabweichungen in das System eingebracht und die Abweichung der resultierenden MTF von der MTF bei idealer Justierung des Systems untersucht. Eine beispielhafte Auswertung einer solchen Studie für 10.000 verschiedene Konfigurationen ist in Abb. 1 dargestellt. Die Verteilungen, kombiniert mit Sensitivitätsanalysen bei Variation einzelner Parameter, geben Aufschluss über die Haupteinflussfaktoren auf entstehende Unsicherheiten. Auf Basis dieser Ergebnisse werden Optimierungen des Aufbaus und der Messvorgänge vorgenommen.



**Abb. 1** Studie zur Änderung der MTF bei Einbringung zufälliger Positionierfehler innerhalb der Toleranzen (durchgeführt für ein Kameraobjektiv mit  $f/2.8$  und  $f = 10$  mm).

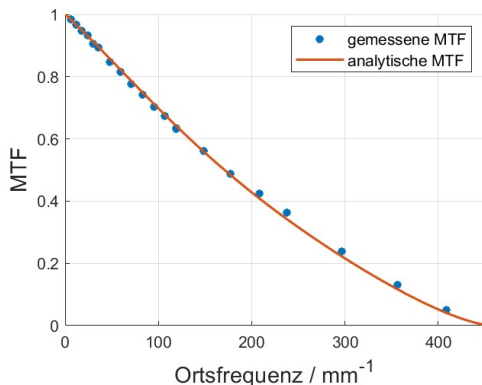
Die Ergebnisse der Modellierungen zeigen, dass der abgeschätzte Unsicherheitsbeitrag signifikant vom gewählten Prüfling, dem Fokuskriterium und der betrachteten Ortsfrequenz abhängt.

## 3 Einfluss des Kameradetektors

In der Modellierung wird bisher ein ideales Detektorverhalten angenommen. Weil aber das Detektorrauschen einen signifikanten Beitrag zum Messergebnis leistet, wurde die Intensitätsabhängigkeit des Bildrauschens der Kamera untersucht, um diesen Einfluss ebenfalls im Modell zu berücksichtigen. Es ergibt sich ein nahezu linearer Zusammenhang

zwischen mittlerer Intensität und Standardabweichung des Bildrauschens, mit zusätzlich auftretenden, vermutlich elektronisch bedingten, Abweichungen bei niedrigen mittleren Intensitäten. Der Verlauf ist abhängig von den Einstellungen der verwendeten 12-bit CCD-Kamera und der Lichtquelle.

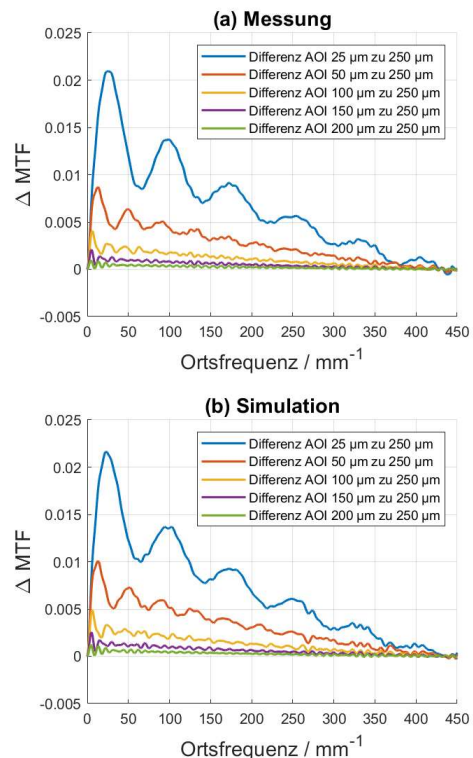
Anhand dieser Ergebnisse zum Rauschverhalten des Detektors wurde ein einfaches Modell entwickelt, mit dem das erwartete Bild auf dem Detektor simuliert werden kann. Dabei gehen auch der Pixelabstand und die Quantisierungstiefe der CCD-Kamera ein. Um die Simulationen mit Messergebnissen vergleichen zu können, wurde eine analytisch beschreibbare Beispiel-MTF verwendet, die einer real gemessenen MTF nahekommt (s. Abb. 2). Für diese analytische MTF wurde die LSF berechnet und mit Hilfe des beschriebenen Kameramodells simulierte Kamerabilder erzeugt.



**Abb. 2.** Vergleich der analytischen MTF und der gemessenen MTF des verwendeten Prüflings (Brennweite  $f = 50 \text{ mm}$ ,  $f/4$ , Wellenlänge  $546 \text{ nm}$ ).

#### 4 Vergleich von Simulation und Messungen

Die Algorithmen zur Berechnung der MTF aus einer gemessenen LSF wurden auf das simulierte und das gemessene Kamerabild angewendet. Sie beinhalten unter anderem die Auswahl des ausgewerteten Messbereichs, die einer Gewichtung der LSF mit einer rechteckigen Fensterfunktion entspricht. Bei Fourier Transformation führt diese Gewichtung zu charakteristischen Oszillationen auf dem MTF-Ergebnis [3]. Diese Oszillationen sind insbesondere bei Differenzbildung der MTF-Ergebnisse zu erkennen, die aus unterschiedlich langen Messbereichen ermittelt wurden. Die entsprechenden Ergebnisse von Messung und Simulation sind in Abb. 3 (a) und Abb. 3 (b) dargestellt. Sowohl qualitativ als auch quantitativ ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zu erkennen. Auch die Anwendung unterschiedlicher Verfahren zur Untergrundkorrektur der Kamerabilder, welche die Ausprägung der auftretenden Oszillationen verändern, führen zu übereinstimmenden Ergebnissen.



**Abb. 3** Differenzen der berechneten MTF für verschiedene Auswertebereiche (area of interest, kurz: AOI).

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Modellierung der MTF Anlage in SimOptDevice können Studien bezüglich der Sensitivität der MTF auf mechanische Einflüsse durchgeführt werden. Des Weiteren wurde ein einfaches, auf Messdaten basierendes Detektormodell entwickelt, mit dem das Verhalten der MTF auf bestimmte Auswerteverfahren abgebildet wird. Im nächsten Schritt soll das Detektormodell mit der Modellierung verbunden werden, um einer ganzheitlichen Simulation des Messvorgangs näher zu kommen, die zur Abschätzung der Messunsicherheit und Optimierung der Anlage genutzt werden kann.

#### Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Förderung dieser Forschungsarbeit durch das TransMeT Programm (Transfer Metrologischer Technologien) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

#### Literatur

- [1] M. Schenker et al., „Entwicklung einer hochgenauen Referenzanlage zur Messung der Modulationstransferfunktion von Objektiven“ in: *DGaO Proceedings 2018* (2018).
- [2] R. Schachtschneider, et al., „SimOptDevice: a library for virtual optical experiments“ in: *Jour. of Sensors and Sensor Systems*, **8**(1), 105-110 (2019).
- [3] K. Doi, K. Stubler, K. Rossmann, „Truncation errors in calculating the MTF of radiographic screen-film systems from the line spread function“ in *Physics in Medicine & Biology*, **17**(2), 241-250 (1972).