

Entwicklung einer hochgenauen Referenzanlage zur Messung der Modulationstransferfunktion von Objektiven

Melissa Schenker*, Manuel Stavridis**, Patrik Erichsen***, Michael Schulz*

*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 Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wird eine Referenzapparatur zur Messung der Modulationstransferfunktion (MTF) von Objektiven entwickelt, mit der eine Messunsicherheit von 0,01 ($k=2$) angestrebt wird. Planung und Aufbau der Apparatur, sowie Einflüsse auf die Messunsicherheit werden vorgestellt.

1 Einführung

Die Modulationstransferfunktion (MTF) charakterisiert die inkohärenten Abbildungseigenschaften von Objektiven. Weltweit gibt es einen wachsenden Bedarf an rückgeführten MTF-Messungen, u. a. bei Kameras im Automotive-Bereich.

In einem gemeinsamen Projekt wird das langjährige Know-how der PTB und Trioptics im Bereich der hochgenauen MTF-Messung zusammengeführt. Bei der PTB wird eine den modernen Entwicklungen angepasste Referenzapparatur realisiert und bei Trioptics wird die Einrichtung eines Laboratoriums für rückgeführte Kalibrierungen angestrebt. Durch das Projekt wird die metrologische Basis für rückgeführte MTF-Messungen in der Industrie geschaffen.

2 Referenzapparatur

Eine schematische Darstellung der Referenzapparatur in der PTB ist in Abb. 1 zu sehen. Das System ist dafür konzipiert, Linsensysteme mit Brennweiten zwischen 15 mm und 135 mm in einer unendlichendlichen Anordnung im visuellen Spektralbereich bei unterschiedlichen Bildhöhen und Prüflingsazimuten zu testen.

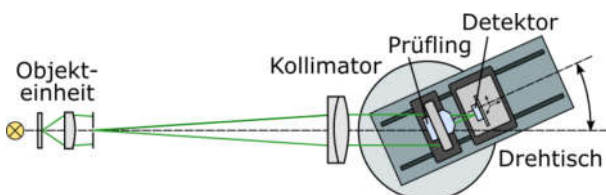


Abb. 1 Schematische Darstellung der MTF Referenzapparatur. Die Objekteinheit besteht aus einer inkohärenten Lichtquelle, optischen Filtern, einem Diffuser, einem Kondensator und der Objektstruktur. Der Detektor befindet sich auf einer XYZ-Achsen-einheit. Mit dem Drehtisch werden unterschiedliche Bildhöhen realisiert.

Als Objekt dient zunächst ein inkohärent beleuchteter Spalt. Durch die Detektion der Linienstreifenfunk-

tion (LSF) in der Bildebene des Prüflings und anschließender Fouriertransformation wird die eindimensionale MTF berechnet [1].

Der Detektor ist in dieser Anordnung austauschbar, sodass die Untersuchung der Vor- und Nachteile verschiedener Detektionsverfahren möglich ist. Es kann entweder ein kamerabasiertes Verfahren mit einer vergrößernden Relayoptik, oder ein scannendes Verfahren mit einer Spalt- oder Kantenapertur auf einer Photodiode verwendet werden.

3 Anforderungen an die Mechanik

Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass die Justierung und Bewegungscharakteristik der Linearachsen einen bedeutenden Einfluss auf die Messunsicherheit haben. Die Anforderung an die Ausrichtung der XYZ-Achsen zueinander liegt bei der Referenzapparatur daher bei weniger als 3 Winkelsekunden. Für die Ausrichtung der Linearachsen zur optischen Achse wird unter anderem ein Autokollimatorsystem in die Messvorrichtung integriert.

Eine Konstruktionszeichnung der Apparatur ist in Abb. 2 dargestellt. Es ist u.a. die Aufnahmeplatte auf dem Drehtisch zu erkennen, die mittels FEM so berechnet wurde, dass die Lageänderung des Detektors bei Verschiebung der XYZ-Einheit auf dem Schienensystem ≤ 10 Winkelsekunden ist.

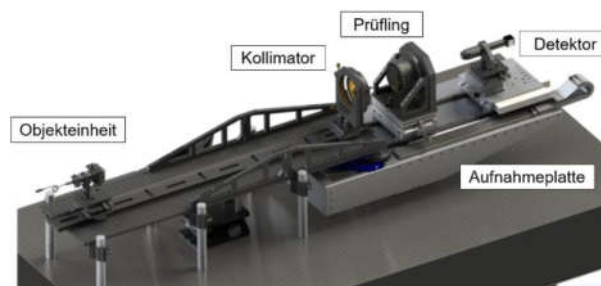


Abb. 2 Konstruktionszeichnung des Referenzaufbaus auf einem optischen Tisch (Maße 240 cm x 120 cm).

4 Einfluss des Detektionsverfahrens auf die Messunsicherheit

Ein weiterer entscheidender Parameter hinsichtlich der Messunsicherheit ist die Scanlänge, innerhalb der die LSF vom Detektor lateral zur optischen Achse vermessen wird. Um die Ausläufer der LSF weit genug aufnehmen zu können, ist für den Detektor ein Dynamikbereich von mehreren Größenordnungen erforderlich. Zudem verschlechtert sich das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) mit zunehmendem Abstand zur optischen Achse. Es wird daher untersucht, wie das unterschiedliche Rauschverhalten der Kanten- und Spaltdetektion genutzt werden kann, um in einem großen Frequenzbereich kleine Messunsicherheiten zu erreichen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden erste Simulationen zu dem Rauschverhalten entwickelt. Die Spalt- bzw. Kantendetektion wird hier durch die Faltung einer beugungsbegrenzten LSF [1] mit einer Rechteck- bzw. Stufenfunktion simuliert. Die MTF wird entsprechend durch Fouriertransformation ermittelt.

In Abb. 3 und Abb. 4 sind die Ergebnisse der MTF für eine LSF mit intensitätsunabhängigem Rauschanteil gezeigt (Beispielprüfling: $F/\#$ 1.7, Wellenlänge 546 nm). Die mittlere Abweichung der resultierenden MTF von der theoretisch erwarteten ist in diesem Modell für die Spaltdetektion geringer. Für kleine Ortsfrequenzen unterhalb von 100 Lp/mm ist dagegen die Abweichung bei der Kantendetektion kleiner.

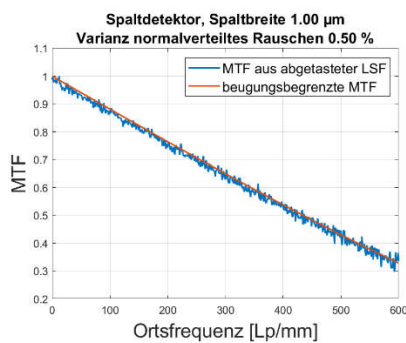


Abb. 3 Simulierte MTF aus Spaltdetektion einer beugungsbegrenzten LSF mit intensitätsunabhängigem Rauschen.

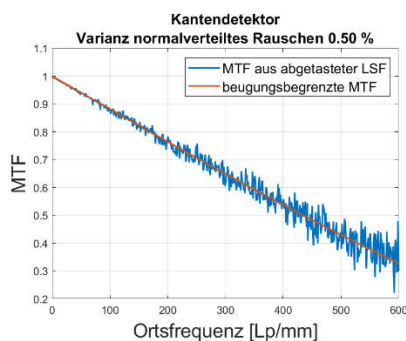


Abb. 4 Simulierte MTF aus Kantendetektion der LSF mit intensitätsunabhängigem Rauschen.

5 Diskussion und Ausblick

Angesichts der Ergebnisse erscheint eine Kombination der Spalt- und Kantendetektion sinnvoll, um den Einfluss des Rauschens auf die MTF gering zu halten. In realen Photodioden dominiert jedoch intensitätsabhängiges Rauschen, welches einen stärkeren negativen Einfluss auf die Kantendetektion hat, da hierbei die über den Scanbereich integrierte LSF aufgenommen wird. Dies gilt es im Weiteren mit realistischen Rauschparametern zu untersuchen.

Um den Einfluss vorhandener Fehler im Messsystem, wie beispielsweise Justagefehler der mechanischen und optischen Komponenten und Geradheitsabweichungen der Achsen, zu untersuchen, wird die Referenzapparatur außerdem mithilfe des Simulationstools SimOptDevice modelliert (Abb. 5). Es basiert auf der geometrischen Modellierung des Systems kombiniert mit optischem Raytracing [2].

Hiermit soll zunächst mithilfe eines virtuellen MTF Messgeräts in der Bildebene eine Sensitivitätsanalyse der unsicherheitsbelasteten Parameter durchgeführt werden. Anschließend wird der Einfluss des Detektionsverfahrens mit einbezogen.

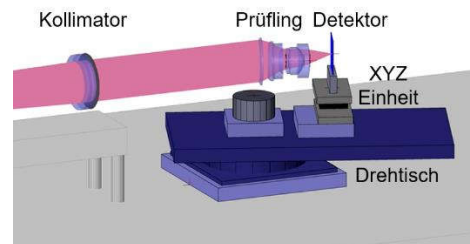


Abb. 5 Simulation der Referenzapparatur mit SimOpt-Device.

Die Referenzapparatur und die Simulationen befinden sich in der Entwicklungsphase. Nach der Justage und Charakterisierung der Apparatur werden die Simulationen gemeinsam mit den experimentellen Untersuchungen zeigen, ob die angestrebte Gesamtunsicherheit von 0,01 erreicht werden kann.

6 Danksagung

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

Literatur

- [1] G. D. Boreman, *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*, (SPIE Press, Bellingham, 2001)
- [2] A. Wiegmann et al., „Accuracy evaluation for sub-aperture interferometry measurements of a synchrotron mirror using virtual experiments“ in: *Precision Engineering* **35**, 183-190 (2011).