

# Entwicklung einer hochpräzisen OTF- und Verzeichnungsmessanlage mit ortsaufgelöster Messunsicherheitsanalyse

Patrik Erichsen, Simone Fohrmann, Kati Schinckel

*Trioptics GmbH, Wedel*

*mailto:patrik.erichsen@trioptics.com*

Zur Bestimmung der Messunsicherheit einer neu entwickelten OTF-Anlage auf Basis von ISO11421 werden die Einflüsse von Gerätekomponenten in Kombination mit Prüflingeigenschaften untersucht. Insbesondere fließen prüflings- und ortsabhängige MTF-Gradienten in die Analyse ein, sodass eine Angabe der MTF-Messunsicherheit für jeden Prüfling ortsaufgelöst möglich ist.

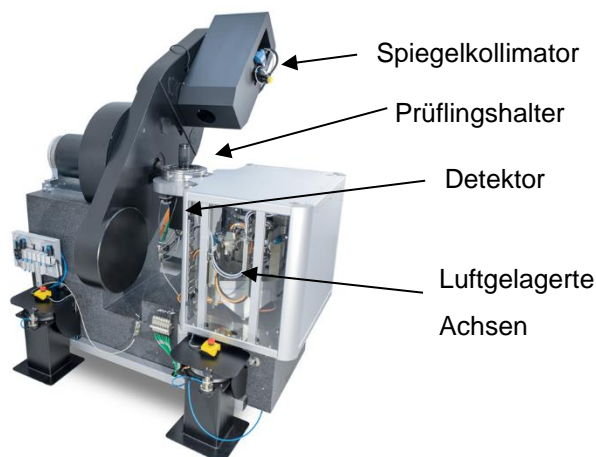
## 1 Einführung

Im Rahmen der Einrichtung eines Labors zur Zertifizierung der MTF von Objektiven wurde ein hochpräzises Messgerät entwickelt. Das Ziel ist, eine Messunsicherheit der MTF unter 0,5MTF% zu erreichen. Um die Messunsicherheit nach ISO11421 zu ermitteln, werden sowohl Geräteeinflüsse als auch Einflüsse der individuellen Prüflinge untersucht und in die Berechnung einbezogen.

Insbesondere die Änderung der MTF in Abhängigkeit von der Messposition im Bildraum führt zu einer Messunsicherheit, die nicht konstant ist, sondern von den Eigenschaften des untersuchten Prüflings abhängt. Während des Messprozesses werden MTF-Gradienten in die verschiedenen Richtungen des Bildraums ermittelt und daraus für die einzelnen Messpositionen jeweils individuelle Messunsicherheiten berechnet.

## 2 Messgerät

Abbildung 1 zeigt ein Foto der Messapparatur.



**Abb. 1** Referenzgerät zur hochpräzisen Vermessung der MTF und Verzeichnung.

Bei der Auslegung wurde größter Wert auf mechanische und thermische Stabilität gelegt. Die

Steuerung der Winkel- und Linearpositionierungen von Komponenten, deren Positionen während des Messprozesses variiert werden, erfolgt mittels Encoder mit höchster Reproduzierbarkeit im Closed-Loop-Verfahren.

## 3 Fehlertypen

Fehlereinflüsse werden hier in zwei Hauptkategorien aufgeteilt. Die erste Kategorie umfasst Einflüsse, die rein geräteabhängig sind und als Konstante behandelt werden können. Hierzu zählen Fehler der objektseitigen Komponenten, wie Objektspalt und Kollimator, und die bildseitigen Einflüsse des Detektors.

Komplexer ist die Betrachtung von Einflüssen, die durch prüflingsabhängige Eigenschaften in die Messunsicherheit einfließen. Hier geht es vor allem um die Variation der MTF in Abhängigkeit von der Messposition im Bildraum. Diese Fehlergrößen werden der zweiten Kategorie zugeordnet.

## 4 Geräteabhängige Einflüsse auf die MTF-Messunsicherheit

Folgende Komponenten werden charakterisiert und Abweichungen ihrer Eigenschaften von herkömmlichen Modellen untersucht:

- Objekt (Spalt)
  - Geometrie
  - Ausleuchtung
- Kollimator
  - Wellenfrontfehler
  - Pupillenausleuchtung
- Detektoroptik
  - Verzeichnung
  - Chromatische Aberration
- Sensor
  - Linearität
  - Pixelgeometrie

Wenn möglich werden mathematische Korrekturen vorgenommen, um den Einfluss auf die MTF-Messunsicherheit zu reduzieren.

## 5 Prüflingsabhängige Einflüsse auf die MTF-Messunsicherheit

Abbildung 2 zeigt ein Schaubild, in dem alle Einzeleinflüsse auf die MTF-Messunsicherheit in sechs Gruppen zusammengefasst werden. Neben dem Einfluss von der Positionsunsicherheit der Detektoreinheit im Bildraum (Bildlage, Detektorposition, Bildfeldposition, Prüflingsazimut), führen auch Unsicherheiten bei der Bestimmung des Abbildungsmaßstabs der Strichplatte in die Messebene und die Gradienten der MTF in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz zu Unsicherheiten in der Messung.

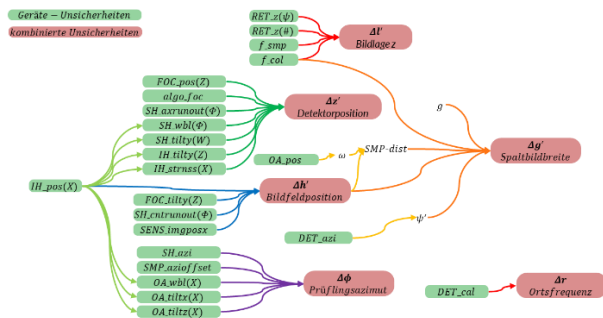


Abb. 2 Zuordnung von messbaren Einzelfehlern in sechs Fehlergruppen.

Für jeden Geräteeinfluss wird unter Berücksichtigung von Prüflingseigenschaften, wie z.B. die MTF-Gradienten, der individuelle Einfluss auf die MTF-Unsicherheit berechnet. Die Kombination aller individuellen Einflüsse ergibt die Gesamtunsicherheit der MTF am Messort für jede Ortsfrequenz.

Als Beispiel wird im Folgenden die Unsicherheit der MTF bedingt durch die MTF-Variation im Bildfeld beschrieben. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für die Abhängigkeit der gemessenen MTF von der Positionierung im Bildfeld (Fokushöhe  $z'$  und Bildhöhe  $h'$ ) und die daraus berechneten Ableitungen nach  $h'$  und  $z'$ . Der Messort ist mit einem „X“ gekennzeichnet und weicht ca. 30  $\mu\text{m}$  von der Fokusposition mit höchster MTF ab.

Für alle Einzelfehler, die in Abbildung 2 dargestellt sind, wird die resultierende MTF-Messunsicherheit für den Messort und die spezifische Messfrequenz berechnet und in einem Balkendiagramm in Abbildung 4 aufgetragen. Der schwarze Balken stellt die Gesamtunsicherheit der MTF dar. Für das gezeigte Beispiel liegt die MTF-Messunsicherheit bei 0,38 MTF% und daher innerhalb der gesetzten Spezifikationen des Messgeräts.

Mit dieser Methode kann neben der MTF-Messunsicherheit eine Beurteilung der Ursachen nach Sensitivität durchgeführt werden. Dadurch sind gezielte Geräteoptimierungen möglich.

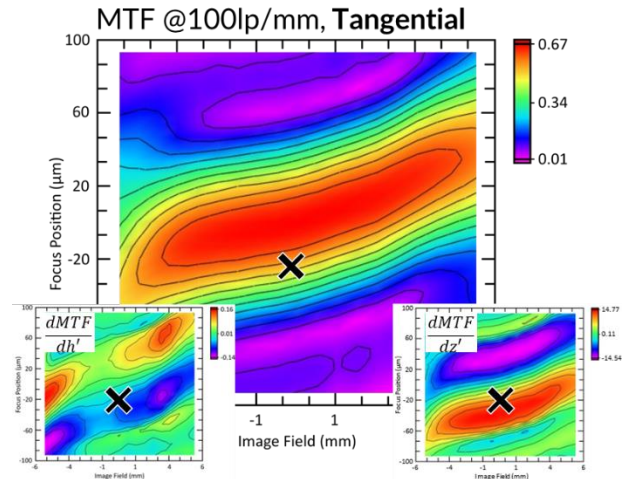


Abb. 3 Variation der MTF-Messwerte im Bildraum und daraus berechnete Ableitungen nach Bildhöhe  $h'$  und Fokushöhe  $z'$ .

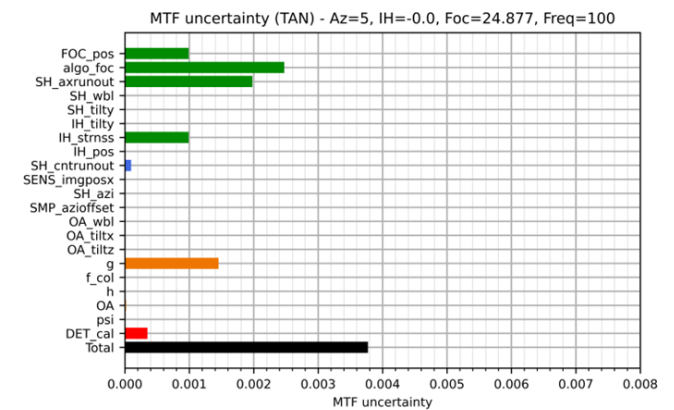


Abb. 4 Einfluss der einzelnen Geräteeinflüsse auf die MTF-Messunsicherheit für eine spezifische Messposition und -ortsfrequenz.

## 6 Fazit und Ausblick

Es wurde ein hochpräzises Messgerät zur Vermessung der MTF und Verzeichnung entwickelt. Für die Messunsicherheitsanalyse in Anlehnung an ISO11421 erfolgt eine Kategorisierung der Einflussgrößen in konstante, geräteabhängige und in prüflingsabhängige Einflussgrößen, die u.a. mit dem Ort variieren, an dem die MTF ermittelt wird. Für jede Einflussgröße wird die MTF-Messunsicherheit separat berechnet.

Mit der vorgestellten Methode der Messunsicherheitsanalyse soll zunächst das vorgestellte Messgerät charakterisiert und verbessert werden, um MTF-Messunsicherheiten von  $<0,5$  MTF% zu erzielen. Im weiteren Schritt ermöglicht das Verfahren, die Unsicherheiten der MTF-Messungen für jeden Prüfling ortsaufgelöst anzugeben.