

Bestimmung des Fokuspunkts bei Messung der Modulationstransferfunktion MTF

Hanno Dierke, Markus Schake

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

<mailto:hanno.dierke@ptb.de>

Die Modulationstransferfunktion (MTF) ist eine häufig verwendete Größe zur Beschreibung der Abbildungseigenschaften optischer Elemente. Für Vergleiche von Messungen ist die Angabe einer Referenzposition erforderlich, üblicherweise der Fokuspunkt (Maximalwert der MTF für Messung entlang der optischen Achse). In diesem Beitrag werden Methoden zur Bestimmung des Fokuspunkts verglichen.

1 Einleitung

Die MTF ist eine Kenngröße, die üblicherweise zur Charakterisierung der Abbildungseigenschaften von optischen Elementen verwendet wird. Der Grund dafür ist, dass sie Informationen sowohl über die Auflösung als auch über Fähigkeiten des optischen Elements der Übertragung des Objektkontrasts in den Bildraum enthält. Zudem ist es möglich, die MTF auf Basis der Designparameter zu berechnen, so dass Abweichungen von der berechneten MTF einen Hinweis auf vorliegende Abbildungsfehler geben.

An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wird derzeit eine Messeinrichtung zur rückführbaren Bestimmung der MTF im Bildfeld (Feldwinkel aktuell $\theta = \pm 20^\circ$) in Anlehnung an das in ISO 9335 [1] vorgeschlagene Verfahren aufgebaut [2, 3, 4]. Insbesondere für die Bestimmung der Winkelabhängigkeit der MTF sowie für den Vergleich von Messungen ist die Angabe einer Referenzposition erforderlich. Üblicherweise wird dabei der Fokuspunkt P_f verwendet, welcher die Position kennzeichnet, an der die MTF für eine bestimmte Ortsfrequenz und bei Messung entlang der optischen Achse („Fokusscan“, Feldwinkel $\theta_0 = 0^\circ$) ihren Maximalwert erreicht. Für die Bestimmung des Fokuspunkts werden verschiedene Ansätze verglichen.

2 Bestimmung des Fokuspunkts P_f

2.1 ... aus dem Datenmaximum

Bei diesem Ansatz wird die z -Koordinate $z(P_f)$ des Fokuspunkts durch den Datenpunkt mit dem höchsten MTF-Wert repräsentiert. Da ein Maximalwert in den meisten Messergebnissen vorliegt, ist dieser Ansatz sehr robust. Liegt jedoch der eigentliche Fokuspunkt zwischen zwei Messwerten, können Messabweichungen auftreten, die direkt mit dem Messpunktstand d_m korrelieren (Intervallbreite $\Delta_{P_f, \text{Datenmax.}} = \pm 1/2 d_m$).

Dies ist in Abb. 1 deutlich erkennbar, in der die Ergebnisse der Bestimmung des Fokuspunkts P_f aus dem Datenmaximum für 20 Messwiederholungen

dargestellt sind. Die so ermittelten Fokuspunkte liegen etwa $5 \mu\text{m}$ auseinander – entsprechend dem gewählten Messpunktstand.

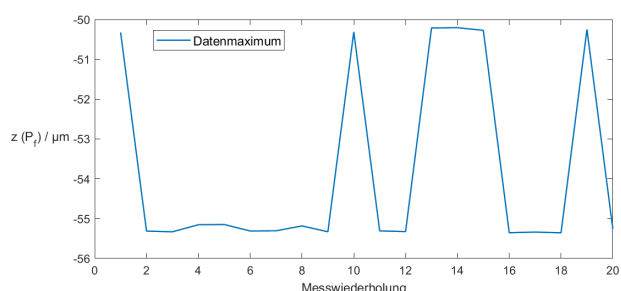


Abbildung 1 Aus dem Datenmaximum bestimmte Fokuspunktposition $z(P_f)$, Fokusscan mit Messpunktstand $d_m = 5 \mu\text{m}$, 20 Wiederholungsmessungen

Dies bedeutet jedoch auch, dass Auswirkungen kleinerer Änderungen in den Umgebungsbedingungen auf die Fokusposition wie zum Beispiel der Raum- oder Kamertemperatur [3] nicht erkannt werden, sofern sie nicht zu einem Sprung zum nächsten Datenpunkt führen.

2.2 ... aus Anpassung der Messdaten durch Polynome verschiedenen Grades

Aus den genannten Gründen wurde die Anpassung der Messdaten durch ein Polynom und die Bestimmung dessen Maximalwerts im Messbereich als verbesserter Ansatz untersucht. Die Messdaten in der Mitte des Fokusscans wurden dabei durch Polynome 2. bis 10. Grades angepasst. Die Auswahl des Anpassungsbereichs erfolgte durch Vorgabe einer Anzahl von Messpunkten, zukünftig kann dies jedoch auch durch Festlegen eines Prozentsatzes des maximalen MTF-Werts erfolgen.

Die Auswertung folgte dabei den folgenden Schritten und Randbedingungen:

- Anpassung der Messdaten mittels der NumPy `polyfit` Methode
- Die Position des Fokuspunkts $z(P_f)$ resultiert

aus der Nullstelle der ersten Ableitung des Polynoms, falls diese

- eine reelle Zahl ist,
- im erfassten Messbereich liegt und
- die zweite Ableitung des Anpassungspolynoms an der ermittelten Position positiv ist.

Zum Vergleich der Anpassungsgüte der verschiedenen Polynomgrade wurden die Residuen durch Vergleich der gemessenen und der aus dem Anpassungspolynom berechneten MTF-Werte an den jeweiligen Messpositionen bestimmt. Dabei ergaben sich die in Abb. 2 dargestellten Werte: Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Anpassung durch ein Polynom 2. bzw. 3. Grades noch stärkere Abweichungen von den Messdaten zu beobachten sind. Diese Abweichungen können durch Anpassung mit einem Polynom 4. Grades signifikant reduziert werden (durchgezogene/gelbe Linie in Abb. 2). Höhere Polynomgrade führen zwar zu einer weiteren Verbesserung der Anpassung, allerdings sind diese Verbesserungen nur noch gering und gehen zudem mit einem höheren Risiko einher, dass im Messbereich nur komplexe Nullstellen des Polynoms ermittelt werden.

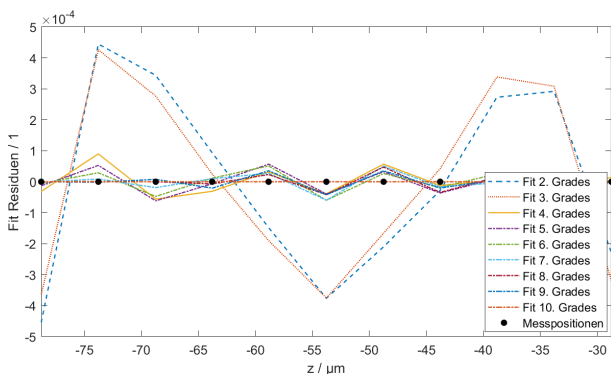


Abbildung 2 Residuen aus der Anpassung der gemessenen MTF-Werte für Polynome 2. bis 10. Grades.

2.3 ... entsprechend der Norm ISO 9335

In der Norm ISO 9335:1995 [1] wird für die Bestimmung des Fokuspunkts für symmetrische Defokuskurven ein weiteres Verfahren vorgeschlagen, welches jedoch in dem hier vorgestellten Vergleich nicht berücksichtigt wurde. Nach ISO 9335 kann der Fokuspunkt als Mittelpunkt des Intervalls bestimmt werden, das durch die Schnittpunkte der MTF Kurve mit einem festgelegten Schwellenwert (prozentualer Anteil des Maximalwerts) festgelegt ist. Dabei werden die Messdaten der auf- und der absteigenden Flanke der Fokuskurve durch lineare Fits in der

Umgebung des Schwellenwerts – zum Beispiel 50% des Maximalwerts – angepasst und die z -Positionen der Schnittpunkte der Fitgeraden mit dem gesetzten Schwellenwert ermittelt. Der Mittelwert beider Positionen entspricht dem gesuchten Fokuspunkt P_f .

Vorteil dieser Art der Bestimmung des Fokuspunkts ist, dass im Anpassungsbereich ein hoher Gradient der Kurve vorliegt und so der Fokuspunkt mit einer geringeren Unsicherheit bestimmt werden kann. Es ist jedoch zu beachten, dass für nicht-symmetrische Fokuskurven die Flanke der Fokuskurve mit der geringeren Steigung stärker gewichtet wird und der auf diese Weise bestimmte Mittelpunkt beider Positionen nicht dem tatsächlichen Fokuspunkt entspricht.

3 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Beitrag wurden verschiedene am MTF-Messaufbau der PTB untersuchte Ansätze zur Bestimmung des Fokuspunkts – ein Referenzwert beispielsweise für Vergleiche von MTF-Messungen – beschrieben. Dieser Wert kann im einfachsten Ansatz aus dem Datenmaximum bestimmt werden. Aufgrund der großen Unsicherheit sollte diese Methode jedoch nicht zur Festlegung des Fokuspunkts angewendet werden, kann aber zur Eingrenzung des Bereichs des Maximums in der Fokuskurve dienen. Unsere Untersuchungen zeigen, dass die Anpassung der Messdaten mit einem Polynom 4. Grades und die Bestimmung dessen Maximalwerts im Messbereich die besten Ergebnisse hinsichtlich Anpassung der Messdaten und Robustheit liefert.

Literatur

- [1] International Organization for Standardization, "ISO 9335:1995 : Optics and photonics – Optical transfer function – Principles and procedures of measurement," (1995). URL <https://www.iso.org/standard/17017.html>.
- [2] M. Schenker, M. Stavridis, M. Schulz, and R. Tutsch, "Effects of misalignments on the modulation transfer function measurement of camera lenses analyzed in optomechanical simulations," *Optical Engineering* **59**(3), 1 – 17 (2020). URL <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.3.034101>.
- [3] M. Schake and M. Schulz, "Influence of camera temperature on MTF measurements with finite image distance," in *EOSAM-Proceedings 2022*, 266, 10018 (EPJ Web of Conferences, 2022).
- [4] M. Schake and M. Schulz, "Influence of camera exposure time on MTF measurements in not ideally linear systems," in *DGaO-Proceedings 2022*, 123 B20 (DGaO, 2022). URL [urn:nbn:de:0287-2022-B020-9](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0287-2022-B020-9).