

Modellierung von Wellenfront-Aberrationen: Fitfehler und Retracefehler

Johannes Schindler, Goran Baer, Christof Pruss, Wolfgang Osten
Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart
mailto:schindler@ito.uni-stuttgart.de

Ein Indikator für die Genauigkeit einer Wellenfrontbeschreibung sind die Fit-Residuen. Dieser Beitrag zeigt, dass es nicht ausreicht, allein diese Größe zu minimieren. Der Grund liegt im Auftreten so genannter Retrace-Fehler. Es wird an Hand von Simulationsergebnissen gezeigt, dass die Genauigkeit hingegen durch die geschickte Auswahl von Basisfunktionen erhöht werden kann.

1 Einleitung

Ein effizientes Mittel zur Modellierung der Eigenschaften von optischen Systemen ist die Beschreibung von Wellenfronten durch Polynome. Üblicherweise verwendet man hier Zernike-Polynome, die auf dem Einheitskreis vollständig und orthogonal sind. Sowohl die Feld- als auch die Apertur-Abhängigkeit können durch eine doppelte Entwicklung in Zernike-Polynome, d.h. eine Matrix von Koeffizienten, erfasst werden [1]. Eine Anwendung ergibt sich in der Tilted-Wave-Interferometrie [2]. Da man vom Nulltest abweicht, ist eine feldabhängige Kalibrierung des Instruments notwendig. Der Interferometerzustand wird durch die Wellenfronten in zwei Referenz-Ebenen charakterisiert. Da nicht nur eine Quelle zur Beleuchtung eingesetzt wird, ist es nötig, auch die Feldabhängigkeit mit zu beschreiben, sodass sich für Beleuchtung und Abbildung jeweils ein vierdimensionales Polynom ergibt.

2 Fitfehler

Die Beschreibung einer Wellenfront durch einen Satz von Polynomfunktionen hat prinzipiell nur eine endliche Genauigkeit. Die Residuen, d.h. die Fitfehler, sind die Differenz zwischen realen, gemessenen und den von der Polynombeschreibung reproduzierten optischen Weglängen. Die Größe und Verteilung dieser Residuen hängt ab vom maximalen Polynomgrad, von der verwendeten Basis und von der Zahl und Verteilung der Stützstellen. Bei der Rekonstruktion der Polynomkoeffizienten in einem inversen Problem wird der RMS-Wert des Fitfehlers minimiert. Abb. 1 zeigt den Fitfehler in Abhängigkeit der Anzahl der verwendeten Koeffizienten. Es wird klar, dass der Fitfehler mit zunehmender Anzahl an Koeffizienten sinkt. Limitierend sind in diesem Fall das Rauschen und die Störungen, die sich nicht durch Polynome beschreiben lassen.

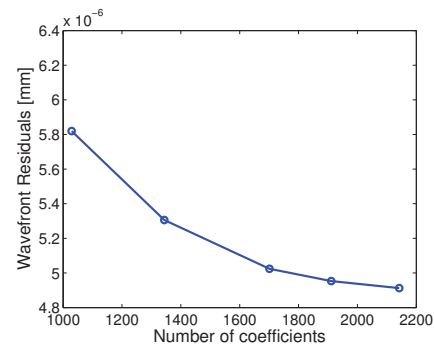


Abbildung 1 Fitfehler in Abhängigkeit des Polynomgrads

3 Problematik: Retrace-Fehler

Verwendet man nun eine Polynom-Beschreibung für die Wellenfront, um Ray-Tracing auf eine Fläche im Prüfraum zu beschreiben, so entstehen zusätzlich zu den Fitfehlern noch Retrace-Fehler. Diese sind allerdings abzugrenzen von der üblichen Definition des Retrace-Fehlers als Abweichung vom Nulltest. Diese Abweichung ist durch die Kalibrierung bereits erfasst, allerdings mit einer gewissen Restunsicherheit behaftet. Der Zusammenhang ist in Abb. 2 veranschaulicht. In rot ist symbolisch ein Strahl eingezeichnet, der zur wahren Wellenfront gehört, in schwarz ist ein Strahl eingezeichnet, der sich ergibt, wenn die reale Wellenfront nur mit endlicher Genauigkeit angenähert wird. Zur besseren Übersicht ist hier nur eine Referenzebene eingezeichnet. Ein Fehler in der Wellenfrontbeschreibung führt dazu, dass Strahlen unter einem anderen Winkel aus der Referenzebene austreten, dann an einem anderen Ort auf den Prüfling treffen und auch auf dem Rückweg durch das System scheinbar einen anderen Weg nehmen als für die reale Wellenfront. Dieser Retrace-Fehler ist offensichtlich prüflingsabhängig und ist ein systematischer Beitrag im Fehlerbudget für das Messergebnis.

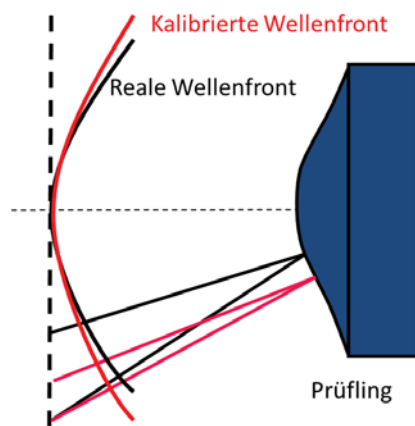


Abbildung 2 Entstehung von Retrace-Fehlern

Um eine Abschätzung zu erhalten, wird die Differenz zwischen kalibrierten und realen optischen Weglängen auf den Prüfling projiziert. Im Folgenden wird dieser Kalibrier-Fehler für drei verschiedene Prüflinge untersucht, eine recht starke Asphäre DemA5, einer Freiform FFA5, die zusätzlich noch einen Astigmatismus von 800 μm aufweist, und einer Asphericon-Asphäre A12-25 mit kleinem Krümmungsradius und schwacher Asphärität.

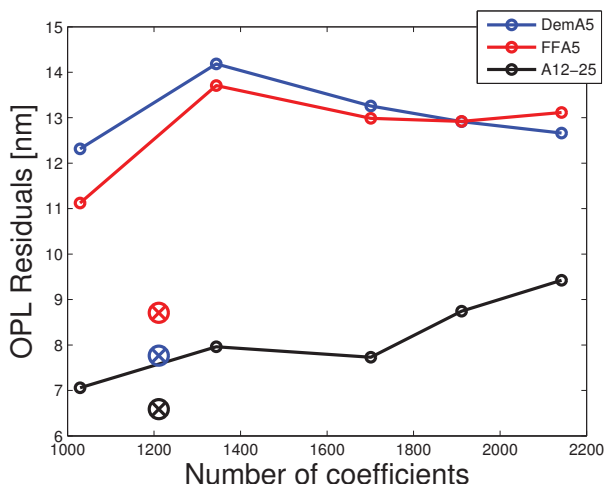


Abbildung 3 Gesamter Kalibrier-Fehler

Man könnte nun versuchen, den Kalibrierfehler zu minimieren, in dem man die Anzahl der Koeffizienten erhöht und somit die Weglängen der Kalibrierstrahlen genauer erklärt. Abb. 3 zeigt allerdings, dass dies nicht funktioniert. Trotz einer Reduktion des Fitfehlers erzielt man keine Reduktion des gesamten Kalibrierfehlers. Das verwendete Modell wird mit einer höheren Zahl an Koeffizienten zwar vollständiger, allerdings sind die einzelnen Koeffizienten auch mit höheren Fehlern behaftet.

4 Lösungsansatz

Aus Abb. 2 geht hervor, dass dem Gradient der Wellenfront eine entscheidende Rolle für das Ray-Tracing zukommt. Insbesondere im Hinblick auf die oben skizzierten Retrace-Fehler erscheint es

sinnvoll, das Modell so aufzustellen, dass die Gradienten richtig reproduziert werden. Der Ansatz in der hier vorgestellten Arbeit besteht darin, die Basisfunktionen auszuwählen, die den größten RMS-Beitrag zum Gradient der Wellenfront leisten. Die Implementierung dieses Ansatzes ist äußerst einfach und erfordert keinerlei zusätzliche Berechnungen von Funktionen, sondern lediglich die Maskierung einiger Basisfunktionen.

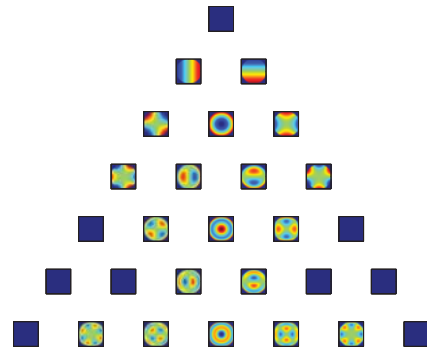


Abbildung 4 Verwendete Zernike-Funktionen

Abb. 4 zeigt die verwendeten Terme bis zur 6. radialen Ordnung, die blau gefärbten Terme sind als Variablen aus dem inversen Problem gestrichen. Die Auswahl dieser Terme geschieht nur für die apertur-abhängigen Terme, da diese unmittelbar relevant für das Ray-Tracing im Prüfraum sind.

5 Ergebnisse

In Abb. 3 sind die Ergebnisse für den ausgewählten Polynomsatz mit kreuzförmigen Symbolen eingezeichnet. Für alle drei Prüflinge ergibt sich eine deutliche Reduktion des Kalibrierfehlers um bis zu 30 % bei Verwendung einer geringen Anzahl an Koeffizienten.

6 Diskussion

Es wurde gezeigt, wie die Genauigkeit und Robustheit der Polynom-Beschreibung durch die Beschränkung auf die für das Ray-Tracing entscheidenden Basis-Funktionen gesteigert werden kann. An dieser Stelle bringt es Gewinn, nicht ein vollständigeres Modell mit möglichst vielen Parametern, sondern ein robusteres Modell mit weniger, aber besser bestimmten Parametern zu verwenden.

Literatur

- [1] J. J. M. Braat and A. J. E. M. Janssen, "Double Zernike expansion of the optical aberration function from its power series expansion," *J. Opt. Soc. Am. A* **30**(6), 1213–1222 (2013).
- [2] G. Baer, J. Schindler, C. Pruss, and W. Osten, "Measurement of Aspheres and Free-Form Surfaces with the Tilted-Wave-Interferometer," in *Fringe 2013*, W. Osten, ed., pp. 87–95 (Springer Berlin Heidelberg, 2014).