

1 Einführung

Optische Technologien sind wesentliche Schlüsselkomponenten und Garant für funktionale Innovationen in allen Bereichen unseres täglichen Lebens. Sie bieten Lösungen für die globalen Herausforderungen unserer Zeit und verfügen zugleich über ein enormes wirtschaftliches Potenzial [SPOP15, S. 1]. Hintergrund dieser positiven Kombination von Eigenschaften ist die Doppelfunktion als einerseits eigenständige innovative Technologie und andererseits als wichtiger Befähiger für umfassende Systemlösungen in einer Vielzahl von Industriebereichen [SVBZ13, S. 10]. Daher ergeben sich durch die geschickte Verknüpfung mit optischen Technologien häufig wegweisende Lösungsmöglichkeiten komplexer technischer Anforderungen, die nicht nur im produktionstechnischen Umfeld eingesetzt werden, sondern auch im täglichen Leben allgegenwärtig sind.

Als Beispiele sei hier auf Head-Up-Displays im Automobilbau [WINN12, S. 334 ff.], kleinste scannende oder bildgebende Optikkomponenten in Mobiltelefonen [KAST10, S. 34; MMJP09, S. 54] oder Mikrooptiken zur Strahlformung, etwa in der Medizintechnik, verwiesen [WEBE13, S. 54 ff.]. Besonders augenfällig ist in diesem Zusammenhang der hohe Deckungsgrad der betreffenden Branchen mit den andauernden Megatrends wie Mobilität und Kommunikation, aber auch den Bereichen Sicherheit, Energie und Gesundheit. In Summe erzielt die Photonik so eine beträchtliche Hebelwirkung mit enormer Strahlkraft über individuelle Branchengrenzen hinaus.

Wesentlicher Treiber für die auch künftig positive Entwicklung der Photonik ist die zunehmende Funktionsintegration und der damit verbundene Schulterchluss zwischen den optischen Technologien und der Elektronik [BMBF11, S. 24]. Durch die Entwicklung derartiger integrierter Systeme erfahren die bisherigen Fertigungs- und Montageprozesse eine erhebliche Vergrößerung ihrer Komplexität, bei gleichzeitig höchsten Ansprüchen an klassische Produktionseigenschaften wie Qualität und Wirtschaftlichkeit. Wird darüber hinaus der ungebrochene und für zahlreiche Applikationen notwendige Trend zur Miniaturisierung berücksichtigt, kann diesem ebenso vielschichtigen wie dichotomen Anforderungsprofil nur durch adäquate Produktionstechnologien begegnet werden.

Dies trifft in besonderer Weise auf mehrkomponentige optische Systeme zu, da Verbesserungen ihrer optischen Eigenschaften oder neuartige Funktionalitäten oft durch eine größere Anzahl an Elementen oder eine höhere Komplexität der geometrischen Funktionsflächen erzielt wird. Beide Möglichkeiten stellen für die Justage- und Montagetechnik eine große Herausforderung dar. Die messtechnische Erfassung der Relativposition der Elemente und Funktionsflächen zueinander ist einerseits bei einer großen Anzahl an Elementen sehr anspruchsvoll, da z. B. das bis zur gerade gemessenen Funktionsfläche durchdrungene optische System berücksichtigt werden muss. Andererseits trägt auch die Geometrie der Funktionsfläche zur Komplexität bei, weil die Orientierung asphärischer Komponenten nur mit aufwendiger Zusatzsensorik und die freigeformter Flächen oft gar nicht erfasst werden kann.

Für diese Herausforderungen bietet die wellenfrontbasierte Justage optischer Systeme einen vielversprechenden Ansatz. Sie stellt die attraktive Möglichkeit bereit, die funktionellen und

geometrischen Eigenschaften auch komplexer optischer Systeme effizient und hochpräzise beurteilen zu können und adressiert damit die skizzierten Limitationen in der Fertigung innovativer optischer Systeme. Die Effektivität dieser Methode basiert u. a. auf der Möglichkeit, die von zahlreichen Einflussfaktoren abhängige optische Funktionalität eines Systems in nur einer Messung zu prüfen, wodurch das Messergebnis direkt mit der Qualitätsprüfung des Systems verbunden ist. Auf diese Weise kann nicht nur ein unmittelbarer Beitrag der Messtechnik zur Wertschöpfung geleistet, sondern auch die aufwendige und damit kostenintensive Einhaltung unnötiger Fertigungstoleranzen in vorgelagerten Prozessschritten verhindert werden. Schlüsselfaktor hierfür sind maßgeschneiderte und beherrschte messtechnische Systeme und Sensoren für zuverlässige Aussagen über die Fähigkeit der (Prüf-)Prozesse, die erreichte Qualität, sowie deren Steuerung innerhalb entsprechender Regelkreise [DISH07, S. 80 ff.; PFEI01, S. 357 ff.; SCPF10, S. 528 ff.].

Gerade der Aspekt eines geschickten Toleranzmanagements erhält vor dem Hintergrund zunehmend vernetzter Wertschöpfungsketten auch im Umfeld der Optik einen immer stärkeren Fokus. Das Paradigma *einer* Fertigungstoleranz für *einen* Prozessschritt muss zu Gunsten variabler Prozessparameter und Fertigungstoleranzen auf Basis der Komponentenhistorie und den Einflussmöglichkeiten in verbleibenden Prozessschritten geändert werden. Nur durch ein derartig effektives Toleranzmanagement erhalten Fertigungsketten die notwendige Adaptivität, um auch künftige Produktgenerationen optischer Systeme effizient fertigen zu können. Der Ansatz der aktiven wellenfrontbasierten Justage kann hierfür einen entscheidenden Hebel bereitstellen.

Mit der vorliegenden Arbeit soll daher ein Beitrag geleistet werden, die theoretischen Potenziale der wellenfrontbasierten Justage als einen Teilaspekt vernetzter adaptiver Produktion zu erforschen und in die konkrete Anwendung zu übertragen. Ergänzt um entsprechende Untersuchungen zu den praktisch erzielbaren Messunsicherheiten und dem Messsystemverhalten kann damit der effektive Nutzen dieses Ansatzes im produktionstechnischen Umfeld umfassend bewertet werden.

1.1 Hintergrund und Kontext des Forschungsansatzes

Traditionell werden optische Elemente und Komponenten durch Verfahren der direkten (Schleifen und Polieren) und replikativen Fertigung (Spritzgießen, Blankpressen etc.) hergestellt [HUKR12, S. 4]. Entsprechend der gewünschten optischen Funktion gilt es anschließend, die Einzelkomponenten mit hoher Präzision zueinander auszurichten. Im heutigen produktionstechnischen Umfeld erfolgt dies in der Regel anhand unterschiedlicher Verfahren der passiven und aktiven Justage. Ein Beispiel hierfür ist die autokollimationsbasierte Erfassung der optischen Achse einer Komponente und die nachfolgende Bearbeitung ihrer Fassung, damit optische und mechanische Achse übereinstimmen und die Montage mehrerer Elemente in einem Tubus ermöglicht wird.

Nicht nur die Präzision und Effizienz solcher Verfahren ist limitiert, es gibt auch grundsätzliche technische Restriktionen, z. B. in der Charakterisierung stark gekrümmter Asphären oder frei geformter Funktionsflächen, wie sie typisch für innovative optische Systeme sind. Dies gilt

umso mehr, als dass bereits geringe Unsicherheiten im Bereich weniger μm ausreichend sind, um die optische Funktion eines Gesamtsystems wesentlich zu beeinträchtigen. Dabei ist ferner zu berücksichtigen, dass der negative Einfluss von Positionierungsunsicherheiten in der Justage mit der Brechkraft der optischen Elemente steigt, durch die insbesondere die kompakten Systeme der Mikrooptik gekennzeichnet sind.

Dieser Herausforderung kann durch die Erfassung der optischen Funktion des Systems begegnet werden, aus deren Parametern im Vergleich mit der Sollfunktion geeignete Korrekturanweisungen ableitbar sind. Ein solches Vorgehen wird dadurch möglich, dass sich im Gegensatz zur Erfassung jeder einzelnen Funktionsfläche das mehrelementige optische Gesamtsystem über die Ermittlung der Wellenfront in nur einer Messung vollständig charakterisieren lässt.

Als geeignetes Werkzeug zur Funktionsprüfung bietet sich die Shack-Hartmann-Sensorik an, die mehrere wesentliche Vorteile miteinander verknüpft, da sie dreidimensionale Informationen der Wellenfront mit einer hohen Dynamik quasi in Echtzeit bereitstellt. Die für andere Applikationen zu geringe laterale Auflösung stellt aufgrund der eher niedrigen Anzahl an genutzten Koeffizienten als Repräsentanten der Wellenfront für den Anwendungsfall der wellenfrontbasierten Justage keinen begrenzenden Faktor dar. Vielmehr kommt es auf eine möglichst (wiederhol-)präzise Erfassung der Wellenfront an, die durch bestimmte Sensorkonfigurationen, z. B. durch lange Brennweiten der beteiligten Mikrolinsen, erreicht werden kann.

Auf Basis einer polynomialen Zerlegung der Wellenfront sind hiernach ihre charakteristischen Eigenschaften gezielt bestimmbar, weil Aberrationen individuellen Koeffizienten zugeordnet werden können, wie sie beispielsweise von den Seidel-Aberrationen bekannt sind. Allerdings ist diese Zuordnung nicht eineindeutig, wodurch komplexe wechselseitige Abhängigkeiten entstehen, deren Auflösung die gleichzeitige Berücksichtigung einer Vielzahl von Koeffizienten und Freiheitsgrade des Betrachtungsraums erfordert. Dabei lässt sich über eine geschickte Wahl der Parameter der zugehörigen Algorithmik wesentlicher Einfluss auf die Güte und Effizienz der Berechnung nehmen, wodurch sich das Verfahren in Abhängigkeit des zu justierenden Systems individuell auslegen lässt. Die so gewonnenen Informationen bergen einen doppelten Nutzen: einerseits im Abgleich mit dem optischen Design zur hochgenauen sowie effizienten Justage des Systems und andererseits als Instrument der gleichzeitigen Inline-Qualitätssicherung.

1.2 Konzept und Aufbau der Untersuchung

Die vorliegende Arbeit folgt in Struktur und Aufbau der Vorgehensweise für angewandte Forschung und erörtert ein allgemeines Lösungsverfahren für konkrete Problemstellungen in der Praxis [ULLR81, S. 11]. Insofern orientieren sich die Abschnitte dieser Arbeit an den jeweiligen Phasen der angewandten Forschung als Bezugsrahmen und können diesen zugeordnet werden [ULLR81, S. 20].

Abschnitt 1 der Arbeit führt an den Themenbereich der Justage optischer Systeme heran und erläutert Herausforderungen und Randbedingungen für entsprechende Verfahren. Mit der