

1 Einleitung

Die Photonik wird aufgrund der zahlreichen, ständig wachsenden Anwendungsfelder und der damit erschließbaren Marktsegmente als »Enabling Technology« bezeichnet [SPEC13]. Vor diesem Hintergrund wird der Optikbranche sowohl eine wichtige technologische als auch wirtschaftliche Hebelwirkung auf andere Industrien und Wissenschaftszweige zugesprochen. Die heute global umworbene Schlüsseltechnologie ist im internationalen Wettbewerb dabei nicht nur Innovationstreiber für neue Verfahren, sondern optische Technologien werden dabei zunehmend selbst zum Produkt [LEIB10].

Mikrooptische Komponenten stellen innerhalb der Photonik elementare Funktionsbausteine vieler Applikationen in einem breit gestreuten Anwendungsspektrum dar. Sowohl der Trend zur Miniaturisierung und Integration vieler Produkte und Komponenten als auch die vermehrte Datenerfassung mit Hilfe von Sensorik lässt den Bedarf an kompakten optischen Bauelementen und Systemen steigen. Diese Entwicklung ergibt sich nicht nur aus neu geschaffenen technologischen Möglichkeiten, sondern wird vielmehr aus der Notwendigkeit begünstigt, Funktionalität und Praktikabilität von Systemen zu steigern und gleichzeitig Kosten zu senken. [GMM08] Das enorme Potential mikrooptischer Systeme zeigt sich bereits heute in zahlreichen Branchen, wie der industriellen Produktion, in optoelektronischen Endgeräten der Messtechnik, der Medizintechnik und der Konsumgüterbranche (vgl. Bild 1.1). Derartige intelligente, miniaturisierte optische Systeme sind Kernkomponenten zahlreicher zukunftssträchtiger Milliardenmärkte und gelten daher innerhalb der Mikrosystemtechnik als wichtige Querschnittstechnologie für alle optischen Anwendungen. [BÄUM11], [BEIC05], [GMM08], [SCHI12]

Das große Anwendungsfeld derartiger optischer Systeme wird in den kommenden Jahren zu einem großen Bedarf an Produktionskapazitäten für hochauflösende, abbildende Mikrooptiksysteme führen. Hervorzuheben ist insbesondere die Branche der Konsumgüterindustrie, wo beispielsweise Kunststoffoptiken mit nur wenigen Millimetern Durchmesser als Kameraobjektive eingesetzt werden. Dabei überwiegt die Verwendung vor allem im Bereich der Mobiltelefone (weltweiter Absatz 2016: 1,48 Mrd. Smartphones). Die Produktion dieser optischen Elemente und Systeme wird derzeit vor allem vom asiatischen Markt dominiert. [EBER06], [INTE16], [YOLE15]

Um die Produktfunktion mikrooptischer Systeme zu gewährleisten bzw. erst zu ermöglichen, erfordern optische Systeme höchste Präzision bei der Fertigung der einzelnen Mikrooptiken. Als massentaugliche Fertigungstechnologie für Kunststoff-Mikrooptiken kommt insbesondere das Spritzgießverfahren zum Einsatz. Gerade in den letzten Jahren werden aufgrund innovativer und qualitativer Fortschritte bei transparenten Polymerwerkstoffen in zunehmendem Maße optische Kunststoffe anstelle von anorganischen Gläsern für hochpräzise optische Mikrokomponenten eingesetzt. Maßgeblich wird das Substitutionspotenzial von optischen Kunststoffen durch das geringe spezifische Gewicht, die gute Urformbarkeit, geringe Fertigungskosten, die Möglichkeit der Integration mechanischer Funktionen sowie die schnelle und flexible Umsetzbarkeit

einer nahezu beliebig komplexen Formteilgestalt begründet [LUCE08], [MICH07], [SCHI06].



Bild 1.1: Anwendungsbeispiele für Kunststoff-Mikrooptiken

Application examples of polymer micro-optics

Steigende Anforderungen an die Abbildungsqualität hochpräziser Mikrooptiken (dynamisch abbildende Anwendungen, Ultra-HD-Auflösung) lassen die aktuell eingesetzte konventionelle Spritzgießtechnologie jedoch an technologische Grenzen stoßen, da die erforderlichen Toleranzen bspw. aufgrund von unzureichend angepassten Werkzeugkonzepten nicht reproduzierbar eingehalten werden können. Diese Problematik kann bei der Herstellung von Kunststoff-Mikrooptiken für Konsumgüterprodukte im Spritzgießprozess bereits heute häufig zu einer hohen Ausschussrate führen [BÄUM11], [LEE14], [MÜLL05], [YEN07]. Um die Funktionalität zukünftiger Mikrooptiksysteme zu gewährleisten bzw. erst zu ermöglichen, besitzen diese signifikant höhere Toleranzanforderungen bis in den Submikrometerbereich. Dies wiederum setzt höchste Präzision bei der Fertigung der einzelnen transmissiven Kunststoff-Mikrooptiken im Spritzgießverfahren voraus. Eine einfache Überführung der derzeit eingesetzten Herangehensweise zur produktspezifischen Fertigung von Kunststoff-Mikrooptiken der Konsumgüterbranche ist insbesondere für eine marktübergreifende Verbreitung von optischen Hochtechnologiemodulen in Hochlohnländern wie Deutschland aus ökonomischen Gründen daher nicht zielführend. Dies gilt umso mehr für eine wirtschaftliche Produktion von Mikrooptiken in Branchen mit vergleichsweise kleineren Stückzahlen (≈ 100 Tsd. Stück/a) und deutlich höheren Qualitätsanforderungen, wie sie in der Medizin- und Sensortechnik vorliegen bzw. in Zukunft zu erwarten sind [EBER06], [GVRE17].

Trotz der vielfältigen und anspruchsvollen Anforderungen im Bereich der Herstellung von Kunststoff-Mikrooptiken bietet das Spritzgießverfahren, als eines der ältesten Kunststoffverarbeitungsverfahren, Potenzial für Forschung und Entwicklung. In die-

sem Zusammenhang mangelt es derzeit jedoch an Untersuchungen, in denen der systematische Einfluss des Werkzeugkonzepts auf die Replikationsqualität von Mikrooptiken in Wechselwirkung mit Spritzgießparametern wissenschaftlich erforscht wurde. Sonderverfahren wie das Spritzprägen kommen bei der Mikrooptikfertigung bislang nur vereinzelt zum Einsatz. Neben der höheren Komplexität und den damit verbundenen höheren Kosten bei der eingesetzten Werkzeugtechnik ist dies insbesondere damit zu begründen, dass nur wenige Erkenntnisse vorliegen, für welche Anwendungsfälle einer Mikrooptik die jeweilige Verfahrensvariante sinnvoll eingesetzt werden kann und welche Aspekte bei der Entwicklung eines geeigneten Werkzeug- und Replikationsprozesses zu beachten sind.

Mit der vorliegenden Arbeit soll demzufolge ein entscheidender Beitrag zur Umsetzung hochpräziser Sonderwerkzeug- und Prozessvarianten der Spritzprägefertigung von Mikrooptiken geleistet werden. Die zentrale Zielsetzung liegt dabei in der wissenschaftlichen Untersuchung, ob unter Anwendung einer systematischen Vorgehensweise zur Auslegung eines hochpräzisen, aktorbasierten Mikrospritzprägewerkzeugs die schwindungsbedingten Formabweichungen reduziert, optisch relevante Spritzgießfehler vermieden und die Fertigungsreproduzierbarkeit von mikrooptischen Kunststoffkomponenten gesteigert werden können.

Auf diese Weise sollen Möglichkeiten zur hochpräzisen sowie wirtschaftlichen Replikation von Mikrooptiken aus Kunststoff für abbildende Optikanwendungen aufgezeigt und weiterentwickelt werden. Die wissenschaftlichen Arbeiten sind dazu in die folgenden Teilaspekte gegliedert:

- Simulative Analyse der prozesseitigen Einflussfaktoren auf die Formhaltigkeit von Mikrooptiken unter Berücksichtigung mehrerer, teilweise gegenläufiger Ziele
- Vergleichende Analyse zur Schwindungskompensation für die hochpräzise Replikation von Kunststoff-Mikrooptiken im Spritzgieß- und Spritzprägeverfahren
- Systematische Auswahl und mechanische Auslegung einer geeigneten, hochpräzisen Prägemethodik
- Konzeption und Aufbau eines piezobasierten Spritzprägewerkzeugs für die hochpräzise Replikation einer anwendungsnahen konvex-konkaven Mikrooptik
- Fertigungs- und messtechnische Verifizierung der untersuchten Aspekte mit Hilfe von prozesstechnologischen Versuchen

Aufbauend auf den im Rahmen dieser Forschungsarbeit erarbeiteten Erkenntnisse werden weiterführende Ansätze für die zukünftige Forschung im Bereich der Werkzeugtechnik und Prozessuntersuchung zur spritzgießtechnischen Fertigung von mikrooptischen Komponenten aufgezeigt.