

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

EffiSaPol - Effiziente Gestaltung von Prozessketten zum Subapertur-Polieren komplexer Präzisionsoptikens

der Forschungsstelle(n)

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Technische Hochschule Deggendorf THD

Das IGF-Vorhaben 418 ZN der Forschungsvereinigung Feinmechanik, Optik und Medizintechnik wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Aachen, 30.9.2014

Ort, Datum

Dr.-Ing. Olaf Dambon

Projektleiter an der Forschungsstelle Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie

Deggendorf, 1.10.2014

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Rolf Rascher

Leiter der Forschungsstelle LOE der Technische Hochschule Deggendorf

1 Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel des Projekts EffiSaPol besteht in einer Steigerung der Effizienz und Flexibilität der Fertigung von Asphären und Freiformflächen in Kleinserien mittels einer wissensbasierten und methodisch begründeten Prozess- und Prozesskettengestaltung beim Subapertur-Polieren. Dazu konzentrieren sich die Arbeiten auf den Aufbau eines systematischen Prozesswissens hinsichtlich fünf am Markt verfügbarer Subapertur-Poliertechnologien.

Zunächst wurde ermittelt, welche Kenntnisse über ein Subaperturpolierverfahren für eine wissensbasierte Prozessauslegung notwendig sind. Daraus wurde eine Methodik aus drei Versuchsschritten (Wirkweise der Stellgrößen, Flächenbearbeitung, Einsatz in Prozessketten) definiert, anhand welcher das notwendige Prozesswissen zum Einsatz der Verfahren bestimmt werden kann. Zur Bestimmung der Wirkweise der Stellgrößen wurden zwei Ansätze zur Durchführung von Parameterstudien definiert: Screening-Versuche anhand eines Variablenvergleichs und faktorielle Versuche anhand von Bahnversuchen. Zur Auswertung der Versuche wurden Kennwerte zur Beschreibung der Abtragsfunktion (Tiefe, Breite, Volumen, Formabweichung gegenüber Gaußkurve) und zur Beschreibung des Polierergebnisses (Rauheit, Abtrag, gerichtete Strukturen) festgelegt. Außerdem wurde die Standardabweichung der Kennwerte zur Beurteilung der Stabilität verwendet. Abschließend wurden verschiedene Diagrammtypen zur Darstellung der Erkenntnisse einheitlich festgelegt.

Im weiteren Projektverlauf wurden die Methoden auf die betrachteten Subapertur-Polierverfahren angewendet. Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT wurden das Bonnet-Polieren und das Fluid-Jet-Polieren (FJP) untersucht. Die technische Hochschule Deggendorf THD (ehemals HDU) betrachtete die Verfahren Ball-(Rad-)polieren, Active-Fluid-Jet-Polieren (A-FJP) und magneto-rheologisches Finishing (MRF). Für jedes Verfahren wurden in der sogenannten Screening-Versuchsreihe der qualitative Einfluss von 6-8 Stellgrößen auf die Form der Abtragsfunktion und das Polierergebnis ermittelt. Dazu wurden die Methoden des Variablenvergleichs und der Haupteffekte aus der statistischen Versuchsplanung angewendet. Die Ergebnisse ermöglichten einerseits die Eingrenzung auf die signifikanten Variablen für die nachfolgenden, faktoriellen Versuchspläne. Andererseits liegen Kenntnisse für die Prozessauslegung vor, welche Stellgrößen primär verändert werden sollten, um einen benötigten Effekt zu erzielen.

In den faktoriellen Versuchen wurden einzelne Polierbahnen aufgebracht und der jeweilige Querschnittsprofil zur Beschreibung des Einflusses der Stellgrößen auf die Abtragsform ausgewertet. Aus der Varianz der ermittelten Werte wurde zusätzlich auf die Stabilität der einzelnen Parameterkombinationen geschlossen. Das Ergebnis ist ein quantitativer Zusammenhang zwischen den verschiedenen Stellgrößen und der Abtragsform. Zusätzlich wurden in den untersuchten Parameterfenstern die Bereiche mit einer hohen Stabilität ermittelt. Die Ergebnisse für die einzelnen Verfahren sind in den jeweiligen Kapiteln (3.2.1-3.2.4) und in dem erstellten Handbuch Subapertur-Polieren dargestellt.

Neben den Parameterstudien wurden weiterhin besonders relevante Aspekte bei der Flächenbearbeitung untersucht. Zentrale Herausforderung bei der Prozessauslegung von Subaperturpolierverfahren ist die Wahl der Abtragsfunktion und der Bahnführung unter Beachtung des Eingangsfehlers und des benötigten Prozessergebnisses. Hierzu wurde der Zusammenhang zwischen dem Bahnabstand, der Form der Abtragsfunktion und der resultierenden Oberflächengüte für das Radpolieren durch die THD untersucht. Weiterhin wurde eine systematische Formveränderung beim Spiralpolieren mit dem Bonnet-Werkzeug durch das Fraunhofer IPT festgestellt. Zu deren Kompensation wurde eine analytische Methode über eine Veränderung des Radialvorschubs vorgeschlagen und erfolgreich demonstriert. Weiterhin wurde der Einfluss der Werkzeugüberlappung am Rand der zu polierenden Linse beim Bonnet-Polieren untersucht und ein geeigneter Bereich ermittelt.

Für den dritten Schritt in der Methodik, nämlich Anwendung in Prozessketten, wurde ein asphärischer Demonstrator mit einer Wendestelle von konkaver zu konvexer Krümmung definiert und mit vier Polierverfahren in zwei Prozessketten bearbeitet.

Für die Darstellung und den Transfer der Ergebnisse wurde ein *Handbuch Subaperturpolieren* erstellt und den beteiligten Firmen zur Verfügung gestellt. Dieses enthält sowohl Erläuterungen zur Anwendung der entwickelten Methodiken als auch über die erzielten Ergebnisse für die fünf untersuchten Verfahren. Neben dem Handbuch wurden folgende Planungs- bzw. Auswertehilfsmittel erstellt: Software zur automatisierten Auswertung von Abtragsprofilen aus Bahnversuchen, Berechnungswerkzeug zur analytischen Berechnung des relativen Materialabtrags beim Spiralpolieren mit dem Bonnet-Verfahren sowie ein Berechnungswerkzeug zur Bestimmung entstehender Strukturen in Abhängigkeit von dem Bahnabstand und der Abtragsfunktion.

Zusammengefasst wurde in EffiSaPol umfassendes Prozesswissen ermittelt, die zugehörigen Methoden zur Bestimmung definiert und praktische Hilfsmittel zur Umsetzung erstellt. Die ehemals notwendige, aufwändige empirische Ermittlung von geeigneten Prozessparametern bei der Fertigung kann in zunehmendem Maße durch analytisches Wissen ersetzt werden. Das generierte Wissen und die entwickelten Methoden ermöglichen es, schnell und prozesssicher selbst auf anspruchsvolle Anfragen zu reagieren und diese gewinnbringend durchzuführen. Die Ergebnisse von EffiSaPol unterstützen die kmU dabei, hochpräzise Optiken in Kleinserien zu im Markt durchsetzbaren Preisen anbieten zu können.

Nicht erreicht wurde jedoch der Aspekt der wissensbasierten Prozesskettenbildung. Hierzu konnten lediglich Ansätze aufgezeigt werden, ohne diese umfassend für eine große Anzahl an Verfahrenskombination zu prüfen. Es stellte sich heraus, dass bereits die Auslegung einzelner Schritte umfangreiches Wissen benötigt, auf welches in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss der Schwerpunkt gelegt wurde.

Das Ziel des Vorhabens wurde deswegen nur teilweise erreicht.

2 Einleitung und Problemstellung

2.1 Motivation und Forschungsthema

Hochpräzise optische Systeme mit Präzisionsglasoptiken stellen in zahlreichen Anwendungen mit hohen Wachstumsraten (Mess- und Produktionstechnik, optischen Nachrichtentechnik, Medizin- und Pharmatechnik, elektronischen Konsumgütern) eine Schlüsselkomponente dar, deren Qualität maßgeblich zur Leistungsfähigkeit der Gesamtlösung beitragen und häufig den Weg für Innovation bereiten. Aus technologischen Gründen entwickelt sich das Design der Optikkomponenten hin zu immer komplexeren Geometrien. Trotz der technologischen Vorteile von Asphären und Freiformflächen beschränkten ein hoher Fertigungsaufwand, insbesondere beim Polieren, und eine aufwändige Messtechnik eine Ausweitung der Anwendung.

Bei der Optikfertigung stellt das Polieren einen unverzichtbaren Schritt in der Technologiekette dar, der maßgeblich die Qualität bestimmt, aber auch den größten Fertigungsaufwand verursacht. Bis zum Projektbeginn wurde eine große Anzahl an Subapertur-Polierv Verfahren für die Asphären und Freiformbearbeitung entwickelt und von verschiedenen Maschinenherstellern auf dem Markt eingeführt. Mit diesem Begriff werden Polierv Verfahren bezeichnet, bei denen das Werkzeug im Vergleich zur Apertur der Optik eine kleine Kontaktfläche besitzt. Diese wird mit verschiedenen Kinematiken über die Oberfläche geführt, um die gesamte Linsenoberfläche zu bearbeiten.

Für Herstellung der adressierten Präzisionsoptiken müssen sowohl mehrere Schritte mit einem Verfahren durchgeführt werden als auch eine sequentielle Verknüpfung mehrerer Verfahren zu einer Prozesskette erfolgen. Die Prozessauslegung erfolgt weitestgehend anhand von empirischen Wissens und wird in der Regel in iterativen Schritten an die jeweilige Bearbeitungsaufgabe angepasst. Je nach zu fertigendem Produkt und mit fortschreitender Fertigungstiefe weisen die Polierv Verfahren spezifische Vor- und Nachteile auf. Es fehlt jedoch sowohl eine umfangreiche systematische Charakterisierung der Potenziale und Grenzen der Verfahren als auch Methoden zur Prozessauslegung und zur Bildung von Prozessketten.

Um im Weltmarkt als Qualitätsführer zu bestehen, hat sich die deutsche Optikindustrie auf die Herstellung von hochpräzisen, anspruchsvoll zu fertigenden und kundenindividuellen Optiken konzentriert. Voraussetzungen dazu sind technologische Spezialkompetenzen und exzellente Fertigungsmethoden für Präzisionsglasoptiken in kleinen Losgrößen. Zur langfristigen Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit und zur Befriedigung des steigenden Bedarfs an Asphären und Freiformflächen besteht die Notwendigkeit einer wirtschaftlichen, effizienten und flexiblen Produktion. Insbesondere vor dem Hintergrund kleiner Losgrößen liegt der Schlüssel zur Effizienzsteigerung in einem Wechsel von der derzeitigen überwiegend empirischen Prozessauslegung hin zu einer wissensbasierten und methodischen Prozessgestaltung. Dieser Problematik widmet sich EffiSaPol.

2.2 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Beim Subapertur-Polieren wird ein kleines Werkzeug mithilfe von CNC-Maschinen über die Oberfläche geführt. Im Vergleich zu vollflächigen Polierverfahren für Sphären weisen Subapertur-Polierverfahren eine höhere Komplexität durch eine Vielzahl von Einflussgrößen auf, deren Zusammenspiel sowohl das Prozessergebnis im Hinblick auf die Oberflächengüte als auch die Polierzeit und damit die Wirtschaftlichkeit beeinflussen.

Der Einsatz dieser Verfahren ist jedoch für die Fertigung von Asphären- und Freiformflächen zwingend erforderlich. Ebenso ermöglichen Subapertur-Polierverfahren das sogenannte Korrekturpolieren. Dabei wird aus der Abtragsfunktion und dem Eingangsfehler die Verweilzeitverteilung des Werkzeugs auf der Oberfläche so variiert, dass der daraus resultierende unterschiedliche Materialabtrag zu einer Verringerung des Formfehlers führt.

So bestimmen die Prozessparameter und das Werkzeug maßgeblich die Abtragsfunktion (Foot-Print). Die Abtragsfunktion und die Bahnführung zusammen mit dem Eingangsfehler beeinflussen direkt die Prozesszeit und Oberflächengüte, so dass in der Praxis die Wahl der Parameter stets einen Kompromiss darstellt. Aufgrund der Komplexität und fehlendem systematischen Wissen erfolgt die Prozessgestaltung zurzeit weitestgehend iterativ in langen, erfahrungsgestützten Prozessentwicklungen. Für eine Effizienzsteigerung gilt es, die Parameter auf analytische Art und Weise optimal im Hinblick auf die eingesetzte Technologie als auch auf die Fähigkeiten der nachfolgenden Polierschritte festzulegen.

Mit dem Aufkommen von Asphären in der Präzisionsoptik wurde eine Vielzahl neuartiger Polierverfahren entwickelt, welche aufgabenspezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Aufgrund der sukzessiven fehlt ein Überblick über Potentiale und Grenzen der einzelnen Verfahren. Es findet keine gesamtheitliche Betrachtung der Prozessketten bei der Fertigung von Asphären und Freiformflächen statt, welche in einer effizienten Gestaltung unter der maximalen Nutzung aller Potentiale der verfügbaren Technologien resultieren könnte.

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens besteht in einer Steigerung der Effizienz und Flexibilität der Fertigung von Asphären mittels einer wissensbasierten und methodisch begründeten Prozessgestaltung. Dazu sollen innerhalb von EffiSaPol das methodische Vorgehen zur Ermittlung des benötigten Prozesswissens definiert, auf dieser Basis die Kenntnisse für die betrachteten Verfahren ermittelt und abschließend in Hilfsmittel zur Nutzung in der Industrie überführt werden.

Innerhalb von EffiSaPol werden folgende Verfahren betrachtet.

- Bonnet-Polieren durch IPT
- Fluid-Jet-Polieren durch IPT
- Rad- (Ball-)Polieren durch THD
- Magneto-rheologisches Finishing (MRF) durch THD
- Active-Fluid-Jet-Polieren (A-FJP) durch THD

3 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Der Arbeitsplan sah sechs Arbeitspaketen, welche in Abbildung1 zusammengefasst dargestellt sind.

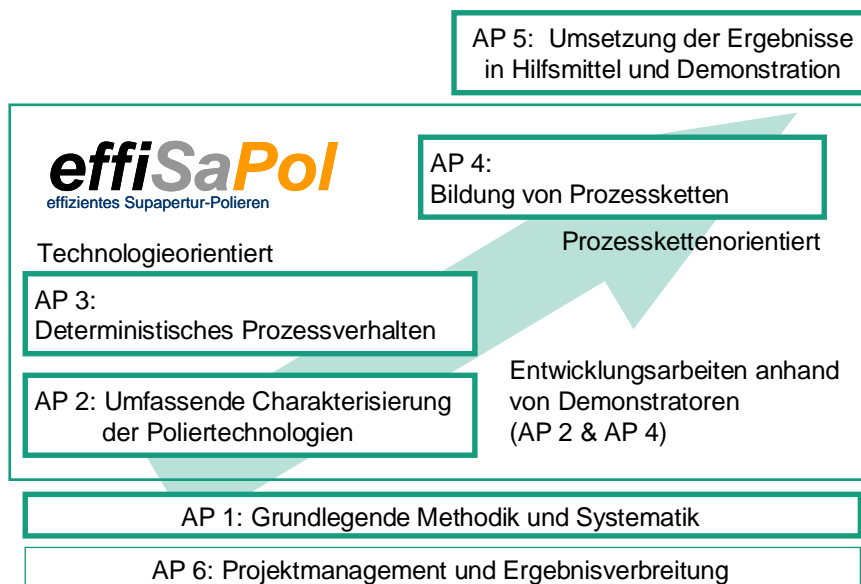


Abbildung 1: Projektstrukturplan

Zunächst erfolgt die Festlegung des methodischen Vorgehens zur Beschreibung einer Subapertur-Poliervorgang und der dazu sinnvollen Versuche (AP1). Dazu gehörte auch die Festlegung der messtechnischen Erfassung. Im zweiten Arbeitspaket erfolgte die Untersuchung der zuvor genannten fünf Verfahren im Rahmen von experimentellen Parameterstudien (AP2). Im Fokus stand die Wirkweise der Stellgrößen auf die Abtragsfunktion und das Polierergebnis. AP3 widmete sich grundsätzlichen Fragen zum Kontaktverhalten eines elastischen Werkzeugs mit der Glasoberfläche und dem Verschleißverhalten der häufig eingesetzten Poliermittelträger aus Polyurethan-Schaum, um bestehende Defizite bei der Prozessstabilität zu analysieren. Im Fokus von AP4 stand die Ermittlung des notwendigen Wissens zum Einsatz der Verfahren in Prozessketten. In AP 5 erfolgte die Umsetzung der Ergebnisse in Hilfsmittel für die Anwendung des Wissens in der Praxis. Hier vor allem die Erstellung eines Handbuchs zu nennen und die Bereitstellung von Berechnungswerkzeugen für einzelne Aspekte der Prozessauslegung. Das sechste Arbeitspaket fasste die notwendigen organisatorischen Tätigkeiten und Aktivitäten zum Transfer der Ergebnisse zusammen.

3.1 Grundlegende Systematik und Versuchsmethodik

In diesem Arbeitspaket wurden zunächst die methodischen Grundlagen erarbeitet. Dies umfasste die Festlegung, welche Kenntnisse über eine Poliertechnologie benötigt werden. Darauf aufbauend wurde die entsprechende Versuchsmethodik definiert. Zusätzlich wurde die messtechnische Erfassung der Versuchsergebnisse zwischen den beiden Forschungsstel-

len abgestimmt. Die Ergebnisse sind die Struktur eines Technologie-Steckbriefes, die Definition der zugehörigen Versuchsmethodiken zur Ermittlung der Informationen und die Bestimmung der messtechnischen Grundlagen für das Vorhaben.

3.1.1 Systematik zur Charakterisierung einer Subapertur-Technologie

3.1.2 Variablenvergleich für die qualitative Wirkweise der Stellgrößen

3.1.3 Faktorielle Versuchspläne anhand von Bahnversuchen zur Quantifizierung der Zusammenhänge

3.1.4 Messtechnische Grundlagen für das Vorhaben

3.1.5 Zwischenfazit

Als Ergebnisse liegen somit vor: Die Bestimmung des Informationsbedarfs zur Beschreibung einer Subapertur-Poliertechnologie vor dem Hintergrund der Prozessauslegung sowie eine Versuchsmethodik, welche aus drei aufeinander aufbauenden Versuchsreihen besteht, um die benötigten Informationen zu ermitteln. Weiterhin wurden zwei Versuchsvorgehensweisen bestimmt, welche einerseits die qualitative Bestimmung der Wirkung auf der Stellgrößen auf die Zielgrößen ermöglicht und andererseits in sogenannten Bahnversuchen ein quantitativer Zusammenhang ermittelt werden kann. Somit ist nicht nur die Vorgehensweise zur Untersuchung der einzelnen Polierverfahren innerhalb von EffiSaPol festgelegt, sondern auch ein übertragbares methodisches Vorgehen für Technologieuntersuchungen in Firmen bestimmt worden. Als weiteren Aspekt wurde die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen den beiden Forschungsstellen ermittelt.

3.2 Untersuchung der betrachteten Poliertechnologien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der anhand der zuvor beschriebenen Methodiken durchgeführten Parameterstudien vorgestellt.

Der zeitliche Aufwand zur Auswertung der bearbeiteten Proben überstieg dabei sogar den Aufwand zur Erzeugung der Proben. Die Versuchsergebnisse wurden anschließend in Haupteffektdiagrammen aufbereitet. Zusätzlich wurde die statistische Signifikanz der beobachteten Unterschiede mittels des Mood-Median-Tests überprüft. Die entsprechenden Diagramme sowie eine vereinfachte Darstellung durch die Angabe von Tendenzen werden in die Verfahrensteckbriefe einfließen.

3.2.1 Bonnet-Polieren

3.2.2 Fluid-Jet-Polieren

3.2.3 Radpolieren

3.2.4 Magneto-rheologisches Finishing

3.2.5 Zwischenfazit:

Als Ergebnis von AP 2 kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Wirkweise wichtiger Stellgrößen bei den betrachteten Verfahren umfassend bestimmt und für die Verfahrenssteckbriefe aufbereitet ist. Dieses erfolgte einerseits für eine große Anzahl (6-8 Stellgrößen) qualitativ mittels der Methode des Variablenvergleichs. Andererseits erfolgte für eine reduzierte Anzahl (3-5 Stellgrößen) eine quantitative Bewertung des Einflusses der Stellgrößen auf die Abtragsform und die Prozessstabilität. Somit ist das Ziel des Arbeitspakets erreicht. Die Erkenntnisse ermöglichen die gezielte Auswahl und Anpassung der jeweiligen Prozessparameter an die Anforderungen der jeweils vorliegenden Bearbeitungsaufgabe. Sie unterstützen somit die wissensbasierte Prozessauslegung.

3.3 Deterministisches Prozessverhalten

Der Einsatz der Subapertur-Polierv Verfahren erfordert ein zeitlich stabiles und vorhersagbares Prozessverhalten, damit die geforderte Formgenauigkeit erreicht werden kann. Deswegen wurde einerseits der Kontakt des Werkzeugs mit der Oberfläche simuliert. Dieses ermöglicht die Bestimmung der Veränderung der Abtragsfunktion bei wechselnden Oberflächenkrümmungen, wie es bei Asphären auftritt, einerseits und andererseits die analytische Untersuchung des Einflusses von Werkzeugeigenschaften auf die Abtragsfunktion. Somit stellt die Berechnung der Größe der Abtragsfunktion ein weiteres Element einer wissensbasierten Prozessauslegung dar.

Weiterhin beeinflusst der Verschleiß des Poliermittelträgers die Stabilität des Prozesses. Zur Erweiterung des Verständnisses wurde zusätzlich der Verschleiß von Polyurethan-Poliermittelträgern in Versuchen auf einem Tribometer untersucht.

3.3.1 Simulation Werkzeugkontakts mit der Oberfläche

3.3.2 Verschleißverhalten PU-Schäume

3.4 Geometriespezifische Prozessstrategien und Bildung von Prozessketten

Die Grundlage für die effiziente Bildung von Prozessketten setzt genaue Kenntnisse über die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Verfahren sowie die Möglichkeit, die Verfahrensparameter entsprechend des Eingangszustands gezielt zu wählen, voraus.

Je nach Wahl der Stellgrößen und der Bahnplanung kann das Ergebnis hinzu einem höheren Materialabtrag oder einer höheren Oberflächengüte verschoben werden.

Nach dem im AP2 insbesondere der Zusammenhang zwischen Prozessparameter und Abtragsfunktion betrachtet wurde, steht die Ermittlung des notwendigen Wissens über einzelne Verfahren zur Bildung von Prozessketten im Fokus von AP4.

Dazu zählen die Untersuchungen

- der Parametereinflüsse auf Rauheit und Form bei einer flächigen Bearbeitung
- des Einflusses des Bahnabstands
- der Effekte beim Überfahren der Werkstückkante

Diese wurden exemplarisch jeweils anhand einer Poliertechnologie betrachtet, wobei die grundlegenden Erkenntnisse und die angewendete Methodik auf andere Verfahren übertragbar sind.

Abschließend werden in Abschnitt 3.4.4 werden die Ergebnisse der Demonstratorbearbeitung vorgestellt.

3.4.1 Flächentests

3.4.2 Einfluss des Bahnabstands

3.4.3 Einfluss des Werkzeugüberhangs auf die Kantenverrundung

3.4.4 Demonstratorbearbeitung

3.4.5 Zwischenfazit:

In diesem Arbeitspaket wurden wichtige Aspekte beim Polieren von Asphären betrachtet. Es wurde exemplarisch anhand einzelner Technologien das methodische Vorgehen zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit einer Technologie, zur Untersuchung des Einflusses des Bahnabstands sowie zur Ermittlung von Kanteneffekten diskutiert. Zusätzlich wurden die auftretenden Effekte beim Polieren einer Asphäre mit Wendestelle betrachtet. Somit liegen Kenntnisse über geometriespezifische Einflüsse bei verschiedenen Polierverfahren vor und es wurden Kompensationsstrategien in Form einer Vorschubmoderation bzw. der Wahl des Bahnabstands aufgezeigt. Im letzten Abschnitt wurden die Bearbeitung des Demonstrators mit den drei Verfahren Ball- und Bonnet-Polieren sowie MRF untersucht und zu zwei Prozessketten verknüpft. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die einzelnen Ergebnisse einen hohen Formfehler aufwiesen. Es bedarf weiterer Prozessentwicklungen für solch komplexe Geometrien. Da bereits die Anwendung einzelner Verfahren sehr herausfordernd war, konnte das Ziel einer validierten Methodik zur Prozesskettengestaltung allerdings nicht erreicht werden. Dennoch stehen mit Abschluss dieses Arbeitspaket wertvolle Methoden zur

wissensbasierten Prozessauslegung und konkrete Erkenntnisse über die Verfahren zur Verfügung, so dass drei der vier erwarteten Ergebnisse dieses Arbeitsschritts erreicht wurden.

3.5 Umsetzung der Ergebnisse in Hilfsmittel

Abschließend erfolgt eine Übersicht über die entwickelten Methodiken und deren Umsetzung in Hilfsmittel, welche das gewonnene Wissen für einen konkreten Nutzen bei der Prozessauslegung aufbereiten.

Den Schwerpunkt bildet das sogenannte „Handbuch Subaperturpolieren“. In diesem sind sowohl die verschiedenen Versuchsmethodiken und Auswertungsverfahren als auch die Ergebnisse der Parameterstudien aller Verfahren übersichtlich zusammengestellt. Es ist so gestaltet, dass es als Nachschlagewerk für industrielle Anwender dient.

Weiterhin wurden im Rahmen von EffiSaPol folgende Versuchsmethodiken und Umsetzungshilfsmittel entwickelt:

- Versuchsmethodik auf Basis des Variablenvergleichs zur qualitativen Bewertung des Einflusses der Stellgrößen auf die Zielgrößen
- Versuchsmethodik zur quantitativen Beschreibung des Einflusses der Stellgrößen auf neu definierte Zielgrößen
- Methodik zur Visualisierung von geeigneten Prozessfenstern
- Berechnungswerkzeug zur Bestimmung des Materialabtrags beim Spiralpolieren
- Berechnungswerkzeug zur Berechnung der zu erwartenden Bahnstrukturen
- Software zur Auswertung der Bahnversuche

Mit der Bereitstellung des Handbuchs und den beschriebenen Hilfsmittel wurde das angestrebte Ziel der Bereitstellung von verallgemeinertem und für die industrielle Praxis aufbereiteten Wissen erreicht.

3.5.1 Handbuch Subaperturpolieren

3.5.2 Methodische Grundlagen

3.5.3 Berechnungsmethode der Spiralkinematik

3.5.4 Berechnungsmethode zur Berechnung des Bahnabstands

3.5.5 Software für Bahnversuche

4 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielen

Das übergeordnete Ziel des Projekts EffiSaPol besteht in einer Steigerung der Effizienz und Flexibilität der Fertigung von Asphären und Freiformflächen in Kleinserien mittels einer wissensbasierten und methodisch begründeten Prozess- und Prozesskettengestaltung beim Subapertur-Polieren. Dazu konzentrieren sich die Arbeiten auf eine Charakterisierung der bestehenden Subapertur-Polierv Verfahren und dem Aufbau eines systematischen Prozesswissens.

Nachfolgende Tabelle stellt die vorgestellten Ergebnisse den angestrebten Zielen gegenüber

Angestrebte Ziele	Erreichte Ergebnisse
<p>Systematik zur einheitlichen Beschreibung der Potenziale und Grenzen einer Subapertur-Poliertechnologie sowie zur Wirkungsweise der Stellgrößen. Die Systematik definiert dazu Kennwerte sowie Methoden anhand von geeigneten Testgeometrien.</p>	<p>Es wurde eine Methodik aus drei Versuchsschritten (Wirkweise der Stellgrößen, Flächenbearbeitung, Einsatz in Prozessketten, vgl. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.) definiert, anhand welcher das notwendige Prozesswissen zum Einsatz der Verfahren bestimmt werden kann. Diese enthält Vorschläge für die Werkstückgeometrie, die jeweilige Versuchsmethodik und Auswertungsansätze.</p> <p>Zur Bestimmung der Wirkweise der Stellgrößen wurden zwei Ansätze zur Durchführung von Parameterstudien definiert: Screening-Versuche anhand eines Variablenvergleichs und faktorielle Versuche anhand von Bahnversuchen (vgl. 5.1.3). Es wurden Kennwerte zur Beschreibung der Form der Abtragsfunktion (Tiefen, Breite, Volumen, Formabweichung gegenüber Gaußkurve) und zur Beschreibung des Polierergebnisses (Rauheit, Abtrag, gerichtete Strukturen) definiert. Außerdem wurde die Standardabweichung der Kennwerte als Beurteilungskriterium der Stabilität verwendet.</p> <p>Zur Darstellung wurden verschiedene Diagrammtypen definiert. Diese Methoden bilden das Gerüst zur systematischen Beschreibung einer Subapertur-Poliertechnik in Form eines</p>

	Technologie-Steckbriefs.
<p>Systematische Beschreibung zahlreicher Subapertur-Poliervverfahren, welche entweder regelmäßig eingesetzt werden oder an der Grenze zur Anwendungsreife stehen. Diese umfasst allgemeine Angaben zur Leistungsfähigkeit, den typischerweise entstehenden Oberflächenstrukturen sowie grundlegende Aussagen zur Wirkungsweise der jeweiligen Stellgrößen.</p>	<p>Folgende fünf Subapertur-Poliertechnologien wurden mittels der zuvor genannten Methoden umfassend untersucht:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rad / Ballpolieren • Bonnet-Polieren • Magneto-rheologisches Finishing, • Active-Fluid-Jet-Polieren und • Fluid-Jet-Polieren. <p>Die Ergebnisse sind in den jeweiligen Kapiteln und in dem Handbuch dargestellt.</p>
<p>Prozess- und Kompensationsstrategien für ein deterministisches Prozessverhalten sowie zur Beherrschung der zentralen Herausforderungen beim Einsatz von Subapertur-Poliervverfahren</p>	<p>Zentrale Herausforderung ist die Wahl der Abtragsfunktion und der Bahnführung unter Beachtung des Eingangsfehlers und dem benötigten Prozessergebnis (höher Abtrag im Hauptpolieren, gute Konvergenz beim Korrekturpolieren, hohe Oberflächengüte).</p> <p>Hierzu wurde der Zusammenhang zwischen dem Bahnabstand, der Form der Abtragsfunktion und der resultierenden Oberflächengüte untersucht. Weiterhin wurde eine systematische Formveränderung beim Spiralpolieren mit dem Bonnet-Werkzeug festgestellt. Dazu wurde eine analytische Methode zur Kompensation über eine Veränderung des Radialvorschubs vorgeschlagen. Weiterhin wurde der Einfluss des Werkzeugkontakts am Rand der Linse betrachtet.</p>
<p>Exemplarische Prozessketten, welche anhand der Methodikbausteine gebildet wurden und empirisch für definierte Demonstratoren evaluiert sind.</p>	<p>Es wurde ein rotationssymmetrischer, asphärischer Demonstrator mit einer Wendestelle von konkaver zu konvexer Krümmung definiert und mit vier Poliervverfahren in zwei Prozessketten bearbeitet.</p> <p>Eine relativ lange Bearbeitungszeit zeigte jedoch, dass die Prozessentwicklung für solch</p>

	<p>eine komplexe Geometrie noch nicht abgeschlossen ist. Eine umfassende Evaluierung von Prozessketten ist vor diesem Hintergrund nicht sinnvoll gewesen.</p>
<p>Aufbereitung der Systematisierung der untersuchten Subapertur-Poliervorgänge in einer Datenbank</p>	<p>Die Ergebnisse der Charakterisierung wurden anhand von Technologie-Steckbriefen in einem „Handbuch-Subaperturpolieren“ aufbereitet. Dieses wurde den beteiligten Firmen zur Verfügung gestellt. Es enthält sowohl eine Beschreibung zur Anwendung der entwickelten Methodiken als auch die erzielten Ergebnisse für die fünf untersuchten Verfahren. Das Handbuch ermöglicht den Wissenstransfer in die Industrie. Auf die Umsetzung in einer Datenbank wurde verzichtet, da diese keinen Mehrwert versprach, sondern vielmehr sogar umständlicher im Versuchsumfeld zu handhaben ist.</p>
<p>Planungswerkzeuge bzw. Hilfsmittel für die Bahngestaltung sowie zur Bestimmung optimaler Übergabepunkte zwischen den Prozessschritten.</p>	<p>Neben dem Handbuch wurden folgende Planungs- bzw. Auswertehilfsmittel erstellt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Software zur automatisierten Auswertung von Abtragsprofilen aus Bahnversuchen • Berechnungswerkzeug zur analytischen Berechnung des relativen Materialabtrags beim Spiralpolieren mit dem Bonnet-Verfahren • Berechnungswerkzeug zur Bestimmung entstehender Strukturen in Abhängigkeit von dem Bahnabstand und der Abtragsfunktion

Zusammengefasst wurde in EffiSaPol umfassendes Prozesswissen ermittelt, die zugehörigen Methoden zur Bestimmung definiert und praktische Hilfsmittel erstellt. In Summe ermöglichen die Ergebnisse die wissensbasierte Prozessauslegung für einzelne Verfahren.

Nicht erreicht wurde jedoch der Aspekt der wissensbasierten Prozesskettenbildung. Hierzu konnten lediglich Ansätze aufgezeigt werden, ohne diese umfassend für eine große Anzahl an Verfahrenskombination zu prüfen. Es stellte sich heraus, dass bereits die Auslegung

einzelner Schritte umfangreiches Wissen benötigt, auf welches in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss der Schwerpunkt gelegt wurde.

5 Verwendung der Zuwendung und Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

5.1 Verwendung der Zuwendung

5.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

An beiden Forschungsstellen erarbeiteten die Wissenschaftler das methodische Vorgehen, die Umsetzung in Versuchspläne und die Methoden zur Auswertung. Sie waren für die Durchführung der Versuche verantwortlich, bereiteten die Ergebnisse auf und interpretierten diese. Außerdem erstellten die Wissenschaftler die Umsetzungshilfsmittel und das Handbuch. Darüber hinaus planten und führten sie die Projekttreffen durch. Abschließend sorgten sie für den Wissenstransfer der Ergebnisse und deren Veröffentlichung.

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig für die Projektbearbeitungen und vor dem Hintergrund des Umfangs der durchgeführten Tätigkeiten im Umfang angemessen.

6 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftliche Nutzen

Die hauptsächliche Nutzung in Form der Anwendung des entwickelten Wissens und der Methoden erfolgt im Fachgebiet Produktion und den Wirtschaftszweigen 26, 29 und 33.

Die Unternehmen der feinoptischen Industrie, darunter befinden sich zahlreiche kmU, können die Ergebnisse bei der Fertigung von Kleinserien komplexer sowie bei einfachen aber hochpräzisen Optikkomponenten nutzen. Die erarbeitete wissensbasierte Prozessgestaltung ermöglicht ihnen ihre Herstellungsverfahren produktspezifisch und prozesssicher auszulegen. Insbesondere den kmU fehlen meist die personellen und finanziellen Ressourcen, um eine umfangreiche Technologierecherche und Prozessentwicklung durchzuführen sowie diese auf eine solch breite Basis zu stellen, wie es in EffiSaPol erfolgte. Firmen, welche bereits in der Asphären- und Freiformfertigung tätig sind, können zunächst das spezifische Wissen über den Stellgrößeneinfluss nutzen, um ihre eigene Prozessauslegung zu überprüfen und anzupassen. Die entwickelten Hilfsmittel unterstützen dabei die Umsetzung des Wissens in die praktische Anwendung. Insgesamt ermöglichen die Ergebnisse die Wahl optimaler Prozessparameter, um bei einzelnen Prozessschritten in kürzest möglicher Zeit das notwendige Ergebnis zu erreichen.

Weiterhin können die Firmen die entwickelte Methodik für ihre eigenen Untersuchungen anwenden, sofern sich Randbedingungen und Verfahren von denjenigen im Projekt unterscheiden. Durch EffiSaPol sparen sie erheblichen Planungsaufwand und das Risiko, eine ungeeignete Versuchsstrategie anzuwenden, ist geringer.

Aufgrund des zukünftig **steigenden Bedarfs nach komplexen Optiken**, wie zu Beginn dargestellt, können weitere kmU ihr Fertigungsspektrum zu Asphären und Freiformflächen hin erweitern. Bei einer solchen Erweiterung bilden die Ergebnisse einen hervorragenden Ausgangspunkt, um mit den begrenzten Ressourcen und einem engen finanziellen Spielraum die eigene Produktion um den Bereich der Asphärenfertigung zu ergänzen.

Grundsätzlich setzt eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU neue Produkte oder für bestehende Produkte kostengünstigere Herstellungsverfahren voraus, die auf einen entsprechenden Bedarf treffen oder mit denen sich Unternehmen neue Märkte erschließen können. Die Ergebnisse von EffiSaPol unterstützen die kmU dabei, hochpräzise Optiken in Kleinserien zu im Markt durchsetzbaren Preisen anbieten zu können. Das generierte Wissen und die entwickelten Methoden ermöglichen es, schnell und prozesssicher selbst auf anspruchsvolle Anfragen zu reagieren und diese gewinnbringend durchzuführen. Die ehemals hierzu notwendige, aufwändige empirische Ermittlung von geeigneten Prozessparametern bei der Fertigung kann in zunehmendem Maße durch analytisches Wissen ersetzt wird.

Insgesamt wird eine Verkürzung der Prozesszeit je Polierschritt durch eine optimierte Wahl der Prozessparameter und eine Reduktion der gesamten Fertigungskosten für eine Asphäre ermöglicht.

Das vorliegende Vorhaben trägt zur Weiterentwicklung der bestehenden Verfahren zur Fertigung komplexer Optiken bei. Neuartig ist dabei der methodische Ansatz zur einheitlichen Charakterisierung von Subapertur-Polierv Verfahren. In EffiSaPol wurde erstmalig ein systematischer Überblick zu den mittlerweile zahlreichen, verfügbaren Polierverfahren erarbeitet. Zuvor waren noch nicht technologieübergreifend die Zusammenhänge zwischen Wahl der Prozessparameter und Bauteilqualität betrachtet worden. Neue Hilfsmittel wie Berechnungsmethoden und das generierte Wissen über signifikante Prozessstellgrößen ermöglichen die optimale Gestaltung der einzelnen Polierschritte. Insgesamt bündelte EffiSaPol somit vorhandenes Wissen, ergänzte es um weitere Untersuchungen und einen methodischen Baukasten, um so den Schritt hin zu einer wissensbasierten und analytischen Prozessauslegung zu machen, der bislang noch nicht angegangen wurde.

7 Veröffentlichungen und Transferkonzept

7.1 Zusammenstellung der Veröffentlichungen

Im Folgenden sind die durchgeführten und noch geplanten Maßnahmen zur Veröffentlichung der Ergebnisse aufgeführt.

Rahmen / Veranstaltung	Titel / Inhalt	Datum / Zeitraum
1. Projekttreffen		
Kick-Off-Treffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA)	Vorstellung des Projektziels, der geplanten Inhalten mit anschließender Diskussion	2.5.12 in Frankfurt a.M.
2. Projekttreffen mit dem PA	Präsentation der erzielten Ergebnisse und Planung des weiteren Vorgehens	8.2.2013 in Aachen
3. Projekttreffen mit dem PA	Präsentation der erzielten Ergebnisse und Planung des weiteren Vorgehens	2.10.2013 in Deggendorf
Abschlusstreffen mit dem PA	Abschlusspräsentation und Diskussion der erzielten Ergebnisse	14.6.2014 in Frankfurt a. M.
2. Beiträge in Zeitschriften und auf Konferenzen		
SPIE Optics + Photonics 2013 Vortrag und Tagungsband	Analysis and modeling of tribology effects in conventional glass polishing	August 2013, San Diego
EUSPEN 2012 Vortrag und Tagungsband	Knowledge-based process design for pad-polishing of precision optics	Juni 2012, Stockholm
OF&T 2014, Vortrag und Tagungsband	Active Fluid-Jet-Polishing – Behavior on different material	Hawai, Juni 2014
3. Vorstellung auf Branchentreffen, Messen etc.		
Jahrestagung der Forschungsvereinigung F.O.M. 2012	Posterpräsentation der erzielten Ergebnisse	November 2012, Berlin
Jahrestagung der Forschungsvereinigung F.O.M. 2013	Posterpräsentation der erzielten Ergebnisse	November 2013, Berlin
Messe Optatec 2014	Ausstellung des Demonstrators, Auslage der Produktflyer auf Fhg-Stand	Juni 2014
Optikseminar 2013	Posterpräsentation	April 2013
European Seminar on Optics	Posterpräsentation	April 2014
4. Berichte und Drucksachen		
Faltbroschüre	Kurzdarstellung des Projekts und erster Ergebnisse	Auslage bei Veranstaltungen, Messen etc.
Zwischenbericht für PA	Kurzdarstellung der erreichten Ergebnisse bis Anfang 2013	Januar 2013

5. Sonstiges		
Gespräche bei Veranstaltungen / Kundengespräche etc.	Vorstellung des Projekts	Telefonate und Vor-Ort-Gespräche in 2013 und 2014
Pressemitteilung zum Abschluss von EffiSaPol	Bekanntmachung des Projektabschlusses und wichtiger Erkenntnisse	30.10.2014
6. Akademische Verwertung		
Vorlesung Ultrapräzisionstechnologie der RWTH Aachen	Aufnahme in die Lehre	seit Sommersemester 2014
Vorlesung Fertigungstechnik Optik an der THD	Aufnahme in die Lehre	seit Wintersemester 2013

Vorlesung optische Technologien an der THD Aufnahme in die Lehre seit Sommersemester 2014
 Praktikum Fertigungstechnik Optik an der THD Aufnahme in die Lehre seit Wintersemester 2013

7.2 Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Im Mittelpunkt des Vorhabens EffiSaPol stand die Erweiterung des Prozesswissens. Deswegen zielt das Transferkonzept auf die Vermittlung des Wissens in die Industrie ab. Der Wissenstransfer zu den beteiligten Firmen ist im Rahmen der Projekttreffen, verschickten Berichten und insbesondere mit der Erstellung des Handbuchs bereits abgeschlossen. Weiterhin wurde das Wissen bereits in die akademische Ausbildung an den beiden Forschungsstellen integriert, so dass über die zukünftigen Absolventen das Wissen ebenfalls in die Unternehmen getragen wird.

Ein breiter Interessentenkreis wurde durch die dargestellten Maßnahmen angesprochen: Präsentation der Ergebnissen auf Messen, Beiträge auf deutschen und internationalen Konferenzen sowie Publikationen in industriellen als auch wissenschaftlichen Zeitschriften.

Die beiden Forschungsstellen verfügen über langjährige Kontakte zu zahlreichen Firmen der deutschen Optikindustrie. Diese resultieren aus gemeinsamen Forschungs- sowie Industrieprojekten. Diese hervorragende Vernetzung der Forschungsstellen mit der Optikindustrie wird genutzt, um in Vor-Ort-Gesprächen und Telefonaten auch Firmen außerhalb des projektbegleitenden Ausschusses auf die erzielten Ergebnisse aufmerksam zu machen und ihnen den Zugang zu ermöglichen. Es ist denkbar, dass einzelne Aspekte sowohl in bilateralen als auch in weiteren Forschungsprojekten im Anschluss an das Vorhaben vertieft adressiert werden.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass das Transferkonzept bereits weitestgehend realisiert wurde.