

Andreas Kelm

Modellierung des Abtragsverhaltens in der Padpolitur

Modellierung des Abtragsverhaltens in der Padpolitik

Andreas Kelm



Universitätsverlag Ilmenau
2017

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 24. März 2016

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Stefan Sinzinger
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Prof. Dr. Rainer Börret
(Hochschule Aalen)

3. Gutachter: Dr. Oliver Fähnle
(Fisba AG, St. Gallen, Schweiz)

Tag der Verteidigung: 6. September 2016

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

Herstellung und Auslieferung

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

ISBN 978-3-86360-149-2 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000465

Titelgrafik: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wird ein Modell vorgestellt, mit dem eine Vorhersage über den Materialabtrag bei der Padpolitur von Oberflächen möglich ist. Es ermöglicht die Vorhersage des Materialabtrags auf Basis physikalischer Parameter. Die Berechnung ist für beliebige Oberflächengeometrien ausgelegt und liefert ortsabhängige Abtragsfunktionen.

Das Modell beinhaltet die Geometrie des Werkstücks, d.h. die dadurch verursachte Änderung der Abtragsfunktion ist integraler Teil der Simulation. Dies stellt eine wesentliche Verbesserung zu kommerziell erhältlichen Poliermaschinen dar, die teilweise mit festen Abtragsfunktionen arbeiten.

Zu den berücksichtigten variablen Parametern zählen der lokale Verlauf der Werkstückoberfläche, die Geometrie des Werkzeugs, die Drehzahlen von Werkzeug und Werkstück sowie die Kraft auf das Werkzeug.

Der Vergleich realer Polituren mit den Ergebnissen der Simulation liefert eine hohe Übereinstimmung mit Abweichungen im Bereich von 10% und darunter. Die starke Positionsabhängigkeit von Form und Größe der Abtragsspuren in der Rundtischpolitur zeigt sich gleichermaßen in der Simulation als auch der realen Politur.

Das Modell bildet die Positionsabhängigkeit des Abtrags bei Verwendung von Offsetwerkzeugen ab. Die Wirksamkeit eines theoretisch hergeleiteten Vorschubprofils zur Beseitigung dieser Eigenheit von Offsetwerkzeugen zeigt die Simulation ebenso.

Die in der Literatur genannte Abhängigkeit des Preston-Koeffizienten von der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück wird experimentell nachvollzogen und ein Verfahren zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten während des Polierprozesses vorgestellt. Die so gemessenen Werte stimmen gut mit den in der Literatur angegebenen Werten überein.

Abstract

Within the limits of this thesis a model is described that is used to make a prediction of the surface wear in a polishing process using a polishing pad. The introduced model uses parameters that can physically be measured and can be used on any work piece geometries. It provides position-dependent tool influence functions.

The model includes the surface geometry of the work piece so this influence on the tool influence function is an integral part of the simulation. This is a major improvement in relation to polishing machines that are commercial available.

The variable input parameters include local curvature of work piece, the shape of the tool, the rotational speed of tool and work piece and the force between tool and work piece.

The comparison of real polishing and the simulation has a good correlation with divergences of around 10% and below. The high dependency of width and geometry of the tool influence functions in relation of the tool position can be seen in simulation as well as in real polishing.

The dependency of wear and tool position of tools using an offset between area of contact and the rotation center can be shown using the simulation. The effectiveness of a profile for the tool feed rate that is theoretically deduced to minimize these tool properties also is presented.

The know dependency of the Preston Coefficient and the relative velocity between tool and work piece is experimentally shown and a process is shown to measure the coefficient of friction during the polishing process. The measurement results do correlate with values obtained from literature.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----------|
| Formelzeichen | XIII |
| 1 Einführung und Aufgabenstellung | 1 |
| 1.1 Stand der Technik..... | 4 |
| 1.2 Ziele der Arbeit..... | 5 |
| 1.3 Gliederung der Arbeit..... | 6 |
| 2 Polierprozesse für optische Oberflächen | 9 |
| 2.1 Abtragsmechanismen..... | 12 |
| 2.2 Prozesstechnologien..... | 14 |
| 2.3 Übersicht gängiger Polierverfahren..... | 18 |
| 2.3.1 Pechpolitur | 18 |
| 2.3.2 Padpolitur | 19 |
| 2.3.3 IBF | 19 |
| 2.3.4 MRF | 20 |
| 2.3.5 FJP..... | 20 |
| 2.4 Offset- und Radwerkzeuge..... | 21 |
| 2.5 Berechnung des Materialabtrags im Polierprozess | 25 |
| 2.5.1 Abtragsrate nach Preston | 26 |
| 2.5.2 Berechnung des Materialabtrags auf der gesamten Oberfläche | 28 |
| 2.5.3 Optimierung des Materialabtrags | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Modellierung des Polierprozesses | 33 |
| 3.1 | Aufbau des Modells | 33 |
| 3.2 | Eingangsparameter und Randbedingungen des Modells | 34 |
| 3.2.1 | Beschreibung des Werkstücks | 34 |
| 3.2.2 | Beschreibung des Werkzeugs | 35 |
| 3.2.3 | Werkzeugbahn | 37 |
| 3.2.4 | Vorschubgeschwindigkeit | 37 |
| 3.2.5 | Drehzahlen und Kraft auf das Werkzeug | 38 |
| 3.2.6 | Preston-Koeffizient | 38 |
| 3.3 | Modell unabhängiger, nichtlinearer Federn | 39 |
| 3.4 | Berechnung der Abtragsfunktion | 43 |
| 3.4.1 | Preston-Koeffizient | 44 |
| 3.4.2 | Berechnung der Kraftverteilung | 44 |
| 3.4.3 | Berechnung der Relativgeschwindigkeit | 46 |
| 3.4.4 | Bestimmung des Reibungskoeffizienten | 50 |
| 3.5 | Berechnung des Gesamtabtrags | 53 |
| 4 | Polierstation auf Basis eines Industrieroboters | 57 |
| 4.1 | Aufbau der Polierstation | 57 |
| 4.2 | Typischer Ablauf des Polierprozesses | 60 |
| 4.2.1 | Politur sich drehender Werkstücke | 63 |
| 4.2.2 | Politur feststehender Werkstücke | 65 |
| 4.3 | Werkzeuge und Poliermittel | 66 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Ergebnisse..... | 69 |
| 5.1 | Modellierung des Materialabtrags..... | 70 |
| 5.1.1 | Modellierung von Abtragsspuren..... | 70 |
| 5.1.2 | Modellierung des Gesamtabtrags | 74 |
| 5.1.3 | Optimierung des Polierabtrags auf Basis der Simulation..... | 76 |
| 5.1.4 | Diskussion der Ergebnisse..... | 82 |
| 5.2 | Einfluss der Schrittweite der Werkzeugbahn | 84 |
| 5.3 | Abtragsverhalten von Offsetwerkzeugen | 91 |
| 5.3.1 | Einfluss des Werkzeugoffsets auf das Abtragsverhalten..... | 91 |
| 5.3.2 | Korrektur des Offseteinflusses..... | 93 |
| 5.3.3 | Diskussion der Simulationsergebnisse zum Offsetwerkzeug..... | 98 |
| 5.4 | Verlauf des Abtrags im Randbereich des Werkstücks | 99 |
| 5.4.1 | Simulation des Abtrags im Randbereich..... | 100 |
| 5.4.2 | Verringerung der Auflagefläche am Werkstückrand | 102 |
| 5.4.3 | Verringerung der Kontaktzeit am Werkstückrand | 104 |
| 5.4.4 | Minderung Randeffekt unter Verwendung der Simulation..... | 105 |
| 5.4.5 | Diskussion der Ergebnisse..... | 109 |
| 5.5 | Einfluss der Relativgeschwindigkeit..... | 110 |
| 5.5.1 | Versuchsdurchführung mit dem Padwerkzeug | 111 |
| 5.5.2 | Ergebnisse mit dem Padwerkzeug..... | 114 |
| 5.5.3 | Versuchsdurchführung mit dem Offsetwerkzeug | 116 |
| 5.5.4 | Ergebnisse mit dem Offsetwerkzeug..... | 119 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.5.5 | Diskussion der Ergebnisse..... | 120 |
| 5.6 | Messung des Reibungskoeffizienten..... | 122 |
| 5.7 | Grenzen der Positioniergenauigkeit..... | 126 |
| 5.7.1 | Genauigkeit bei der Einmessung des Werkzeugs..... | 126 |
| 5.7.2 | Untersuchung der Positioniergenauigkeit der Polierstation..... | 128 |
| 5.7.3 | Untersuchung der Verkippung zwischen Werkzeug und Werkstück..... | 131 |
| 5.7.4 | Begrenzung in der Positioniergeschwindigkeit..... | 134 |
| 5.7.5 | Diskussion der Ergebnisse..... | 135 |
| 6 | Diskussion und Ausblick..... | 139 |
| | Literaturverzeichnis..... | 142 |

Formelzeichen

| Größe | Einheit | Bedeutung |
|----------------------------|---------|---|
| $a(x)$ | | Korrekturfaktor |
| A | m^2 | Größe eines Flächenelements |
| c_P | m^2/N | Preston-Koeffizient |
| d | m | Offset des Werkzeugs |
| d_1, d_2, d_{1a}, d_{2a} | m | Auflagebereich des Werkzeugs auf dem Werkstück |
| F_{WZ} | N | Kraft auf das Werkzeug |
| F_f | N | Reibkraft |
| F_N | N | Normalkraft |
| FP | N/m^2 | Flächenpressung |
| G | | Matrix der Abtragsfunktionen z |
| I_{Last} | A | Stromaufnahme |
| p | N/m^2 | Druck |
| P_W | W | Wirkleistung |
| R_0 | M | Krümmungsradius |
| \vec{r} | M | Ortsvektor |
| s | M | Weg des Werkzeugs auf dem Werkstück |
| S | M | Materialabtrag |
| t | S | Zeit |
| t_{VZ} | S | Verweilzeit des Werkzeugs an einem Punkt der Werkzeugbahn |
| v, \vec{v}_{ges} | m/s | Relativgeschwindigkeit |
| \vec{v}_{WZ} | m/s | Geschwindigkeitskomponente des Werkzeugs |
| \vec{v}_{WS} | m/s | Geschwindigkeitskomponente des Werkstücks |
| W | J | Arbeit |
| $x'z'$ | M | Schnitt durch das Werkzeugkoordinatensystem |
| xz | M | Schnitt durch das Werkstückkoordinatensystem |
| z | M | Abtragsfunktion |
| α | | Drehwinkel |
| μ | | Reibungskoeffizient |
| τ | Nm | Moment |
| Φ | | Drehwinkel |
| ω_{WZ} | $1/s$ | Kreisfrequenz des Werkzeugs |
| ω_{WS} | $1/s$ | Kreisfrequenz des Werkstücks |

1 Einführung und Aufgabenstellung

Optische Komponenten wie Linsen und Spiegel sind ein integraler Bestandteil vieler alltäglich verwendeter Geräte. Sie besitzen z.B. in Kameras die Aufgabe das Licht eines Objekts auf einen lichtempfindlichen Film oder Chip abzubilden. Die Qualität dieser Abbildung und somit die Qualität der Optik ist ein wichtiger Faktor in der Beurteilung der gesamten Kamera.

Präzise Optiken werden auch heute noch häufig mit der klassischen Prozesskette gefertigt. Zu den typischen Einsatzgebieten dieser Herstellungsweise zählen dabei die Bearbeitung von spröden, empfindlichen und temperaturstabilen Materialien, die Herstellung von Einzelstücken, Kleinserien und die Fertigung von Komponenten mit sehr hohen qualitativen Anforderungen, z.B. in hochwertigen Fotoobjektiven oder Teleskopen.

Die einzelnen Herstellungsschritte der klassischen Prozesskette sind in Abbildung 1 skizziert. Die Herstellung von Linsen und optischen Oberflächen erfordert mehrere aufeinander aufbauende Schritte. Die grau hinterlegten Prozesse stellen dabei die Vor- bzw. Folgeprozesse dar. Der zeitliche Aufwand der einzelnen Schritte steigt in der Regel vom Schleifen über die Politur bis zur Korrektur an. Die Dauer der Bearbeitungsprozesse hängt dabei stark von den Ergebnissen des Vorprozesses ab: Je besser die geschliffene Oberfläche ist, umso geringer ist der Aufwand in der Politur[Pre27].

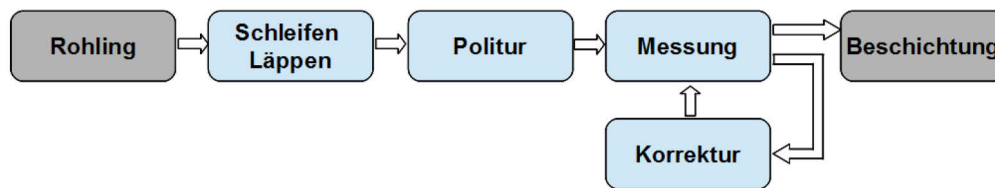


Abbildung 1: klassische Prozesskette bei der Herstellung von Glaslinsen

Der Bereich „Rohling“ in Abbildung 1 umfasst die oft umfangreichen Prozesse zur Herstellung des Ausgangsmaterials in passender Größe und Qualität. Rohlinge werden meist zugekauft und bei Einzelstücken nach Auftrag gefertigt. Einen zylinderförmigen Rohling aus Glas der Sorte BK7 zeigt die Abbildung 2 ganz links. Zur weiteren Bearbeitung in der Schleifmaschine wird der Rohling auf einem Halter befestigt.

Der Punkt „Schleifen, Läppen“ der Abbildung 1 umfasst die Prozesse zur Generierung der Oberflächenform. Bei der klassischen Herstellung von optischen Flächen in spröden Materialien wird die Form der Oberfläche durch einen Schleif- oder Läppprozess erzeugt. Nach der Bearbeitung weist das Werkstück Schädigungen und Spuren der Bearbeitung auf [Pre22], [Bui03]. Die raue Oberfläche des mittleren Werkstücks in Abbildung 2 besitzt durch den Schleifprozess eine matte Oberfläche.

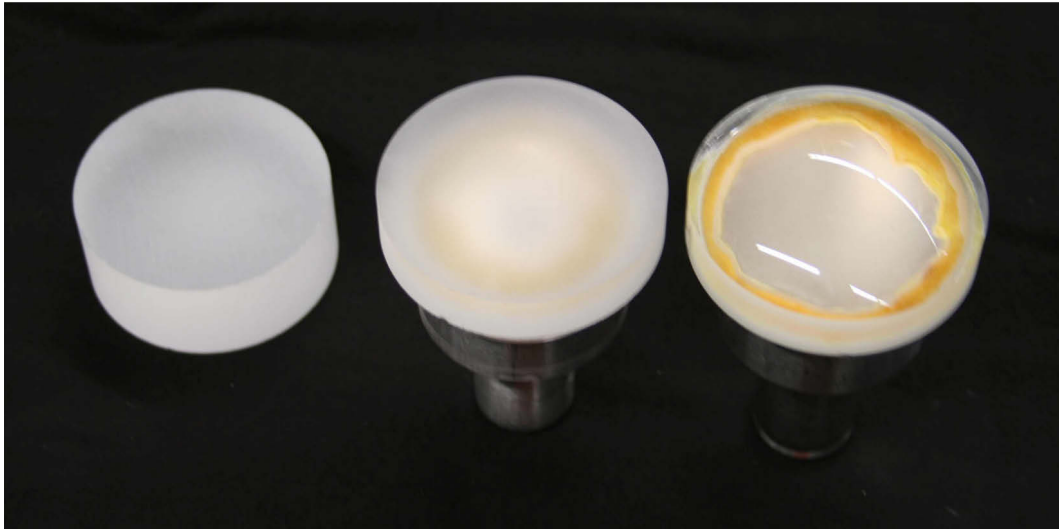


Abbildung 2: Werkstücke während der klassischen Prozesskette zur Herstellung von Optik; Links: Rohling, Mitte: geschliffene Fläche auf Halter, Rechts: nach Politur, der Kitt zur Befestigung des Halters ist deutlich durch die polierte Oberfläche zu erkennen

Die folgende Prozessgruppe „Polieren“ in Abbildung 1 beseitigt die durch die vorhergehende Bearbeitung gestörte Materialschicht und glättet die Oberfläche. Eine polierte Oberfläche zeigt das rechte Werkstück in Abbildung 2. Die raue Oberfläche wurde durch die Politur entfernt. Durch die transparente Oberfläche der Linse ist der Kitt klar zu erkennen, mit dem das Werkstück auf dem Halter befestigt wurde. Genügt die Oberflächenqualität danach nicht den gegebenen Anforderungen so können optionale Korrekturschritte zur Minimierung der Oberflächenabweichungen durchgeführt werden. Diese erfolgen typischerweise in einem iterativen Prozess. Dieser besteht aus der Korrekturpolitur mit anschließender Vermessung der Oberfläche.

Der abschließende Bereich „Beschichtung“ in Abbildung 1 umfasst die Prozesse zur definierten Aufbringung von dünnen Schichten auf die polierte Fläche. Diese dienen zur gezielten Veränderung der Eigenschaften des optischen Elements.

Dazu gehören unter anderem reflektierende Schichten, Schichten zur Entspiegelung der Oberfläche, optische Filter oder kratzfeste Schichten. Nach der Beschichtung folgt typischerweise die Montage und Justage des optischen Elements.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Prozessgruppe „Polieren“ aus Abbildung 1, speziell mit der Politur von Oberflächen mit flexiblen Polierwerkzeugen aus Elastomer.

Bei der Politur wird mit dem Werkzeug Material von der Oberfläche des Werkstücks abgetragen. Dieser Vorgang ist zeitabhängig, d.h. der Materialabtrag verdoppelt sich, wenn das Werkzeug an einer Stelle die doppelte Zeit verweilt. Zudem bearbeitet das Werkzeug zu jedem Zeitpunkt einen ganzen Bereich des Werkstücks, es findet eine flächige Bearbeitung statt. Die Größe und Form des Materialabtrags auf dem Werkstück ist durch die Flexibilität der Werkzeuge nicht eindeutig definiert und durch die Auswahl geeigneter Werkzeuge in weiten Bereichen anpassbar.

Soll der Polierprozess eine vorher festgelegte Materialschicht abtragen, so ist die Steuerung des Polierprozesses erforderlich. Dabei wird durch die gezielte Änderung einzelner Prozessparameter der Materialabtrag ortsabhängig gesteuert.

1.1 Stand der Technik

Die Politur einer optischen Fläche besitzt die Aufgabe, die Oberflächenform des Werkstücks in die geforderte Genauigkeit zu bringen, die durch den Vorprozess entstandene gestörte Materialschicht zu entfernen sowie die Rauigkeit der Oberfläche zu reduzieren[Cum95]. Die Dicke der abzutragenden Materialschicht, im weiteren Verlauf der Arbeit „Abtrag“ genannt, ist daher meist durch die Anforderungen an die optische Fläche vorgeben.

Stand der Technik bei der Optimierung des Abtrags in kommerziell erhältlichen Polierstationen ist die experimentelle Aufnahme einer oder mehrerer Abtragsfunktionen auf der Oberfläche eines Testteils. Diese Abtragsfunktionen beschreiben den Materialabtrag des Werkzeugs auf dem Werkstück, wobei sich die Position des Werkzeugs typischerweise nicht ändert. Dazu wird das Werkzeug für eine vorher festgelegte Zeit mit dem Werkstück in Kontakt gebracht und danach der Abtrag von Material auf der Oberfläche gemessen. Diese konstante, ortsunabhängige Abtragsfunktion dient als Basis zur weiteren Berechnung und Optimierung des Polierprozesses auf dem gesamten Werkstück.

Das Testteil ist nach der Aufnahme der Abtragsfunktionen in der Regel nicht weiter verwendbar. Bei einigen auf dem Markt verfügbaren Systemen wird die lokale Geometrie der zu polierenden Oberfläche berücksichtigt und die gemessene Abtragsfunktion angepasst. Grundlage bleibt dabei aber die an einer oder mehreren Positionen gemessene Abtragsfunktion.

Die Aufnahme von Abtragsfunktionen ist auch Teil der Prozesskette die auf der MRF-Technologie, die von der Firma QED Technologies vertrieben wird [Jac95][Jac99]. Auch bei dem Precessions-Verfahren der Firma Zeeko ist die Aufnahme von Abtragsfunktionen notwendig [Bin00]. Bei der Politur unter Verwendung eines Ionenstrahls findet dieser Schritt ebenso Verwendung [Dru95].

1.2 Ziele der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die Abbildung aller relevanten Einflussgrößen des Polierprozesses mit Padwerkzeugen in einem Modell. Dieses Modells soll die Vorhersage des ortsabhängigen Abtrags ermöglichen.

Ziel ist die Erzeugung von Abtragsfunktionen ausschließlich auf Basis einer Simulationsrechnung. Mit diesen berechneten Abtragsfunktionen soll die

Berechnung des Abtrags auf dem gesamten Werkstück erfolgen. Des Weiteren soll mit dem Ergebnis der Simulation die Optimierung des Abtrags möglich sein.

Mit Hilfe des Modells sollen zudem die einzelnen Prozessparameter untersucht und deren Einfluss auf die Politur dargestellt werden. Alle Eingangsparameter der Simulation sind dabei auf Grundlage physikalisch messbarer Größen definiert.

Ein weiteres Ziel ist die Anwendbarkeit des Modells auf beliebigen sphärischen sowie asphärischen Werkstückgeometrien.

1.3 Gliederung der Arbeit

Das zweite Kapitel gibt einen Überblick über die Eigenschaften der Politur allgemein und beschreibt die grundlegenden Komponenten. Anschließend bietet das Kapitel eine kurze Übersicht über gängige Polierverfahren, liefert einen Überblick über die Modelle zu den Mechanismen des Abtrags in der Politur und beschreibt die Berechnung der Abtragsrate nach der als Preston-Gleichung bekannten Beziehung. Danach ist eine numerische Methode zur Berechnung des gesamten Materialabtrags auf Basis der Abtragsfunktionen dargestellt.

Das dritte Kapitel widmet sich dem Aufbau des Modells, das zur Berechnung des Materialabtrags angewandt wird. Es folgt die Darstellung der für die Modellierung relevanten Eingangsparameter und des, für die Simulation verwendeten, Werkzeugmodells. Die Beschreibung der Berechnung einer Abtragsfunktion sowie die Bestimmung des Gesamtabtrags des Polierprozesses schließen das Kapitel.

Das vierte Kapitel beschreibt die zur Verfügung stehende Polierstation, den Ablauf der Politur in unterschiedlichen Bearbeitungsmodi mit den für die

Bearbeitung erforderlichen Eingangsparametern und bietet eine Übersicht über die zur Überprüfung des Modells verwendeten Polierwerkzeuge und Poliermittel.

Das fünfte Kapitel stellt die anhand des Modells und der Polierstation durchgeführten Versuche und Messungen dar. Die Modellierung von Abtragsspuren sowie der Vergleich mit realen Polituren stehen am Anfang des Kapitels. Darauf folgend werden Ergebnisse zur Modellierung sowie der Optimierung des Abtrags auf der gesamten Oberfläche des Werkstücks dargestellt.

Die Untersuchung der Auswirkung der Änderung der Schrittweite auf das Ergebnis der Simulation führt zu der Festlegung eines Richtwerts. Oberhalb dieses Richtwerts liefert die Berechnung zunehmend fehlerhafte Ergebnisse.

Weiter werden die Einflüsse von Offsetwerkzeugen sowie von Werkstückkanten untersucht und Methoden zur Korrektur dieser Einflüsse dargestellt. Der Einfluss der Relativgeschwindigkeit ist anhand von Versuchen dargestellt. Zur quantitativen Bestimmung dieses Einflusses wird eine Methode zur Messung des Reibungskoeffizienten während der Politur beschrieben.

Den Abschluss des fünften Kapitels bilden Betrachtungen zur Positioniergenauigkeit der verwendeten Polierstation.

Das sechste Kapitel dient der Diskussion des Modells, der durchgeführten Versuche und Messungen. Es werden die Möglichkeiten sowie die Grenzen des Modells und der für die Versuche verwendeten Polierstation aufgezeigt.

2 Polierprozesse für optische Oberflächen

Bei der klassischen Herstellung einer optischen Oberfläche dient die Politur mehreren Zwecken. Die Vorpolitur beseitigt die, durch die vorhergehende Bearbeitung gestörte, Materialschicht. Die Feinpolitur dient der Glättung der Oberfläche. Mit der Korrektur werden Formfehler beseitigt.

Bei der Politur wird das Poliermittel mit dem Polierwerkzeug auf die zu polierende Oberfläche gedrückt. Durch die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück treten die im Poliermittel enthaltenen feinen Abrasivstoffe mit einem Durchmesser unter $3\mu\text{m}$ [Coo90] in Wechselwirkung mit der Oberfläche und tragen dabei Material ab.

Die zur Politur verwendeten Werkzeuge besitzen die Aufgabe, das Poliermittel unter definierten Bedingungen in den Wirkspalt zwischen Werkzeug und der Oberfläche zu bringen. Das klassische Prinzip der Politur ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Werkzeug drückt die abrasiven Partikel mit der vorgegebenen Kraft des Werkzeugs F_{WZ} auf das Werkstück. Dabei sinken die abrasiven Partikel teilweise in die Werkzeugoberfläche ein[Coo90]. Der Polierbelag eines Werkzeugs besitzt daher in der Regel die Fähigkeit, die Abrasivstoffe des Poliermittels teilweise in die Werkzeugoberfläche einzubetten oder durch eine offenporige Struktur zu fixieren.

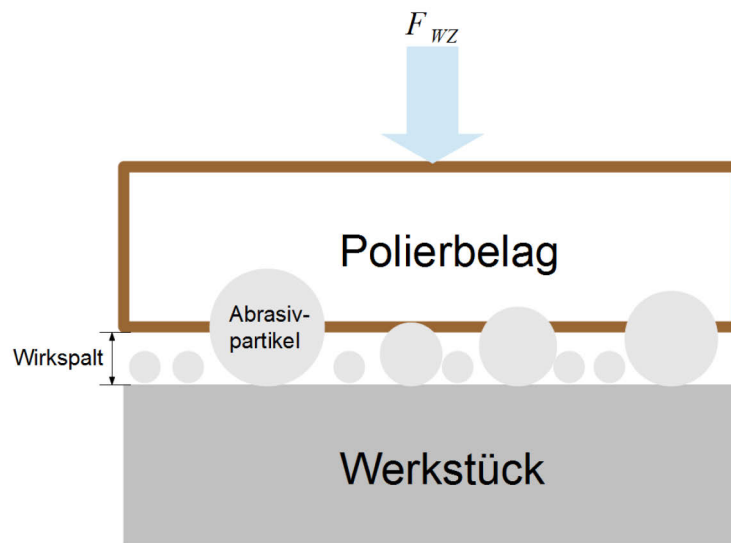


Abbildung 3: Kontaktbereich zwischen Polierwerkzeug und Werkstück, die abrasiven Partikel sinken teilweise in den Polierbelag und werden auf das Werkstück gedrückt, nach [Coo90]

Bei ausreichender Anzahl an abrasiven Partikeln liegt die gesamte Kraft F_{WZ} auf den abrasiven Partikeln. Das Werkzeug selbst besitzt idealerweise keinen Kontakt mit dem Werkstück und trägt somit nicht zum Abtrag bei. Die konstante und ausreichende Verfügbarkeit von Poliermittel im Kontaktbereich ist eine Grundvoraussetzung für einen stabilen Polierprozess.

Polierwerkzeuge sollen eine Viskosität besitzen die so niedrig ist, dass sich Abrasivstoffe teilweise einbetten können und gleichzeitig aber hoch genug ist, um den Druck auf die Abrasivstoffe übertragen zu können [Izu86, S.99]. Zudem soll das Werkzeug elastisch sein um sich der Oberflächengeometrie des Werkstücks anpassen zu können und gleichzeitig hart genug sein, um die Oberfläche glätten zu können.

Die Polierbeläge von Padwerkzeugen bestehen aus natürlichen oder künstlichen Materialien, wie z.B. Filz, Stoff, Baumwolle, Polyurethanschaum oder Polyesterfasern [Kar04, S. 212] und sind in unterschiedlichen Härten und

Füllmaterialien verfügbar. Eine detaillierte Untersuchung des Einflusses des Polierbelags auf das Polierverhalten findet sich in [Pra10].

Das Poliermittel besteht aus einer flüssigen Komponente, festen Abrasivstoffen sowie eventuellen Zusätzen zur gezielten Beeinflussung des Poliermittelverhaltens. Die Poliermittel stehen fertig angemischt als Konzentrat [Kar04, S. 189] zur Verfügung oder können je nach Bedarf selbst angemischt werden.

Die flüssige Komponente in der Glaspolitur besteht oft, zumindest zum Teil, aus destilliertem Wasser. Wasserempfindliche Oberflächen werden zur Vermeidung unerwünschter chemischer Reaktionen auch mit Poliermitteln auf z.B. Ölbasis bearbeitet.

Als Abrasivstoff dienen vor allem Oxide der „Seltene Erden“. Am Häufigsten werden Ceriumoxid CeO_2 , Zirkoniumoxid ZrO_2 , Aluminiumoxid Al_2O_3 und Siliziumoxid SiO_2 verwendet [Kar04, S. 182]. Harte Materialien, wie Metalle oder Saphir, werden oft mit einer Mischung aus Diamantpulver und Öl oder Wasser poliert [Kar04, S.184]. Das traditionell als „Polierrot“ bekannte Eisenoxid Fe_2O_3 kommt nur noch in Sonderfällen zum Einsatz [Kar04, S. 175]. Bei der Verwendung von Ceriumoxid in der Glaspolitur sind, im Vergleich zu Eisenoxid, höhere Abtragsraten zu erwarten.

Durch die unterschiedlichen Anforderungen an den Polierprozess sowie die Vielfalt an Materialien und Formen haben sich zahlreiche unterschiedliche Polierverfahren entwickelt. Bei der Auswahl des Prozesses sind oft neben der Abtragsrate verschiedene weitere Parameter von Bedeutung. Dazu zählen unter anderem die Oberflächenrauigkeit, Formgenauigkeit sowie das Auftreten von Tiefenschädigungen [Eva04]. Daher besteht die Politur einer Oberfläche oft aus einem mehrstufigen Prozess.

2.1 Abtragsmechanismen

Zur Beschreibung der Abtragsmechanismen haben sich vier verschiedene Modelle herausgebildet: mechanisch, plastisch, chemisch und mechanisch-chemisch [Coo90], [Eva03]. Abbildung 4 stellt die vier Modelle in einer Übersicht dar.

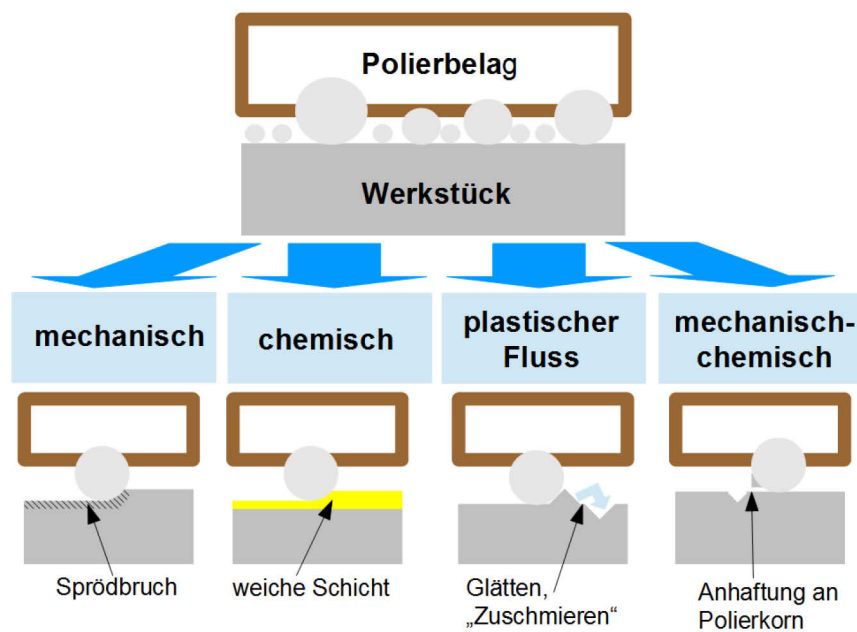


Abbildung 4: Abtragsmodell der Politur, nach [Eva03]

Das Modell des mechanischen Abtrags geht davon aus, dass Material aus der Oberfläche durch die Körner des Abrasivstoffs mechanisch herausgetrennt wird [Pre27]. Bei der Politur von Metallen verformt ein Polierkorn die Oberfläche des Werkstücks elastisch und trennt im weiteren Verlauf seines Weges über die Oberfläche einen Splitter heraus [Bro83]. Dieser Mechanismus ist in der Glaspolitur nur in den frühen Phasen der Politur bestimmend, da eine raue Oberfläche gute Angriffsflächen für die Polierkörner bietet [Eva03].

Das Modell des chemischen Abtrags beschreibt die Bildung und Ablösung einer gelartigen Schicht nahe der Oberfläche. Diese Schicht bildet sich bei Glas durch die Einlagerung von Wasser [Eva03] und besitzt eine niedrigere Härte als das darunterliegende Material. Diese weichere, hydrierte Schicht wird mit Hilfe der Körner des Abrasivstoffs abgetragen [Izu86, S.95]. Die Abtragsrate ist invers proportional zu ihrer Härte [Izu86, S.94]. Der Einfluss dieses Effekts ist abhängig von den Materialeigenschaften des Werkstücks sowie dem Poliermittel [Eva03], [Sch04].

Cook beschreibt fünf Prozesse die den Einfluss des chemischen Modells zusammenfassen [Coo90]:

- (1) Einbringen von Lösungsmittel (Wasser in der Glaspolitur) in die Oberfläche unter dem Druck des Polierkorns.
- (2) Oberflächenauflösung unter Druck
- (3) Anhaftung der Auflösungsprodukte an die Oberfläche des Polierkorns
- (4) Rate der Rückablagerung der Auflösungsprodukte an die Oberfläche
- (5) Oberflächenauflösung zwischen dem Einwirken zweier Polierkörner

Das Modell des plastischen Flusses beschreibt einen Mechanismus, nach dem die Oberfläche lokal durch Reibung mit dem Abrasivstoff soweit erwärmt wird, dass eine plastische Verformung stattfindet und erhöhte Teile der Oberfläche in niedrigere Teile fließen [Izu86, S.91].

Preston vermutete bereits 1925, dass dieser Mechanismus auf molekularer Ebene den Polierprozess beeinflussen könnte wenn eine entsprechende Temperaturerhöhung zugelassen wird [Pre27]. In der Glaspolitur sind für das

Auftreten dieses Effekts bei chemisch veränderten Oberflächen oft schon geringe Temperaturerhöhungen ausreichend [Eva03].

Das Modell des mechanisch-chemischen Abtrags [Coo90] ist auch als Reibungsabtrags-modell[Eva03] bekannt. Dabei binden sich einzelne Glasmoleküle an die Körner des Abrasivstoffs und werden durch deren kinetische Energie aus der Glasmatrix herausgerissen [Eva03].

In dem realen Polierprozess findet sich eine Kombination der verschiedenen Mechanismen [Eva03]. Der vorherrschende Mechanismus hängt von der Art des polierten Materials, des Poliermittels sowie der Bearbeitungsparameter ab und lässt eine Verallgemeinerung einzelner Ergebnisse nicht zu.

2.2 Prozesstechnologien

Bei der Vollflächenbearbeitung ist das Werkzeug größer als das Werkstück und bearbeitet die gesamte Fläche eines oder mehrerer Werkstücke gleichzeitig. Das Werkzeug besitzt dabei die negative Form des zu polierenden Werkstücks. Die Formgenauigkeit der Werkzeugoberfläche wirkt sich dabei direkt auf das Ergebnis des Polierprozesses aus.

Vollflächig bearbeitbar sind in der Regel nur plane und sphärische Flächen. Die Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Aufbau zur vollflächigen Politur einer Planfläche auf Glas. Das Werkzeug ist mittig im Bild sichtbar und besteht aus einer Grundplatte aus Aluminium mit darauf aufgebrachtem Polierbelag. In der Halbleiterindustrie ist die Vollflächenpolitur als Planarisierungsprozess von Wafern weit verbreitet.

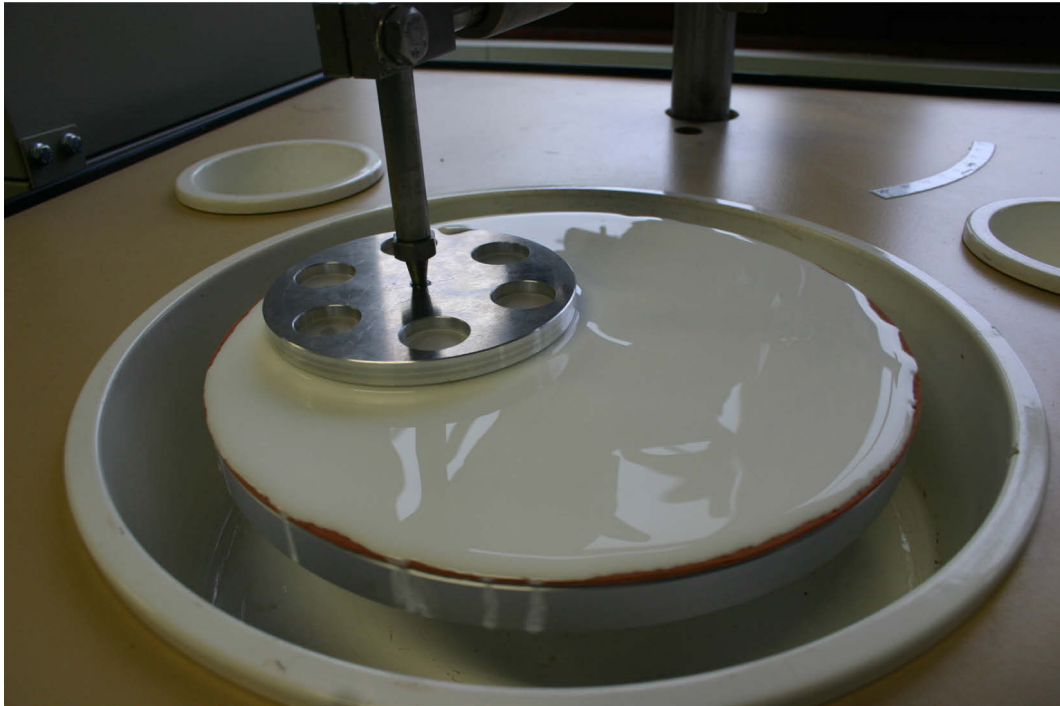


Abbildung 5: Vollflächige Politur einer Planfläche; das Werkstück sitzt kopfüber auf dem runden Halter aus Aluminium im linken oberen Quadranten der Abbildung; das plane Werkzeug ist mit Poliermittel benetzt und deutlich größer als das Werkstück

An der oberen Kante des Werkzeugs in Abbildung 5 ist der braune Polierbelag noch zu erkennen, der Rest ist von Poliermittel bedeckt. Das Werkstück befindet sich kopfüber auf dem Polierbelag, der Halter des Werkstücks besteht ebenfalls aus Aluminium. Die darin eingebrachten runden Aussparungen erleichtern die Demontage nach dem Ende der Bearbeitung. Über den Stößel in der Mitte erfolgt die Halterung und Führung des Werkstücks auf dem Werkzeug sowie der Aufbringung zusätzlicher Kraft.

Zur Bearbeitung von Flächen mit sich änderndem Krümmungsradius sowie zur lokalen Politur von Oberflächen kommen Subapertur-Werkzeuge zum Einsatz. Diese werden im Verlauf der Politur über die Oberfläche des Werkstücks geführt.

2 Polierprozesse für optische Oberflächen

Sie besitzen eine Abtragsfunktion, die deutlich kleiner als der Durchmesser des zu bearbeitenden Werkstücks ist. Der Aufbau ist oft mehrstufig, wobei eine Schicht in der Regel aus flexiblem Material besteht. Damit kann sich das Werkzeug der Oberflächenform des Werkstücks anpassen.

Neben den Eigenschaften der Subapertur-Werkzeuge selbst besitzt die Geschwindigkeit, mit der das Werkzeug über die Oberfläche des Werkstücks geführt wird, einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis des Polierprozesses.

In den meisten Polierprozessen wird das Werkzeug senkrecht auf der Oberfläche bzw. parallel zur Flächennormale geführt. Abbildung 6 verdeutlicht die Lageänderung des Werkzeugs anhand der Darstellung zweier Positionen auf dem Werkstück. Das Werkzeugkoordinatensystem $x'z'$ ändert sich relativ zum Werkstückkoordinatensystem xz im Verlauf der Bearbeitung. Das Werkzeug ist als Padwerkzeug dargestellt. Der schwarze Grundkörper dient der Halterung des darauf befestigten Elastomers, in weiß skizziert. Den Kontakt zu dem in grau gehaltenen Werkstück stellt der braun eingefärbte Polierbelag dar.

In Abbildung 6 bestimmt die grün dargestellte Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück die Größe der Abtragsfunktion. Nur in diesem Bereich findet eine Bearbeitung der Oberfläche statt. Zur Bearbeitung der gesamten Fläche wird das Werkzeug in einer geeigneten Bahn über die Linse geführt.

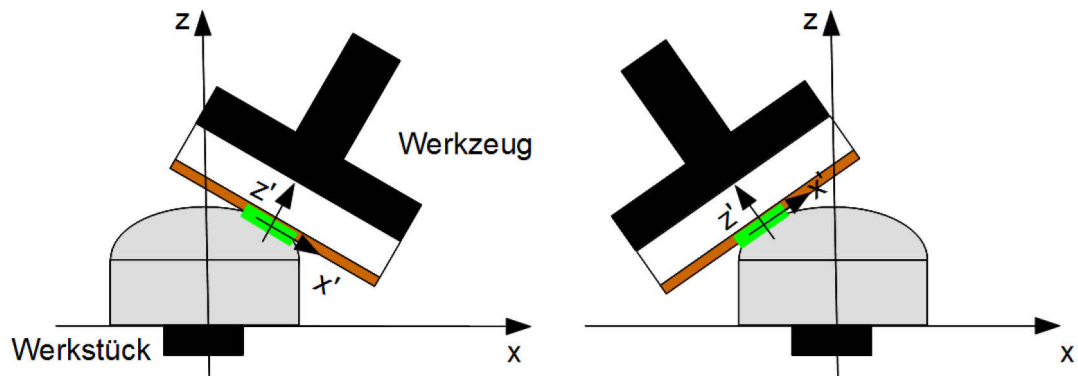


Abbildung 6: Skizzierte Darstellung der Koordinatensysteme von Werkstück (xz) und Werkzeug ($x'z'$). Die Verschiebung und Rotation von $x'z'$ relativ zu xz im Verlauf des Polierprozesses bestimmt die Lage der grün markierten Kontaktfläche.



Abbildung 7 Subaperturpolitur einer Glaslinse

Eine Umsetzung der skizzierten Darstellung aus Abbildung 6 zeigt Abbildung 7. Das Werkstück, eine Linse aus Glas, sitzt auf dem Halter im unteren Teil des

Bildes. Das Werkzeug zur Politur ist im oberen Teil zu sehen, der Polierbelag des Polierpads sitzt direkt auf dem Werkstück auf.

Die blauen Schläuche in Abbildung 7 sorgen für die Zuführung des Poliermittels. Im Verlauf der Politur bewegt sich das Polierwerkzeug, wie in Abbildung 6 skizziert, über die Oberfläche des Werkstücks.

Die Abtragsrate eines Polierprozesses hängt meist von der Größe der Abtragsfunktionen ab. Abhängig vom Anwendungsfall ist die Größe der Werkzeugfunktion begrenzt durch die Oberflächengeometrie des Werkstücks oder Vorgaben zur Formgenauigkeit. Kleine Abtragsfunktionen eignen sich vor allem zur Korrektur von Oberflächenabweichungen bereits polierter Werkstücke, größere Abtragsfunktionen kommen beim Beseitigen der durch den Vorprozess gestörten Materialschicht zum Einsatz.

2.3 Übersicht gängiger Polierverfahren

Bei der Politur haben sich viele unterschiedliche Technologien entwickelt. Die gewünschten Eigenschaften einer Oberfläche fließen in die Auswahl des Verfahrens mit ein. Bei der Vorpolitur ist oft die möglichst schnelle Beseitigung der durch die Vorbearbeitung gestörten Materialschicht gewünscht während bei anderen Prozesstechnologien die Beseitigung von Rauheit oder Formabweichungen im Vordergrund steht. Eine Übersicht über gängige Polierverfahren findet sich in diesem Kapitel.

2.3.1 Pechpolitur

In der Pechpolitur bestehen die Polierwerkzeuge aus natürlich gewonnenem oder künstlich hergestelltem Polierpech. Das Pech wird auf einem planen oder

sphärischen Werkzeug aus Glas oder Metall aufgebracht und dient als Polierbelag [Kar04, S. 202].

Die Rohmaterialien sind in unterschiedlichen Zusammensetzungen und Härten verfügbar und werden vom Hersteller oder vom Benutzer gemischt und auf die Bedürfnisse maßgeschneidert [Kar04, S. 202]. Die Anwendungsgebiete der Pechpolitur liegen sowohl in der Vorpholitur als auch in der Feinpolitur.

2.3.2 Padpolitur

Das Polierwerkzeug wird oft „Polierpad“ (engl. für Polster, Kissen) genannt und besteht aus einem flexiblen Elastomer mit darauf befestigtem Polierbelag. In der kommerziellen Politur finden mehrheitlich Padwerkzeuge aus natürlichen oder künstlichen Materialien Verwendung [Kar04, S. 212]. Abbildung 8, linkes Bild zeigt den typischen Aufbau eines Werkzeugs mit festem Grundkörper in schwarz. Der schraffierte Bereich stellt das Elastomer dar. Es sorgt dafür, dass sich das Werkzeug an die Oberfläche des Werkstücks anpassen kann. Der Polierbelag ist in braun dargestellt und dient der Speicherung des Poliermittels sowie der Einbettung der Abrasivstoffe.

Die Anwendungsgebiete der Padpolitur liegen sowohl in der Vorpholitur als auch der Feinpolitur von Asphären und Freiformflächen. Bei der Korrekturpolitur kommen Padwerkzeuge auch auf Planflächen und sphärischen Flächen zum Einsatz.

2.3.3 IBF

Bei der Verwendung eines Ionenstrahls (Ion Beam Figuring - IBF) als Werkzeug wird auf der Werkstückoberfläche selektiv Material durch beschleunigte Partikel abgetragen [Dru95]. Die Ionen werden in einer Ionenquelle erzeugt und treffen

die Oberfläche mit einer kinetischen Energie von bis zu mehreren keV. Jedes auf der Oberfläche auftreffende Ion schlägt dabei ein bis zwei Moleküle aus der Oberfläche [Bra08, S. 53]. Durch die kontaktlose Bearbeitung zeigt das Werkzeug keinerlei Abnutzung [Dru95].

Die Stabilität der Abtragsfunktion wird von der Ionenquelle bestimmt und lässt sich in der Größe mit Blenden vor der Ionenquelle beeinflussen. Abtragsfunktionen mit einem Durchmesser von bis zu 150mm werden verwendet, das Strahlprofil kann gaußförmig oder rechteckig sein. Im Allgemeinen wird IBF als ein formgebender Prozess verstanden, nicht als ein glättender Prozess [Jac03]. Durch die geringe Abtragsrate ist das Verfahren vor allem zur Korrektur von Oberflächen geeignet.

2.3.4 MRF

Das MRF-Verfahren (magnetorheological finishing – MRF) verwendet als Werkzeug ein magnetisch aktives Fluid bestehend aus magnetischen Partikeln und Abrasivstoff [Jac95]. Das sich bewegende Fluid wird über ein Magnetfeld verfestigt und bildet so das Polierwerkzeug. Durch die Scherbeanspruchung der Abrasivstoffe im Fluid findet ein Materialabtrag statt [Jac99].

Aufgrund der geringen Abtragsrate ist das Verfahren vor allem zur Korrektur von Oberflächen geeignet.

2.3.5 FJP

Beim FJP (Fluid Jet Polishing) dient ein Flüssigkeitsstrahl als Werkzeug. Die Poliersuspension gelangt über eine Düse mit definiertem Druck auf das zu polierende Werkstück. Beim Auftreffen des Strahls erzeugen die in der Suspension enthaltenen Abrasivstoffe durch Scherkräfte einen Abtrag auf der

Oberfläche. Die Größe und Form der Abtragsfunktion wird über den Druck, den Düsendurchmesser sowie den Kippwinkel zwischen Werkzeug und Werkstück bestimmt und ist damit auf den jeweiligen Anwendungsfall anpassbar. Durch die berührungslose Bearbeitung besitzt das Werkzeug keine Abnutzung [Fae98] und durch das Wirkprinzip eine sehr stabile Abtragsfunktion. Zudem sind bei Verwendung kleiner Düsen Abtragsfunktionen mit einem Durchmesser unter 1mm möglich [Fae98]. Das Verfahren eignet sich nur zur Korrektur von polierten Oberflächen.

2.4 Offset- und Radwerkzeuge

Zur Erhöhung der Abtragsrate in der Padpolitur sowie zur Beeinflussung der Abtragsfunktion, besteht die Möglichkeit, ein rotationssymmetrisches Padwerkzeug außeraxial zu betreiben. Dazu wird bewusst ein Versatz, im Weiteren Offset genannt, zwischen der Drehachse des Werkzeugs und der Kontaktfläche von Werkzeug und Werkstück eingefügt. Durch die zusätzliche Geschwindigkeitskomponente des Werkzeugs erhöht sich die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück. Das zweite bis vierte Bild aus der Abbildung 8 zeigt Werkzeuge mit einem Versatz d zur Drehachse des Werkzeugs. Dabei kommen je nach Anwendungsfall plane oder sphärische Werkzeuge zum Einsatz. Das rechte Bild stellt ein Radwerkzeug dar. Dies ist im Prinzip ein um 90° verkipptes kugelförmiges Werkzeug aus dem eine Scheibe herausgeschnitten ist.

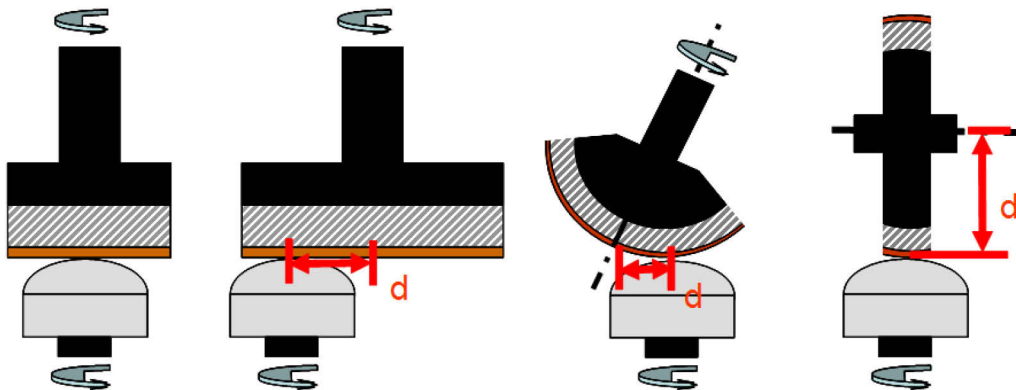


Abbildung 8: Padwerkzeuge, der Offset d ist als Abstand der Kontaktzone von der Drehachse des Werkzeugs in rot eingezeichnet, von links nach rechts: planes Werkzeug ohne Offset, planes Werkzeug mit Offset, sphärisches Werkzeug mit Offset, Radwerkzeug

Abbildung 9, linkes Bild, zeigt ein planes Werkzeug mit deutlichen Bearbeitungsspuren. Der rot markierte Bereich stellt die gesamte aktive Kontaktfläche dar. Während der Bearbeitung ist dabei immer nur ein Teil des ringförmigen Bereichs in Kontakt mit der Oberfläche. Der schwarze Pfeil im linken Bild deutet den Offset d an.

Das Prinzip eines Offsetwerkzeugs bei der Bearbeitung einer rotationssymmetrischen Fläche ist in Abbildung 9, mittleres und rechtes Bild, skizziert. Dargestellt sind die beiden unterschiedlichen Positionierungsmöglichkeiten zur Erzeugung des Offsets. Das Werkstück ist in der Draufsicht zu sehen und grau dargestellt. Die Rotation des braunen Werkzeugs mit ω_{WZ} sorgt mit dem Offset d für die zusätzliche Geschwindigkeitskomponente und sorgt damit für eine erhöhte Abtragsrate im Vergleich mit einem Werkzeug ohne Offset.

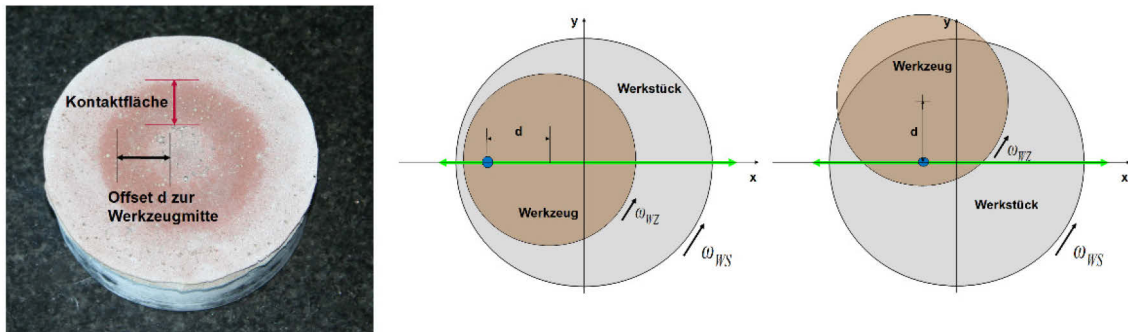


Abbildung 9: links: Werkzeug für die Offsetpolitur, die Kontaktfläche hebt sich dunkler auf dem Polierbelag ab, der Offset d zwischen Kontaktfläche und Drehachse ist in schwarz eingezeichnet; Mitte: Skizze von Werkzeug und Werkstück, Erzeugung des Offsets d parallel zur Werkzeugbahn; Rechts: Erzeugung des Offsets senkrecht zur Werkzeugbahn

Die grün angedeutete Werkzeugbahn in Abbildung 9, mittleres und rechtes Bild, ist für die Politur rotationssymmetrischer Flächen auf dem Rundtisch gedacht. Sie führt entlang der x-Achse vom linken zum rechten Rand des Werkstücks. Das skizzierte Werkzeug liegt in der blau gezeigten Kontaktzone auf dem Werkstück auf. Durch die Rotation des Werkstücks mit ω_{WS} dreht sich die gesamte Oberfläche des Werkstücks unter die blaue Kontaktfläche und führt damit zur Politur der gesamten Oberfläche.

Das mittlere Bild in Abbildung 9 zeigt den Offset des Werkzeugs parallel zur Werkzeugbahn, das rechte Bild zeigt ihn senkrecht dazu. Beide Varianten führen zu einer Erhöhung der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück. Die Variante, in der das Werkzeug parallel zur Werkzeugbahn verschoben ist, besitzt allerdings eine Nullstelle, wenn sich im Kontaktbereich das Werkzeug und das Werkstück gleichsinnig mit der gleichen Geschwindigkeit drehen.

2 Polierprozesse für optische Oberflächen

Die blaue Kurve in Abbildung 10 zeigt beispielhaft den Verlauf der Relativgeschwindigkeit für einen Offset $d=30\text{mm}$ parallel zur Werkzeugbahn im Zentrum der Kontaktfläche. Die Nullstelle liegt bei $x=-30\text{mm}$. Die Relativgeschwindigkeit steigt ab diesem Punkt linear mit der Entfernung zur Nullstelle an. Im Vergleich zu dem Verlauf der Relativgeschwindigkeit ohne Offset, dargestellt in der schwarzen Kurve, liegt die blaue Kurve im Bereich von $x=-32\text{mm}$ bis $x=-15\text{mm}$ unterhalb der schwarzen Kurve. Die Abtragsrate der blauen Kurve ist in diesem Bereich geringer als bei einem Werkzeug ohne Offset.

Die Verwendung von Offsetwerkzeugen in der Rundtischpolitur führt bei unpassender Werkzeugbahn nicht automatisch zu einer Erhöhung der Abtragsrate und sollte bei der Prozessplanung Berücksichtigung finden.

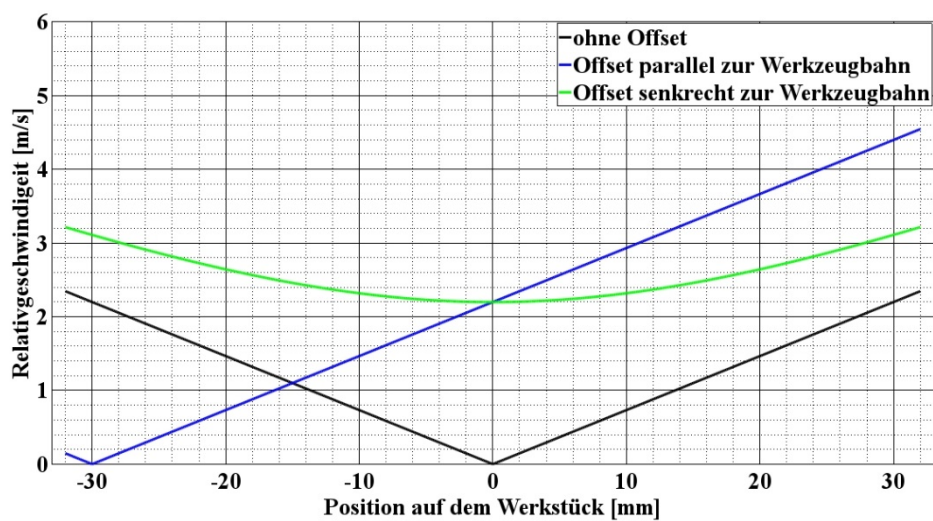


Abbildung 10 Verlauf der Relativgeschwindigkeit bei der Rundtischpolitur bei Verwendung verschiedener Varianten für den Offset $d=30\text{mm}$, Drehzahlen von Werkstück und Werkzeug 700 1/min

Die grüne Kurve in Abbildung 10 zeigt denselben Offset von $d=30\text{mm}$ senkrecht zur Werkzeugbahn. Sie besitzt keine Nullstelle und steigt symmetrisch zum Nullpunkt des Werkstücks nichtlinear an und liegt an jeder Position des Werkstücks deutlich oberhalb des Verlaufs ohne Offset. Die Drehzahlen von Werkzeug und Werkstück zur Berechnung der Relativgeschwindigkeit in Abbildung 10 betragen 700 1/min .

Eine erste Einschätzung, um welchen Betrag die mittlere Abtragsrate bei Verwendung von Offsetwerkzeugen ansteigt, liefern die Mittelwerte der Kurven aus Abbildung 10. Der Mittelwert der Relativgeschwindigkeit ohne Offset beträgt etwa $1,17\text{ m/s}$. Er steigt bei dem Offset parallel zur Werkzeugbahn um den Faktor $1,88$ auf etwa $2,2\text{ m/s}$ an. Der Offset senkrecht zur Werkzeugbahn erhöht die mittlere Relativgeschwindigkeit weiter auf etwa $2,56\text{ m/s}$. Dies entspricht eine Erhöhung gegenüber der schwarzen Kurve um den Faktor $2,18$.

Offsetwerkzeuge besitzen durch den zusätzlichen Versatz zwischen der Drehachse und der Kontaktfläche zum Werkstück eine höhere Abtragsrate als Padwerkzeuge ohne Offset. Bei Verwendung eines Offsetwerkzeugs mit 30mm Offset und unter Vernachlässigung weiterer Einflüsse sollte sich, im Vergleich zu einem Werkzeug ohne Offset, die Abtragsrate um den Faktor $1,88$ bzw. $2,18$ erhöhen.

2.5 Berechnung des Materialabtrags im Polierprozess

Eine Gemeinsamkeit aller Polierprozesse besteht darin, dass mit einem Werkzeug und passender Poliersuspension Material von der Oberfläche eines Werkstücks abgetragen wird. Dieser Materialabtrag ist zeitabhängig und nimmt mit der Verweilzeit des Werkzeugs auf der Oberfläche zu. Ein Parameter zur

Charakterisierung eines Prozesses ist daher die Abtragsrate, d.h. das Abtragsvolumen pro Zeiteinheit.

Es gibt mehrere Ansätze die Abtragsrate zu berechnen. Dabei werden meist die Abtragsraten eines Polierprozesses messtechnisch erfasst und über empirisch bestimmte Parameter eine Gleichung aufgestellt. Der am meisten verbreitete Ansatz ist in einer Arbeit von Preston 1927 beschrieben.

2.5.1 Abtragsrate nach Preston

Nach Preston besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Polierabtrag und der geleisteten Arbeit. Die Voraussetzung dafür ist die Konstanz aller weiteren Größen. Für den Fall einer Planpoliermaschine lässt sich die geleistete Arbeit W eines Polierprozesses wie folgt beschreiben[Pre27]:

$$W = \mu \cdot A \cdot p \cdot v \cdot t \quad (1)$$

Der Reibungskoeffizient μ sowie die Größe der Kontaktfläche A sind dabei konstant. Somit steht der Abtrag z laut Preston in Zusammenhang mit dem Druck p auf das Werkzeug, der Relativgeschwindigkeit v zwischen Werkzeug und Werkstück sowie der Zeit t in dem das Werkzeug aktiv ist[Pre27].

$$z \propto p \cdot v \cdot t \quad (2)$$

Der Ausdruck ist unter Verwendung des Preston-Koeffizienten c_P als Preston-Gleichung bekannt. Sie beschreibt die Abtragsrate dz/dt eines Polierprozesses. F ist die wirkende Kraft auf die Fläche A und s der Weg, den die Oberfläche des Werkstücks auf dem Werkzeug zurücklegt.

$$\frac{dz}{dt} = c_P \cdot \frac{F}{A} \cdot \frac{ds}{dt} \quad (3)$$

Die Preston-Gleichung hat sich in weiten Bereichen der Politur sowie des Läppens von Oberflächen bewährt und wird mit Erfolg angewandt. Neben der von Preston untersuchten Planpoliermaschine liefert die Preston-Gleichung auch für gekrümmte Geometrien brauchbare Ergebnisse. Ist nur der gesamte Materialabtrag z eines Flächenelements von Interesse, so vereinfacht sich die Preston-Gleichung zu:

$$z = c_P \cdot \frac{F}{A} \cdot v \cdot t \quad (4)$$

Der Preston-Koeffizient beschreibt den Einfluss einer Vielzahl von variablen Kenngrößen eines Prozesses. Der Preston-Koeffizient ist also kein Materialparameter sondern ein Prozessparameter[Lam97].

Der von Preston beschriebene lineare Zusammenhang zwischen der geleisteten Arbeit und dem Materialabtrag [Pre27] deutet auf einen linearen Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizient μ und dem Materialabtrag hin. Hayes und

Moon beschreiben den Reibungskoeffizient als Teil des Preston-Koeffizienten und zeigen die lineare Abhängigkeit beider Parameter [Hay84] [Moon98]. Die Änderung des Reibungskoeffizienten führt daher zu einer Änderung der Abtragsrate in der gleichen Größenordnung.

2.5.2 Berechnung des Materialabtrags auf der gesamten Oberfläche

Nach Gleichung (2) ist die Abtragsrate auf einem Flächenelement proportional zu dem wirkenden Druck sowie der Relativgeschwindigkeit. Diese Parameter sind in vielen Polierprozessen abhängig von der Position des Werkzeugs. Zusätzlich ist die Zeit, die das Werkzeug einen Punkt auf dem Werkstück bearbeitet, die sogenannte Verweilzeit, ebenso abhängig von der Position des betrachteten Punktes auf dem Werkstück.

Betrachtet man eine genügend kleine Zeiteinheit Δt , in der der Druck $P(x, y, t)$ sowie die Relativgeschwindigkeit $v(x, y, t)$ annähernd konstant sind, so lässt sich der Materialabtrag $z(x, y)$ für alle Punkte auf der zu bearbeitenden Oberfläche über ein Zeitintegral darstellen (nach [Asp72][Hay84, S. 30]):

$$z(x, y) = \int_0^{\Delta t} c_p \cdot P(x, y, t) \cdot v(x, y, t) dt \quad (5)$$

Diese so beschriebene Abtragsfunktion $z(x, y)$ des Werkzeugs auf dem Werkstück wird oft auch als Werkzeugfunktion bezeichnet. Weitere gebräuchliche Ausdrücke dafür sind: tool influence function, tool removal function.

Mit der Aufteilung eines Durchlaufs des Polierprozesses in einzelne Zeiteinheiten Δt und der Berechnung einer Abtragsfunktion für jede Zeiteinheit lässt sich die gesamte Auswirkung der Politur, also der gesamte Materialabtrag des Prozesses, über die Addition der einzelnen Abtragsfunktionen erhalten [Asp72].

Eine weitere Möglichkeit der Berechnung der Höhe sowie der Form des durch die Politur abgetragenen Materials lässt sich über die Faltung des Verweilzeitprofils mit der Abtragsfunktion erreichen [Asp72]. Ebenso beschreibt [Hay84, S. 38] die Berechnung des Materialabtrags $S(x, y)$ als Faltung der Abtragsfunktion $z(x, y)$ mit dem Verweilzeitprofil $t_{VZ}(x, y)$:

$$S(x, y) = z(x, y) * t_{VZ}(x, y) \quad (6)$$

Die Tatsache, dass die Abtragsfunktionen sich mit der Position auf dem Werkstück ändern macht die Berechnung nur etwas mühsamer [Asp72].

Berechnet man für jeden diskreten Punkt des Verweilzeitprofils t_{VZ} eine eigene Abtragsfunktion, so lässt sich der Materialabtrag in Form einer Gleichung beschreiben:

$$S(x, y) = z_1(x, y) \cdot t_{VZ,1} + z_2(x, y) \cdot t_{VZ,2} + \dots + z_n(x, y) \cdot t_{VZ,n} \quad (7)$$

Fasst man die Werkzeugfunktionen $z_i(x, y)$ in einer Matrix $G(x, y)$ zusammen, so entsteht ein lineares Gleichungssystem.

$$G(x, y) \cdot t_{VZ} = S(x, y) \quad (8)$$

Damit lässt sich der gesamte Materialabtrag eines Polierprozesses numerisch durch die Addition der einzelnen Werkzeugfunktionen berechnen. Die Werkzeugfunktionen sind dabei mit der ihr zugeordneten Verweilzeit gewichtet. Der Parameter t_{VZ} in Gleichung (8) ist dabei einheitenlos und beschreibt die Verweilzeit in Vielfachen von Δt .

Es ist dabei vorausgesetzt, dass die Abtragsfunktion zeitlich invariant ist, d.h. die durch den Materialabtrag hervorgerufene Änderung der Werkstückform ist ausreichend gering, dass die Form und Größe der Abtragsfunktion unabhängig von der Verweildauer des Werkzeugs auf dem Werkstück ist. Bei ansonsten konstanten Parametern skaliert der Polierabtrag daher linear mit der Verweilzeit.

Die Berechnung des Gesamtabtrags über die Berechnung einzelner Abtragsfunktionen mit diskreten Stützstellen stellt eine Näherung dar. Das Werkzeug bewegt sich kontinuierlich über die Oberfläche und springt nicht von Punkt zu Punkt auf der Werkzeugbahn. Der Einfluss dieses Fehlers hängt von der Dichte der Stützstellen sowie der Größe der Abtragsfunktionen ab und ist im Einzelfall abzuschätzen.

2.5.3 Optimierung des Materialabtrags

Bei der Politur einer Oberfläche ist typischerweise schon vor der Durchführung die gewünschte Form der Oberfläche bekannt. Aus der unterschiedlichen Form vor und nach der Bearbeitung ergibt sich die gewünschte Formänderung der

Oberfläche während des Polierprozesses. Die Steuerung des Materialabtrags bei konstanter Werkzeugfunktion beschreibt [Hay84]. Aspen beschreibt in [Asp72] einen Ansatz, der die Einbindung flexibler Abtragsfunktionen ermöglicht. Algorithmen zur Berechnung diskutiert auch [For97].

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Optimierung des Materialabtrags nicht näher diskutiert, der Vollständigkeit halber jedoch der Ansatz kurz dargestellt.

Die gewünschte Formänderung während des Polierprozesses, zusammen mit einem für den Prozess erforderlichen konstanten Materialabtrag, ergibt den gewünschten Materialabtrag $S(x, y)$ des Prozesses in Gleichung (8). Sind die Werkzeugfunktionen $G(x, y)$ bekannt, lässt sich das Gleichungssystem nach t_{VZ} lösen. Die Verweilzeit t_{VZ} bestimmt für jeden, ihr fest auf dem Werkstück zugeordneten Punkt, die Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeugs entlang der Werkzeugbahn und damit den Materialabtrag auf der Oberfläche des Werkstücks.

3 Modellierung des Polierprozesses

Das Ziel der Modellierung des Polierprozesses besteht in der Nachbildung des positionsabhängigen Abtragsverhaltens eines Padwerkzeugs sowie dem Verständnis der relevanten Einflussgrößen. Zudem soll mit dem Modell die Wahl einzelner Parameter des Prozesses, wie die Anzahl der Oszillationen oder die Größe des Werkzeugs, schon vor der ersten realen Politur festgelegt werden können.

Zur Steuerung des Abtragsverhaltens besteht die Notwendigkeit, die den Prozess bestimmenden Parameter zu kennen und deren Einfluss voraussagen zu können. Aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen ist eine Begrenzung des in der Modellierung erfassten Parameterraums vorteilhaft. Das einfache Hinzufügen bzw. Anpassen einzelner Einflussgrößen in das Modell gestattet eine möglichst hohe Flexibilität.

3.1 Aufbau des Modells

Das Modell bildet die relevanten Parameter des Polierprozesses auf der Polierstation ab. Da die, für die Politur verwendeten Werkzeuge sowie die Geometrien der Werkstückoberflächen variieren, kommt eine analytische Lösung nicht in Betracht. Zur Beibehaltung der Flexibilität der einzelnen Parameter wird ein numerisches, zeitdiskretes Modell verwendet und ein kompletter Prozessdurchlauf abgebildet.

Mit der Modellierung des gesamten Prozesses ist der Einfluss aller geometrischen und positionsabhängigen Parameter möglich. Die genauen Geometrien von Werkzeug oder Werkstück sind dabei vorgegebene Eingangsparameter, diese sind unabhängig von den übrigen Parametern der Modellierung änderbar.

Grundlage des Modells ist die Arbeit von R. Aspden, in der eine diskrete Berechnung der Abtragsrate mit Hilfe eines Computerprogramms dargestellt ist [Asp72]. Dazu wird die Werkzeugbahn in einzelne diskrete Zeitschritte aufgeteilt. Das Modell basiert auf der Berechnung von Abtragsfunktionen für jeden dieser diskreten Zeitschritte entlang der Werkzeugbahn. Durch die kontinuierliche Bewegung des Werkzeugs entlang der Werkzeugbahn wird jedem Zeitschritt eine Position des Werkzeugs zugeordnet. Innerhalb eines Zeitschritts werden konstante, diskrete Größen für alle Parameter angenommen und eine Abtragsfunktion berechnet. Diese Berechnung basiert auf der von Preston formulierten Gleichung (3). Die Überlagerung der Abtragsfunktionen aller diskreten Zeitschritte führt zu dem Gesamtabtrag des Polierprozesses.

3.2 Eingangsparmeter und Randbedingungen des Modells

Die numerische Modellierung des Polierprozesses erfolgt weitgehend auf Basis der für die praktische Politur benötigten Parameter. Um möglichst weitgehende Übereinstimmung der Eingangsparmeter zu erreichen, kommen so weit wie möglich die für die reale Politur verwendeten Datensätze zur Anwendung.

3.2.1 Beschreibung des Werkstücks

Die Form des Werkstücks dient als Basis für die Berechnung der Kraftverteilung zwischen Werkzeug und Werkstück und ist damit ein wichtiger Teil der Eingangsparmeter. Innerhalb des Modells besteht das Werkstück aus diskreten Flächenelementen. Von jedem der Flächenelemente sind die Position sowie die Größe bekannt. Im Verlauf der Simulationsrechnung können sich die Positionen der Flächenelemente durch den „Abtrag“ von Material geringfügig ändern.

Durch die Verwendung von diskreten Flächenelementen ist die Oberflächengeometrie des zu bearbeitenden Werkstücks sehr flexibel anpassbar.

Für rotationssymmetrische Flächen bietet sich dabei die analytische Beschreibung in Form der Asphärengleichung nach [Nor08] an. Für beliebige Flächen kann die Ausgangsform aus anderen Formaten generiert werden. Eine einfach zu implementierende Schnittstelle zu CAD-Programmen stellt z.B. das stl-Dateiformat dar. Die Oberfläche ist dabei durch aneinander grenzende Dreiecke beschrieben.

Reale Messdaten lassen sich ebenso ohne Probleme als Eingangsparameter zur Beschreibung der Werkstückgeometrie verwenden. Ein möglicher Weg besteht darin, die Messdaten mittels Triangulation in das stl-Format zu überführen und daraus äquidistante Flächenelemente zu berechnen. Durch die realen Messdaten ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse eines Simulationslaufs und der durchgeführten Politur möglich.

3.2.2 Beschreibung des Werkzeugs

Die Oberflächenform des Werkzeugs dient, wie die des Werkstücks, als Basis zur Berechnung der Kraftverteilung. Zur Minimierung des Rechenaufwands ist der Einsatz einer analytischen Beschreibung sinnvoll, z.B. ein konstanter Wert für Planflächen. Für beliebig geformte, rotationssymmetrische Werkzeuge kann z.B. die Asphärengleichung Verwendung finden. Beliebiger geformter Werkzeuge sind über andere Methoden zur Flächenbeschreibungen, analog zum Werkstück, ebenso möglich.

Neben der Form des Werkzeugs ist seine Verformbarkeit der wichtigste Eingangsparameter. Diese ist aus dem Datenblatt des verwendeten Elastomers erhältlich und in Form einer Flächenpressung beschrieben. Darunter ist die Verformung einer Fläche bei Beaufschlagung mit einer vorgegebenen Kraft zu verstehen.

Abbildung 11 zeigt die Pressung einiger Elastomere in N/mm^2 auf der y-Achse in Abhängigkeit der Verformung auf der x-Achse. Die beispielhaft dargestellten Elastomere unterscheiden sich deutlich in ihrer Härte. Das gelb dargestellte Sylomer G ist wesentlich weicher als das schwarz dargestellte Sylomer V.

Deutlich sichtbar ist der nichtlineare Verlauf der Flächenpressung einiger Elastomere in Abbildung 11. Im Bereich der Einfederung bis etwa 1mm steigt die Flächenpressung linear an, um dann bei größeren Einfederungen einen flacheren Verlauf zu nehmen. Bei dem schwarz dargestellten Verlauf steigt die Flächenpressung ab einer Einfederung von etwa 2,5mm sogar wieder an.

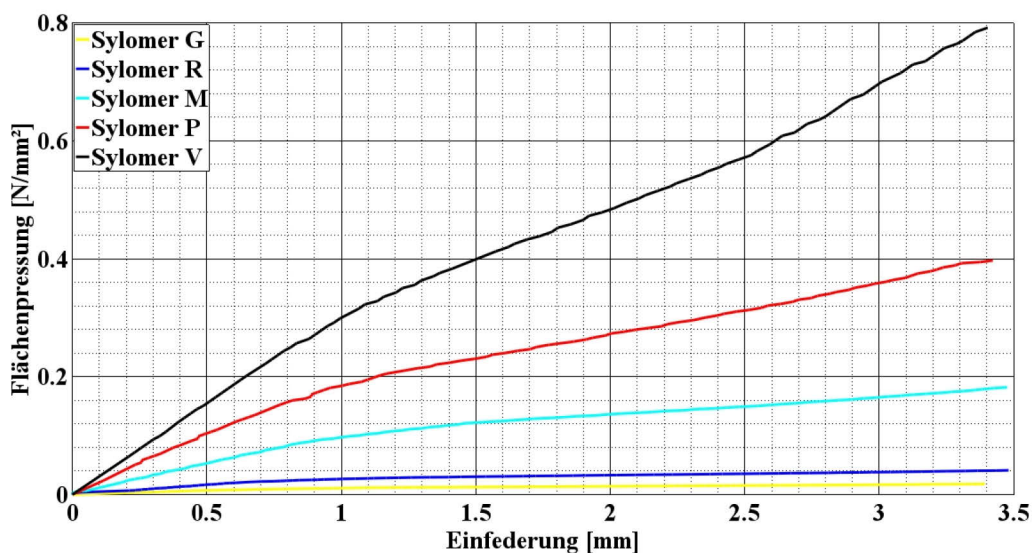


Abbildung 11: Verlauf der Flächenpressung über der Einfederung verschiedener Elastomere, je steiler der Verlauf desto härter das Elastomer, Dicke aller Elastomere 12,5mm, nach [rrg04]

Die Auswahl des Elastomers erfolgt nach Verformbarkeit sowie Härte und beeinflusst entscheidend die Kraftverteilung zwischen Werkzeug und Werkstück und damit die Form der Abtragsfunktion sowie die Glättwirkung des Werkzeugs.

Je geringer der notwendige Druck für die Verformung des Elastomers, desto besser passt sich das Werkzeug der Oberfläche des Werkstücks an. Da sich das Werkzeug mit abnehmender Härte auch den Oberflächenfehlern des Werkstücks anpasst, verringert sich die Glättwirkung mit abnehmender Härte.

Der in Abbildung 11 beispielhaft dargestellte Verlauf der Flächenpressung des Elastomers ändert sich mit der Größe der einfedernden Fläche. Die Datenblätter der Elastomere unterscheiden zwischen „Vollflächige Lagerung“, „Streifenförmige Lagerung“ und „Punktförmige Lagerung“ [rrg04]. Im Rahmen der Modellierung werden die Angaben für punktförmige Lagerung verwendet, da die Größe der Subapertur-Werkzeuge bzw. die Größe der Abtragsfunktion am besten mit der „Punktförmigen Lagerung“ übereinstimmt. Im Rahmen der Polierversuche hat sich dies bewährt.

3.2.3 Werkzeugbahn

Die Werkzeugbahn des Polierwerkzeugs über die Werkstückoberfläche besteht aus diskreten Punkten und beschreibt die Position sowie die Orientierung des Werkzeugs während der Politur. In Abbildung 24 ist eine rasterförmige Werkzeugbahn skizziert. Das Werkzeug wird damit rasterförmig über das zu polierende Werkstück geführt. Bei der Politur von rotationssymmetrischen Werkstücken auf dem Rundtisch sind linienförmige Werkzeugbahnen vom Rand bis zum Mittelpunkt des Werkstücks üblich. Ein Beispiel dafür stellt die grüne Werkzeugbahn in Abbildung 9 dar.

3.2.4 Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit, mit der das Werkzeug über die Werkstückoberfläche geführt wird. Dabei besitzt jeder Punkt

der Werkzeugbahn eine ihm zugeordnete Vorschubgeschwindigkeit, sie besteht also aus einer Punktliste mit derselben Länge wie die Werkzeugbahn.

Die Vorschubgeschwindigkeit eines Punktes gilt vom jeweiligen Punkt bis zum nächsten Punkt der Werkzeugbahn und wird typischerweise in Millimeter pro Sekunde angegeben. Sie lässt sich mit der Verweilzeit t_{VZ} aus Gleichung (8) und dem Punktabstand der Werkzeugbahn berechnen. Durch Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit ist die ortsabhängige Steuerung des Polierabtrags möglich. Im einfachsten Fall ist dieser Wert konstant.

3.2.5 Drehzahlen und Kraft auf das Werkzeug

Die Drehzahlen des Werkzeugs und des Werkstücks sind zwei weitere Eingangsparameter. Beide Größen können für jede Position der Werkzeugbahn definiert werden. Im Normalfall sind die Drehzahlen jedoch konstant.

Die Kraft auf das Werkzeug wird in Newton angegeben und ist ebenso für jeden Punkt der Werkzeugbahn extra definierbar. Diese Größe stellt die auf das Werkzeug ausgeübte Kraft dar. Im Normalfall ist dieser Parameter ebenso wie die Drehzahlen konstant.

3.2.6 Preston-Koeffizient

Der Preston-Koeffizient beschreibt zusammenfassend eine Vielzahl einzelner Größen. Daher ist die direkte messtechnische Bestimmung schwierig. Im Rahmen dieser Arbeit ist nur die messtechnische Bestimmung des zum Preston-Koeffizienten gehörenden Reibungskoeffizienten dargestellt. Alle weiteren enthaltenen Einflussgrößen werden als konstant angenommen. Der Preston-Koeffizient kann daher indirekt durch den Vergleich der Ergebnisse des Modells

und der realen Politur ermittelt und nach Durchlauf der Simulation errechnet werden.

Schwankungen der Abtragsrate eines Polierprozesses führen so zu einer Schwankung des Preston-Koeffizienten.

3.3 Modell unabhängiger, nichtlinearer Federn

Bei der Politur drückt der Polierkopf das Werkzeug mit vorgegebener Kraft auf die Oberfläche. Durch die elastische Verformung des Werkzeugs passt es sich an die Oberfläche an. Das Werkstück verformt sich im Rahmen dieses Modells nicht. Nach der Preston-Gleichung ist der Materialabtrag linear abhängig von der aufgetragenen Kraft. Es findet nur in den Bereichen in denen das Polierwerkzeug eine Kraft auf das Werkstück ausübt der Abtrag von Material statt.

Bestimmend für den Umfang der Verformung des Werkzeugs sind dabei der lokale Verlauf der Oberfläche sowie die elastischen Eigenschaften des Werkzeugs. Die in Abbildung 12 skizzierten Werkzeuge, bestehend aus einer schwarzen Halterung, grau schraffiertem Elastomer und braun dargestelltem Polierbelag verdeutlichen die unterschiedlichen Kontaktbereiche zwischen Werkzeug und Werkstück in Abhängigkeit der Oberflächenform. Durch den Unterschied der Geometrie des Werkstücks in der linken und rechten Skizze ist ein deutlicher Unterschied in der Form der Abtragsfunktionen zu erwarten.

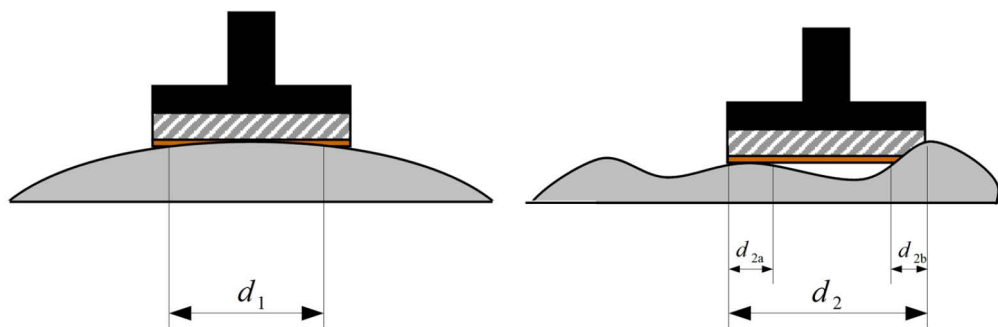


Abbildung 12: Auflagefläche des Polierwerkzeugs in Abhängigkeit der Werkstückform, links: durchgehende Auflagefläche der Breite d_1 mit stärkster Einfederung in der Mitte, rechts: unterbrochene Auflagefläche der Breite d_2 mit stärkster Einfederung am rechten Rand, eine Bearbeitung des Werkstücks erfolgt nur in den Bereichen d_{2a} und d_{2b}

Die in der linken Skizze von Abbildung 12 dargestellte graue, zu polierende, Oberfläche stellt eine sphärische oder leicht asphärische Fläche dar. Sie besitzt nur in der Mitte einen Wendepunkt und das Polierwerkzeug sitzt mit seinem Mittelpunkt auf der Fläche. Eine aufgebrauchte Kraft führt dort zur größten Verformung. Die gesamte Auflagefläche ist mit d_1 bezeichnet und zusammenhängend. Wird das Werkzeug im Verlauf des Polierprozesses über die Fläche geführt, erreicht es alle Teile der Oberfläche. Daher ist die Politur der gesamten Oberfläche mit dieser Werkzeugform möglich.

Die rechte Skizze der Abbildung 12 zeigt eine Freiformfläche mit mehreren Wendepunkten. Das Werkzeug liegt nur mit dem linken und rechten Rand auf, die Auflageflächen sind mit d_{2a} bzw. d_{2b} bezeichnet. Dazwischen befindet sich ein Bereich, in dem das Werkzeug die Oberfläche nicht berührt. Im mittleren Bereich des Werkzeugs findet daher kein Materialabtrag statt. Der maximale Durchmesser der Auflagefläche ist d_2 genannt und nicht zusammenhängend.

Die Politur der gesamten Fläche ist nicht möglich, das hier skizzierte Werkzeug ist für die Politur der Freiformfläche nicht geeignet.

Eine wichtige Eigenschaft des Modells besteht somit in der Forderung, die Kraftverteilung zwischen Werkzeug und Werkstück für unterschiedliche Geometrien nachbilden zu können. Eine Möglichkeit besteht in der Modellierung mittels der „Finite Elemente Methode“ (FEM). Aufgrund der dafür erforderlichen, sehr hohen Rechenleistung kommt eine alternative Methode zum Einsatz.

Das Modell der „unabhängigen, nichtlinearen Federn“ zur Modellierung des Werkzeugs ermöglicht die Berechnung der Verformung mit deutlich geringerem Rechenaufwand. Den Aufbau eines typischen Polierwerkzeugs zeigt Abbildung 13, linkes Bild. Der in schwarz dargestellte Grundkörper dient der Halterung des Werkzeugs in der Maschine und bildet eine feste Basis für das darauf befestigte Elastomer. Der auf dem Elastomer befestigte Polierbelag ist in braun skizziert.

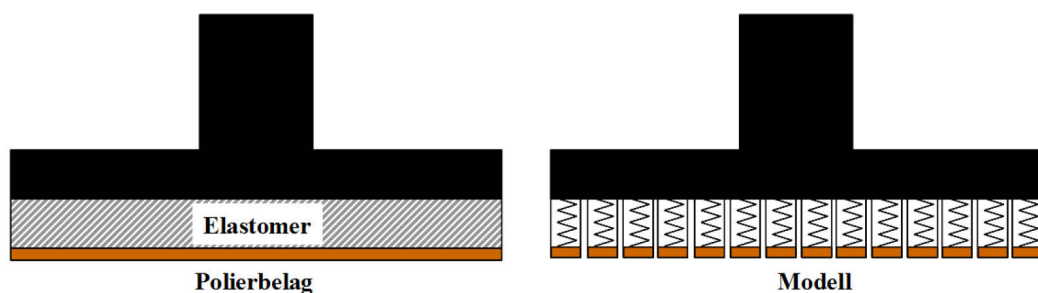


Abbildung 13: links: Aufbau eines typischen Polierwerkzeugs, auf der schwarzen Grundfläche ist das grau schraffierte Elastomer befestigt. Der Polierbelag ist braun dargestellt, rechts: Modell des Werkzeugs, Darstellung des Elastomers als einzelne Federn die unabhängig voneinander verformbar sind

Das rechte Bild in Abbildung 13 zeigt das Modell des Werkzeugs. Die Oberfläche wird in einzelne Flächenelemente unterteilt, die Verformbarkeit des Elastomers ist über gedachte Federn nachgebildet. Die Materialparameter des Elastomers bestimmen die Verformbarkeit dieser Federn. Das Modell berücksichtigt nur die senkrecht auf das Werkzeug wirkenden Kräfte und vernachlässigt dabei auftretende Querkräfte.

Mit Hilfe des Modells der unabhängigen, nichtlinearen Federn und der bekannten Werkzeuggeometrie können der Umfang der Verformung aller Flächenelemente des Werkzeugs und damit die wirkende Kraft bestimmt werden. Die Summe aller, auf die einzelnen Flächenelemente wirkenden Kräfte, stellt die gesamte auf das Werkzeug wirkende Kraft dar.

Eine Anpassung der Skizze aus Abbildung 12 zeigt Abbildung 14. Im linken Bild zeigt sich die größte Verformung in der Mitte des Werkzeugs, im rechten Bild liegt die größte Verformung am rechten Rand des Werkzeugs vor. Durch die bekannte Werkzeuggeometrie sind der Umfang und die Lage der Einfederung diskret berechenbar.

Das Modell der nichtlinearen, unabhängigen Federn berücksichtigt ausschließlich Kräfte, deren Wirkung parallel zu den gedachten Federn verläuft. Im Werkzeug auftretende Querkräfte sind nicht berücksichtigt.

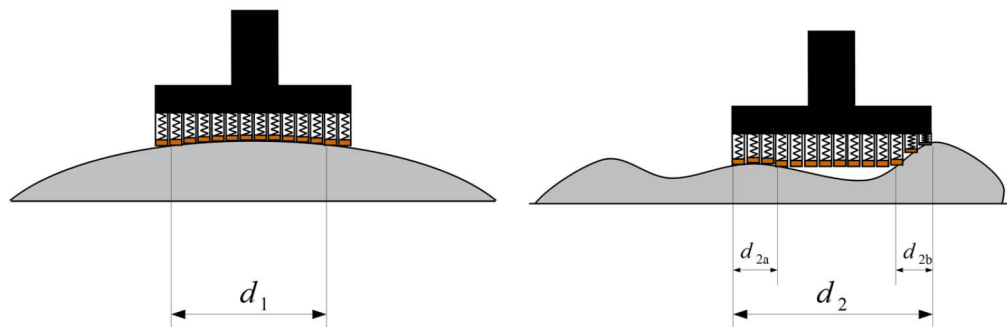


Abbildung 14: Einfederung der Federelemente in Abhängigkeit der Werkstückform am Beispiel der Skizze aus Abbildung 10. Der Grad der Einfederung jedes Flächenelements ist mit der Federkennlinie direkt berechenbar

3.4 Berechnung der Abtragsfunktion

Zur Berechnung der Höhe des Abtrags auf jedem einzelnen Flächenelement des Werkstücks sind nach der Preston-Gleichung (4) folgende Parameter wichtig:

- der Preston-Koeffizient
- die auf das Flächenelement wirkende Kraft
- die Größe des betrachteten Flächenelements
- die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück
- die Dauer der Politur, im Modell die Dauer eines Zeitschritts Δt

Nach erfolgter Bestimmung bzw. Berechnung aller Komponenten ist über die Gleichung (4) der Materialabtrag für jedes Flächenelement des Werkstücks berechenbar.

3.4.1 Preston-Koeffizient

Der Preston-Koeffizient beschreibt den Einfluss einer Vielzahl von variablen Kenngrößen eines Prozesses. Unter anderem ist der Reibungskoeffizient ein Teil des Preston-Koeffizienten [Hay84] [Moon98]. Die Einheit des Preston-Koeffizienten ist $[c_p] = m^2/N = m^3/J$ und beschreibt das abgetragene Volumen pro Einheit eingebrachter Arbeit[Lam97].

Viele der im Preston-Koeffizient enthaltenen Parameter variieren mit den verwendeten Materialien des Werkstücks, des Werkzeugs sowie der Poliersuspension. Aus diesen Gründen ist eine fixe Festlegung des Preston-Koeffizienten nicht sinnvoll. Zielführender ist die iterative Anpassung des Koeffizienten auf Basis vorgenommener Polituren. Damit ergibt sich neben der Anpassung auf den jeweiligen Prozess auch eine Möglichkeit zur Prozesskontrolle: eine Änderung des Preston-Koeffizienten über mehrere Poliervorgänge ist ein Indiz für einen nicht stabilen Prozess.

3.4.2 Berechnung der Kraftverteilung

Die Geometrie von Werkzeug und Werkstück ist im Voraus nicht bekannt. Ist der Prozess kraftgesteuert, d.h. die auf das Werkzeug wirkende Kraft F_{WZ} ist über die Eingangsparameter vorgegeben, erfolgt die Berechnung der Kraftverteilung iterativ über ein Näherungsverfahren.

Die beiden Flächen von Werkzeug und Werkstück werden überlagert. Die Bereiche der Überschneidung beider Flächen liefert die Kontaktfläche. Liegt der Verlauf der Werkzeugoberfläche für ein Flächenelement innerhalb des Werkstücks, ist davon auszugehen, dass sich die Federelemente des Werkzeugs an dieser Stelle verformen. Die Höhe der Verformung ist genau so groß, dass das

Werkzeug auf dem Werkstück zu liegen kommt. Die Skizze im linken Bild von Abbildung 15 verdeutlicht diese positionsabhängige Verformung der Federelemente sowie die Richtung der auf das Werkzeug wirkenden Kraft F_{WZ} .

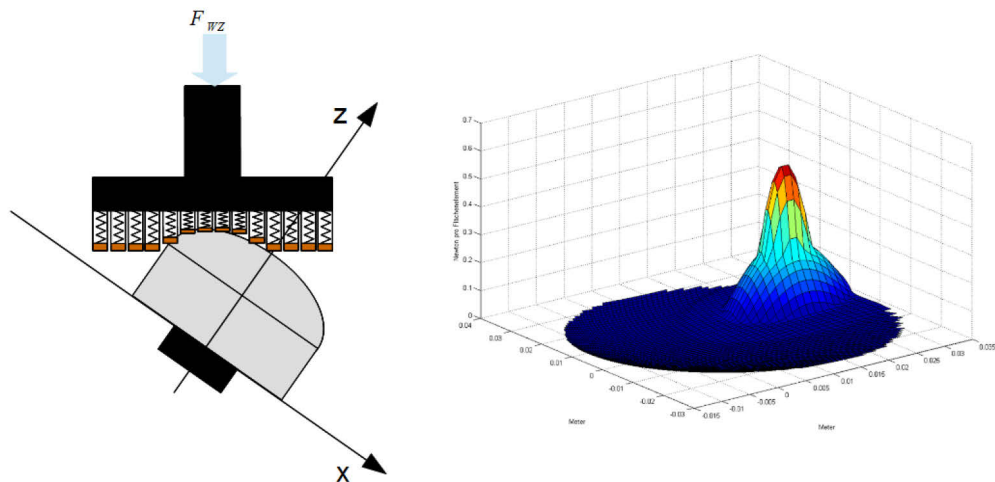


Abbildung 15: Kraftverteilung zwischen Werkzeugmodell und Werkstück; links: Verformung der einzelnen Flächenelemente des Werkzeugmodells, rechts: berechnete Kraftverteilung, die x - und y -Achsen zeigen die Position der Kraft auf dem Werkstück, die z -Achse stellt die Höhe der Kraft dar.

Die Größe A der einzelnen Flächenelemente ist über das vorgegebene Raster bekannt. Daher kann die, auf ein Flächenelement des Werkstücks wirkende Kraft F über die Flächenpressung FP des Elastomers berechnet werden.

$$F = FP(s) \cdot A \quad (9)$$

Die durch die Einfederung s des Werkzeugs verursachte ortsabhängige Kraft auf einem Werkstück ist beispielhaft als Falschfarbendarstellung im rechten Bild von Abbildung 15 dargestellt. Die rote Spitze stellt das Zentrum der Kraftverteilung mit maximaler Verformung der Oberflächenelemente dar. Mit zunehmendem Abstand zum Zentrum fällt die berechnete Kraft zuerst steil ab und läuft zum Rand hin flach aus. Dieser nichtlineare Verlauf hängt von der Kennlinie des Elastomers, der Gesamtkraft F_{WZ} sowie den Oberflächengeometrien von Werkstück und Werkzeug ab.

Das Polierwerkzeug wird bei der iterativen Berechnung parallel zur Richtung von F_{WZ} so verschoben, bis die Summe aller Einzelkräfte der vorgegebenen Gesamtkraft F_{WZ} entspricht. Diese Methode gestattet die Verwendung von beliebig geformten Geometrien für Werkstück sowie Werkzeug und entspricht bei der realen Polierstation dem Variationsbereich des Druckzylinders.

Alternativ zur iterativen Berechnung der zur vorgegebenen Gesamtkraft passenden Einfederung ist mit der fixen Vorgabe der Positionen von Werkzeug und Werkstück die auf das Werkzeug wirkende Kraft berechenbar. Bei diesem weggesteuerten Ansatz ist die Position des Werkzeugs die bestimmende Größe und setzt daher eine hohe Genauigkeit in der Positionierung voraus.

3.4.3 Berechnung der Relativgeschwindigkeit

Zur Berechnung der Abtragsfunktion eines Zeitschritts ist die Berechnung des Betrags der Relativgeschwindigkeit $\overrightarrow{v_{ges}}$ zwischen Werkzeug und Werkstück notwendig. Sie setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

- Die vom Werkzeug verursachte Komponente $\overrightarrow{v_{WZ}}$ ist abhängig von der Drehzahl des Werkzeugs sowie dem Abstand zur Drehachse des Werkzeugs
- Die vom Werkstück verursachte Komponente $\overrightarrow{v_{WS}}$ ist abhängig von der Drehzahl des Werkstücks sowie dem Abstand zur Drehachse des Werkstücks
- Die Bewegung des Werkzeugs entlang der Werkzeugbahn. Diese ist über den Vorschub vorgegeben, mit dem das Werkzeug über das Werkstück geführt wird.

Die durch die Werkzeugbewegung verursachte Komponente der Relativgeschwindigkeit ist oft zum Zeitpunkt der Simulation noch nicht bekannt, da der Werkzeugvorschub oft zur Optimierung des ortsabhängigen Abtrags verwendet wird.

Ist der Anteil klein gegenüber den anderen beiden Komponenten kann der Einfluss der Werkzeugbewegung vernachlässigt werden. Mit dieser Vereinfachung ist die Relativgeschwindigkeit der Betrag der vektoriellen Addition von $\overrightarrow{v_{WZ}}$ und $\overrightarrow{v_{WS}}$:

$$|\overrightarrow{v_{ges}}| = \overrightarrow{v_{WZ}} + \overrightarrow{v_{WS}} \quad (10)$$

Definiert man für das Werkstück und das Werkzeug je ein eigenes Koordinatensystem mit der z-Achse als Drehachse, so lassen sich beide Geschwindigkeitskomponenten jedes Flächenelements berechnen.

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (11)$$

Das linke Bild in Abbildung 16 zeigt dies beispielhaft anhand der Geschwindigkeitskomponente des Werkstücks. Der Ortsvektor \vec{r} beschreibt den Abstand des Punktes P eines diskreten Flächenelements zum Nullpunkt, die Drehung um die z-Achse ist über die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_{WS}$ angegeben. Analog dazu wird die Geschwindigkeitskomponente des Werkzeugs in seinem eigenen Koordinatensystem berechnet.

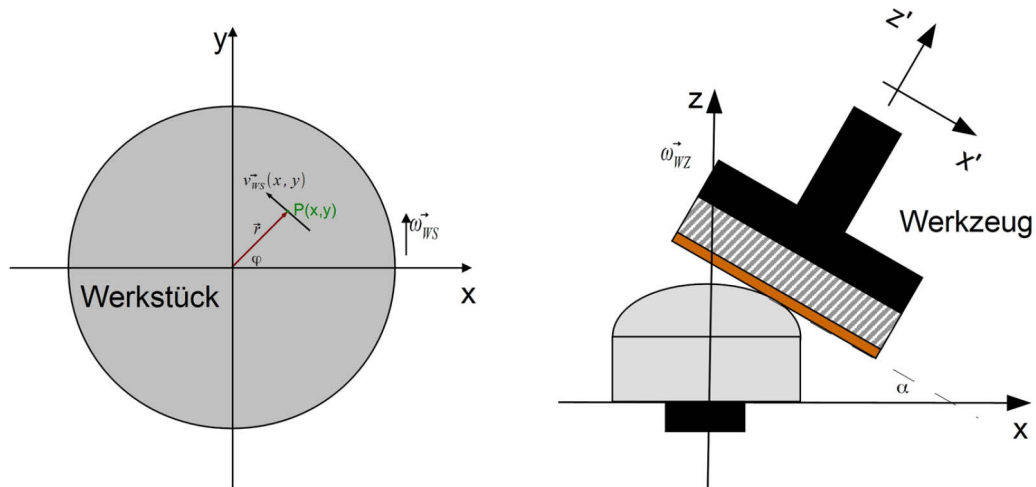


Abbildung 16: Berechnung der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück, links: das Werkstück dreht sich mit seiner Winkelgeschwindigkeit ω_{WS} um die z -Achse, die Geschwindigkeitskomponente \vec{v}_{WS} der Kontaktfläche im Bereich des grünen Punktes $P(x,y)$ berechnet sich mit Hilfe des Ortsvektors \vec{r} , rechts: das Werkzeug im Koordinatensystem $x'z'$ ist um α , gedreht, die Berechnung der Geschwindigkeitskomponente \vec{v}_{WS} geschieht analog zum linken Bild.

Die Skizze im rechten Bild von Abbildung 16 verdeutlicht die Lage der beiden Koordinatensysteme anhand eines zweidimensionalen Schnitts entlang der x -Achse. Die Position des Werkzeugkoordinatensystems $x'z'$ im Werkstückkoordinatensystem xz ist durch die diskreten Wegpunkte der Werkzeugbahn vorgegeben.

Zusätzlich ist das Werkzeugkoordinatensystem $x'z'$ im rechten Bild mit dem Winkel α um die y -Achse gedreht. Der skizzierte Winkel α sowie die im realen Polierprozess vorhandene, aber nicht skizzierte Drehung um die x -Achse ist durch die Werkzeugbahn vorgegeben.

Beide Koordinatensysteme können eine Drehung um ihre z bzw. z' Achse besitzen.

Aus dem Blickwinkel des Werkstücks bedeutet dies, dass sich die Oberfläche des Werkstücks unter dem Werkzeug hindurch wendrehet. Das Werkzeug bearbeitet dabei in zeitlicher Abfolge einen ringförmigen Bereich auf dem Werkstück. Der Betrag von $\overrightarrow{v_{WS}}$ aus dem linken Bild in Abbildung 16 ist zwar konstant, die Richtung des Vektors ändert sich jedoch mit der Rotation der Werkstückfläche und ist für jeden diskreten Zeitschritt zu berücksichtigen.

Aus dem Blickwinkel des Werkzeugs bedeutet dies, dass sich das rotierende Werkzeug über das Werkstück hinweg dreht und in zeitlicher Abfolge unterschiedliche Bereiche des Werkzeugs zur Bearbeitung beitragen. Das ist vor allem bei den Offsetwerkzeugen in Abbildung 9 deutlich zu sehen. Die blaue Kontaktzone wandert mit der Rotation des Werkzeugs und bildet einen ringförmigen Kontaktbereich.

Zur Berechnung der Relativgeschwindigkeit ist daher die Rotation beider Flächen um ihre z -Achsen zu berücksichtigen. Zudem ändert sich die Lage der Koordinatensysteme zueinander im Verlauf der Politur, da die Verschiebung und die Kippung des Werkzeugs durch die Werkzeugbahn vorgegeben sind.

3.4.4 Bestimmung des Reibungskoeffizienten

Nach [Hay84] und [Moon98] ist der Preston-Koeffizient linear abhängig vom Reibungskoeffizient μ , d.h. die Abtragsrate des Polierprozesses ändert sich mit dem Reibungskoeffizienten. Für die Bestimmung des Reibungskoeffizienten stehen spezielle Prüfstände zur Verfügung [Bel09], [Pra10]. Der Aufbau des Werkzeugs in [Bel09] gleicht im Prinzip einem Offsetwerkzeug. Diese

Übereinstimmung lässt sich zur Berechnung des Reibungskoeffizienten während des Polierprozesses verwenden.

Den prinzipiellen Aufbau zur Messung des Reibungskoeffizienten zeigt Abbildung 17. Die Drehbewegung des Offsetwerkzeugs erzeugt ein Elektromotor. Die Stromaufnahme und die anliegende Spannung werden während der Politur kontinuierlich gemessen und daraus die Wirkleistung P_W bestimmt. Die Position der Kontaktzone von Werkzeug und Werkstück ist für jeden Zeitpunkt bekannt und die Relativgeschwindigkeit berechenbar.

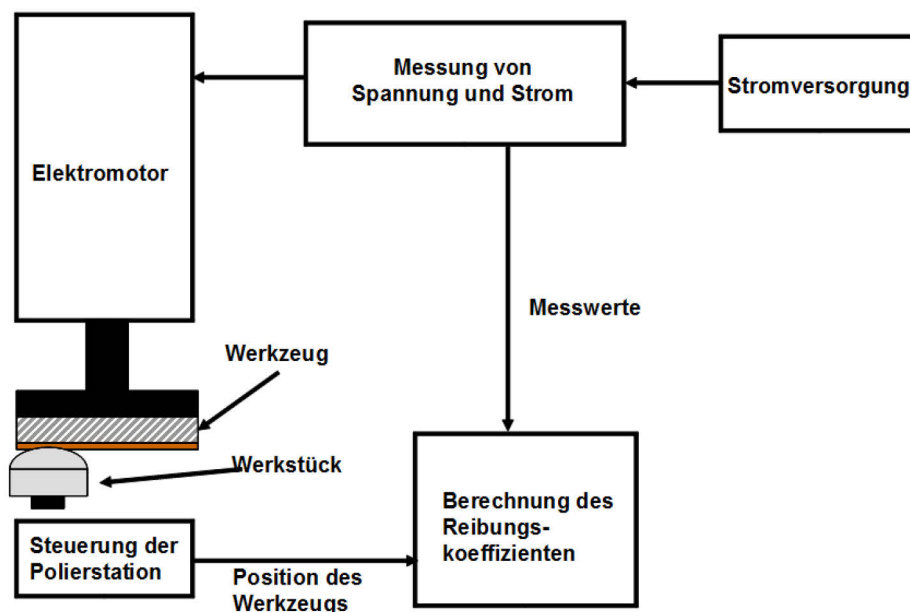


Abbildung 17: prinzipieller Aufbau zur Messung des Reibungskoeffizienten, aus der Leistungsaufnahme des Elektromotors bei der Politur eines Werkstücks sowie der Position des Werkstücks lässt sich der Reibungskoeffizient berechnen

In der Polierstation überlagern sich die Geschwindigkeiten von Werkzeug und Werkstück und erzeugen damit ein von der Position abhängigen Verlauf der Relativgeschwindigkeit. Zur Messung des Reibungskoeffizienten kommt ein Offsetwerkzeug nach Abbildung 9, mittleres Bild, zur Verwendung. Die Geschwindigkeitsvektoren von Werkzeug und Werkstück liegen parallel zueinander und erzeugen daher einen mit der Position linearen Verlauf über dem Werkstück. Bei richtiger Wahl des Offsets ist die maximal erreichbare Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück höher als bei dem Werkzeug ohne Offset. Mit P_W und der Drehzahl des Werkzeugs lässt sich das wirksame Moment τ bestimmen:

$$\tau = \omega_{WZ} \cdot P_W \quad (12)$$

Die Reibkraft F_f berechnet sich mit dem Offset d .

$$F_f = \tau \cdot d \quad (13)$$

Der Reibungskoeffizient ist das Verhältnis von Reibkraft und Normalkraft.

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \quad (14)$$

Zu jedem Punkt der Werkzeugbahn lässt sich die Relativgeschwindigkeit v_{ges} des Prozesses berechnen. Verläuft die Werkzeugbahn auf der x-Achse, wie in Abbildung 9, mittleres Bild, so stehen die beiden Geschwindigkeitskomponenten von Werkzeug v_{WZ} und Werkstück v_{WS} parallel zueinander. Sie können daher addiert werden.

$$v_{ges} = v_{WZ} + v_{WS} = \omega_{WZ} \cdot d + \omega_{WS} \cdot x \quad (15)$$

Der Parameter x beschreibt hier den Mittelpunkt der Kontaktzone. Bei gleichen Drehzahlen für Werkzeug und Werkstück ergibt sich eine Nullstelle bei $x = -d$, entsprechend $v_{ges} = 0$. Durch die Berechnung der Relativgeschwindigkeit nach Gleichung (15) ergibt sich ein, von der Position des Werkzeugs auf der Fläche des Werkstücks abhängiger, linearer Verlauf der Relativgeschwindigkeit. Damit ist für jede Position der Werkzeugbahn über die Werkstückoberfläche der Reibungskoeffizient in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit berechenbar.

Generell ist denkbar, über die kontinuierliche Messung des Reibungskoeffizienten auch Rückschlüsse auf den aktuellen Zustand des Polierprozesses zu erhalten und so z.B. abgenutzte Werkzeuge zu erkennen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das jedoch nicht umgesetzt.

3.5 Berechnung des Gesamtabtrags

Die für jeden diskreten Zeitschritt Δt berechnete Abtragsfunktion dient zur Berechnung des gesamten, durch den Polierprozess erzeugten, Materialabtrags

auf der Oberfläche des Werkstücks. Dieser Gesamtabtrag ergibt sich dabei aus der Summe der Abtragsfunktionen aller Zeitschritte.

Abbildung 18 verdeutlicht das anhand einer Skizze. Sie zeigt ein rundes Werkstück in der Draufsicht sowie die Lage zweier Abtragsfunktionen zum Zeitpunkt t_0 und dem darauffolgenden Zeitpunkt $t_0 + \Delta t$ bei sich drehendem Werkstück. Das Drehzentrum befindet sich dabei in der Mitte des Werkstücks, der Winkel ϕ beschreibt die Drehung des Werkstücks während des Zeitschritts Δt . Durch die Addition der beiden dargestellten Abtragsfunktionen ergibt sich näherungsweise der Abtrag für beide Zeitschritte.

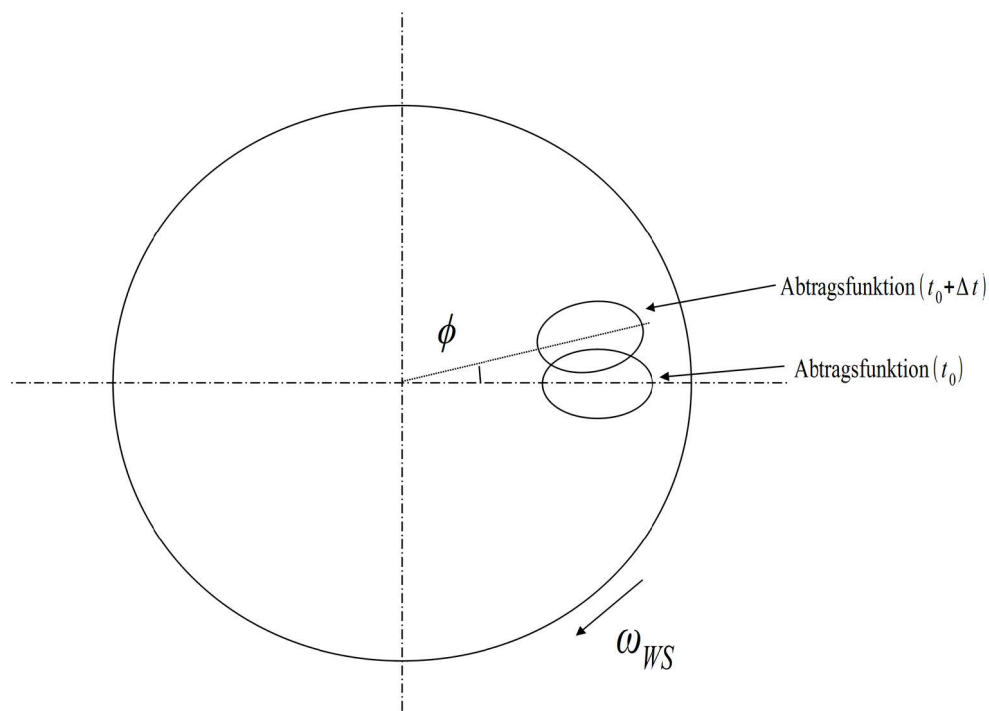


Abbildung 18: Berechnung des Materialabtrags durch Überlagerung von Abtragsfunktionen zweier Zeitschritte auf dem Werkstück, das Werkstück dreht sich mit $\overline{\omega_{WS}}$, dadurch verändert sich die Position der Abtragsfunktion($t_0 + \Delta t$) um den Drehwinkel ϕ relativ zu der Abtragsfunktion(t_0)

Die Wahl der Länge des Zeitschritts Δt hängt vor allem von der Drehzahl des Werkstücks sowie der Größe der Abtragsfunktion ab. Ist Δt so groß gewählt, dass die Abtragsfunktionen zweier aufeinanderfolgender Zeitschritte komplett nebeneinander liegen und sich nicht mehr überdecken, liefert dieser Ansatz keine brauchbaren Ergebnisse.

Die Wiederholung dieser Überlagerung für alle Zeitschritte eines Durchlaufs ergibt dabei den gesamten Materialabtrag der Simulation.

4 Polierstation auf Basis eines Industrieroboters

Zur Verifikation des Modells steht eine Polierstation auf Basis eines Industrieroboters von ABB zur Verfügung. Diese ist mit einem Rundtisch zur Bearbeitung von rotationssymmetrischen Oberflächen sowie einem festen Tisch ausgestattet.

4.1 Aufbau der Polierstation

Der Roboter IRB4400 von ABB ist ein in der Industrie häufig verwendeter Roboter mit breiten Einsatzmöglichkeiten. Seine sechs beweglichen Achsen ermöglichen die freie Positionierung im Arbeitsbereich. Die Programmierung des Roboters erfolgt in der von ABB verwendeten Sprache RAPID. Der Flansch an der sechsten Achse ist zur Montage eines Werkzeugs gedacht.

Zur Verwendung in der Polierstation ist am Flansch der sechsten Achse eine Vorrichtung zur Politur montiert, im Weiteren Polierkopf genannt. Dieser besitzt die Aufgabe, das Polierwerkzeug definiert über die zu polierende Oberfläche zu führen. Der Polierkopf in Abbildung 19 zeigt den typischen Aufbau.

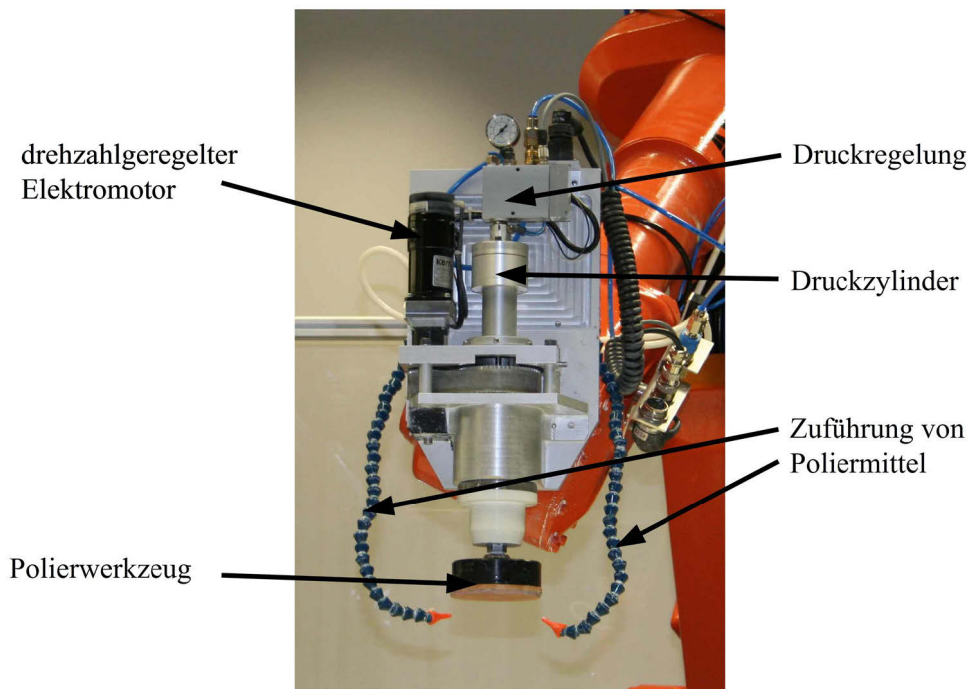


Abbildung 19: Polierkopf montiert an der sechsten Achse des Roboters ABB IRB4400

Das Polierwerkzeug in Abbildung 19 sitzt auf einer beweglichen Welle, die an einem Druckzylinder mit vorgeschalteten regelbaren Ventil befestigt ist. Dies dient der Regelung der auf das Werkzeug aufgetragenen Polierkraft. Ein auf dem Polierkopf montierter, drehzahl geregelter Elektromotor ermöglicht die Steuerung der Drehzahl des Polierwerkzeugs. Über Schläuche wird das Poliermittel während der Bearbeitung kontinuierlich zugeführt.

In Abbildung 20 ist die gesamte Polierstation im Überblick zu sehen. Vor dem Roboter ist ein Tisch mit zwei eingelassenen Arbeitswannen montiert. Innerhalb der linken Arbeitswanne befindet sich ein Hydrodehnspannfutter zur Aufnahme des Werkstücks. Zur Bearbeitung von rotationssymmetrischen Oberflächen ist die linke Vorrichtung über einem drehzahl geregelten Motor mit max. 700 Umdrehungen pro Minute ansteuerbar.

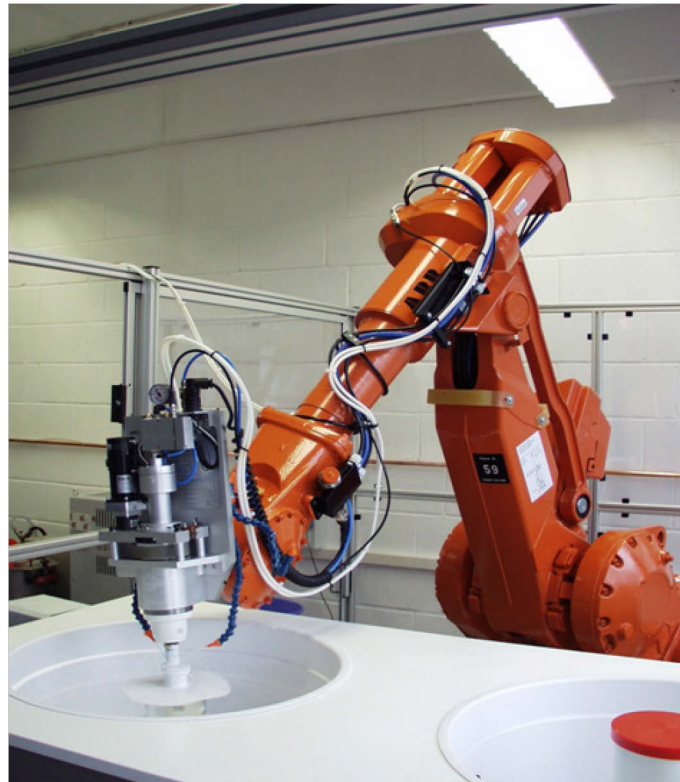


Abbildung 20: Polierstation auf Basis des Industrieroboters ABB IRB4400; der Polierkopf ist am Handgelenk des orangenen Roboters befestigt, die Versorgungsleitungen, Poliermittel- und Druckluftschläuche laufen entlang des Roboters; im Vordergrund ist ein Tisch mit zwei Aufnahmen für Werkstücke, in der linken Aufnahme befindet sich ein Werkstück in Bearbeitung

Die Aufnahme der rechten Arbeitswanne in Abbildung 20 ist nicht drehbar und dient der Politur nicht rotationssymmetrischer Teile. Am rechten unteren Rand des Bildes ist die Aufnahme mit einem roten Deckel verdeckt.

Unter den Arbeitswannen befindet sich eine Vorrichtung zum Auffangen des Poliermittels. Eine daran angeschlossene Schlauchpumpe befördert das Poliermittel in einem geschlossenen Kreislauf über flexible Schläuche zum Polierkopf und auf das zu polierende Werkstück zurück. In Abbildung 20 sind

die weißen, über den Roboter verlegten Schläuche zu sehen, die für die Zuführung des Poliermittels zuständig sind. Der parallel dazu verlaufende blaue Schlauch ist für die Versorgung mit Druckluft zuständig. Die Druckregelung des Polierkopfs ermöglicht die Variation der Polierkraft von 0 bis 40 N, der drehzahlgeregelte Motor des Polierkopfs ist von 0 bis 700 Umdrehungen pro Minute einstellbar.

Die Umsetzung der vorgegebenen Polierkraft auf den zugehörigen Druck übernimmt die Robotersteuerung. Dadurch kann die Angabe der Kraft in der Einheit Newton erfolgen. Auf vergleichbare Weise findet die Umsetzung der Drehzahlen von Werkzeug und Werkstück innerhalb der Steuerung des Roboters statt.

4.2 Typischer Ablauf des Polierprozesses

Die Politur ist ein Teilschritt des oft umfangreicheren Herstellungsprozesses einer Oberfläche. Die Abbildung 1 in der Einleitung verdeutlicht dies anhand des klassischen Herstellungsprozesses einer Glasoptik. Die folgende Darstellung des Polierprozesses basiert auf dieser klassischen Prozesskette.

Eine Voraussetzung zur präzisen Bearbeitung einer Oberfläche ist die genaue Kenntnis der Lage und Ausrichtung. Zur genauen Positionierung des Werkstücks besitzt die Polierstation, so wie alle zur Herstellung in dieser Prozesskette verwendeten Maschinen und Geräte, ein Hydrodehnspannfutter. Der zu bearbeitende Rohling wird zu Beginn auf einen passenden Halter aufgekittet und während der gesamten Prozesskette vom Schleifen oder Läppen über die Politur bis zur Feinkorrektur auf diesem Halter zu belassen. Eine auf einen Halter montierte Linse ist in dem rechten Bild von Abbildung 2 zu sehen.

Nach Beendigung der Vorprozesse wird das zu polierende Werkstück mit dem Spannfutter der Polierstation befestigt. Die Abbildung 21 zeigt eine rotationssymmetrische Oberfläche während der Politur, das Spannfutter befindet sich in der Mitte der Arbeitswanne am mittigen, unteren Ende des Bildes. Das elastische Polierwerkzeug ist am unteren Ende des Polierkopfs montiert. Es wird über den Druckzylinder mit definierter Kraft auf das eingespannte Werkstück gedrückt. Werkzeug und Werkstück drehen sich dabei mit vorgegebener Drehzahl.



Abbildung 21: Politur einer rotationssymmetrischen Oberfläche; der graue Polierkopf im oberen Teil des Bildes drückt das sich drehende Werkzeug auf das sich ebenso drehende Werkstück. Das Poliermittel wird über die blauen Schläuche direkt auf das Werkstück zugeführt. Die Folie unterhalb dient dem Spritzschutz.

Das Poliermittel in Abbildung 21 gelangt über die beiden blauen Schläuche links und rechts vom Polierkopf auf die Oberfläche und sammelt sich danach in der Wanne oder einem darunter montierten Aufnahmegefäß. Eine Pumpe sorgt für die erneute Zuführung des Poliermittels auf die Oberfläche.

Der Roboter führt das Werkzeug auf der vorgegebenen Werkzeugbahn über die Oberfläche des Werkstücks. Diese besteht normalerweise aus einer Liste diskreter Punkte, die der Roboter nacheinander anfährt.

Die Werkzeugbahn kann während eines Polierprozesses mehrmals zyklisch durchlaufen werden. Im Wesentlichen gibt es dafür mehrere Gründe:

- Der Dynamikbereich des Roboters ist begrenzt und die reale Vorschubgeschwindigkeit von den Fähigkeiten des Roboters abhängig.
- Die Abtragsrate ist abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit und nur in einem begrenzten Parameterbereich annähernd konstant.
- Mit der Aufteilung der Bearbeitungsdauer auf mehrere Zyklen teilt sich auch der Materialabtrag in gleicher Weise auf. Die Einflüsse von eventuell im Prozess vorhandenen Schwankungen des Materialabtrags werden dadurch minimiert und über die gesamte zu bearbeitende Fläche verteilt.

Mit gegebener Bearbeitungszeit lässt sich über die Anzahl der Durchläufe, auch Oszillationen genannt, die Vorschubgeschwindigkeit anpassen. Nach Beendigung des Polierprozesses wird das Werkstück aus dem Spannfutter entnommen, die Oberfläche von Poliermittelrückständen gereinigt und bei Bedarf vermessen.

4.2.1 Politur sich drehender Werkstücke

Die Bearbeitung von rotationssymmetrischen Oberflächen erfolgt auf einem drehbar aufgebauten Spannfutter, auch Rundtisch genannt. Dabei ist das Werkstück so montiert, dass die Rotationsachsen von Werkstück und Spannfutter übereinander liegen. In Abbildung 22, linkes Bild, liegt die Drehachse auf der z-Achse des Koordinatensystems. Mit der Drehung des Spannfutters dreht sich damit auch das Werkstück um seine Rotationsachse.

Wird das Werkzeug für eine definierte Zeit an einen Punkt auf die Oberfläche gesetzt, erzeugt die Abtragsfunktion des Werkzeugs durch die Drehbewegung des Werkstücks ω_{WS} eine ringförmige oder kreisförmige Abtragsspur auf der Oberfläche. Im linken Bild von Abbildung 22 ist dies schematisch dargestellt. Das runde Werkzeug ist braun unterlegt, die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück ist als blauer Kreis in der Mitte des Werkzeugs mit dem Durchmesser Δx dargestellt. Dies stellt auch die Breite der Abtragsspur dar.

Das rechte Bild in Abbildung 22 zeigt beispielhaft eine polierte Abtragsspur auf einer geschliffenen Glaslinse mit einem Durchmesser von ca. 64mm. Das Werkstück ist auf einem Werkstückhalter befestigt. Dieser dient der Befestigung bei der Bearbeitung oder Vermessung. Der geschliffene Teil der Oberfläche ist rau und matt. Die ringförmig ausgetragene, klare Abtragsspur hebt sich deutlich davon ab.

Durch die rotationssymmetrische Austragung der Abtragsfunktion genügt zur Politur der gesamten Oberfläche auf dem Rundtisch nur eine Werkzeugbahn vom Rand zur Mitte des Werkstücks. In Abbildung 23 ist ein möglicher Verlauf der Werkzeugbahn als grüne Linie skizziert, das Werkzeug wird hier in einer Linie über die gesamte zu polierende Oberfläche des Werkstücks geführt.

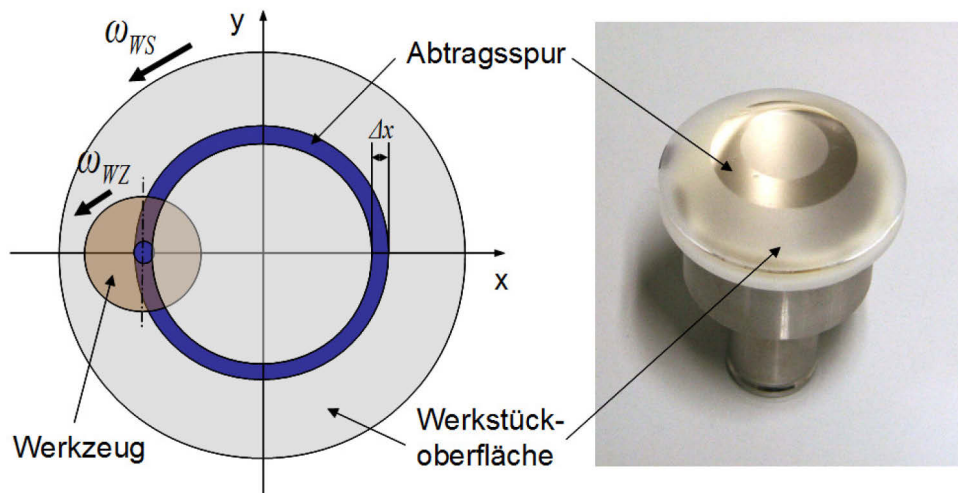


Abbildung 22: links: skizzierte Darstellung der Rundtischpolitur. Werkzeug und Werkstück drehen sich mit ihrer jeweiligen Winkelgeschwindigkeit. Die Kontaktfläche mit der Breite Δx liegt im Zentrum des Werkzeugs und wird über die Drehung des Werkstücks rotationssymmetrisch ausgetragen. Rechts: auf Werkstückhalter montierte Glaslinse mit polierter Abtragspur auf geschliffener Oberfläche

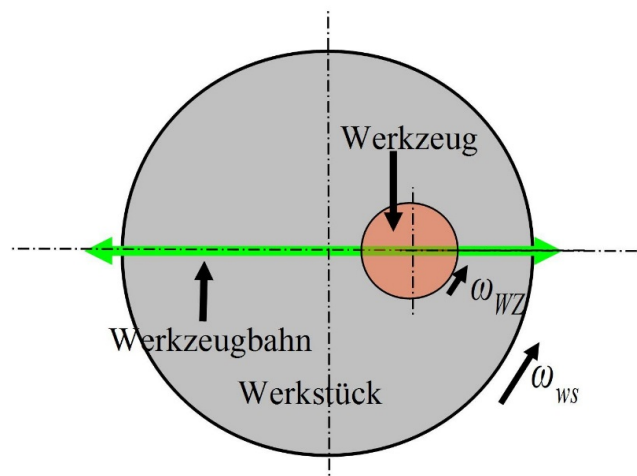


Abbildung 23 skizzierter Verlauf der Werkzeugbahn in grün bei der Rundtischpolitur zur Politur der gesamten Oberfläche.

4.2.2 Politur feststehender Werkstücke

Ein fest stehendes Werkstück ermöglicht die nicht rotationssymmetrische Bearbeitung von Oberflächen. Dabei kann entweder das Werkstück selbst eine Freiformfläche sein, oder der erwünschte Gesamtabtrag auf einer ansonsten rotationssymmetrischen Fläche enthält nicht rotationssymmetrische Anteile. Dies ist der Fall, wenn in einem Korrekturschritt auf der Oberfläche vorhandene unsymmetrische Abweichungen beseitigt werden sollen.

Bei dieser Form der Bearbeitung wird das Werkzeug so über die Oberfläche geführt, dass das Werkzeug die gesamte Fläche erreicht. In Abbildung 24 ist beispielhaft eine, grün dargestellte, mäanderförmige Werkzeugbahn in x-Richtung zu sehen. Die grünen Pfeile zeigen die Fahrtrichtung des Werkzeugs an. Die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück liegt in der Skizze im Zentrum des Werkzeugs und erzeugt an dieser Stelle einen Abtrag auf der Oberfläche. Die ebenso blau eingezeichnete Abtragsspur wird in diesem Fall von der Drehbewegung des Werkzeugs sowie der Bewegung des Werkzeugs auf der Werkzeugbahn erzeugt.

Die Form der Werkzeugbahn selbst ist dabei nicht festgelegt. Neben der gezeigten Mäanderform finden oft auch andere Werkzeugbahnen, wie z.B. Spiralbahnen, Verwendung. Der genaue Verlauf der Werkzeugbahn ist vom jeweiligen Polierprozess abhängig und wird im Allgemeinen für jede Werkstückgeometrie individuell erstellt. So hängt z.B. der Abstand der grünen Werkzeugbahnen in Abbildung 24 entlang der y-Achse von der Breite der Abtragsfunktion des Werkzeugs ab.

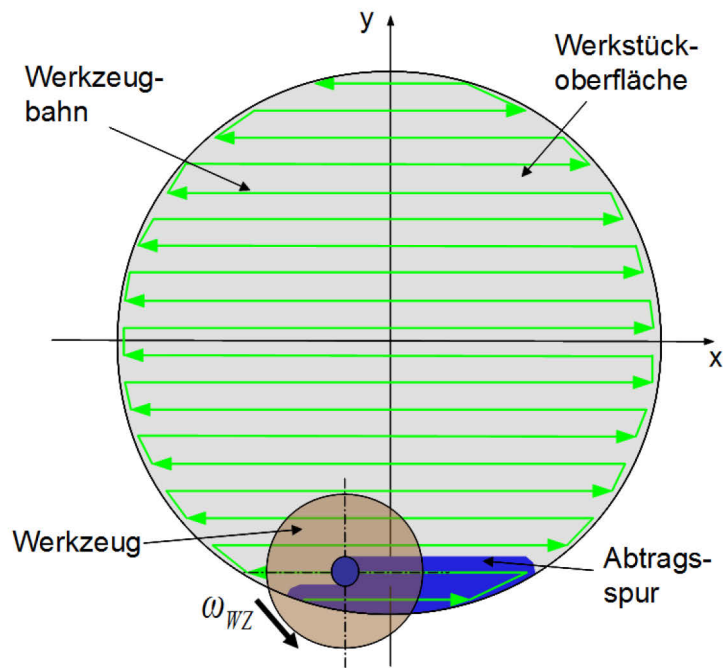


Abbildung 24: Skizze der Politur eines festen Werkstücks, das braun unterlegte Werkzeug dreht sich um seine Achse und bearbeitet das Werkstück in einer rasterförmigen Werkzeugbahn. Die blaue Kontaktfläche im Zentrum des Werkstücks erzeugt dadurch eine Abtragsspur.

4.3 Werkzeuge und Poliermittel

Der in der Polierstation verwendete Polierkopf ist für die Bearbeitung mit Polierpads konstruiert. Am unteren Ende des Polierkopfs in Abbildung 21 ist ein austauschbarer Halter aus Kunststoff befestigt. Er dient als Halterung des Polierwerkzeugs und ist auf die jeweilige Größe und Dicke des Polierpads angepasst. Das Polierwerkzeug selbst besteht aus einem flexiblen Elastomer mit darauf befestigtem Polierbelag.

Für die Herstellung der Werkzeuge sind verschiedene Typen von Elastomeren sowie von Polierbelägen verfügbar. Mit dem wechselbaren Halter sind zudem die Dicke und der Durchmesser der Werkzeuge variabel und kann auf die jeweiligen

Anforderungen optimiert werden. In der Abbildung 25 ist eine Auswahl an Werkzeugen dargestellt: das Werkzeug ganz links besitzt einen Durchmesser von 6mm und wird vor allem zur Korrekturpolitur eingesetzt. Das zweite Werkzeug von links wird ebenso zur Korrektur eingesetzt und besitzt einen kugelförmigen Kopf mit dem Radius 4mm.



Abbildung 25: Auswahl an Werkzeugen zur Padpolitur; von links: 6mm Pad, Kugelwerkzeug mit Radius 4mm, 16mm Pad mit Elstomer, 26mm Pad

Die beiden rechten Werkzeuge in Abbildung 25 sind größer, 16mm und 26mm im Durchmesser. Sie kommen bei der Vorpolitur wie auch bei der Korrektur zum Einsatz.

Das Poliermittel befindet sich in einem Sammelbehälter, der sich bei der Polierstation unter der Arbeitswanne befindet. Um ein Absetzen der festen Bestandteile zu verhindern sorgt eine Schlauchpumpe für ständigen Umlauf in einem geschlossenen Kreislauf. Es stehen mehrere verschiedene Poliermittel auf Basis von Ceriumoxid, Aluminiumoxid oder Diamant zur Verfügung. Zur Politur von Glas wird meist eine Mischung aus destilliertem Wasser und Ceriumoxid mit

4 Polierstation auf Basis eines Industrieroboters

einer definierten Körnung zwischen 0,5 und 1 μ m zugesetzt ist. Die Dichte dieser Mischung liegt bei typischerweise 1,06 g/l.

5 Ergebnisse

Zur Bestätigung der Gültigkeit des Modells werden Polierversuche auf der Polierstation durchgeführt und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Unter Verwendung der Simulation werden verschiedene Einflüsse auf das Abtragsverhalten in der Rundtischpolitur erfasst und Wege zur Kontrolle dieser Einflüsse aufgezeigt. Die Ergebnisse gliedern sich dabei in drei Bereiche auf. Der erste Bereich beinhaltet die Versuche zur Übereinstimmung des Abtrags in der Simulation und der Politur und untergliedert sich in folgende Teile:

- Kapitel 5.1.1: Modellierung von Abtragsspuren
- Kapitel 5.1.2: Modellierung des Gesamtabtrags mit konstantem Vorschub
- Kapitel 5.1.3: Optimierung des Abtrags

Der zweite Bereich umfasst die Einflüsse der benutzerabhängigen Größen mit Einfluss auf das Abtragsverhalten in der Simulation oder der realen Politur und gliedert sich in zwei Teile:

- Kapitel 5.2: Schrittweite der Werkzeugbahn
- Kapitel 5.7: Positioniergenauigkeit der verwendeten Polierstation

Der dritte Bereich befasst sich mit den Einflüssen von prozessabhängigen Größen auf das Abtragsverhalten und gliedert sich in folgende Teile:

- Kapitel 5.3: Berücksichtigung des Einflusses von Offsetwerkzeugen
- Kapitel 5.4: Verlauf des Abtrags im Randbereich des Werkstücks
- Kapitel 5.5: Berücksichtigung des Einflusses der Relativgeschwindigkeit
- Kapitel 5.6: Messung des Reibungskoeffizienten

Eine Bewertung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse findet sich direkt nach der Darstellung der einzelnen Versuche und Einflüsse.

5.1 Modellierung des Materialabtrags

Zur Verifizierung der Gültigkeit des Modells ist der Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit den Resultaten des realen Polierprozesses unverzichtbar. Dabei sind, neben dem gesamten Abtrag auf dem Werkstück, auch die Abtragsfunktionen für jeden Punkt der Werkzeugbahn von Interesse. Die Optimierung des Abtrags auf Basis der berechneten Abtragsfunktionen liefert ein weiteres Kriterium für die praktische Anwendbarkeit des Modells.

5.1.1 Modellierung von Abtragsspuren

In der Rundtischpolitur erfolgt durch die Rotation des Werkstücks eine ringförmige Austragung der Abtragsfunktion. In der Modellierung liefert die Überlagerung der Abtragsspuren aller Punkte der Werkzeugbahn den Gesamtabtrag der Politur. Interessant bei dem Vergleich zwischen der Simulation und der realen Politur sind dabei die Lage, Geometrie und Größe der Abtragsspuren. Dieser Vergleich liefert eine Abschätzung der Aussagekraft des Modells.

Eine simulierte Abtragsspur ist in Abbildung 26, linkes Bild, dargestellt. Das Höhenprofil ist in Falschfarben dargestellt, die roten Stellen entsprechen den Flächenelementen mit dem höchsten Abtrag. Die blaue Grundfläche stellt den Teil der Oberfläche, auf dem kein Abtrag stattgefunden hat.

Bei der Simulation des Polierprozesses der Rundtischpolitur ist durch die Rotationssymmetrie der Vergleich von Schnittmessungen ausreichend. Dabei geht die gedachte Schnittebene von dem Rand durch das Drehzentrum des

Werkstücks bis zum gegenüberliegenden Rand. Die blaue Linie in dem linken Bild von Abbildung 26 skizziert diese. Die Bewertung der Abtragsspur findet mit diesem Schnitt statt. Den Schnitt in der x - z Ebene durch die Drehachse zeigt das rechte Bild. Die Abtragsspur besitzt einen maximalen Abtrag von etwa $10,5\mu\text{m}$, dargestellt durch den roten Bereich. Die Breite beträgt etwa 18mm , d.h. auf dem Werkstück findet eine Bearbeitung in einem ringförmigen Bereich der Breite 18mm statt.

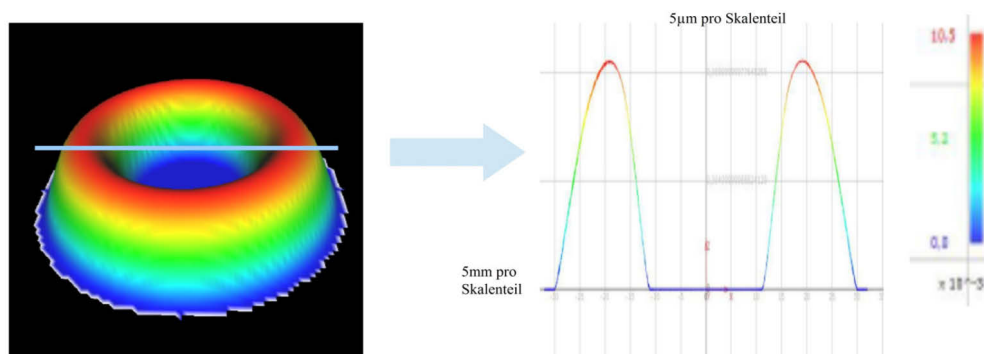


Abbildung 26: simulierte Abtragsspur auf einer Asphäre in Falschfarbendarstellung, rot bedeutet hoher Abtrag, blau geringer Abtrag; links: dreidimensionale Ansicht, die blaue Linie skizziert die Schnittebene für die rechte Darstellung, Mitte: Schnitt in x - z Ebene, die x -Achse zeigt die Position auf dem Werkstück in mm , die z -Achse den Materialabtrag in μm , rechts: Skala der Falschfarbendarstellung

Zur Verifikation des Modells werden einzelne Abtragsspuren poliert und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Für die Politur jeder Abtragsspur wird das Werkzeug für eine festgelegte Dauer auf einer festen Position in Kontakt mit dem Werkstück gebracht und danach vom Werkstück abgehoben. Die Werkzeugpositionierung sowie die Kontrolle der Polierzeit übernimmt ein

Programm auf der Steuerung des Roboters. Der Ablauf zur Aufnahme der Abtragsspuren gliedert sich wie folgt:

- Messung der Oberfläche des Werkstücks
- Montage des Werkstücks in der Polierstation
- Einstellen der geforderten Drehzahlen für Werkzeug und Werkstück sowie der vorgegebenen Kraft
- Positionierung des Werkzeugs mit passender Orientierung auf dem Werkstück
- Politur des Werkstücks an dieser Position mit der gewünschten Dauer
- Abheben des Werkzeugs und säubern des Werkstücks
- Vermessung des Werkstücks nach der Politur
- Berechnen der Abtragsfunktion durch bilden der Differenz beider Messungen

Abbildung 27 zeigt den Vergleich von Abtragsspuren auf einer asphärischen Linse bei verschiedenen Positionen. Die durchgezogenen Kurven stellen dabei die reale Politur dar, die gestrichelt eingezeichneten Kurven sind die Ergebnisse der Simulation. Die blauen Kurven zeigen die Abtragsspur bei der Position $x=2,5\text{mm}$, d.h. die Mitte der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück liegt $2,5\text{mm}$ vom Zentrum des Werkstücks entfernt. Durch die Breite der Abtragsfunktion liegt das Werkzeug auch auf der Drehachse des Werkstücks bei $x=0\text{mm}$ noch auf der Fläche auf. Damit bildet sich eine einzelne, über die Drehachse hinaus reichende Abtragsspur mit sehr viel höherem Abtrag im Vergleich zu den anderen Spuren.

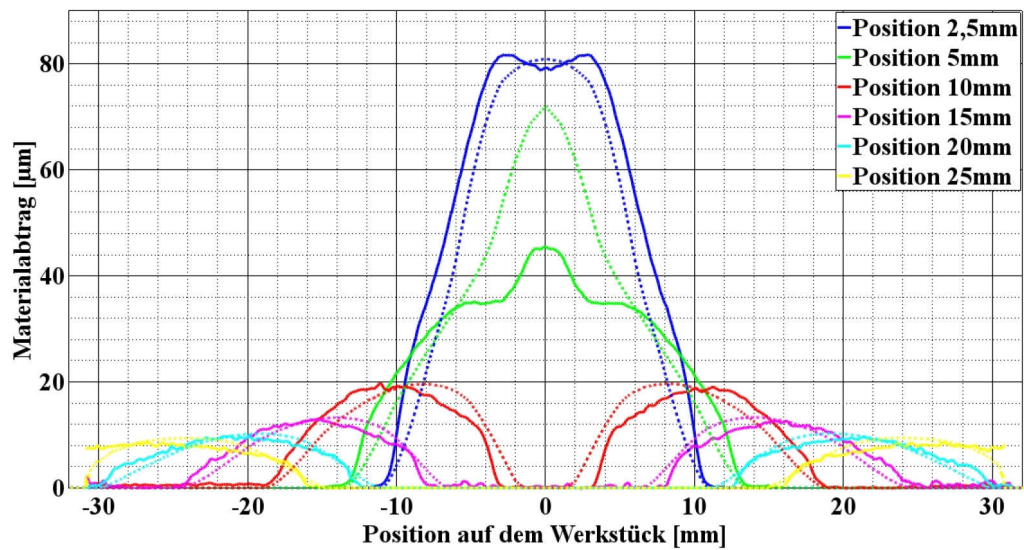


Abbildung 27: Abtragsspuren eines Offsetwerkzeugs an verschiedenen Positionen auf einer asphärischen Linse; gestrichelte Kurve: Simulation, durchgezogene Kurve: Politur

Bei den grünen Kurven in Abbildung 27 ist das Werkzeug bei $x=5\text{mm}$ positioniert. In der realen Politur reicht nur noch ein kleiner Teil der Abtragsfunktion über $x=0\text{mm}$ hinaus und bildet dabei die kuppenförmige Erhebung bei $x=0\text{mm}$ auf der durchgezogenen grünen Kurve. In der Simulation ist die Überlappung ausgeprägter und erzeugt dadurch eine Spitze mit deutlich sichtbarer Abweichung zur realen Politur.

Die roten Kurven in Abbildung 27 zeigen eine in Form und Größe gute Übereinstimmung, allerdings ist die Lage der simulierten Abtragsspuren um etwa ein bis zwei Millimeter versetzt. Wie bei den grünen Kurven ist die Relevanz dieser Abweichungen im Einzelfall zu bewerten. Die Spuren bei den Positionen 15mm, 20mm sowie 25mm stimmen mit den errechneten Verläufen und Größen sehr gut überein und zeigen nur geringe Abweichungen.

Die Polierdauer jeder Spur beträgt 10min, der Durchmesser des Werkstücks 64mm. Das Elastomer auf dem Offsetwerkzeug besteht aus 6mm dickem Sylomer M mit einer 0,5mm dicken PU Polierfolie. Die Drehzahl von Werkstück und Werkzeug beträgt 700 1/min und die Kraft auf das Werkzeug 40N. Als Poliermittel dient Opaline mit einer Dichte von $1,03\text{g/cm}^3$.

Fast alle berechneten Abtragsspuren, mit Ausnahme der Position $x=5\text{mm}$, stimmen gut mit den realen Ergebnissen überein. Dies gilt für den maximalen Abtrag, der Position der Abtragsfunktion sowie dessen Breite.

5.1.2 Modellierung des Gesamtabtrags

Neben der Übereinstimmung einzelner Abtragsspuren ist der Verlauf des Abtrags auf der Oberfläche des gesamten Werkstücks von Interesse. Daher wird die Politur einer asphärischen Linse mit einem Offsetwerkzeug auf dem Rundtisch mit den Ergebnissen der Simulation verglichen.

Der konstante Vorschub von 3mm/s zeigt Abbildung 28. Das Werkzeug wird auf einer Bahn von $x=-32\text{mm}$ bis $x=32\text{mm}$ mit einem Punkteabstand von 1mm über das Werkstück bewegt. Der Durchmesser der asphärischen Linse beträgt 64mm, die Drehzahlen von Werkstück sowie Werkzeug sind 700 1/min. Das Werkzeug ist ein Offsetwerkzeug mit 30mm Offset. Die Dicke des Elastomers beträgt 6mm. Der Polierbelag besteht aus PU und ist 0,5mm dick.

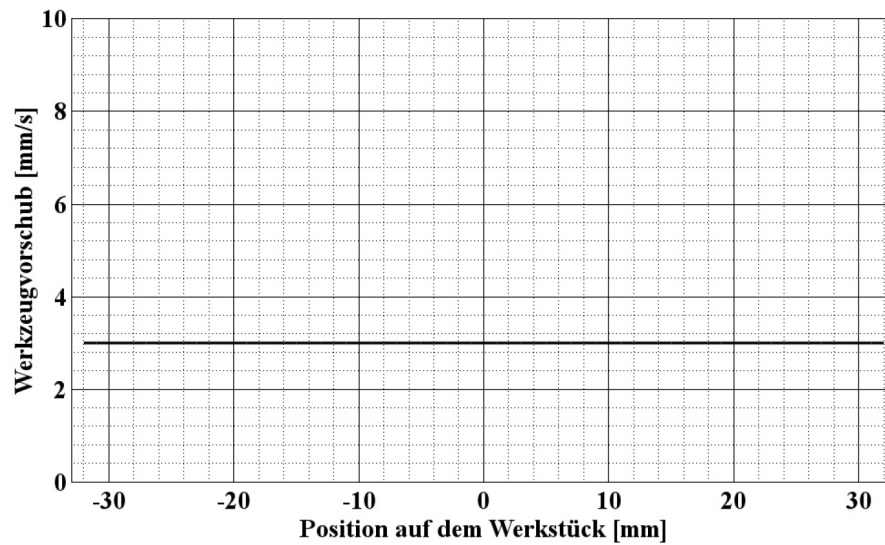


Abbildung 28: Konstanter Vorschub des Werkzeugs über das Werkstück

Abbildung 29 zeigt den Materialabtrag als Schnitt in der xz -Ebene. Das Ergebnis der Simulation ist grün und der gemessene Materialabtrag der Politur blau gestrichelt dargestellt. Der glockenförmig abfallende Verlauf rund um die Drehachse des Werkstücks ist eine typische Eigenschaft von Offsetwerkzeugen in der Rundtischpolitur. Die Ursache dieses Verlaufs liegt in der Positionsabhängigkeit der Höhe der Abtragsspuren, wie sie im Kapitel 5.1.1 dargestellt ist. Der erzielte Materialabtrag in Abbildung 29 beträgt in der Mitte des Werkstücks ungefähr $15\mu\text{m}$, die Simulation sagt für diese Position einen Wert von etwa $16\mu\text{m}$ voraus. Auch im weiteren Verlauf stimmen beide Kurven prinzipiell überein, die Abweichung liegt bei maximal $1\mu\text{m}$. Das zeigt, dass die Simulation den Einfluss des Offsets beim Werkzeug quantitativ abbildet.

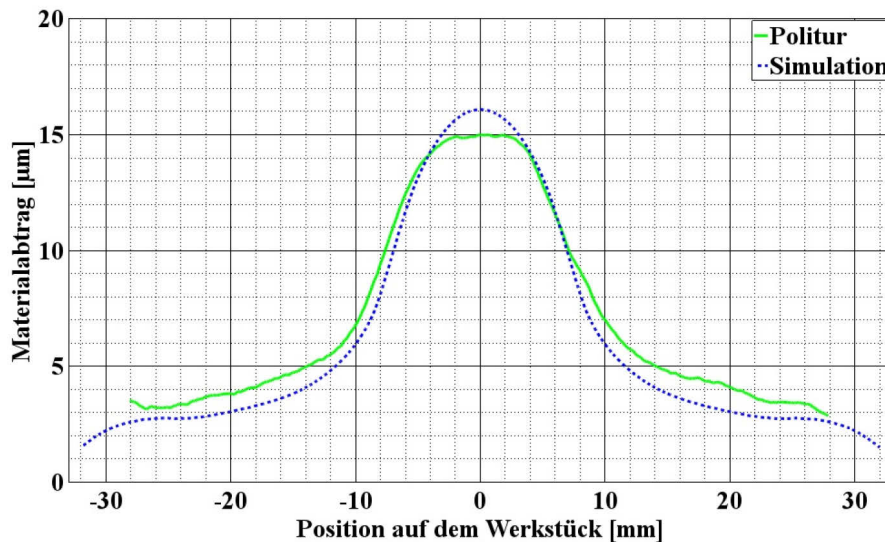


Abbildung 29: typischer Verlauf des Materialabtrags bei der Politur mit Offsetwerkzeug und konstantem Vorschub

Die durch den Abtrag in Abbildung 29 verursachte Änderung der Oberflächenform, d.h. die Differenz zwischen Maximum und Minimum des Materialabtrags, liegt bei etwas weniger als $12\mu\text{m}$ und stellt einen typischen Verlauf des Abtrags von Offsetwerkzeugen in der Rundtischpolitur dar.

Eine Korrektur des Abtragsverhaltens von Offsetwerkzeugen in der Rundtischpolitur ist im Allgemeinen unabdingbar. Üblicherweise findet diese über die Steuerung des Werkzeugvorschubs auf dem Werkstück statt.

5.1.3 Optimierung des Polierabtrags auf Basis der Simulation

Die prinzipielle Vorgehensweise zum Einsatz der Simulation zur Optimierung des Abtrags ist in Abbildung 30 zu sehen. Die grün unterlegten Bereiche stellen die den Start bzw. das Ende der Prozesskette dar. Die auf das beschriebene Modell basierende Simulation ist blau unterlegt und die Optimierung sowie die Bearbeitung in der Poliermaschine orange.

Nach dem Beginn der Prozess in Abbildung 30 steht an erster Stelle die Vermessung der Oberfläche des Werkstücks und darauf folgend die Prüfung der Messergebnisse auf Einhaltung der Spezifikation. Ist diese eingehalten, findet typischerweise keine Bearbeitung statt und der Prozess ist beendet. Bei nicht eingehaltener Spezifikation oder bei nicht vorhandenen Messungen des Werkstücks kann die Simulation unabhängig vom Rest der Prozesskette erfolgen. Dies ist vor allem relevant, wenn sich die Oberfläche des Werkstücks noch im Design befindet und nicht real verfügbar ist.

Die Simulation startet mit dem Erstellen der Werkzeugbahn. Das Verweilzeitprofil besteht aus der Verweilzeit des Werkzeugs an jedem Punkt der Werkzeugbahn. Es kann Korrekturen zur Anpassung an Offsetwerkzeuge (vgl. Kapitel 5.3) und zur Minimierung des Einflusses der Relativgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 5.5) enthalten. Die Berechnung der Abtragsfunktionen auf Basis der vorgegebenen Parameter schließt den Bereich der Simulation ab.

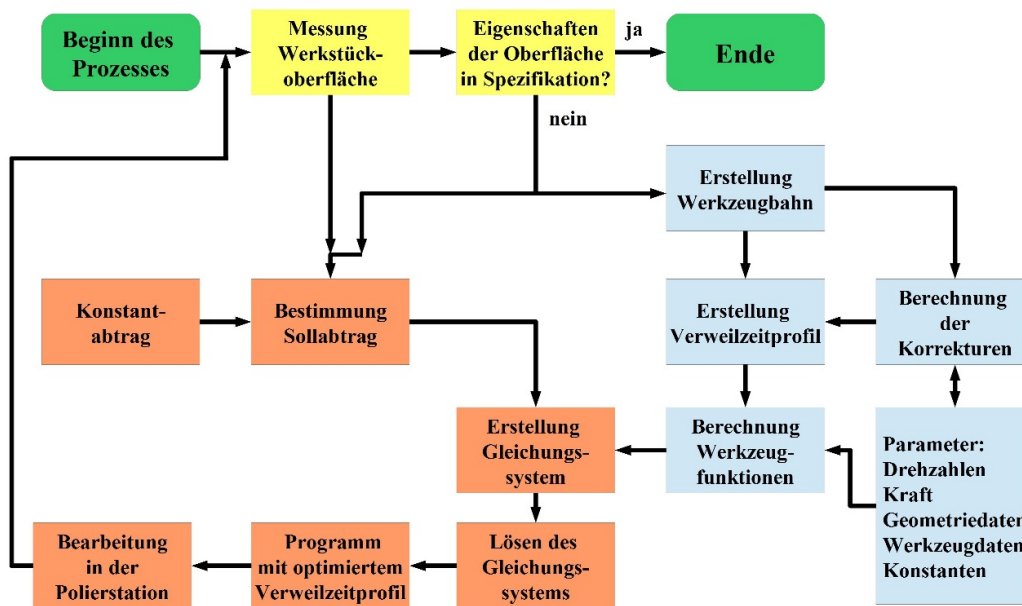


Abbildung 30 prinzipieller Ablauf der optimierten Politur auf Basis der Ergebnisse der Simulation, der Bereich der Messung des Werkstücks ist gelb unterlegt, die Simulation blau und die Optimierungsrechnung sowie Bearbeitung des Werkstücks orange

Die Optimierung des Verweilzeitprofils in Abbildung 30 startet mit der Bestimmung des Sollabtrags des Polierprozesses. Dieser berechnet sich aus den Messergebnissen des Werkstücks und einen, für die Bearbeitung notwendigen, konstanten Abtrag. Mit den Ergebnissen der Simulation lässt sich ein Gleichungssystem nach Kapitel 2.5.2 aufstellen. Die Lösung dieses Gleichungssystems führt zu einem, auf den Sollabtrag optimierten, Verweilzeitprofil. Nach der Überführung in ein für die Polierstation lesbares Programm findet die optimierte Bearbeitung des Werkstücks statt.

Darauf folgen die erneute Messung des Werkstücks und die Prüfung auf Einhaltung der Spezifikation. Bei Bedarf wiederholt sich die Bearbeitung.

Als Ausgangsbasis der Optimierung dient der in Kapitel 5.1.2 beschriebene Prozess zur Politur einer asphärischen Glaslinse mit dem Offsetwerkzeug. Mit der Simulation werden für jeden Punkt der Werkzeugbahn von $x=-32\text{mm}$ bis $x=32\text{mm}$ Abtragsspuren berechnet, die Abbildung 27 zeigt beispielhaft einen Teil der Abtragsspuren für unterschiedliche Positionen. Mit diesen errechneten Abtragsspuren wird ein lineares Gleichungssystem nach Kapitel 2.5.3 aufgestellt und nach der Verweilzeit gelöst.

Der Sollabtrag $S(x,y)$ aus Gleichung (8) wird auf einen konstanten Wert gesetzt um einen über die Werkstückoberfläche konstanten Materialabtrag zu erhalten. Diese so für jeden Punkt der Werkzeugbahn berechnete Verweilzeit wird in den dazu gehörenden Vorschub mit der Einheit mm/s umgerechnet, daraus ein Roboterprogramm erstellt und dieses Programm an Stelle des konstanten Vorschubs ausgeführt. Die restlichen Parameter, d.h. Kraft auf das Werkzeug sowie Drehzahlen von Werkstück und Werkzeug, des Polierprozesses bleiben konstant.

Die Abbildung 31 zeigt das Ergebnis der Optimierungsrechnung. Der Werkzeugvorschub wird, in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück, variiert. Typisch für Werkzeuge mit Offset ist die Spitze in der Mitte des Werkstücks bei $x=0\text{mm}$. Vergleicht man diesen Verlauf mit dem konstanten Vorschub aus Abbildung 28, so bewegt sich das Werkzeug im Mittenbereich schneller als bei konstantem Vorschub. Dies führt zu einem niedrigeren Materialabtrag im Mittenbereich von Abbildung 32 im Vergleich zum Materialabtrag bei konstantem Vorschub in Abbildung 29. Im Bereich außerhalb der Mitte, ab ca. $|x| > 5\text{mm}$ ist dies gerade umgekehrt; in diesem Bereich bewegt sich das Werkzeug mit dem Vorschubprofil aus Abbildung 31 langsamer über das Werkstück.

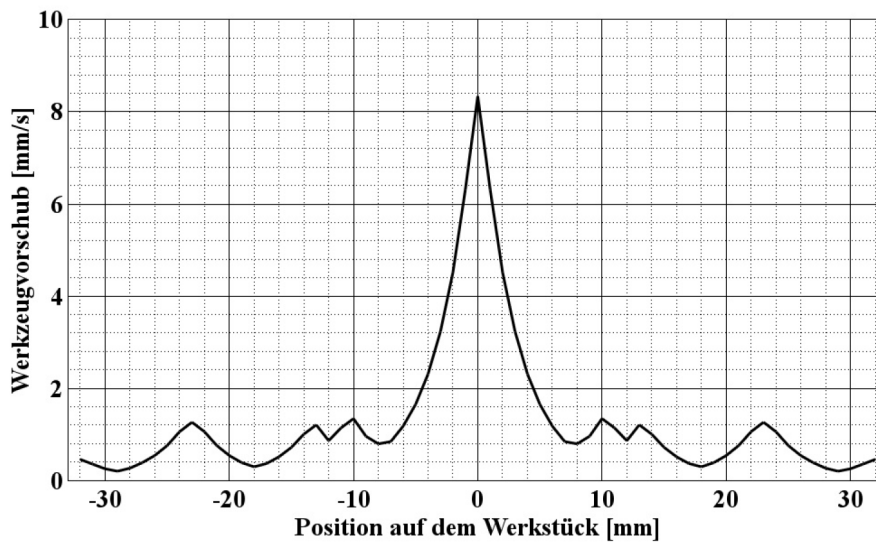


Abbildung 31: optimierter Vorschub des Werkzeugs für konstanten Materialabtrag mit einem Offsetwerkzeug

Das Ergebnis von insgesamt sieben Polierdurchläufen ist in Abbildung 32 zu sehen. Dargestellt ist der, mit der Politur erzielte, Materialabtrag auf dem Werkstück. Dieser beträgt etwa $12\mu\text{m}$. Zusätzlich zum erwünschten konstanten Materialabtrag erzeugt der Polierprozess eine Änderung der Oberflächenform von ungefähr $2\mu\text{m}$. Dies stellt, im Vergleich zu dem in Kapitel 5.1.2 dargestellten Prozess mit konstanter Verweilzeit, eine erhebliche Verbesserung dar.

Diese deutliche Reduktion der Oberflächenabweichung von $12\mu\text{m}$ auf $2\mu\text{m}$ bestätigt die Ergebnisse der Modellierung und bietet damit eine Methode zur Vorhersage sowie zur Korrektur des Abtragsverhaltens in der Padpolitur auch bei stark ortsabhängigen Abtragsfunktionen.

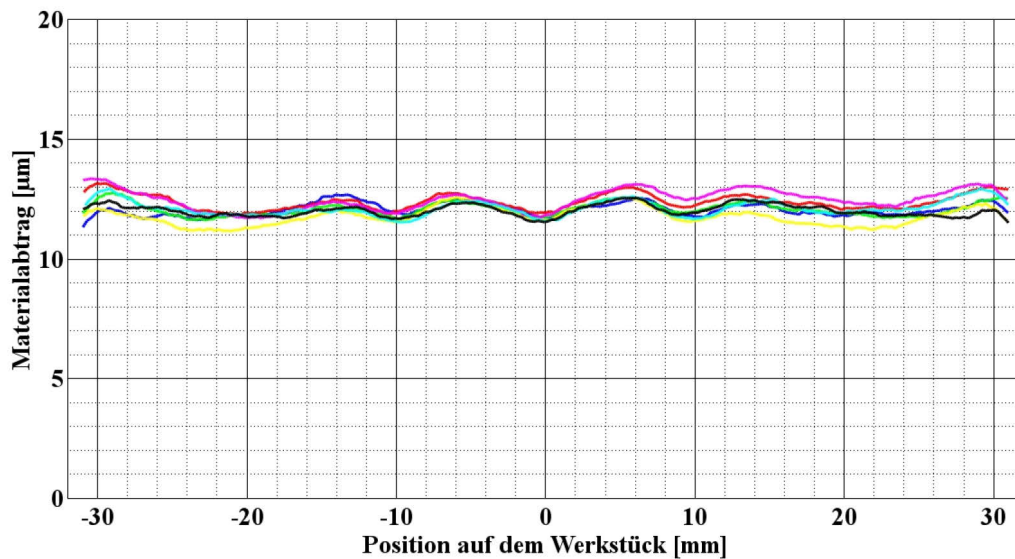


Abbildung 32: Versuch zur Reproduzierbarkeit von Materialabträgen bei optimiertem Prozess; Abtrag bei der Politur mit Offsetwerkzeug und angepasstem Werkzeugvorschub, jede Farbe stellt einen Poliervorgang dar. Bei einem konstanten Abtrag von $12\mu\text{m}$ entspricht die Abweichung von $2\mu\text{m}$ ungefähr 17%.

Der wellenförmige Verlauf des Materialabtrags in der Schnittdarstellung von Abbildung 32 ist auf den Einfluss des Optimierungsalgorithmus sowie auf den Unterschied zwischen den realen und den simulierten Abtragsspuren zurückzuführen.

Eine für die Optimierung des Abtrags wichtige Eigenschaft eines Polierprozesses liegt in der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Den Mittelwert der Abträge aus den sieben Polituren der Abbildung 32 zeigt Abbildung 33 in der schwarzen Kurve. Der gemittelte Abtrag zeigt eine Positionsabhängigkeit von etwa $1\mu\text{m}$. Dabei beträgt der Minimalwert des Abtrags etwa $11,7\mu\text{m}$ und der Maximalwert $12,7\mu\text{m}$. Die grauen, gestrichelten Kurven stellen die Standardabweichung dar. Im Mittenbereich der Fläche liegt sie unter $0,2\mu\text{m}$, im Randbereich steigt sie auf etwa $0,4\mu\text{m}$.

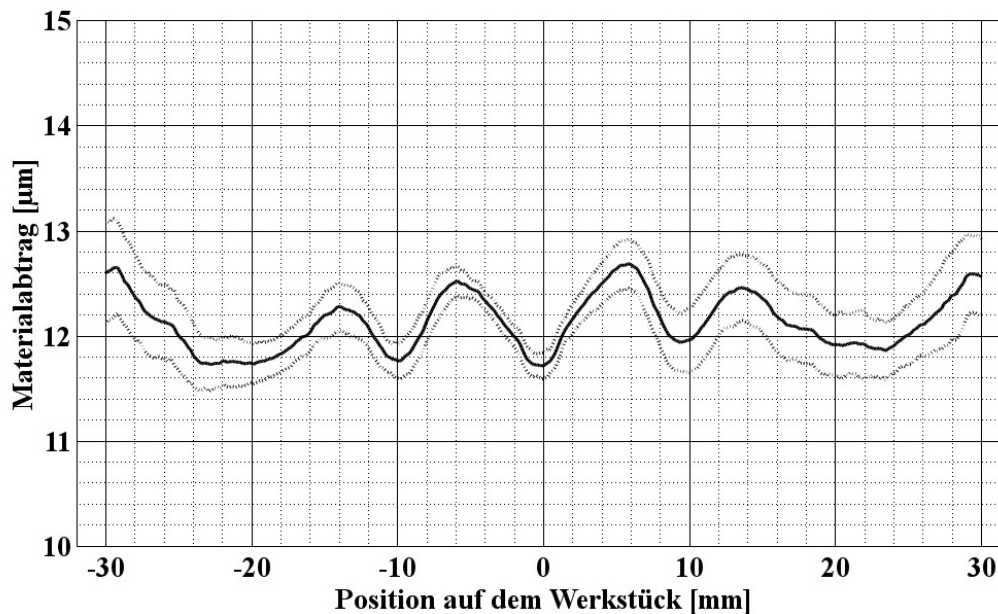


Abbildung 33: mittlerer Abtrag des Versuchs zur Reproduzierbarkeit von Materialabträgen bei optimiertem Prozess; die grau gestrichelten Kurven stellen die Standardabweichung dar

Die Werte für die Standardabweichung sind deutlich niedriger als die ortsabhängigen Schwankungen des Abtrags im gesamten Bereich des Werkstücks. Damit sind diese Schwankungen reproduzierbar und nicht zufällige Ergebnisse eines unstabilen Prozesses.

5.1.4 Diskussion der Ergebnisse

Bei der Betrachtung der Abtragsspuren in Abbildung 27 fällt die große Positionsabhängigkeit der Abtragsspuren in Form und Höhe auf. Die unterschiedliche Höhe ist auf die zusätzliche Geschwindigkeitskomponente des Werkzeugs mit Offset zurückzuführen. Die Ursache der Formänderungen der Abtragsspuren liegt in der asphärischen Geometrie des Werkstücks.

Die Verwendung einer einzelnen, global gültigen Abtragsfunktion zur Optimierung, wie sie in einigen, kommerziell verfügbaren Poliermaschinen

angewandt wird, würde in diesem Fall hohe Abweichungen erzeugen. Bei dem Einsatz von Offsetwerkzeugen in der Rundtischpolitur ist daher die Anwendung von lokalen, ortsabhängigen Abtragsfunktionen sehr empfehlenswert.

Die Optimierung des Abtrags auf Basis der simulierten Abtragsfunktionen, dargestellt in Abbildung 32, liefert eine Reduktion der Abweichungen von $12\mu\text{m}$ auf $2\mu\text{m}$. Dies belegt die Wirksamkeit der Optimierung. Allerdings ist die erzielte Oberflächengenauigkeit in der Präzisionsoptik nicht ausreichend. Eine nachfolgende Korrektur der Werkstückoberfläche ist daher meist erforderlich.

Die Abweichungen der Simulationsergebnisse jeder einzelnen Abtragsspur von der realen Politur wirken sich vor allem bei der Optimierung des Materialabtrags der Politur aus. Die Relevanz dieser Auswirkungen ist nicht allgemein beurteilbar, sondern hängt im Einzelfall vom realen Prozess und der Verweilzeit an dieser Werkzeugposition ab.

Eine weitere Fehlerquelle besteht in der Messmethodik zur Bestimmung des Oberflächenverlaufs auf dem Werkstück. Dies beeinflusst auch die Messung des Abtrags einer Politur. Die Standardabweichung zum mittleren Abtrag in Abbildung 33 erhöht sich zum Rand des Werkstücks. Eine mögliche Ursache liegt in der Messmethodik zur Bestimmung des Abtrags. Die Geometrie sowie die Mittendicke des Werkstücks werden vor und nach der Politur gemessen. Die Differenz der gemessenen Geometrien ergibt die Form des Abtrags. Ist das Werkstück bei einer der beiden Messungen geringfügig schräg oder dezentriert, so wirkt sich dies als leichte Verkippung des Ergebnisses der Abtragsberechnung aus.

Die Größenordnung dieser Messunsicherheiten liegt unter dem Bereich der Messunsicherheit der verwendeten taktilen Koordinatenmessmaschine. Bei einer

weiteren Verbesserung des Abtragsverhaltens des Polierprozesses oder einer weiteren Korrektur der Oberfläche ist dies bei der Messmethodik des Werkstücks zu berücksichtigen.

5.2 Einfluss der Schrittweite der Werkzeugbahn

Die Berechnung des Materialabtrags nach dem vorgestellten Modell basiert auf der Annahme diskreter Punkte entlang der Werkzeugbahn. Für die Rundtischpolitur ist dies in Abbildung 34, linkes Bild, mittels diskreter grüner Punkte skizziert. Während das Werkstück sich mit ω_{ws} um seine Rotationsachse dreht, bewegt sich das Werkzeug in einer geraden Bahn über das Werkstück. Durch die Rotation des Werkstücks bearbeitet das Werkzeug einen ringförmigen Ausschnitt. Das rechte Bild aus Abbildung 34 zeigt beispielhaft den simulierten Abtrag für einen Punkt der Werkzeugbahn. Der rote Bereich zeigt hohen Abtrag, im blauen Bereich findet kein Materialabtrag statt. Durch die Drehung des Werkstücks ergibt sich die ringförmige Struktur.

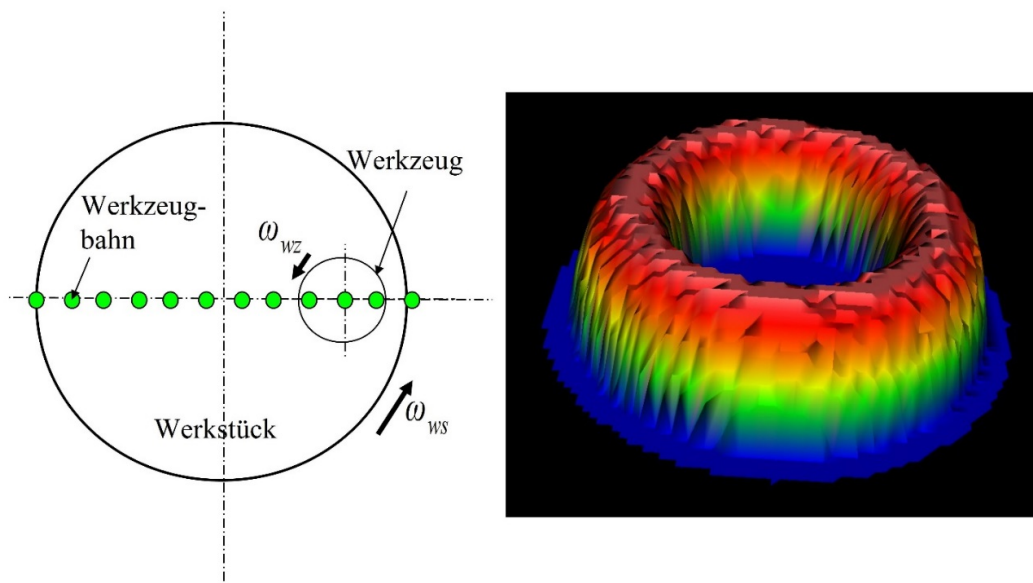


Abbildung 34: links: skizzierte Darstellung einer Werkzeugbahn in der Rundtischpolitur; das Werkzeug wird über diskrete Punkte, in grün dargestellt, über das Werkstück geführt; rechts: Abtragsfunktion eines Werkzeugs in Falschfarbendarstellung: rot zeigt hohen Abtrag, blau kein Abtrag

Der Abstand der einzelnen Punkte der Werkzeugbahn, der Schrittweite, besitzt Auswirkungen auf das Ergebnis der Simulationsrechnung. Da das Werkzeug in der realen Politur mit konstanter Geschwindigkeit über das Werkstück geführt wird, ist diese Abweichung in der realen Politur nicht vorhanden.

Allerdings beeinflusst die Schrittweite der Werkzeugbahn die Möglichkeit der Optimierungsrechnung und damit die Steuerung des Abtrags im Polierprozess. Zur Vermeidung dieser Effekte sind für die Simulation und eine evtl. darauf folgende Optimierungsrechnung ausreichend kleine Schrittweiten von Vorteil.

Zur Klärung dieses Einflusses soll der Materialabtrag bei unterschiedlichen Schrittweiten simuliert werden. Mit diesen Ergebnissen soll ein Richtwert festgelegt werden, bei dem die Simulation noch verwertbare Ergebnisse liefert.

Dazu wird die Rundtischpolitur einer Planfläche mit einem Polierpad simuliert. Das Werkstück hat einen Durchmesser von 64mm, der Durchmesser des Werkzeugs beträgt 14mm. Da das Werkzeug plan aufliegt, beträgt die Breite der Abtragsspur ebenfalls 14mm. Die Werkzeugbahn verläuft von $x=-32\text{mm}$ bis $x=32\text{mm}$, entsprechend der mit grünen Punkten skizzierten Werkzeugbahn im linken Bild von Abbildung 34. Der einzige Unterschied der einzelnen Durchläufe der Simulation besteht in der Schrittweite der Werkzeugbahn.

Die grüne Kurve in Abbildung 35 zeigt den erwarteten Abtrag der Simulation bei einer Schrittweite der Werkzeugbahn von 0,5mm. Dabei ist im mittleren Bereich des Werkstücks der Materialabtrag konstant. Zum Rand hin wirkt sich der Randeffect aus, damit beschäftigt sich das Kapitel 5.4 .

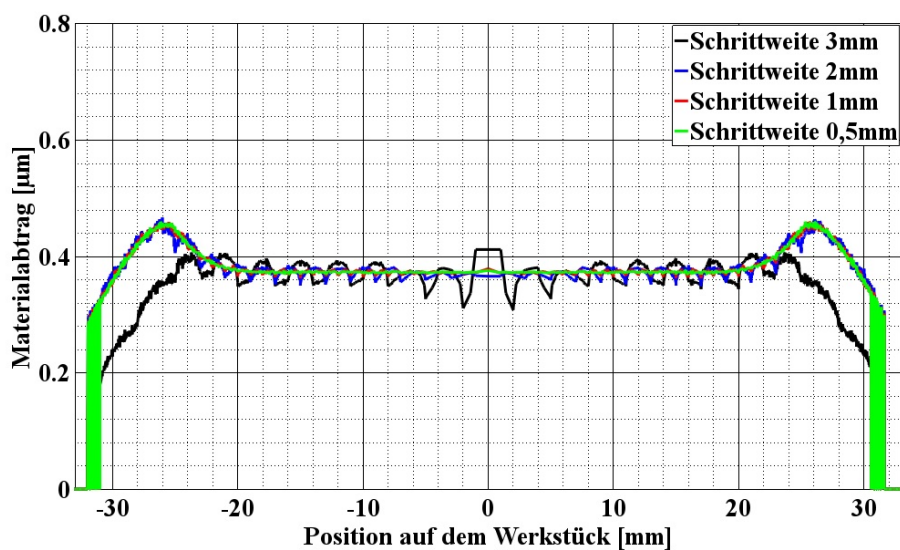


Abbildung 35: Simulation des Abtrags auf einem planen Werkstück; die Änderung der Schrittweite der Punkte entlang der Werkzeugbahn führt zu Änderungen der Ergebnisse der Simulation

Von Interesse ist in Abbildung 35 der Bereich von $|x| \leq 18\text{mm}$. Der Verlauf im Randbereich ist für die Betrachtung des Einflusses der Schrittweite auf den Abtrag nicht relevant. Die rote Kurve zeigt den simulierten Abtrag bei der Schrittweite 1mm. Er stimmt gut mit der grünen Kurve überein, jedoch sind schon geringe Abweichungen sichtbar. Mit Erhöhung der Schrittweite auf 2mm oder sogar 3mm, blaue bzw. schwarze Kurve, steigen die Abweichungen deutlich sichtbar an. Im Mittenbereich ergibt sich bei der schwarzen Kurve eine Abweichung zur grünen Kurve von etwas mehr als 10%.

Für die schwarze Kurve aus Abbildung 35 ist die Werkzeugbahn auf $x=-30\text{mm}$ bis $x=30\text{mm}$ begrenzt da der nächste Punkt bei $|x|=33\text{mm}$ und damit außerhalb des Werkstücks liegen würde. Dies führt zu den sichtbaren Abweichung im Randbereich von $|x|>24\text{mm}$. Zur Vermeidung des Einflusses des Randbereichs wird nur der Bereich von $|x| \leq 18\text{mm}$ betrachtet.

Die Auswirkungen der Schrittweite auf den mittleren Abtrag zeigt Abbildung 36. Auf der x-Achse ist die Schrittweite in Millimeter aufgetragen, auf der y-Achse der mittlere Abtrag im Bereich von $|x| \leq 18\text{mm}$.

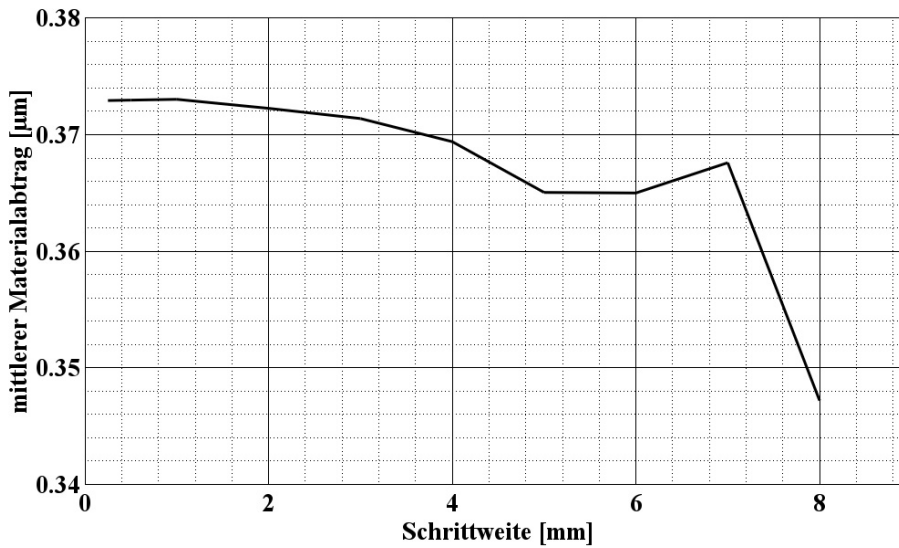


Abbildung 36: mittlerer Materialabtrag der Simulation in Abhängigkeit unterschiedlicher Schrittweiten der Punkte entlang der Werkzeugbahn

Die berechneten Abträge auf Basis des Modells, dargestellt in Abbildung 35, dienen als Berechnungsgrundlage für die entsprechenden Schrittweiten. Von der minimalen Schrittweite 0,25mm bis etwa 1mm ist in Abbildung 36 der mittlere Materialabtrag relativ konstant. Er fällt darüber zunehmend ab und springt oberhalb von 5mm deutlich.

Die Auswirkungen der Schrittweite sind noch deutlicher in Abbildung 37 zu erkennen. Dabei wird die quadratische mittlere Abweichung (Root Mean Square, rms-Wert) im Bereich von $|x| \leq 18mm$ relativ zum Mittelwert dargestellt.

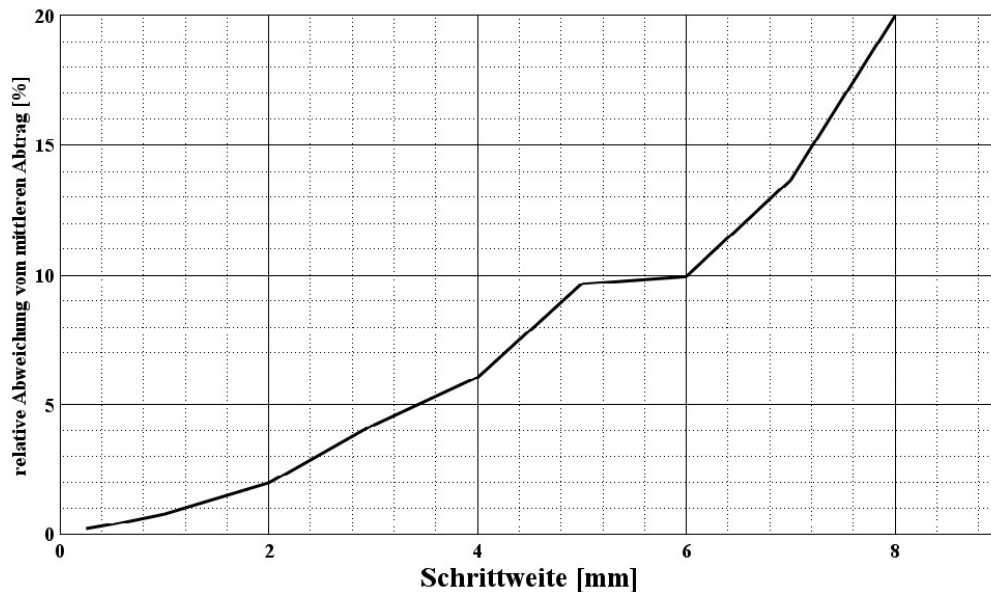


Abbildung 37: Einfluss der Schrittweite auf die Simulationsergebnisse: relative Abweichung der Fehler des Abtrags

Die mittlere Abweichung in Abbildung 37 ist nahe 0% bei der niedrigsten Schrittweite von 0,25mm und steigt mit Zunahme der Schrittweite kontinuierlich an. Sie erreicht 20% bei einer Schrittweite von 8mm.

Soll die Auswirkung der Schrittweite auf einen Wert von $\leq 1\%$ begrenzt werden, so darf in diesem Beispiel die maximale Schrittweite etwa 1mm betragen. Darf die mittlere Abweichung 2% betragen, erhöht sich die zulässige Schrittweite auf 2mm.

Einen Richtwert für die maximale Schrittweite ergibt sich, wenn man die Schrittweite relativ zum Durchmesser der Abtragsfunktion betrachtet, in diesem Fall beträgt er 14mm. Eine Schrittweite von 1mm entspricht etwa 7,15% des Durchmessers der Abtragsfunktion, die Schrittweite 2mm 14,3%.

Für einen Richtwert in der Praxis lässt sich ein Wert dazwischen verwenden: die maximale Schrittweite der Werkzeugbahn sollte nicht größer als 10% des Durchmessers der Abtragsfunktion sein um in der Simulation und der nachfolgenden Optimierung eine ausreichende Genauigkeit zu erhalten.

Um Einflüsse der Relativgeschwindigkeit auszuschließen sind der Preston-Koeffizient sowie die Drehzahlen von Werkzeug und Werkstück in der Simulation konstant. Die Ergebnisse sind daher nur für die Betrachtung der Schrittweite in der Simulation zu verwenden; reale Polituren zeigen ein anderes Abtragsverhalten. Da die Schrittweite der Werkzeugbahn jedoch Auswirkungen auf die Ergebnisse der Optimierung des Abtrags besitzt, ist der erarbeitete Richtwert auch praktisch von Interesse.

Die dargestellten Werte variieren mit der Form der Abtragsfunktion, d.h. vor allem mit der Geometrie des Werkstücks. Der aufgezeigte Richtwert hat sich bei zahlreichen Polierversuchen bewährt. Bei Bedarf kann die Simulation mit verringerter Schrittweite erneut durchgeführt und das Ergebnis, analog Abbildung 35, verglichen werden.

Mit der Simulation einzelner Abtragsfunktionen und der Betrachtung des daraus berechneten Gesamtabtrags lässt sich die erforderliche Schrittweite der Werkzeugbahn berechnen. Dies gilt neben der Rundtischpolitur auch für die Politur von feststehenden Werkstücken. Der dargestellte Richtwert lässt sich auch zur Erstellung der in diesem Bereich verwendeten raster- oder spiralförmigen Werkzeugbahnen verwenden.

5.3 Abtragsverhalten von Offsetwerkzeugen

Mit dem Einsatz von Offsetwerkzeugen in der Rundtischpolitur erhöht sich die Abtragsrate. Der Umfang dieser Erhöhung sowie die Auswirkungen auf den Verlauf des Abtrags lassen sich in der Simulation darstellen.

5.3.1 Einfluss des Werkzeugoffsets auf das Abtragsverhalten

Zur Untersuchung des Einflusses des Offsetwerkzeugs auf den Abtrag wird die Rundtischpolitur einer asphärischen Oberfläche mit einem Offsetwerkzeug simuliert. Dabei wird der Offset des Werkzeugs in Schritten von 0mm bis 40mm senkrecht zur Werkzeugbahn variiert und der Abtrag als Schnittmessung dargestellt.

Das Werkzeug wird entlang der x-Achse von $x=-32$ bis $x=32$ mm mit konstantem Vorschub geführt, der prinzipielle Ablauf ist in Abbildung 9, rechtes Bild zu sehen. Die Werkzeugbahn ist dabei als grüne Linie dargestellt. Die Werkzeug- und Werkstückdrehzahl beträgt dabei 700 1/min. Zur Verdeutlichung des Einflusses des Offsetwerkzeugs ist in der Simulation der Preston-Koeffizient als Konstante vorgegeben.

Der Abtrag ohne Offset, dargestellt als gelbe Linie in Abbildung 38, ist nahezu unabhängig von der Position auf dem Werkstück. Er liegt bei ungefähr $4\mu\text{m}$. Der Verlauf des Materialabtrags mit 10mm Offset ist auf der gesamten Fläche oberhalb der gelben Linie zu finden. Allerdings zeigt sich im Zentrum des Werkstücks bei der Position $x=0$ mm ein deutliches Maximum mit $14\mu\text{m}$. Der Abtrag bei $x=20$ mm liegt nur zwischen $4\mu\text{m}$ und $5\mu\text{m}$. Der Abtrag ist damit nicht mehr konstant, sondern positionsabhängig.

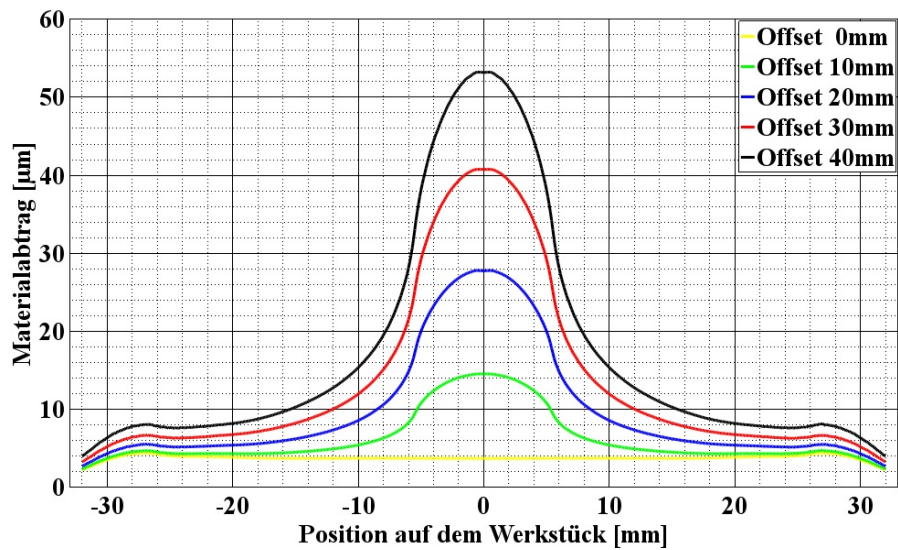


Abbildung 38: Abtragsverhalten eines Offsetwerkzeugs in Abhängigkeit des Offsets

Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmendem Abtrag noch deutlich. Die blaue Linie in Abbildung 38 stellt den Abtrag mit 20mm Offset dar. Der Abtrag in der Mitte verdoppelt sich gegenüber der grünen Linie. Die Verdopplung des Offsets auf 40mm, dargestellt in der schwarzen Linie, bewirkt eine weitere Verdopplung des Mittenabtrags.

Die Erklärung liefert die Preston-Gleichung (4): Mit Verdopplung des Offsets verdoppelt sich die Geschwindigkeitskomponente des Werkzeugs. Im Drehzentrum des Werkstücks ist die Geschwindigkeitskomponente des Werkstücks null. Damit erhöht sich der Mittenabtrag mit dem Offset linear.

Dieser Effekt der linearen Erhöhung des Abtrags mit dem Offset ist allerdings im Randbereich des Werkstücks wesentlich schwächer ausgeprägt, da die Geschwindigkeitskomponente des Werkzeugs konstant ist. Abbildung 39 stellt dies beispielhaft für die Positionen $x=0\text{mm}$ und $x=20\text{mm}$ dar, die Daten stammen aus Abbildung 38. Während der Abtrag bei $x=20\text{mm}$, dargestellt in der

blauen Kurve, mit zunehmendem Offset nur um ca. den Faktor 2,1 steigt, erhöht sich der Abtrag bei $x=0\text{mm}$ um den Faktor 15,7.

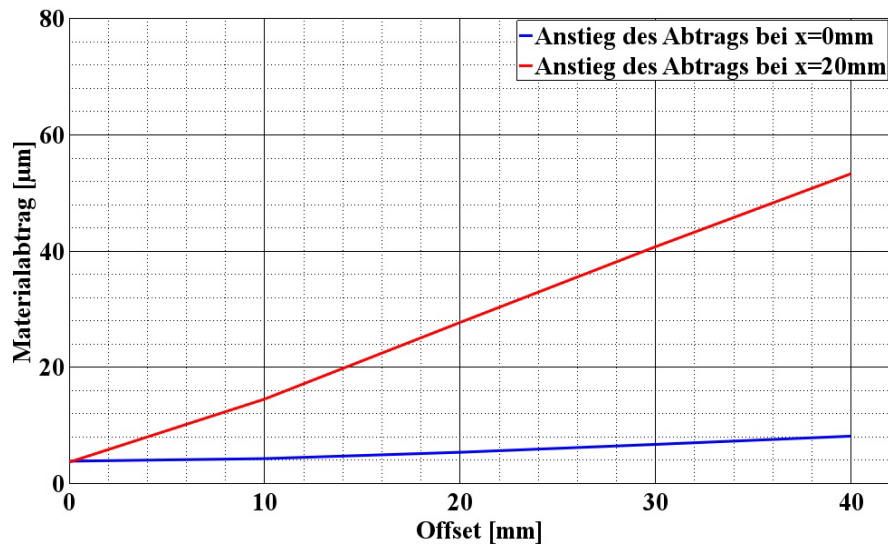


Abbildung 39: Verlauf des Abtrags in Relation zum Werkzeugoffset

Die Steigerung der Abtragsrate durch die Verwendung von Offsetwerkzeugen ist möglich. Allerdings erhöht sich die Positionsabhängigkeit des Abtrags deutlich. Soll bei der Politur eine Schicht mit konstanter Dicke vom Werkstück abgetragen werden, so ist ein Korrekturmechanismus im Polierprozess sinnvoll.

Die Notwendigkeit der Kompensation stellt für die Rundtischpolitur mit Offsetwerkzeugen einen bedeutenden Nachteil dar.

5.3.2 Korrektur des Offseteinflusses

Preston beschreibt in seiner Arbeit den linearen Zusammenhang zwischen dem Abtrag der Politur und der geleisteten Arbeit [Pre27]. Mit dieser Annahme ist der Abtrag der Politur auf einer Fläche konstant, wenn die geleistete Arbeit für jedes Flächenelement konstant ist. Bei der Rundtischpolitur können die einzelnen

Flächenelemente als Ringe aufgefasst werden, deren Zentrum mit dem Drehzentrum des Werkstücks übereinstimmt. In der Abbildung 22, linkes Bild, ist dieser Ring mit der Breite Dicke Δx in blau unterlegt.

Die Fläche A dieses Ringes lässt sich mit der Dicke Δx und dem Abstand x vom Ringzentrum berechnen.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot \Delta x \cdot |x| \quad (16)$$

Ordnet man der Bearbeitungsdauer t eines Flächenelements einen einheitenlosen Korrekturfaktor $a(x)$ zu und setzt sowohl die Fläche A als auch die Bearbeitungsdauer eines Flächenelements samt dem Korrekturfaktor in die Preston-Gleichung (4) ein, so erhält man folgende Gleichung.

$$z(x) = \frac{c_p \cdot F \cdot t \cdot a(x)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta x} \cdot \frac{|v_{ges}|}{|x|} \quad (17)$$

F stellt die Kraft auf das Flächenelement dar, c_p ist der Preston-Koeffizient und v_{ges} die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück.

Stellt man die Gleichung (17) nach $a(x)$ um und ersetzt alle konstanten Parameter durch eine einzelne Konstante, lässt sich der Korrekturfaktor berechnen. Er stellt den Korrekturwert dar, mit dem die Verweilzeit skaliert werden muss um einen konstanten Abtrag für jedes Flächenelement zu erzeugen.

$$a(x) = \text{const} \cdot \left| \frac{x}{t \cdot v_{\text{ges}}(x)} \right| \quad (18)$$

Dabei ist der Korrekturfaktor von der Position auf dem Werkstück und der Relativgeschwindigkeit abhängig. Damit ist a konstant, wenn die Relativgeschwindigkeit linear mit $|x|$ ansteigt. Dies ist z.B. in der Padpolitur ohne Offset der Fall.

Eine Berechnung von Vorschubprofilen unter Einbeziehung des Korrekturfaktors $a(x)$ zeigt Abbildung 40. Sie basiert auf den Parametern des Kapitels 5.3.1 Die Drehzahlen von Werkzeug und Werkstück liegen bei konstant 700 1/min.

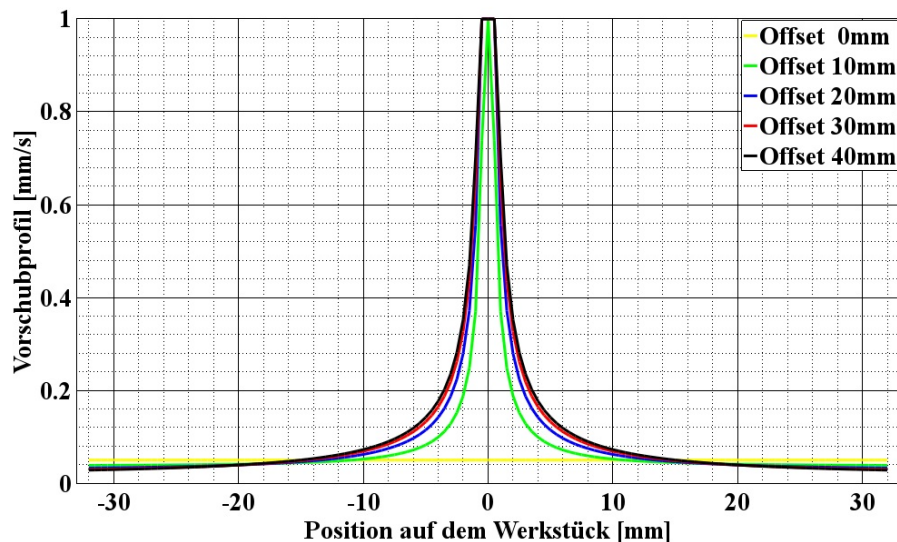


Abbildung 40: beispielhafter Verlauf des Vorschubs mit Korrekturfaktor in Abhängigkeit des Werkzeugoffsets; skaliert auf gleiche Prozessdauer

Es fällt auf, dass das Vorschubprofil ohne Offset in Abbildung 40, dargestellt durch die gelbe Kurve, konstant ist. Mit der Einführung eines Offsets muss der erhöhte Abtrag in der Mitte des Werkstücks bei $x=0\text{mm}$ durch erhöhten Vorschub kompensiert werden, während er zum Rand hin unter die Vorschubgeschwindigkeit der gelben Kurve fällt. Dieses Verhalten verstärkt sich mit zunehmendem Offset. Die schwarze Kurve, die ein Offset von 40mm darstellt, zeigt dieses Verhalten am Deutlichsten. Daraus lässt sich schließen, dass sich der Dynamikbereich mit zunehmendem Offset erhöht.

Zur Vermeidung der Polstelle bei der Position $x=0\text{mm}$ in Abbildung 40 ist der Vorschub auf 1mm/s begrenzt. Alle Vorschubprofile sind so skaliert, dass die Prozesszeiten konstant sind und die Erhöhung des Materialabtrags direkt vergleichbar ist.

Mit den errechneten Vorschubprofilen aus Abbildung 40 lässt sich das Abtragsverhalten eines Offsetwerkzeugs mit Korrektur in der Simulation darstellen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 41. Der Abtrag bleibt in weiten Bereichen des Werkstücks annähernd konstant und steigt mit dem Offset von 0mm bis 40mm um den Faktor 2,5 an.

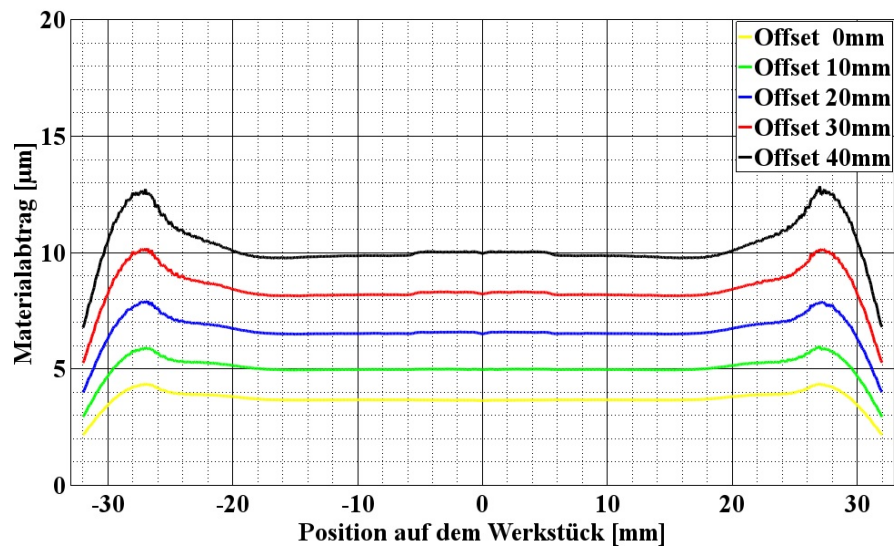


Abbildung 41: Abtragsverhalten eines Offsetwerkzeugs in Abhängigkeit des Offsets mit Korrektur

An den Abtragsprofilen der Werkzeuge mit Offset in Abbildung 41 lassen sich im Mittenbereich bei $x=0\text{mm}$ Unebenheiten im Abtrag erkennen. Diese steigen mit dem Offset an und sind auf den Einfluss der Begrenzung des Vorschubprofils im Bereich um $x=0\text{mm}$ in Abbildung 40 zurückzuführen. Im Randbereich des Werkstücks, ab etwa $|x| > 20\text{mm}$ liegt das Werkzeug bis über die Kante des Werkstücks auf. Das Abtragsverhalten am Rand eines Werkstücks ist Thema des Kapitels 5.4.

Die Erhöhung des Materialabtrags um den Faktor 2,5 durch den zusätzlichen Offset des Werkzeugs führt zur Notwendigkeit einer Korrektur mittels Vorschubprofil zur Beseitigung des erhöhten Mittenabtrags. Dieses Vorschubprofil zeigt vor allem im Mittenbereich um $x=0\text{mm}$ eine hohe Dynamik auf und stellt damit erhöhte Anforderungen an die Polierstation.

5.3.3 Diskussion der Simulationsergebnisse zum Offsetwerkzeug

Die Erhöhung der Abtragsrate durch Nutzung eines Offsets ist möglich. Der negative Nebeneffekt ist ein stark positionsabhängiger Abtrag. So steigt der Mittenabtrag bei Erhöhung des Offsets in der Simulation um den Faktor 15,7 während der Abtrag an der Position $x=20\text{mm}$ lediglich um den Faktor 2,1 steigt.

Die Korrektur dieser Positionsabhängigkeit, ausschließlich auf Basis einer Optimierungsrechnung nach Kapitel 2.5.3 ist kritisch, da der Umfang der Optimierung sehr hoch ist. So liegt bei der schwarzen Kurve aus Abbildung 38 der minimale Abtrag bei ca. $8\mu\text{m}$ und der maximale Abtrag bei ca. $53\mu\text{m}$. Die Differenz von $45\mu\text{m}$ allein durch die Optimierungsrechnung zu lösen ist praktisch sehr anspruchsvoll und kaum umsetzbar.

Eine minimale Abweichung der Abtragsspuren von Simulation und realer Politur führt unweigerlich zu Fehlern beim Polierprozess.

Eine alternative Methode liegt in der Korrektur des Einflusses von Offsetwerkzeugen durch die theoretische Betrachtung der Abtragsrate. Dabei setzt die Gleichung (18) einen punktförmigen Kontaktbereich voraus, in dem $v_{ges}(x)$ konstant ist. Daher ist sie als Näherung aufzufassen deren Genauigkeit abnimmt, je größer die Breite Δx der Abtragsspur ist. Die Auswirkung dieser Näherung auf die reale Politur hängt von der Geometrie des Werkstücks und des Werkzeugs ab und ist im Einzelfall zu betrachten.

Der Vergleich der Vorschubprofile aus Abbildung 40 und Abbildung 31 zeigt einen grundlegend ähnlichen Verlauf. Im Mittenbereich um $x=0\text{mm}$ ist der Vorschub deutlich erhöht, während er im Randbereich abnimmt.

Ein Vorteil der Berechnung eines Korrekturfaktors nach Gleichung (18) besteht darin, dass sich Abweichungen der simulierten Abtragsspuren nicht auf das Ergebnis des Polierprozesses auswirken. Eine Optimierung des Vorschubprofils wird in den meisten Fällen jedoch zusätzlich vonnöten sein.

Denkbar ist eine Aufteilung der Berechnung des Vorschubprofils. Der Einfluss des Offsetwerkzeugs wird anhand der theoretischen Betrachtung ausgeglichen. Danach verbleibende Abweichungen von Sollabtrag und Simulationsergebnis werden mittels numerischer Optimierung minimiert.

Der Anstieg des Abtrags bei einem Offset von 30mm in Abbildung 41 beträgt etwa den Faktor 2,16. In Kapitel 2.4 ergab eine erste Abschätzung zur Erhöhung der Abtragsrate durch Erhöhung der Relativgeschwindigkeit den Faktor 2,18. Dies bestätigt die Annahme, dass die Erhöhung der Relativgeschwindigkeit durch den Offset zu der Erhöhung des Materialabtrags führt.

Die gute Übereinstimmung beider Faktoren von 2,16 bzw. 2,18 lässt sich mit der Annahme konstanter Parameter in Gleichung (18) erklären. Im realen Polierprozess wird die Erhöhung des Materialabtrags geringer ausfallen.

Der dargestellte Korrekturfaktor stellt erhöhte Ansprüche an die Dynamik sowie an die Positioniergenauigkeit der Polierstation. Der Preis der Steigerung der Abtragsrate durch Offsetwerkzeuge liegt daher bei den erhöhten Anforderungen an die Positioniereinheit der Polierstation.

5.4 Verlauf des Abtrags im Randbereich des Werkstücks

Bei der Politur im Randbereich eines Werkstücks kann das Werkzeug teilweise über den Rand des Werkstücks überstehen und das Abtragsverhalten des Werkzeugs beeinflussen. Diese Beeinflussung wird oft als Randeffect, in Englisch

„edge effect“, bezeichnet. Mit der Simulation lässt sich der Einfluss des Randeffekts auf dem Abtrag nachstellen.

Der Randeffekt in der Padpolitur basiert im Wesentlichen auf zwei Ursachen:

- Die Verringerung der Auflagefläche durch teilweisen Überstand des Werkzeugs am Werkstückrand
- Die Verringerung der Kontaktzeit im Bereich der Umkehrpunkte der Werkzeugbahn

5.4.1 Simulation des Abtrags im Randbereich

Zur Simulation des Randeffekts wird der Abtrag von Werkzeugbahnen simuliert, die das Werkzeug unterschiedlich weit über den Rand des Werkstücks bewegen. Als Werkstück dient eine Planfläche mit dem Durchmesser 64mm. Das Werkzeug besitzt einen Durchmesser von 14mm. Der Preston-Koeffizient wird konstant angenommen und die Drehzahlen von Werkstück und Werkzeug sind gleich mit 700 1/min .

Die Umkehrpunkte der Werkzeugbahn werden in Schritten von $|x| = 28\text{mm}$ bis $|x| = 35\text{mm}$ geändert und der Abtrag als Schnittmessung dargestellt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnung zeigt Abbildung 42. Die einzelnen Kurven stellen unterschiedliche Umkehrpunkte der Werkzeugbahn dar. Alle Simulationsläufe liefern im Mittenbereich des Werkstücks einen konstanten Abtrag von etwas mehr als $0,36\mu\text{m}$. Im Randbereich unterschieden sie sich jedoch deutlich.

Bei der schwarzen Kurve in Abbildung 42 wird das Werkzeug von $x=-35\text{mm}$ bis $x=35\text{mm}$ auf einer geraden Linie über das Werkstück geführt. Im Randbereich,

ab etwa $|x| = 24\text{mm}$, steht das Werkzeug zunehmend über und erzeugt die Überhöhung des Abtrags auf etwa $0,64\mu\text{m}$ und liegt damit um mehr als den Faktor 1,7 über dem Abtrag im Mittenbereich.

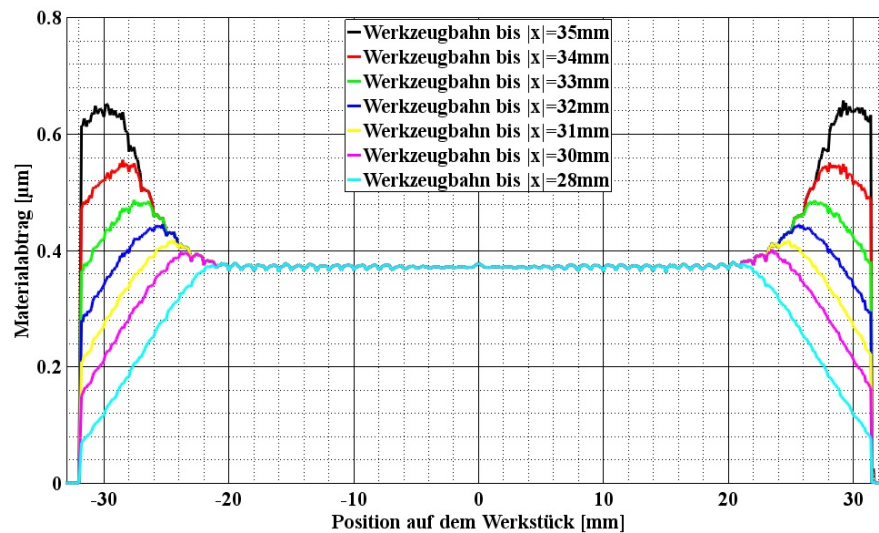


Abbildung 42: Simulationsergebnisse des Materialabtrags der Politur einer Planfläche mit dem Durchmesser 32mm in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück und der Werkzeugbahn

Mit Verringerung der Werkzeugbahn in Abbildung 42 verringert sich ebenso die Überhöhung des Materialabtrags. So liefert schon eine Verringerung des Bereichs auf $x=-34\text{mm}$ bis $x=34\text{mm}$ eine deutliche Reduktion auf etwa $0,56\mu\text{m}$, wie die rote Kurve zeigt. Dies entspricht etwas mehr als dem 1,5-fachen des Abtrags im Mittenbereich.

Diese Überhöhung des Materialabtrags nimmt weiter ab, je weiter die Umkehrpunkte der Werkzeugbahn zur Mitte des Werkstücks hin verlagert werden, d.h. umso weniger vom Werkzeug über den Rand des Werkstücks hinausragt. Der Abtrag im unmittelbaren Randbereich nimmt ebenso ab. Bei

einer Werkzeugbahn von $x=-28\text{mm}$ bis $x=28\text{mm}$ ist in Abbildung 42 fast keine Überhöhung des Abtrags mehr zu sehen.

5.4.2 Verringerung der Auflagefläche am Werkstückrand

Steht das Werkzeug über den Rand des Werkstücks hinaus, so ändert sich die Auflagefläche zwischen Werkzeug und Werkstück. Die Skizze in Abbildung 43 verdeutlicht diese Änderung am Rand des Werkstücks. Das linke Werkzeug liegt komplett auf dem Werkstück auf und besitzt eine kreisrunde Kontaktfläche. Demgegenüber berührt das rechte Werkzeug das Werkstück nur teilweise, die Auflagefläche ist kleiner und nicht mehr kreisförmig.

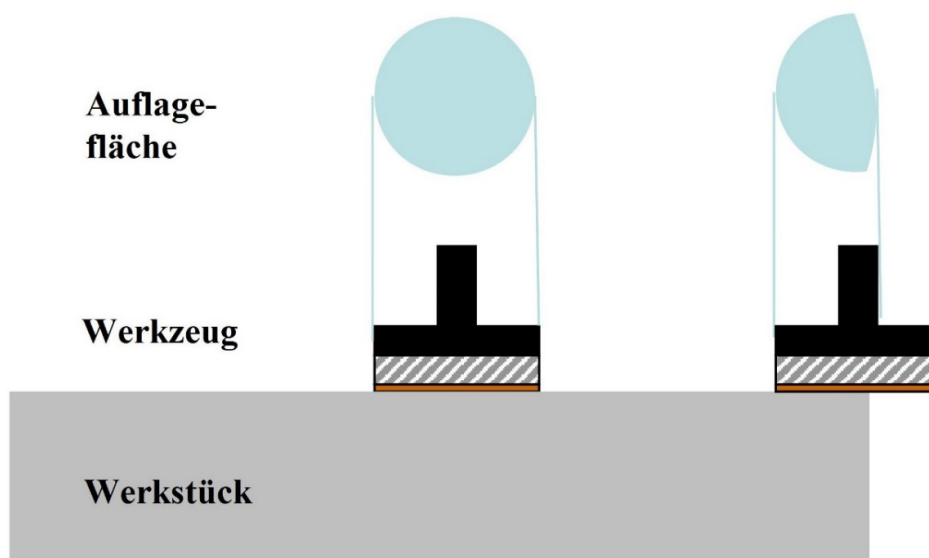


Abbildung 43: Skizzierte Darstellung der Auflagefläche des Werkzeugs auf einem planem Werkstück; im Mittenbereich liegt das Werkzeug vollflächig auf; im Randbereich steht das Werkzeug über das Werkstück

Ist die auf das Werkzeug aufgebrachte Kraft konstant, so erhöht sich mit abnehmender Auflagefläche die Flächenpressung in dem Kontaktbereich. Damit

findet im Randbereich eine erhöhte Einfederung des elastischen Werkzeugs statt. Die Simulation der Politur einer Planfläche mit 32mm Durchmesser, einem planen Werkzeug mit Radius 7mm und einer Kraft auf das Werkzeug von 40N dient zur Verdeutlichung des Effekts.

Mit der Abnahme der Auflagefläche erhöhen sich die Flächenpressung und damit die Deformation des Werkzeugs. In Abbildung 44 ist die simulierte maximale Deformation des Werkzeugs in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück dargestellt. Im Mittenbereich ist die Deformation etwa konstant bei 0,179mm, im Randbereich steigt die Deformation stark an, wobei die Simulation im Extremfall Werte bis 3,2mm liefert.

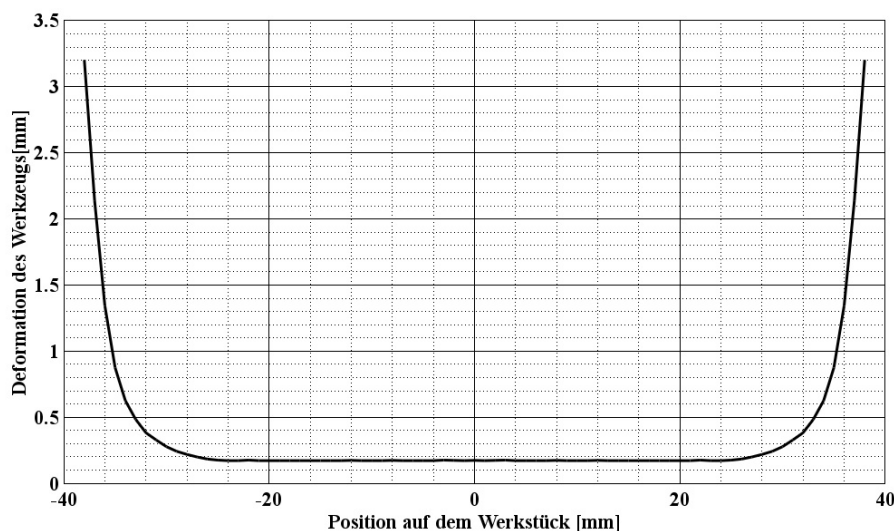


Abbildung 44: Simulierte Einfederung des Werkzeugs im Randbereich bei konstanter Kraft in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück

Durch die Erhöhung der Einfederung steigt die Abtragsrate des Prozesses auf allen Flächenelementen die in diesem Bereich vom Werkzeug überdeckt sind.

Dies führt zu der Überhöhung des Abtrags, sichtbar bei der schwarzen Kurve in Abbildung 42 im Bereich von ungefähr $|x| = 30\text{mm}$.

5.4.3 Verringerung der Kontaktzeit am Werkstückrand

Durch die Begrenzung der Werkzeugbahn findet im Bereich der Umkehrpunkte eine verminderte Überdeckung statt, d.h. der Teil des Werkstücks im Bereich der Umkehrpunkte ist zeitlich kürzer in Kontakt mit dem Werkzeug als im Mittenbereich.

In Abbildung 45 ist der konstante Vorschub von 1mm/s in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück skizziert. Die Umkehrpunkte liegen bei $x = -32\text{mm}$ und $x = 32\text{mm}$. Die zugehörige Kontaktzeit eines Punktes auf dem Werkstück mit dem Werkzeug ist in Abbildung 46 dargestellt. Bei dem Werkzeugdurchmesser von 10mm und dem Durchmesser des Werkstücks von 64mm liegt die Kontaktzeit im Mittenbereich des Werkstücks bei 10s . Im Randbereich nimmt sie ab und erreicht im Umkehrpunkt genau die Hälfte des Mittenbereichs.

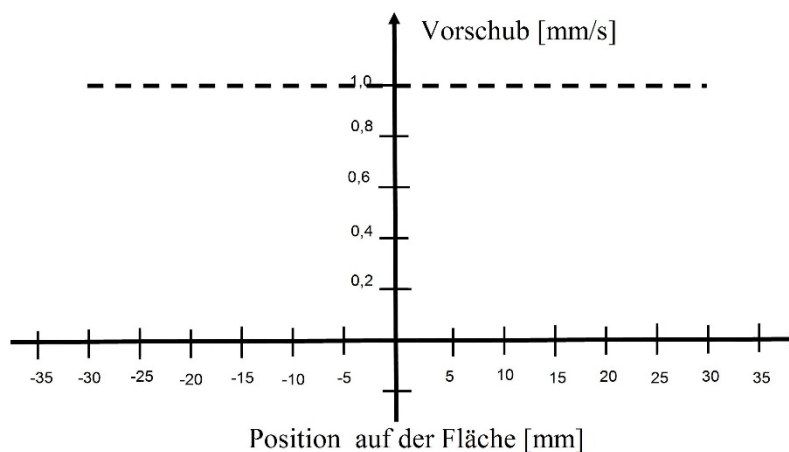


Abbildung 45: konstanter Vorschub von 1mm/s von $x = -32\text{mm}$ bis $x = 32\text{mm}$

Mit der Verringerung der Kontaktzeit im Randbereich des Werkstücks, wie in Abbildung 46 dargestellt, nimmt der Abtrag im Randbereich ab. Die blaue Kurve in Abbildung 42 besitzt eine vergleichbare Werkzeugbahn. Der Abtrag auf der Fläche nimmt dabei oberhalb von etwa $|x|=26\text{mm}$ ab. Dies ist auf die Verringerung der Kontaktzeit zurückzuführen.

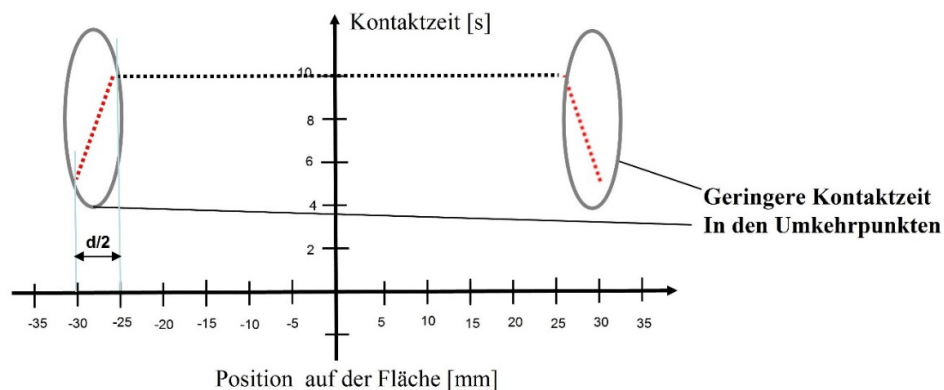


Abbildung 46: Kontaktzeit eines Werkzeugs mit dem Durchmesser $d=10\text{mm}$ und einem Punkt auf dem Werkstück bei konstantem Vorschub von 1mm/s ; Im Bereich der Umkehrpunkte bei $x=-32\text{mm}$ bzw. $x=32\text{mm}$ verringert sich die Kontaktzeit

Bei der Begrenzung der Werkzeugbahn auf $x=-32\text{mm}$ bis $x=32\text{mm}$ liegt das Werkzeug bei $|x|=32\text{mm}$ genau zur Hälfte auf dem Werkstück auf. Damit besitzt es in diesen Umkehrpunkten genau die halbe Kontaktzeit, verglichen mit dem Mittenbereich des Werkstücks. In Abbildung 46 entspricht dies bei $|x|=32\text{mm}$ dem Wert 5s auf der y-Achse.

5.4.4 Minderung Randeffekt unter Verwendung der Simulation

Zur Verminderung der Auswirkung des Randeffekts kann in begrenztem Umfang die Anpassung der Verweilzeit über eine Optimierungsrechnung erfolgen. Die Korrekturtiefe dieser Optimierung ist jedoch begrenzt, da zum

Rand des Werkstücks hin immer weniger Abtragsfunktionen zur Korrektur zur Verfügung stehen. Zudem enthält der Verlauf des Abtrags in Abbildung 42 im Randbereich hohe Gradienten. Beide Faktoren erschweren die Optimierung auf Basis der Verweilzeitanpassung und führen zu Fehlern auf der gesamten zu polierenden Fläche.

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung des Randeffekts eröffnet die Simulation. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Verformung des Werkzeugs für jeden Teil des Werkstücks berechnen. Ein typisches Ergebnis der Simulation zeigt Abbildung 44.

Mit den Ergebnissen zur Einfederung des Werkzeugs lässt sich der Einfluss des Randbereichs wie folgt minimieren:

- Bestimmung der Verformung des Padwerkzeugs mit der Simulation an einem vorher festgelegten Punkt auf der Oberfläche des Werkstücks. Das Werkzeug liegt dabei im Mittenbereich komplett auf und steht nicht über den Rand des Werkstücks ab. Als möglicher festgelegter Punkt bietet sich die Drehachse in der Mitte des Werkzeugs an.
- Nach der Bestimmung der Verformung des Werkzeugs wird in einem erneuten Durchlauf der Simulationsrechnung diese konstante Deformation als Vorgabe geben und die auf das Werkzeug wirkende Kraft berechnet. Dies entspricht in der praktischen Umsetzung der weggesteuerten Politur, bei der die Einfederung des Werkzeugs nicht über einen Druckzylinder sondern über die feste Positionierung des Werkzeugs erzeugt wird.

- Mit dem errechneten Kraftverlauf kann nun ein dritter Durchlauf der Simulation erfolgen. Dabei wird die Kraft auf das Werkzeug für jeden Punkt der Werkzeugbahn entsprechend der Simulation gesteuert.

Die errechnete Deformation des Werkzeugs aus Abbildung 44 beträgt etwa 0,179mm. Mit diesem Wert als konstante Vorgabe lässt sich der Verlauf der auf das Werkzeug wirkenden Normalkraft berechnen.

Die Kurve in Abbildung 47 zeigt das Ergebnis. Da der angenommene Wert von 0,179mm gerundet ist und etwas zu hoch liegt, liegt die Kraft im Mittenbereich etwas oberhalb von 40N. Im Randbereich nimmt die Kraft ab und erreicht die Nulllinie bei etwa 39mm. Dort liegt das Werkzeug mit dem Durchmesser 14mm komplett neben dem Werkstück.

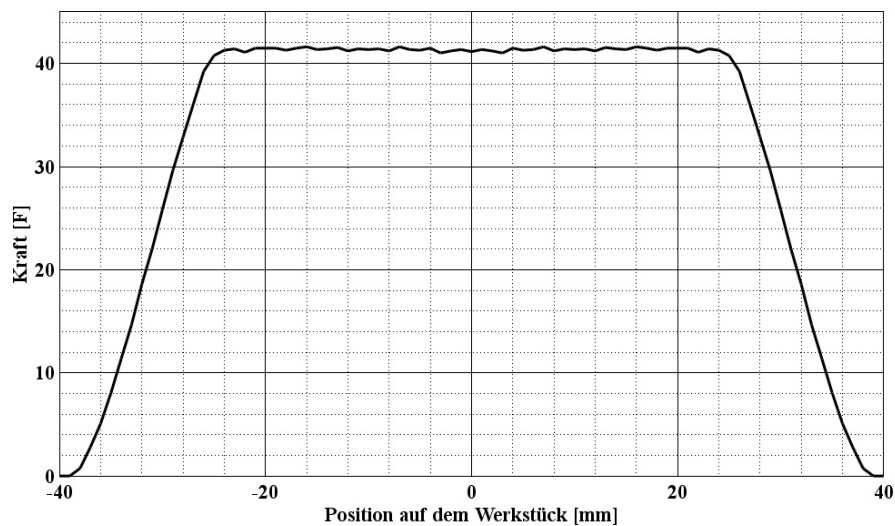


Abbildung 47: Kraftverteilung bei der Politur einer Planfläche mit konstanter Einfederung

Mit dem errechneten Verlauf der Kraft aus Abbildung 47 lässt sich nun eine erneute Simulation durchführen. Abbildung 48 zeigt den Abtrag in Abhängigkeit

der Position für mehrere Werkzeugbahnen. Bei der schwarzen Kurve wird, analog zu Abbildung 42, das Werkzeug von $x=-35\text{mm}$ bis $x=35\text{mm}$ auf einer geraden Linie über das Werkstück geführt. Der Abtrag nimmt oberhalb von etwa $|x|=28\text{mm}$ zum Rand hin ab.

Im Vergleich zum Verlauf der schwarzen Kurve in Abbildung 42 bedeutet dies eine wesentliche Verbesserung. Das Überschwingen des Abtrags ist nicht mehr vorhanden. Dies gilt ebenso für die Werkzeugbahnen mit eingeschränkter Werkzeugbahn.

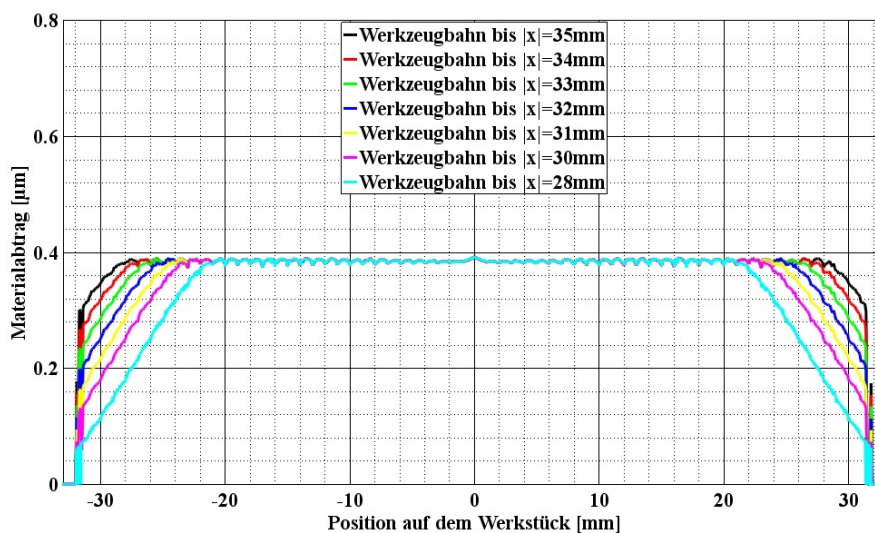


Abbildung 48: Simulationsergebnisse des Materialabtrags der Politur einer Planfläche mit dem Durchmesser 32mm in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück und der Werkzeugbahn unter Einsatz eines Kraftprofils

Lediglich der verringerte Abtrag, hervorgerufen durch die Verringerung der Kontaktzeit des Werkzeugs im Randbereich, ist noch zu sehen. Dieser verschiebt sich mit zunehmender Begrenzung der Werkzeugbahn immer weiter in den Mittenbereich des Werkstücks. Bei der Begrenzung auf $|x| \leq 28\text{mm}$, zu sehen

in der türkisenen Kurve in Abbildung 48, verläuft der Abtrag konstant bis $|x| = 22\text{mm}$ und sinkt danach kontinuierlich ab.

5.4.5 Diskussion der Ergebnisse

Die dargestellten Simulationen basieren auf Werkzeugbahnen, bei denen das Werkzeug im Randbereich zunehmend über dem Werkstück absteht. Dabei verformt sich nur der Teil des Werkzeugs, der noch auf der Oberfläche des Werkstücks aufliegt. Dies führt zunehmend zu Ungenauigkeiten in der Berechnung der Kraftverteilung, da das zugrunde liegende Modell auf unabhängigen, nichtlinearen Federn beruht und nur Kräfte parallel zu den Federn des Modells berücksichtigt. Die zunehmend auftretenden Querkräfte sind nicht berücksichtigt. Die Verringerung der Kraft im Randbereich vermindert diese Ungenauigkeiten, eine Abweichung zwischen Simulation und Modell ist aber zu erwarten.

In der realen Politur tritt noch ein ganz anderer Einfluss auf: Die wirkenden Querkräfte innerhalb des Werkzeugs sowie die, oft scharfe, Kante des Werkstücks können zur Zerstörung des Polierwerkzeugs führen. Daher ist eine Werkzeugbahn, die weit über das Werkstück hinausführt, in der realen Padpolitur zunehmend kritisch.

Die Abnahme des Abtrags zum Randbereich hin ist immer noch vorhanden. Zur weiteren Minimierung des Randeffekts kann nun die Anpassung der Verweilzeit angewandt werden. Durch die verringerte Kraft im Randbereich sind die Abtragsfunktionen kleiner. Dies vereinfacht die Optimierungsrechnung und führt zu geringeren Restfehlern in diesem Bereich.

5.5 Einfluss der Relativgeschwindigkeit

Nach Preston besteht mit Gleichung (3) ein linearer Zusammenhang zwischen der Abtragrata und der Relativgeschwindigkeit v_{ges} zwischen Werkzeug und Werkstück. Bei durchgeführten Polituren in der Rundtischpolitur weichen die real erzielten Ergebnisse jedoch von der Theorie ab. Die Ursache wird in der starken Ortsabhängigkeit von v_{ges} vermutet, da in der Rundtischpolitur die durch das Werkstück eingebrachte Geschwindigkeitskomponente stark positionsabhängig ist.

Die experimentelle Überprüfung dieser These soll anhand von zwei Versuchen erfolgen, wobei in einem Versuch v_{ges} in Abhängigkeit der Position des Werkzeugs x_p auf dem Werkstück variiert und im anderen Versuch konstant gehalten ist. Parallel dazu wird der jeweilige Polierprozess in der Simulation nachgebildet. Besteht nun ein Zusammenhang zwischen v_{ges} und dem Preston-Koeffizienten, so sollte sich dies im Vergleich zwischen Simulation und Politur zeigen. Bei dem Versuch mit variabler v_{ges} ist dabei eine erheblich höhere Abweichung zwischen Simulation und Politur zu erwarten. Im weiteren Verlauf des Kapitels ist zur Untersuchung der ortsabhängigen v_{ges} die Relativgeschwindigkeit immer positiv als Betrag dargestellt.

Für beide Versuche wird neben der Politur auf der Polierstation der erwartete Abtrag anhand des vorhandenen Modells mit konstantem Preston-Koeffizient berechnet.

- Im ersten Versuch sind die Drehzahlen von Werkstück und Werkzeug sowie die Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeugs während der gesamten Politur konstant.

- Im zweiten Versuch wird der Einfluss der Relativgeschwindigkeit ausgeschaltet indem $v_{ges}(\mathbf{x})$ für alle Werkzeugpositionen \mathbf{x} nach Möglichkeit konstant gehalten wird.

Die beiden Versuche werden mit zwei unterschiedlichen Werkzeugen durchgeführt:

- Bei dem Werkzeug Nummer eins handelt es sich um ein Padwerkzeug, es besitzt kein Offset.
- Das Werkzeug Nummer zwei besitzt ein Offset von 30mm senkrecht zur Werkzeugbahn.

Um jegliche Einflüsse der Werkstückgeometrie auszuschließen, kommen plane Linsen der Glassorte BK7 mit einem Durchmesser von 64mm als Werkstück zum Einsatz. Die Kraft auf das Werkzeug beträgt konstant 20N und die Drehzahlen für Werkstück und Werkzeug maximal 700 Umdrehungen pro Minute. Die Polierzeit für Versuch eins beträgt 66min und für Versuch zwei 56min. Dieser Unterschied in der Prozessdauer ist für die Auswertung nicht relevant, da die jeweiligen Versuche mit der dazugehörigen Simulation verglichen werden.

5.5.1 Versuchsdurchführung mit dem Padwerkzeug

Abbildung 49 zeigt eine Übersicht des Verlaufs der Relativgeschwindigkeiten beider Versuche für das Padwerkzeug. Die Position auf dem Werkstück ist dabei auf der x-Achse aufgetragen, die y-Achse zeigt die Relativgeschwindigkeit. Die grüne Linie zeigt den Verlauf der Relativgeschwindigkeit mit konstantem Vorschub für den ersten Versuch. Sie steigt linear mit der Entfernung zum

Nullpunkt. Für diesen Versuch sind dabei die Drehzahlen von Werkzeug und Werkstück konstant gehalten. Ihr Verlauf in Abhängigkeit der Position für den ersten Versuch zeigt die grüne Linie in Abbildung 50. Sie liegen bei 700 1/min, unabhängig von der Position auf dem Werkstück.

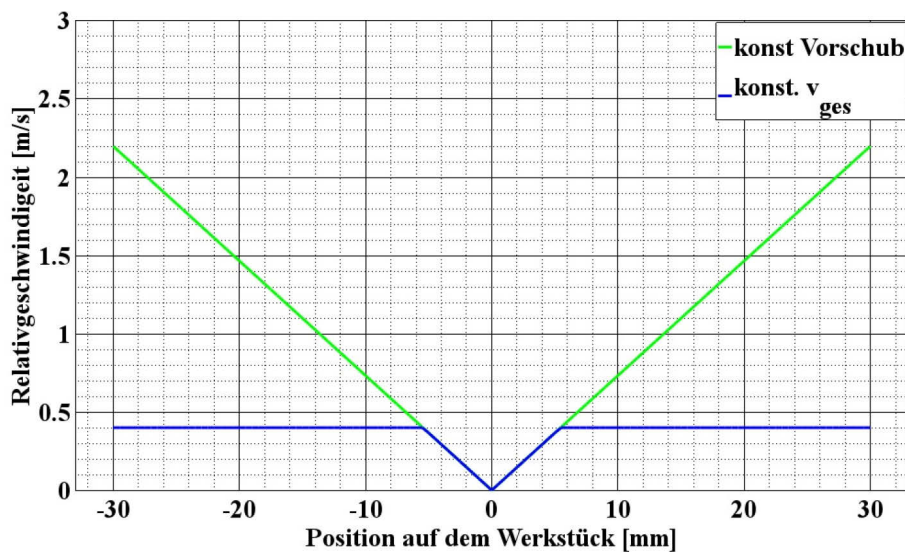


Abbildung 49: Verlauf der Relativgeschwindigkeiten eines Padwerkzeugs in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück; grüne Linie: konstanter Vorschub des Werkzeugs; blaue Linie: konstante Relativgeschwindigkeit v_{ges}

Die blaue Linie in Abbildung 49 zeigt den Verlauf der Relativgeschwindigkeit für den zweiten Versuch. Dabei ist $v_{ges}(x) = 0,4 \frac{m}{s}$ für $|x| \geq 5,5mm$. Darunter besitzt Werkzeug eine zu geringe v_{ges} um diese konstant zu halten. Zur positionsabhängigen Anpassung der v_{ges} werden die Drehzahlen von Werkstück und Werkzeug entsprechend angepasst. Der Verlauf ist durch die blaue Linie in Abbildung 50 dargestellt. Ab $|x| \geq 5,5mm$ nimmt die Drehzahl von 700 1/min ab und liegt bei $|x| = 30mm$ bei ungefähr 160 1/min.

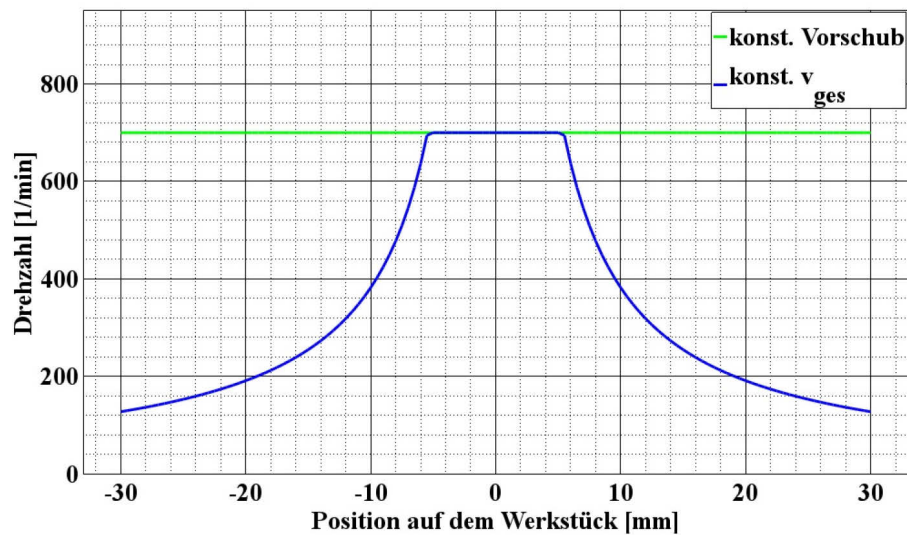


Abbildung 50: Verlauf der Drehzahlen von Werkstück und Werkzeug für das Padwerkzeug in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück; grüne Linie: konstanter Vorschub des Werkzeugs; blaue Linie: konstante v_{ges}

In der Rundtischpolitur steigt die zu bearbeitende Fläche mit dem Abstand des Werkzeugs vom Drehzentrum des Werkstücks linear an. Dieser Anstieg wird im Versuch eins, dem Versuch mit konstantem Vorschub, durch den Anstieg von v_{ges} ausgeglichen, dies zeigt auch der Verlauf der grünen Linie in Abbildung 49.

Bei der Begrenzung von v_{ges} im zweiten Versuch durch die Anpassung der Drehzahlen ist dieser Ausgleich nicht mehr vorhanden; bei weiterhin konstantem Vorschub wäre eine deutliche Reduktion des Materialabtrags zu erwarten. Um diesem Effekt entgegenzuwirken wird im Versuch zwei auch der Vorschub des Werkzeugs über das Werkstück unter Anwendung der Gleichung (18) verringert.

Die Abbildung 51 zeigt den Verlauf des Werkzeugvorschubs für beide Versuche. Die grüne Linie stellt den konstanten Verlauf des Vorschubs in Versuch eins mit 1,5mm/s dar; die blaue Linie zeigt die positionsabhängige Korrektur des

Vorschubs ab $|x| \geq 5,5\text{mm}$. Er sinkt von $1,5\text{mm/s}$ im Mittenbereich des Werkstücks bis auf ungefähr $0,3\text{mm/s}$ im Randbereich bei $|x| = 30\text{mm}$.

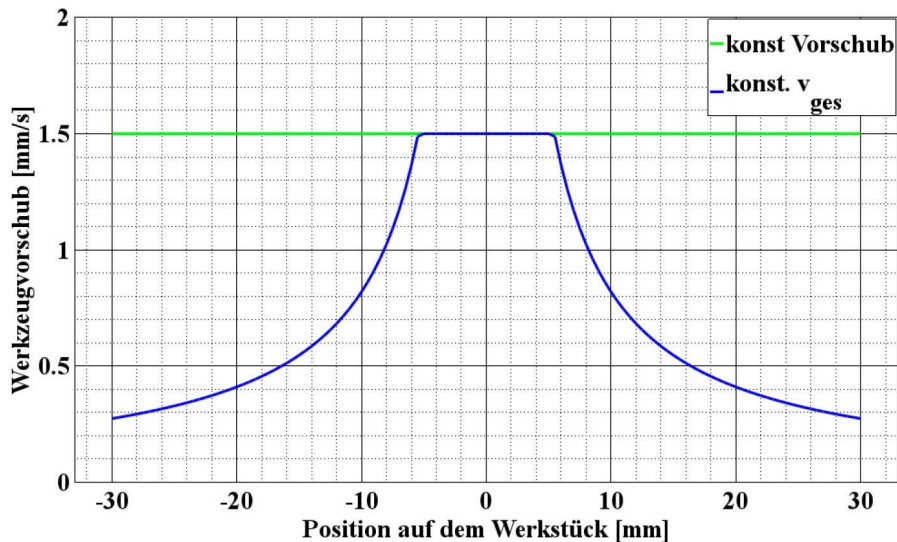


Abbildung 51: Verlauf des Werkzeugvorschubs für das Padwerkzeug in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück; grüne Linie: konstanter Vorschub; blaue Linie: konstante v_{ges}

Für den Versuch eins mit dem Padwerkzeug ohne Offset ergibt sich mit Gleichung (18) ein konstanter Korrekturfaktor. Dies zeigt sich auch im konstanten Verlauf der grünen Kurve aus Abbildung 51.

5.5.2 Ergebnisse mit dem Padwerkzeug

Abbildung 52 zeigt das Abtragsverhalten des Padwerkzeugs. Sie zeigt den erzielten Abtrag auf der Oberfläche als Schnitt in der xz -Ebene sowie die zugehörigen Simulationsergebnisse für beide Versuche:

- Die rote Kurve stellt den Abtrag des Versuchs eins mit dem Padwerkzeug dar. Das Simulationsergebnis dazu ist in der schwarzen Kurve zu sehen. Deutlich sichtbar ist der Unterschied im Verlauf der beiden Kurven. Der

Abtrag der realen Politur liegt in der roten Kurve bei der Werkzeugposition $x = 0\text{mm}$ noch oberhalb des Simulationsergebnisses der schwarzen Kurve. Er fällt jedoch zu beiden Rändern hin, im Bereich zwischen $|x| = 20\text{mm}$ und $|x| = 30\text{mm}$, ab und bleibt sichtbar hinter dem simulierten Wert der schwarzen Kurve zurück.

- Die blaue Kurve in Abbildung 52 zeigt den Verlauf des Abtrags für Versuch zwei mit dem Padwerkzeug. Die grüne Kurve zeigt das dazu gehörende Ergebnis der Simulation. Die Verläufe beider Kurven stimmen nahezu überein. Auch bei Versuch zwei ist der Materialabtrag in der Simulation zu den Rändern hin etwas höher und in der Mitte niedriger. Jedoch stimmen die Verläufe beider Kurven relativ gut, mit einem Fehler kleiner als 10%, überein.

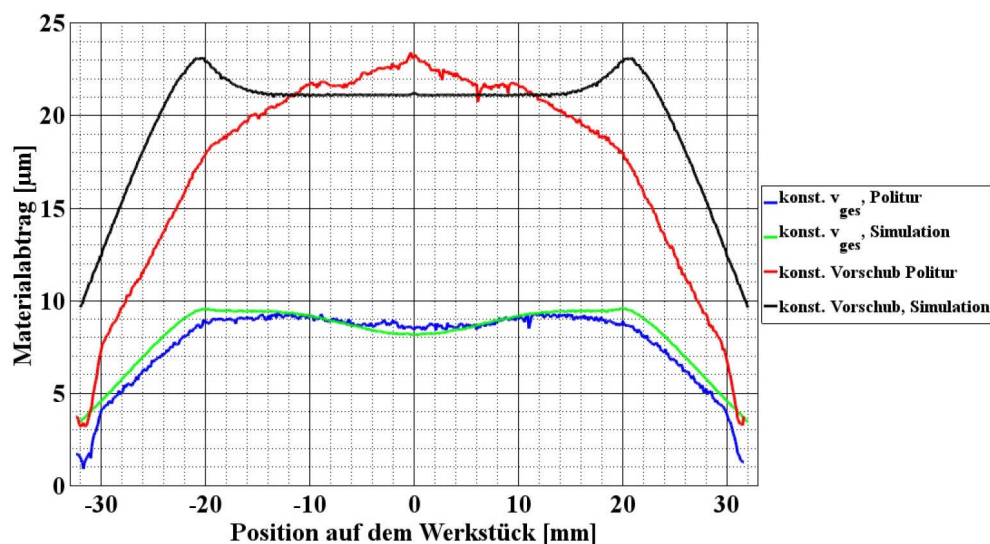


Abbildung 52: Abtragsverhalten des Padwerkzeugs; schwarz: Simulation mit konstantem Vorschub, rot: reale Politur konstantem Vorschub, grün: Simulation mit konstanter v_{ges} , blau: Politur mit konstanter v_{ges}

5.5.3 Versuchsdurchführung mit dem Offsetwerkzeug

In der Abbildung 53 ist der Verlauf der Relativgeschwindigkeiten beider Versuche für das Offsetwerkzeug dargestellt. Analog zu Abbildung 49 ist die Position auf dem Werkstück auf der x-Achse aufgetragen, die Relativgeschwindigkeit auf der y-Achse. Die grüne Linie zeigt den Verlauf der Relativgeschwindigkeit mit konstantem Vorschub des ersten Versuchs. Die minimale v_{ges} tritt dabei im Drehzentrum des Werkstücks bei $x = 0\text{mm}$ auf und steigt nichtlinear zum Rand hin an.

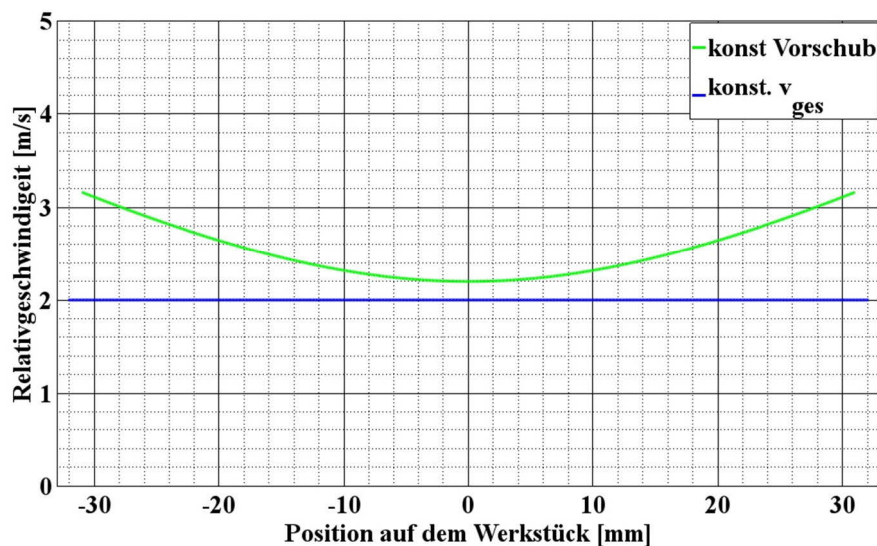


Abbildung 53: Verlauf der Relativgeschwindigkeiten eines Offsetwerkzeugs in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück; grüne Linie: konstanter Vorschub des Werkzeugs; blaue Linie: konstante Relativgeschwindigkeit

Die blaue Kurve in Abbildung 53 zeigt die konstante $|v_{ges}(x)| = 2\text{m/s}$ für den Versuch zwei mit dem Offsetwerkzeug. Auffällig ist hier, im Vergleich zum Verlauf der blauen Kurve aus Abbildung 49, das Fehlen der Unstetigkeit in der Mitte des Werkstücks. Dies lässt sich mit der zusätzlichen

Geschwindigkeitskomponente des Offsetwerkzeugs zurückführen. Sie ist auch im Drehzentrum des Werkstücks ausreichend hoch, um eine Unstetigkeit ähnlich des Padwerkzeugs nicht aufkommen zu lassen.

Die konstante v_{ges} des Versuchs zwei wird, analog zum Padwerkzeug, durch die Anpassung der Drehzahlen von Werkzeug und Werkstück erreicht. In der Abbildung 54 ist der Verlauf der Drehzahlen für beide Versuche aufgetragen. Die grüne Kurve zeigt den konstanten Verlauf der Drehzahlen mit 700 1/min für den gesamten Weg des Werkzeugs.

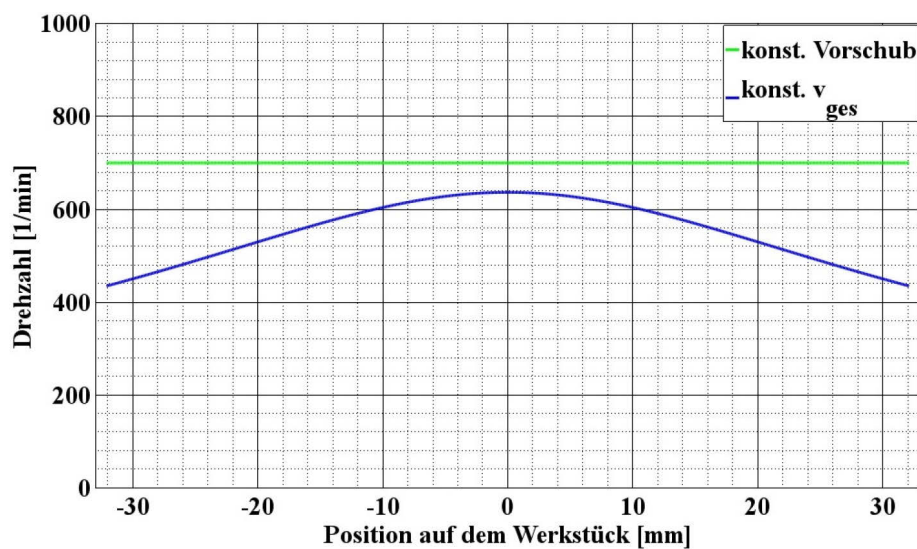


Abbildung 54: Verlauf der Drehzahlen von Werkstück und Werkzeug für das Offsetwerkzeug in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück; grüne Linie: konstanter Vorschub des Werkzeugs; blaue Linie: konstante v_{ges}

Die blaue Kurve in Abbildung 54 zeigt die positionsabhängige Anpassung der Drehzahl für den Versuch mit konstanter Relativgeschwindigkeit. In der Mitte des Werkstücks bei $x = 0 \text{ mm}$ liegen die Drehzahlen mit ungefähr 640 1/min am Höchsten und sinken zum Rand hin auf etwa 440 1/min ab.

Die maximal mögliche Drehzahl von 700 1/min ist in diesem Versuch nicht erforderlich um die festgelegte Relativgeschwindigkeit zu erreichen.

Durch den nichtlinearen Verlauf der Relativgeschwindigkeit der grünen Kurve in Abbildung 53 ist für den Versuch mit konstantem Vorschub ein stark nichtlinearer Verlauf des Abtrags zu erwarten. Dieser nichtlineare Verlauf ist in Versuch eins nicht korrigiert. Es kommen dieselben Parameter wie bei dem Versuch eins mit Padwerkzeug zur Anwendung.

Im Versuch zwei, der Politur mit konstanter Relativgeschwindigkeit, wird der Werkzeugvorschub, analog des Versuchs mit dem Padwerkzeug, mit der Gleichung (18) angepasst.

Den Verlauf des Werkzeugvorschubs für beide Versuche zeigt Abbildung 55. Die grüne Kurve zeigt den konstanten Vorschub von Versuch eins, die blaue Kurve den angepassten Verlauf für Versuch zwei. Auffällig ist auch hier die, für ein Offsetwerkzeug typische, Polstelle in der Mitte bei $x = 0 \text{ mm}$. Diese ist hier auf 10 mm/s begrenzt. Die Ursache der Polstelle ist die vom Offsetwerkzeug verursachte zusätzliche Geschwindigkeitskomponente. Diese ist unabhängig von der Position des Werkzeugs auch im Mittenbereich wirksam. Der steile Abfall der blauen Kurve im Bereich um die Mitte ist auf den nichtlinearen Zusammenhang zwischen v_{ges} und dem Abstand zum Mittelpunkt zurückzuführen. Zum Randbereich hin sinkt der Werkzeugvorschub sehr weit bis auf unter $0,1 \text{ mm/s}$. Nur mit dieser extremen Anpassung des Werkzeugvorschubs kann mit diesem Offsetwerkzeug ein konstanter Materialabtrag bei der Politur erreicht werden

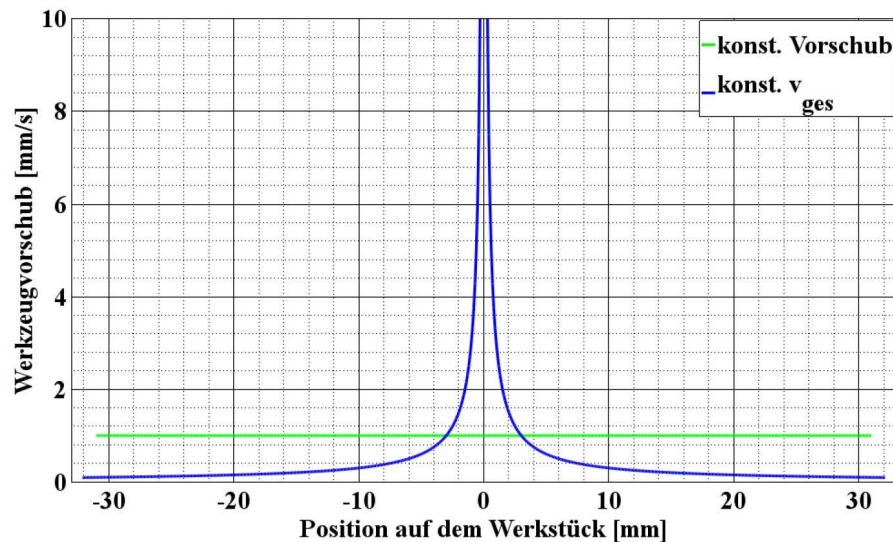


Abbildung 55: Verlauf des Werkzeugvorschubs für das Offsetwerkzeug in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück; grüne Linie: konstanter Vorschub; blaue Linie: konstante v_{ges}

5.5.4 Ergebnisse mit dem Offsetwerkzeug

Das Abtragsverhalten des Offsetwerkzeugs zeigt Abbildung 56. Sie zeigt den erzielten Abtrag auf der Oberfläche als Schnitt in der xz -Ebene mit den dazu gehörenden Simulationsergebnissen für beide Versuche:

- Die rote Kurve zeigt den Abtrag der Politur des Versuchs eins mit konstantem Vorschub. Das dazu passende Ergebnis der Simulation ist in der schwarzen Kurve dargestellt. Beide Kurven stimmen im Mittenbereich um $x = 0\text{mm}$ gut überein, weichen aber zum Rand hin, oberhalb von ungefähr $|x| > 8\text{mm}$ zunehmend voneinander ab. Der Materialabtrag der Politur in der roten Kurve bleibt zu den Randbereichen hin deutlich hinter der Simulation der schwarzen Kurve zurück
- Die blaue Kurve zeigt den Abtrag der Politur nach Versuch zwei, mit konstanter v_{ges} . Die grüne Kurve zeigt das Ergebnis der dazu gehörenden

Simulation. Der Verlauf stimmt bis auf kleine Abweichungen sehr gut überein. Interessant ist zudem der annähernd konstante Verlauf der beiden Kurven über einen relativ großen Teil der Oberfläche. Die Ursache dafür liegt in der Korrektur des Werkzeugvorschubs nach Abbildung 55, blaue Kurve.

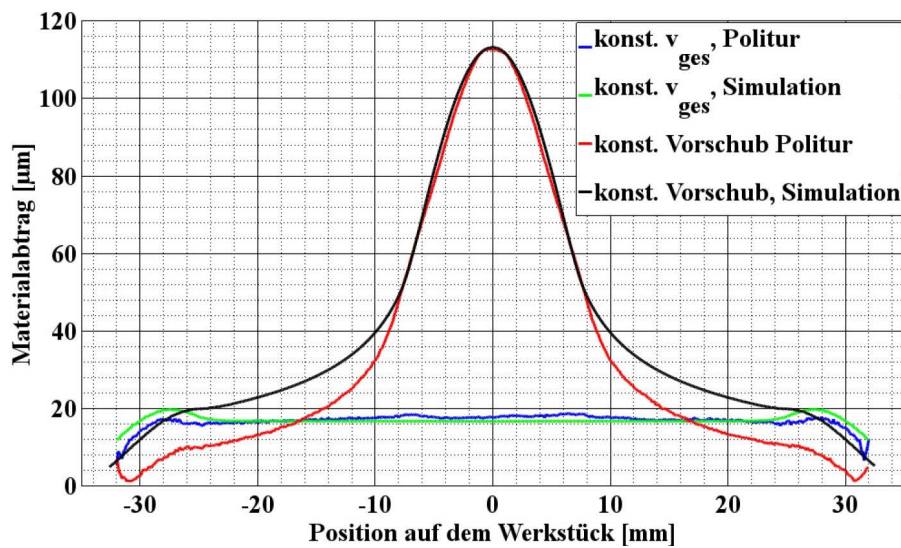


Abbildung 56: Abtragsverhalten eines Offsetwerkzeugs mit 30mm Offset; schwarz: Simulation mit konstantem Vorschub, rot: reale Politur mit konstantem Vorschub, grün: Simulation mit konstanter v_{ges} , blau: Politur mit konstanter v_{ges}

5.5.5 Diskussion der Ergebnisse

Bei dem Vergleich des Materialabtrags der Polierversuche beider Werkzeuge mit den dazugehörigen Simulationen ist bei dem Versuch eins, mit konstantem Vorschub, ein deutlich sichtbarer Unterschied zwischen der Simulation und der realen Politur zu sehen. Dieser Unterschied nimmt zum Randbereich zu. Da der Vorschub bei Versuch eins konstant gehalten ist, bleibt als einzig variabler Parameter die Relativgeschwindigkeit v_{ges} . Diese nimmt von der Mitte des

Werkstücks zum Rand zu. Dies lässt vermuten, dass die Abtragsrate des Polierprozesses abhängig ist von der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück.

Bei dem Versuch zwei, der Politur mit konstanter Relativgeschwindigkeit, ist der Einfluss der Relativgeschwindigkeit aus Versuch eins ausgeschaltet. Die ortsabhängige Anpassung der Drehzahlen sowie des Vorschubs sorgt für die konstante Relativgeschwindigkeit und besitzt keine weiteren, darüber hinaus gehenden Einflüsse, auf die Abtragsrate.

Der Vergleich der Abträge beider Werkzeuge mit der zugehörigen Simulation zeigt eine hohe Übereinstimmung der Verläufe. Die Abweichungen sind deutlich geringer als bei Versuch eins und treten im Mittenbereich ebenso wie im Randbereich des Werkstücks auf. Daher kann das Werkzeug als Ursache für die beobachteten Abweichungen ausgeschlossen werden.

Vielmehr fehlt dem Modell der Simulation bei Versuch eins eine wesentliche Größe, die diese Abweichungen verursacht. Der einzige Unterschied beider Versuche, aus Sicht des Werkstücks, ist der Verlauf der Relativgeschwindigkeit. Die Änderung der Abtragsrate lässt sich damit auf die Änderung der Relativgeschwindigkeit zurückführen. Die Ergebnisse dieser Versuche bestätigen die Ergebnisse neuerer Veröffentlichungen auf diesem Gebiet wobei der im Preston-Koeffizient enthaltene Reibungskoeffizient von der Relativgeschwindigkeit abhängig ist [GHI05], [Bel09], [Pra10].

Wichtig ist zudem der mit dem Offsetwerkzeug und konstanter v_{ges} erzielte konstante Abtrag über einen großen Bereich des Werkstücks durch Anwendung des Korrekturfaktors aus Gleichung (18).

5.6 Messung des Reibungskoeffizienten

Die Vorgehensweise zur Messung des Reibungskoeffizienten ist in Kapitel 3.4.4 beschrieben, eine Skizze des Aufbaus zeigt Abbildung 17. Beispielhaft erfolgt die Messung des Reibungskoeffizienten auf einer sphärischen Fläche aus BK7 Glas mit dem Radius $R_0 \approx 88\text{mm}$ und einem Durchmesser von 64mm.

Der Offset des Werkzeugs beträgt $d = 20\text{mm}$ in Richtung der Werkzeugbahn, die Kraft F_N ist 40N und die Drehzahl für Werkstück und Werkzeug 700 Umdrehungen pro Minute. Die Kontaktfläche des Werkzeugs wird entlang der x-Achse von $x=-30\text{mm}$ bis 30mm geführt und das Werkzeug dabei mit der Kraft F_N beaufschlagt.

Parallel dazu werden der Verlauf der Spannung sowie die Stromaufnahme des im Polierkopf enthaltenen Elektromotors aus Abbildung 17 gemessen. Der Strom I_{Last} in Abhängigkeit der Position zeigt das linke Bild der Abbildung 57. Dabei sind insgesamt fünf Durchläufe der Messung sowie der Mittelwert dieser Messungen abgebildet. Auffällig ist die hohe Änderung des Motorstroms bei $x=-20\text{mm}$. An dieser Stelle sind die Geschwindigkeitskomponenten des Werkzeugs v_{WZ} und des Werkstücks v_{WS} gleich groß und zeigen für eine punktförmige Abtragsfunktion in dieselbe Richtung. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück ist an diesem Punkt daher Null.

Das rechte Bild in Abbildung 57 zeigt den Verlauf der am Motor anliegenden Spannung bei vier Durchläufen der Messung. Auch hier tritt bei der Position $x=-20\text{mm}$ eine Änderung im Spannungsverlauf auf.

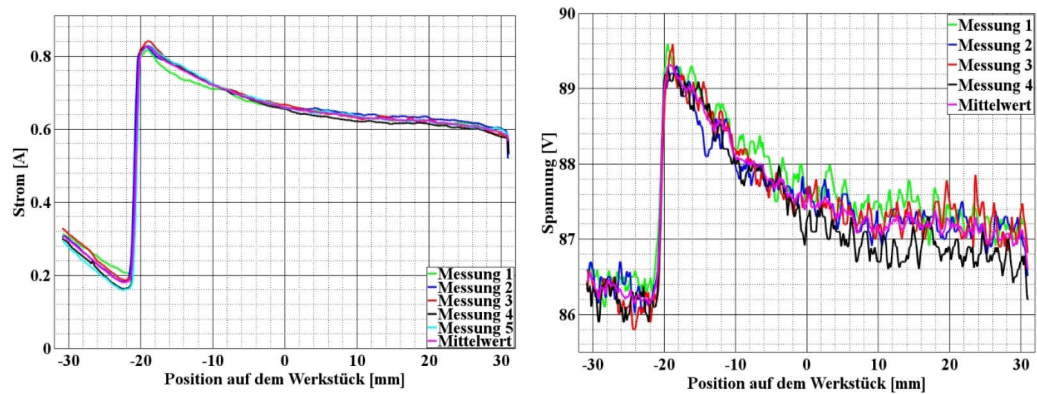


Abbildung 57: mehrere Messungen von Strom- und Spannungsverlauf relativ zur Werkzeugposition; links: Stromaufnahme, rechts: Spannungsverlauf

Mit den Strom- und Spannungsverläufen unter Last sowie der Strom- und Spannungsaufnahme im Leerlauf lassen sich die Wirk- und Verlustleistung errechnen. Das linke Bild in Abbildung 58 zeigt den Verlauf in Abhängigkeit der Position auf der Werkstückoberfläche. Die Gesamtleistungsaufnahme ist dabei in schwarz dargestellt. Diese unterteilt sich in die, an die Welle des Motors abgegebene, rot dargestellte Wirkleistung und die grün eingefärbte Verlustleistung.

Deutlich ist in Abbildung 58 die hohe Änderung der Wirkleistung bei $x = -20\text{mm}$ zu sehen. Dabei ist sie für $x > -20\text{mm}$ positiv, d.h. der Motor gibt Leistung ab, während sie für $x < -20\text{mm}$ ins Negative abfällt. In diesem Bereich nimmt der Motor Leistung auf. Das lässt sich dadurch erklären, dass in diesem Bereich v_{WS} größer ist als v_{WZ} , das Werkzeug vom Werkstück quasi „geschoben“ wird.

Das rechte Bild aus Abbildung 58 zeigt den, unter Anwendung der Gleichungen (12)-(14), berechneten Reibungskoeffizient. Er besitzt bei $x = -20\text{mm}$ eine Nullstelle, interessant ist der Bereich von $x > -20\text{mm}$ bis $x = 30\text{mm}$, in diesem Bereich ändert sich die Relativgeschwindigkeit linear.

5 Ergebnisse

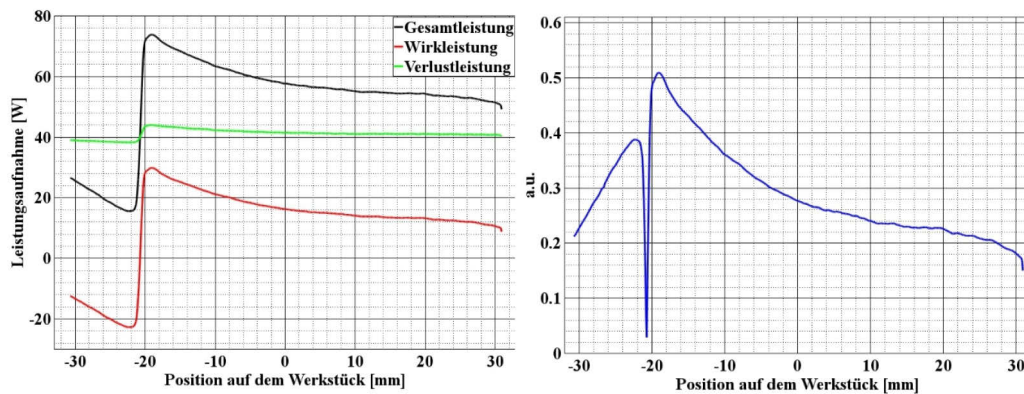


Abbildung 58: links: Verlauf der Leistungsaufnahme des Elektromotors in Watt, Werkzeugposition auf x -Achse; rechts: berechneter Reibungskoeffizient in Abhängigkeit der Werkzeugposition

Die schwarze Linie in Abbildung 59 zeigt den berechneten Reibungskoeffizient, der mit der Gleichung (15) in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit aufgetragen ist. Er beträgt für kleine Relativgeschwindigkeiten bis zu 0,5. Bei der Änderung der Relativgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$ auf $2,5 \text{ m/s}$ sinkt er um mehr als den Faktor 2. Die grauen Kurven stellen die errechnete Messunsicherheit dar.

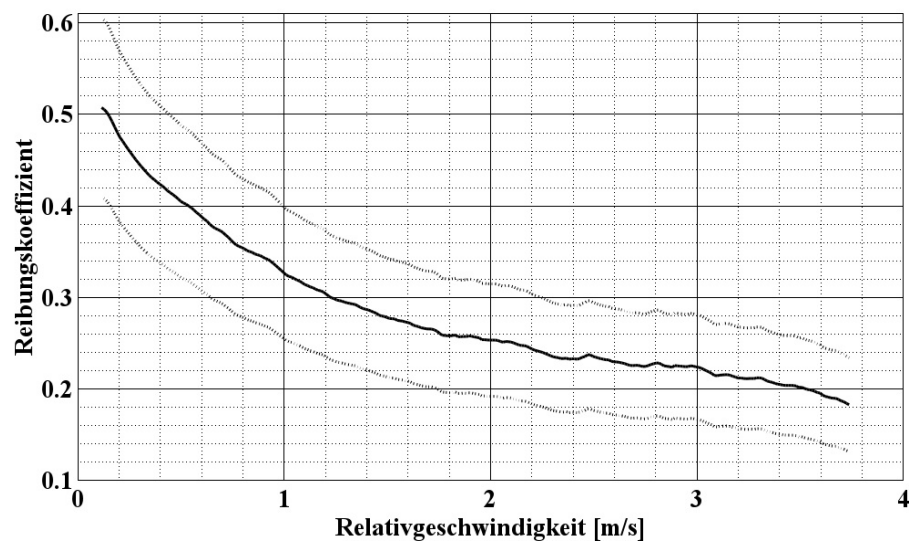


Abbildung 59: schwarze Linie: gemessener Reibungskoeffizient in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit, graue Linien: errechnete Messunsicherheit

Generell deckt sich der Verlauf des Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit mit den Ergebnissen anderer Veröffentlichungen. Die Werte von [Bel09] sind etwas höher und die Werte aus [Pra10] etwas niedriger.

Der Reibungskoeffizient ist abhängig von mehreren Parametern. Dazu zählen neben den Materialeigenschaften des Werkzeugs sowie des Werkstücks auch die Einflüsse der Poliersuspension. Mit der dargestellten Methode lassen sich die Abhängigkeiten dieser Einflüsse von der Relativgeschwindigkeit zusammen erfassen und können so in die Modellierung des Abtragsverhaltens eingebunden werden.

Die vorgestellte Messung des Reibungskoeffizienten ermöglicht die Anpassung des Preston-Koeffizienten an die Relativgeschwindigkeit und beseitigt damit die Abweichung der Simulation von der realen Politur.

5.7 Grenzen der Positioniergenauigkeit

Zur Überprüfung der Ergebnisse der Modellierung ist der Vergleich mit Ergebnissen aus der realen Politur ein grundlegender Bestandteil. Dabei können im Zuge der realen Politur Fehler auftreten, die diesen Vergleich erschweren. Dieses Kapitel untersucht die Grenzen der verwendeten Polierstation hinsichtlich der Positioniergenauigkeit.

5.7.1 Genauigkeit bei der Einmessung des Werkzeugs

Der Roboter ABB IRB4400 der Polierstation besitzt sechs Achsen, mit denen das Werkzeug im Arbeitsraum bewegt wird. Dabei stehen zur Positionierung alle sechs Freiheitsgrade zur Verfügung. Diese Achsen des Roboters besitzen Inkrementalgeber. Damit berechnet die Steuerung des Roboters die Position des Werkzeugflanschs an der sechsten Achse.

Mit dem Werkzeugvektor berechnet der Roboter die Eingriffsposition des Werkzeugs. Er beschreibt in der Polierstation die Länge des Werkzeugs, gemessen vom Werkzeugflansch an der sechsten Achse bis zur Mitte der Kontaktfläche des Polierwerkzeugs auf dem Werkstück.

Zur Bestimmung des Werkzeugvektors stellt die Robotersteuerung ein Programm zur Verfügung. Dabei wird am Polierkopf anstelle des Polierwerkzeugs eine Spitze befestigt. Mit dieser Spitze wird ein fester Punkt im Arbeitsbereich aus vier verschiedenen Richtungen angetastet. Die Steuerung berechnet aus den vier Positionen den Werkzeugvektor und liefert neben dem Werkzeugvektor auch den mittleren sowie den maximalen Fehler dieser Rechnung.

Tabelle 1 zeigt das Ergebnis von vier Einmessungen desselben Werkzeugs mit derselben Messspitze. Die einzelnen Komponenten der Vektoren unterscheiden

sich je nach Einmessung teilweise deutlich voneinander; zwischen der x-Komponente der Einmessung eins und zwei besteht ein Unterschied von 1,88mm. Der maximale Fehler der beiden Einmessungen unterscheidet sich um 1,71mm.

Selbst bei der genauesten Einmessung zwei aus Tabelle 1 ist der maximale Fehler von 1,26mm groß. Mit einer Unsicherheit in dieser Größenordnung ist bei der Positionierung des Werkzeugs auf dem Werkstück zu rechnen.

| Einmessung Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| X-Komponente [mm] | 218,85 | 216,97 | 218,62 | 216,92 |
| Y-Komponente [mm] | -0,66 | -1,53 | -0,72 | -0,8 |
| Z-Komponente [mm] | 83,42 | 82,52 | 84,58 | 82,76 |
| Mittlerer Fehler [mm] | 0,82 | 0,46 | 0,78 | 0,65 |
| Maximaler Fehler [mm] | 2,97 | 1,26 | 2,09 | 1,61 |

Tabelle 1: gemessener Werkzeugvektor desselben Werkzeugs mit zugehörigen Fehlern der Einmessung

Der von der Steuerung errechnete Fehler aus Tabelle 1 bei Einmessung eins liegt bei fast drei Millimeter, die Einmessung drei über zwei Millimeter. Denkbar ist hier eine fehlerhafte Positionierung der Messspitze während der Einmessung. Da die Positionierung manuell erfolgt liegt die erzielbare Genauigkeit am Bediener.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der „ungünstigen“ Positionierung des Polierkopfs während der Einmessung. Darunter ist eine Position im Arbeitsraum des Roboters zu verstehen, bei der sich die Positioniergenauigkeiten der einzelnen Achsen ungünstig überlagern.

5.7.2 Untersuchung der Positioniergenauigkeit der Polierstation

Durch die Unsicherheiten der Einmessung des Werkzeugs ergibt sich eine Positioniergenauigkeit des Werkzeugs auf dem Werkstück. Zusätzlich dazu kommt die Messunsicherheit bei der Einmessung des Werkstücks durch die Antastung des Werkstücks mit der Messspitze.

Eine Möglichkeit zur Erfassung des gesamten Positionierfehlers des Werkzeugs auf dem Werkstück für zwei Raumrichtungen, x und y , ist die Messung des Motorstroms bei der Rundtischpolitur. Dazu wird das Werkzeug bei sich drehendem Werkstück auf einer fein aufgelösten, mäanderförmigen Werkzeugbahn um das Drehzentrum des Werkstücks geführt und für jede Position der Werkzeugbahn die Stromaufnahme des Polierkopfs gemessen. Abbildung 60 zeigt die mäanderförmige Bahn um den Mittelpunkt. Der Abstand der einzelnen Bahnen beträgt dabei 0,1mm. Der gesamte Bereich der Werkzeugbahn liegt in einem Kreis mit 1,5mm Radius.

Während das Werkzeug die Werkzeugbahn abfährt, drehen sich sowohl das Werkzeug als auch das Werkstück mit derselben Drehzahl.

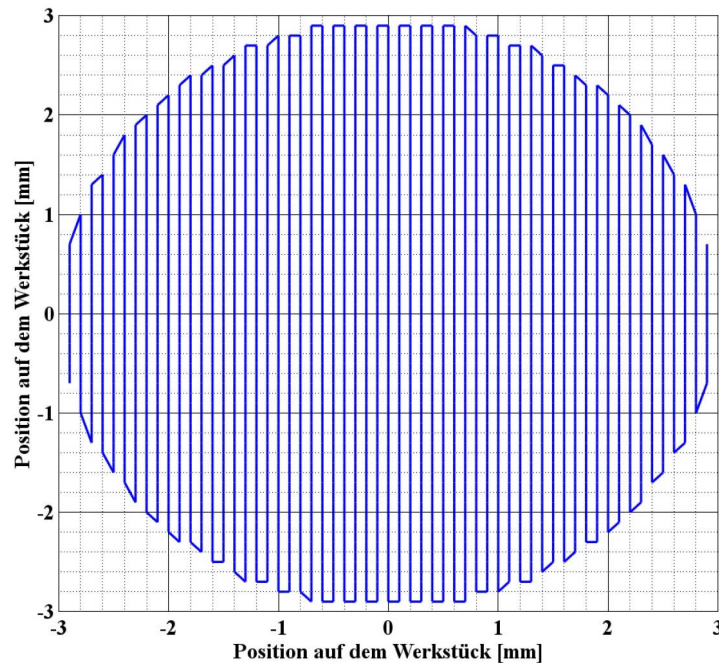


Abbildung 60: mäanderförmige Werkzeugbahn zur Bestimmung des Positionierungsfehlers nach dem Einmessen der Polierstation

Liegen die Drehzentren von Werkstück und Werkzeug direkt übereinander, so besitzen alle gemeinsamen Punkte von Werkzeug und Werkstück denselben Geschwindigkeitsvektor, die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück ist null. Dies führt zu einer Änderung der Stromaufnahme des Elektromotors im Polierkopf.

Das Vorgehen zur Bestimmung des Lagefehlers der Einmessung in der Übersicht:

- Einmessung des Polierkopfes
- Einmessen des Werkstücks
- Politur einer rotationssymmetrischen Fläche im Rundtischmodus; mäanderförmige Werkzeugbahn um den Mittelpunkt des Werkstücks
- Messung des Motorstroms in Abhängigkeit der Position des Werkzeugs

5 Ergebnisse

- Bestimmung der Verschiebung durch Ablesen des Extremwerts des Motorstroms

In Abbildung 61 ist der Motorstrom einer Messung als Falschfarbendarstellung in Abhängigkeit der Position auf der Werkzeugbahn von Abbildung 60 aufgetragen. Der rote Bereich im linken Bild stellt den Motorstrom von max. 0,58 A dar. Deutlich ist die Verschiebung zum Nullpunkt, der Drehachse des Werkstücks, zu erkennen. Die Verschiebung liegt bei $x=0,4\text{mm}$ und $y=0,7\text{mm}$. Im rechten Bild ist der Nullpunkt angepasst, das Maximum liegt im Nullpunkt des Werkstücks. Der rote Bereich im rechten Bild stellt den maximalen Motorstrom von 0,56 A dar. Das Minimum beider Bilder, in blau dargestellt, liegt bei ungefähr 0,44 A.

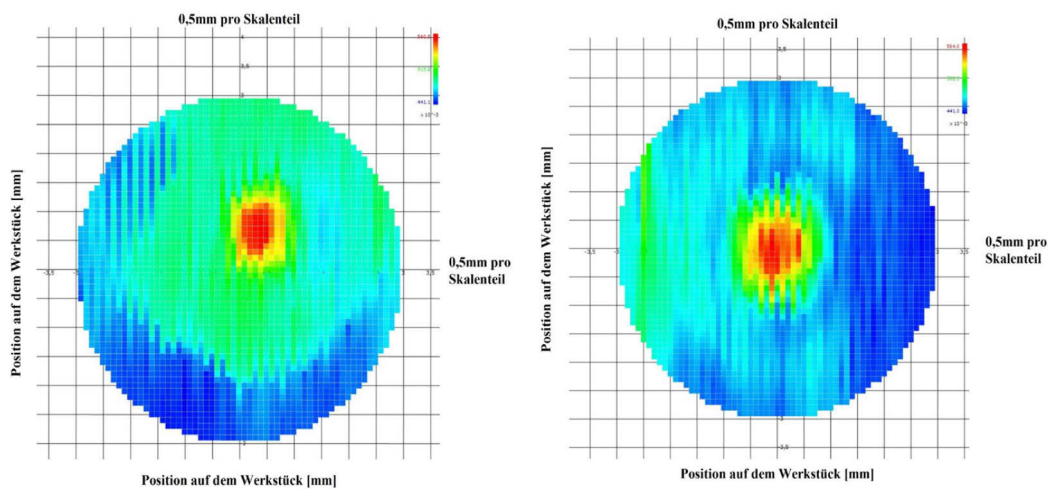


Abbildung 61: Motorstrom in Abhängigkeit der Position auf der Werkzeugbahn; links: ohne Korrektur, rechts: mit Korrektur des Positionierfehlers: $x=0,4\text{mm}$, $y=0,7\text{mm}$

Die Messung des Motorstroms bei einer mäanderförmigen Werkzeugbahn mit feiner Auflösung ermöglicht die Kontrolle der Werkzeugpositionierung sowie der

Korrektur der Positionierungsfehler in x- und y-Richtung. Positionierungsfehler in z-Richtung werden dabei nicht erfasst. Die Oberfläche des Werkstücks weist nach der Messung Fehler durch den Polierprozess auf und ist ohne Überarbeitung nicht mehr zu verwenden.

Mit der Messung des Motorstroms kann bei der Politur im Rundtischmodus die Abweichung der Werkzeugpositionierung vom Sollwert gemessen werden. Im dargestellten Beispiel beträgt diese Abweichung in x-Richtung 0,4mm und in y-Richtung 0,7mm. Die Größenordnung stimmt mit der in Kapitel 5.7.2 bestimmten Abweichung des Werkzeugvektors überein.

5.7.3 Untersuchung der Verkipfung zwischen Werkzeug und Werkstück

Nach dem Einmessen des Werkzeugkopfs sollte das Werkzeug senkrecht auf dem Werkstück positioniert sein. Mit der Messung des Motorstroms während der Politur eines Werkstücks soll dies überprüft und eine vorhandene Verkipfung des Werkzeugs relativ zum Werkstück gemessen werden. Beispielhaft wird dies anhand der Kippung des Werkzeugs um die y-Achse dargestellt.

Abbildung 62 skizziert ein grünes, verkipptes Padwerkzeug ohne Offset an zwei Positionen A, B auf einem grau dargestellten Werkstück. Das Werkstück dreht sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω_{WS} , das Werkzeug mit ω_{WZ} . Für zwei ausgewählte Punkte des Werkzeugs sind die Geschwindigkeitsvektoren des Werkzeugs \vec{v}_{WZ} und des Werkstücks \vec{v}_{WS} eingezeichnet. In beiden Positionen A und B liegt das Werkzeug rechts seines Drehpunkts auf.

Durch eine Verkipfung des Werkzeugs wird Auflagefläche auf dem Werkstück, bezogen auf den Werkzeugmittelpunkt, unsymmetrisch. Diese Unsymmetrie führt zu einer Beeinflussung des Werkzeugverhaltens und lässt sich über die Messung der Stromaufnahme des Motors bestimmen.

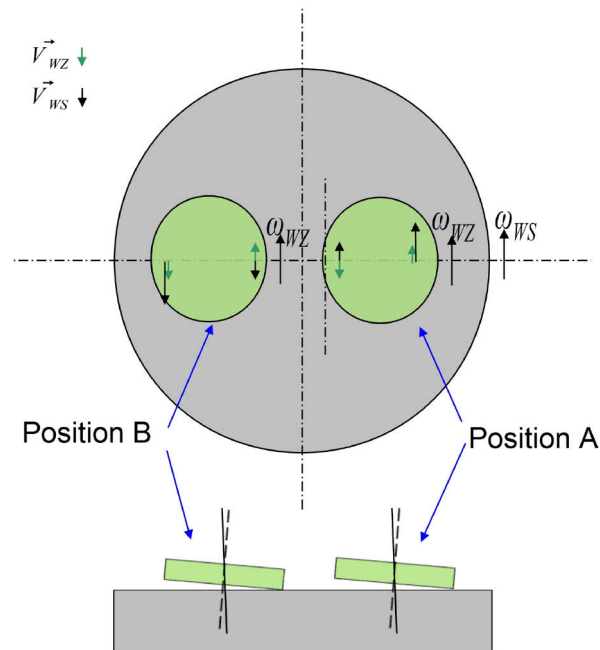


Abbildung 62: Einfluss eines verkippten Werkzeuges auf den Materialabtrag; Auflagefläche eines verkippten Werkzeuges (grün) in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück (grau)

Bei Position A in Abbildung 62 bewegt sich der aufliegende Bereich gleichsinnig mit der Werkstückoberfläche. Dadurch verringert sich die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück und führt zu einer niedrigen Stromaufnahme des Motors an diesem Punkt. Bei Position B bewegt sich der aufliegende Bereich gegensinnig mit der Werkstückoberfläche und führt zu einer erhöhten Stromaufnahme des Motors.

Als Versuchsobjekt dient eine sphärische Linse mit einem Durchmesser von ca. 64mm. Das Werkzeug ist ein Padwerkzeug ohne Offset, die Kraft auf das Werkzeug beträgt 40 N und der Vorschub über das Werkstück ist konstant. Werkzeug und Werkstück drehen sich mit 700 Umdrehungen pro Minute

Abbildung 63 zeigt die einzelnen Messungen des Motorstroms in Abhängigkeit des Kippwinkels und der Position auf dem Werkstück. Die rote Linie stellt den

Leerlaufstrom dar, das Werkzeug befindet sich dabei über dem Werkstück in der Luft. Die gelbe Kurve zeigt den Motorstrom eines eingemessenen, unverkippten Werkzeugs. Er weist eine starke Unsymmetrie zum Nullpunkt der x-Achse auf. Diese nimmt mit positiver Verkipfung von 1° zu, wie der Verlauf der pinken Kurve zeigt. Sie nimmt ab, sobald das Werkzeug in negative Richtung verkippt wird und erreicht ein Minimum bei ca. $-1,5^\circ$, dargestellt durch die schwarze Kurve. Bei zu starker Verkipfung in die negative Richtung, dargestellt durch grüne Kurve, nimmt die Unsymmetrie wieder zu.

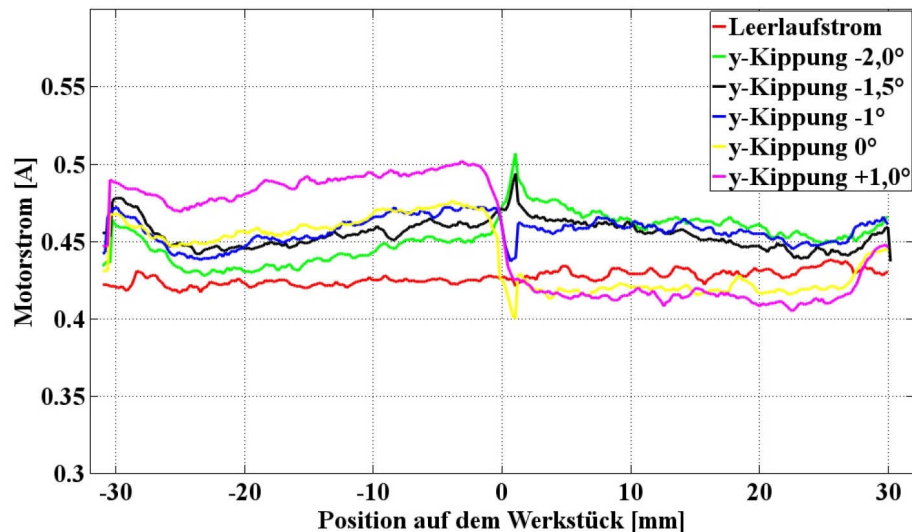


Abbildung 63: Messung der Stromaufnahme in Abhängigkeit der Werkzeugposition und der Verkipfung des Werkzeugs um die y-Achse

Mit der Messung des Motorstroms des Werkzeugs in Abhängigkeit der Position auf dem Werkstück lässt sich auf diese Weise bei der Rundtischpolitur die Verkipfung des Werkzeugs relativ zum Werkstück messen. Dieser Einfluss ist im Normalfall in der Simulation nicht berücksichtigt und stellt eine Quelle für Abweichungen von Simulation und realer Politur dar.

5.7.4 Begrenzung in der Positioniergeschwindigkeit

Dem in der Polierstation verwendeten Roboter ABB IRB4400 wird die Werkzeugbahn als Liste von sequentiell abzuarbeitenden Steuerbefehlen übergeben, wobei jeder Steuerbefehl zur Anfahrt eines Punktes dient. Die Rate der verarbeiteten Befehle ist durch die Steuerung des Roboters begrenzt. Das Überschreiten dieser Grenze führt zu einer verzögerten Abarbeitung der Steuerbefehle und damit zu Fehlern im Polierprozess.

Mit Hilfe eines Testprogramms soll die maximal mögliche Befehlsrate gefunden werden. Dazu wird eine kreisförmige Werkzeugbahn mit einem Radius von 40mm und einem Punkteabstand von 0,1mm definiert. Der Roboter fährt diese Werkzeugbahn mit vorgegebener Geschwindigkeit ab, gemessen wird die Zeit die der Roboter für diese Werkzeugbahn benötigt, nach[Eut11].

Abbildung 64 zeigt die Prozessdauer in Abhängigkeit des Werkzeugvorschubs. Der erwartete Sollwert ist in blau dargestellt, die rote Kurve zeigt die tatsächlich gemessene Zeit. Schon bei Werkzeugvorschüben von 3mm/s ergeben sich zwischen den beiden Kurven eindeutig sichtbare Abweichungen. Dies deutet darauf hin, dass die Steuerung des Roboters mit einer Befehlsrate von 30 Steuerbefehlen pro Sekunde die geforderte Werkzeugbahn nicht mehr richtig abfährt.

Oberhalb des Werkzeugvorschubs von 4,5mm/s in Abbildung 64 bleibt die Prozesszeit konstant und ist nicht mehr abhängig vom vorgegebenen Vorschub.

Daraus lässt sich schließen, dass die Steuerung des Roboters ungefähr 45 Steuerbefehle pro Sekunde verarbeiten kann. Die Messwerte stammen aus [Eut11].

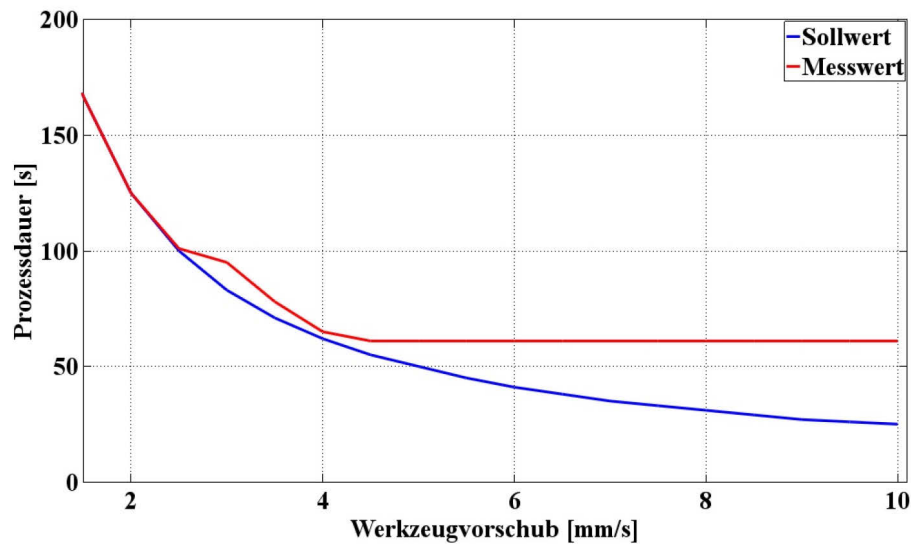


Abbildung 64: Prozessdauer eines Programms in Abhängigkeit des Werkzeugvorschubs, nach [Ent11]

Bei der Erstellung von Programmen auf der verwendeten Polierstation sollte, zur Vermeidung von Polierfehlern, darauf geachtet werden, dass die Befehlsrate der Steuerbefehle von der Polierstation verarbeitet werden kann. Für den Roboter ABB IRB4400 liegt die maximal sinnvolle Befehlsrate bei 30 Steuerbefehlen pro Sekunde.

5.7.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Polierstation auf Basis des Roboters ABB IRB4400 unterliegt Einschränkungen in der Genauigkeit:

- Die Positioniergenauigkeit des Roboters sowie die Ungenauigkeiten bei der Einmessung des Werkzeugs wirken sich auf die Lage der Abtragsfunktion des Werkzeugs aus. Dabei liegen die mittleren Abweichungen bei der Einmessung bei typischerweise unter 1mm und die maximalen Abweichungen im kleinen einstelligen Millimeterbereich. Die

genauen Werte hängen von der jeweiligen Einmessung ab und können um mehr als den Faktor zwei variieren.

- Positionierungsfehler lassen sich in der Rundtischpolitur in begrenztem Umfang über die Messung des Motorstroms erfassen. Eine Korrektur ist entlang der x- und y-Achse möglich. Gemessen wurde eine Abweichung von $x=0,4\text{mm}$ und $y=0,7\text{mm}$. Die Größenordnung der Abweichung stimmt gut mit der Abweichung bei der Einmessung des Werkzeugvektors überein.
- Die Befehlsrate zur Steuerung des Werkzeugvorschubs ist durch die Steuerung des Roboters begrenzt auf maximal 30 Befehle pro Sekunde. Eine Überschreitung führt zu unvorhersehbaren Einflüssen auf den Abtrag des Polierprozesses.
- Die Einmessung des Werkzeugs erfasst nicht eine eventuell vorhandene Kippung relativ zum Werkstück. Im dargestellten Beispiel beträgt die Verkippung des Werkzeugs um die y-Achse etwa $-1,5^\circ$. Diese lässt sich, bei der Politur von Planflächen, über die Kontrolle des Motorstroms messen und korrigieren.

Beide Fehlerquellen, die Verkippung des Werkzeugs sowie die Ungenauigkeiten bei der Einmessung des Werkzeugvektors beeinflussen sich gegenseitig bei der Politur von nichtplanen Oberflächen. Auch bei den hier dargestellten Messungen ist diese Beeinflussung vorhanden; durch die geringe Krümmung der verwendeten sphärischen Oberflächen lassen sich die beiden Effekte in den dargestellten Messungen trennen.

Die genannten Unsicherheiten sind bei der Planung des Polierprozesses zu berücksichtigen und schränken das Einsatzgebiet ein. So nimmt die Auswirkung der Positionierungsunsicherheit zu, je kleiner die Abtragsfunktionen des Werkzeugs sind. Die Polierstation ist daher vor allem für den Vorpolierprozess mit möglichst großen Abtragsfunktionen sinnvoll einzusetzen. Die Feinkorrektur von Oberflächenfehlern ist mit dieser Polierstation nicht zielführend.

6 Diskussion und Ausblick

Das vorgestellte Modell ermöglicht die numerische Simulation des Polierprozesses mit Padwerkzeugen auf Basis physikalisch messbarer Eingabegrößen. Dazu gehören neben den Geometrien der Oberflächen die Drehzahlen von Werkstück und Werkzeug, die Kraft auf das Werkzeug, der Preston-Koeffizient sowie die Elastizität des Werkzeugs. Mit diesem begrenzten Parametersatz ist die Vorhersage des Materialabtrags bis auf Abweichungen unter 10% möglich.

Bei der Modellierung sind unterschiedliche Geometrien der Werkzeug- und Werkstückoberflächen flexibel verwendbar. Diese reichen von Planflächen über sphärische und asphärische Flächen bis hin zu Freiformflächen.

Das Werkzeugmodell auf Basis der unabhängigen, nichtlinearen Federn ermöglicht die Berechnung der lokalen Kraftverteilung zwischen Werkzeug und Werkstück unter Berücksichtigung der senkrecht auf das Werkzeug wirkenden Kräfte, im Werkzeug auftretende Querkräfte sind dabei nicht erfasst. Der Vergleich von Polierversuchen und Ergebnissen der Simulation zeigt zum großen Teil hohe Übereinstimmungen.

Die auf Basis des Modells erzeugten ortsabhängigen Abtragungsspuren auf beliebigen Oberflächengeometrien können als Eingangssparameter einer weiteren Optimierung des Abtrags dienen. Dies stellt eine wesentliche Weiterentwicklung im Vergleich zu vielen auf dem Markt erhältlichen Poliersystemen dar. Zudem ist durch die Möglichkeit der Modellierung des Polierprozesses die Verwendung von Testteilen zur Erzeugung von Abtragungsfunktionen nicht mehr notwendig.

Bei dem Einsatz von Offsetwerkzeugen lässt sich in der Rundtischpolitur die Abtragsrate deutlich steigern. Allerdings erhöht sich der Abtrag im Mittenbereich um das Drehzentrum des Werkstücks stark. Die Beseitigung dieses erhöhten Abtrags über ein angepasstes Vorschubprofil stellt erhöhte Anforderungen an die dynamischen Eigenschaften und Positioniergenauigkeit der Polierstation. Der vorhandene Aufbau ist dafür nur bedingt geeignet.

Der Randeffect lässt sich durch das Modell der unabhängigen, nichtlinearen Federn nachbilden. Mit der Vernachlässigung von Querkräften innerhalb des Werkzeugs ist das Ergebnis der Simulation mit einem Fehler behaftet. Dieser nimmt zu, je weiter das Werkzeug über den Werkstückrand hinaussteht. Bei Einsatz eines positionsabhängigen Kraftprofils sinkt allerdings die Kraft auf das Werkzeug im Randbereich. Dies dürfte sich positiv auf Querkräfte auswirken. Die Simulation ersetzt daher nicht die auf den jeweiligen Polierprozess ausgerichtete Prozessplanung, sondern ergänzt diese lediglich. Bei sorgfältiger Ausführung ist mit einer deutlichen Verminderung des Randeffects zu rechnen.

Der Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Reibungskoeffizienten ist in der Rundtischpolitur eine der maßgeblichen Prozessgrößen. Der sorgfältige Umgang mit der Erfassung und Beseitigung des Einflusses ist essentiell und sollte nicht unterschätzt werden.

Ein kritischer Punkt ist der in der Polierstation verwendete Industrieroboter ABB IRB4400. Er dient als Positionierungssystem und besitzt eine spezifizierte räumliche Positioniergenauigkeit von 1mm. Daneben entstehen bei der Einmessung von Werkstück und Werkzeug zusätzliche Ungenauigkeiten in derselben Größenordnung. Damit eignet sich die Polierstation vor allem zur Politur mit großen Abtragsfunktionen, deren Durchmesser deutlich über der

Positionierungsunsicherheit liegt. Für die Korrektur mit feinen Werkzeugen ist sie ungeeignet.

Zur Minimierung der Positionierungsfehler ist der Einsatz eines alternativen und genaueren Positionierungssystems zu empfehlen.

Für einzelne Fehlerquellen des Positioniersystems, wie die Verkippung des Werkzeugs oder der Positionsfelder des Werkstücks, sind Methoden zur Bestimmung der Abweichung beschrieben. Diese erfordern allerdings die Politur von Testteilen und sind damit im Alltag zu aufwendig und nicht durchgängig anwendbar.

Literaturverzeichnis

- [Asp72] Aspen, R.; McDonough, R.; Nitchie, F.R.: Computer Assisted Optical Surfacing. In: Applied Optics Vol. 11 No. 12 (1972), S. 2739-2747
- [Bel09] Belkhir, N.; Bouzid, D.; Herold, V.: Determination of the friction Coefficient During Glass polishing. In: Tribol. Lett (2009), Vol 33
- [Bin00] Bingham, R.G.; Walker, D.D.; Kim, D.-H.; Brooks, D.; Freeman, R.; Riley D.: A novel automated process for aspheric surfaces. In: SPIE Proceedings 4093(2000)
- [Bra08] Braunecker, Bernhard; Hentschel, Rüdiger; Tiziani, Hans J.: Advanced Optics Using Aspherical Elements: 1. Auflage, Washington: SPIE (2008), Vol. No.: PM173
- [Bro81] Brown, Norman J.; Baker, Phillip C.; Manley, Richard T.: Optical Polishing of Metals. In: SPIE Proceedings 306 (1981)
- [Bro90] Brown, Norman J.: Optical Fabrication. In: Lawrence Livermore National Laboratory Report (1990), MISC 4476
- [Bui93] Buijs, M.; Korpel-van Houten, K.: A model for lapping of glass. In: Journal of Material Science (1993), Vol 28
- [Con01] Conradt, Reinhard; Dahlmann, Ulf; Gross, Sonja-Michaela; Klocke, Fritz; Hambrücker, Stefan: Optimierung der chemischen Einflüsse bei der mechanischen Politur von Glas, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Forschungsvorhaben AiF 12063N (2001)

- [Con06] Conrad, Reinhard, GHI, IPT: Einfluss des Agglomerationsverhaltens von Polierkörpern, Glasabrieb und verwendetem Poliermittelträger auf das Polierergebnis optischer Gläser. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13582/N (2006)
- [Con08] Conrad, Reinhard; Prange, A.; Becker, E.; Klocke, Fritz; Schneider, U.: Prozesskontrolle – Prozesskontrolle bei der Politur optischer Gläser. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 14741N (2008)
- [Coo90] Cook, Lee M. : Chemical Processes in Glass Polishing. In: Journal of Non-Crystalline Solids (1990), Vol. 120
- [Cum95] Cumbo, M.J.; Fairhurst, D.; Jacobs, S.D.; Puchebner, B.E.: Slurry particle size evolution during the polishing of optical glass. In: Applied Optics (1995), Vol 34
- [Nor08] DIN ISO 10110-12:2007: Optik und Photonik – Erstellung von Zeichnungen für optische Elemente und Systeme- Teil 12: Asphärische Oberflächen (2008)
- [Dru95] Drueding, Thomas, W.; Fawcett, Steven C.; Wilson, Scott R.; Bifano, Thomas G.: Ion beam figuring of small optical components. In: Optical Engineering 34(1995), Nr. 12
- [Eut11] Euteneier, Florian; Bericht zum Praxissemester. Zentrum für Optische Technologien, Hochschule Aalen(2011)

-
- [Eva03] Evans, C.J.; Paul, E.; Dornfeld, D.; Lucca, D.A.; Byrne, G.; Tricard, M.; Klocke, Fritz; Dambon, O.; Mullany, B.A.: Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing. In: Annals of CIRP Vol 52(2003), Nr. 2
- [Fae98] Fähnle, Oliver W.; van Brug, Hedser; Frankena, Hans J.: Fluid jet polishing of optical surfaces. In: Applied Optics Vol 37(1998), Nr.28
- [For97] Forbes, Greg: Algorithms for Optical Fabrication. Class Notes for COM Summer School (1997)
- [Guo04] Guo, Lirong; Subramanian, R S.: Mechanical Removal in CMP of Copper Using Alumina Abrasives. In: Journal of the Electrochemical society Vol. 151 (2004)
- [Hay84] Hayes, J.B.: Linear Methods of Computer Controlled Optical Figuring. PHD Thesis, University of Arizona (1984)
- [Izu86] Izumitani, Tetsuro. S.: Optical Glass. 1. Auflage; New York:American Institute of Physics, 1986
- [Jac95] Jacobs, S.D.; Golini, D.; Hsu, Y.; Puchebner, B.E.; Strafford, D.; Kordonski, W.I.; Prokhorov, I.V.; Fess, E.; Pietrowski, D.; Kordonski, V.W.: Magnetorheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing. In: SPIE Proceedings Vol. 2576(1995)
- [Jac99] Jacobs, S.D. ; Arrasmith, S.A.; Kozhinova, I.A.; Greg, L.L.; Shorey, A.B.; Romanofsky, H.J.: An overview of Magnetorheological Finishing (MRF) for Precision Optics Manufacturing. In: Ceramic Transactions Vol 102 (1999)

- [Jac03] Jacobs, S.D.: Innovations in Polishing of Precision Optics Part 2. In: Convergence 11/2 (2003)
- [Kar04] Karow, Hank H.: Fabrication methods for precision optics. New Jersey:Wiley Interscience (2004)
- [Klo02] Klocke, Fritz; Dambon, Olaf: Influences on the Polishing Process of Optical Glasses Using Synchro-speed-Kinematics. In: ASPE Proceedings (2002)
- [Kir94] Kirk, N.B.; Wood, J.V.: Glass polishing. In: British Ceramic Transactions Vol 93 (1994), Nr. 1, S. 25-30
- [Lam97] Lambropoulos, John C.; Xu, Su; Fang Tong: Loose abrasive lapping hardness of optical glasses and its interpretation. In: Applied Optics Vol 36(1997), Nr. 7, S. 1501-1516
- [Moon98] Moon, Y.: Investigation of the Relationship between Preston's Coefficient and Friction Coefficient in Chemical Mechanical Polishing (CMP). UC Berkeley: Research Reports 1998/1999 (1998)
- [Pra10] Prange, Andreas; Waechter, Daniel: Poliermittelträger für das Polieren optischer Gläser. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15763 N (2010)
- [Pre22] Preston, F.W.: The Structure of abraded surface glasses. In: Transactions of the Optical Society Vol 23(1922) Nr. 3, S. 141-164
- [Pre25] Preston, F.W.: The nature of the polishing operation. In: Transactions of the Optical Society. Glass Technol. Vol 3 (1925), S. 181-190

- [Pre27] Preston, F.W.: The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines. In: Journal of the Society of Glass Technology, Vol 11 (1927), S 214-256
- [rrg04] RRG: Sylomer. RRG Industrietechnik GmbH, 2004, Industrieschrift
- [Sch04] Schott, TIE 30: Chemical properties of optical glass. Schott Technical Information Optics for devices, 2004, Firmenschrift