

Materialabtrag beim Polieren - Finite Elemente Simulation und Versuch

Marco Speich¹, Wolfgang Rimkus², Rainer Börret¹, David K. Harrison³

¹Zentrum für Optische Technologien, Hochschule Aalen, Aalen, Deutschland

²Zentrum für Berechnung und Simulation, Hochschule Aalen, Aalen, Deutschland

³School of Engineering and Computing, Glasgow Caledonian University, Glasgow, United Kingdom

1 Zusammenfassung

Stahlformen für Polymeroptiken sind in der Regel in mehreren Verfahrensschritten hergestellt, der letzte Schritt vor der Formgebung ist das manuelle Polieren. Dieser Schritt erfordert qualifizierte Experten mit langjähriger Erfahrung und ist sehr zeitaufwendig. Ein weiteres Problem der manuellen Politur ist der medizinische Aspekt, manuelles Polieren ist sehr anstrengend für Gelenke in Fingern und Handgelenk, Ellbogen und Schulter. Deshalb ist das Ziel dieser Arbeit manuelles Polieren durch automatisierte Roboterpolitur zu ersetzen.

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf dem Materialabtrag bei der Roboterpolitur von Stahlformen für Polymerspritzguss von Optiken. Um den Prozess des Materialabtrags beim Polieren zu verstehen soll dieser mit Hilfe der Finite-Elemente-Analyse simuliert werden. Die FEA hilft dabei die richtigen Werkzeugmaterialien und Poliermittel abhängig vom gewünschten Materialabtrag und Oberflächengüte zu wählen. Experimentelle Tests wurden durchgeführt und mit der Simulation verglichen um Korrelationen zwischen den verschiedenen Parametern zu finden.

2 Einleitung

2.1 Polieren von Stahlformen für Kunststoffoptiken

Manuelles Polieren wird häufig verwendet bei der Herstellung von Spritzgussformen. Je nach Anwendungsgebiet der Polymerteile sind die Anforderungen an die Form sehr unterschiedlich. Ein Anwendungsgebiet sind z.B. Polymeroptiken.

Polymerspritzgussteile werden in der Regel in hohen Stückzahlen produziert. Von Billig-Produkten mit mehreren Millionen Kunststoffteilen pro Form bis zu Präzisionsoptiken mit Mengen von wenigen hundert Teilen sind die Anforderungen an die Formen sehr ähnlich [1].

Um die geforderten Ergebnisse auf der Stahlform zu erreichen sind nicht nur die Herstellungsprozesse, sondern auch die Messtechnik von wesentlicher Bedeutung. Verschiedene Messgeräte um die polierten Oberflächen bezüglich Formgenauigkeit und Mikrorauheit zu testen kommen zur Anwendung.

In der Regel können diese Kunststoffspritzgussformen auf zwei verschiedene Arten poliert werden [2, 3]. Die Arbeiter müssen erfahrene Experten sein um gute Ergebnisse bezüglich Formabweichung und Oberflächenrauheit zu erzielen. Jeder Formeinsatz benötigt viel Zeit. Ein Verfahren ist das Polieren mit großen Werkzeugen. Allerdings funktioniert diese Methode ausschließlich für sphärische Formen. Lokales manuelles Polieren ist die andere Methode um Stahlformen für Kunststoffspritzguss zu polieren. Polierexperten nutzen kleine Subapertur-Werkzeuge aus verschiedenen Materialien und bewegen diese Werkzeuge manuell über die Oberfläche. Dieses Verfahren führt zu einer guten Oberflächenrauheit, aber es ist sehr schwer, die Formabweichung steuern. Wie bei dem anderen Verfahren müssen die Arbeiter echte Experten auf diesem Gebiet sein. Dies wiederum macht es sehr teuer und schwer zu kontrollieren. Diese Methode ist sehr anspruchsvoll in Bezug auf gesundheitliche

Aspekte. Es ist sehr anstrengend für den Polierer und die Gelenke in Fingern und Handgelenk, Ellbogen und Schulter werden stark beansprucht, weil viel Kraft erforderlich ist um gute Ergebnisse zu erzielen; außerdem ist die Bewegung keine natürliche Bewegung [4]. Das macht dieses Projekt noch interessanter; wahrscheinlich ist es möglich, 95% der geforderten Oberflächenrauheit und der gewünschten Form zu erreichen, so dass der Polierer nur noch die letzten 5% auf die angegebenen Werte polieren muss.

2.2 Finite Element Analyse des Materialabtrags

Spanende Prozesse können mit verschiedenen kommerziellen Software-Lösungen simuliert werden. Es gibt Software-Lösungen die zum Beispiel Bohren, Fräsen und Drehen simulieren. Diese Programme bestimmen Kräfte während des Schneidvorganges, die Form der Späne und Temperaturen an der Schneidkante und im Material. Normalerweise setzen diese Programme sogenannte explizite Finite-Elemente-Modelle (FEM) ein. Diese Modelle verwenden üblicherweise eine explizite Lagrange-Funktion, einen Euler-Ansatz oder eine Kombination aus beidem [5]. Auch sogenannte Partikelmodelle werden für diese Zwecke verwendet.

Es existieren verschiedene Ideen und Ansätze, um Schleifprozesse zu simulieren [6, 7]. Diese Ansätze arbeiten sowohl mit FEM Programmen als auch mit Programmen zu molekular-dynamischen Simulation. Molekular-dynamische Modelle betrachten die Prozesse auf der Ebene einzelner Moleküle.

Mit Simulation von Schleifverfahren können die Kräfte in dem Verfahren, die auftretenden Temperaturen beim Schleifen und die erzielbare Oberflächenqualität nach dem Schleifen bestimmt werden. Mit FEM kann der Schleifvorgang entweder makro- oder mikroskopischen betrachtet werden. Die mikroskopische Analyse betrachtet den Schleifvorgang und die Kontaktzone im Detail; plastische Verformung und Materialabtrag können simuliert werden. Die makroskopische Betrachtung wird üblicherweise verwendet, um Temperatur und (elastisch) Spannungen sowohl im Werkzeug als auch im Werkstück zu identifizieren. Das plastische Verhalten und der Materialabtrag werden in der Regel nicht berücksichtigt.

3 Ziele der Forschung

Das Ziel dieses Projektes ist ein FE-Modell zu entwickeln, das es ermöglicht, verschiedene Parameter des Polierprozesses zu optimieren, ohne viel Experimente durchführen zu müssen. Dies soll dabei helfen, den besten Satz von Parametern für jede Anwendung und jedes Material vor der tatsächlichen Bearbeitung zu bestimmen.

Der aktuelle Polierprozess besteht aus 8 bis 14 verschiedenen Parametern, je nach Art des Poliermittels und der Werkzeugmaterialien. Die folgende Abbildung 1 zeigt, wie das Werkzeug auf der Oberfläche bewegt wird. Das Werkzeug wird an einem neu konstruierten Polierkopf befestigt, welcher von einem Industrieroboter bewegt wird. Das Bild zeigt, dass das Werkzeug einige Grad verkippt wird, um eine höhere relative Geschwindigkeit im Kontaktbereich zu erzielen. Der Durchmesser des Werkzeugs liegt bei ca. 30 mm und die Länge des Verfahrenswegs ist 15 mm bei den ersten Tests. Die große Anzahl an variablen Parametern mit jeweils unzähligen Möglichkeiten macht es sehr schwierig, den besten Parametersatz schnell zu finden. Mit Hilfe einer DOE Software wurden verschiedene Parameter, wie z.B. Drehzahl der Spindel, Vorschub der Roboterbewegung, Abstand zwischen den Werkzeugbahnen usw. untersucht und der Parametersatz mit dem höchsten Materialabtrag wurde gewählt, um das FE-Modell zu testen.

Erste Versuche sind auf gehärteten Stahlproben durchgeführt worden, jedoch ist die Abtragsleistung auf gehärtetem Stahl sehr niedrig. Um den Test zu beschleunigen wurde ein anderes Material, nämlich Kupfer verwendet. Kupfer wird parallel im Labor für andere Versuche verwendet. Für poliertes Kupfer existieren eine Menge an interessanten Anwendungen z.B. Kupfer-Spiegel in CO₂-Lasern.

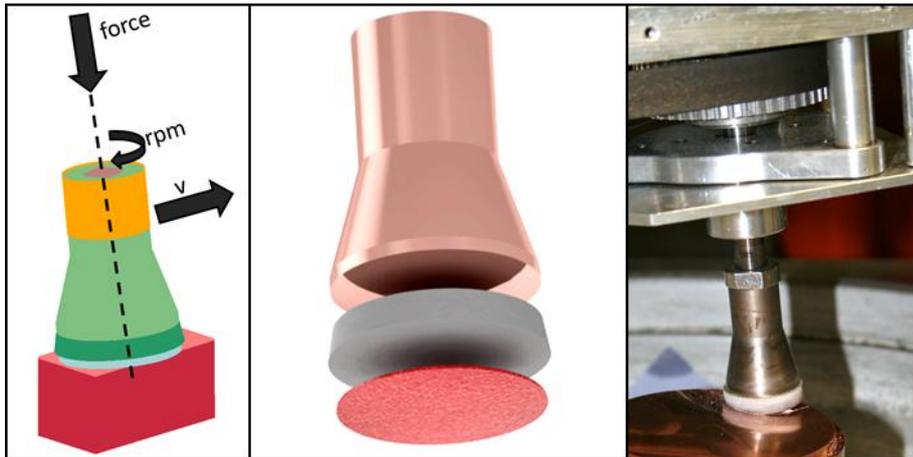


Fig. 1: Polierwerkzeug; links: schematische Skizze mit 3 Prozessparametern; mitte: verschiedene Werkzeugschichten, Schaft, flexible Zwischenschicht und harte Werkzeugschicht; rechts: Polierprozess auf einer Kupferprobe

3.1 Prozessentwicklung

Viele verschiedene Werkzeugmaterialien, Prozessparameter, Poliermittel und Verfahrenswege wurden untersucht. Das Zentrum für Optische Technologien der Hochschule Aalen verwendet eine proprietäre Software namens Zaphod um die Roboter-Programme für die verschiedenen Versuche zu erzeugen. Diese Software ermöglicht es dem Bediener Parameter wie Vorschub, Drehzahl, Anpressdruck usw. leicht zu ändern. Der Roboterfahrweg wird auch in der gleichen Software generiert; Parameter wie Wegstrecke, Bahnabstände, andere Werkzeugverfahrenswege (Mäander, Spirale, Hilbert Kurve etc.) können für jedes Experiment angepasst werden. Die gewählte Werkzeugbahn wird dann auf die vordefinierte Form des Werkstückes transformiert und nach der Eingabe der Roboterdaten wie Werkzeugmittelpunkt und Werkstückausrichtung erzeugt die Software das Roboter-Programm [8]. Die durchgeführten Experimente lieferten hervorragende Ergebnisse hinsichtlich Oberflächenrauheit. Abhängig vom Anfangszustand des Werkstücks waren verschiedene Prozessschritte nötig um die erforderliche Oberflächenrauheit zu erzielen. Beginnend mit harten Werkzeugen und grobem Poliermittel werden die Prozessschritte von Schritt zu Schritt feiner. Nach der letzten Feinpolitur liegt die Oberflächenrauheit normalerweise zwischen 4 und 8 nm rms [9]. Diese Werte werden mit einem Weißlicht-Interferometer gemessen und beziehen sich auf ein Messfeld von 4,94 x 3,70 mm. Aber diese feinen Prozesse sind nicht in der Lage, Strukturen auf der Oberfläche die von früheren Bearbeitungen wie Fräsen, Drehen oder Schleifen kommen, zu entfernen. Um diese Strukturen zu entfernen, ist es notwendig, einen ersten Prozessschritt mit einem hohen Materialabtrag zu haben. Die Form wird vor dem ersten Läppverfahren mit einer taktilen Koordinatenmessmaschine vermessen. Die Ergebnisse dieser Messung können verwendet werden um das Roboter-Programm für den ersten Läppvorgang zu erzeugen. Dieses Programm kann die Form korrigieren indem in Bereichen mit positiver Abweichung von der Soll-Form mehr Material entfernt wird. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse einer gemessenen Stahlform von der die Soll-Form abgezogen wurde. Durch das Abziehen der Soll-Form in Zaphod bleiben die Formfehler. Diese Fehler können verwendet werden, um das Roboter-Programm für den Korrekturprozess zu erzeugen. In diesem Fall müssen ca. 20 µm in verschiedenen Bereichen entfernt werden, so dass ein Prozess mit einem hohen Materialabtrag unbedingt erforderlich ist.

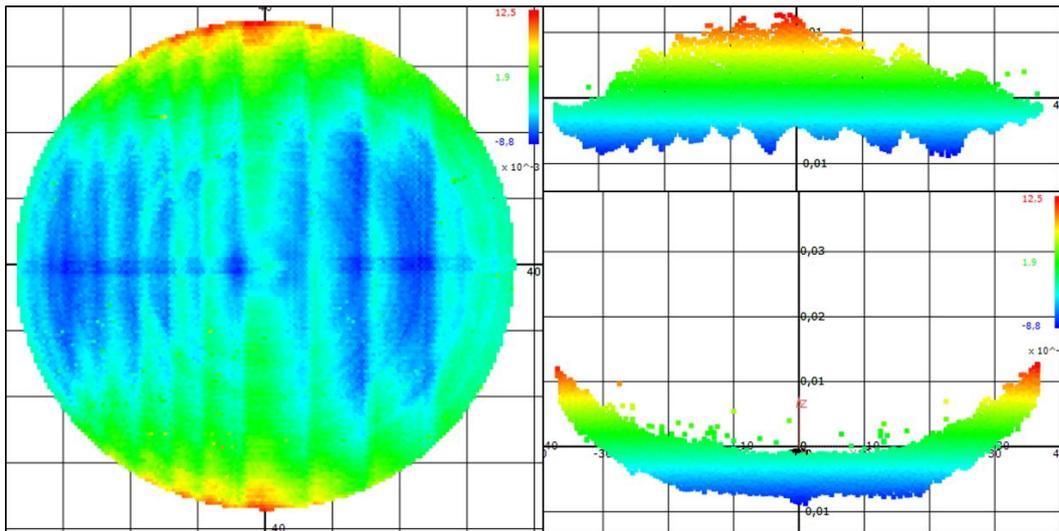


Fig. 2: Formfehler auf einer sphärischen Form (\varnothing 70 mm), gemessen auf einer taktilen Koordinatenmessmaschine (links: XY Ansicht; oben rechts: XZ Ansicht; unten rechts: YZ Ansicht)

3.2 Finite Element Modelle

Für erste Betrachtungen zu der Finite-Elemente-Analyse wird ein einfaches Finite-Elemente-Modell verwendet. Dieses einfache Modell soll zeigen ob erste Aussagen über Belastungen des Werkzeugs und die resultierenden Oberflächenqualität gemacht werden können. Das Netz in der Werkzeugschicht wird mit kleineren Elementen erzeugt um die Qualität und die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

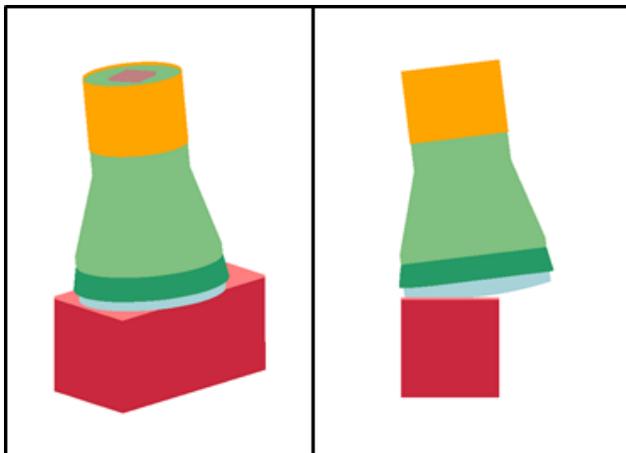


Fig. 3: Finite Element Modell des Polierprozesses; verschiedene Werkzeugmaterialien werden in unterschiedlichen Farben dargestellt

Um das Polieren zu simulieren wird das explizite FE-Programm LS-DYNA verwendet. Materialeigenschaften der unterschiedlichen Werkzeugteile wurden in Druckversuchen ermittelt und in ein passendes Materialmodell eingesetzt. Das Werkstück wird mit den elastisch-plastischen Eigenschaften des verwendeten Kupfermaterials modelliert.

4 Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Versuch

Erste Ergebnisse zeigen eine deutliche Analogie der Verformung bzw. des Materialabtrags in Simulation und Experiment. Die beiden folgenden Abbildungen (Abb. 4 und Abb. 5) zeigen die Ergebnisse des Materialabtrags von FE-Simulation und Experiment.

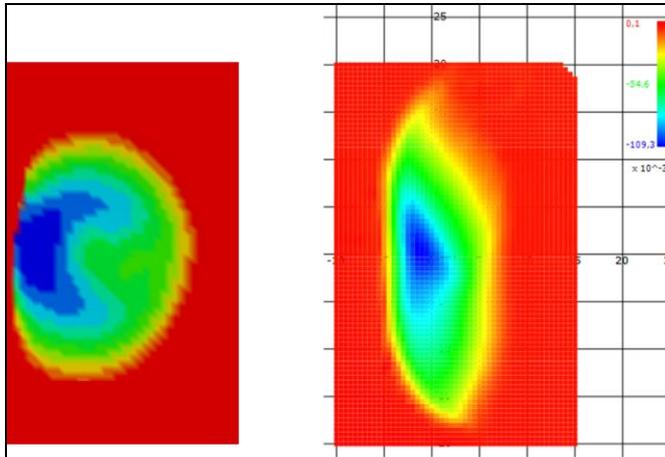


Fig. 4: Materialabtrag in XY Ansicht, links: FE Simulation; rechts: taktile Messung

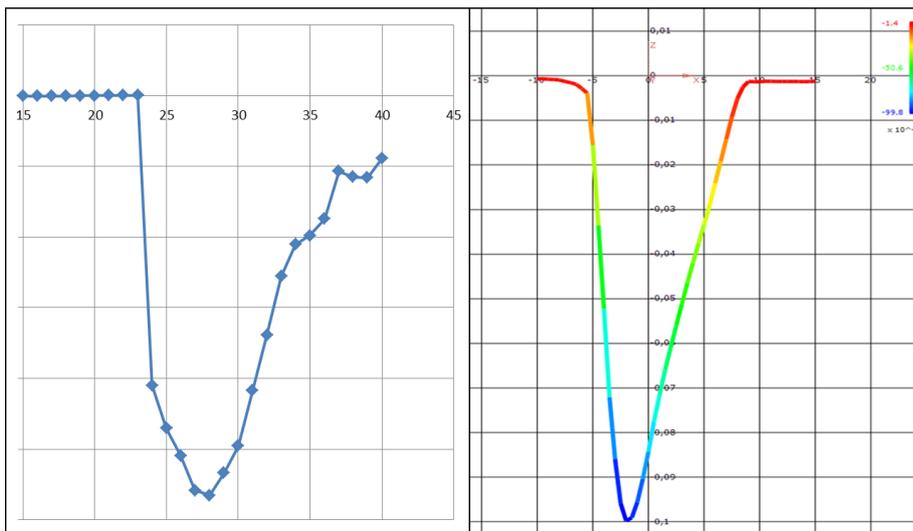


Fig. 5: Materialabtrag in Schnittansicht, links: FE Simulation; rechts: taktile Messung

In Abbildung 4 ist ersichtlich, dass der Bereich des entfernten Materials zwischen Simulation und Versuch Unterschiede aufweist. Aber der Schnitt in Abbildung 5 zeigt eine gute Korrelation zwischen der Simulation und dem Experiment.

Dieses Verhalten liegt vermutlich an den verschiedenen Arten von Prozessen in Simulation und Experiment. Die Simulation verwendet Reibung um das Poliermittel zu simulieren und das Experiment arbeitet mit einem realen Poliermittel. Das heißt, in Wirklichkeit gibt es eine Flüssigkeit mit kleinen abrasiven Teilchen direkt in der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück und der Materialabtrag entsteht durch die Bewegung der Schleifeteilchen auf der Oberfläche. Der nächste Schritt ist, die auftretende Reibung in Abhängigkeit des verwendeten Poliermittels exakt zu messen um das FE-Modell zu verbessern.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Erste Ergebnisse aus der FE-Simulation zeigen gute Korrelationen zu den Ergebnissen der Experimente, trotz kleiner Abweichungen. Das Verformungsverhalten des Finite-Elemente-Modells stimmt mit dem realen Werkstück überein. Auf der Grundlage dieser ersten Tests müssen mehr Simulationen durchgeführt werden um den Einfluss verschiedener Prozessparameter zu untersuchen. Ferner ist zu prüfen, ob eine feinere Verteilung der Finite-Elemente eine Simulation der plastischen Verformung ermöglicht oder evtl. sogar das Entfernen von Elementen. Wenn dies nicht möglich ist wäre es interessant, es mit einer molekül-dynamische Analyse zu testen.

6 Literatur

- [1] Hering, E. and Martin, R., Fertigung optischer Komponenten und Systeme (Manufacturing of optical components and systems), in Photonik - Grundlagen, Technologie und Anwendung (Photonics - Basics, technology and application), 2005, Springer: Berlin. 105-128.
- [2] Börret, R., Kelm, A., Thiess, H., and Giggel, V., ASPHERO5 – Simulation and Analysis of Aspherical Polishing Process. Key Engineering Materials, 2008. 364-366: 488-492.
- [3] Brecher, C., Tuecks, R., Zunke, R., and Wenzel, C., Development of a force controlled orbital polishing head for free form surface finishing. Production Engineering, 2010. 4(2-3): 269-277.
- [4] Ulf Steinberg, Falk Liebers, and Klußmann, A., Manuelle Arbeit ohne Schaden, 2011, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. p. 24.
- [5] Limido, J., Espinosa, C., Salaün, M., and Lacome, J.L., SPH method applied to high speed cutting modelling. International Journal of Mechanical Sciences, 2007. 49(7): 898-908.
- [6] Kim, D.W., Park, W.H., Kim, S.-W., and Burge, J.H., Parametric modeling of edge effects for polishing tool influence functions. Optics Express, 2009. 17(7): 5656.
- [7] Würz, E. and Biermann, D. Schleifen von Keramik-Hartmetall-Verbunden – Prozess und Simulation. in 8. Seminar "Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung".
- [8] Mazal, J., Börret, R., Krenz, M., and Speich, M. Robot assisted fluid jet polishing of advanced materials. in 12th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology. Stockholm, Sweden: euspen.
- [9] Speich, M., Bååth, L., Börret, R., Harrison, D.K., and Rosén, B.-G. Robot assisted steel polishing and surface characterisation. in 12th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology. Stockholm, Sweden: euspen.