

Parameterfindung für die Stempelherstellung von komplexen Geometrien mit Nanoimprint Lithographie

Christos J. Karapatzakis*, Selina Burkert*, Cordelia F. Wittemann*, Andreas Heinrich*

*Aalen School of Applied Photonics, Hochschule Aalen

mailto:Christos.Karapatzakis@hs-aalen.de

Diese Arbeit untersucht die kritischen Parameter für die Stempelherstellung komplexer Geometrien mittels Nanoimprint Lithographie (NIL). Im Fokus stehen die experimentelle Analyse von Einflussfaktoren wie Stempelgeometrie, Skalierung und Elastizität sowie ergänzende FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Methode) zur Spannungsverteilung.

1 Einleitung

Nanoimprint Lithographie (NIL) [1] ist ein Stempel-Replikationsverfahren zur kostengünstigen und hochauflösenden Replikation von Nano- und Mikrostrukturen. Typische Anwendungen in der Optik sind die Herstellung von Mikro-Linsen-Arrays und diffraktiven optischen Gittern. [1, 2] Die Qualität der abgeformten Strukturen hängt maßgeblich von der Qualität des verwendeten Stempels ab. Bei komplexen Geometrien mit Hinterschnitten treten jedoch Herausforderungen hinsichtlich der Formtreue und der mechanischen Stabilität des Stempels während des Abformprozesses auf. Diese Arbeit zielt darauf ab, die entscheidenden Parameter für die Herstellung solcher Stempel zu identifizieren und deren Einfluss auf die Prozessstabilität zu quantifizieren.

2 Methodik

Der Herstellungsprozess umfasst drei Hauptschritte. Die Master-Strukturen werden mittels 2-Photonen-Polymerisation (2PP) gedruckt und nachgehärtet. Anschließend werden die Master-Strukturen mit NIL abgeformt. Zur Nachbereitung werden die Stempelstrukturen mit UV-Licht nachgehärtet.

Dieser Prozess wurde wiederholt für verschiedene Geometrien und Materialeinflussfaktoren (Abb. 1). Die Untersuchung konzentrierte sich auf folgende Parameter, welche die Formtreue und die mechanische Stabilität während des Abformprozesses beeinflussen:

- Stempel Geometrie: Strukturgeometrien mit unterschiedlichen Überhängen.
- c) Extrusion und Skalierung: Strukturen wurden sowohl rotationssymmetrisch als auch längs extrudiert und skaliert für Strukturhöhen von $50 \mu\text{m}$ bis $150 \mu\text{m}$.
- Stempel-Elastizität: Das E-Modul des Stempelmaterials variiert von $10 - 2850 \text{ MPa}$.
- Stabilität des Masters: Der Master wurde sowohl in solid als auch hohl mit einem Füllmus-

ter gedruckt und anschließend ausgehärtet.

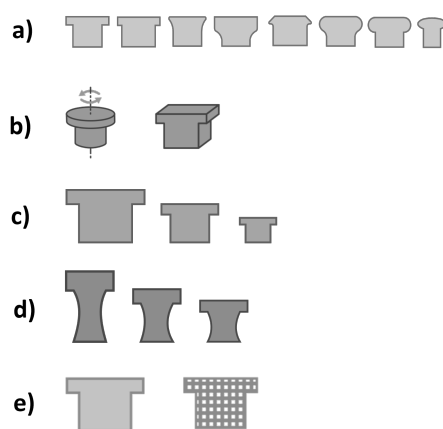


Abbildung 1 Geometrie und Material-Einflussfaktoren

Die Master- und Stempelstrukturen wurden jeweils vor und nach dem Abformen mit einem Weißlichtinterferometer (WLI) gemessen, um die Strukturhöhe und Strukturbreite nach dem Abformen zu bewerten. Es wurden drei relevante Fehlerfälle identifiziert (Abb. 2). Abweichungen, welche mehr als 10% von der Ursprungsgröße abweichen, wurden als Defekt gezählt. Fall 1, sowohl Master als auch Stempel sind nach dem Abformen intakt (Abb. 2a). Fall 2, die Stempelbreite weist Defekte auf (Abb. 2b). Fall 3, der Master weist Defekte auf, die Stempelbreite ist jedoch intakt (Abb. 2c). Alle sonstigen Kombinationen von Defekten werden nicht gewertet (Abb. 2d).

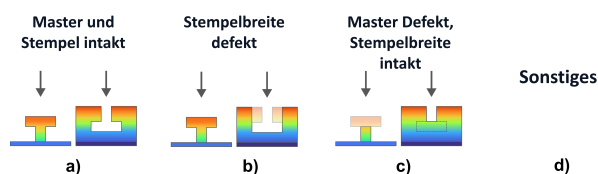


Abbildung 2 Auswahlkriterien für die Messungen vor und nach dem Abformen

3 Experimente

Die Ergebnisse (Abb. 3) zeigen für alle Strukturgeometrien einen hohen Anteil von Fall 2 auf,

was auf ein Abreißen der Stempelüberhänge während des Abformprozesses hindeutet. Fall 1, bei dem sowohl Master als auch Stempel nach dem Abformen intakt sind, tritt am häufigsten für die eingerahmte Strukturgeometrie in Abb. 3 auf. Diese Geometrie besitzt einen Kerbradius. Um den Einfluss des Kerbradius auf die Formtreue zu untersuchen, wurden T-Strukturen mit sich änderndem Kerbradius für ein elastisches und ein steifes Stempelmateriale getestet (Abb. 4).

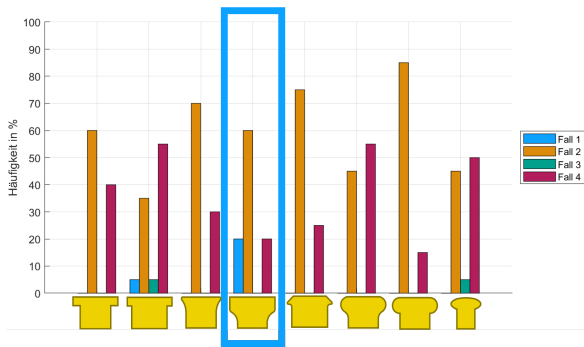


Abbildung 3 Ergebnisse der Abformungen für alle benutzte Geometrie und Material Einflussfaktoren. Jede Strukturgeometrie wurde 60-mal gedruckt.

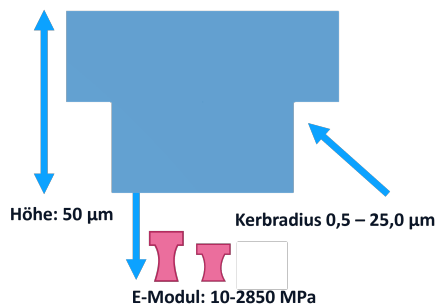


Abbildung 4 Einfluss des Kerbradius und des Materials auf die Spannungsverteilung

Draufsicht-Messungen des elastischen und steifen Stempels, für einen kleinen Kerbradius, nach dem Abformen zeigen Defekte in den Ecken des steifen Stempels (Abb. 5). Ursache dafür können hohe Spannungskonzentrationen innerhalb des Stempels beim Abformprozess sein, da dieser nicht ausreichend nachgeben kann.

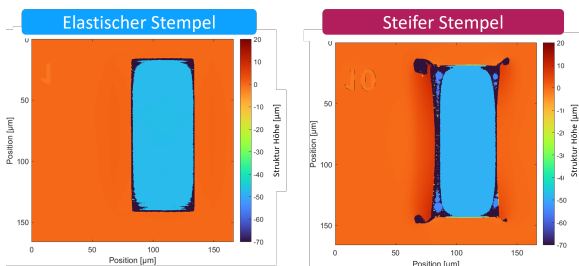


Abbildung 5 Draufsicht-Messungen für einen Elastischen und Steifen Stempel nach der Replikation für Hinterschnitt kleinem Kerbradius

4 Simulation

Zur Analyse der mechanischen Belastungen wird eine 3D-Simulation mittels COMSOL Multiphysics durchgeführt. Für die Modellierung wird ein nicht-lineares Neo-Hook'sches Materialmodell verwendet. Ein Parameter-Sweep für den Kerbradius ($0.5 - 25.0 \mu\text{m}$) und das E-Modul ($10 - 2850 \text{ MPa}$) wird anschließend durchgeführt. Die Simulation dient zur Analyse der Spannungsverteilung während des Abformprozesses im Stempel, um kritische Belastungsbereiche zu identifizieren. Die Simulationsergebnisse (Abb. 6) korrelieren mit den experimentellen Beobachtungen. Ein zentrales Ergebnis ist der Vergleich zwischen steifen und elastischen Stempeln:

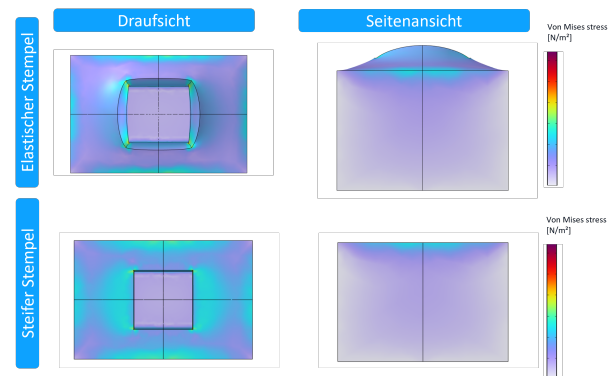


Abbildung 6 Vergleich der simulierten Stempel-Elastizität für einen elastischen und einen steifen Stempel.

5 Fazit

Aus experimentellen Untersuchungen und FEM-Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Stempel-Elastizität ein entscheidender Parameter für die Herstellung komplexer Geometrien mit Hinterschnitten ist. Elastische Stempelmateriale verbessern die Formtreue und minimieren Defekte, indem sie ein Nachgeben während des Abformprozesses ermöglichen.

6 Danksagung

Dieses Projekt wurde unterstützt durch das DFG Projekt NanoADD (FKZ INST 52/20-1)

Literatur

- [1] S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, "Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers," *Applied Physics Letters* **67**(21), 3114–3116 (1995). URL <https://doi.org/10.1063/1.114851>.
- [2] L. J. Guo, "Recent progress in nanoimprint technology and its applications," *Journal of Physics D: Applied Physics* **37**(11), R123 (2004). URL <https://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/37/11/R01>.