

Christian Mehne



# Großformatige Abformung mikrostrukturierter Formeinsätze durch Heißprägen



universitätsverlag karlsruhe



Christian Mehne

**Großformatige Abformung mikrostrukturierter  
Formeinsätze durch Heißprägen**



# **Großformatige Abformung mikrostrukturierter Formeinsätze durch Heißprägen**

von  
Christian Mehne



---

universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)  
Fakultät für Maschinenbau, 2007

## Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe  
c/o Universitätsbibliothek  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz  
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2007  
Print on Demand

ISBN: 978-3-86644-185-9





# **Großformatige Abformung mikrostrukturierter Formeinsätze durch Heißprägen**

Zur Erlangung des akademischen Grads eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

von der Fakultät für Maschinenbau der  
Universität Karlsruhe (TH)  
genehmigte

**Dissertation**

von  
Dipl.-Ing. Christian Mehne  
aus Villingen-Schwenningen

Tag der mündlichen Prüfung: 23.07.2007

Hauptreferent: Prof. Dr. Volker Saile  
Korreferent: Prof. Dr. Heinz Kück



Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Mikrostrukturtechnik des Forschungszentrums Karlsruhe. Mein besonderer Dank gilt daher Herrn Prof. Saile für die Betreuung der Arbeit und die Übernahme des Hauptreferats. Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts die zu der Arbeit beigetragen haben bedanken, insbesondere bei M. Hecke, M. Guttmann, M. Worgull und H. Biedermann.

Herrn Prof. Kück vom HSG-IMAT möchte ich herzlich für die Übernahme des Korreferats und für die Fertigung der in dieser Arbeit verwendeten Stahlformeinsätze am HSG-IMAT danken.

Christian Mehne

# Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Heißprägeverfahren für große Formate und Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen weiter entwickelt, sowie Möglichkeiten zur Herstellung großformatiger Formeinsätze und Erzeugung durchgehender Öffnungen in mikrostrukturierten Kunststoffbauteilen gefunden.

Für die Weiterentwicklung des Heißprägeverfahrens wurde der Heißprägeprozess für eine neu aufgebaute Anlage beschrieben und analysiert. Diese Anlage ermöglicht mit dem dazugehörigen Basiswerkzeug Abformungen mit einem Durchmesser von bis zu 250 mm. Mit diesem Werkzeug wurden grundlegende Messungen zur Druckverteilung in der Polymerschmelze durchgeführt. Anhand dieser Messungen können zukünftig Maschinensteuerungen, Heißprägewerkzeuge für große Formate und Formeinsätze besser ausgelegt werden.

Im nächsten Themenkomplex wurden zwei Lösungsansätze zur Herstellung großformatiger Formeinsätze ausgearbeitet. Der erste Lösungsansatz beruht auf modular aufgebauten Formeinsätzen, der zweite Ansatz beruht auf galvanisch erzeugten Formeinsätzen. Für modular aufgebaute Formeinsätze wurden drei Konzepte entwickelt, die von einer einfachen Vorrichtung zur Aufspannung mehrerer Formeinsätze in einem Heißprägewerkzeug über eine Vorrichtung zur Halterung von Shim-Formeinsätzen bis hin zu einem großformatigen, aus mehreren Komponenten zusammengebauten Formeinsatz reichen. Anhand des aus mehreren Komponenten zusammengebauten Formeinsatzes konnte erstmals nachgewiesen werden, dass solche Formeinsätze im Heißprägeverfahren verwendet werden können. Mit der Entwicklung eines Verfahrens zur galvanischen Kopie

---

abgeformter Kunststoffbauteile wurde eine weitere Möglichkeit zur Herstellung großformatiger Formeinsätze geschaffen. Bei diesem Verfahren wurden mehrere kleinformate, mit einem Urformeinsatz abgeformte Bauteile auf ein großformatiges Substrat aufgeklebt und durch Galvanoformung in eine Metallstruktur kopiert. Diese Metallstruktur kann dann als großformatiger Formeinsatz verwendet werden.

Im dritten Teil der Arbeit wurden zwei Verfahren zur Herstellung durchgehender Öffnungen direkt im Heißprägeverfahren entwickelt. Im ersten Verfahren wurde ein Schichtaufbau aus einer Polymer- und einer Metallfolie als nachgiebige Unterlage anstelle einer massiven Substratplatte verwendet. Die nachgiebige Unterlage ermöglichte dabei die vollständige Verdrängung der Polymerschmelze während des Prägeprozesses. Das zweite neu entwickelte Verfahren beruht auf der Kombination eines vergleichsweise harten Formeinsatzes und einer weicheren Substratplatte. Bei diesem Verfahren dringen Teilbereiche des härteren Formeinsatzes während des Prägevorgangs in die weiche Substratplatte ein, dabei konnten ebenfalls restschichtfreie Bauteile erzeugt werden.

# **Abstract**

## **Large-area Replication of Microstructured Mold Inserts by Hot Embossing**

Work within the framework of the present thesis was dedicated to improving the hot embossing process for large-area mold inserts with high aspect ratios. In addition, new ways of manufacturing large-area mold inserts and creating through-holes in microstructured polymer parts were developed. For the further development of large-area hot embossing, the process using a newly developed hot embossing machine and tool was described and analyzed. The new molding tool allows for the use of mold inserts of up to 250 mm in diameter. With this molding tool, basic measurements and analysis of the pressure distribution in the polymer melt were carried out. The data obtained can be used for the development of future control systems and large-area hot embossing tools as well as for the design of large-area mold inserts.

The next stage of work covered the manufacture of microstructured large-area mold inserts. For this purpose two solution approaches were developed. The first approach uses modular concepts for mold inserts. In the second approach mold inserts are made by electroplating polymeric parts. The simplest concept for modular mold inserts uses a device to fix several mold inserts in a single hot embossing tool. The second concept for modular mold inserts is based on several shim mold inserts clamped in a device which forms the outer dimensions of the molded part. The most sophisticated concept is that of a mold insert assembled of several microstructured parts which form a single large-area mold insert. This

---

assembled mold insert was demonstrated to be suitable for the hot embossing of microstructured polymer parts. The second approach developed consisted of a process to produce mold inserts by electroplating molded polymer structures. To obtain large-area mold inserts, several small microstructured polymer parts were placed and glued onto one substrate plate. By electroplating of nickel the molded parts were copied in a metal structure that could be used as a large-area mold insert.

In the third part of the thesis two processes for manufacturing through-holes directly by hot embossing were developed. In the first process a stack of polymer and metal foils was used as a resilient substrate instead of a solid substrate plate. The resilient substrate allowed to completely displace the polymer melt between the mold insert and the opposing substrate during the hot embossing process. The second process used a combination of a hard mold insert and a softer substrate plate. During embossing partial areas of the harder mold insert protrude into the soft substrate. Through-holes with a diameter of 100  $\mu\text{m}$  were produced without damaging the mold insert.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Kunststoffabformung</b>	<b>7</b>
2.1	Beschreibung des Heißprägeverfahrens . . . . .	7
2.1.1	Stand der Technik und Einordnung des Verfahrens	7
2.1.2	Beschreibung des Heißprägeprozesses . . . . .	10
2.1.3	Kunststoffe für den Heißprägeprozess . . . . .	13
2.2	Beschreibung der Anlagentechnik . . . . .	22
2.2.1	Allgemeine Beschreibung . . . . .	22
2.2.2	Jenoptik HEX03et . . . . .	23
2.2.3	Wickert WMP1000 . . . . .	25
2.3	Konzeption und Aufbau von Werkzeugen für die großformatige Abformung . . . . .	30
2.3.1	Neues Konzept moderner Heißprägewerkzeuge .	30
2.3.2	Heißprägewerkzeuge für die großformatige Abformung . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Prozessparameter für die großformatige Abformung</b>	<b>39</b>
3.1	Beschreibung des Heißprägeprozesses für die großformatige Abformung . . . . .	39
3.2	Analyse der Prozessparameter beim Heißprägen . . . . .	45
3.2.1	Messaufbau zur Messung des Schmelzendrucks .	45
3.2.2	Durchführung der Messreihen . . . . .	46
3.2.3	Analyse der Messdaten und Schlussfolgerungen für den Heißprägeprozess . . . . .	47

<b>4</b>	<b>Herstellungsverfahren für großformatige Formeinsätze</b>	<b>59</b>
4.1	Grundlagen und Stand der Technik . . . . .	59
4.2	Monolithische Formeinsätze . . . . .	61
4.2.1	Mikromechanisch hergestellte Formeinsätze . . .	61
4.2.2	LIGA-Formeinsätze . . . . .	62
4.3	Modular aufgebaute Formeinsätze . . . . .	63
4.3.1	Vorrichtung zur Abformung mehrerer Formeinsätze	64
4.3.2	Vorrichtung zur Abformung von Shim- Formeinsätzen . . . . .	65
4.3.3	Großflächig strukturierter, modular aufgebauter Formeinsatz . . . . .	68
4.4	Galvanisch erzeugte Formeinsätze . . . . .	73
4.4.1	Verfahrensbeschreibung . . . . .	73
4.4.2	Herstellung der Urbauteile . . . . .	77
4.4.3	Anordnung der Bauteile auf einem Galvaniksubstrat	78
4.4.4	Überwachshilfen für die Galvanoformung . . . .	81
4.4.5	Oberflächenmodifikation für die Galvanoformung	85
4.4.6	Galvanoformung des Formeinsatzes . . . . .	87
4.4.7	Endbearbeitung des Formeinsatzes . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Herstellung durchgehender Öffnungen im Heißprägeprozess</b>	<b>91</b>
5.1	Grundlagen und Stand der Technik . . . . .	91
5.2	Abformung auf einen Folienstapel . . . . .	93
5.2.1	Verfahrensbeschreibung . . . . .	93
5.2.2	Musterabformungen . . . . .	96
5.3	Abformung auf weiche Substrate . . . . .	99
5.3.1	Verfahrensbeschreibung . . . . .	99
5.3.2	Musterabformungen . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>109</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>113</b>

**Literaturverzeichnis**

**127**

# 1 Einleitung

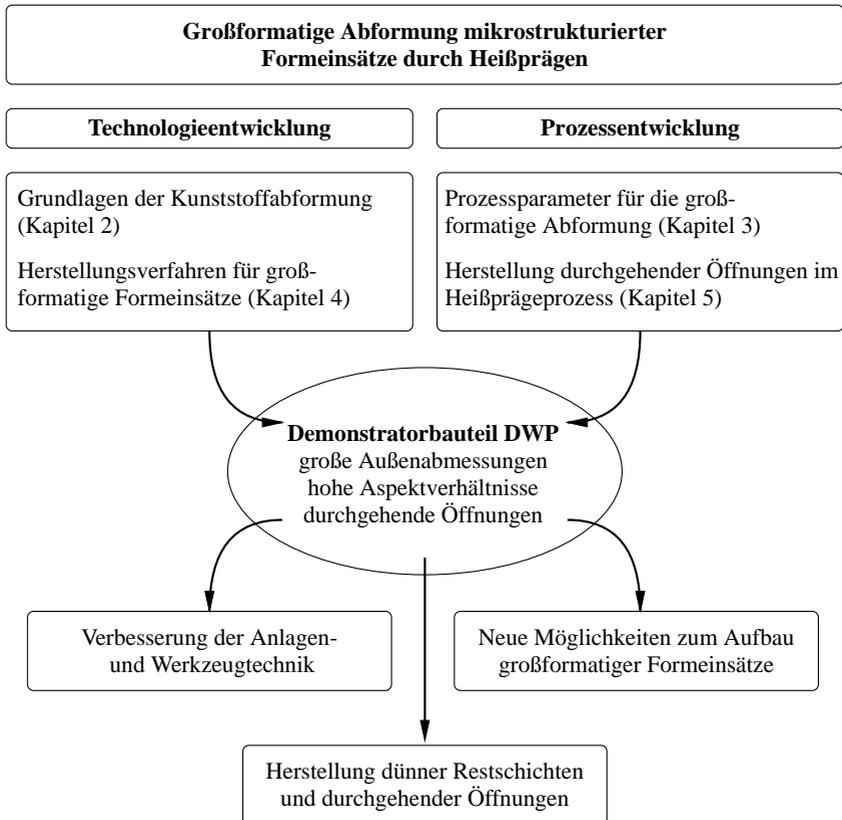
Zur Herstellung von mikrostrukturierten Kunststoffbauteilen mit Außenabmessungen von wenigen Millimetern und Strukturdetails im Bereich einiger Mikrometer existiert eine relativ breite Auswahl an Fertigungsverfahren. So werden optische Datenträger wie DVDs mit Strukturdetails unter einem Mikrometer und ähnlichen Außenabmessungen wie typische heißgeprägte Bauteile in großen Serien mit sehr kurzen Fertigungszeiten im Spritzprägeverfahren hergestellt. Kleinere, echt dreidimensionale Bauteile wie zum Beispiel Linsenhalter für DVD-Leseköpfe können ebenfalls in großen Serien durch Mikrospritzguss hergestellt werden.

Das Heißprägeverfahren als weiteres etabliertes Replikationsverfahren beruht im Gegensatz zum Spritzgießen oder Spritzprägen auf der Umformung eines folien- oder plattenförmigen Halbzeugs. Dabei wird eine Polymerfolie in einem Werkzeug bis in den Schmelzzustand erwärmt und anschließend durch einen weg- und kraftgesteuerten Prägevorgang zwischen einem mikrostrukturierten Formeinsatz und einer Gegenplatte umgeformt. Während der Umformung entsteht eine relativ dünne Trägerschicht (Restschicht), auf der die mikrostrukturierten Bauteile angeordnet sind. Im Bereich der Mikrosystemtechnik werden mit dem Heißprägeverfahren vor allem Funktionsmuster und kleine Serien optischer und fluidischer Bauteile hergestellt. Als Fertigungsverfahren für die industrielle Anwendung wird das Heißprägeverfahren nur in Nischenanwendungen genutzt. Dies sind vor allem optische Bauteile, wie zum Beispiel Prismenfolien oder Fresnellinsen. Solche Fresnellinsen kommen unter anderem bei Tageslichtprojektoren zum Einsatz und haben Außenabmessungen von circa  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  und Strukturdetails unter  $5\text{ }\mu\text{m}$ . Diese Bauteile sind durch die großen Außenabmessungen und die hohen Anforderungen bezüglich

der Abformgenauigkeit schon recht anspruchsvoll in der Herstellung. Im Gegensatz zum Heißprägeverfahren für die Mikrosystemtechnik werden bei der industriellen Anwendung jedoch meist nur Standardkunststoffe wie PVC und technische Kunststoffe wie zum Beispiel PMMA verwendet und auch die erzielbaren Aspektverhältnisse (Verhältnis von Höhe zur Breite einer Struktur) sind vergleichsweise gering. Im Heißprägeverfahren für die Mikrosystemtechnik können derzeit nur Formate mit Außenabmessungen bis maximal 100 mm Durchmesser abgeformt werden, allerdings können mit diesem Fertigungsverfahren ähnlich wie beim Mikrospritzguss fast alle thermoplastischen Kunststoffe (z.B. COC, PC, PSU) strukturiert und hohe Aspektverhältnisse erzielt werden.

Für die Weiterentwicklung des Heißprägeverfahrens hin zu einer breiteren, auch industriellen Anwendbarkeit muss daher die Lücke zwischen den jetzt schon abformbaren Flächen sowie den im Bereich der Forschung und Entwicklung verwendeten Kunststoffen und Strukturabmessungen geschlossen werden. Dazu ist es notwendig, das Heißprägeverfahren in verschiedenen Bereichen weiter zu entwickeln. Zu diesen Bereichen gehören Maschinen- und Werkzeugtechnik, Prozessparameter und Herstellungsverfahren für Formeinsätze. Ausgehend von den am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Grundlagen des Heißprägeverfahrens, wurden in den letzten Jahren Werkzeuge [1] und Heißprägeanlagen [2] speziell für die großformatige Abformung entwickelt.

Ein weiteres Verbesserungspotential des Heißprägeverfahrens liegt in der Herstellung durchgehender Öffnungen (Durchgangslöcher), was bislang aufgrund des plattenförmigen Aufbaus von Heißprägewerkzeugen nicht möglich war. Somit können die notwendigen Nachbearbeitungsschritte für die Öffnung bestimmter Bereiche entfallen und es können auch kleine Öffnungen mit hohen Anforderungen an die Kantenqualität hergestellt werden. Mit der Möglichkeit durchgehende Öffnungen direkt im Prägeprozess herzustellen, ergeben sich weitere Anwendungsfelder für das Heißprägeverfahren wie etwa die Herstellung von mikrofluidischen Strukturen zur Dosierung von Flüssigkeiten oder für Analysesysteme.



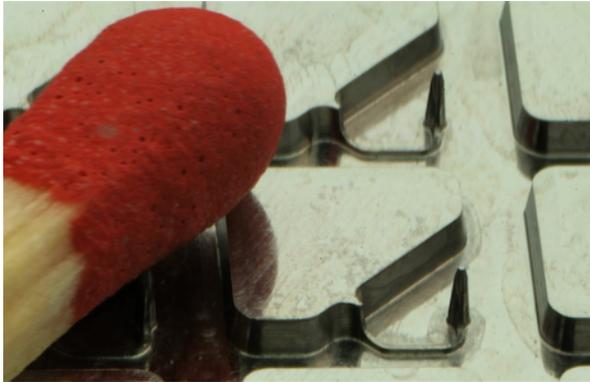
**Abbildung 1.1:** Schematischer Aufbau der vorliegenden Arbeit.

Aufgabe und Ziel dieser Arbeit war es, die notwendigen Prozessparameter und Fertigungsverfahren für das großformatige Heißprägen zu entwickeln. Dazu gehörten die Analyse der Möglichkeiten der neuen Heißpräganlage Wickert WMP 1000 und der für diese Anlage vorhandenen Werkzeuge. Weiterhin wurden verschiedene Möglichkeiten zur Fertigung großformatiger Formeinsätze und zur Herstellung durchgehender Öffnungen entwickelt. Die Arbeit war somit in eine Prozess- und eine Technologieentwicklung untergeteilt. Der schematische Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

Als Demonstratorbauteil wurde in der gesamten Arbeit die Struktur einer so genannten Dispensing Well Plate (DWP™) verwendet (Abbildung 1.2). Diese Struktur zur Dosierung kleiner Flüssigkeitsmengen wurde am Institut für Mikrosystemtechnik der Universität Freiburg entwickelt [3, 4]. Eine DWP besteht aus 384 Einzelstrukturen mit jeweils einer durchgehenden Öffnung, die auf einem Bauteil mit Außenabmessungen von circa 86 mm × 128 mm angeordnet sind. Die DWP ist hinsichtlich der Prozessparameter zur Abformung der durchgehenden Öffnungen und der Herstellung des dafür notwendigen Formeinsatzes ein sehr anspruchsvolles Bauteil und somit ein geeigneter Demonstrator für das Ziel dieser Arbeit.

Die Arbeit ist in die folgenden Hauptkapitel gegliedert:

**Kapitel 2:** Hier werden die Grundlagen des Heißprägeprozesses, insbesondere hinsichtlich der großen Prägeflächen, vorgestellt. Dazu wird der Prozess kurz beschrieben und die theoretischen Grundlagen erläutert. Anschließend werden die neu entwickelte und im Rahmen dieser Arbeit in Betrieb genommene Heißpräganlage WMP 1000 und die dazugehörigen Werkzeuge für die großformatige Abformung vorgestellt. Am Ende des Kapitels wird ein Werkzeugkonzept für die industrielle Anwendung vorgestellt.



**Abbildung 1.2:** Ausschnitt eines in dieser Arbeit verwendeten DWP-Formeinsatzes.

**Kapitel 3:** In diesem Kapitel wird der eigentliche Heißprägeprozess auf der neuen Anlage WMP 1000 und dem dazugehörigen Heißprägewerkzeug im Detail beschrieben. Weiterhin wird der Heißprägeprozess basierend auf Druckmessungen in der Polymerschmelze analysiert und der Einfluss der Prozessparameter auf die Qualität der abgeformten Bauteile erläutert.

**Kapitel 4:** In diesem Kapitel werden die gängigsten Verfahren für die Fertigung mikrostrukturierter Formeinsätze zur Verwendung im Heißprägeprozess vorgestellt. Daran anschließend werden Konzepte für großformatige Formeinsätze, die aus mehreren Bauteilen aufgebaut sind, erläutert. Im letzten Unterkapitel wird ein Prozess zur Herstellung großformatiger Formeinsätze durch Rekombination polymerer Bauteile und nachfolgender Galvanoformung beschrieben.

**Kapitel 5:** Hier werden zwei Ansätze und Verfahren zur Herstellung von durchgehenden Öffnungen direkt im Heißprägeprozess vorgestellt. Der erste Ansatz ermöglicht dabei die Herstellung durchgehender

Öffnungen mit nahezu beliebigen Formeinsätzen, für den zweiten Ansatz müssen Formeinsatz und Substrat eine unterschiedliche Härte aufweisen.

# 2 Grundlagen der Kunststoffabformung

## 2.1 Beschreibung des Heißprägeverfahrens

In den folgenden Abschnitten wird das Heißprägeverfahren mit den am häufigsten verwendeten Verfahren zur Herstellung von Kunststoffmikrostrukturen verglichen und eingeordnet. Daran anschließend folgt eine genauere Verfahrensbeschreibung und eine Beschreibung der Fließverhältnisse in der Polymerschmelze während des Prägeprozesses.

### 2.1.1 Stand der Technik und Einordnung des Verfahrens

Das Heißprägeverfahren wurde in den 1970er Jahren erstmals zu Herstellung von Hologrammen genutzt [5, 6], unabhängig davon wurde das Verfahren am Forschungszentrum Karlsruhe im Rahmen des LIGA-Prozesses in den 1990er Jahren entwickelt [7]. Heute ist das Heißprägeverfahren ein im Labormaßstab weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung von mikrostrukturierten Bauteilen aus Polymeren, industriell werden solche Bauteile meistens durch Spritzgießen oder Spritzprägen hergestellt. Jedes dieser Verfahren hat prozessbedingte Vor- und Nachteile, die bei der Wahl des geeigneten Herstellungsprozesses abgewogen werden müssen.

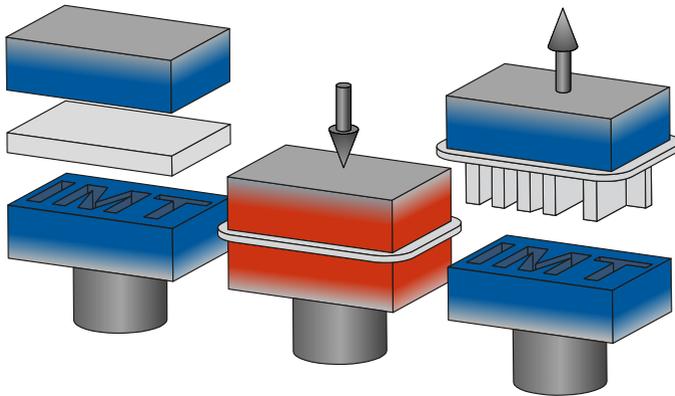
**Spritzgießen:** Beim Spritzgießen wird aufgeschmolzenes Kunststoffgranulat unter hohem Druck in ein vollständig geschlossenes, bei mikrostrukturierten Bauteilen in der Regel evakuiertes Werkzeug eingespritzt. Es ist das in der industriellen Anwendung am häufigsten verwendete Verfahren und zeichnet sich durch kurze Zykluszeiten

und einen hohen Grad an Automatisierung aus. Durch die Formfüllung von einem oder wenigen Angusspunkten aus und somit verhältnismäßig langen Fließwegen haben spritzgegossene Bauteile jedoch innere Spannungen, die zum Beispiel bei optischen Komponenten störend sein können. Weiterhin ist bei Mikrobauteilen das Volumen des Angussbereichs teilweise deutlich größer als das des Bauteils selbst, was die Wirtschaftlichkeit des Prozesses einschränkt. Daher wurden in letzter Zeit Verfahren und Anlagen zur Verringerung des Angussvolumens entwickelt [8].

Zur Herstellung von Bauteilen mit sehr kleinen Strukturdetails oder sehr dünnen Wandstärken muss zur vollständigen Formfüllung die Form während des Spritzvorgangs zum Teil über die Glasübergangstemperatur des Kunststoffs erwärmt und zur Entformung wieder abgekühlt werden. Dieser variotherme Zyklus dauert in der Regel etwas länger als ein herkömmlicher Spritzgussprozess [9].

**Spritzprägen:** Während des Spritzprägeprozesses wird aufgeschmolzenes Kunststoffgranulat in ein teilweise geöffnetes Werkzeug eingespritzt, die vollständige Formfüllung erfolgt anschließend durch eine Schließbewegung des Werkzeugs. Durch die kurzen Fließwege und damit einer geringen Scherbeanspruchung der Kunststoffschmelze sind die hergestellten Bauteile sehr spannungsarm. Durch die Schließbewegung des Werkzeugs können auch sehr dünne Bauteile hergestellt werden. Typische im Spritzprägeverfahren hergestellte Bauteile sind zum Beispiel optische Datenträger und Kunststofflinsen [10]. Bei nicht beheizten Formen sind die im Spritzprägeverfahren erzielbaren Strukturdetails bei Aspektverhältnissen  $> 1$  (Verhältnis der charakteristischen lateralen Abmessungen der Struktur zur Strukturhöhe) begrenzt.

**Heißprägen:** Im Heißprägeverfahren werden zumeist folienartige Halbzeuge in ein geöffnetes Werkzeug eingelegt und erst durch Aufheizen des nahezu geschlossenen Werkzeugs aufgeschmolzen. Die



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung des Heißprägeprozesses. Hauptmerkmale des Prozesses sind die Verwendung von folienartigen Halbzeugen, das Aufschmelzen der Folie durch Aufheizen des Werkzeugs und das Entformen der Bauteile durch die Öffnungsbewegung des Werkzeugs.

Polymerschmelze wird dann durch eine weitere Schließbewegung in das Formwerkzeug gepresst. Mit diesem Verfahren können sehr hohe Aspektverhältnisse und kleinste Strukturdetails bis in den Nanometerbereich abgeformt werden. Weiterhin eignet sich das Verfahren aufgrund der Verwendung von Polymerfolien als Ausgangsmaterial besonders für großflächige und sehr dünne Bauteile.

Neben diesen drei Verfahren gibt es noch weniger häufig angewandte Verfahren wie das Mikrothermoformen und das Reaktionsgießen. Beim Mikrothermoformen werden dünne Polymerfolien mit Hilfe von Druckgas bei erhöhter Temperatur in einen Formeinsatz verstreckt und somit dreidimensionale Folienstrukturen zum Beispiel für mikrofluidische Bauteile hergestellt [11]. Beim Reaktionsgießen werden thermisch- oder UV-härtbare Monomere verwendet, die bei relativ geringen Drücken in eine

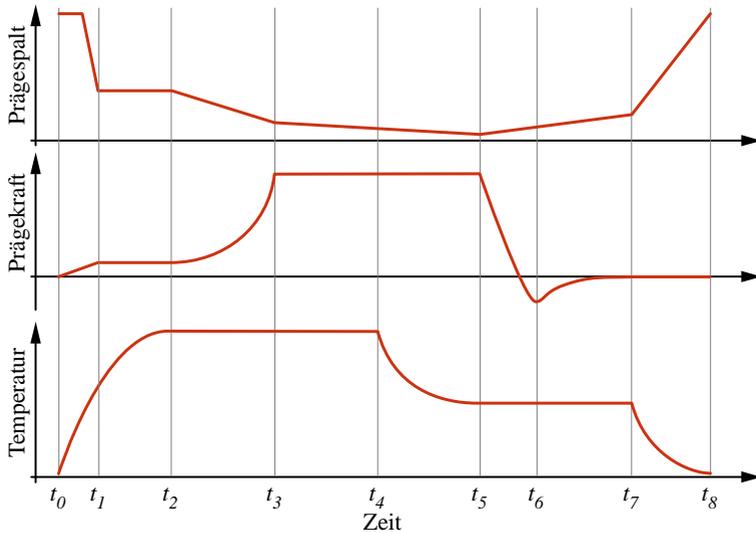
Form gepresst und anschließend ausgehärtet werden. Durch die Aushärtung der Formmasse nach der Strukturierung ist die Materialpalette beim Reaktionsgießen im Gegensatz zu den meisten anderen hier genannten Verfahren nicht auf thermoplastische Polymere beschränkt [12].

Der Hauptunterschied des Heißprägeverfahrens im Vergleich zum Spritzgießen beziehungsweise zum Spritzprägen liegt in der Verwendung folienartiger Halbzeuge und dem Aufschmelzen dieser Folien im Werkzeug. Sowohl beim Spritzgießen als auch beim Spritzprägen wird Kunststoffgranulat in einer Plastifiziereinheit aufgeschmolzen und anschließend in das Werkzeug eingespritzt. Durch diese Trennung zwischen der Formgebung und dem Aufschmelzen des Kunststoffs können mit diesen Verfahren kurze Zykluszeiten erreicht werden. Nachteilig ist jedoch, dass durch das rasche Abkühlen und Verfestigen der Schmelze in der Form die erzielbaren Strukturdetails und Aspektverhältnisse begrenzt sind. Beim Heißprägen hingegen wird das Polymer durch das beheizte Werkzeug aufgeschmolzen, so dass die Schmelze auch die kleinsten Details des Formeinsatzes ausfüllen kann. Nach der Formfüllung muss das Werkzeug zur Entformung des Bauteils abgekühlt werden, woraus sich auch die langen Prozesszeiten ergeben. Ein Vorteil bei der Verwendung von Folien als Ausgangsmaterial ist die große Flexibilität. So ist es im Heißprägeprozess mit geringem Aufwand möglich, jede einzelne Abformung mit einem anderen Kunststoff durchzuführen.

### 2.1.2 Beschreibung des Heißprägeprozesses

Der Heißprägeprozess lässt sich in vier grundlegende Einzelschritte aufteilen. Diese Einzelschritte sind in Abbildung 2.2 schematisch anhand des zeitlichen Verlaufs der Temperatur, der Prägekraft und des Prägespaltes dargestellt. Die Prozessschritte gliedern sich wie folgt:

1. Aufheizen des Halbzeugs auf Umformtemperatur ( $t_0 \rightarrow t_2$ ).
2. Umformen des Halbzeugs (weg- und kraftgesteuert,  $t_2 \rightarrow t_4$ ).



**Abbildung 2.2:** Verlauf von Temperatur, Prägekraft und Prägespalt über der Zeit während eines Heißprägezyklus.

3. Abkühlen auf Entformtemperatur ( $t_4 \rightarrow t_5$ ).
4. Entformen des geprägten Bauteils ( $t_5 \rightarrow t_8$ ).

Zum Zeitpunkt  $t_0$  wird ein Halbzeug eingelegt und mit dem Aufheizvorgang begonnen. Bis zum Zeitpunkt  $t_1$  wird eine geringe, so genannte Antastkraft aufgebaut, durch die eine bessere Wärmeleitung und ein gleichmäßiges Aufschmelzen des Halbzeugs gewährleistet wird. Außerdem wird das Halbzeug zwischen den beiden Werkzeughälften fixiert, wodurch eine Verformung des Halbzeugs durch Retardation während der Erwärmung vermieden wird. Das Werkzeug wird zusammen mit dem Kunststoffhalbzeug bis zur erforderlichen Umformtemperatur aufgeheizt, diese liegt bei amorphen Kunststoffen bei etwa 30 K bis maximal 100 K über der

Glasübergangstemperatur. Bei teilkristallinen Kunststoffen liegt die Umformtemperatur im Bereich der Kristallitschmelztemperatur oder wenige Kelvin darüber.

Bei erreichter Umformtemperatur ( $t_2$ ), wird die Prägekraft durch eine Schließbewegung des Werkzeugs mit konstanter Geschwindigkeit aufgebaut (weggesteuerter Umformvorgang,  $t_2 \rightarrow t_3$ ). Die Prägekraft wird bis zur vollständigen Formfüllung und zum Erreichen der angestrebten Restschichtdicke gehalten (kraftgesteuerter Umformvorgang,  $t_3 \rightarrow t_4$ ). Während dieser Haltezeit fließt die Kunststoffschmelze bei konstanter Temperatur weiter in die Strukturen des Formeinsatzes und in der Restschicht nach außen. Zur Aufrechterhaltung der Kraft wird der Weg dabei nachgeregelt. Diese Haltezeit kann je nach Komplexität und Abmessungen des Formeinsatzes wenige Sekunden bis hin zu mehreren Minuten dauern.

Anschließend an die Haltezeit beginnt unter Aufrechterhaltung der Prägekraft der Abkühlvorgang bis zur Entformtemperatur ( $t_5$ ). Bei erreichter Entformtemperatur wird das Werkzeug mit geringer Geschwindigkeit geöffnet und so die geprägten Strukturen entformt. Zur Entformung wird dabei die höhere Haftung zwischen dem Kunststoff und der Substratplatte verglichen mit der Haftung am Formeinsatz ausgenutzt. Im Prägekraftverlauf ist dabei eine charakteristische Kraftspitze ( $t_6$ ) zu erkennen, deren Betrag der zum Entformen der Struktur notwendigen Kraft entspricht. Die zur Entformung notwendige Kraft hängt sehr stark von der Qualität des verwendeten Formeinsatzes und den Prozessparametern ab [13]. Am Ende des Prägeprozesses wird das Werkzeug weiter abgekühlt und die Maschine zur Entnahme des geprägten Bauteils vollständig geöffnet ( $t_7 \rightarrow t_8$ ).

Der hier gezeigte Verlauf zeigt nur die prinzipiell notwendigen Schritte eines Heißprägeprozesses, je nach Struktur kann ein Heißprägezyklus auch weitere Zwischenschritte beinhalten.

---

## 2.1.3 Kunststoffe für den Heißprägeprozess

### Klassifizierung der Kunststoffe für den Heißprägeprozess

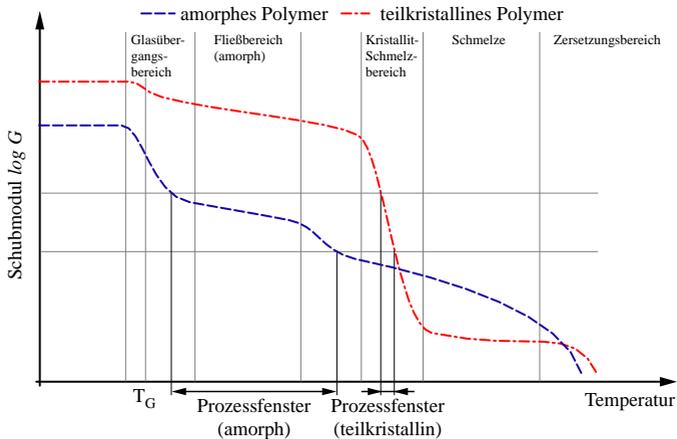
Für den Heißprägeprozess sind nahezu alle thermoplastischen Kunststoffe geeignet. Diese lassen sich in zwei Klassen einteilen:

**Amorphe, thermoplastische Polymere:** Kennzeichen der amorphen, thermoplastischen Polymere ist die regellose, knäuelartige Anordnung der Makromoleküle sowohl im festen als auch im aufgeschmolzenen Zustand. Die Molekülketten bilden dabei durch Verschlaufungen und Durchdringungen ein Netzwerk aus lösbaren, physikalischen Bindungen. Beispiele für amorphe thermoplastische Polymere sind Polymethacrylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC) und Cycloolefine Copolymere (COC).

**Teilkristalline thermoplastische Polymere:** Die teilkristallinen, thermoplastischen Polymere haben neben den regellos, knäuelartig angeordneten Bereichen auch Bereiche, in denen sich die Polymerketten so nahe aneinander annähern, dass sie sich zu sehr regelmäßigen, kristallinen Strukturen zusammenlagern. Durch diese kristallinen Bereiche sind diese Polymere in der Regel härter, spröder sowie temperaturstabiler als amorphe Polymere. Beispiele für teilkristalline Polymere sind Polypropylen (PP), Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) und Polyetheretherketon (PEEK).

Amorphe und teilkristalline Polymere unterscheiden sich durch ihren molekularen Aufbau hinsichtlich der Verarbeitung im Heißprägeverfahren. Dabei hat der Verlauf des Schubmoduls in Abhängigkeit von der Temperatur einen entscheidenden Einfluss. Dieser Verlauf ist schematisch in Abbildung 2.3 dargestellt.

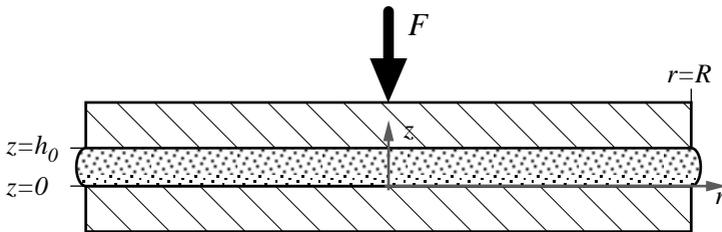
Bei niedrigen Temperaturen liegen Thermoplaste im Glaszustand vor, in diesem Zustand sind sie hart und spröde und lassen sich daher nicht umformen. Mit steigender Temperatur nimmt der Schubmodul der Polymere



**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung des Schubmodulverlaufs über der Temperatur bei amorphen und teilkristallinen Kunststoffen.

kontinuierlich ab. Im Bereich der Glasübergangstemperatur tritt bei amorphen Thermoplasten ein deutlicher Abfall des Schubmoduls aufgrund der Zunahme der Kettenbeweglichkeit ein. Diese Polymere liegen bei Temperaturen oberhalb des Glasübergangsbereiches in einem gummielastischen beziehungsweise entropieelastischen Zustand vor und können schon umgeformt werden. An den Glasübergangsbereich schließt sich bei weiter abfallendem Schubmodul der Fließbereich und der Schmelze-Zustand an. Aufgrund des langsam sinkenden Schubmoduls können die amorphen Thermoplaste in einem großen Temperaturbereich umgeformt werden.

Bei teilkristallinen Thermoplasten hingegen ist der Abfall des Schubmoduls im Bereich der Glasübergangstemperatur nicht deutlich ausgeprägt, da die weiterhin vorhandenen Kristallite noch für eine hohe Festigkeit des Kunststoffs sorgen. Daher sind die teilkristallinen Polymere oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur noch nicht umformbar, erst bei einer Temperatur oberhalb des Kristallit-Schmelzbereichs ist eine Umformung möglich. Der Schubmodul nimmt nach dem Erreichen der Kristallit-Schmelztemperatur



**Abbildung 2.4:** Zweiplattenmodell zur Beschreibung des Prägevorgangs als Verdrängung einer Kunststoffschicht zwischen zwei kreisförmigen Platten durch die Kraft  $F$ .

schon bei geringer Temperaturerhöhung um einige Größenordnungen ab, die Schmelze verhält sich dann wie eine niedrigviskose Flüssigkeit. Daher sind teilkristalline Polymere im Heißprägeverfahren schwierig abzuformen, da der zur Formfüllung notwendige Prägedruck durch den Fließwiderstand der Schmelze nicht aufgebaut werden kann.

### Fließverhältnisse in der Polymerschmelze

Die idealisierten Fließverhältnisse in einer Polymerschmelze während eines Prägevorgangs lassen sich mit einem Zweiplatten-Modell beschreiben [14]. Bei diesem Modell wird das viskose Fließen eines Kunststoffs beim Zusammendrücken zweier paralleler, kreisförmiger Platten ähnlich einem Heißprägevorgang untersucht. Die Berechnungen können dabei für ein Newton'sches Medium [15] oder auch mit aufwändigeren Materialmodellen [16, 17] durchgeführt werden.

Für ein Newton'sches Medium kann der Umformvorgang anhand des Modells in Abbildung 2.4 beschrieben werden. Bei diesem Modell erzeugt eine senkrecht wirkende Kraft  $F$  den Druck  $p_0$  zwischen zwei parallelen Platten. Dieser Druck erzeugt Spannungen in der Kunststoffschmelze, die zu einem Fließen der Schmelze zu den Plattenrändern und zum Überquellen führen. Der Abstand der Platten ändert sich dabei um  $dz$ , das Volumen

zwischen den Platten sinkt demzufolge um  $\pi R^2 dz$ . Das Fließen selbst wird dabei durch den Druckverlauf im Medium erzeugt. Die notwendige Kraft, um die Flüssigkeit vom Zylinder der Fläche  $2\pi r dz$  zum Zylinder der Fläche  $2\pi(r + dr)dz$  strömen zu lassen, ergibt sich dabei zu  $F = 2\pi r dz dp$ . Für eine laminare Strömung und ein Newton'sches Medium lässt sich das Kräftegleichgewicht 2.1 aufstellen:

$$\eta \frac{d^2 u}{dz^2} 2\pi r dz dr + 2\pi r dz dp = 0 \quad (2.1)$$

oder

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dr} \quad (2.2)$$

Dabei gilt für die Tangentialspannung  $\tau = \eta du/dz$  mit  $du/dz$  als Geschwindigkeitsgradienten senkrecht zur Strömungsrichtung und  $\eta$  als der Viskosität des Mediums. Aus diesem Ansatz ergibt sich für die Prägekraft nach 2.3

$$F = -\frac{3}{2} \frac{\eta \pi R^4}{h_0^3} \frac{dz}{dt} \quad (2.3)$$

Aus dieser Gleichung lassen sich grundlegende Zusammenhänge zwischen der Prägekraft, der Formteilgeometrie und der Umformparameter ablesen.

$$F \sim R^4; \quad F \sim \frac{1}{h_0^3}; \quad F \sim \frac{dz}{dt}; \quad F \sim \eta$$

Diese Abhängigkeiten spielen insbesondere bei der großformatigem Abformung eine Rolle, da die Prägekräfte bei großen Flächen ( $R \uparrow$ ) und dünnen Restschichten ( $h \downarrow$ ) sehr schnell ansteigen. Weiterhin muss auch die mechanische Stabilität der Heißprägewerkzeuge hohen Anforderungen gerecht werden, um dünne, gut ausgeformte Bauteile herstellen zu können. Die Prägekraft ist nach diesem Modell proportional zur vierten Potenz des Bauteilradius, danach muss die Prägekraft bei Verdoppelung des Bauteilradius zur Erzielung der gleichen Restschichtdicke auf den 16-fachen

---

Wert steigen. Zur Reduktion der Restschichtdicke um die Hälfte muss die Prägekraft (bei konstanter Prägefläche) um den Faktor 8 erhöht werden.

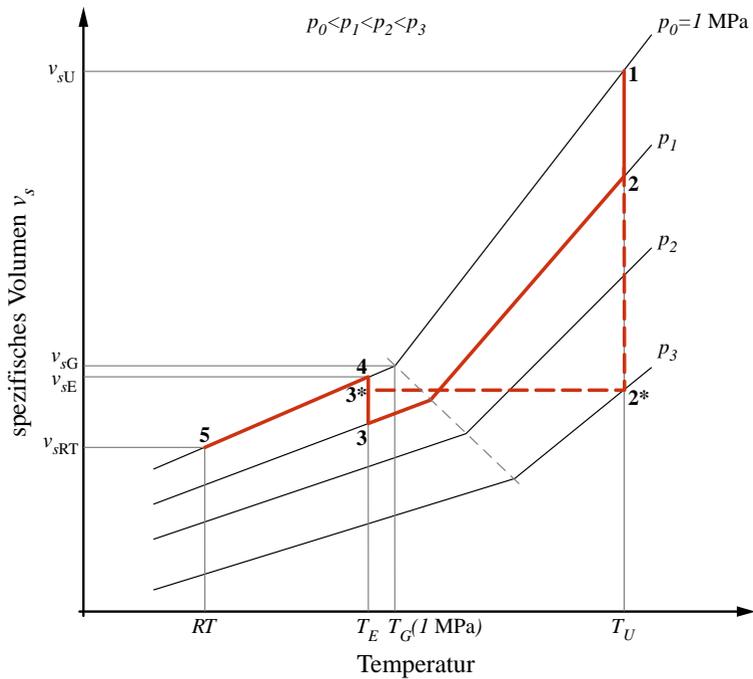
Positiv für die großformatige Abformung ist hingegen die Abhängigkeit der Dickenänderung der Restschicht  $dz$  von der Zeit. Dadurch kann durch eine längere Prägezeit bei gleichbleibender Prägekraft eine dünnere Restschicht erzielt werden. Bei realen Kunststoffschmelzen ist auch die Viskosität zeitabhängig, dadurch bauen sich durch Verformung entstandene innere Spannungen während einer langen Prägezeit ab.

Daher sind für großformatige Abformungen im Heißprägeprozess lange Prägezeiten und relativ hohe Umformkräfte notwendig.

### **Schwindungsabschätzung anhand des pvT-Diagramms**

Anhand von pvT-Diagrammen können die Zustandsänderungen von Kunststoffen während des Abkühlens aus der Schmelze dargestellt werden. In einem pvT-Diagramm ist der Zusammenhang zwischen Druck  $p$ , spezifischem Volumen  $v$  und der Temperatur  $T$  aufgetragen. Da Kunststoffe sowohl in der Schmelze als auch im festen Zustand kompressibel sind, werden im pvT-Diagramm eine Schar von Isobaren eingetragen. Die Isobaren zeigen bei amorphen Kunststoffen sowohl unterhalb als auch oberhalb der Glasübergangstemperatur einen linearen Verlauf mit unterschiedlicher Steigung. Die Glasübergangstemperatur ist durch den Schnittpunkt der Geradenabschnitte definiert und steigt mit zunehmendem Druck an.

Für einen idealisierten Heißprägeprozess ohne Werkzeug- und Maschineneinflüsse kann die notwendige Prägekraft anhand eines pvT-Diagramms abgeschätzt werden. Dazu sind in Abbildung 2.5 ein isobarer und ein isochorer Abkühlprozess in einem schematisierten pvT-Diagramm eingezeichnet. Ausgehend von der Kunststoffschmelze bei  $p_0 = 1$  MPa wird die Prägekraft aufgebracht ( $1 \rightarrow 2$ ) und unter Aufrechterhaltung der Prägekraft isobar abgekühlt ( $2 \rightarrow 3$ ). Nach dieser isobaren Abkühlung wird die Prägekraft abgebaut und so der Druck auf Umgebungsdruck reduziert ( $3 \rightarrow 4$ ). Dabei nimmt das spezifische Volumen des Kunststoffes zu und es entstehen im noch nicht entformten Bauteil Druckeigenspannungen,



**Abbildung 2.5:** Darstellung des Heißprägeprozesses in einem schematisierten p-vT-Diagramm der Kunststoffschmelze. Dargestellt sind die isobare Abkühlung 1-2-3-4-5 und die isochore Abkühlung 1-2\*-3\*-4-5.

---

die zur Entstehung von Entformkräften beitragen können. Diese Zunahme des spezifischen Volumens kann durch eine isochore Abkühlung verringert werden. Dazu muss die Umformkraft und damit der Prägedruck und die Kompression des Kunststoffes so hoch gewählt werden, dass nach der isochoren Abkühlung ( $2^* \rightarrow 3^*$ ) die Änderung des spezifischen Volumens ( $3^* \rightarrow 4$ ) bei gegebener Entformtemperatur  $T_E$  möglichst gering bleibt. Die bei der isothermen Entformung entstehenden Druckeigenspannungen können durch geeignete Wahl des Prägedruckes und der Entformtemperatur sogar gänzlich vermieden werden. Dies ist jedoch bei der großformatigen Abformung nicht immer möglich, da die Umformkraft und damit der Prägedruck begrenzt sind.

Die Änderung des spezifischen Volumens während der Abkühlung auf Raumtemperatur  $4 \rightarrow 5$  stellt die Verarbeitungsschwindung dar. Diese kann durch isochore Abkühlung und Entformung bei geringerer Temperatur vermindert werden. Bei niedriger Entformtemperatur entstehen jedoch wegen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Polymer und Formeinsatz Eigenspannungen, die wiederum Entformkräfte hervorrufen.

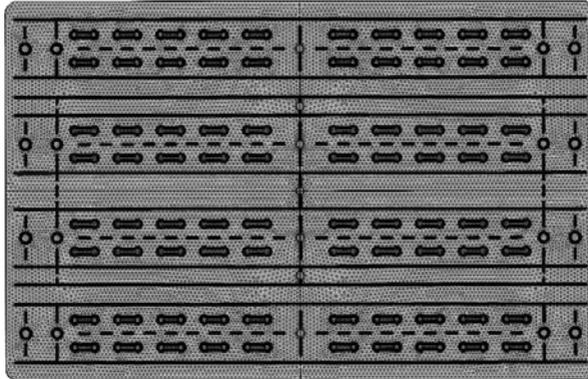
Diese Betrachtungen sind nur für einen idealisierten Heißprägeprozess gültig. Bei einem realen Prozess ist der Prägedruck über der Bauteilfläche nicht konstant [13]. Daher muss insbesondere bei großflächigen Abformungen mit einem durch unterschiedliche Schwindung verursachten Verzug der Bauteile gerechnet werden. Um diesen Verzug zu vermeiden, muss der Druckverlauf in der Restschicht homogenisiert werden, dies kann zum Beispiel durch die Verwendung einer Tauchkantendichtung anstelle einer Fließspaltdichtung geschehen [1].

## **Simulation des Heißprägeverfahrens**

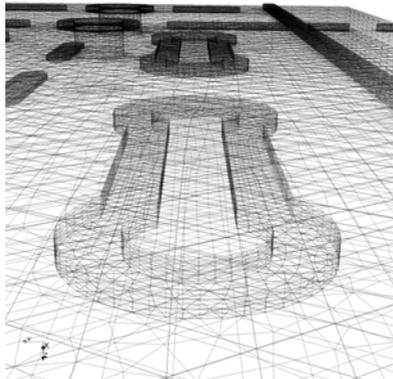
Neben den modellhaften analytischen Untersuchungen des Heißprägeprozesses besteht inzwischen auch die Möglichkeit, das Heißprägeverfahren durch numerische Methoden zu simulieren. Im Gegensatz zum klassischen

Spritzgussprozess, bei dem FEM- und CFD-Analysen zu den Standardverfahren gehören, gibt es für das Heißprägen keine Verfahren, mit denen der gesamte Prozess hinreichend genau simuliert werden kann. Daher werden für das Heißprägen die einzelnen Prozessschritte meistens getrennt betrachtet. Für den Heißprägeprozess von Mikrostrukturen kann der gesamte Prozess mit Hilfe von Werkzeugen für die Simulation des Spritzprägeprozesses und klassischer FEM-Werkzeuge simuliert werden [13]. Bei der Nano-Imprint-Lithografie gibt es einige Ansätze zur Simulation der Fließverhältnisse in der Polymerschmelze [18, 19, 20], allerdings werden dabei meist nur einzelne oder wenige benachbarte Kavitäten betrachtet.

Bei der Abformung von Mikrostrukturen im Heißprägeverfahren spielt die Befüllung des Formeinsatzes eine eher untergeordnete Rolle, da bei den üblichen Restschichtdicken ( $\approx 100 \mu\text{m}$ ) eine vollständige Befüllung des Formeinsatzes immer möglich ist. Die weitaus größere Schwierigkeit im Heißprägeprozess ist die defektfreie Entformung der geprägten Bauteile. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten schrumpfen die geprägten Bauteile auf den Formeinsatz auf. Die so entstehenden Haftkräfte erzeugen während der Entformung Normalkräfte auf die Mikrostrukturen, die zu Verformungen oder zum Abreißen der Strukturen führen können. Der Einfluss der Schrumpfung des Polymers nimmt mit größeren abgeformten Flächen zu, daher ist insbesondere die Möglichkeit zur Simulation der Entformung bei großformatigen Formeinsätzen von Interesse. Dazu wurde am Forschungszentrum Karlsruhe in Zusammenarbeit mit dem Industrial Materials Institute am National Research Council (Canada) Simulationen zur Entformung unter Berücksichtigung der Relaxation des Kunststoffes und der Reibung zwischen Formeinsatz und Polymer durchgeführt [21]. Eine weitere Möglichkeit zum Einsatz von Simulationsrechnungen im Heißprägeverfahren ist die thermische Simulation des Aufheiz- und Abkühlvorgangs von Werkzeug und Polymer.



(a) Teilansicht eines vernetzten, strukturierten Feldes mit Außenabmessungen von  $75\text{ mm} \times 48\text{ mm}$ .



(b) Detail der Vernetzung, Stegbreite der Struktur  $300\text{ }\mu\text{m}$ , Strukturhöhe  $120\text{ }\mu\text{m}$ .

**Abbildung 2.6:** Ausschnitte eines vernetzten Formeinsatzes mit einem Durchmesser von  $250\text{ mm}$  für mikrofluidische Bauteile.

### 2.2 Beschreibung der Anlagentechnik

In den folgenden Abschnitten wird zuerst der allgemeine Aufbau und die verschiedenen Einsatzbereiche von Heißprägeanlagen dargestellt, anschließend wird kurz eine typische Anlage für die Anwendung in der Forschung vorgestellt und eine neu aufgebaute Anlage für die industrielle Anwendung ausführlicher beschrieben.

#### 2.2.1 Allgemeine Beschreibung

Eine Heißprägeanlage besteht prinzipiell aus einem Lastrahmen zur Erzeugung der Prägekraft und einem Werkzeug mit einem Heiz- und Kühlsystem sowie einer Aufnahme für Formeinsätze. Die kommerziell erhältlichen Heißprägeanlagen lassen sich grob in drei Kategorien einteilen:

**Heißprägeanlagen für die Forschung:** Eine Anlage zur Verwendung im Bereich der Forschung ist zum Beispiel die Anlage HEX03et der Firma Jenoptik Mikrotechnik. Diese Heißprägemaschinen zeichnen sich durch sehr präzise Kraft-Weg-Regelungen und ein sehr flexibles Steuerungssystem aus. Die Stammwerkzeuge sind dabei fest eingebaut, lediglich der jeweilige Formeinsatz ist austauschbar.

**Industrietaugliche Heißprägeanlagen:** Industriell einsetzbare Anlagen, wie zum Beispiel die Heißprägemaschine WMP1000 der Firma Wickert Maschinenbau GmbH, bauen zumeist auf Laborpressen für die Kunststoffindustrie auf, haben jedoch in der Regel speziell an den Heißprägeprozess angepasste Steuerungen. Bei diesen Anlagen können die Stammwerkzeuge einfach ausgetauscht werden, so dass eine flexible Nutzung auch mit speziell für ein Bauteil optimierten Werkzeugen möglich ist.

**Heißprägeanlagen für die Nanoimprint-Lithografie:** Diese Anlagen beruhen auf modifizierten Maskalignern, die mit einem zusätzlichen Heiz- und Kühlsystem ausgestattet sind. Die Formgebung der

---

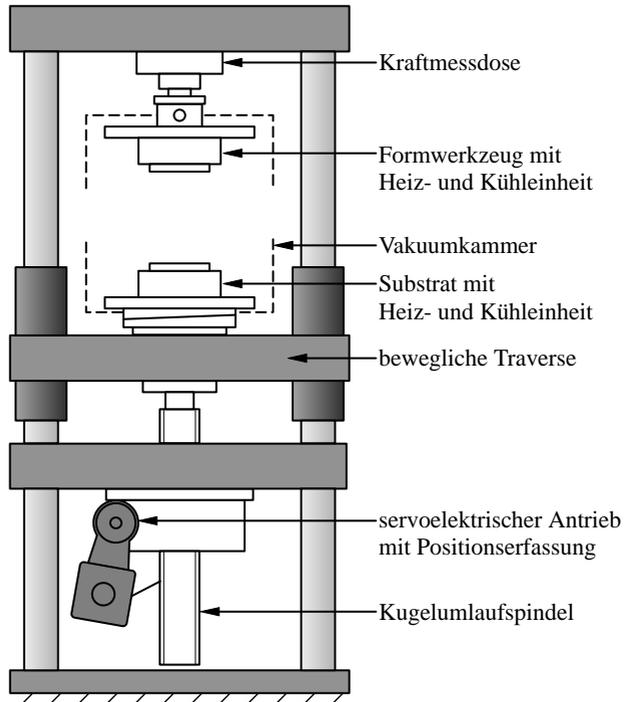
Polymere erfolgt bei diesen Anlagen entweder durch Wärme [22] oder durch UV-Aushärtung von geeigneten Resistsystemen [23]. Die Umformkräfte dieser Anlagen sind bauartbedingt relativ gering, die abformbare Fläche ist mit bis zu 8 Zoll Durchmesser jedoch verhältnismäßig groß [24].

In den nächsten Abschnitten werden Heißprägemaschinen für den Forschungsbereich und industriell einsetzbare Anlagen anhand der HEX03et und der WMP1000 vorgestellt und Unterschiede der beiden Anlagen herausgearbeitet.

### **2.2.2 Jenoptik HEX03et**

Der prinzipielle Aufbau einer Heißpräganlage zur Nutzung im Bereich der Forschung ist am Beispiel der Anlage HEX03et in Abbildung 2.7 gezeigt. Die Hauptkomponenten einer solchen Anlage sind ein steifer Maschinenrahmen mit Prägeantrieb sowie die beiden Werkzeughälften. Der Maschinenrahmen beruht bei diesem Maschinenkonzept auf einem Rahmen wie er auch für Materialprüfmaschinen eingesetzt wird. Dies hat den Vorteil einer hochpräzisen Kraft-Weg-Regelung und einer versatz- und spielfreien Bewegung der beiden Werkzeughälften zueinander. Der eigentliche Antrieb der beweglichen Traverse erfolgt über eine Kugelumlaufspindel und einen Servomotor mit integrierter Positionserfassung. Die Erfassung der auftretenden Kräfte erfolgt direkt im Kraftfluss der Maschine durch eine hochauflösende Kraftmessdose zwischen der oberen Werkzeughälfte und dem Maschinenrahmen.

Die Werkzeuge sind bei diesem Anlagentyp fest in der Maschine eingebaut, lediglich die Formeinsätze können ausgetauscht werden. Die weitgehend symmetrisch aufgebauten Werkzeuge stellen dabei alle notwendigen Basisfunktionen wie Beheizung, Kühlung und Evakuierung während des Prägeprozesses zur Verfügung. Die Beheizung der Formeinsätze erfolgt über elektrische Rohrheizpatronen und die Kühlung über Wärmeträgeröl das durch eine Kühlwendel im Stammwerkzeug umgewälzt wird. Die



**Abbildung 2.7:** Prinzipeller Aufbau einer Heißpräganlage für den Forschungsbereich am Beispiel der HEX03et der Firma Jenoptik Mikrotechnik.

---

technischen Daten einer solchen Anlage sind für die HEX03et in Tabelle A.1 im Anhang zusammengefasst.

Die Steuerung solcher Anlagen ist als PC-Steuerung mit einer sehr flexiblen Makrosprache ausgeführt, mit der alle notwendigen Parameter auch während eines Heißprägeprozesses verändert und eingestellt werden können. Zusammen mit der einfachen, schnellen Montage der Formeinsätze im Stammwerkzeug können diese Anlage sehr flexibel eingesetzt werden. Die Anlagen können sowohl für das klassische Heißprägen als auch für thermisches Bonden, Nanoimprintlithographie (NIL) oder Thermoformprozesse [11] eingesetzt werden. Für die unterschiedlichen Prozesse müssen lediglich die Formeinsätze beziehungsweise Substratplatten getauscht und ein entsprechendes Makroprogramm geschrieben werden.

Aufgrund der Bauart ähnlich einer Materialprüfmaschine und der einfachen Ausführung des Heiz- und Kühlsystems eignen sich diese Anlagen für einzelne Funktionsmuster und Kleinstserien. Zur Herstellung größerer Stückzahlen sind schnellere Maschinen mit höheren Heizraten und der Möglichkeit zur Automatisierung des Heißprägeprozesses notwendig.

### **2.2.3 Wickert WMP1000**

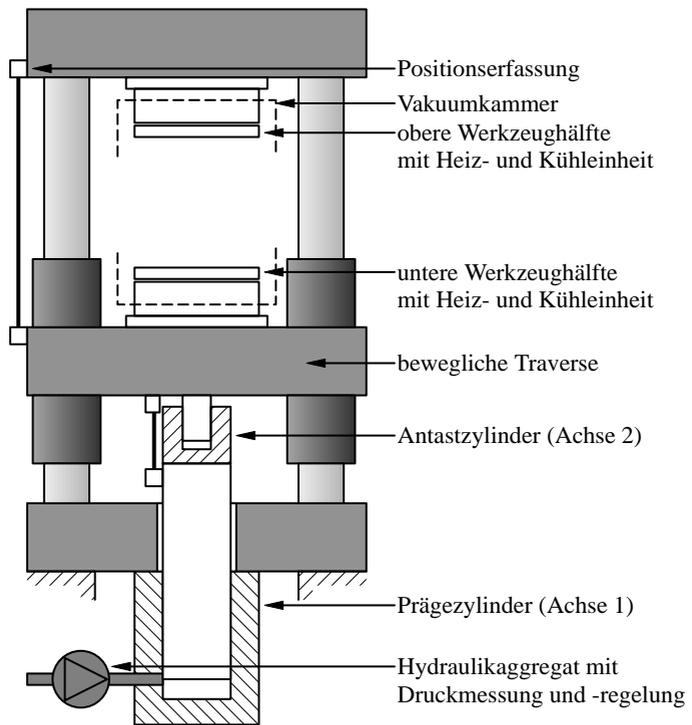
Mit der Heißpräganlage WMP1000 der Wickert Maschinenbau GmbH soll ein Konzept für eine industriennahe Heißpräganlage für die großformatige Abformung vorgestellt werden. Diese Anlage und die dafür notwendigen Werkzeuge wurden am IMT zusammen mit der Wickert Maschinenbau GmbH im Rahmen des BMBF-Förderprojektes  $\mu$ -FEMOS entwickelt [2]. Die Werkzeuge für die großformatige Abformung werden im Kapitel 2.3 vorgestellt.

Der Aufbau einer industrietauglichen Heißprägemaschine ist mit dem einer Forschungsanlage, wie sie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben wurde, vergleichbar. Die Hauptunterschiede liegen im Antriebs- und Steuerungskonzept sowie in den verwendeten Werkzeugen. Darüber hinaus sollte eine industriell nutzbare Anlage Möglichkeiten zur Automatisierung des

Heißprägeprozesses bieten. Der prinzipielle Aufbau einer solchen Maschine ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Abbildung 2.9 zeigt eine Fotografie der Anlage. Die Anlage besteht aus einem sehr steifen Maschinenrahmen, dessen bewegliche Traverse durch einen zweistufigen Hydraulikzylinder angetrieben wird. Dieser zweistufige Antrieb besteht aus zwei koaxial angeordneten Hydraulikzylindern mit unterschiedlichen Wirkdurchmessern. Beide Zylinder verfügen über eine unabhängige Druckerzeugung und über eine separate Kraft- und Positionsregelung. Die Erfassung der Kraft erfolgt bei diesem Maschinenkonzept nicht direkt im Kraftfluss des Maschinenrahmens, sondern indirekt durch die Messung des kolben- und ringraumseitigen Hydraulikdrucks. Äußere Einflüsse wie beispielsweise Reibung in den Führungen der Traverse oder unterschiedliches Gewicht der verwendeten Werkzeuge werden durch eine Referenzierung der Kraft- und Wegmesssysteme ausgeglichen.

Der kleinere, so genannte Antastzylinder deckt den unteren Kraftbereich zwischen 500 N und 30000 N der Maschine ab und wird zur Erzeugung der Antastkraft während des Aufschmelzens des Polymeres verwendet. Die Genauigkeit der Kraftregelung liegt bei diesem Zylinder im Bereich von wenigen 100 N, der Hub des Zylinders beträgt nur einige Millimeter bei einer Positioniergenauigkeit von etwa 100  $\mu\text{m}$ .

Der zweite, größere Prägezylinder wird für die eigentliche Schließbewegung und zur Erzeugung der Prägekraft verwendet. Die Kraft- und Positionsregelung ist bei dieser Achse in zwei Bereiche unterteilt. Der Schließhub der Anlage ist mit einer gröberen Regelung ausgestattet, die eine Positionierung der Achse auf einige zehntel Millimeter erlaubt, die erreichbaren Schließgeschwindigkeiten liegen im Bereich von etwa 90 mm/s. Im Bereich der letzten 50 mm wird durch eine Anpassung der Regelparameter und durch eine genauere Positionserfassung eine bessere Positionsregelung ermöglicht. Die erzielbare Positioniergenauigkeit liegt in diesem Bereich bei ca. 100  $\mu\text{m}$ . Die Prägekraft von maximal 1000 kN kann auf ca. 1000 N genau geregelt werden. Die wichtigsten technischen Daten der Heißprägeanlage WMP1000 sind in Tabelle A.2 im Anhang zusammengefasst.



**Abbildung 2.8:** Prinzipieller Aufbau einer industrienahen Heißpräganlage am Beispiel der WMP1000 der Firma Wickert Maschinenbau GmbH.



**Abbildung 2.9:** Heißpräganlage Wickert WMP1000.

Das Steuerungskonzept einer industrietauglichen Anlage muss auf die Bedürfnisse der industriellen Anwender abgestimmt werden. Die Steuerung muss daher anwenderfreundlich und einfach zu bedienen sein. Weiterhin muss die Steuerung eine grobe Fehlbedienung der Anlage erkennen und so eine Beschädigung der verwendeten Werkzeuge und Formeinsätze verhindern. Daher eignen sich für solche industrienahen Anlagen beispielsweise SPS-Steuerungen, die in ähnlicher Ausführung bei Kunststoffspritzgussmaschinen oder bei herkömmlichen Pressen für die Kunststoffverarbeitung verwendet werden. Für die Heißpräganlage WMP1000 wird eine SPS-Steuerung zusammen mit einer grafischen Bedienoberfläche auf einem Steuerrechner verwendet. Über die Bedienoberfläche können sämtliche Prozessparameter und Prägeschritte eines vorgegebenen Zyklus eingegeben werden. Dieser Zyklus wird dann von der SPS-Steuerung bei jedem Prägevorgang abgearbeitet.

Im Unterschied zu einer flexiblen PC-Steuerung ist diese Art der Steuerung eng an den vorgegebenen Ablauf der SPS gebunden, der jedoch für

---

fast alle Prägevorgänge geeignet ist. Ein Vorteil dieser Art der Steuerungen liegt in dem für die Kommunikation zwischen Steuerrechner, SPS und Hydraulikregelung verwendeten Bussystem. Bei der Heißprägeanlage WMP1000 wird beispielsweise Profibus zur Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten verwendet. Durch den Einsatz standardisierter Kommunikationsprotokolle ist es einfach möglich, andere Steuerungen an die Heißprägeanlage anzubinden. Bei der WMP1000 kann zum Beispiel das Stammwerkzeug gegen andere Werkzeuge mit einer eigenen Steuerung ausgetauscht werden und die Anlage dann mit Hilfe der Werkzeugsteuerung über das Bussystem bedient werden.

Die Möglichkeit zum Austausch der Stammwerkzeuge ist ein weiterer Unterschied zu den Heißprägeanlagen aus dem Forschungsbereich, bei denen in der Regel nur die Formeinsätze ausgetauscht werden können. Durch den Austausch ganzer Stammwerkzeuge können speziell an einzelne Bauteile angepasste Heiz- und Kühlsysteme verwendet werden. Weiterhin können je nach Bauteilgeometrie Entformmechanismen in den Werkzeugen vorgesehen werden, die zum Beispiel für die beidseitige Strukturierung von Bauteilen oder für die weitere Automatisierung des Heißprägeprozesses notwendig sind.

### 2.3 Konzeption und Aufbau von Werkzeugen für die großformatige Abformung

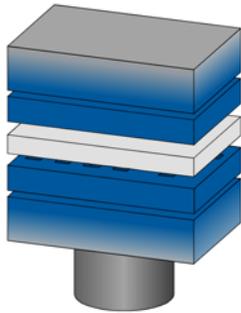
Mit modernen Heißprägewerkzeugen muss eine wirtschaftliche Herstellung von mikrostrukturierten Bauteilen möglich sein. Um dies zu erreichen, müssen die Zykluszeiten verkürzt und die abformbaren Flächen vergrößert werden, um eine größere Anzahl an Bauteilen gleichzeitig und in kürzerer Zeit herstellen zu können. Im Rahmen des BMBF-Förderprojektes  $\mu$ -FEMOS wurde am IMT ein neues Konzept für Heißprägewerkzeuge entwickelt und ein Demonstrationswerkzeug aufgebaut. Darüber hinaus wurde am Forschungszentrum Karlsruhe ein Präzisionswerkzeug für die Herstellung beidseitig mikrostrukturierter Formteile realisiert [1].

In den nachfolgenden Abschnitten werden das neue Konzept für Heißprägewerkzeuge und die danach gebauten Werkzeuge vorgestellt.

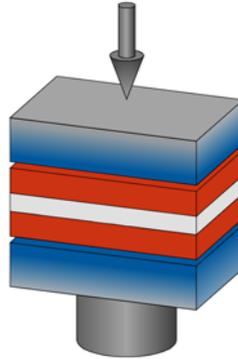
#### 2.3.1 Neues Konzept moderner Heißprägewerkzeuge

Zur Verringerung der Zykluszeiten muss bei modernen Heißprägewerkzeugen die zyklisch beheizte Masse soweit wie möglich reduziert werden. Dabei müssen jedoch die Druckfestigkeit und die Ebenheit des Werkzeugs hohen Anforderungen genügen, um großformatige Bauteile auch mit sehr dünnen Restschichten herstellen zu können.

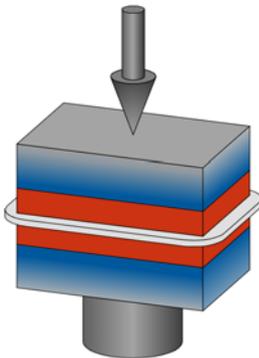
Um die zyklisch beheizten Massen soweit wie möglich zu reduzieren, werden die heißen und kalten Bereiche des Werkzeugs bei diesem Konzept thermisch getrennt. Daraus folgt die Aufteilung eines solchen Werkzeugs in eine Heizplatte und einen so genannten Kühlblock (siehe Abbildung 2.10). Diese beiden Funktionseinheiten sind im Grundzustand des Werkzeugs durch Federkraft voneinander abgehoben und somit durch den dabei entstehenden Luftspalt thermisch isoliert (Abbildung 2.10(a)). Dieser Luftspalt wird während des Aufschmelzens des Polymers beibehalten, die Antastkraft wird nur durch die Federkraft erzeugt (Abbildung 2.10(b)). Aufgrund der thermischen Isolierung kann die relativ dünne Heizplatte zusammen mit dem Formeinsatz sehr schnell aufgeheizt werden.



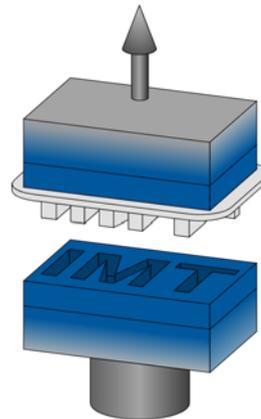
(a) Einlegen des Halbzeugs.



(b) Aufheizen mit geringer Kraft und abgehobenen Heizplatten.



(c) Aufbau der Umformkraft und Anpressen der Heizplatten an den Kühlblock.



(d) Abkühlen und Entformung.

**Abbildung 2.10:** Schematische Darstellung des neuen Konzeptes für Heißprägewerkzeuge.



**Abbildung 2.11:** Untere Hälfte des Demonstrationswerkzeugs mit einer abformbaren Fläche von bis zu 250 mm Durchmesser.

Durch die Umformkraft wird die Heizplatte im eigentlichen Prägeprozess an den massiven Kühlblock angepresst, somit entsteht ein mechanisch stabiler Aufbau, mit dem auch auf großen Flächen gleichmäßig dünne Restschichten erzielt werden können (Abbildung 2.10(c)). Sobald die Heizplatte und der Kühlblock miteinander in Kontakt kommen, wird die Wärme aus der Heizplatte in den vergleichsweise großen und ständig gekühlten Kühlblock abgeführt. Durch den als Wärmesenke wirkenden Kühlblock können die Heizplatte und der Formeinsatz sehr schnell abgekühlt und die Bauteile anschließend entformt werden (Abbildung 2.10(d)).

### 2.3.2 Heißprägewerkzeuge für die großformatige Abformung

#### Umsetzung des neuen Werkzeugkonzepts in einem Demonstrationswerkzeug

Das am IMT aufgebaute Demonstrationswerkzeug (Basiswerkzeug) ist die erste Umsetzung des neuen Werkzeugkonzepts mit getrennten Heiß-

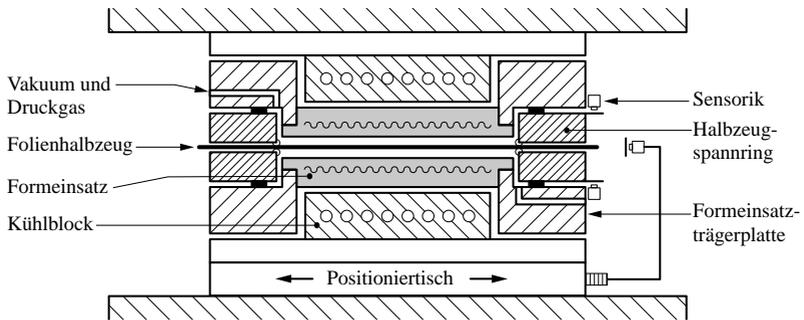
---

und Kaltbereichen. Die bis auf die Vakuumkammer symmetrisch aufgebauten Werkzeughälften bestehen jeweils aus einem wassergekühlten Kühlblock und einer Heizplatte, die durch vorgespannte Tellerfederpakete vom Kühlblock abgehoben wird. Auf der Heizplatte können Formeinsätze mit 250 mm Durchmesser befestigt werden, die maximale Umformtemperatur beträgt 300°C. Die Heizplatte kann bei diesem Werkzeug mit einem Magnetspannsystem auf den Kühlblock gespannt werden, so dass in Verbindung mit einer spielfreien Öffnungsbewegung der Heißpräganlage eine versatzfreie Entformung möglich ist. Zur Entformung können wie bei herkömmlichen Heißprägwerkzeugen üblich, durch Lappen oder Sandstrahlen angeraute Substratplatten verwendet werden. Alternativ wurde eine Vorrichtung zur Entformung von auf lose Substrate (z.B. Wafer) abgeformten Bauteilen entwickelt [25]. In Abbildung 2.11 ist das Demonstrationswerkzeug dargestellt.

### **Präzisionswerkzeug für die beidseitige Strukturierung**

Neben dem Demonstrationswerkzeug wurde am IMT ein Präzisionswerkzeug für die Herstellung von beidseitig strukturierten, großflächigen Bauteilen mit dünnen Restschichten aufgebaut [1]. Dabei wurden insbesondere Mechanismen zur Ausrichtung der Formeinsätze und zur defektfreien Entformung der geprägten Bauteile entwickelt. Der prinzipielle Aufbau des Werkzeugs ist in Abbildung 2.12 zu sehen, Abbildung 2.13 zeigt eine Gesamtansicht des Werkzeugs.

Das Werkzeug besteht aus zwei weitgehend symmetrischen Werkzeughälften. Die untere Werkzeughälfte verfügt zusätzlich über einen Positioniertisch, mit dem die beiden Werkzeughälften präzise zueinander ausgerichtet werden können. Die Ausrichtung erfolgt durch Vermessung geprägter Bauteile und der Position der Werkzeughälften zueinander. Die Einstellung des Tisches erfolgt durch einen kombinierten Antrieb aus Stellschrauben für die grobe Ausrichtung und Piezoaktoren für die Feineinstellung.



**Abbildung 2.12:** Prinzipieller Aufbau eines Werkzeugs für die Abformung beidseitig strukturierter Bauteile.



**Abbildung 2.13:** Gesamtansicht des Präzisionswerkzeugs für die beidseitige Strukturierung aufgebaut auf der WMP1000.

---

Zur Entformung verfügt dieses Werkzeug über Halbzeugspannrings, die sowohl das Folienhalbzeug als auch die geprägten Bauteile in der Formtrennebene fixieren. Die Halbzeugspannrings sind relativ zum Formeinsatz und der Formeinsatzträgerplatte beweglich und verfügen über einen von der Maschinenbewegung unabhängigen Antrieb. Die Formeinsätze können ebenfalls relativ zur Öffnungs- und Schließbewegung der Maschine bewegt werden. Durch eine Kombination von Relativbewegungen kann daher während der Entformung die Maschine zwar geöffnet, die Position der Formeinsätze und der Halbzeugspannrings zueinander jedoch konstant gehalten werden. Um das Bauteil zu entformen wird bei jeweils einer Werkzeughälfte der Halbzeugspannrings relativ zum Formeinsatz bewegt und dadurch das Bauteil an der Restschicht aus dem Formeinsatz gezogen. Dieser Prozess wird durch Druckgas, das zwischen Formeinsatz und geprägtem Bauteil eingeleitet wird, unterstützt. Nachdem das Bauteil in der einen Werkzeughälfte entformt ist, wird der gleiche Prozess nochmals bei der anderen Werkzeughälfte wiederholt. Das Bauteil liegt dann bei vollständig geöffneter Maschine lose im Werkzeug und kann zum Beispiel mit einem Handlingsystem entnommen werden. Durch die Fixierung der Folienhalbzeuge vor und während des Prägeprozesses und der automatisierten Entformung der geprägten Bauteile ist mit diesem Werkzeug auch eine Reel-to-Reel-Fertigung möglich. Dabei werden unstrukturierte Folienhalbzeuge von einer Rolle in ein Heißprägewerkzeug geführt, umgeformt und nach der Umformung wieder auf einer Rolle aufgerollt. Dieses Fertigungsverfahren wird bislang hauptsächlich in der Folienstrukturierung durch Rollprägen mit niedrigen Aspektverhältnissen verwendet. Mit dem am IMT entwickelten Werkzeug können nun auch in einem sequentiellen Verfahren Strukturen mit höheren Aspektverhältnissen und senkrechten Seitenwänden hergestellt werden.

### **Konzept eines Werkzeugs für die industrielle Anwendung**

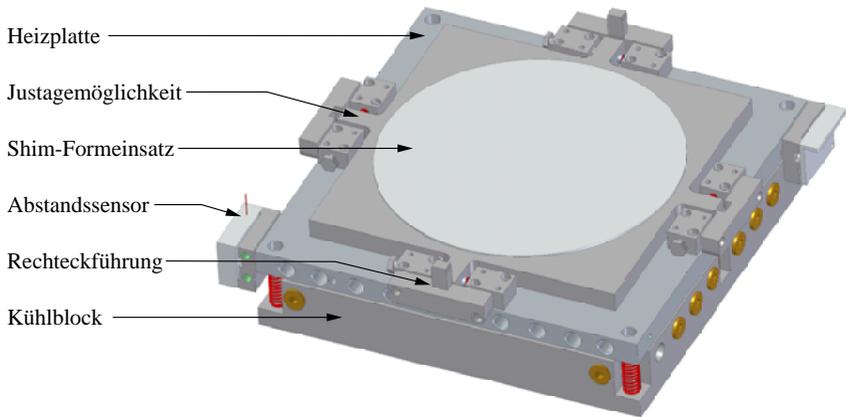
Für die industrielle Anwendung müssen Heißprägewerkzeuge nochmals höhere Anforderungen erfüllen. Die Werkzeuge müssen einfach und robust

aufgebaut sein. Gleichzeitig muss es jedoch möglich sein, planparallele, beidseitig strukturierte Bauteile mit einer ausreichenden Justagegenauigkeit und teilweise sehr engen Dickentoleranzen herzustellen. Die besondere Herausforderung für die industrielle Anwendung liegt darin, die geforderte Präzision allein mit dem Werkzeug zu erreichen und auch mit weniger genauen Maschinenrahmen hochgenaue Bauteile fertigen zu können.

Basierend auf den in den beiden in den vorherigen Abschnitten erläuterten Werkzeugkonzepten wurde daher ein Entwurf eines Heißprägewerkzeugs für die industrielle Anwendung entwickelt. Der Entwurf verbindet die Vorteile dieser beiden Werkzeuge. Zum einen ähnelt dieses Werkzeug mit dem einfachen, plattenförmigen Aufbau dem Demonstrationswerkzeug, zum anderen besteht die Möglichkeit zur Justage der beiden Werkzeughälften zueinander und zur genauen Vermessung des Werkzeugspalts ähnlich dem Präzisionswerkzeug. In Abbildung 2.14 ist ein CAD-Entwurf des Werkzeugs zu sehen, das derzeit im Rahmen eines Industrieprojekts aufgebaut wird.

Um das Werkzeug auch auf Pressen mit größerer Kraftregelung im unteren Kraftbereich nutzen zu können, wird die Heizplatte durch mehrere Spiralfedern vom Kühlblock abgehoben. Die Antastkraft wird so beim Schließen der Maschine durch die Spiralfedern erzeugt, die Höhe der Antastkraft wird durch den Schließweg und die Federkonstante der verwendeten Federn festgelegt. Während der Entformung wird die Heizplatte nicht auf dem Kühlblock gespannt. Durch die Führung der beiden Heizplatten zueinander kann auch ohne eine Fixierung eine versatzfreie Entformung der mikrostrukturierten Bauteile gewährleistet werden. Durch den Verzicht auf ein Spannsystem können die Kühlkanäle sehr nahe an die Oberfläche des Kühlblocks gelegt und somit eine schnelle Wärmeabfuhr aus der Heizplatte in den Kühlblock sichergestellt werden.

Direkt an der oberen und unteren Heizplatte sind Sensoren zur Vermessung des Werkzeugspalts angebracht, so dass äußere Einflüsse wie die Dehnung des Maschinenrahmens oder Temperaturschwankungen während



**Abbildung 2.14:** CAD-Modell eines industrietauglichen Heißprägewerkzeugs.

der Messung der Bauteildicke weitestgehend ausgeglichen werden können. Durch die Verwendung mehrerer Sensoren kann eine Verkippung der beiden Werkzeughälften zueinander festgestellt werden, die zum Beispiel durch ungünstige Fließverhältnisse in der Polymerschmelze oder durch falsch eingelegtes Halbzeug hervorgerufen wird.



## **3 Prozessparameter für die großformatige Abformung**

Für die Abformung großformatiger Formeinsätze durch Heißprägen sind genaue Kenntnisse der Prozessparameter und deren Einfluss auf die Qualität der Abformung notwendig. Die Bereiche, in denen die Parameter eingestellt werden können, sind dabei durch die eingesetzten Werkzeuge und die Heißpräganlage bestimmt. In diesem Kapitel wird zuerst ein allgemeiner Heißprägeprozess insbesondere im Hinblick auf die großformatige Abformung beschrieben, daran anschließend werden die wichtigsten Parameter (Umformtemperatur, Prägekraft und Geschwindigkeit, Haltezeit) und deren Einfluss auf die Abformung untersucht. Dabei wird insbesondere auf die Möglichkeiten der neu entwickelten Heißpräganlage WMP1000 und des dazugehörigen Heißprägewerkzeugs (Basiswerkzeug) eingegangen.

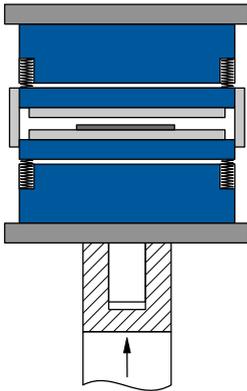
### **3.1 Beschreibung des Heißprägeprozesses für die großformatige Abformung**

Der Heißprägeprozess auf der Heißpräganlage Wickert WMP1000 zusammen mit dem Basiswerkzeug lässt sich wie in Abbildung 3.1 dargestellt in einzelne Schritte aufteilen.

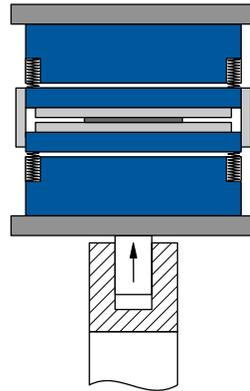
1. Einlegen des Halbzeugs und schließen der Heißpräganlage mit Achse 1 bis zum Abdichten der Vakuumkammer (siehe Abbildung 3.1(a)).

### 3 Prozessparameter für die großformatige Abformung

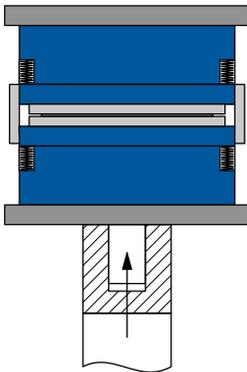
---



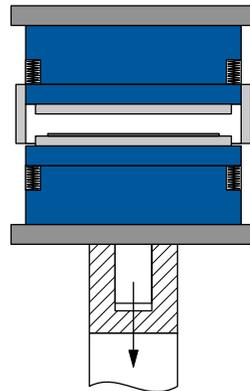
(a) Schließbewegung des Werkzeugs mit Achse 1.



(b) Anstastvorgang mit Achse 2.



(c) Aufbau der Prägekraft mit Achse 1.



(d) Verriegelung von Achse 2; Entformung und Öffnungsbewegung mit Achse 1.

**Abbildung 3.1:** Prinzipielle Darstellung der Prozessschritte bei der Abformung mit der WMP1000 und dem Basiswerkzeug.

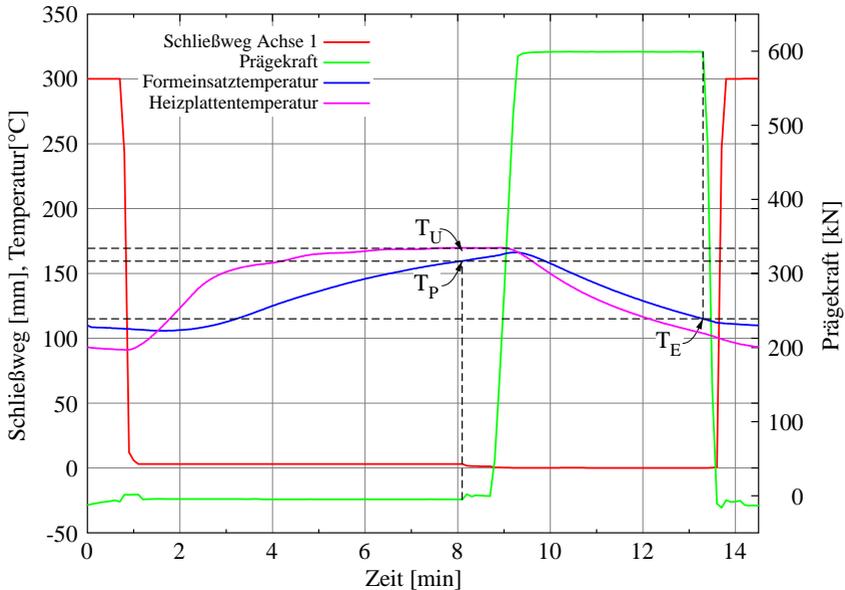
- 
2. Evakuierung des Werkzeughohlraums und Aufbau der Antastkraft mit Achse 2. Achse 1 bleibt dabei an der im vorhergehenden Schritt erreichten Position, die Heizplatten des Basiswerkzeugs sind nach dem Erreichen der Antastkraft durch vorgespannte Tellerfederpakete weiterhin vom jeweiligen Kühlblock abgehoben (siehe Abbildung 3.1(b)). Durch den isolierenden Luftspalt können so Heizraten von bis zu 50 K/min erreicht werden, typische Aufheizzeiten liegen bei etwa 120sec.
  3. Nach dem Erreichen der Umformtemperatur wird Achse 2 mit Achse 1 verdrängt. Dies bedeutet, dass Achse 2 unter Beibehaltung der Antastkraft mit derselben Geschwindigkeit geöffnet wird, mit der Achse 1 geschlossen wird. Die Position des Werkzeugs bleibt somit insgesamt unverändert.
  4. Aufbau der Prägekraft mit Achse 1. Während des Aufbaus der Prägekraft werden die Heizplatten an den Kühlblock angepresst und bilden somit einen Verbund mit der für die Abformung nötigen Steifigkeit und Planparallelität (siehe Abbildung 3.1(c)). Die elektrische Heizung des Werkzeugs wird unmittelbar nach dem Erreichen der Prägekraft ausgeschaltet und die Heizplatten auf dem jeweiligen Kühlblock mit einem Magnetspannsystem gespannt, so dass später eine versatzfreie Entformung möglich ist. Die Antastachse 2 wird zur Entformung und zum Öffnen der Anlage mit Achse 1 verriegelt. Bei erreichter Prägekraft kann optional eine Haltezeit eingegeben werden.
  5. Durch den Kontakt der Heizplatten mit dem jeweiligen Kühlblock wird das Werkzeug schnell abgekühlt. Typische Kühlzeiten für eine Abformung aus PMMA betragen dabei etwa 180sec. Sobald die Entformtemperatur erreicht ist, wird die Prägekraft abgebaut und das Werkzeug mit Achse 1 zur Entformung um wenige Millimeter geöffnet (siehe Abbildung 3.1(d)).

6. Im letzten Prozessschritt wird das Werkzeug belüftet, die Heißpräganlage vollständig geöffnet und die Verriegelung von Achse 1 und Achse 2 sowie die der Heizplatten mit dem jeweiligen Kühlblock gelöst.

Dieser Heißprägeprozess wird durch ein vorgegebenes Makro der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) der Heißpräganlage WMP1000 vorgegeben. Die Prozessparameter für die Prägetemperaturen, die Stellwege und die Antast- und Prägekraft können dabei je nach Bauteil und Formeinsatz variiert werden.

Zur präzisen Temperaturregelung sind die Heizplatten des Basiswerkzeugs in jeweils vier Zonen aufgeteilt, die separat geregelt und auf unterschiedliche Temperaturen eingestellt werden können. Somit ist es möglich, sehr homogene Temperaturverteilungen im Formeinsatz zu erreichen. Im Heißprägeprozess können für jede Werkzeughälfte drei unterschiedliche Temperaturen eingegeben werden (siehe Abbildung 3.2): Die Umformtemperatur  $T_U$  ist diejenige Temperatur, auf die die Heizplatten beheizt werden. Die Prägetemperatur  $T_P$  ist die Temperatur, bei der begonnen wird, die Prägekraft aufzubauen. Bei erreichter Entformtemperatur  $T_E$  wird mit der Entformung des geprägten Bauteils begonnen. Die Umformtemperatur wird direkt in den einzelnen Zonen der Heizplatten gemessen, die Prägetemperatur und die Entformtemperatur wird im Formeinsatz beziehungsweise in der Substratplatte gemessen. Durch den sehr schnellen Beginn der Abkühlung des Formeinsatzes beim Aufbau der Prägekraft kann es unter Umständen sinnvoll sein, die Umformtemperatur deutlich über der Prägetemperatur zu wählen und so durch die thermische Trägheit der Heizplatte und des Kühlblocks eine leichte Verlangsamung des Kühlprozesses der Polymerschmelze zu erreichen. Dies kann insbesondere zur Erzielung sehr dünner und spannungsarmer Bauteile erforderlich sein.

Die Stellwege der beiden Prägeachsen sind im Rahmen des vorgegebenen Prägeablaufs beliebig programmierbar. Achse 1 kann im Bereich des Schließhubes auf etwa 0,2 mm Millimeter genau positioniert werden, eine Kraftregelung ist in diesem Bereich nicht möglich. Im Bereich der



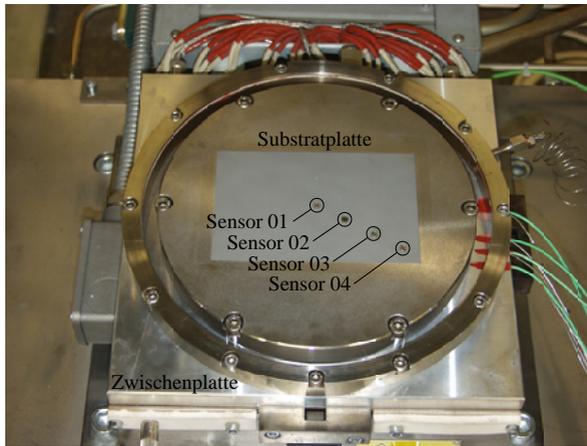
**Abbildung 3.2:** Verlauf von Schließweg, Prägekraft, Heizplatten- und Präge-temperatur während eines Prägezyklus auf der WMP1000. Zur Vereinfachung ist nur der Schließweg von Achse 1 dargestellt. Eingezeichnet sind auch die Umformtemperatur  $T_U$ , die Präge-temperatur  $T_P$  und die Entformtemperatur  $T_E$ .

letzten 50 mm des Schließhubes wird durch eine höher auflösende Positionserfassung eine genauere Positionsregelung möglich, die maximal erzielbare Positioniergenauigkeit liegt im Bereich von etwa 100  $\mu\text{m}$ . Die kleinere Achse 2 hat einen Gesamtstellweg von ca. 50 mm, die Positioniergenauigkeit liegt ebenfalls im Bereich von 100  $\mu\text{m}$ . Beide Achsen können sowohl relativ als auch absolut positioniert werden, so dass eine genaue Einstellung des Werkzeugspalts während des gesamten Prozesses möglich ist.

Die Einstellung der Antast- und der Prägekraft ist nur im Bereich der letzten 50 mm des Schließhubs möglich. Im Bereich der großen Verfahrswege von Achse 1 und während der Öffnungsbewegung der Anlage ist keine Kraftregelung möglich. Im Schließbereich kann die Kraft der Antastachse 2 im Bereich von 500 N bis zu 30 kN eingestellt werden. Die Umformkraft von Achse 1 kann von 30 kN bis hin zu 1000 kN eingestellt werden, die maximal mögliche, unregelte Öffnungskraft von Achse 1 beträgt etwa 500 kN. Ein weiterer Parameter, der beim Aufbau der Antastkraft und der Umformkraft einstellbar ist, ist die so genannte Druckaufbauzeit, die zwischen einer Sekunde und einhundert Sekunden eingestellt werden kann. Diese Druckaufbauzeit bestimmt die Geschwindigkeit mit der die im jeweiligen Prozessschritt vorgegebene Kraft aufgebaut wird und somit indirekt die Prägegeschwindigkeit.

In Abbildung 3.2 ist ein prinzipieller Verlauf von Schließweg, Prägekraft, Heizplatten- und Formeinsatztemperatur dargestellt. Die Bewegung von Achse 2 ist zur Vereinfachung der Darstellung nicht gezeigt.

Zur Erzielung optimaler Ergebnisse stehen somit die Parameter Umformtemperatur, Antastkraft, Prägekraft und Prägegeschwindigkeit zur Verfügung. Eine Haltezeit, während der die Polymerschmelze bei aufgebauter Umformkraft weiter beheizt wird, ist bei diesem Steuerungs- und Werkzeugkonzept nicht vorgesehen. In den folgenden Abschnitten wird der Einfluss der Parameter Umformtemperatur, Prägekraft und Prägegeschwindigkeit auf die Abformung untersucht. Als Qualitätskriterien werden dabei die Druckverteilung in der Restschicht und die Restschichtdicke verwendet, da eine homogene Druckverteilung in der Restschicht die Herstellung verzugsarmer Bauteile ermöglicht. Eine geringe Restschichtdicke entspricht außerdem bei fast allen Bauteilen einer guten Formfüllung und somit einer guten Abformung.



**Abbildung 3.3:** Basiswerkzeug mit Substrat- und Zwischenplatte zur Druckmessung.

## **3.2 Analyse der Prozessparameter beim Heißprägen**

Zur Analyse des Einflusses der Parameter beim Heißprägen wurde eine Messreihe aufgenommen, bei der der Druck der Polymerschmelze in der Restschicht an verschiedenen Positionen bei unterschiedlicher Prägekraft gemessen wurde. Anhand dieser Messungen werden in den folgenden Abschnitten der Einfluss verschiedener Parameter auf die Abformung erläutert und Schlussfolgerungen für die großformatige Abformung gezogen.

### **3.2.1 Messaufbau zur Messung des Schmelzendrucks**

Zur Aufzeichnung des Druckverlaufs in der Polymerschmelze wurde das Basiswerkzeug mit einer Substratplatte mit vier integrierten Quarzdrucksensoren Typ 601H und dazu passenden Ladungsverstärkern der

Firma Kistler verwendet. Die Sensoren haben einen Messbereich von 0 – 1000 bar bei einer Linearität von  $\pm 0,5\%$ . Die Sensoren können bis zu einer Maximaltemperatur von 200 °C eingesetzt werden, was für die Durchführung der Messreihen mit PMMA ausreichend ist. Ein weiterer Grund für die Auswahl dieser Sensoren war deren geringe Baugröße, wodurch sie ohne größeren Aufwand in das Basiswerkzeug integriert werden konnten. Ein Nachteil dieser Sensoren ist jedoch deren bessere Eignung für dynamische Messungen und Kurzzeitmessungen, was die Verwendung in einem lange andauernden Heißprägezyklus einschränkt. Die gewonnenen Messdaten können daher sinnvollerweise nur zueinander in Vergleich gesetzt werden, ein Aussage über die absoluten Messwerte ist nur begrenzt möglich.

Zur Messung wurden vier Sensoren ausgehend vom Mittelpunkt mit jeweils 25 mm Abstand in eine Substratplatte eingebaut. Zur vakuumdichten Herausführung der Messkabel wurde zwischen der Heizplatte und der Substratplatte eine Zwischenplatte aus Aluminium eingefügt. Im Bereich der Drucksensoren wurden außerdem vier Thermoelemente in die Substratplatte eingesetzt, um so die Temperaturverteilung während des Prägevorgangs aufnehmen zu können. Eine Fotografie des Werkzeugs mit der Substratplatte zur Druckmessung ist in Abbildung 3.3 gezeigt. Die Substratplatte wurde bei den Messungen in der unteren Werkzeughälfte eingebaut, in der oberen Werkzeughälfte wurde ein mikrostrukturierter Messingformeinsatz verwendet.

#### **3.2.2 Durchführung der Messreihen**

Für die Messungen wurde Folienmaterial aus PMMA Typ 99530 des Herstellers Röhm verwendet. Die verwendete Folie besitzt eine Stärke von ca. 500  $\mu\text{m}$ , für die Messreihe wurden Einzelfolien mit Außenabmessungen von 100 mm  $\times$  150 mm verwendet. Die Glasübergangstemperatur dieses Polymers beträgt etwa 105 °C, die Abformungen wurden bei einer Prägetemperatur von 165 °C durchgeführt. Bei den Abformungen ergab sich die Schwierigkeit, dass die untere Heizplatte auf eine deutlich höhere

---

Temperatur als die obere Heizplatte aufgeheizt werden musste. Dies war für eine symmetrische Temperaturführung notwendig, da in der unteren Werkzeughälfte eine Zwischenplatte zur Druckmessung eingebaut war und somit eine größere Masse aufgeheizt werden musste. Zur Erzielung eines ähnlichen Temperaturverlaufs im Formeinsatz und in der Substratplatte wurde die obere Heizplatte auf ca. 170 °C und die untere Heizplatte auf 200 °C beheizt. Die Umformtemperatur der unteren Heizplatte konnte nicht weiter erhöht werden, da bei 200 °C die maximale Betriebstemperatur der verwendeten Messkabel erreicht war. Die Prägekraft wurde in 100 kN Schritten ausgehend von 300 kN auf die Maximalkraft von 1000 kN erhöht. Für jede Kraftstufe wurden mehrere Abformungen durchgeführt, zur Analyse wurde der aufgezeichnete Verlauf von Druck und Temperatur der einzelnen Prägezyklen gemittelt. Der Mittelwert wurde durch arithmetische Mittelung der Druckwerte der einzelnen Messzyklen gebildet. Dabei wurden die Messzyklen so synchronisiert, dass deren maximale Druckwerte übereinstimmten. Nach der Mittelwertbildung wurde die bei den Druckaufnehmern festgestellte, nahezu lineare Drift herausgerechnet. In den Abbildungen 3.4 bis 3.6 ist der Verlauf der Druckwerte und der Temperatur in der Substratplatte dargestellt, Abbildung 3.7 zeigt den Maximaldruck in Abhängigkeit von der Sensorposition. In Abbildung 3.8 ist der Verlauf der Restschichtdicke in Abhängigkeit von der Prägekraft dargestellt.

### **3.2.3 Analyse der Messdaten und Schlussfolgerungen für den Heißprägeprozess**

#### **Analyse der Messdaten**

Anhand der gemessenen Druckverteilungen kann der Heißprägeprozess charakterisiert und Schlussfolgerungen für die Weiterentwicklung von Maschinen- und Werkzeugtechnik gezogen werden. Die in den Abbildungen 3.4, 3.5 und 3.6 dargestellten Messwerte zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Druckverteilung von der Prägekraft. Das allgemeine

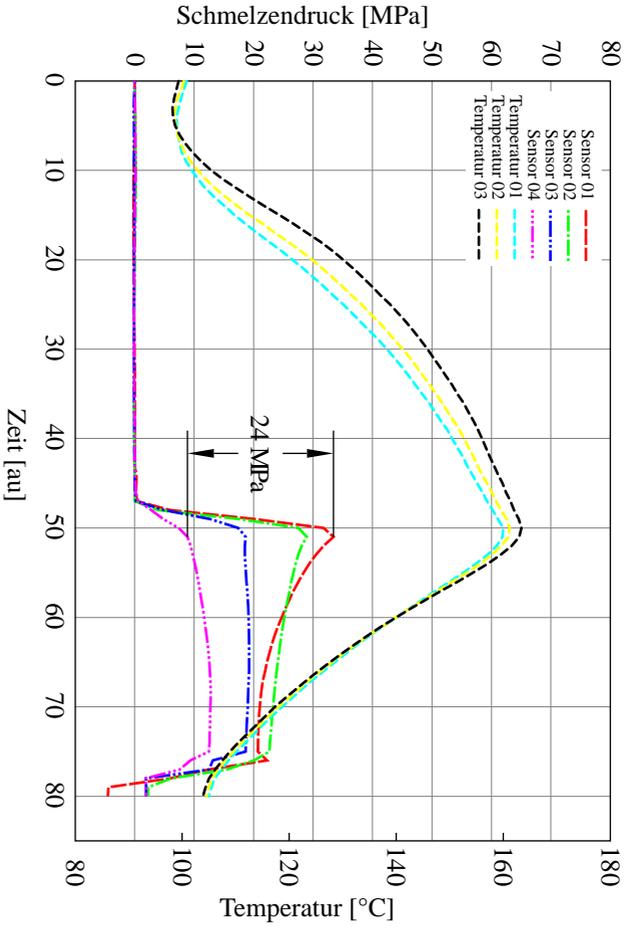
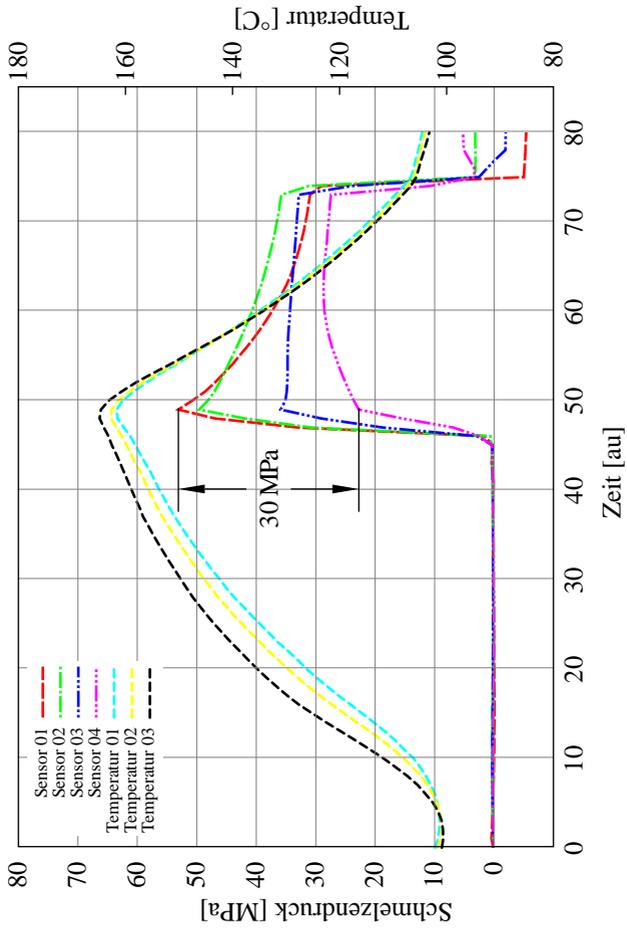


Abbildung 3.4: Gemessener Druck- und Temperaturverlauf bei einer Prägekraft von 300 kN.



**Abbildung 3.5:** Gemessener Druck- und Temperaturverlauf bei einer Prägekraft von 600 kN.

### 3 Prozessparameter für die großformatige Abformung

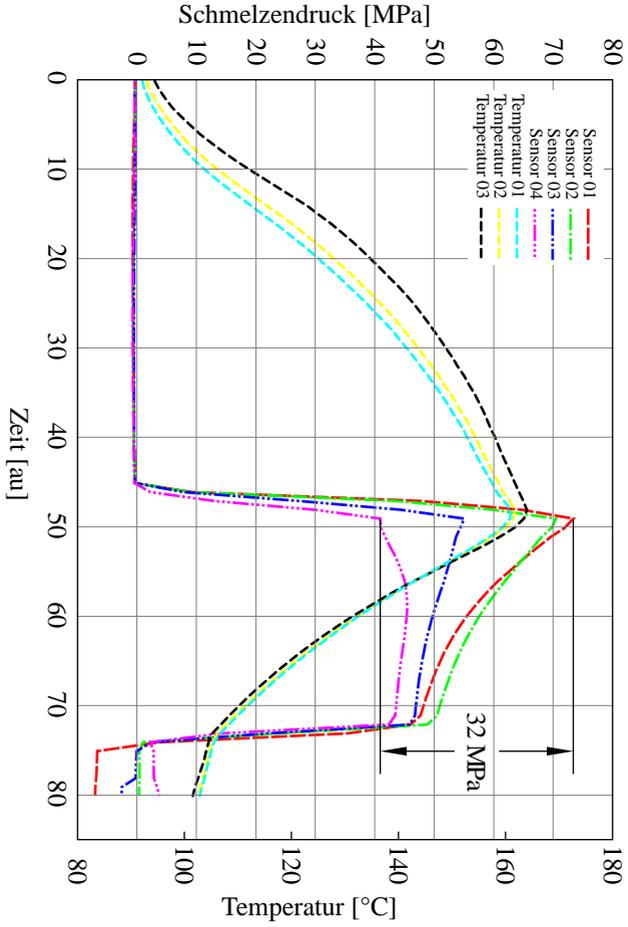
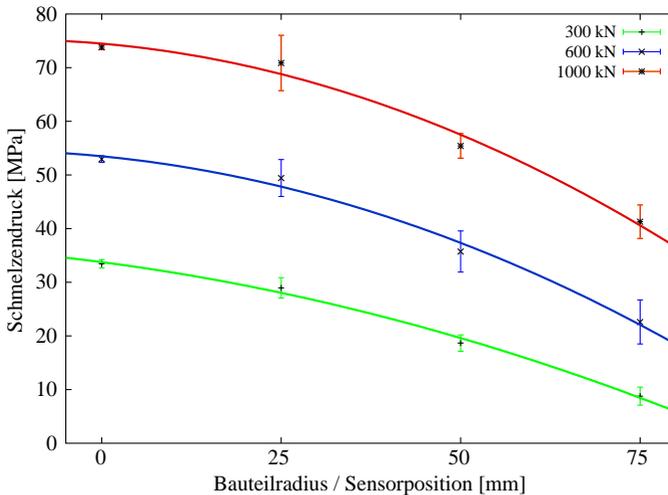


Abbildung 3.6: Gemessener Druck- und Temperaturverlauf bei einer Prägekraft von 1000 kN.



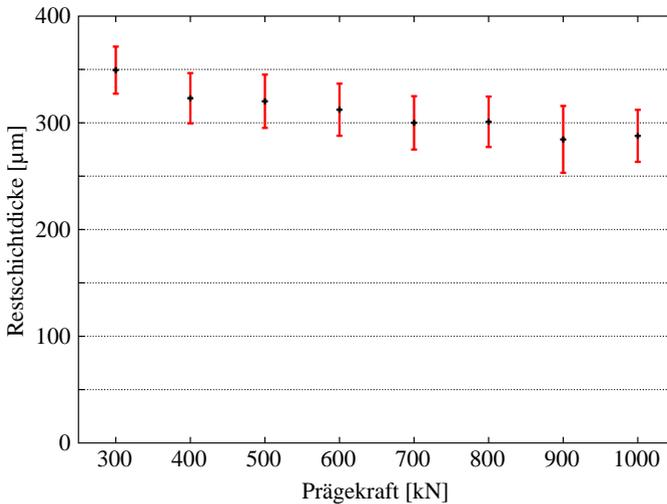
**Abbildung 3.7:** Approximation des Druckverlaufs über dem Bauteilradius anhand der gemessenen Werte und einem Polynom 2. Ordnung.

Druckniveau steigt, wie erwartet, mit zunehmender Prägekraft an. Gleichzeitig wird die Druckverteilung bei höherer Prägekraft inhomogener, was sich in einem immer größer werdenden Druckabfall zwischen dem Sensor in der Mitte (Sensor 01) und dem ganz außen liegenden Sensor (Sensor 04) zeigt. Die Differenz der Druckwerte zwischen dem zentralen und dem ganz außen liegenden Sensor nimmt dabei von etwa 24 MPa bei einer Umformkraft von 300 kN über circa 30 MPa bei 600 kN auf fast 32 MPa bei 1000 kN zu.

In Abbildung 3.7 ist zur Verdeutlichung der gemessene Maximaldruck nach Aufbau der Prägekraft über dem Bauteilradius beziehungsweise in Abhängigkeit von der Sensorposition dargestellt. Die durchgezogene Linie stellt bei jeder Umformkraft den geschätzten Druckverlauf zwischen den Messpunkten dar. Dieser Druckverlauf wurde der Theorie entsprechend

durch ein Polynom 2. Ordnung mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der parabelförmige Druckverlauf mit zunehmender Prägekraft immer steiler wird. Die größer werdende Druckdifferenz zwischen Zentrum und Randbereich lässt sich durch die viskoelastischen Eigenschaften der Polymerschmelze erklären. Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde die Prägekraft immer mit derselben Druckaufbauzeit erzeugt, somit nahm die Prägeschwindigkeit mit zunehmender Umformkraft zu. Bei höheren Umformgeschwindigkeiten reagiert ein viskoelastisches Medium zunehmend elastisch, der Einfluss des viskosen Anteils in der Polymerschmelze wird geringer und die Schmelze kann nur noch bedingt fließen. Somit fließt die Schmelze im Randbereich verhältnismäßig wenig und im Zentrum der Schmelze wird ein hoher Druck aufgebaut. Ein weiterer Grund für die größere Druckdifferenz bei hohen Umformkräften kann der Anstieg der Glasübergangstemperatur bei höherem Druck sein, wodurch die Viskosität der Schmelze abnimmt. Somit wird ein Fließen des Polymers und eine Homogenisierung des Druckverlaufs erschwert. Diese gemessenen Druckverläufe bestätigen die durch Simulationsrechnungen [13] und aus theoretischen Betrachtungen [26] zu erwartenden Druckverläufe.

In den Abbildungen 3.4 bis 3.6 ist weiterhin zu erkennen, dass sich die Druckwerte der verschiedenen Sensorpositionen während der Abkühlphase aneinander annähern, das Druckprofil im Bauteil wird insgesamt homogener. Eine Ursache hierfür liegt im weiteren Fließen der Polymerschmelze auch während der Abkühlphase und daraus folgend einem Druckausgleich im Bauteil. Bei höheren Umformkräften kann das Polymer dabei eher fließen, so dass das Druckprofil bei höheren Kräften am Ende der Abkühlung insgesamt homogener ist als bei geringen Umformkräften. Bei genügend stark abgekühltem Bauteil und somit einer sehr hohen Viskosität des Polymers liegt weiterhin keine hydrostatische Druckverteilung mehr vor, sondern annähernd ein rein statischer Druck, bei dem theoretisch keine Druckunterschiede mehr auftreten sollten.



**Abbildung 3.8:** Veränderung der Restschichtdicke bei zunehmender Prägekraft. Eingezeichnet sind Mittelwerte und Standardabweichungen von jeweils fünf Abformungen.

In Abbildung 3.8 ist die Veränderung der Restschichtdicke mit zunehmender Prägekraft dargestellt. Die Restschichtdicke wurde für jede Umformkraft an verschiedenen Positionen des Bauteils gemessen und der Mittelwert gebildet. In Abbildung 3.8 ist die gemittelte Dicke und deren Standardabweichung dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Dicke der Restschicht mit zunehmender Prägekraft nicht signifikant abnimmt, bei einer Prägekraft von 300 kN beträgt die Restschichtdicke  $349,4 \mu\text{m} \pm 44,1 \mu\text{m}$ , bei 1000 kN beträgt sie noch  $287,8 \mu\text{m} \pm 48,8 \mu\text{m}$ . Die Restschichtdicke nimmt somit bei einer Erhöhung der Prägekraft um 700 kN nur um gut  $61 \mu\text{m}$  ab, was in der Größenordnung der Standardabweichung der Restschichtdicken liegt. Diese geringe Abnahme der Restschichtdicke zeigt deutlich, dass zur Herstellung von dünnen, großformatigen Bauteilen eine hohe Prägekraft alleine nicht ausreicht. Dies

ist auch schon aus der theoretischen Betrachtung einer Quetschströmung zwischen zwei Platten in [16] zu erkennen.

#### **Schlussfolgerungen für den Heißprägeprozess**

Um im Heißprägeprozess großformatige dünne Bauteile beziehungsweise Bauteile mit dünner Restschicht herzustellen, reicht eine hohe Prägekraft alleine nicht aus. Vielmehr ist es notwendig, den Prozess durch geeignete Wahl der restlichen Parameter (Umformtemperatur, Prägegeschwindigkeit und Haltezeit) zu optimieren. Die wichtigsten Parameter sind dabei die vorgelegte Materialmenge und die Länge der Fließwege, die Umformtemperatur, die Prägegeschwindigkeit bzw. der Kraftverlauf und zuletzt die Haltezeit. Im Folgenden wird der Einfluss dieser Parameter im Heißprägeprozess dargestellt.

**Materialmenge und Fließwege:** Eine wichtige Einflussgröße sind die Abmessungen des vorgelegten Kunststoffhalbzeugs. Das bei empfindlichen Formeinsätzen verwendete Folienhalbzeug muss möglichst nahe an den Abmessungen des zu prägenden Bauteils sein, so dass während des Umformvorgangs nur wenig Material verdrängt werden muss und somit nur kurze Fließwege notwendig sind. Die Abmessungen und vor allem die Dicke der verwendeten Halbzeuge sollten wenn möglich schon beim Entwurf der Formeinsätze beachtet werden. Der Formeinsatz sollte so ausgelegt werden, dass die notwendige Verdrängung der Kunststoffschmelze möglichst lokal stattfindet. Weiterhin muss eine großflächige Restschicht rings um den strukturierten Bereich des Formeinsatzes vermieden werden, dies kann zum Beispiel durch die Verwendung einer Tauchkantendichtung anstelle der üblichen Fließspaltdichtung realisiert werden. Eine solche Tauchkantendichtung kann durch schmale Hilfsstrukturen erzeugt werden, die um die strukturierten Bereiche verlaufen. Die Höhe der Hilfsstrukturen muss dabei so ausgelegt werden, dass die Restschicht in diesem Bereich sehr dünn wird und damit ein

---

Druckaufbau innerhalb der Hilfsstrukturen möglich wird. Außerhalb der Tauchkantendichtung muss die Polymerschmelze weitestgehend frei und drucklos fließen. Die Dicke der Restschicht muss allerdings noch groß genug sein, um die Schwindung des Polymers während der Abkühlung des Bauteils ausgleichen zu können. Durch die Verwendung einer Tauchkantendichtung in Form einer Hilfsstruktur wird die Dicke des abgeformten Bauteils letztendlich durch die Restschichtdicke im Bereich der Tauchkantendichtung bestimmt. Wenn eine zu große Menge Halbzeug eingelegt wird, kann die Polymerschmelze in den Bereich außerhalb der Dichtung verdrängt werden und dort im Idealfall drucklos fließen. Somit bleibt der Prägekraftbedarf auf die strukturierte Fläche beschränkt.

**Umformtemperatur:** Die Umformtemperatur beeinflusst in erster Linie die Viskosität der Kunststoffschmelze während des Heißprägeprozesses. Eine höhere Prägetemperatur hat eine niedrigere Viskosität und somit einen geringeren Prägekraftbedarf zur Erzielung dünner Restschichten zur Folge. Die Viskosität kann im Heißprägeprozess jedoch nicht beliebig gering eingestellt werden, da sonst der für den Druckaufbau notwendige Fließwiderstand in der Restschicht zu gering wird. Die Kavitäten des Formeinsatzes können dann nicht mehr vollständig gefüllt werden. Weiterhin kann bei hoher Umformtemperatur und somit niedriger Viskosität ein starkes Kleben des Polymers am Formeinsatz beobachtet werden, wodurch die defektfreie Entformung des Bauteils behindert wird [13]. Diese Grenztemperatur bzw. Grenzviskosität stellt die obere Beschränkung des Prozessfensters dar. Bei amorphen Thermoplasten ändert sich die Viskosität innerhalb des für den Heißprägeprozess interessanten Temperaturfensters von 40 K bis 100 K über der Glasübergangstemperatur etwa um den Faktor 1000. Daher sollte die Umformtemperatur möglichst nahe am oberen Rand des Prozessfensters gewählt werden, um die notwendige Prägekraft gering zu halten.

**Prägegeschwindigkeit und Kraftverlauf:** Die Einflussmöglichkeiten durch Veränderung der Prägegeschwindigkeit beziehungsweise des Kraftverlaufs auf die Abformung sind nur beschränkt. Die im Heißprägeverfahren üblichen Prägegeschwindigkeiten liegen im Bereich von 0,5 mm/min bis 1,0 mm/min und damit schon bei sehr geringen Werten, so dass eine weitere Verringerung der Prägegeschwindigkeit keinen wesentlichen Einfluss mehr hat. Eine Veränderung des Prägekraftverlaufs, wie zum Beispiel ein gestufter Aufbau der Prägekraft, hat ebenfalls nur wenig Einfluss auf die Bauteilqualität.

Beide Einflussfaktoren, Prägegeschwindigkeit und Kraftverlauf, wirken sich jedoch implizit auf die Haltezeit aus. So wird mit einer niedrigen Prägegeschwindigkeit die Haltezeit quasi schon während des Aufbaus der Prägekraft begonnen. Ein gestufter Aufbau der Prägekraft ist ebenfalls nur mit einer Haltezeit zwischen den Kraftstufen sinnvoll.

**Haltezeit:** Die Haltezeit wird als diejenige Zeitspanne definiert, während der das Heißprägewerkzeug bei erreichter Prägekraft weiter beheizt wird. Sie ist neben der Umformtemperatur der zweite maßgebliche Einflussfaktor im Heißprägeprozess. Dies liegt vor allem an den viskoelastischen Eigenschaften von Polymerschmelzen. Bei einer solchen Schmelze werden durch Deformation eingebrachte Spannungen nicht proportional mit der Deformationsgeschwindigkeit abgebaut, sondern zeitlich verzögert. Durch diese zeitliche Verzögerung reagiert ein viskoelastisches Medium bei einer Deformation zuerst elastisch, der Abbau der inneren Spannungen und somit die eigentliche Verformung tritt erst nach einer Haltezeit ein. Für den Heißprägeprozess bedeutet dies, dass ein Fließen der Polymerschmelze in der Restschicht zeitlich verzögert nach dem Umformvorgang und der Füllung der Kavitäten einsetzt. Die Restschichtdicke nähert sich während der Haltezeit asymptotisch einem endlichen Grenzwert an, die größte Veränderung kann jedoch in

---

den ersten zwei Minuten der Haltezeit festgestellt werden [13]. Zur Erzielung dünner Restschichten und spannungsarmer Bauteile ist daher eine Haltezeit unbedingt notwendig.



# 4 Herstellungsverfahren für großformatige Formeinsätze

In diesem Kapitel werden Konzepte für großformatige Formeinsätze für den Einsatz im Heißprägeverfahren vorgestellt. Dazu werden im ersten Abschnitt die Grundlagen erläutert, daran anschließend werden Herstellungsverfahren für monolithische Formeinsätze vorgestellt. Im dann folgenden Abschnitt werden drei im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzepte für modular aufgebaute Formeinsätze genauer beschrieben. Als letztes neu entwickeltes Herstellungsverfahren wird die Herstellung von großformatigen Formeinsätzen durch Kombination abgeformter Bauteile und Galvanoformung ausführlich beschrieben.

## 4.1 Grundlagen und Stand der Technik

Für die Herstellung von Mikrobauteilen aus Kunststoff oder Keramik mittels Heißprägen oder Spritzgießen werden mikrostrukturierte Abformwerkzeuge (Formeinsätze) aus Metall benötigt. Neben den klassischen formgebenden Methoden, wie z.B. mechanischer Mikrofertigung [27], Laserbearbeitung [28], Erodierverfahren [29] oder abtragenden elektrochemischen Verfahren [30], wird für die Herstellung von Formeinsätzen mit anspruchsvollen Strukturdetails und höchsten Anforderungen an Seitenwandrauigkeit und Aspektverhältnisse vorrangig die Kombination aus Lithographie und Galvanoformung (LIGA-Verfahren) eingesetzt [31, 32].

Bei diesem Fertigungsprozess stellen die eingesetzten Lithographieverfahren (Röntgentiefenlithographie oder UV-Lithographie) oftmals eine Beschränkung in Bezug auf die Dimensionalität der zu realisierenden

Mikrostrukturen und auf die maximale Größe der strukturierbaren Fläche auf dem Werkzeug dar. Auch bei den mechanischen Herstellungsverfahren ist die strukturierbare Fläche durch die steigende Bearbeitungsdauer und die Standzeit der verwendeten Werkzeuge begrenzt.

Der Übergang zu größeren abformbaren Flächen ist jedoch sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus technischen Gesichtspunkten notwendig. So müssen zum Beispiel für die Weiterentwicklung des Heißprägeverfahrens hin zur industriellen Anwendbarkeit die Herstellungskosten pro mikrostrukturierter Bauteil verringert werden. Dies kann zum einen durch die Verkürzung der Zykluszeiten und zum anderen durch die Abformung möglichst vieler Bauteile im Nutzen erreicht werden.

Für viele Anwendungen im Bereich der Medizintechnik werden zum Beispiel standardisierte Mikrotiterplatten mit vergleichsweise großen Außenabmessungen verwendet, die auch mit funktionellen Mikrostrukturen versehen werden [33, 34]. Mit der derzeitigen Maschinen- und Werkzeugtechnik sind Abformungen mit großen Außenabmessungen möglich, die Herstellung von großflächigen mikrostrukturierten Formeinsätzen mit hohen Aspektverhältnissen ist hingegen problematisch. Die Schwierigkeiten bei der Herstellung großer Formeinsätze liegt in der großen Anzahl von Mikrostrukturen, die in der Regel sehr lange Bearbeitungszeiten erfordern. Auch die notwendige hohe Präzision wird durch den Verschleiß und die Standzeiten der Werkzeuge beeinflusst, da die Wiederholgenauigkeit bei einem Werkzeugwechsel begrenzt ist. Bei der Herstellung von Formeinsätzen durch lithographische Verfahren ist die herstellbare Fläche in der Regel durch den Lithographieschritt eingeschränkt. Größere Formeinsätze können durch abschnittsweises Belichten erzeugt werden, jedoch steigen dann auch die Bestrahlungskosten. Daher sind alternative Fertigungsverfahren für Formeinsätze notwendig, um die großformatige Abformung erfolgreich weiterentwickeln zu können.

---

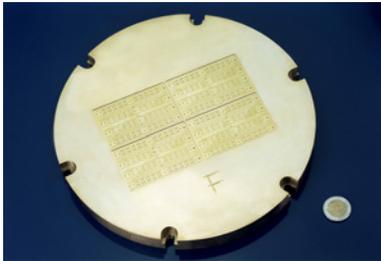
## 4.2 Monolithische Formeinsätze

### 4.2.1 Mikromechanisch hergestellte Formeinsätze

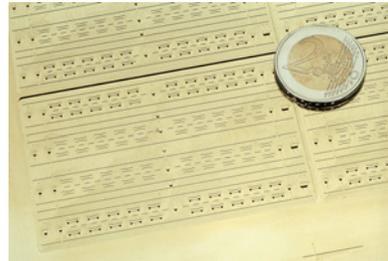
Zu den mikromechanischen Herstellungsverfahren für Formeinsätze werden alle abtragenden Verfahren gezählt. Dazu gehören klassische, spanabhebende Verfahren (Mikrofräsen, Mikrodrehen und Mikrohobeln), abtragende elektrochemische Verfahren (elektrochemisches Fräsen (ECM) [30], Mikrofunkenerosion ( $\mu$ EDM)) und auch die Laserstrukturierung.

Fast alle Verfahren sind derzeit in den Abmessungen der strukturierbaren Fläche auf  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  beschränkt. Vor allem bei Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen und somit verbunden mit einem relativ hohen Materialabtrag steigen die Bearbeitungszeiten sehr schnell an. Beim Mikrofräsen lassen sich derzeit Abtragsraten von etwa  $20 \text{ mm}^3/\text{min}$  erzielen, die elektrochemischen und laserbasierten Verfahren liegen im Bereich von unter  $0,1 \text{ mm}^3/\text{min}$  [35]. Eine Zusammenstellung der Kenngrößen für verschiedene mechanische Fertigungsverfahren ist in Tabelle A.3 im Anhang aufgeführt. Daher ist die Herstellung von großformatigen Formeinsätzen - dies bedeutet Formeinsatzdurchmesser von ca.  $250 \text{ mm}$  - mit hohen Aspektverhältnissen in der Regel aufwändig. Diese Tendenz nimmt mit kleiner werdenden Strukturen und somit den hierfür erforderlichen, kleineren Herstellungswerkzeugen und geringeren Abtragsleistungen weiter zu.

In Abbildung 4.1 ist ein mikromechanisch hergestellter, großformatiger Formeinsatz dargestellt. Der Formeinsatz hat einen Durchmesser von  $250 \text{ mm}$ , die strukturierte Fläche beträgt  $150 \text{ mm} \times 96 \text{ mm}$  mit kleinsten Strukturdetails von  $300 \mu\text{m}$ . Der Formeinsatz wurde aus Messing (CuZn39Pb2) durch Mikrofräsen hergestellt. Auf dem Formeinsatz sind Gehäusestrukturen für Flusssensoren enthalten; durch die Vergrößerung des Formates konnte die Anzahl der im Nutzen abgeformten Gehäuse von 40 Stück bei herkömmlichem Formeinsatzdurchmesser ( $\varnothing 116 \text{ mm}$ ) auf 160 Stück erhöht werden. Gleichzeitig wurde die Zykluszeit durch die Verwendung eines neuen Heißprägewerkzeugs um etwa 50% reduziert.



(a) Formeinsatz



(b) Strukturdetails

**Abbildung 4.1:** Großformatiger, mikromechanisch hergestellter Formeinsatz aus Messing (Formeinsatzdurchmesser 250 mm, strukturierte Fläche: 150 mm  $\times$  96 mm, kleinstes Strukturdetail ca. 300  $\mu$ m).

### 4.2.2 LIGA-Formeinsätze

Das LIGA-Verfahren wurde Anfang der 80er Jahre am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt und zeichnet sich durch hohe erzielbare Aspektverhältnisse und eine nahezu beliebige laterale Gestalt der Mikrostrukturen aus. Die namensgebenden Hauptprozessschritte sind die Lithographie mit Synchrotronstrahlung oder auch UV-Strahlung, die Galvanoformung von Metallstrukturen und letztendlich die Abformung durch Spritzgießen oder Heißprägen [36].

Im ersten Schritt der Lithographie wird ein Resist mit Hilfe von Masken und extrem paralleler energiereicher Synchrotronstrahlung oder auch durch UV-Belichtung strukturiert. Die nach der Entwicklung erhaltenen Primärstrukturen werden dann im zweiten Prozessschritt durch eine galvanische Abscheidung von der Grundplatte aus in eine Metallstruktur kopiert. Je nach Dauer der Abscheidung können in diesem Schritt entweder so genannte direktlithographische Metallbauteile oder bei vollständigem Überwachsen der Strukturen Formeinsätze für Replikationsprozesse hergestellt werden [37].

---

Durch die Strukturierung mit Synchrotronstrahlung und Masken lassen sich nahezu beliebige laterale Strukturen herstellen, die über eine sehr hohe Seitenwandqualität und Steilheit verfügen. Allerdings ist die maximale Abmessung der Strukturen durch den Bestrahlungsschritt begrenzt. Die typischen strukturierbaren Abmessungen eines mit Hilfe von Synchrotronstrahlung hergestellten LIGA-Formeinsatzes betragen ca. 20 mm × 60 mm, die Außenabmessungen eines Formeinsatzes betragen 30 mm × 66 mm [32]. Die Höhe der Strukturen kann zwischen wenigen Mikrometern bis in den Bereich von Millimetern betragen, die kleinsten erreichbaren Strukturdetails liegen im Bereich einiger Nanometer. Die Dicke der Formeinsätze liegt im Bereich zwischen wenigen hundert Mikrometern bei so genannten Shim-Formeinsätzen und 5 mm für das herkömmliche Formeinsatzformat.

Bei der Strukturierung des Resists mit Hilfe von UV-Belichtung lassen sich größere Bereiche strukturieren, allerdings sind Flankensteilheit und die erzielbaren Aspektverhältnisse beim UV-LIGA-Prozess geringer als beim herkömmlichen LIGA-Prozess [37].

Die strukturierbare Fläche ist somit sowohl bei mikromechanischen Herstellungsverfahren als auch bei lithografischen Verfahren beschränkt. Daher ist es notwendig, neue Konzepte zur Herstellung großformatiger mikrostrukturierter Formeinsätze mit hohen Aspektverhältnissen zu entwickeln.

### **4.3 Modular aufgebaute Formeinsätze**

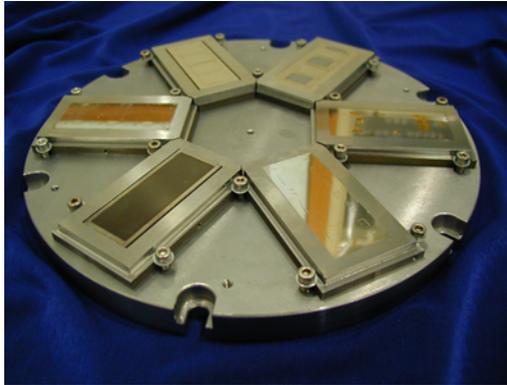
Mit den üblichen Herstellungsverfahren für mikrostrukturierte Formeinsätze mit hohen Aspektverhältnissen lassen sich derzeit nur kleinere Flächen als die im Heißprägeverfahren abformbaren Flächen strukturieren. Eine nahe liegende Lösung ist daher die Verwendung von modular aufgebauten Formeinsätzen in einem Stammwerkzeug und somit entweder die Herstellung mehrerer kleiner Bauteile im Nutzen oder auch die Herstellung eines großflächigen Bauteils mit Hilfe mehrerer, aneinander gesetzter

kleinformatiger Formeinsatzkomponenten. Dazu wurden im Rahmen dieser Arbeit drei Konzepte für solche modular aufgebauten Formeinsätze entwickelt.

- Das erste Konzept beinhaltet eine Vorrichtung, die es ermöglicht, mehrere Formeinsätze gleichzeitig in ein Heißprägewerkzeug einzubauen. Die Formeinsätze stellen bei diesem Konzept eigenständige Einheiten dar und können auch ohne die Vorrichtung abgeformt werden.
- Im zweiten Konzept werden strukturierte Formeinsatzkomponenten in eine Vorrichtung eingebaut, die die Außenabmessungen der abgeformten Bauteile bestimmt. In der Vorrichtung werden mehrere Formeinsätze gleichzeitig abgeformt, jedes Bauteil beruht jedoch auf einer einzigen strukturierten Formeinsatzkomponente. Als einzelne strukturierte Formeinsatzkomponenten wurden Shim-Formeinsätze verwendet.
- Im dritten Konzept werden mehrere strukturierte Formeinsatzkomponenten zu einem großformatigen Formeinsatz zusammengesetzt. Mit diesem Formeinsatz wird pro Prägezyklus nur ein großformatiges Bauteil hergestellt.

### 4.3.1 Vorrichtung zur Abformung mehrerer Formeinsätze

Die Vorrichtung zur gleichzeitigen Abformung mehrerer Formeinsätze besteht im Wesentlichen aus einer Grundplatte, in die ein Bohrungsmuster zur Befestigung verschiedener Formeinsätze eingebracht ist [38]. Die Grundplatte hat einen Durchmesser von 250 mm und eine Dicke von 17 mm. Mit dem vorhandenen Bohrungsmuster lassen sich bis zu sechs LIGA-Formeinsätze gleichzeitig aufspannen, wobei die Aufspannung in drei verschiedenen Anordnungen geschehen kann. Weiterhin lassen sich unterschiedliche rechteckige und quadratische Formeinsätze sowie verschieden große runde Formeinsätze auf der Grundplatte befestigen. Die



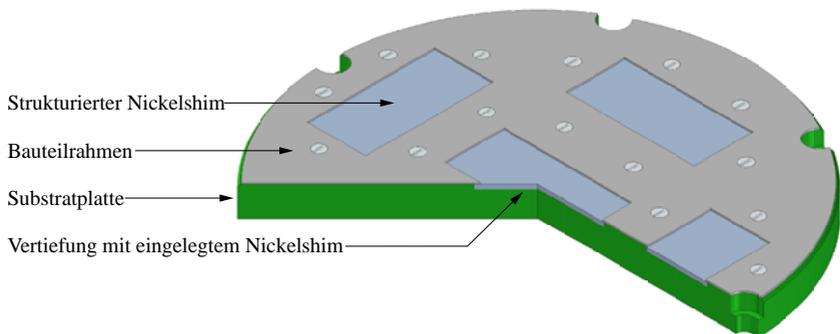
**Abbildung 4.2:** Vorrichtung zur Abformung mehrerer Formeinsätze mit sechs sternförmig angeordneten LIGA-Formeinsätzen.

unterschiedlichen Abmessungen der Formeinsätze sind in Tabelle A.4 im Anhang aufgeführt. In Abbildung 4.2 ist die Vorrichtung mit sechs sternförmig angeordneten LIGA-Formeinsätzen gezeigt.

Bei diesem Konzept müssen die Dickentoleranz bei der Fertigung und die Höhentoleranz bei der Montage der einzelnen Formeinsätze sehr eng gewählt werden, um gleichmäßige Restschichtdicken der einzelnen geprägten Bauteile zu erzielen. Durch ungleich hohe Formeinsätze besteht weiterhin die Möglichkeit, dass die Werkzeughälften verkippen und so eine defektfreie Entformung der Bauteile erschwert wird. Bei der Verwendung von Formeinsätzen mit unterschiedlichen Strukturen muss darauf geachtet werden, dass die Formeinsätze mit denselben Prozessparametern abgeformt werden können.

#### **4.3.2 Vorrichtung zur Abformung von Shim-Formeinsätzen**

Bei diesem Ansatz werden strukturierte Formeinsatzkomponenten in eine Vorrichtung eingebaut, die sowohl die äußeren Abmessungen der abzuformenden Bauteile festlegt als auch zur Fixierung und Ausrichtung der



**Abbildung 4.3:** CAD-Schnittansicht der Vorrichtung zur Aufnahme von Shim-Formeinsätzen.

Formeinsatzkomponenten dient. Als strukturierte Formeinsatzkomponenten werden dabei so genannte Shim-Formeinsätze verwendet. Dies sind in der Regel  $300\ \mu\text{m} - 500\ \mu\text{m}$  dünne, galvanisch erzeugte Nickelscheiben mit einer mikrostrukturierten Oberfläche [39, 40]. Diese Nickelshims müssen wegen ihrer geringen Dicke an allen Außenkanten niedergehalten werden. Der Niederhalter legt bei diesem Konzept gleichzeitig die Außenabmessungen der Bauteile fest und dient somit als Bauteilrahmen. Mit Hilfe dieses Bauteilrahmens werden die Shims in Vertiefungen in einer Substratplatte geklemmt, die Shims werden durch diese Vertiefungen ausgerichtet und schließen bündig mit der Oberfläche der Substratplatte ab. Die Dicke des Bauteilrahmens bestimmt somit auch die Dicke der geprägten Bauteile. Eine Skizze dieser Vorrichtung ist in Abbildung 4.3 gezeigt. Die Vorrichtung selbst ist ohne eingebaute Formeinsätze in Abbildung 4.4 dargestellt.

Die zwischen dem Bauteilrahmen und dem Nickelshim vorhandene Trennfuge muss während des Unformvorgangs gegen das Einfließen der Polymerschmelze abgedichtet werden. Dies kann in einfacher Art und Weise durch Unterlegen von dünnen Metallfolien unter den Nickelshim



**Abbildung 4.4:** Vorrichtung zur Aufnahme von Shim-Formeinsätzen für das Heißprägen. In der Abbildung sind keine Shim-Formeinsätze in die Vorrichtung eingebaut.

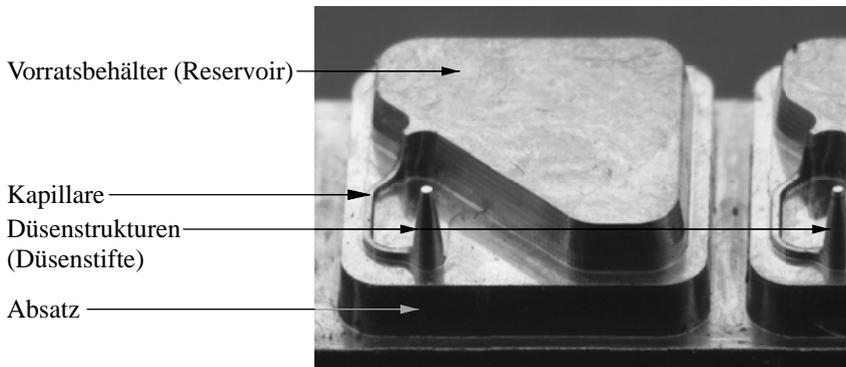
geschehen, wodurch die Dickentoleranzen der Shims ausgeglichen und der Bauteilrahmen fest auf die Nickelshims gepresst wird.

Durch die Verwendung von Shim-Formeinsätzen können mit diesem Konzept relativ schnell kleine Serien von Bauteilen mit gleichen Außenabmessungen hergestellt werden. Die Shim-Formeinsätze haben den Vorteil, dass sie recht schnell und kostengünstig zum Beispiel durch UV-Lithografie und Galvanoformung oder durch galvanische Kopie bereits vorhandener abgeformter Bauteile hergestellt werden können. Auch zur Herstellung von Bauteilen in einem Baukastensystem ist dieses Konzept geeignet, da durch einfachen Austausch der strukturierten Formeinsatzkomponenten Bauteile mit den gleichen Außenabmessungen und unterschiedlicher Strukturierung hergestellt werden können. Die Außenabmessungen müssen sich dabei nicht auf einfache Rechtecke wie in Abbildung 4.4 beschränken, sondern können beispielsweise auch Justagestrukturen beinhalten.

### 4.3.3 Großflächig strukturierter, modular aufgebauter Formeinsatz

Der Ansatz zur Verwendung mehrerer Formeinsatzkomponenten, die zusammen einen Formeinsatz bilden, ist im makroskopischen Werkzeugbau Stand der Technik [41]. Für die Abformung mikrostrukturierter Bauteile, insbesondere im Heißprägeprozess, stellt die Verwendung mehrerer Bauteile in einem Formeinsatz jedoch eine besondere Herausforderung dar, da die in der Regel erzielbaren Spaltmaße im Bereich der abformbaren Details liegen. Im Heißprägeprozess können aufgrund der Erwärmung des Polymerhalbzeugs über den Formeinsatz kleinste Spalte gefüllt werden, da der Kunststoff an den heißen Wänden des Formeinsatzes nicht erstarrt. Daher ist bei der Verwendung mehrerer Komponenten zum Aufbau eines Formeinsatzes eine hochpräzise Bearbeitung der Außenkonturen der einzelnen Komponenten notwendig. Darüber hinaus müssen die einzelnen Komponenten druckfest miteinander verbunden werden, damit sie durch die Prägekraft und den dadurch entstehenden Druck in der Polymerschmelze nicht gegeneinander verschoben werden oder Spalte bilden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zusammen mit dem Institut für Mikroaufbautechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft (HSG-IMAT) und dem Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung am Institut für Mikrosystemtechnik der Universität Freiburg (IMTEK) ein modular aufgebauter Formeinsatz zur Abformung von mikrofluidischen Strukturen im Mikrotiterplattenformat entwickelt und aufgebaut. Die mikrofluidischen Strukturen wurden am IMTEK entwickelt und dienen der Dosierung von Flüssigkeiten nach dem Prinzip der Dispensing Well Plate (DWP™). Jede dieser Strukturen besteht aus einem Vorratsbehälter (Reservoir), einer Düsenbohrung und einer Kapillare, die Vorratsbehälter und Kapillare verbindet (Abbildung 4.5) [3, 4]. Die im Formeinsatz als konische Stifte ausgebildeten Düsenbohrungen haben einen Fußdurchmesser von 380  $\mu\text{m}$  und einen Spitzendurchmesser von 100  $\mu\text{m}$ . Bei einer Höhe von 1000  $\mu\text{m}$

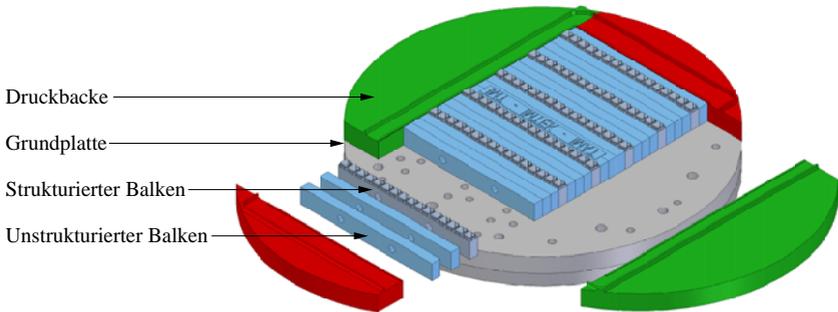


**Abbildung 4.5:** Formeinsatz für eine Dosierstruktur nach dem DWP-Verfahren. Der Abstand der beiden Düsenstifte beträgt 4,5 mm, die Höhe der Struktur insgesamt 2 mm.

entspricht dies einem Aspektverhältnis von ca. 5. Die Kapillare hat einen quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 100  $\mu\text{m}$ , das Vorratsbehältnis ist das größte Strukturelement mit Außenabmessungen von ca. 3,6 mm  $\times$  3,6 mm und einer Höhe von 600  $\mu\text{m}$ . Im Formeinsatz ist rings um jede Dosierstruktur nochmals ein Absatz eingearbeitet, der im abgeformten Bauteil in Form eines Steges die Deckelung einzelner Dosierstrukturen ermöglicht. Der Formeinsatz der DWP hat somit fünf unterschiedliche Höhenstufen bei einer Gesamtdicke des Bauteils von 2 mm.

Auf einer standardisierten Mikrotiterplatte müssen 384 dieser Dosierstrukturen vorhanden sein. Die Mikrotiterplatte hat dabei Außenabmessungen von 85,48 mm  $\times$  127,76 mm, die Einzelstrukturen sind in 16 Reihen und 24 Spalten auf einem 4,5 mm-Raster angeordnet [42, 43].

Der modular aufgebaute Formeinsatz besteht aus 24 Einzelbalken, vier so genannten Druckbacken und einer Grundplatte mit der die Bauteile verschraubt werden. Um die Tauglichkeit des Konzepts für einen



**Abbildung 4.6:** CAD-Modell des großflächig strukturierten, modular aufgebauten Formeinsatzes.

zusammengebauten Formeinsatz nachzuweisen, sind lediglich sechs der 24 Balken mit jeweils 16 Dosierstrukturen versehen, die restlichen Balken sind unstrukturiert. Aufgrund des Aufbaus aus Einzelbalken ist eine Erweiterung des Formeinsatzes auf eine vollbelegte Dispensing Well Plate jederzeit möglich.

Anhand der in Abbildung 4.6 gezeigten Explosionsansicht kann die Vorgehensweise zur Montage des Formeinsatzes erkannt werden. Im ersten Schritt der Montage des Formeinsatzes werden zwei der vier Druckbacken L-förmig auf der Grundplatte mit Passtiften ausgerichtet und fest verschraubt. Anschließend werden die strukturierten und unstrukturierten Balken sowie die beiden restlichen Druckbacken lose mit der Grundplatte verschraubt (siehe Abbildung 4.7(a)). Mit Hilfe einer Montagevorrichtung werden nun die Balken in den Winkel aus den beiden bereits fest verschraubten Druckbacken gepresst und ausgerichtet. Während der Ausrichtung der Balken werden deren Verschraubungen mit der Grundplatte nach und nach festgezogen. Sind alle Balken ausgerichtet, werden die beiden noch losen Druckbacken fest mit der Grundplatte verschraubt und die Montagevorrichtung entfernt. Durch diese Vorgehensweise kann der Formeinsatz spaltfrei zusammengesetzt werden. In Abbildung 4.7(a) und

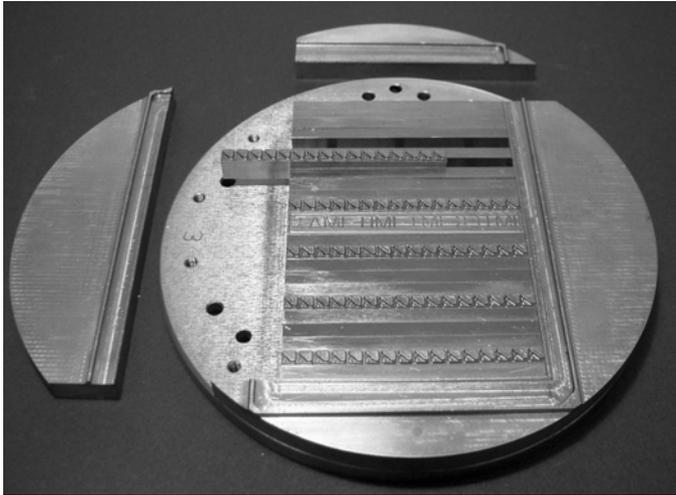
---

Abbildung 4.7(b) ist der teilmontierte Formeinsatz und der vollständig montierte Formeinsatz mit einem strukturierten Bauteil und einem Einzelbalken zu sehen.

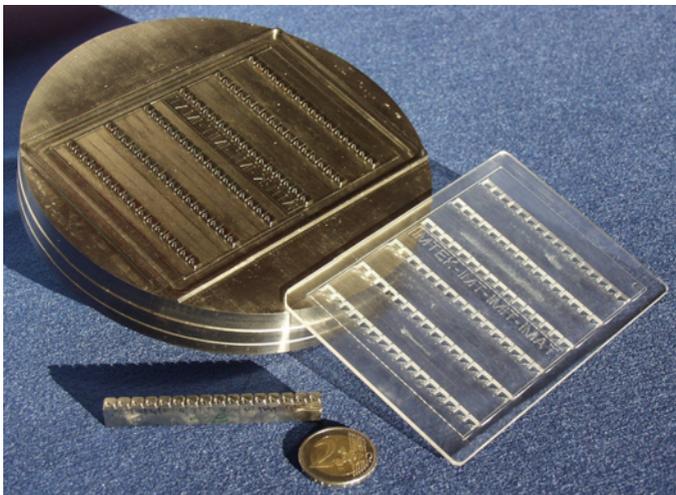
Die 24 einzelnen Balken wurden zur Einhaltung der notwendigen Toleranzen vor der Mikrostrukturierung hochgenau überschliffen. Vor der Strukturierung und dem Zusammenbau wurden die Einzelbalken nochmals vermessen und klassifiziert, so dass trotz der Addition der einzelnen Toleranzen die Gesamttolerierung der Lage der Dosierstrukturen von  $\pm 20 \mu\text{m}$  eingehalten werden konnte. Die Abweichung der Lage der Düsenstrukturen zwischen den einzelnen Balken betrug bei einem Nennabstand von 18,059 mm im Mittel 18,064 mm mit einer Standardabweichung von weniger als  $10 \mu\text{m}$ . In Abbildung 4.8 sind sowohl die Lageabweichungen der Düsenposition auf den einzelnen Balken in x-Richtung als auch die Lageabweichungen der Düsenposition auf jeweils einem Balken in y-Richtung dargestellt. Die Lageabweichungen der Düsenposition in y-Richtung auf einem Balken beruhen auf den Toleranzen des Fertigungsprozesses. Die Toleranzen zwischen den Einzelbalken in x-Richtung bilden die Summe der Toleranzen der Fertigung und der Montage des Formeinsatzes. Mit diesem Formeinsatz konnte nachgewiesen werden, dass die für das Heißprägen notwendigen engen Spaltmaße bei modular aufgebauten Formeinsätzen eingehalten werden können.

#### 4 Herstellungsverfahren für großformatige Formeinsätze

---

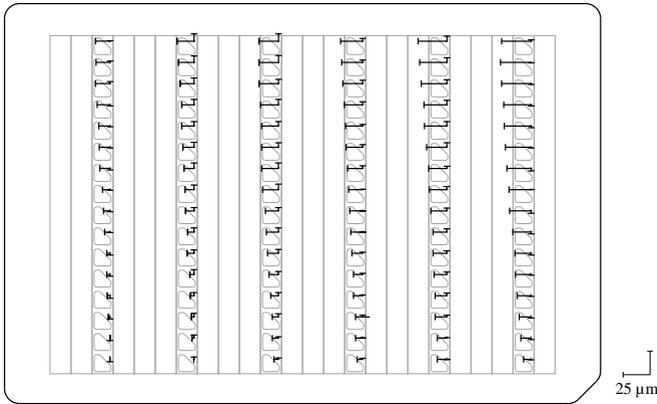


(a) Teilmontierter Formeinsatz.



(b) Formeinsatz, strukturierter Einzelbalken und abgeformtes Bauteil.

**Abbildung 4.7:** Fotografie des modular aufgebauten Formeinsatzes.



**Abbildung 4.8:** Laterale Lageabweichung der Dosierstrukturen des montierten, modularen Formeinsatzes. Aufgezeichnet ist jeweils die Abweichung der gemessenen Position der Düsenpins von der Sollposition in x- und y-Richtung.

## 4.4 Galvanisch erzeugte Formeinsätze

### 4.4.1 Verfahrensbeschreibung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Herstellung von großformatig mikrostrukturierten Formeinsätzen entwickelt, bei dem mehrere Urbauteile auf einem Substrat angeordnet und durch Galvanoformung in einen größeren Formeinsatz kopiert wurden. Die Urbauteile können dabei mit nahezu jedem Verfahren hergestellt werden. Für Formeinsätze mit sich wiederholenden Mikrostrukturen eignen sich jedoch vor allem Bauteile, die durch Replikationsprozesse hergestellt wurden, da dadurch in der Regel eine größere Anzahl an mikrostrukturierten Bauteilen mit vergleichsweise geringem Aufwand hergestellt werden kann. Durch die Herstellung in einem Replikationsprozess haben die Urbauteile alle die gleichen Abmessungen, sie unterscheiden sich lediglich durch die im

Replikationsprozess entstehenden Ungenauigkeiten. Somit können mit diesem Verfahren großformatige Formeinsätze mit vergleichbaren Toleranzen wie kleinere Formeinsätze aufgebaut werden. Darüber hinaus ist es mit diesem Verfahren möglich, Werkstoffe und Bauteile die mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren erzeugt wurden, zu kombinieren, um sie anschließend in einen Formeinsatz zu kopieren und somit neue Funktionen zu realisieren.

Eine Schwierigkeit bei diesem Herstellungsverfahren liegt in der Eignung der verwendeten Urbauteile für die Galvanoformung. Idealerweise müssen die Bauteile so gestaltet sein, dass die Metallabscheidung vom Strukturgrund starten und die Urbauteile gleichmäßig überwachsen kann. Für Urbauteile mit hohen Aspektverhältnissen sind dazu drei Bereiche notwendig. Für den Start der Metallabscheidung müssen die Bauteile im Bereich des Strukturgrundes leitfähig sein. Der Bereich der Strukturseitenwände muss hingegen isolierend sein, um ein lunkerfreies Wachstum zu ermöglichen. Der dritte Bereich ist die Strukturoberfläche, auf der auf die Struktur angepasste leitfähige Bereiche (Überwachshilfen) ein gleichmäßiges Überwachsen ermöglichen.

Mit der Möglichkeit restschichtfreie Bauteile durch Heißprägen herzustellen, wird die Erzeugung von Metallstrukturen mit Hilfe der Zweiten Galvanik<sup>1</sup> erheblich erleichtert, da die Galvanoformung ausgehend von einem leitfähigen Galvaniksubstrat direkt in den abgeformten Öffnungen starten kann und so auch Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen galvanisch kopiert werden können. Dazu müssen die geprägten Bauteile lediglich auf dem leitfähigen Substrat fixiert werden, dies kann zum Beispiel durch Aufkleben oder Festklemmen geschehen. Somit ist es auch möglich, mehrere abgeformte Bauteile spaltfrei aneinander zu setzen und durch die durchgehenden Öffnungen vollständig galvanisch zu überwachsen. Für ein gleichmäßiges Wachstum auf der Oberfläche von

---

<sup>1</sup>Als Zweite Galvanik wird die galvanische Kopie abgeformter Bauteile bezeichnet. Die dabei verwendeten Formeinsätze sind oftmals auch galvanisch hergestellt (erste Galvanoformung).

---

Kunststoffbauteilen muss diese jedoch mit Überwachshilfen metallisiert werden.

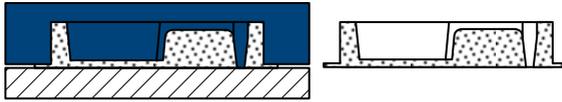
Zur Herstellung großformatiger Formeinsätze wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, das auf der Kombination und der Fixierung mehrerer kleinformatiger Bauteile auf einer Substratplatte und anschließender Galvanoformung beruht [44, 45]. In Abbildung 4.9 ist eine Übersicht der Prozessschritte dieses Verfahrens dargestellt:

- (a) Herstellung vereinzelter, kleinformatiger Kunststoffbauteile zum Beispiel durch Replikationsverfahren oder auch durch lithographische Verfahren.
- (b) Justiertes Aufkleben mehrerer dieser Bauteile auf ein Substrat für die Galvanoformung.
- (c) Aufbringen einer Metallisierung zur gezielten Kontrolle der Metallabscheidung beim Überwachsen der Kunststoffbauteile.
- (d) Einbau in eine Galvanikverschaltung und Beginn der Galvanoformung.
- (e) Ende der Galvanoformung bei vollständig überwachsenen Bauteilen.
- (f) Fertigstellung des großformatigen Formeinsatzes und Trennung vom Substrat durch Drahterodieren und nasschemisches Ätzen.

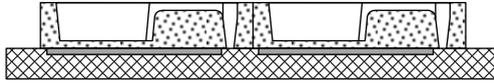
In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Verfahrensschritte genauer beschrieben. Als Demonstrator wird dabei ebenfalls die Geometrie der Dispensing Well Plate (DWP™) verwendet, mit dem Ziel die prinzipielle Machbarkeit für dieses Verfahren anhand der anspruchsvollen DWP™-Struktur nachzuweisen.

## 4 Herstellungsverfahren für großformatige Formeinsätze

---



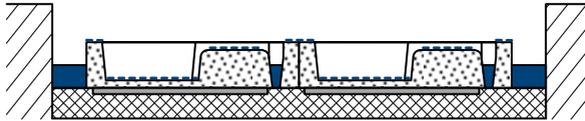
(a) Herstellung mehrerer kleinformatiger Urbauteile zum Beispiel durch Heißprägen.



(b) Justiertes Aufkleben mehrerer Bauteile auf ein Galvaniksubstrat.



(c) Aufbringen der Metallisierung zur Steuerung des Galvanikwachstums beim Überwachsen der Kunststoffbauteile.



(d) Beginn der Galvanoformung ausgehend vom Galvaniksubstrat.



(e) Ende der Galvanoformung bei vollständig überwachsenen Polymerbauteilen.



(f) Endbearbeitung und Entfernung der Urbauteile zu Herstellung des großformatigen Formeinsatzes.

**Abbildung 4.9:** Übersicht der Prozessschritte zur Herstellung von Formeinsätzen mittels galvanischer Kopie polymerer Urbauteile.

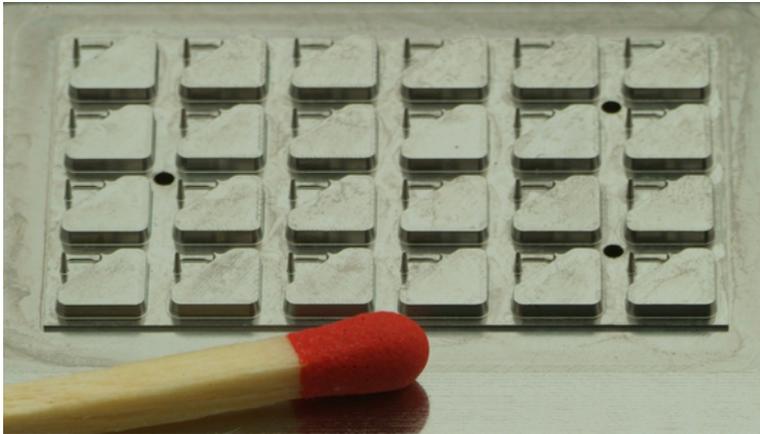
---

## 4.4.2 Herstellung der Urbauteile

Die zur galvanischen Kopie verwendeten Urbauteile können mit jedem beliebigem Mikrostrukturierungsverfahren hergestellt werden. Die einzige Einschränkung liegt in den Werkstoffen der Urbauteile, da diese nach der Galvanoformung selektiv zu der abgeschiedenen Metallstruktur löslich sein müssen. Besonders geeignet sind gut zerspanbare und ätzbare Metalle wie Messing oder Kupfer und Polymerwerkstoffe wie zum Beispiel das im LIGA-Verfahren häufig verwendete Polymethylmetacrylat (PMMA). Werden die Urbauteile im Heißprägeverfahren oder auch durch Mikrospritzguss hergestellt, können eine Vielzahl von Polymerwerkstoffen verwendet und auch deren vorteilhafte Eigenschaften ausgenutzt werden.

Zur Herstellung der Urbauteile für den Demonstrationsformeinsatz wurde ein durch HSC-Fräsen hergestellter Stahlformeinsatz verwendet [46]. Der Formeinsatz hat einen Außendurchmesser von 116 mm, die strukturierte Fläche ist 26 mm × 35 mm groß und besteht aus 24 Dispensiereinheiten mit den genormten Außenabmessungen von 4,5 mm × 4,5 mm. Zur Ausrichtung der einzelnen geprägten Bauteile beim nachfolgenden Galvanikprozess verfügt der Formeinsatz zusätzlich über drei Passbohrungen, in die während der Abformung Stifte eingepasst und so Justageöffnungen in den geprägten Bauteilen erzeugt werden. Der strukturierte Bereich des Formeinsatzes ist in Abbildung 4.10 dargestellt, in den Passbohrungen des Formeinsatzes sind noch keine Stifte eingesetzt.

Dieser Formeinsatz wurde auf einer Heißprägeanlage der Firma Jenoptik Mikrotechnik Typ HEX03et abgeformt. Als Werkstoff für die Abformungen wurden Polymethylmethacrylat (PMMA), Topas 5013 (COC), Polystyrol (PS) und Polycarbonat (PC) erprobt, um ein Optimum zwischen Abformbarkeit und Eignung für die Galvanoformung zu finden. Als der am besten geeignete Werkstoff hat sich Polycarbonat der Type Bayer Makrolon PC2405 aufgrund der guten Abformbarkeit und der für die Galvanoformung wichtigen Hydrophilisierbarkeit herausgestellt. Die Abformungen wurden bei einer Umformtemperatur von 180 °C, einer



**Abbildung 4.10:** Kleinformatiger DWP-Formeinsatz mit 24 Dosierstrukturen.

Prägekraft von 20 kN und einer Haltezeit von 200 sec durchgeführt. Ein typischer Prägezyklus ist in Abbildung A.2 im Anhang dargestellt.

Da der Formeinsatz andere Außenabmessungen hat als die letztendlich zur Galvanoformung benötigten Einzelbauteile, wurden die Bauteile nach der Abformung auf die notwendigen Außenabmessungen zugeschnitten. Weiterhin mussten die Bauteile auf der unstrukturierten Seite nochmals poliert werden, um eine ausreichende Ebenheit zum Aufkleben der Bauteile zu erzielen.

### 4.4.3 Anordnung der Bauteile auf einem Galvaniksubstrat

Im Herstellungsprozess für einen großformatigen Formeinsatz werden mehrere Einzelbauteile ausgerichtet auf eine Substratplatte aufgeklebt. Dabei muss auf folgende Punkte geachtet werden:

- Die einzelnen Urbauteile müssen sowohl untereinander als auch relativ zum späteren Formeinsatzrand ausgerichtet werden.

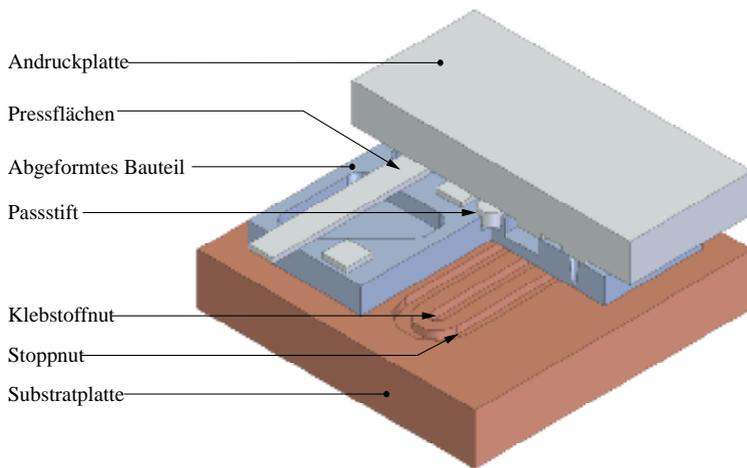
- 
- Die Bauteile müssen so aufgeklebt werden, dass die Geometrie und Funktion der Bauteile durch den Klebstoffauftrag nicht verändert werden.
  - Beim Aufkleben der Polymerbauteile müssen diese spaltfrei auf die Substratplatte gepresst werden, um ein Galvanikwachstum zwischen Bauteil und Substratplatte zu vermeiden.

Aus diesen Gründen muss eine auf die verwendeten Urbauteile angepasste Vorrichtung zum Aufkleben der Bauteile verwendet werden. Diese Vorrichtung muss zum einen die notwendige Ausrichtung der Bauteile sicherstellen und zum anderen die Bauteile so auf ein Substrat pressen, dass diese ohne Beschädigung verklebt oder auch direkt zur Galvanofornung verwendet werden können. Dazu ist es notwendig, sowohl eine strukturierte Substratplatte als auch eine auf die Urbauteile angepasste Andruckplatte zu verwenden.

Der für den Demonstrator-Formeinsatz verwendete Aufbau zum Aufkleben der abgeformten Bauteile auf die Substratplatte ist schematisch in Abbildung 4.11 dargestellt. Zur Ausrichtung und zum gezielten Anpressen der abgeformten Bauteile dient in diesem Aufbau die so genannte Andruckplatte. In dieser Platte sind Passstifte eingesetzt, die in die Justageöffnungen der geprägten Bauteile ragen und diese so zueinander ausrichten. Die Andruckplatte ist weiterhin mit Pressflächen versehen, um die abgeformten Bauteile nur in bestimmten Bereichen auf die Substratplatte zu pressen. Die Pressflächen sind dabei an die Strukturierung der Substratplatte angepasst und pressen die abgeformten Bauteile in den Bereichen auf die Substratplatte, in denen kein beziehungsweise nur wenig Klebstoff fließen soll. Dies sind zum einen die Bereiche der durchgehenden Öffnungen und zum anderen die Bereiche, in denen die abgeformten Bauteile mit der Substratplatte verklebt werden. Zur Verklebung sind in der Substratplatte Klebstoffnuten und Stoppnuten eingebracht. Die Klebstoffnuten haben die Form eines geraden Grabens mit einem Querschnitt von  $500\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ . Am Ende der Nut ist jeweils eine

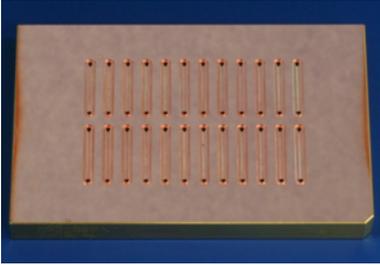
## 4 Herstellungsverfahren für großformatige Formeinsätze

---

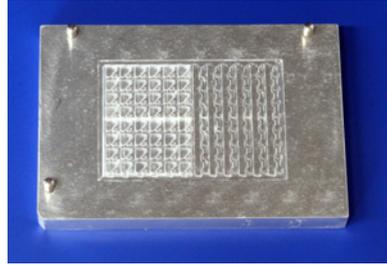


**Abbildung 4.11:** Schematische Darstellung zum Aufkleben der einzelnen Bauteile auf ein Substrat.

durchgehende Bohrung zur Befüllung mit Klebstoff von der Rückseite der Substratplatte angebracht. Die Stoppnuten umgeben die Klebstoffnuten mit einem Abstand von  $500\ \mu\text{m}$ , der Querschnitt der Nut beträgt ebenfalls  $500\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ . Im Verklebungsprozess werden die Klebstoffnuten von der Rückseite der Substratplatte mit Klebstoff gefüllt. Dieser fließt dann zwischen Bauteil und Substratplatte infolge von Kapillarkräften bis zu den Stoppnuten, an denen die Kapillarwirkung aufgrund der Vergrößerung des Querschnitts nachlässt und somit das Weiterfließen des Klebstoffs verhindert wird. Durch das gezielte Anpressen der Bauteile im Bereich der Klebstoffnut wird der Spalt zwischen Bauteil und Substratplatte minimiert und somit ein ausreichend großer Unterschied in der Kapillarwirkung am Übergang zur Stoppnut sichergestellt. Weiterhin wird durch den engen Fließspalt die Klebstoffmenge, die während der Verarbeitungszeit des Klebstoffs zur Stoppnut fließen kann, begrenzt. Daher kann die Stoppnut nicht vollständig mit Klebstoff gefüllt werden und ein Überlaufen der



(a) Strukturierte Substratplatte.



(b) Andruckplatte mit zwei aufgelegten Bauteilen.

**Abbildung 4.12:** Strukturierte Substratplatte und Andruckplatte zum Aufkleben von vier abgeformten DWP-Strukturen.

Stopppnut wird vermieden. Die für den Demonstratorformeinsatz verwendete Substratplatte ist in Abbildung 4.12(a) gezeigt, die Andruckplatte mit zwei aufgelegten Bauteilen in Abbildung 4.12(b).

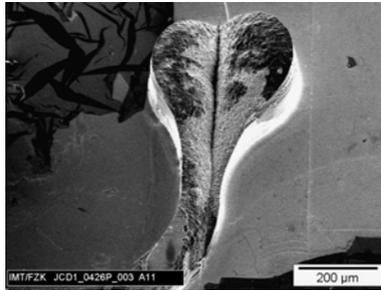
#### 4.4.4 Überwachshilfen für die Galvanoformung

Um größere nichtleitende Flächen durch galvanische Metallabscheidung überwachsen zu können, ist eine Metallisierung dieser Flächen notwendig. Diese so genannte Überwachshilfe dient dazu, das laterale Wachstum auf den Kunststoffbauteilen zu beschleunigen und Galvaniknähte zu vermeiden. Diese Galvaniknähte entstehen, wenn zwei Wachstumsfronten aufeinander treffen und so zwischen den konvex gewölbten Wachstumsfronten und der nichtleitenden Oberfläche ein Hohlraum entsteht. Wird eine vollflächige Metallisierung auf der Oberfläche verwendet, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass sich die Metallabscheidung zu schnell ausbreitet und so Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen von oben überwachsen und deshalb nicht vollständig abgebildet werden. Abbildung 4.13 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme einer Galvaniknaht, die im Bereich einer Öffnung in dem zu kopierenden Bauteil entstand. Um

solche Galvaniknähte zu vermeiden und gleichzeitig das Überwachsen größerer Flächen zu ermöglichen, müssen strukturierte Metallschichten verwendet werden.

Diese Metallschichten sollten dabei entweder an die Polymerstrukturen angepasst sein oder die gesamte Oberfläche zum Beispiel in Form eines Punktmusters überziehen. Durch die strukturierten Überwachshilfen kann das Galvanikwachstum gezielt gesteuert werden, so dass die Metallabscheidung bei Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen gezielt verzögert und in flächigen Bereichen beschleunigt wird. Die leitfähige Schicht wird über PVD-Verfahren aufgebracht. Um eine Struktur zu erzeugen, werden die Polymerbauteile während des Bedampfungsprozesses durch strukturierte Metallblenden abgedeckt. Diese Metallblenden können je nach Geometrie und Größe ihrer Öffnungen mit verschiedenen Verfahren hergestellt werden. Zur mikromechanischen Herstellung von Metallblenden eignet sich zum Beispiel Mikrobohren für einfache Lochblenden mit minimalen Bohrungsdurchmessern von unter 100  $\mu\text{m}$  und Abmessungen der strukturierten Fläche von etwa 20 mm  $\times$  20 mm. Blenden mit einer komplexeren Öffnungsgeometrie können durch Drahterodieren hergestellt werden, jedoch muss in diesem Verfahren für jede Blendenöffnung ein Startloch hergestellt werden, was die Anzahl und die minimale Größe der Blendenöffnung einschränkt. Bei größeren Außenabmessungen und sehr kleinen Blendenöffnungen können die Blenden in Form von dünnen Nickelfolien durch UV-Lithographie und Galvanoformung hergestellt werden [47]. Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung großer Blenden sind die in der Leiterplattenfertigung üblichen Ätzverfahren, allerdings sind hierbei die minimalen Abmessungen der Blendenöffnungen ebenfalls begrenzt [48].

Bei der Herstellung des Demonstrator-Formeinsatzes wurden sowohl eine auf die Strukturen angepasste Metallisierung als auch ein regelmäßiges Punktmuster als Überwachshilfe verwendet (Abbildung 4.14). Die mittels Aufdampfen aufgebraachte Metallschicht bestand jeweils aus einer

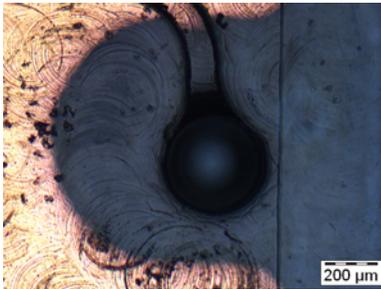


**Abbildung 4.13:** Typische Galvaniknaht beim Zusammentreffen zweier Wachstumsfronten.

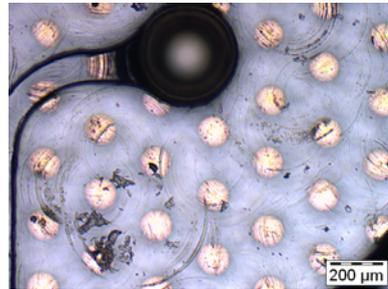
10 nm dicken Chromschicht und einer 50 nm dicken Goldschicht und wurde in einem Winkel von  $30^\circ$  aufgebracht, um auch die Seitenwände der Kunststoffstrukturen zu erreichen.

Die auf die Strukturen angepasste Metallisierung wurde so ausgelegt, dass die Düsenbohrungen in den Kunststoffbauteilen abgedeckt waren und die Vorratsbehälter und die Kapillare vollflächig bedampft wurden. Die einzelnen Dosierstrukturen waren dabei durch nichtleitende Bereiche getrennt, so dass einzelne leitfähige Felder mit Abmessungen von ca.  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  entstanden. In Abbildung 4.14(a) ist ein Ausschnitt der auf die Strukturen angepassten, leitfähigen Schicht zu sehen. Die Metallabscheidung erfolgte dann ausgehend von der Substratplatte durch die Düsenbohrungen der DWP auf die Oberfläche der geprägten Bauteile. Durch das laterale Wachstum auf der Oberfläche wurde die Metallschicht in den einzelnen Feldern kontaktiert und so ein rasches Überwachsen der DWP-Struktur ermöglicht.

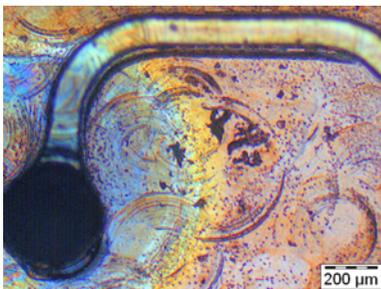
Als Alternative wurde eine einfache Lochblende zum Aufdampfen eines Kreismusters der Metallschicht verwendet. Das Kreismuster bestand aus hexagonal angeordneten Öffnungen mit einem Durchmesser von  $80 \mu\text{m}$  und einem Abstand von  $200 \mu\text{m}$ . Die Blende wurde durch Mikrobohren hergestellt. In Abbildung 4.14(d) ist die galvanische Kopie



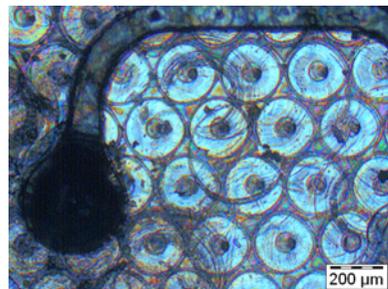
(a) Angepasste Überwachshilfe auf einem Polymerbauteil.



(b) Regelmäßiges Punktmuster als Überwachshilfe auf dem Polymerbauteil.



(c) Galvanisch hergestellte Kopie mit angepasster Überwachshilfe.



(d) Galvanische Kopie mit punktmusterförmiger Überwachshilfe.

**Abbildung 4.14:** Unterschiedliche Überwachshilfen zur Galvanoformung von Kunststoffbauteilen. Die Aufnahmen zeigen in der oberen Reihe die Kunststoffbauteile und in der unteren Reihe die galvanisch hergestellten Metallbauteile.

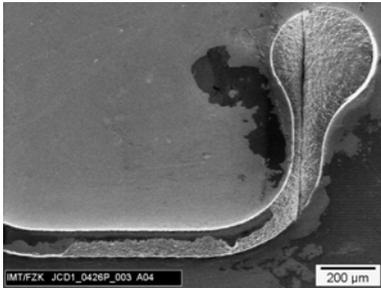
---

eines Kunststoffbauteils mit dieser punktförmigen Startmetallisierung auf der Stirnfläche zu sehen. In der Abbildung ist das kreisförmige Wachstum rund um die dunkler erscheinenden metallisierten Flächen deutlich zu erkennen. Die Metallisierung mit einem Punktmuster hat den Vorteil, dass die Blende nicht zu den Strukturen justiert werden muss. Bei gestuften Strukturen können zudem durch die Streuung im Aufdampfprozess die tieferliegenden Strukturen vollflächig metallisiert werden, während auf der Oberfläche durch die plan aufliegende Blende scharf begrenzte Metallschichten erzeugt werden. Somit kann die Metallabscheidung bei der anschließenden Galvanoformung in den tieferliegenden Bereichen beschleunigt und insgesamt ein gleichmäßigeres Wachstum erzielt werden.

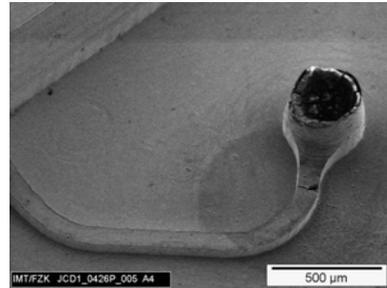
#### **4.4.5 Oberflächenmodifikation für die Galvanoformung**

Für die erfolgreiche galvanische Kopie von Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen ist es notwendig, dass die engen Strukturen vollständig mit Elektrolyt befüllt werden und während der Metallabscheidung ein ausreichend hoher Ionenaustausch in den Strukturen stattfindet. Zur vollständigen Befüllung der Strukturen ist eine gute Benetzbarkeit der Kunststoffoberfläche durch den Elektrolyt notwendig. Für die Galvanoformung wurde in dieser Arbeit ein Standardelektrolyt zur Herstellung von Nickelformeinsätzen verwendet. Dieser Nickelsulfamat-Elektrolyt besteht aus einem Nickelsalz (72 g/l Ni), einem Fluortensid (150 mg/l) zur Verbesserung der Benetzbarkeit und Borsäure (38 g/l) zur Pufferung des pH-Wertes. Die Badparameter waren auf eine Badtemperatur von 52 °C und einen pH-Wert von 3,5 eingestellt [49].

In Vorversuchen wurde die mangelhafte Abbildung einiger konischer Düsen festgestellt, typische Fehlerbilder sind in Abbildung 4.15(a) und in Abbildung 4.15(b) dargestellt. Bei beiden Fehlerbildern ist eine fehlerhafte Metallabscheidung zu erkennen. Die Struktur in Abbildung 4.15(a) wurde durch zwei Wachstumsfronten auf der Oberseite des Kunststoffbauteils überwachsen. Dabei bildeten diese beiden Wachstumsfronten eine deutlich erkennbare Galvaniknaht. Die Ursache hierfür kann mit einer in



(a) Von der Strukturstirnseite her überwachsende Düsenstruktur.



(b) Durch mangelnde Benetzung unvollständig abgebildete Düsenstruktur.

**Abbildung 4.15:** Fehlerbilder bei der galvanischen Kopie von Polymerbauteilen.

der konischen Öffnung verbleibenden Luftblase erklärt werden, die eine Metallabscheidung in den Strukturkavitäten teilweise verhindert. In der in Abbildung 4.15(b) gezeigten Düsenstruktur fand zwar Wachstum statt, jedoch wurde keine gleichmäßige Nickelschicht abgeschieden, sondern nur eine poröse Schicht an der Wand des Polymerbauteils. Die Ursache hierfür liegt wohl im mangelndem Elektrolytaustausch und daher an einer lokal zu geringen Nickelkonzentration.

Zur Verbesserung der Benetzbarkeit der Kunststoffbauteile mit dem Nickelelektrolyt und somit zur Minimierung der oben genannten Fehlerbilder wurden abgeformte Bauteile aus verschiedenen Kunststoffen mit Sauerstoffplasma behandelt und die Kontaktwinkel als Maß für die Benetzbarkeit vor und nach der Plasmabehandlung gemessen. In Tabelle 4.1 sind die gemittelten Kontaktwinkel und Standardabweichungen verschiedener Kunststoffe vor und nach der Plasmabehandlung aufgeführt. Die abgeformten Bauteile wurden jeweils in einem Sauerstoffplasma mit 200 W bei einem Druck von 0,5 mbar für 5 Minuten behandelt und im direkten Anschluss daran der Kontaktwinkel gemessen. Der nach der Plasmabehandlung am besten benetzbare Kunststoff ist COC, allerdings ist dieser

**Tabelle 4.1:** Kontaktwinkelmessungen an verschiedenen Kunststoffen mit Nickelsulfamat-Elektrolyt. Die aufgelisteten Werte und Standardabweichungen wurden durch Mittelung mehrerer Einzelmessungen ermittelt.

	PMMA	COC	PC	PS
unbehandelt [°]	84,2 ± 1,67	91,5 ± 3,40	95,4 ± 1,49	101,2 ± 2,32
O <sub>2</sub> -Plasma [°]	66,5 ± 3,36	33,7 ± 1,57	49,5 ± 3,43	53,3 ± 1,45

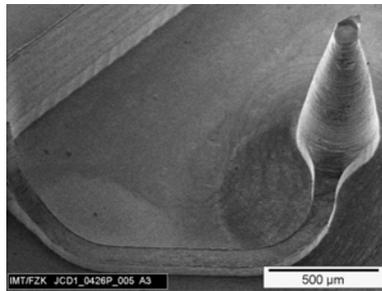
Kunststoff schwierig abzuformen und nur nach einer Vorbehandlung zu verkleben. Als Polymer mit den besten Verarbeitungseigenschaften und gleichzeitig einer recht guten Benetzbarkeit wurde Polycarbonat (PC) als Werkstoff für den weiteren Prozess ausgewählt.

#### 4.4.6 Galvanoformung des Formeinsatzes

Für die Herstellung von Formeinsätzen durch Galvanoformung müssen die Substrate mit den darauf befindlichen Kunststoffstrukturen in eine Galvanikverschalung eingebaut werden. Diese Verschalung dient der Kontaktierung des Substrats und der Abgrenzung des zu galvanisierenden Bereichs auf dem Substrat. Die Abgrenzung geschieht durch einen Rahmen, an dem die Substratplatte mittels Vakuum gehalten wird. Eine zusätzliche Abdeckung verhindert den Kontakt von Elektrolyt und der Rückseite der Substratplatte. Diese Galvanikverschalungen sind für Kupfer-Substrate mit Außenabmessungen von 84 mm × 54 mm und für Wafer mit 3'' bis 8'' Durchmesser kommerziell erhältlich [50].

#### 4.4.7 Endbearbeitung des Formeinsatzes

Der durch Galvanoformung abgeschiedene Nickelblock muss zum Einbau und zur Abformung in einer Heißpräganlage noch auf die dazu

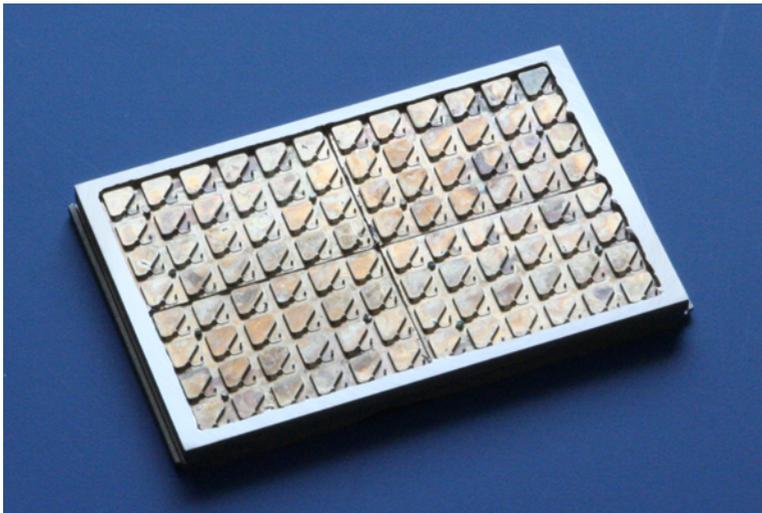


**Abbildung 4.16:** Elektronenmikroskopische Aufnahme einer galvanisch kopierten DWP-Struktur.

notwendigen Außenabmessungen zugeschnitten werden. Das bei LIGA-Formeinsätzen hierzu übliche Verfahren ist Drahterodieren, mit dessen Hilfe auch die zum Einbau in eine Werkzeugträgerplatte und zur Abformung benötigten Toleranzen erreicht werden können [32].

Zum Einbau des Formeinsatzes in eine Substratplatte wird der abgegründete Nickelblock auf der Rückseite des späteren Formeinsatzes plan erodiert, daran anschließend werden die Außenabmessungen zugeschnitten. An zwei Außenseiten werden Stufen eingebracht, mit denen der Formeinsatz später in der Substratplatte befestigt wird. Nachdem der Formeinsatz die endgültigen Außenabmessungen hat, wird die Kupfersubstratplatte ebenfalls durch Drahterodieren bis auf etwa 300 µm entfernt. Die verbleibende Kupferschicht wird anschließend chemisch entfernt, als letzter Prozessschritt werden die Kunststoff-Urbauteile mit einem geeigneten Lösungsmittel entfernt.

In Abbildung 4.16 ist eine galvanische Kopie des Düsenpins einer DWP-Struktur abgebildet. Abbildung 4.17 zeigt einen aus vier Urbauteilen hergestellten Formeinsatz mit 96 Einzelstrukturen.



**Abbildung 4.17:** Aus vier Urbauteilen durch galvanische Kopie hergestellter Formeinsatz.



# 5 Herstellung durchgehender Öffnungen im Heißprägeprozess

In diesem Kapitel werden verschiedene Verfahren zur Herstellung durchgehender Öffnungen im Heißprägeverfahren vorgestellt. Dazu werden zuerst verschiedene aus der Literatur bekannte Ansätze vorgestellt und bewertet, daran anschließend werden zwei neu entwickelte Prägeverfahren genauer beschrieben. Im ersten dieser beiden Verfahren wird ein nachgiebiger Folienstapel als Substrat verwendet, im zweiten Verfahren wird die unterschiedliche Härte zwischen Formeinsatz und Substratplatte zur Herstellung durchgehender Öffnungen ausgenutzt.

## 5.1 Grundlagen und Stand der Technik

In der Mikrosystemtechnik besteht häufig Bedarf an Kunststoffbauteilen mit durchgehenden Öffnungen, zum Beispiel bei fast allen mikrofluidischen Bauteilen wie Mikropumpen, Mikroventilen oder auch fluidischen Bauteilen für Analysensysteme. Solche Bauteile können zwar auch durch Spritzguss hergestellt werden, jedoch ist das Heißprägeverfahren gerade im Entwicklungsstadium und für kleinere Serien hierfür aufgrund seiner Einfachheit und Flexibilität gut geeignet. Bei den kleinen Stückzahlen im Entwicklungsstadium können auch keine aufwändigen Vorrichtungen zur Öffnung von Durchgangslöchern eingesetzt werden. Somit ist es notwendig, einfache Prozesse zur Herstellung von durchgehenden Öffnungen direkt im Heißprägeverfahren zu entwickeln.

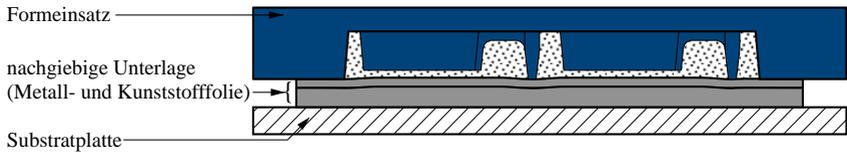
Im Heißprägeprozess wird immer eine Polymerschmelze zwischen zwei parallelen Platten verdrängt, die abgeformten Bauteile verfügen daher

immer über eine charakteristische Restschicht, die sich zwischen den parallelen Platten ausbildet. Diese Restschicht wird für den Druckaufbau, zur Formfüllung und zum Schwindungsausgleich während der Kühlphase benötigt. Zur Herstellung von Bauteilen mit durchgehenden Öffnungen muss diese Restschicht vollständig verdrängt werden. Dies ist jedoch aufgrund des Prozessprinzips schwierig.

Zur Herstellung von Bauteilen mit sehr dünnen Restschichten und von Bauteilen mit einfach zu öffnenden Bereichen gibt es einige Ansätze. In [7] wird ein Verfahren zu Abformung von Kunststoffstrukturen auf prozessierten Wafern vorgestellt. Die dabei verbleibende sehr dünne Restschicht wird durch reaktives Ionenätzen entfernt und so durchgehende Öffnungen realisiert. Ein ähnliches Verfahren wird in [51] vorgeschlagen, bei dem die im Abformverfahren entstehende Restschicht jedoch von der Rückseite her geätzt wird.

Ein weiteres in [51] vorgestelltes Verfahren ist die Abformung eines Polymerverbundes, bei dem die eigentlichen Bauteile auf einer Trägerschicht aus einem zweiten Polymer hergestellt werden. Die Polymere sind dabei so ausgewählt, dass sie eine für die Entformung ausreichende Haftfestigkeit bieten. Nach der Entformung können die geprägten Bauteile durch eine Schälbewegung von der Trägerschicht getrennt werden. Mit diesem Verfahren können somit Einzelbauteile oder Bauteile mit durchgehenden Öffnungen auf einer relativ dicken, jedoch einfach abtrennbaren Trägerschicht hergestellt werden. Der Nachteil dieses Verfahrens ist die Einschränkung in der Werkstoffauswahl. Zur Abformung und Trennung des Polymerverbundes müssen Materialkombinationen gefunden werden, die eine ausreichende Haftfestigkeit zur Entformung bieten und gleichzeitig wieder getrennt werden können. Dies ist nur mit wenigen Polymeren wie zum Beispiel Celluloseacetat (AC) als Trägerschicht und Polyoxymethylen (POM) als Bauteilwerkstoff möglich.

Für Bauteile, die nicht auf Wafern oder Trägerschichten abgeformt werden können, kann ein in [52] vorgeschlagenes Verfahren verwendet werden. Bei diesem Verfahren werden um die zu öffnenden Bereiche



**Abbildung 5.1:** Schematische Darstellung eines Aufbaus zur Herstellung von Bauteilen mit Durchgangslöchern unter Verwendung von Folienstapeln.

Kerben und somit gezielt Sollbruchstellen in das Bauteil eingebracht. Im Bereich dieser Sollbruchstellen kann das Material einfach aus dem Bauteil herausgebrochen werden [1]. Nachteilig bei diesem Verfahren ist die aufwändige Strukturierung der Formeinsätze mit Kerbstrukturen und die zwingend erforderliche Nacharbeit zur Herstellung der Öffnungen. Ein weiterer Nachteil sind die durch das Herausbrechen entstehenden Grate, die nachteilig für die Funktion des Bauteils sein können.

Ein Verfahren zur direkten Herstellung von durchgehenden Öffnungen ist das Mikroheißstanzen [53], bei dem in einem zweistufigen Prägeprozess zuerst eine Matrize aus hochtemperaturbeständigen Polymeren (z.B. PEEK oder PSU) hergestellt wird. Anschließend werden zwischen Formeinsatz und geprägter Matrize dünne Polymerfolien mit niedrigerer Glasübergangstemperatur im Fließbereich ausgestanzt. Dieses Verfahren ist jedoch auf Bauteile mit Dicken unter 200  $\mu\text{m}$  beschränkt und eine echte dreidimensionale Strukturierung ist nicht möglich.

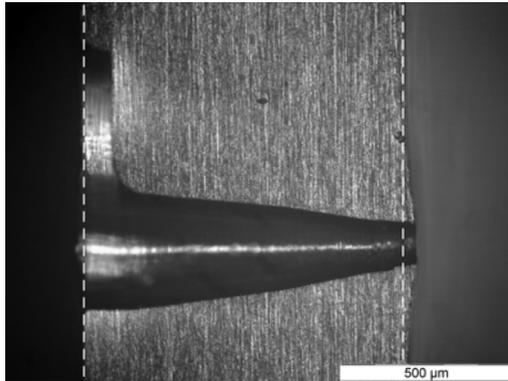
## 5.2 Abformung auf einen Folienstapel

### 5.2.1 Verfahrensbeschreibung

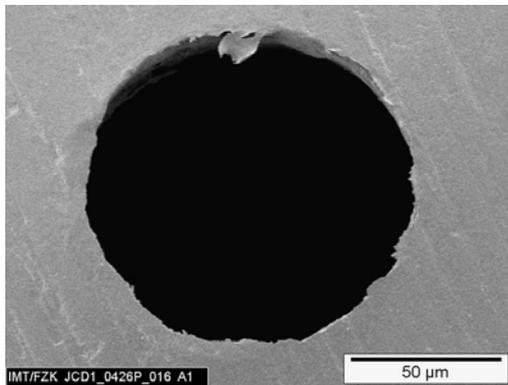
Bei diesem Ansatz wird zusätzlich zu einer herkömmlichen Substratplatte eine nachgiebige Unterlage verwendet. Diese Unterlage besteht in der

Regel aus einer weichen Polymerfolie und einer Metallfolie und kann durch geeignete Wahl der Werkstoffe und der Dicke der Folien in der Nachgiebigkeit eingestellt werden. In Abbildung 5.1 ist ein prinzipieller Aufbau für dieses Verfahren dargestellt. Durch die Nachgiebigkeit dieses Schichtaufbaus kann die Kunststoffschmelze in bestimmten Bereichen vollständig von der Stirnseite des Formeinsatzes verdrängt werden. Somit ist es möglich, die Restschicht im Bereich von großen Auflageflächen (zum Beispiel am Formeinsatzrand) zu erhalten, gleichzeitig kann die Restschicht im Bereich kleiner Auflageflächen vollständig verdrängt werden. Während der Abkühlphase wird der notwendige Nachdruck nicht durch die Restschicht, sondern durch die nachgiebige Unterlage erzeugt.

Ein Vorteil dieses Aufbaus ist, dass die Stirnseite des Formeinsatzes nicht gestuft sein muss, sondern alle Strukturen auf dem gleichen Höhenniveau liegen können. Daher können auch die weit verbreiteten lithographischen Verfahren zur Formeinsatzherstellung verwendet werden. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist die vergleichsweise weiche Unterlage, die sich unter dem Druck der Polymerschmelze verformt, daher ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, ideal planparallele Bauteile herzustellen. Die Bauteile weisen prinzipbedingt leichte Überhöhungen um die Kanten an der Stirnseite des Formeinsatzes auf. In den Abbildungen 5.2(a) und 5.3(a) sind Querschliffe von geprägten Öffnungen dargestellt. Der Querschnitt eines ideal planparallelen Bauteils ist durch die gestrichelten Linien gekennzeichnet, die Überhöhungen sind im Bereich der Düsen Spitze zu erkennen. Die Überhöhungen und die Qualität der Kanten der Öffnungen hängen stark vom Aufbau des Folienstapels und den gewählten Prozessparametern ab. Zu weiche oder auch zu dicke Polymerunterlagen haben auch bei geringen Prägekräften relativ starke Überhöhungen zur Folge. Mit dickeren Metallfolien kann dem zwar entgegengewirkt werden, jedoch steigt dann der Prägekräftenbedarf zur Erzielung von Durchgangslöchern stark an. Dies kann eine Beschädigung des Formeinsatzes bedeuten. Zur Erzielung von möglichst planparallelen Bauteilen mit guter Kantenqualität muss daher für jeden Öffnungsdurchmesser und auch für verschiedene Öffnungsformen eine angepasste Unterlage gefunden werden.



(a) Querschliff einer geprägten Öffnung. Die gestrichelte Linie entspricht einem planparallelen Bauteil. Im Bereich der Düsenpitze ist eine Überhöhung zu erkennen.



(b) Aufsicht auf die geprägte Kante mit geringen Grat.

**Abbildung 5.2:** Mikroskopaufnahmen von Abformungen auf einem Stapel aus einer 25 µm dicken Stahlfolie und einer 250 µm dicken PTFE-Folie.

Bei diesem Ansatz ergeben sich zwei Hauptschwierigkeiten. Die erste Schwierigkeit liegt in der Beschädigung der Metall- und der Polymerfolie während des Prägeprozesses. Die Metallfolie weist in der Regel bei erfolgreich hergestellten Durchgangslöchern eine Schädigung durch die Abdrücke des Formeinsatzes auf. Die darunter liegenden Polymerfolien werden durch die Prägekraft ebenfalls verformt, da die geeigneten temperaturbeständigen Polymere (z.B. PTFE, PVDF oder Silikonfolien) bei hohen Drücken zum Fließen neigen. Dies verhindert eine mehrfache Verwendung der Unterlage. Die zweite Schwierigkeit liegt in der Entformung der geprägten Bauteile. Die beim Heißprägen übliche Entformung über eine haftfeste Verbindung des Bauteils mit der Substratplatte ist bei der Verwendung von lose auf der Substratplatte liegenden Folienstapeln nicht möglich. Die Entformung unter Verwendung der Restschicht ist auch nicht einfach möglich, da die Restschicht in den Randbereichen der Bauteile sehr dünn ist und somit nur geringe Kräfte übertragen werden können. Daher muss individuell für jeden Formeinsatz eine Möglichkeit zur Entformung gefunden werden. Dazu bieten sich beispielsweise geteilte Formeinsätze oder Formeinsätze mit Absenkungen am Formeinsatzrand an, in deren Bereich die Restschicht stabiler ist und somit eine manuelle Entformung ermöglicht.

### 5.2.2 Musterabformungen

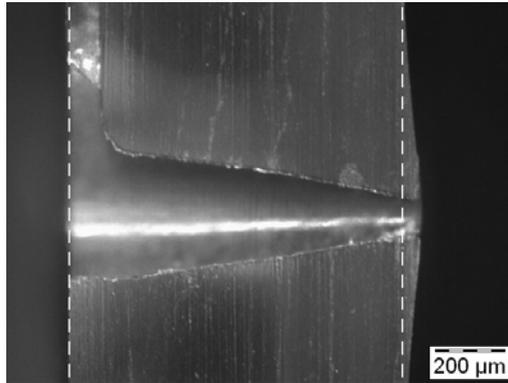
Zur Abformung von durchgehenden Öffnungen mit einem Durchmesser von 100  $\mu\text{m}$  und einer Tiefe von ungefähr 1000  $\mu\text{m}$  wurde ein gefräster Stahlformeinsatz verwendet [46]. Die für die Musterabformungen verwendeten Kunststoffe waren ein Cycloolefines Copolymer (Topas COC 5013X16) von Ticona und Polymethylmethacrylat (PMMA G77Q11) von Bayer. Dabei zeigte sich, dass eine Unterlage aus einer 250  $\mu\text{m}$  dicken PTFE-Folie und einer 25  $\mu\text{m}$  dicken Stahlfolie (1.4301) bei Prägekräften von 20 kN gute Kantenqualitäten bei beiden Kunststoffen ergab. Unter dem Folienstapel wurde eine Substratplatte aus Stahl verwendet. Die mit

---

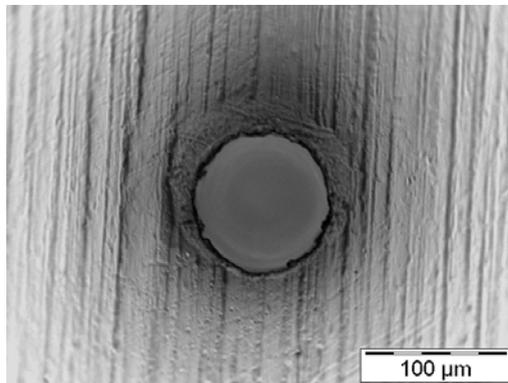
diesen Parametern in PMMA geprägten Öffnungen sind in den Abbildungen 5.2(a) und 5.2(b) dargestellt. Der Prägeverlauf für PMMA ist in Abbildung A.1 im Anhang dargestellt. Mit diesem Aufbau konnten mit beiden Kunststoffen 24 durchgehende Öffnungen mit 24 Stiften im Formeinsatz auf einer Fläche von 18 mm × 24 mm abgeformt werden. Mit diesem Aufbau konnten etwa 100 Abformungen durchgeführt werden, ohne eine messbare Beschädigung des Formeinsatzes durch den Kontakt mit der Unterlage feststellen zu können.

Durch Verwendung einer weicheren Silikonfolie anstelle der PTFE-Folie ist eine leichte Verschlechterung der Kantenqualität zu verzeichnen. Die Überhöhung nimmt jedoch rund um die geprägten Öffnungen zu. Beispielhaft sind in Abbildung 5.3 eine Aufsicht und ein Querschliff durch eine geprägte Öffnung gezeigt. Bei diesen Abformungen wurden ebenfalls die Kunststoffe PMMA und COC verwendet, die nachgiebige Unterlage bestand aus einer 25 µm dicken Stahlfolie (1.4301) und einer 250 µm dicken Silikonfolie (Typ KU-CG20) der Firma Kunze-Folien GmbH auf einer Substratplatte aus Stahl. Die Umformparameter waren dabei die gleichen wie die in Abbildung A.1 im Anhang gezeigten.

Eine weitere Möglichkeit zur Abformung auf eine nachgiebige Unterlage ist die Verwendung von einem Materialstapel aus einer Stahlfolie und einer Unterlage aus Reinaluminium auf einer Substratplatte aus Stahl. Aufgrund der geringen Härte von Reinaluminium muss die Aluminiumunterlage genau wie auch die Unterlagen aus Polymerfolien mit einer härteren Metallfolie abgedeckt werden, um eine zu starke Verformung des Aluminiums zu vermeiden. Die in Abbildung 5.4 gezeigten Öffnungen wurden mit einem Messingformeinsatz auf eine Aluminiumplatte (EN AW-1050A A199,5) und eine 120 µm dicke Stahlfolie (1.4301) abgeformt. Abbildung 5.4(a) zeigt eine Aufnahme einer durchgehenden Öffnung, die mit ausreichender Prägekraft hergestellt wurde. In Abbildung 5.4(b) wurde eine zu geringe Prägekraft gewählt, so dass noch eine dünne Restschicht vorhanden war. Beide Abformungen wurden aus Polysulfon (PSU) hergestellt. Trotz der Abdeckung mit einer Stahlfolie wird das Aluminiumsubstrat durch die Prägekraft derart verformt, dass eine Wiederverwendung

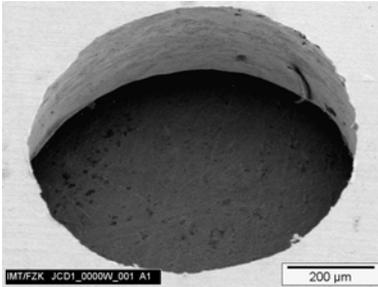


(a) Querschliff einer geprägten Öffnung. Die gestrichelte Linie entspricht einem planparallelen Bauteil. Im Bereich der Düsenspitze ist eine Überhöhung zu erkennen.

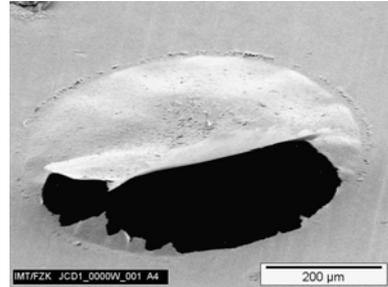


(b) Aufsicht auf die geprägte Kante mit geringen Grat.

**Abbildung 5.3:** Mikroskopaufnahmen von Abformungen auf einem Stapel aus einer 25  $\mu\text{m}$  dicken Stahlfolie und einer 250  $\mu\text{m}$  dicken Silikonfolie.



(a) Ausreichende Prägekraft.



(b) Zu geringe Prägekraft.

**Abbildung 5.4:** Elektronenmikroskopische Aufnahmen von geprägten Durchgangslöchern. Die Öffnungen wurden durch Abformung auf einen Stapel aus einer Stahlfolie und einer Unterlage aus Reinaluminium hergestellt.

nicht möglich ist. Auch die Problematik der Entformung bleibt bei diesem Ansatz bestehen, da weiterhin ein loser Materialstapel als Substrat verwendet wird. Durch die im Vergleich zu den Polymerfolien harte Unterlage ist dieser Aufbau aus Reinaluminium und einer Stahlfolie für relativ große und mechanisch stabilere Strukturen geeignet.

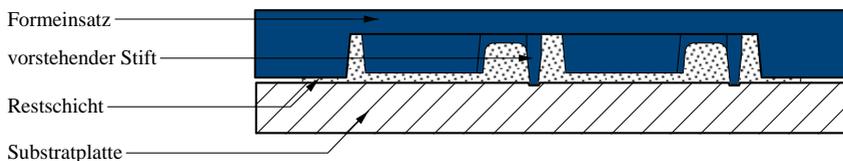
## 5.3 Abformung auf weiche Substrate

### 5.3.1 Verfahrensbeschreibung

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung durchgehender Öffnungen im Heißprägeprozess ist die Verwendung von Materialpaarungen aus einem harten Formeinsatz und einer weichen Substratplatte anstelle von Folienstapeln. Die Abformungen mit einem Messingformeinsatz auf eine Substratplatte aus Reinaluminium zeigen bereits die Möglichkeit, Durchgangslöcher unter Ausnutzung unterschiedlicher Härte von Formeinsatz

## 5 Herstellung durchgehender Öffnungen im Heißprägeprozess

---



**Abbildung 5.5:** Schematische Darstellung eines Aufbaus zur Herstellung von Bauteilen mit durchgehenden Öffnungen unter Nutzung unterschiedlicher Härte von Formeinsatz und Substratplatte.

und Substratplatte herzustellen. Daher wurden bei diesem Ansatz Materialpaarungen mit unterschiedlicher Härte auf die Eignung zur Herstellung durchgehender Öffnungen untersucht. Geeignete Materialpaare zeichnen sich dadurch aus, dass der Formeinsatz wenige Mikrometer in die Substratplatte eingedrückt werden kann, ohne den Formeinsatz zu beschädigen und starke Verformungen der Substratplatte zu erzeugen. Die Verformung der Substratplatte muss dabei auf die Eindrücke des Formeinsatzes beschränkt bleiben, Aufwerfungen rund um die Eindruckbereiche sollen durch geeignete Werkstoffwahl vermieden werden. In Abbildung 5.5 ist ein prinzipieller Aufbau dieser Herangehensweise gezeigt.

Um einen Formeinsatz in die Substratplatte eindrücken zu können, ist es notwendig, dass die Bereiche der durchgehenden Öffnungen über die Stirnseite des Formeinsatzes herausstehen. Diese vorstehenden Bereiche müssen mechanisch stabil genug sein, so dass sie durch die beim Eindrücken in die Substratplatte entstehenden Kräfte nicht beschädigt werden. Weiterhin müssen die vorstehenden Bereiche mit einer ausreichenden Ebenheit gefertigt werden. Diese Ebenheit sollte besser sein, als die maximale Eindringtiefe der hervorstehenden Bereiche während des Prägevorgangs, um einen vollflächigen Kontakt sicherzustellen. Die während des Heißprägeprozesses durch den Kontakt von Formeinsatz und Substratplatte entstehenden Kräfte müssen durch die richtige Auslegung des Formeinsatzes und der Wahl geeigneter Prozessparameter minimiert werden. Dazu

---

muss die verbleibende Restschicht so dünn ausgelegt werden, dass die Prägekraft zu einem Großteil durch die Viskosität beziehungsweise durch den Fließwiderstand der Polymerschmelze aufgefangen wird. Dadurch werden die hervorstehenden Bereiche des Formeinsatzes durch eine entsprechende Haltezeit mit geringen Prägekräften in die Substratplatte eingedrückt. Bei der ersten Abformung eines Formeinsatzes auf einer neuen Substratplatte entsteht so ein Abdruck der hervorstehenden Bereiche des Formeinsatzes. In den folgenden Prägezyklen können die hervorstehenden Bereiche wieder in die Abdrücke aus dem vorhergehenden Zyklus eintauchen. Dies ist in der Regel aufgrund der hochgenauen Führungen der Heißpräganlagen und Werkzeug ohne Versatz möglich. Wegen der unterschiedlichen Werkstoffe von Formeinsatz und Substratplatte und deren Wärmeausdehnungskoeffizienten muss jedoch die Umformtemperatur in jedem Zyklus möglichst genau auf denselben Wert eingestellt werden. Dies ist insbesondere bei großformatigen Formeinsätzen wichtig, da wegen deren größeren Abmessungen der Betrag der Wärmeausdehnung größer ist.

### **5.3.2 Musterabformungen**

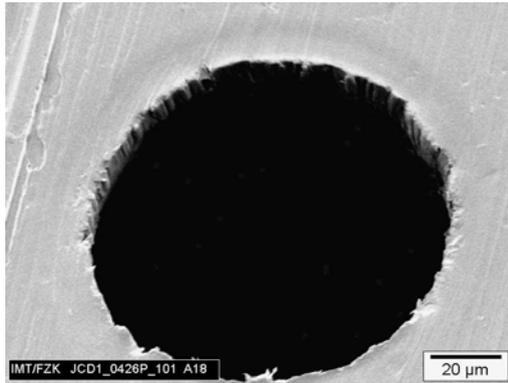
#### **Materialpaarung Messing - unbehandelter Stahl**

Für die Musterabformungen wurde der in Abschnitt 4.3 beschriebene Formeinsatz verwendet. Die als durchgehende Öffnungen zu prägenden Düsenstrukturen wurden im Formeinsatz etwas länger als notwendig hergestellt, so dass noch ein Eindringen von circa  $5\ \mu\text{m}$  in die Substratplatte möglich war. Der Formeinsatz wurde aus Werkzeugstahl (1.2767) hergestellt, die verwendete Substratplatte bestand aus Messing (CuZn39Pb2). Der Formeinsatz wies eine im Kleinlasthärteprüfverfahren nach Vickers gemessene Härte von  $192 \pm 5\ \text{HV}(0,1)$  auf, die Substratplatte wies eine gemessene Härte von  $157 \pm 5\ \text{HV}(0,1)$  auf. Schon dieser geringe Unterschied in der Härte der verwendeten Werkstoffe reichte aus, um durchgehende Öffnungen mit  $100\ \mu\text{m}$  Durchmesser abzuformen. Dabei wurden alle 96 im Formeinsatz als Düsenpin ausgebildeten Strukturen als durchgehende

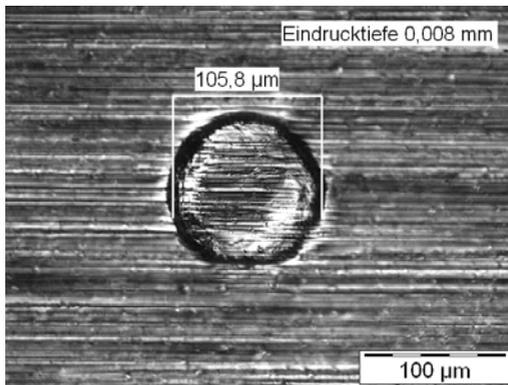
Öffnungen abgeformt [54]. In Abbildung 5.6(a) ist eine geprägte Öffnung zu sehen, in Abbildung 5.6(b) ist ein Eindruck eines Stahlstifts in der Messingsubstratplatte zu sehen. Die Tiefe des Eindrucks in der Substratplatte beträgt etwa 8  $\mu\text{m}$ , insgesamt konnte eine maximale Eindrucktiefe von 15  $\mu\text{m}$  festgestellt werden.

Für die Abformungen mussten die Abmessungen und die Dicke der verwendeten Polymerfolien genau definiert werden, da sich eine deutliche Abhängigkeit der Restschichtdicke von der Materialmenge zeigte. Während des Abformprozesses konnte die Polymerschmelze nur in geringem Maß vom strukturierten Bereich des Formeinsatzes zum Rand hin verdrängt werden, trotz der langen Prägezeit von 600 s bei einer Umformtemperatur von 165 °C für PMMA und einer Prägekraft von 145 kN. Das zur Abformung mit dem Präzisionswerkzeug verwendete Makro ist in Abbildung A.3 im Anhang aufgelistet.

Neben den Umformparametern spielte auch die Wahl der richtigen Entformtemperatur eine wichtige Rolle, da der Kunststoff bei relativ großen Abständen zwischen den Strukturen über große Bereiche frei schrumpfen kann. Bei zu niedriger Entformtemperatur entstehen dabei hohe Entformkräfte, die eine defektfreie Entformung des Bauteils erschweren. In Abbildung 5.7 ist der Abstand zwischen zwei Strukturen, in denen das Polymer ungehindert schrumpfen kann, dargestellt. Durch einen großen Abstand zwischen zwei Strukturen (1) wird durch die Schrumpfung des Polymers bei zu geringer Entformtemperatur eine Querkraft in die Düsenstifte eingeleitet. Bei geringeren Strukturabständen (2) ist der Einfluss der Wärmedehnung des Polymers geringer. Im Bereich der großen Strukturabstände wurden die Düsenstifte im Formeinsatz sogar verbogen. In den Bereichen, in denen die Düsenstifte durch die Reservoirs geschützt wurden, konnte keine Verformung festgestellt werden. Der Schrumpf des Polymers wird dabei durch die Reservoirs behindert, die massivere Reservoirstruktur nimmt die durch den Schrumpf des Polymers entstehenden Kräfte auf.

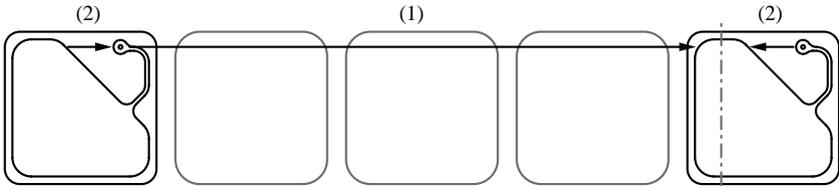


(a) Mikroskopaufnahme einer geprägten durchgehenden Öffnung.



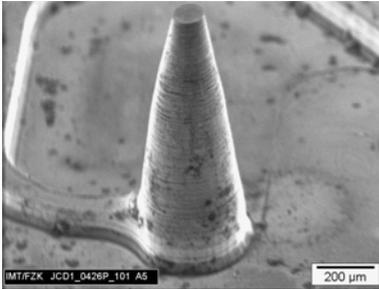
(b) Aufnahme eines Eindruckes in der Substratplatte.

**Abbildung 5.6:** Mikroskopaufnahmen eines geprägten Durchgangslochs und eines Eindruckes in der Substratplatte. Die Öffnungen wurden durch Abformung mit einem Stahlformeinsatz auf eine Messing-Substratplatte hergestellt.



**Abbildung 5.7:** Schrumpfungseinflüsse bei der Abformung durchgehender Öffnungen. Ungehinderter Schrumpf (1) und durch die Reservoirstruktur behinderte Schrumpfung des abgeformten Bauteils (2). Die strichpunktierte Linie stellt die Mittelachse des Bauteils dar.

Ein weiteres Problem stellte die unzureichende mechanische Festigkeit der Düsenstifte während der Abformung dar. Die Stifte waren im Layout derart ausgelegt, dass sie  $200\ \mu\text{m}$  über den Rand des Formeinsatzes herausragten, bei einer Abformung der Düsenstifte als Durchgangslöcher entsteht somit eine knapp  $200\ \mu\text{m}$  dicke Restschicht im Randbereich des Formeinsatzes. Diese Restschichtdicke war in Vorversuchen gerade noch erreichbar, so dass ein ausreichender Schutz der Düsenstifte sichergestellt werden sollte. Der angenommene Wert für die Restschichtdicke gilt für eine ideale Abformung ohne Verformung der Düsenstifte. Im Laufe der Abformungen konnte jedoch eine Abnahme der Restschichtdicke im Randbereich und eine Stauchung der Düsenstifte festgestellt werden. Die Stauchung der Düsenstifte trat vor allem bei schon durch Schrumpfungseffekt vorverformten Düsenstiften auf, im schlimmsten Fall wurden die Stifte um fast  $200\ \mu\text{m}$  gestaucht. In Abbildung 5.8(a) ist eine Aufnahme eines unverformten Düsenstifts zu sehen, Abbildung 5.8(b) zeigt einen durch die Prägekraft verformten Düsenstift.



(a) Unverformter Düsenstift.



(b) Durch Prägekräfte verformter Düsenstift.

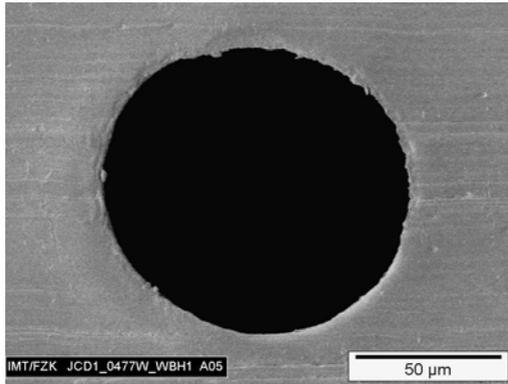
**Abbildung 5.8:** REM-Aufnahmen von Düsenstiften im DWP-Formeinsatz.

### Materialpaarung Messing - vergüteter Stahl

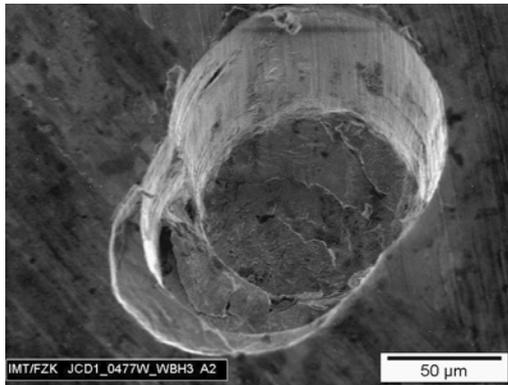
Als weitere Materialpaarung wurde ein härterer Stahlformeinsatz in Kombination mit einer Messingsubstratplatte erprobt. Hierzu wurde der verwendete Stahl (1.2767) vergütet. Im ersten Schritt der Vergütung wurde der Formeinsatz in einem Vakuumofen 5 min bei 650 °C vorgewärmt und anschließend bei 850 °C für eine Dauer von 15 min austenitisiert. Im zweiten Schritt wurde der Formeinsatz in Öl abgeschreckt. Nach dem Härten wurde der Formeinsatz in einem dritten Schritt bei 300 °C während 120 min angelassen und langsam auf Raumtemperatur abgekühlt. Dadurch konnte die gemessene Härte von  $192 \pm 5$  HV(0,1) im unbehandelten Zustand auf  $556 \pm 4$  HV(0,5) erhöht werden. Als Substratplatte wurde weiterhin eine Messingplatte mit einer Härte von  $157 \pm 5$  HV(0,1) verwendet. Nach der Vergütung des Formeinsatzes konnten keine Maßänderungen oder Verformungen der Mikrostrukturen, die nicht innerhalb der geforderten Toleranzen lagen, festgestellt werden. Auch die während der Wärmebehandlung entstehende Oxidschicht hatte auf die Abformbarkeit des Formeinsatzes keinen messbaren Einfluss.

Mit dem wärmebehandelten Formeinsatz konnten ebenfalls durchgehende Öffnungen abgeformt werden. Die Prozessparameter entsprachen denen

bei der Abformung des unbehandelten Formeinsatzes. Die mit dem wärmebehandelten Formeinsatz hergestellten Düsen hatten eine ausgezeichnete Kantenqualität, eine Verformung der Düsenstifte während der Abformung durch Schrumpfung des Polymers oder durch Umformkräfte konnte nicht mehr festgestellt werden. Eine elektronenmikroskopische Aufnahme einer geprägten Öffnung ist in Abbildung 5.9(a) gezeigt, in Abbildung 5.9(b) ist ein Abdruck eines wärmebehandelten Düsenstifts in der Messingsubstratplatte zu sehen. Die hier gezeigte ovale Form des Abdrucks entstand durch Spiel in der Führung des verwendeten Heißprägewerkzeugs. Trotz der versetzten Eindrücke der Düsenstifte in der Substratplatte und den somit entstehenden Querkräften wurden die Stifte während des Prägevorgangs nicht verformt.



(a) Geprägte Öffnung.



(b) Eindruck eines Düsenstifts in die Messingsubstratplatte.

**Abbildung 5.9:** Mikroskopaufnahmen von geprägten Öffnungen und Eindrücken in der Messingsubstratplatte bei Verwendung eines wärmebehandelten Stahlformeinsatzes.



## 6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Heißprägeverfahren für große Formate und Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen weiter entwickelt. Dazu wurde der Heißprägeprozess im Hinblick auf die Abformung von großformatigen Formeinsätzen und von Bauteilen mit durchgehenden Öffnungen hin untersucht und weiterentwickelt. Im Rahmen dieser Entwicklung wurden neue Verfahren zur Herstellung großformatiger Formeinsätze und durchgehender Öffnungen ausgearbeitet. Als Demonstratorbauteil wurde dabei die Geometrie der Dispensing Well Plate (DWP<sup>TM</sup>) verwendet, die wegen der großen Außenabmessungen, dem hohen Aspektverhältnis und den notwendigen durchgehenden Öffnungen sowohl für die Abformung als auch für die Formeinsatzherstellung sehr anspruchsvoll ist.

Für die Weiterentwicklung des Heißprägeverfahrens wurde die neu entwickelte Heißprägeanlage Wickert WMP1000 der Firma Wickert Maschinenbau GmbH (Landau) in Betrieb genommen und an den am IMT üblichen Heißprägeprozess angepasst. Mit dem zur Anlage gehörenden Basiswerkzeug wurden grundlegende Messungen zur Druckverteilung in der Polymerschmelze durchgeführt. Die Messungen bestätigen die theoretisch erwarteten Ergebnisse früherer Arbeiten und dienen als Grundlage zur Optimierung der Abformung großformatiger Bauteile. Anhand dieser Messungen ist zukünftig auch die Auslegung von Maschinensteuerungen, Heißprägewerkzeugen für große Formate und Formeinsätzen möglich.

Ein weiterer Themenkomplex war die Entwicklung verschiedener Möglichkeiten zum Aufbau großformatiger Formeinsätze. Dazu wurden zwei Lösungsansätze ausgearbeitet. Der erste Lösungsansatz beruht

auf modular aufgebauten Formeinsätzen, der zweite Ansatz beruht auf galvanisch erzeugten Formeinsätzen.

Für modular aufgebaute Formeinsätze wurden drei Konzepte entwickelt, die von einer einfachen Vorrichtung zur Aufspannung mehrerer Formeinsätze in einem Heißprägewerkzeug über eine Vorrichtung zur Halterung von Shim-Formeinsätzen bis hin zu einem großformatigen, aus mehreren Komponenten zusammengebauten Formeinsatz reichen. Als Demonstrator für einen aus mehreren Komponenten aufgebauten Formeinsatz wurde ein Formeinsatz mit der DWP™-Struktur aufgebaut. Bei den positionskritischen Strukturen dieses Formeinsatzes konnte eine Standardabweichung vom Nennmaß von unter 10 µm erzielt werden. Mit diesem Formeinsatz wurde erstmals gezeigt, dass bei großflächigen, gebauten Formeinsätzen sehr enge Toleranzen erzielt werden können und ein spaltfreier Zusammenbau mehrerer Formeinsatzkomponenten möglich ist.

Mit der Entwicklung eines Verfahrens zur galvanischen Kopie abgeformter Kunststoffbauteile wurde eine weitere Möglichkeit zur Herstellung großformatiger Formeinsätze geschaffen. Bei diesem Verfahren werden mehrere kleinformati- ge, mit einem Urformeinsatz abgeformte Bauteile auf ein großformatiges Substrat aufgeklebt und durch Galvanoformung in eine Metallstruktur kopiert. Diese Metallstruktur kann dann als großformatiger Formeinsatz verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses Verfahren exemplarisch zur Herstellung eines Formeinsatzes für die DWP™ verwendet. Dazu wurden vier abgeformte Bauteile mit jeweils 24 Einzelstrukturen justiert auf ein Galvaniksubstrat aufgeklebt, eine Startmetallisierung aufgebracht und durch Galvanoformung in eine Nickelstruktur umkopiert, die nach der Endbearbeitung als Formeinsatz verwendet werden kann. Mit diesem neuen Verfahren können somit in kurzer Zeit großflächig mikrostrukturierte Formeinsätze aus kleinformati- gen Urbauteilen hergestellt werden.

Im dritten Teil der Arbeit wurden zwei Verfahren zur Herstellung durchgehender Öffnungen direkt im Heißprägeverfahren entwickelt. Im ersten Verfahren wird eine nachgiebige Unterlage anstelle der harten

---

Substratplatte verwendet. Die aus einer Metall- und einer Polymerfolie bestehende nachgiebige Unterlage ermöglicht die Erzeugung durchgehender Öffnungen direkt im Heißprägeprozess. Dabei sind keine gestuften Formeinsätze notwendig, daher ist dieses Verfahren auch für die in der Mikrostrukturtechnik weit verbreiteten lithografisch erzeugten Formeinsätze geeignet. Der Werkstoff und die Dicke der Metall- und der Polymerfolie müssen bei diesem Verfahren an die Abmessungen der durchgehenden Öffnungen angepasst werden. Als Demonstrationsbauteil wurde die DWPT<sup>TM</sup> mit 24 Öffnungen mit jeweils 100 µm Durchmesser auf einer Fläche von 18 mm × 24 mm erfolgreich abgeformt. Als Unterlage wurden eine 25 µm dicke Stahlfolie und eine 250 µm dicke PTFE-Folie verwendet.

Das zweite neu entwickelte Verfahren beruht auf der Kombination eines vergleichsweise harten Formeinsatzes und einer weicheren Substratplatte. In diesem Verfahren müssen die Strukturen in den zu öffnenden Bereichen über den eigentlichen Formeinsatzrand hervorstehen. Diese Bereiche dringen während des Prägeprozesses in die weiche Substratplatte ein. Der Fließwiderstand in der Polymerschmelze in den Randbereichen des Formeinsatzes bzw. in den Bereichen, in denen keine Öffnungen geprägt werden sollen, schützt dabei die hervorstehenden Bereiche des Formeinsatzes vor Beschädigung. Daher ist eine genaue Kenntnis der Prozessparameter zur Einstellung der erzielbaren Restschichtdicke notwendig.

Die Tauglichkeit dieses Verfahrens wurde anhand der Materialkombination Stahl/Messing nachgewiesen. Mit der Kombination Stahl/Messing können auf dem Format einer Mikrotiterplatte durchgehende Öffnungen im Heißprägeverfahren hergestellt werden. Als Demonstrator wurde eine DWPT<sup>TM</sup> mit Außenabmessungen von 86 mm × 128 mm verwendet. Die DWPT<sup>TM</sup> verfügte über 96 gleichmäßig verteilte konische Öffnungen mit einem minimalen Durchmesser von 100 µm und einem Aspektverhältnis von etwa 5. Dieses Bauteil konnte erfolgreich in verschiedenen Kunststoffen (PMMA, COC) abgeformt werden. Die erzielte Kantenqualität der geprägten Öffnungen ist dabei hervorragend.

Eine weitere geeignete Materialpaarung ist vergüteter Stahl und Messing. Diese Kombination ergibt exzellente Ergebnisse bezüglich der Kantenqualität und der Standzeit der Formeinsätze bei der Herstellung von durchgehenden Öffnungen.

Somit steht mit dem Ansatz zur Nutzung unterschiedlicher Härte von Formeinsatz und Substratplatte erstmalig ein praxistaugliches Verfahren zur Herstellung durchgehender Öffnungen direkt im Heißprägeprozess zur Verfügung. Mit der verwendeten Demonstratorstruktur konnte gezeigt werden, dass dieses Verfahren auch für empfindliche Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen geeignet ist. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass derartige Strukturen auch ohne Maßänderung vergütet und im Heißprägeverfahren verwendet werden können.

Mit den im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Arbeiten wurde das Heißprägeverfahren in vielen Bereichen erweitert. Dazu gehören im Bereich der Technologieentwicklung die Heißprägeanlage für große Formate und die neuen Möglichkeiten zum Aufbau großformatiger Formeinsätze. Die durchgeführte Prozessentwicklung stellt die notwendigen Prozessparameter für die großformatige Abformung und zur Erzeugung durchgehender Öffnungen zur Verfügung.

# A Anhang

## Technische Daten der Heißpräeanlagen HEX03et und WMP1000

**Tabelle A.1:** Technische Daten der Heißpräeanlage HEX03et.

Presse	Schließkraft	100 N - 200 kN
	min. Schließgeschwindigkeit	0,001 mm/min
	max. Schließgeschwindigkeit	200 mm/min
Heiz- und Kühlsystem	max. Umformtemperatur	320 °C
	Heiz- und Kühlrate	15 K/min
	Formeinsatzdurchmesser	max. 150 mm
Positioniereinheit	Positioniergenauigkeit	±3 µm

**Tabelle A.2:** Technische Daten der Heißpräeanlage WMP1000 und der dafür entwickelten Werkzeuge.

Presse	Antastkraft	500 N - 30 kN
	Umformkraft	50 kN - 1000 kN
	Schließgeschwindigkeit	10 µm/s - 90 mm/s
Basiswerkzeug	Umformtemperatur	max. 300 °C
	Heizrate	50 K/min
	Kühlrate	30 K/min
	Formeinsatzdurchmesser	max. 250 mm
IMT-Werkzeug	Umformtemperatur	max. 350 °C
	Heiz- und Kühlrate	50 K/min
	Formeinsatzdurchmesser	max. 154 mm
	Positioniergenauigkeit (lateral)	≤ 5 µm

## Kenngrößen verschiedener Fertigungsverfahren für Formeinsätze

**Tabelle A.3:** Kenngrößen verschiedener Fertigungsverfahren für Formeinsätze nach [35]. Die Fertigungsverfahren sind Mikrofräsen ( $\mu$ Fräsen), Mikrodrahtrodieren ( $\mu$ WEDM), Mikrosenkerodieren ( $\mu$ SEDM), Laserablation (LASER), Elektrochemisches Fräsen ( $\mu$ ECM) und elektrochemisches Fräsen mit ultrakurzen Pulsen (ECF).

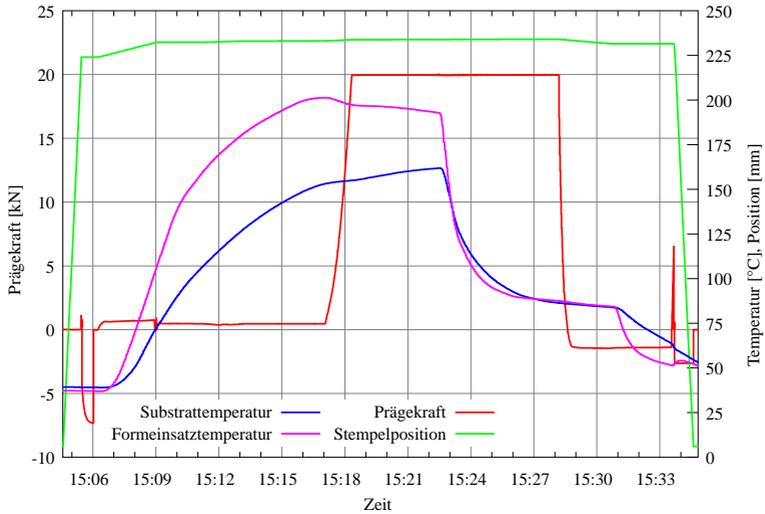
	$\mu$ Fräsen	$\mu$ WEDM	$\mu$ SEDM	$\mu$ LASER	$\mu$ ECM	ECF
Formeinsatzbreite (mm)	200	200	300	200	200	20
Formeinsatzlänge (mm)	200	200	300	200	200	20
Formeinsatzhöhe (mm)	200	100	150	200	30	10
Strukturfläche (mm)	$100 \times 100$	$200 \times 200$	$200 \times 150$	$200 \times 150$	$40 \times 30$	$20 \times 20$
kleinste Werkzeuggröße (mm)	0,1	0,02 – 0,05	0,05	-	-	-
Strukturabmessungen ( $\mu$ m)	50 – 100	20 – 50	10 – 50	5	50	10
Genauigkeit ( $\mu$ m)	3 – 10	2	3	1	8	2
Aspektverhältnis	2 – 5	10 – 50	3 – 10	2 – 50	-	10
Rauigkeit ( $\mu$ m Ra)	0,2	0,1	0,1	1	0,1	-
Materialabtragsrate ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	20	0,1	0,01	0,04	-	$6 \times 10^{-6}$

## Vorrichtung zum Aufspannen mehrerer Formeinsätze

**Tabelle A.4:** Mögliche Rastermaße zur Befestigung von Formeinsätzen. Alle Maße in [mm].

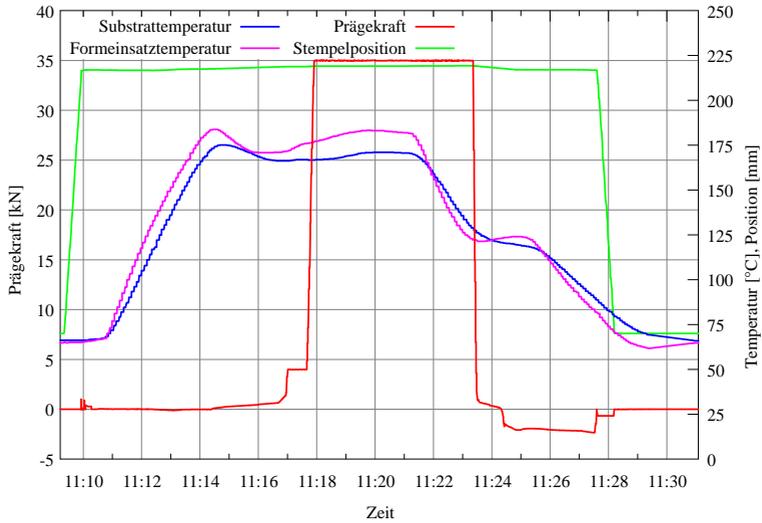
quadratische FE	rechteckige FE		
54,5 × 54,5	47,2 × 54,5	54,5 × 109,0	95,0 × 54,5
79,0 × 79,0	47,2 × 109,0	54,5 × 142,0	95,0 × 82,0
94,4 × 94,4	47,2 × 164,0	54,5 × 150,0	95,0 × 109,0
47,2 × 191,0	54,5 × 190,0	95,0 × 163,0	
47,2 × 218,0	54,5 × 204,0	95,0 × 218,0	
runde FE	∅109,0; ∅190,0; ∅220,0		

## Prägeverlauf zur Abformung durchgehender Öffnungen



**Abbildung A.1:** Prägeverlauf zur Abformung von durchgehenden Öffnungen in PMMA auf einen Folienstapel.

## Prägeverlauf zur Herstellung der Urbauteile für die Zweite Galvanik



**Abbildung A.2:** Prägeverlauf zur Herstellung der Urbauteile aus Polycarbonat (Makrolon 2405) für die Zweite Galvanik.

---

```

=>WENDELIN(Warten bis Start von Wickert)
    => xy-Tisch auf Position fahren
Formeinsätze heizen(oben=110°C, unten=110°C)
Wartezeit(Zeit=5Sekunden)
=>WUM(Übergabe nach xy Tisch)
FreigIMTWerkzeug(Warten auf Freigabe von Wickert)
    => Achse 1 auf Position schließen (20000mm, 15000mm/s)
        Achse 1 auf Position schließen (15000mm, 2000mm/s)
        Achse 1 auf Position schließen (7259mm, 500mm/s)
        Warten auf IMT Werkzeug
Formeinsätze heizen(oben=230°C, unten=230°C)
Evakuieren unten, oben
Belüften unten(Druck=0,2bar)
Temperatur >=(oben=150°C, unten=150°C)
Formeinsätze heizen(oben=165°C, unten=165°C)
Evakuieren unten
Wartezeit(Zeit=180Sekunden)
IMTfertig(Umformtemperatur erreicht)
FreigIMTWerkzeug(warten bis Prägekraft aufgebaut)
    => Achse 1 auf Position schließen (3900mm, 500mm/s)
        Pause (15s)
        Achse 1 prägen über Kraft (145000N, 400mm/s, 20s)
        Verriegelungszyylinder verriegeln
        Warten auf IMT Werkzeug
Wartezeit(Zeit=720Sekunden)
Formeinsätze kühlen(oben=89°C, unten=92°C)
Temperatur <=(oben=90°C, unten=94°C)
Belüften unten(Druck=2,0bar)
IMTfertig(Entformtemperatur erreicht)
FreigIMTWerkzeug(nach Druckentlastung)
    => Achse 1 Druckentlastung über Kraft (30000N, 10s)
        Achse 1 auf Position öffnen (rel.) (500mm, 50000N, 200mm/s)
        Warten auf IMT Werkzeug
IMTfertig(vor Entformung)
Wartezeit(Zeit=15Sekunden)
Belüften oben(Druck=3,5bar)
Wartezeit(Zeit=15Sekunden)
Belüften unten,oben(Druck=0,1bar)
Wartezeit(Zeit=60Sekunden)
Formeinsätze heizen(oben=60°C, unten=60°C)
Formeinsatzspannring temperieren(Single=ein)
    => Achse 1 auf Position öffnen (rel.) (1500mm, 50000N, 200mm/s)
        Pause (45s)
        Achse 1 auf Position öffnen (120000mm, 50000N, 2000mm/s)
        Verriegelungszyylinder entriegeln

```

**Abbildung A.3:** Makroprogramm zur Abformung durchgehender Öffnungen. Die eingerückten Zeilen werden von der Heißpräganlage ausgeführt, die restlichen von der Werkzeugsteuerung.



# Literaturverzeichnis

- [1] DITTRICH, H. ; HECKELE, M. ; SCHOMBURG, W. K.: *Werkzeugentwicklung für das Heißprägen beidseitig mikrostrukturierter Formteile*. Karlsruhe, 2004 (Wissenschaftliche Berichte FZKA 7058)
- [2] BÄR, M.: *Mikro-FEMOS Mikro-Fertigungstechniken für hybride mikrooptische Sensoren*. Karlsruhe : Universitätsverlag Karlsruhe, 2006 (Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik / Informationstechnik)
- [3] KOLTAY, P. ; STEGER, R. ; BOHL, B. ; ZENGERLE, R.: The dispensing well plate: a novel nanodispenser for the multiparallel delivery of liquids (DWP Part I). In: *Sensors and Actuators A* 116 (2004), S. 483–491
- [4] KOLTAY, P. ; KALIX, J. ; ZENGERLE, R.: Theoretical evaluation of the dispensing well plate method (DWP part II). In: *Sensors and Actuators A* 116 (2004), S. 472–482
- [5] BARTOLINI, R. ; HANNAN, W. ; KARLSONS, D. ; LURIE, M.: Embossed hologram motion pictures for television playback. In: *Applied Optics* 9 (1970), S. 2283–2290
- [6] GALE, M. T. ; KANE, J. ; KNOP, K.: Embossable surface-relief structures for color and black-and-white reproduction. In: *Journal of Applied Photographic Engineering* (1978), Nr. 4, S. 41
- [7] MICHEL, A. ; RUPRECHT, R. ; HARMENING, M. ; BACHER, W.: *Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern*. Karlsruhe, 1993 (KfK Bericht 5171)

- [8] MICHAELI, W. ; SPENNEMANN, A. ; GÄRTNER, R.: New plastication concepts for micro injection moulding. In: *Microsystem Technologies* 8 (2002), Nr. 1, S. 55–57
- [9] PIOTTER, V. ; BAUER, W. ; BENZLER, T. ; EMDE, A.: Injection molding of components for microsystems. In: *Microsystem Technologies* 7 (2001), Nr. 3, S. 99–102
- [10] BÖHLINGER, S.: *Spritzgießen und Spritzprägen von Kunststoffoptiken*. Aachen : Mainz, 2002 (IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung)
- [11] TRUCKENMÜLLER, R. ; RUMMLER, Z. ; SCHOMBURG, W.: *Herstellung von dreidimensionalen Mikrostrukturen aus Polymermembranen*. Karlsruhe, 2003 (Wissenschaftliche Berichte FZKA 6801)
- [12] HANEMANN, T. ; PFLEGING, W. ; HAUSSELT, J. ; ZUM GAHR, K.-H.: Laser micromaching and light induced reaction injection molding as suitable process sequence for the rapid fabrication of microcomponents. In: *Microsystem Technologies* 7 (2002), Nr. 5, S. 209–214
- [13] WORGULL, M. ; HECKELE, M. ; SCHOMBURG, W. K.: *Analyse des Mikro-Heißprägeverfahrens*. Karlsruhe, 2003 (Wissenschaftliche Berichte FZKA 6922)
- [14] GUPTA, R. K.: *Polymer and composite rheology*. 2. ed., rev. and expand. Dekker, 2000
- [15] MÜLLER, H.: Der Einfluß der Viskosität auf den Preßdruck von Metallklebeverbindungen. In: *Plaste und Kautschuk* 9 (1962), Nr. 7, S. 330–332
- [16] LEIDER, P. J. ; BIRD, R. B.: Squeezing Flow between Parallel Disks .1. Theoretical Analysis. In: *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 13 (1974), Nr. 4, S. 336–341

- 
- [17] LEIDER, P. J.: Squeezing Flow between Parallel Disks .2. Experimental Results. In: *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 13 (1974), Nr. 4, S. 342–346
- [18] SCHEER, H.-C. ; BOGDANSKI, N. ; WISSEN, M. ; KONISHI, T. ; ET AL.: Polymer time constants during low temperature nanoimprint lithography. In: *Journal of Vacuum Science Technology B* 23 (2005), Nr. 6, S. 2963–2966
- [19] ROWLAND, H. D. ; KING, W. P.: Polymer deformation and filling modes during microembossing. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14 (2004), S. 1625–1632
- [20] HIRAI, Y. ; FUJIWARA, M. ; OKUNO, T. ; TANAKA, Y. ; ET AL.: Study of the resist deformation in nanoimprint lithography. In: *Journal of Vacuum Science Technology B* 19 (2001), Nr. 6, S. 2811–2815
- [21] WORGULL, M. ; HECKELE, M. ; HETU, J. F. ; KABANEMI, K. K.: Modeling and optimization of the hot embossing process for micro- and nanocomponent fabrication. In: *Journal of Microlithography Microfabrication and Microsystems* 5 (2006), Nr. 1
- [22] NIKOLAJEFF, F. ; LUNDVALL, A. ; KARLSSON, M. ; PIETARINEN, J. ; ET AL.: Micro-optics fabrication by nanoimprint lithography. In: *EOS Topical Meeting on Micro-Optics, Diffractive Optics and Optical MEMS*. Paris : European Optical Society, 2006, S. 112
- [23] GALE, M. T.: Replication technology for microoptics and optical microsystems. In: *Gradient Index, Miniature, and Diffractive Optical Systems III*. San Diego, California, USA : Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2003, S. 113–120
- [24] GOURGON, C. ; PERRET, C. ; TALLAL, J. ; LAZZARINO, F. ; ET AL.: Uniformity across 200 mm silicon wafers printed by nanoimprint lithography. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 38 (2005), Nr. 1, S. 70

- [25] ZOU, H. ; MEHNE, C.: *Entwicklung einer Entformvorrichtung für großflächige auf Wafer geprägte Mikrostrukturen*, Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Diplomarbeit, 2006
- [26] SUS, D.: Relaxations- und Normalspannungseffekte in der Quetschströmung. In: *Rheologica Acta* 23 (1984), Nr. 5, S. 489–496
- [27] GIETZELT, T. ; EICHHORN, L. ; SCHUBERT, K.: Material and micromaching aspects of manufacturing micromolds for replication techniques. In: *Advanced Engineering Materials* 8 (2006), Nr. 1-2, S. 33–37
- [28] PFLEGING, W. ; BERNAUER, W. ; HANEMANN, T. ; TORGE, M.: Rapid fabrication of microcomponents - UV-laser assisted prototyping, laser micro-machining of mold inserts and replication via photomolding. In: *Microsystem Technologies* 9 (2002), Nr. 1 - 2, S. 67–74
- [29] CAO, D. ; JIANG, J. ; YANG, R. ; MENG, W.: Fabrication of high-aspect-ratio microscale mold inserts by parallel  $\mu$ EDM. In: *Microsystem Technologies* (2006), S. 1–7
- [30] STAEMMLER, L. ; RENTZ, R. ; SCHLAG, M.: Untersuchungen zur Herstellung höchstpräziser Formeinsätze durch HSC-Technik und Endbearbeitung durch elektrochemisches Fräsen mit ultrakurzen Impulsen. 2005. – Abschlussbericht AIF 13697N
- [31] SCHULZ, J. ; BADE, K. ; GUTTMANN, M. ; HAHN, L. ; ET AL.: Ensuring repeatability in LIGA mold insert fabrication. In: *Microsystem Technologies* 10 (2004), Nr. 5, S. 419–422
- [32] GUTTMANN, M. ; SCHULZ, J. ; SAILE, V.: Lithographic Fabrication of Mold Inserts. In: BALTES, H. (Hrsg.): *Advanced Micro and Nano-systems* Bd. 3, Microengineering of Metals and Ceramics. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005, S. 187–219

- [33] GUBER, A. E. ; HECKELE, M. ; HERRMANN, D. ; MUSLIJA, A. ; ET AL.: Microfluidic lab-on-a-chip systems based on polymers - fabrication and application. In: *Chemical Engineering Journal* 101 (2004), Nr. 1-3, S. 447–453
- [34] GERLACH, A. ; KNEBEL, G. ; GUBER, A. E. ; HECKELE, M. ; ET AL.: High-density plastic microfluidic platforms for capillary electrophoresis separation and high-throughput screening. In: *Sensors and Materials* 14 (2002), Nr. 3, S. 119–128
- [35] AZCARATE, S. ; URIARTE, L. ; SCHOTH, A. ; BIGOT, S. ; ET AL.: Hybrid Tooling: A Review of Process Chains for Tooling Micro-fabrication within 4M. In: FILLION, B. (Hrsg.): *4M 2006 Second International Conference on Multi-Material Manufacture*. Grenoble : Elsevier, 2006
- [36] BECKER, E. W. ; EHRFELD, W. ; HAGMANN, P. ; MANER, A. ; ET AL.: Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofor- ming, and plastic moulding (LIGA process). In: *Microelectronic Engineering* 4 (1986), Nr. 1, S. 35–56
- [37] MOHR, J. ; MENZ, W. ; PAUL, O.: *Mikrosytemtechnik für Ingenieure*. 3., überarb. u. erw. Aufl. Weinheim : Wiley-VCH, 2005
- [38] MERTENS, M. ; MEHNE, C.: *Entwicklung eines modularen Werk- zeugträgers für das großflächige Heißprägen von Mikrostrukturen*, Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Studi- enarbeit, 2005
- [39] KIM, I. ; MENTONE, P. F.: Electroformed nickel stamper for light guide panel in LCD back light unit. In: *Electrochimica Acta* 52 (2006), Nr. 4, S. 1805–1809
- [40] ANSARI, K. ; VAN KAN, J. A. ; BETTIOL, A. A. ; WATT, F.: Stamps for nanoimprint lithography fabricated by proton beam writing and

- nickel electroplating. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16 (2006), Nr. 10, S. 1967–1974
- [41] MENGES, G. ; MOHREN, P.: *Anleitung für den Bau von Spritzgieß-Werkzeugen*. 5. vollständig überarbeitete Auflage. Hanser, 1999
- [42] N.N. *ANSI SBS 1-2004: Microplates - Footprint Dimensions*. 2004
- [43] N.N. *ANSI SBS 4-2004 Microplates - Well Positions*. 2004
- [44] GUTTMANN, M. ; MEHNE, C. ; WISSMANN, M. ; HARTMANN, M. ; ET AL.: Galvanische Replikation von Kunststoff-Mikrostrukturen als alternatives Verfahren für die Fertigung von Abformwerkzeugen. In: *Galvanotechnik* 97 (2006), Nr. 10, S. 2530–2536
- [45] GUTTMANN, M. ; MEHNE, C. ; WISSMANN, M. ; HARTMANN, M. ; ET AL.: Galvanische Replikation von Kunststoffmikrostrukturen für die Fertigung von Abformwerkzeugen. In: *Dornbirner Mikrotechniktage*. Dornbirn : Fachhochschule Vorarlberg, 2006
- [46] *Hahn-Schickard-Gesellschaft für Angewandte Forschung e.V. Institut für Mikroaufbautechnik*. <http://www.hsg-imat.de>. Mai 2007
- [47] GUTTMANN, M. ; BADE, K. ; HEIN, H. ; KRAMER, C. ; ET AL.: Mikrostrukturieren Schattenmasken für PVD-Verfahren herstellen. In: *Metalloberfläche* 57 (2003), Nr. 5, S. 27–31
- [48] LOPEZ, A.: Chemisches Feinätzen im Endlosverfahren. In: *Mikroproduktion* 4 (2006), S. 20–22
- [49] SCHANZ, G. ; BADE, K.: Microelectroforming of Metals. In: BALTES, H. (Hrsg.): *Microengineering of Metals and Ceramics Part 2: Special Replication Techniques, Automation and Properties*. Weinheim : Wiley-VCH, 2005, S. 395–420

- [50] GUTTMANN, M. ; MATTHIS, B. ; SCHULZ, J. ; WINKLER, F. ; ET AL.: Einfache Substrathalter für die Mikrogalvanoformung. In: *Metalloberfläche* 57 (2005), Nr. 4, S. 22–30
- [51] MÜLLER, K.-D.: *Herstellung von beweglichen metallischen Mikrostrukturen auf Siliziumwafern*. Karlsruhe, 1999 (Wissenschaftliche Berichte FZKA 6254)
- [52] HECKELE, M. ; HERRMANN, D. ; MUSLIJA, A. ; SCHALLER, T. *Struktur auf einem Bauteil sowie Verfahren unter Verwendung der Struktur*. Patent DE 102 24 843 B3. 2004
- [53] RAPP, B. ; WORGULL, M. ; HECKELE, M. ; GUBER, A. ; ET AL.: Mikro-Heißstanzen - Erzeugung von Durchlochstrukturen in ebenen Kunststoffsubstraten. In: *Mikrosystemtechnik Konferenz*. Freiburg i. Br., 2005
- [54] MEHNE, C. ; HECKELE, M. ; STEGER, R. ; KOLTAY, P. ; ET AL.: Hot Embossing of Large Area Microfluidic Devices with Through Holes. In: *EUSPEN 2006*. Baden/Wien, 2006

## Großformatige Abformung mikrostrukturierter Formeinsätze durch Heißprägen

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Heißprägeverfahren für große Formate und Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen weiter entwickelt, weiterhin werden Möglichkeiten zur Herstellung großformatiger Formeinsätze und zur Abformung durchgehender Öffnungen in mikrostrukturierten Kunststoffbauteilen beschrieben.

Für die Weiterentwicklung des Heißprägeverfahrens wird ein Heißprägeprozess für eine neu entwickelte, industrietaugliche Anlage beschrieben und analysiert.

Im nächsten Themenkomplex werden zwei Lösungsansätze zur Herstellung großformatiger Formeinsätze vorgestellt und ausgearbeitet. Der erste Lösungsansatz beruht auf modular aufgebauten Formeinsätzen, im zweiten Ansatz wird ein Prozess zur Herstellung von Formeinsätzen durch galvanische Kopie abgeformter Kunststoffbauteile beschrieben.

Im dritten Teil der Arbeit werden zwei Verfahren zur Herstellung durchgehender Öffnungen direkt im Heißprägeverfahren vorgestellt. Beide Verfahren beruhen auf einer unterschiedlichen Härte beziehungsweise Nachgiebigkeit von Formeinsatz und Substratplatte.