



Masterarbeit

**Einfluss von Verarbeitungsparametern im Spritzguss
und Fügen auf die Eigenschaften von
mikrofluidischen Chips für medizintechnische
Anwendungen**

verfasst von

Maria Sarah Pfefferkorn



KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung

Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Clemens Holzer

Montanuniversität Leoben

Leoben,

eingereicht am, 14.06.2011

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare on lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

14.06.2011

Datum

Unterschrift

Danksagung

Mein größter Dank gilt der Abteilung BioSciences bei Sony DADC Austria AG. Ich danke dem gesamten Team, das mich bei meinen Versuchen wirklich sehr hilfreich unterstützte. In diesem Sinne danke ich im Besonderen Helmut Haderer, Jozo Brnic und Dario Borovic. Weiters danke ich Dipl.-Ing. Christian Mayrhofer für die Einschulung an allen Messgeräten und die Vorschläge hinsichtlich Auswertung, sowie Dipl.-Ing. Christian Pöschl und Andrej Peterca für die Unterstützung im Bereich Spritzguss.

Vor allem möchte ich mich beim Abteilungsleiter Dipl.-Ing. Dr. Georg Bauer sowie bei Dipl.-Ing. Alfred Paris für die Betreuung der Arbeit bedanken. Außerdem bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Dr. mont. Werner Balika für die Vorschläge zur Vorgehensweise und Verbesserung der Arbeit.

Mein Dank gilt an dieser Stelle meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. mont. Thomas Lucyshyn für die Betreuung der Arbeit und die vielen Verbesserungsvorschläge. Ich danke auch dem Vorstand des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung, Univ.-Prof. Dr. Clemens Holzer für die kritische Durchsicht der Arbeit.

Kurzfassung

Das Kennen von Einflussfaktoren und deren Auswirkungen entlang der gesamten Prozesskette ist eine wichtige Voraussetzung zur präzisen Herstellung mikrofluidischer Chips in der medizintechnischen Anwendung. In dieser Arbeit wurden deswegen Einflussfaktoren auf den Spritzguss- und Fügeprozess untersucht. Es wurde weiters eine Charakterisierung der einzelnen Prozessschritte und Analysen der Auswirkungen von einem Prozessschritt auf nachfolgende Prozessschritte durchgeführt, um ein Verständnis für die Zusammenhänge der gesamten Prozesskette zu erlangen. Messungen entlang der Prozesskette wurden vereinheitlicht. So war es möglich, Prozessschritte miteinander zu vergleichen.

Es wurden Grenzen der sinnvollen Prozessführung mit Hilfe von Versuchen für den Spritzguss- und Fügeprozess gefunden und somit die Auswirkung bestimmter Einflussfaktoren geklärt.

Beim Spritzgussprozess wurde die Prozessfensterfindung unter Berücksichtigung von Entformungsgraten, Abformungsdifferenz und Durchbiegung der Bauteile durchgeführt. Weiters wurden auch Auswirkungen auf Schwindung, Dickenverteilung am Bauteil und Rauheit untersucht. Die Untersuchungen zeigten wesentliche Veränderungen der Messgrößen (bis auf Rauheit) durch die Einflussfaktoren.

Beim Fügeprozess fand eine Auswertung des Faktorenversuchs nach optischen Kriterien statt. Es wurde beobachtet, dass sowohl Entformungsgrathöhe, als auch lange Aktivierungszeiten beim Fügen zu einer Beeinträchtigung des Chips führten.

Abschließend wurden Untersuchungen der Kanaltiefe, Rauheit und Durchbiegung entlang der gesamten Prozesskette durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass Kanaltiefen und Rauheit der Kunststoffteile wesentlich durch vorangegangene Prozesse beeinflusst wurden. Die Durchbiegung der Kunststoffteile hingegen wurde vorwiegend erst durch den Spritzgussprozess bestimmt.

Abstract

Knowledge about influencing factors and their effects along the whole production process is necessary for producing accurate microfluidic chips for medical-technical applications. Therefore this thesis the influencing factors for injection moulding and bonding were investigated. This thesis also characterises every step of the production process and analyse the effects of one step to another. For comparison measurements along the process chain were standardised.

For injection moulding and bonding experiments were realised and reasonable process intervals were found. Consequently also the effects of defined influence factors were detected.

For injection moulding the process interval was found by taking into account burr at demoulding, replication and deflection of the plastic parts. Furthermore also the effect on shrinkage, thickness distribution and roughness was investigated. Significant variations of investigated factors (except roughness) due to the influence factors were found.

After bonding the plastic parts were analysed optically. Burr at demoulding and long activating times caused an impairment of the chips.

An investigation of channel depth, roughness and deflection along the whole production process was made. It was shown, that channel depth and roughness of the plastic parts were influenced by previous process steps. The deflection in contrast was mainly caused by injection moulding.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....	3
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	6
2.1	HERSTELLUNG VON FORMEINSÄTZEN.....	6
2.2	SPRITZGIEßEN	13
2.3	FÜGEN	21
3	HERSTELLUNGSPROZESS FÜR DEN SALEM-CHIP.....	25
3.1	ÜBERBLICK ÜBER DIE PROZESSKETTE	25
3.2	WESENTLICHE QUALITÄTSKRITERIEN JE PROZESS.....	26
3.3	PROZESSSCHRITTE	26
3.3.1	Belacken.....	26
3.3.2	Belichten	26
3.3.3	Entwickeln	26
3.3.4	Besputtern / Galvanisieren	26
3.3.5	Spritzgießen.....	26
3.3.6	Elektrodendrukken.....	26
3.3.7	Fügen	26
4	EXPERIMENTELLES	26
4.1	MATERIAL.....	26
4.2	BAUTEIL UND MESSPOSITIONEN	26
4.3	VERWENDETE ANLAGEN.....	26
4.3.1	Spritzguss.....	26
4.3.2	Elektrodendruck	26
4.3.3	Fügen	26
4.4	PRÜFPLAN.....	26
4.5	VERWENDETE MESSGERÄTE UND MESSDURCHFÜHRUNG	26
4.5.1	Konfokalmikroskop	26
4.5.2	Topographiemessgerät	26
4.5.3	Optisches Messgerät.....	26
4.5.4	Dickenmessung	26
4.5.5	Rasterelektronenmikroskop (REM)	26
4.5.6	Lichtmikroskop	26
4.6	ERMITTLUNG DES PROZESSFENSTERS VON SPRITZGUSS UND FÜGEN	26
4.6.1	Versuche im Spritzgießprozess.....	26
4.6.2	Versuch beim thermischen Fügen	26
5	ERGEBNISSE	26
5.1	ERGEBNISSE DER SPRITZGIEßVERSUCHE.....	26
5.1.1	Festlegung der Grenzen für ein Prozessfenster	26
5.1.2	Ergebnisse der Schwindungsmessung	26
5.1.3	Ergebnisse der Dickenverteilung	26
5.1.4	Ergebnisse der Rauheit in der Verbindungskammer	26

1. Einleitung und Zielsetzung

5.2	ERGEBNISSE DER FÜGEVERSUCHE.....	26
5.2.1	Festlegung der Grenzen für ein Prozessfenster	26
5.2.2	Grate beim Fügen.....	26
5.2.3	Durchbiegung beim Fügen	26
5.2.4	Ergebnisse der Kanaltiefen- und breiten	26
5.3	ERGEBNISSE DES ELEKTRODENDRUCKVERSUCHS.....	26
5.4	AUSWIRKUNGEN ENTLANG DER PROZESSKETTE	26
5.4.1	Kanaltiefe	26
5.4.2	Rauheit in der Verbindungskammer am Stamper	26
5.4.3	Durchbiegung	26
6	ZUSAMMENFASSUNG	26
7	LITERATUR.....	26
8	VERWENDETE SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN.....	26

1 Einleitung und Zielsetzung

Der ausgewählte, zu untersuchende Mikrofluidik-Chip („Salem“-Chip, interner Chipname bei Sony DADC Austria AG, Abbildung 1) wird in der Genforschung eingesetzt. Er dient zur gezielten Aufbereitung von Desoxyribonukleinsäure (DNA) - Proben für nachfolgende Untersuchungen, unter anderem Sequenzierung.

Die Funktion des Chips liegt in der Erzeugung und Verbindung von Mikrotröpfchen (Abbildung 2, Abbildung 3). Es werden zwei verschiedene Arten von Tröpfchen erzeugt. Eines davon enthält eine DNA-Probe, das andere eine Chemikalie. Diese beiden werden dann in einer sogenannten Reaktionskammer („Merge Chamber“) in einem elektrischen Feld für nachfolgende Untersuchungen miteinander vereint [16].

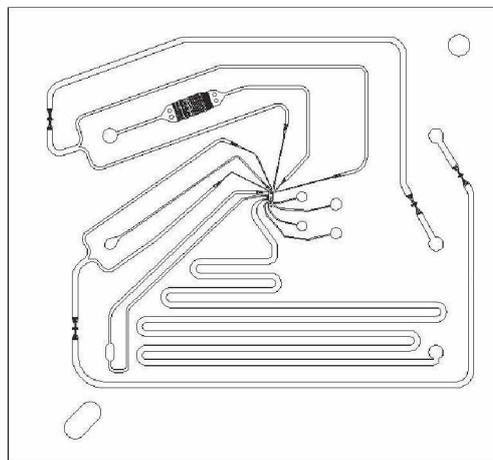


Abbildung 1: Kanalstruktur des „Salem“-Chips [16]

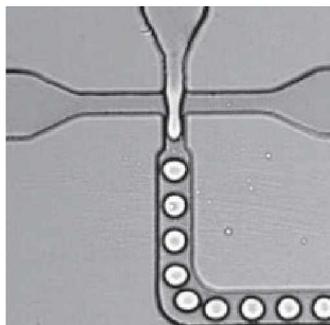


Abbildung 2: Erzeugung von Mikrotröpfchen [17]

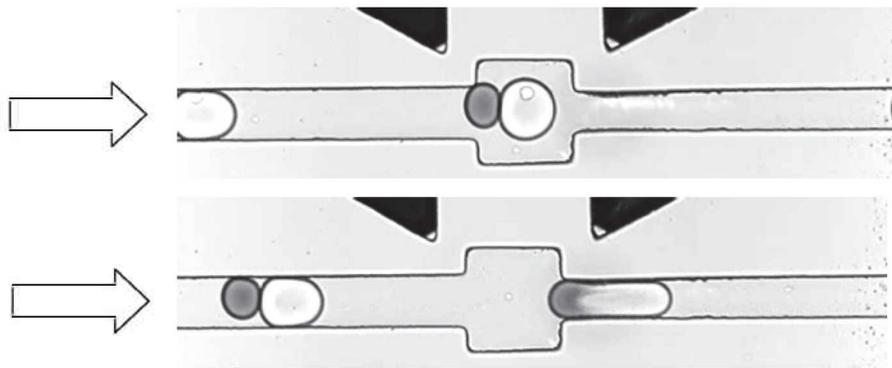


Abbildung 3: Verbinden der beiden Flüssigkeiten in der Reaktionskammer mit Hilfe eines elektrischen Feldes [17], Pfeile zeigen Fließrichtung

Der Chip muss sowohl Hydrophobie in den Kanälen als auch genaue Kanalquerschnittsgeometrien aufweisen, um die Qualität der Tröpfchen zu gewährleisten. Diese beiden Kriterien am Chip werden maßgeblich durch die Fertigungsmaterialien, wie auch durch die Fertigungspräzision bestimmt.

Der Chip besteht aus einer Kanal- und einer Abdeckplatte (Abbildung 4). Die Kanalplatte („Channel Plate“) enthält die Kanalstrukturen in denen sich die Tröpfchen bewegen. Die Abdeckplatte („Cover Plate“) wird zum Verschließen der Kanalplatte benutzt. Beide Platten werden durch das Spritzgießverfahren hergestellt. Der Spritzgießprozess selbst ist sehr komplex und wird von vielen Parametern beeinflusst. Einen wesentlichen Beitrag zur Qualität liefert schon die Herstellung der Formeinsätze („Stamper“) für das Spritzgießwerkzeug. Einen weiteren Einfluss auf die Qualität hat auch das Fügen („Bonden“) der beiden Platten zum Chip nach dem Spritzguss. Die Kombination dieser Prozesse kann zu einer positiven oder negativen Beeinflussung der Chipeigenschaften führen. Dieser Grund veranlasste die Firma Sony DADC AG, Österreich, auf diesem Gebiet Untersuchungen entlang der gesamten Prozesskette des Salem-Chips durchzuführen.

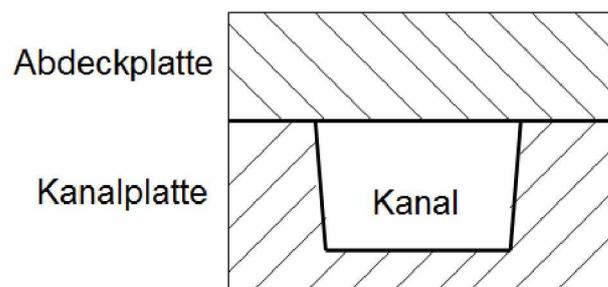


Abbildung 4: Schnitt durch den Chip (schematische Darstellung)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Ziele verfolgt.

1. Charakterisierung der einzelnen Prozessschritte zur Herstellung des Chips mittels systematischer Evaluierung:

Um Prozessschritte miteinander vergleichen zu können, wurde ausgehend vom IST-Zustand eine einheitliche Bewertung (z.B. Überprüfen derselben Positionen durch dieselben Prüfverfahren) für möglichst alle Schritte gesucht. Daraus können für ausgewählte Messungen und Bewertungen Arbeitsanweisungen ausgearbeitet werden. Durch Standardisierung der Prüfungen wird bei Auftreten von Problemen ein äußerst schnelles und gezieltes Handeln ermöglicht. Die Interpretation der Ergebnisse soll helfen, auch zukünftige Projekte durch eine systematische Herangehensweise zu vereinheitlichen.

2. Ausarbeitung der Einflussfaktoren auf einzelne Schritte der Prozesskette sowie die dabei entstehenden Auswirkungen auf die Chipeigenschaften

Mit Hilfe von Faktorenversuchsplänen wurden auch Prozessfenster für verschiedene Prozesse definiert. Der Fokus lag dabei auf den Prozessen Spritzgießen, Bedrucken und Fügen.

3. Erarbeitung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Schritten

Auswirkungen der einzelnen Prozessschritte auf die nachfolgenden Prozessschritte sollen analysiert werden

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Herstellung von Formeinsätzen

In diesem Kapitel werden verschiedene Herstellungsverfahren zur Erzeugung von Formeinsätzen für das Spritzgießen betrachtet.

LIGA-Verfahren

Das LIGA-Verfahren ist eine weit verbreitete Methode zur Herstellung von Mikrostrukturen. LIGA steht für die wichtigsten Prozessschritte dieses Verfahrens, **L**ithographie, **G**alvanik und **A**bformung. Es hat im Besonderen in den letzten Jahren große Bedeutung im Bereich Mikrobauteil und Mikrosysteme erlangt. Das Interesse liegt vor allem an der Möglichkeit der Herstellung hochkomplexer Mikroteile in der Massenproduktion. Abbildung 5 zeigt die einzelnen Prozessschritte des Verfahrens [13, 15].

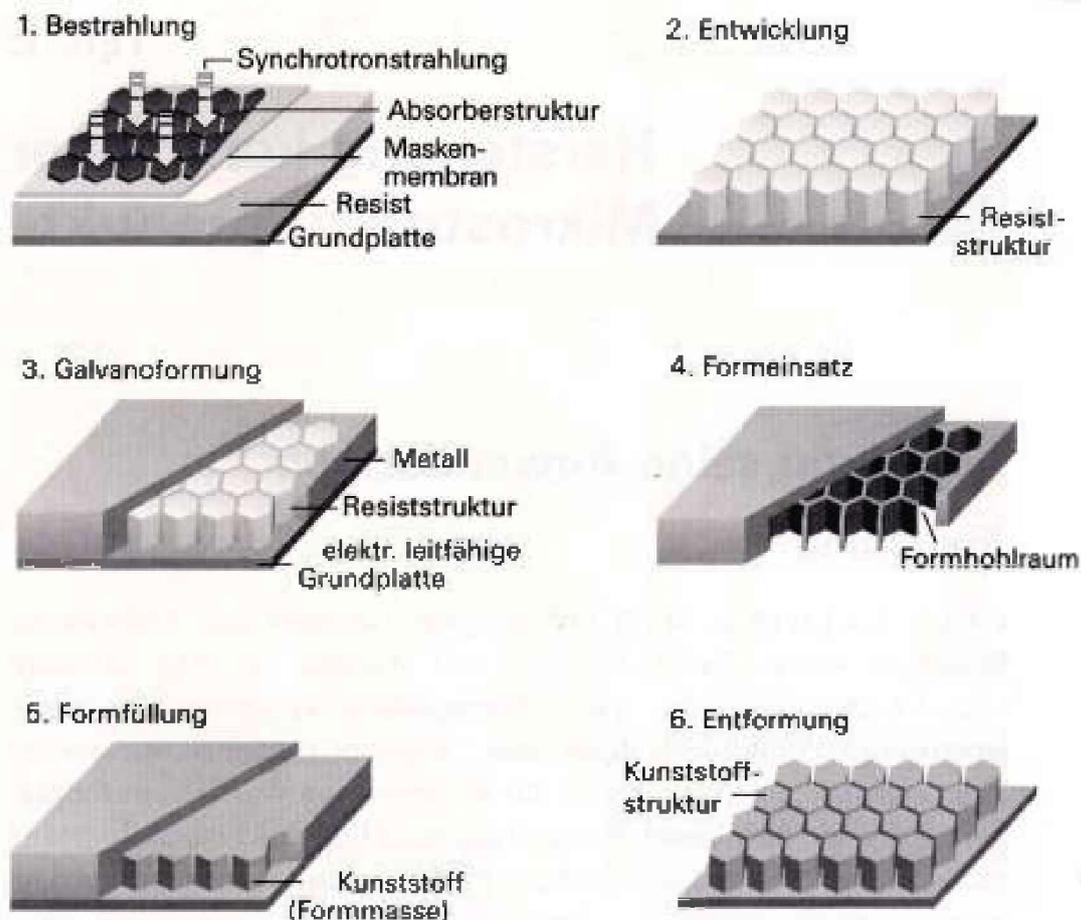


Abbildung 5: Fertigungsschritte des LIGA-Verfahrens [4]

2. Theoretische Grundlagen

Im ersten Schritt des LIGA-Prozesses wird ein lichtempfindliches Polymer („Resist“) mit einer Wandstärke von mehreren hundert Mikrometern auf eine Grundplatte aufgebracht und durch belichtet. Diese Grundplatte besteht aus Metall oder aus einem isolierten Material mit einer elektrisch leitenden Deckschicht. Durch die Bestrahlung mit der Wellenlänge zwischen ca. 0,2 bis 0,6 nm wird mit Hilfe einer Maskenmembran (indirektes Lithografieverfahren) ein Absorbermuster auf den Resist übertragen [15].

Bei Positivresists führt die Bestrahlung zu chemischen Veränderungen (Brüchen) in den Molekülketten des Resists und somit zur Verringerung der chemischen Beständigkeit. Auf Grund dessen ist es mit Hilfe eines geeigneten Entwicklers möglich, die belichteten Bereiche herauszulösen. Somit bleibt nur die unbelichtete Resiststruktur bestehen. Bei Negativresists sind zusätzlich in dem Polymergerüst photoempfindliche Komponenten eingebaut. Diese führen bei Anregung durch Bestrahlung zu Vernetzungsreaktionen in der Polymerkette. Dadurch werden durch den Entwickler nur mehr die nicht vernetzten (nicht belichteten) Bereiche herausgelöst (siehe Abbildung 6) [15].

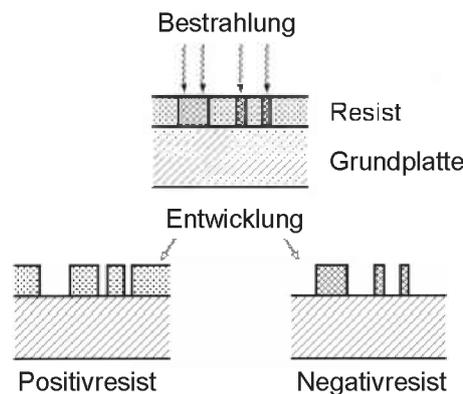


Abbildung 6: Unterschied Positiv-Negativresist [15]

Die Maske besteht aus einem Absorber, der Trägerfolie und dem Maskenrahmen. Der Absorber enthält die Information, die in den Resist übertragen werden soll. Er muss aus einem Material mit hohem Absorptionskoeffizienten für Röntgenstrahlung, wie zum Beispiel Gold, bestehen. Die Transmission T in Abhängigkeit der Wellenlänge λ zeigt sich durch:

$$T_{Au}(\lambda) = e^{-\alpha_{Au}(\lambda) \cdot d_{Au}} \quad (1)$$

wobei α_{Au} den Absorptionskoeffizienten und d_{Au} die Schichtdicke von Gold darstellen. Die erforderliche Dicke hängt von der Wellenlänge der Strahlung als auch von der Höhe des zu bestrahlenden Resists ab.

2. Theoretische Grundlagen

Die Absorber sind auf geeigneten Trägern aufgebracht. Um so wenig Röntgenstrahlung wie möglich zu absorbieren, muss der Träger einen geringen Absorptionskoeffizienten und eine geringe Dicke aufweisen. Weiters muss das Trägermaterial resistent gegenüber Röntgenstrahlung sein und sollte eine bestimmte Festigkeit und Formstabilität aufweisen. Zurzeit werden deswegen vor allem Trägerschichten aus Beryllium und Titan verwendet. Diese werden auf Rahmen aufgespannt, um bei der Belichtung des Resists justiert werden zu können.

Um nach dem Belichten und Entwickeln aus der Resiststruktur einen Formeinsatz aus Metall erhalten zu können, muss in den Zwischenräumen des Resists eine Metallplatte abgeschieden werden, wobei hauptsächlich Nickel verwendet wird. Dies erfolgt im Prozessschritt der Galvanoformung. In diesem Fertigungsschritt erfolgt eine Abscheidung des Metalls an der Resiststruktur in einem Galvanikbad. Die Abscheidung wird im Allgemeinen solange angehalten bis sich eine ca. 5 mm dicke Metallplatte ausgebildet hat (siehe Abbildung 7). Mit Hilfe von Rakeln kommt es zur mechanischen Nachbearbeitung.

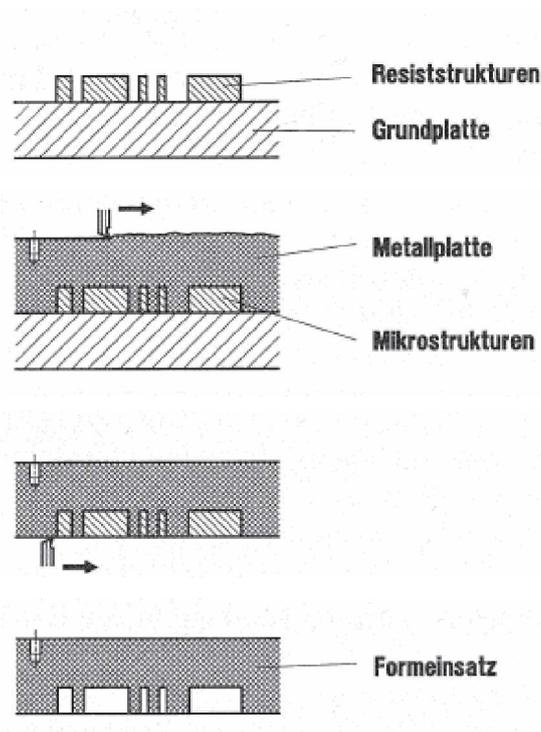


Abbildung 7: Herstellung vom belichteten Resist bis zum Formeinsatz [15]

Um den Formeinsatz von der Resiststruktur entfernen zu können, muss die Resistplatte vor dem Galvanoformen behandelt werden, um eine schlechte Haftung zu gewährleisten. Weiters ist es auch möglich, eine Zwischenschicht aufzubringen und den Formeinsatz durch Wegätzung des Resists freizulegen [15].

2. Theoretische Grundlagen

Der somit erzeugte Formeinsatz aus Nickel wird vor allem im Spritzguss- und Prägeprozess zur Massenherstellung von mikrostrukturierten Bauteilen aus Kunststoff verwendet (siehe Abbildung 8). Der Einsatz sollte so beschaffen sein, dass eine möglichst einfache Entformung möglich ist. Dies wird durch eine geringe Oberflächenrauigkeit und geringe Haftung des Kunststoffs am Formeinsatz erzielt. Weiters muss darauf geachtet werden, dass die Einsätze keine Hinterschneidungen aufweisen [15].

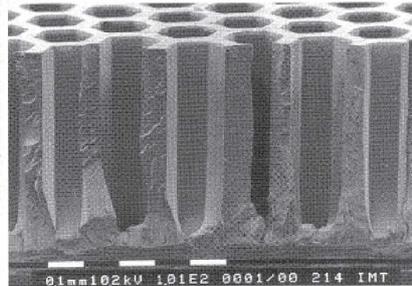


Abbildung 8: Mikrostruktur, die mit dem Spritzgießverfahren hergestellt wurde [15]

Röntgenlithografie

Die Lithografie ist ein wichtiger Prozessschritt des LIGA-Verfahrens, der durch verschiedene Methoden durchgeführt werden kann. Eine davon ist die Röntgenlithografie. Generell stehen der Röntgenlithografie drei verschiedene Strahlungsquellen zur Verfügung: Hochleistungs-Röntgenröhren, Plasmaquellen und Synchrotrons.

Der Vorteil der Röntgenstrahlung liegt darin, dass eine Bestrahlung des Resists von Strukturbreiten im Nanometerbereich und eine Erzeugung von 3D-Strukturen mit hohem Aspektverhältnis (Verhältnis der maximalen Höhe zu minimalen lateralen Abmessungen der Struktur) möglich sind [15]. Die Strahlung ist jedoch divergent und kann auch zu Schäden am Resist führen. Außerdem ist die Herstellung der Maskenmembran mit sehr großem Aufwand verbunden [18].

Optische Lithografie

Bei der optischen Lithografie werden Strukturen mit Hilfe von Masken (siehe auch Röntgenstrahlolithografie) an einem photoempfindlichen Resist hergestellt. Die Bestrahlung findet durch Quecksilberdampf lampen mit verschiedenen starken Emissionslinien statt.

Die Abbildung der Maskenmembran kann durch zwei verschiedene Belichtungsmöglichkeiten der Schattenprojektion realisiert werden. Bei der

2. Theoretische Grundlagen

Kontaktbelichtung liegt die Maske direkt auf dem Resist auf. Das führt zwar zu einer sehr guten Strukturauflösung, aber auch zu einer Beschädigung der Maske und/oder des Resists bei zu starkem Kontakt, vor allem dann, wenn sich Staubpartikel zwischen Maske und Resist befinden. Bei der Proximity-Belichtung wird daher ein Abstand von 10 bis 50 μm zwischen Resist und Maske gewählt [15].

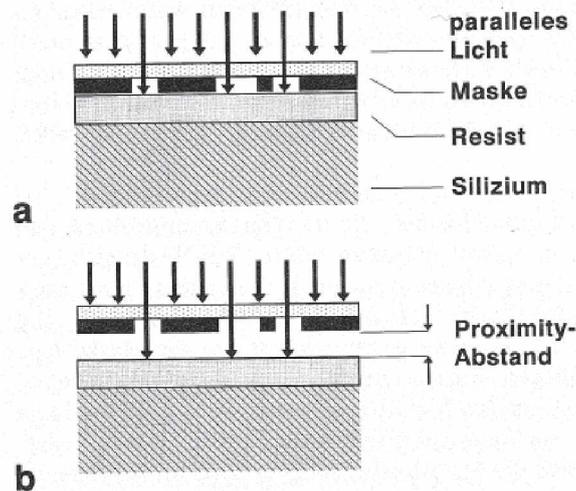


Abbildung 9: Schattenprojektion (a: Kontaktbelichtung, b: Proximity – Belichtung) [15]

Elektronenstrahlithografie

Im Gegensatz zum Röntgenstrahlverfahren wird bei diesem Fertigungsprozess eine vorgegebene Struktur in den Resist mit Hilfe eines Elektronenstrahls aufgebracht. Die Elektronenstrahlithographie wird vor allem zum direkten Schreiben an Resists bei geringer Stückzahl verwendet. Somit sind keine Masken zur Definition der Strukturen mehr nötig (direktes Lithografieverfahren).

Man unterscheidet zwischen zwei Fertigungsmöglichkeiten, dem Raster- und dem Vectorscanverfahren. Beim Rasterscanverfahren wird der Strahl über die gesamte Fläche des Resists geführt. Er ist jedoch nur an jenen Stellen eingeschaltet, an denen auch belichtet werden muss. An allen anderen Stellen findet nur eine Abtastung der Fläche statt (siehe Abbildung 10). Diese Methode führt zu sehr langen Herstellungszeiten. Beim Vectorscanverfahren wird versucht, die nicht genutzte Belichtungszeit zu minimieren. Hier werden nur jene Positionen des Resists angefahren, an denen auch belichtet wird [15].



Abbildung 10: Raster-Scanning-Verfahren [15]

Ionenstrahlolithografie

Neben der Elektronenstrahlolithografie entwickelte sich auch die Ionenstrahlolithografie. Bei diesem Verfahren werden beschleunigte Ionen auf den Resist geschossen. Ein Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der Elektronenstrahlolithografie besteht durch die höhere Masse der Ionen. Auf Grund dessen kommt es zu einer geringeren Streuung der Ionen im Resist und somit zu einer höheren Qualität [15].

Laserlithografie

Das Laserverfahren ist neben der Elektronenstrahl- und Ionenstrahlolithografie ein weiteres direktes Lithografieverfahren. Bei der Herstellung wird ein Excimer-Laser eingesetzt. Dieser erzeugt elektromagnetische Strahlung im ultravioletten Wellenlängenbereich. Die beiden Schritte „Belichten und Entwickeln“ werden bei diesem Verfahren zu einem Prozessschritt zusammengefasst. Somit kommt es zu einer Minimierung der Herstellzeiten. Mit dieser Technik lassen sich jedoch nur geringe Aspektverhältnisse (< 10) und größere Strukturen ($> 1 \mu\text{m}$) herstellen [13]. Abbildung 11 zeigt ein Verfahren der Laserlithografie mit Beugungslinsen. Das vom Laser kommende Licht wird mit Hilfe eines Filters und Linsen in gleichartige Strahlen aufgeteilt. Durch den Regler kann die Laserintensität vorgegeben werden. Die Lichtintensität an jeder Stelle wird durch ein bestimmtes Element am Regler kontrolliert. Bevor der Laser auf den Resist trifft, erzeugen die Beugungslinsen noch einen fokussierten Strahl. Somit kann eine vorgegebene Struktur auf den Resist aufgebracht werden [14].

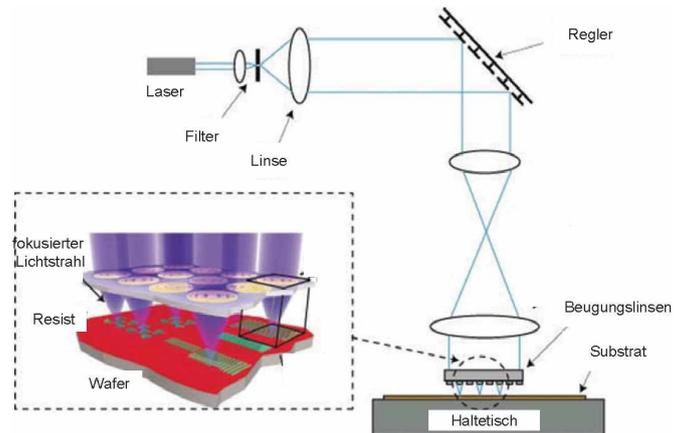


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Aubaes für Laserlithografie [14]

Mittlerweile ist es sogar möglich, Laserlithografie an gekrümmten Oberflächen durchzuführen [38].

2.2 Spritzgießen

Mikrospritzguss

Neben anderen Fertigungsverfahren wie zum Beispiel dem Spritzprägen stellt die Herstellung von Mikroteilen durch das Spritzgießen ein wichtiges Verfahren zur Massenproduktion dar.

Der Mikrospritzguss wird heute in zwei Klassen eingeteilt:

- Mikrospritzgussteile mit minimalen Abmessungen, Toleranzen und geringem Gewicht:

Die Abmessungen dieser Teile liegen im Millimeterbereich. Auf jenen Teilen können sich sowohl Strukturen im Mikrometerbereich, als auch keine Strukturen befinden. Das Gewicht der einzelnen Teile liegt bei wenigen Milligramm. Auf Grund dessen ist es nicht mehr möglich, solche Teile mit konventionellen Spritzgießmaschinen herzustellen.

- Spritzgussteile mit mikrostrukturierten Bereichen:

Diese Teile besitzen Abmessungen im Zentimeterbereich. Sie haben meist eine planare Gestalt, auf der sich auf einer oder beiden Seiten Bereiche mit Strukturen im Mikrometerbereich befinden. Das Aspektverhältnis ist meist hoch [11, 13, 32].

Bei der Herstellung von Spritzgussteilen mit mikrostrukturierten Bereichen muss auf bestimmte Anforderungen Rücksicht genommen werden. Die Kavität muss vor dem Einspritzen evakuiert werden, um eine vollständige Füllung zu gewährleisten und Deseleffekte zu vermeiden. Beim Abformen von Mikrostrukturen zeigen sich auch besondere Ansprüche. Der Entformungsvorgang muss ohne Abscherung, Deformation oder Zerstörung der Struktur ablaufen. Deswegen reicht oft zur Abformung eine isotherme Werkzeugtemperierung nicht mehr aus. Erforderlich wird eine variotherme Werkzeugtemperierung [13, 32].

Beim isothermen Standardspritzguss wird die Schmelze in ein relativ kaltes Werkzeug eingespritzt. Auf Grund dessen findet eine Erstarrung der Randschichten an der Werkzeugwand statt. Durch den Spritzdruck wird die nicht erstarrte Schmelze weiter in das Werkzeug vorangetrieben. Bei dünnen Wandstärken (z.B. in den Mikrostrukturen) und langen Fließwegen kann es zu Schwierigkeiten beim vollständigen Füllen der Kavität kommen. Bei der variothermen Werkzeugtemperierung wird das Werkzeug (eine oder beide Werkzeughälften) auf

2. Theoretische Grundlagen

hohe Temperaturen, maximal Schmelztemperatur des Kunststoffes, erwärmt. Erst nach vollständigem Füllen wird die Werkzeugtemperatur gesenkt. Diese Temperaturänderung sollte aus Produktivitätsgründen möglichst schnell erfolgen [32]. In Abbildung 12 ist der Spritzgusszyklus mit variothermer Temperierung für mikrostrukturierte Teile dargestellt. Abbildung 13 zeigt die Randschichterstarrung bei isothermer und variothermer Temperierung.

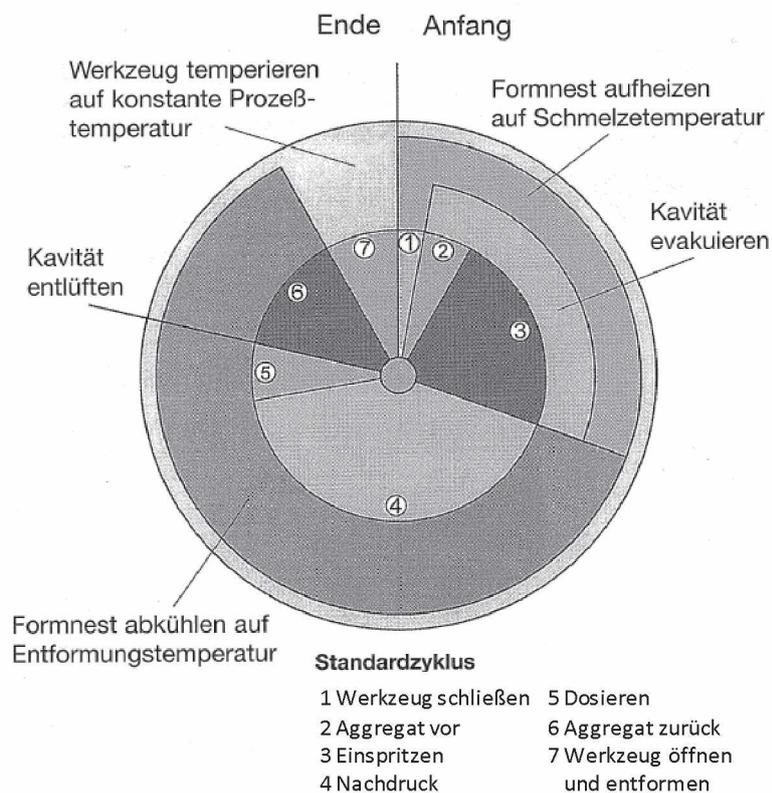


Abbildung 12: Spritzgusszyklus mit variothermer Temperierung für mikrostrukturierte Bauteile nach [13]

2. Theoretische Grundlagen

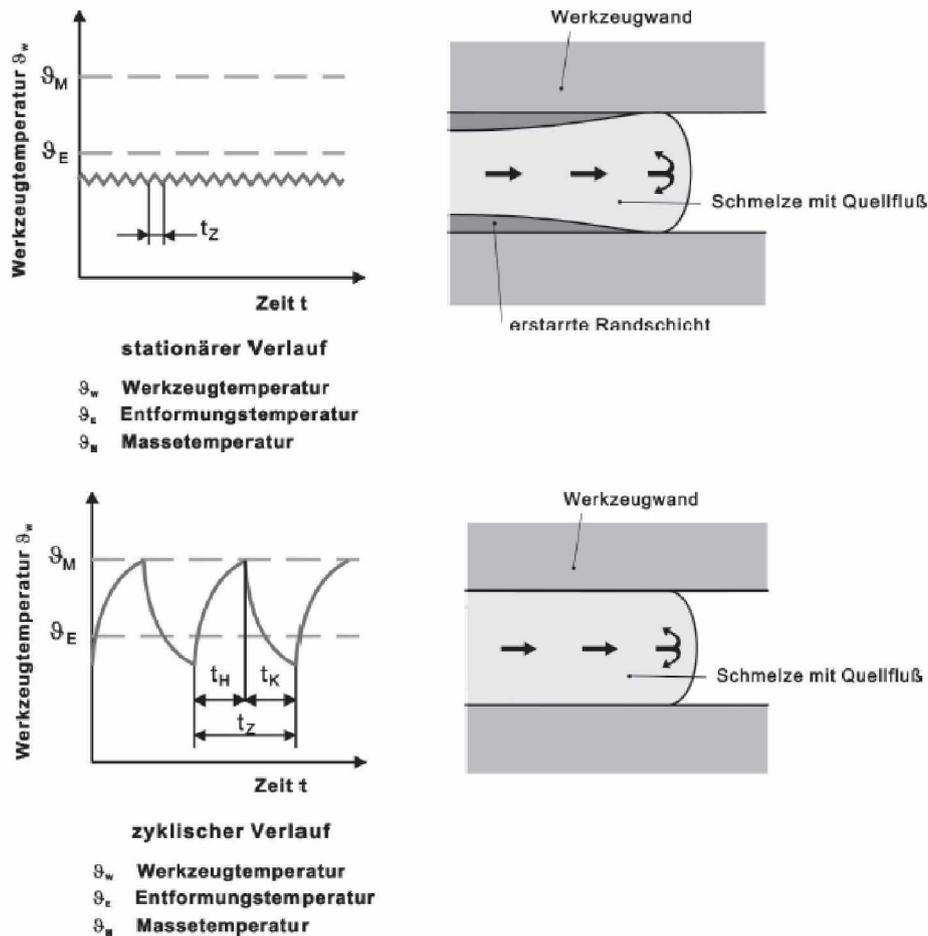


Abbildung 13: Spritzgießen mit isothermer und variothermer Werkzeugführung [35]

Man verwendet bei der variothermen Werkzeugtemperierung unter anderem die fluidische Temperierung oder Induktionsheizung [33]. Beim fluidischen System sind, zusätzlich zu dem äußeren Temperierkreislauf für das Gesamtwerkzeug, in den Formplatten spiralförmige Temperiereinsätze vorhanden, die mit Öl oder Wasser durchströmt werden. Durch Konvektion kommt es zur Temperierung zwischen Fluid und Werkzeugplatten.

Bei der Induktionsheizung wird eine meist wassergekühlte Spule von einem hochfrequenten Wechselstrom durchflossen und erzeugt ein elektromagnetisches Wechselfeld. Voraussetzung dafür ist, dass der Formeinsatz ferromagnetisch ist. Somit werden auf der Oberfläche des Einsatzes Wirbelströme erzeugt, die aufgrund des spezifischen elektrischen Widerstandes zur Erwärmung führen. Wegen der guten Wärmeübertragung beim induktiven Erwärmungsprinzip können auch beim variothermen Spritzgießen geringe Zykluszeiten erreicht werden [32].

Durchbiegung

Durchbiegungen oder Verwölbungen von ebenen Platten werden vor allem durch ungleichmäßige Abkühlung im Werkzeug bestimmt. Kommt es zu einer ungleichmäßigen Kühlung, das heißt, wird eine Fläche stärker gekühlt als die andere, so wird sich die Platte wölben. Die Verwölbung ist konkav zur wärmeren Seite hin (siehe Abbildung 14) [5].

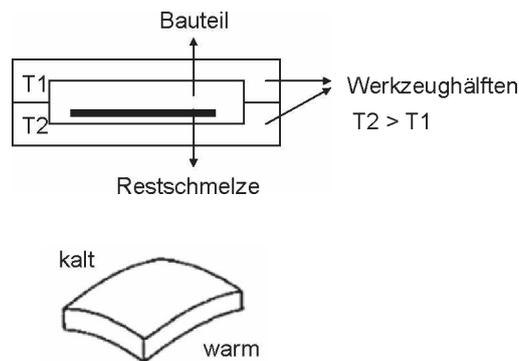


Abbildung 14: Durchbiegung von ebenen Platten [5]

Schwindung

Die Maßabweichung des Kunststoffteils zum formgebenden Werkzeug wird in der Kunststofftechnik als Schwindung bezeichnet. Man versteht darunter die Differenz zwischen Werkzeugmaß l_w und Bauteilmaß l_k , bezogen auf das Werkzeugmaß.

$$S = \frac{l_w - l_k}{l_w} \cdot 100\% \quad (2)$$

Abbildung 15 zeigt die Definition der Schwindung mit der Zeit, wobei an den Positionen 0 und 1 das Maß im kalten und warmen Werkzeug angezeigt wird. An Position 2 ist das Maß unter Schließkraft und Nachdruck im Werkzeug gegeben. Es ist ersichtlich, dass unter diesen Bedingungen das Formteilmaß am größten ist. Nach Entformen des Kunststoffteils kommt es zu einer Verringerung der Abmessung (Position 3), der Entformungsschwindung. Die Verarbeitungsschwindung soll nach DIN16901 nach 16 Stunden Lagerung gemessen werden (Position 4). Bei Lagerung über längere Zeit kommt es noch zu einer weiteren Maßänderung, der Nachschwindung. Sie ist besonders bei teilkristallinen Kunststoffen nicht zu vernachlässigen, da sie durch Nachkristallisation und Relaxation von Eigenspannungen verursacht wird. Die Summe aus

2. Theoretische Grundlagen

Verarbeitungsschwindung und Nachschwindung wird als Gesamtschwindung (Position 5) bezeichnet [13].

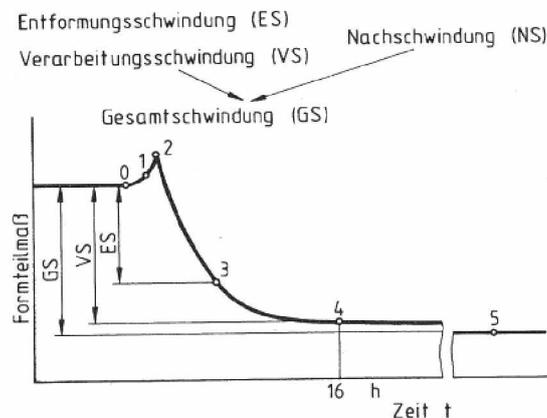


Abbildung 15: Änderung des Maßes mit der Zeit [13]

Die Schwindung ist eine Größe, die sich von vielen Faktoren beeinflussen lässt. Die Einflussgrößen können generell in drei Gruppen Material, Formteilgeometrie und Prozess eingeteilt werden. In Abbildung 16 sind wichtige Einflussparameter auf die Schwindung prinzipiell dargestellt.

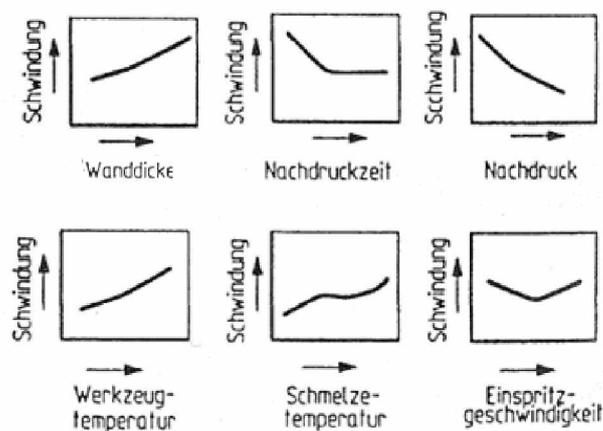


Abbildung 16: Schematische Darstellung von wichtigen Einflussparametern auf die Schwindung nach [10]

Es herrscht ein enger Zusammenhang zwischen Abmaßen und Prozessparametern beim Spritzguss. Wichtige Maschinenparameter sind mit dem Einfluss auf die Maßhaltigkeit in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenhang Maßhaltigkeit und Maschinenparameter nach [10]

	Abmaße
Nachdruckhöhe	↑
Massetemperatur	↑
Werkzeugtemperatur	↓
Schneckendrehzahl	0
Staudruck	0
Einspritzgeschwindigkeit	0 - ↑

Je größer die Wanddicke ist, umso mehr Wärmemenge wird im Bauteil gespeichert. Dies führt zu einer Verringerung der Abkühlgeschwindigkeit, was wiederum die Bildung von kristallinen Bereichen und Relaxation von Eigenspannungen begünstigt und somit zu größerer Schwindung führt [6, 10].

Nachdruckzeit und Nachdruckhöhe bewirken bei größeren Werten eine geringe Schwindung. Die Wirkung der Nachdruckzeit ist jedoch durch den Siegelzeitpunkt begrenzt. Nach Ablauf dieser Zeit ist der Anguss eingefroren und es kann zu keiner weiteren Reduktion der Schwindung kommen. Auf Grund der Tatsache, dass Kunststoffe kompressibel sind, kommt es zu einer Verringerung der Schwindung bei Erhöhung des Drucks. Generell muss hier jedoch ein Unterschied zwischen angussnahen und angussfernen Abmaßen gemacht werden. Es zeigt sich ein wesentlicher Unterschied auf Grund der Druckübertragung im Werkzeug. Somit steigen Abmaße angussnah und –fern nicht im gleichen Ausmaß an. Je höher der Nachdruck umso größer ist somit der Unterschied [10].

Die Werkzeugtemperatur hat denselben Einfluss auf die Schwindung wie die Steigerung der Bauteildicke. Je größer die Werkzeugtemperatur desto geringer ist die Abkühlgeschwindigkeit. Dies führt zu einer größeren Schwindung [10].

Generell ist eine Aussage über die Schmelztemperatur nur schwer möglich, da sich zwei Phänomene überlagern. Einerseits kommt es zu einem ähnlichen Effekt wie bei der Erhöhung der Werkzeugtemperatur und somit zur Erhöhung der Schwindung. Andererseits bewirkt die Steigerung der Schmelztemperatur bessere Fließfähigkeit des Kunststoffes und somit bessere Druckübertragung und Schwindungsreduktion [6, 12]. Beruft man sich auch auf das pVT–Diagramm führt eine Erhöhung der Massetemperatur, aufgrund des höheren spezifischen Volumens, zu einer größeren Schwindung [10].

Bei geringer Einspritzgeschwindigkeit kommt es zu einer raschen Abkühlung des Materials und somit auch zu einem schnellen Einfrieren des Angusses. Dies bewirkt

2. Theoretische Grundlagen

eine schlechtere Nachdruckübertragung. Es zeigt sich eine Schwindungssteigerung. Eine schnelle Einspritzgeschwindigkeit bewirkt hingegen eine größere Neigung zur Entstehung von Orientierungen im Bauteil und somit eine Erhöhung der Schwindung [6, 12].

Einspritzgeschwindigkeit, Schneckendrehzahl und Staudruck haben keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Schwindung und Maßhaltigkeit [10].

Entformung

Die Entformung bestimmt maßgeblich die Qualität des Endprodukts. Dabei beeinflussen vor allem Luft- und Vakuumeinschlüsse, Schwindung, Reib- sowie Adhäsionsvorgänge das Entformen der Bauteile (siehe Abbildung 17).

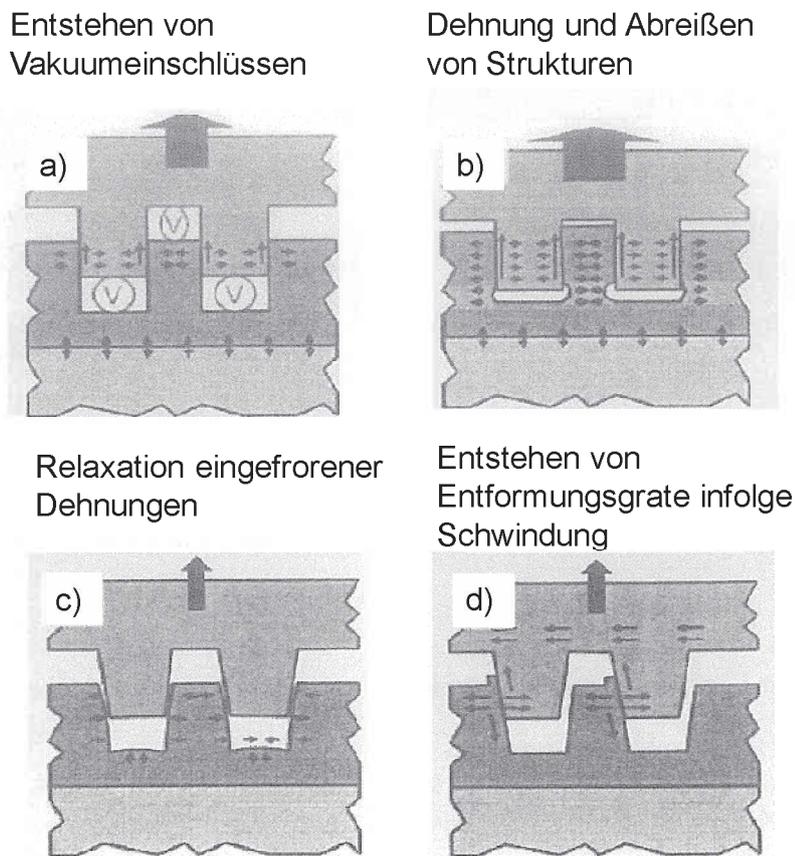


Abbildung 17: Schematische Darstellung verschiedener Entformungsprobleme nach [31]

Rauheit

Im Allgemeinen wird die Rauheit von Kunststoffbauteilen durch die Rauheit des Formeinsatzes im Werkzeug bestimmt [3]. Sie hängt somit stark vom Herstellungsprozess des Formeinsatzes ab. Zur Bestimmung der Rauheit können verschiedene Kenngrößen herangezogen werden. Die wichtigsten und häufig verwendeten sind R_a (arithmetischer Mittenrauwert), R_q (quadratischer Mittenrauwert) und R_z (gemittelte Rautiefe) [37].

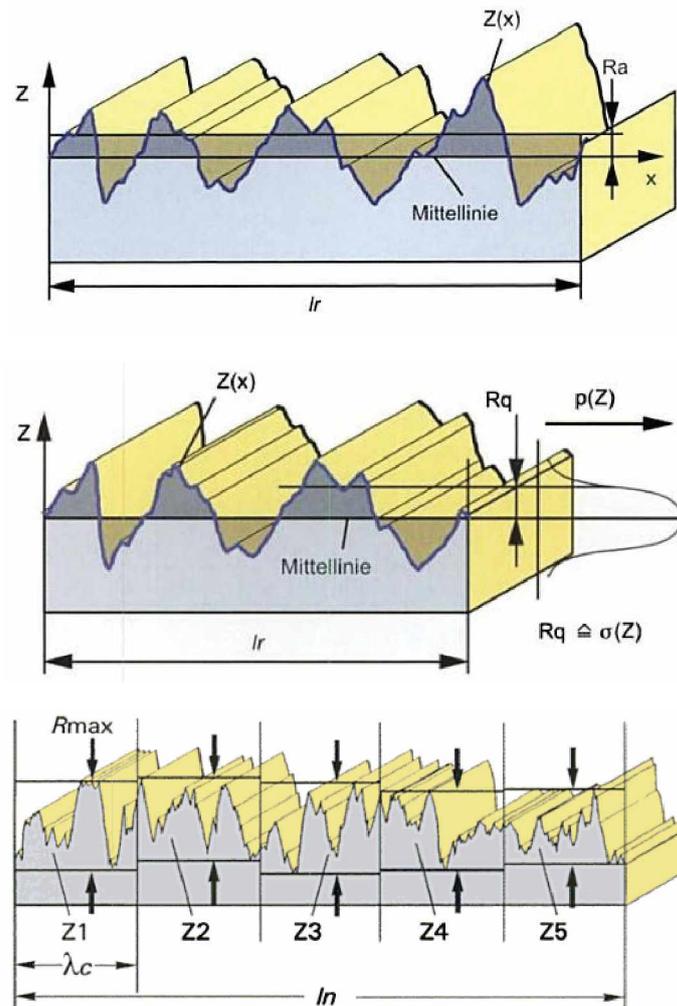


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Rauheitsmesswerte (oben: R_a , Mitte: R_q , unten: R_z) [37]

2.3 Fügen

Die Fügeverfahren von Kunststoffen lassen sich im Großen und Ganzen in drei Gruppen unterteilen: Schnappverbindungen, Schweißen und Kleben. In diesem Kapitel wird kurz auf die einzelnen Fügetechniken eingegangen.

Schnappverbindungen

Schnappverbindungen sind formschlüssige Verbindungen. Ein Wulst wird bei der Montage kurzzeitig ausgelenkt und rastet in einen Hinterschnitt des Verbindungspartners ein. Je nach Gestaltung kann zwischen lösbarer und unlösbarer Verbindung gesprochen werden. Unlösbare Verbindungen können Dauerlasten und höhere Temperaturen aufnehmen. Sie zeichnen sich durch eine hohe Belastbarkeit aus. Schnappverbindungen sind aufgrund der einfachen Montage eine sehr kostengünstige Fügemethode. [30]

Schweißen

Unter Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen versteht man das Fügen unter Druck, wobei durch unterschiedliche Möglichkeiten die Fügestellen in den viskoelastischen Zustand gebracht werden. Abbildung 19 zeigt die Einteilung verschiedene Verfahren nach Art der Erwärmung für das Schweißen von Thermoplasten. Ziel ist es, Kunststoffteile zu vereinen und eine homogene Verbindung an der Schweißstelle zu erhalten. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn es zu einer Verhakung der Molekülketten der Fügeteile an der Grenzfläche kommt. Voraussetzung für diese Vereinigung ist die Fließfähigkeit der Kunststoffe. Dies ist auch der Grund, weshalb Duromere und vernetzte Elastomere nicht, Thermoplaste jedoch schon schweißbar sind [2].

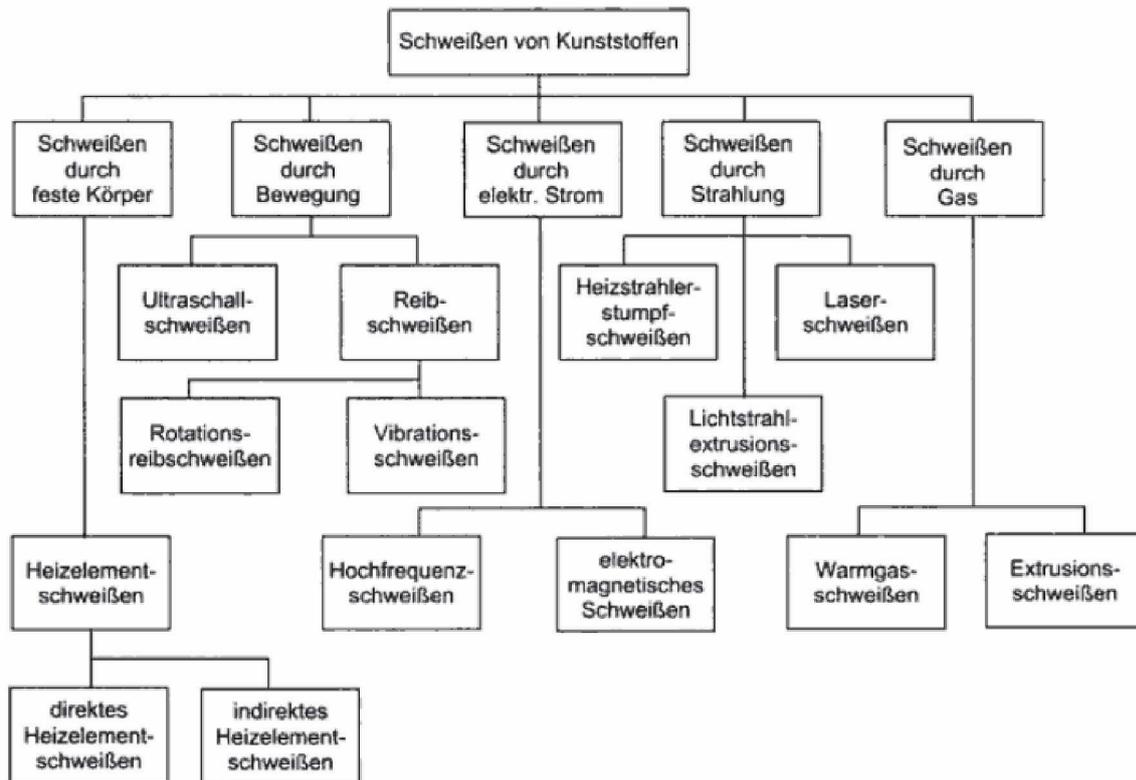


Abbildung 19: Schweißverfahren nach Arten der Erwärmung [30]

Da an der Schweißstelle Materialverhakung stattfindet, kann in diesem Bereich als Näherung der Mischungsgrundsatz herangezogen werden. Dieser besagt, dass sich polare und polare sowie unpolare und unpolare Stoffe gut mischen lassen. Daraus lässt sich eine gute Abschätzung der Schweißbeignung aufstellen. Jedoch muss beachtet werden, dass jeglicher Einfluss von Zusatzstoffen (zum Beispiel Weichmacher, Verarbeitungshilfsmittel, Farbstoffe) zu einer Änderung des Schweißverhaltens führen kann [36].

Kleben

Kleben ist eine weitere Möglichkeit, um Kunststoffteile miteinander zu verbinden. Das Fügen erfolgt durch Auftragung von viskosem Klebstoff oder Lösungsmittel und nachfolgender Verbindung unter Druck und Temperatur. Das Verkleben von Kunststoffen wird besonders dort eingesetzt, wo die hohen Festigkeiten der Schweißverbindung nicht benötigt oder die Kunststoffe durch den Wärmeeinfluss beim Schweißen deformiert werden [2]. Ein Vorteil gegenüber dem Schweißen zeigt sich bei Teilen aus Duromeren, Elastomeren, hochwarmfesten Thermoplasten und faserverstärkten Werkstoffen [8]. Während diese nicht schweißbar sind, können sie jedoch durch das Kleben verbunden werden.

2. Theoretische Grundlagen

Durch geeignete Maßnahmen vor der Verklebung ist es außerdem möglich, nahezu alle Kunststoffe miteinander zu verkleben. Die Vorbehandlungen können je nach Kunststoff und Oberflächenbeschaffenheit variieren. Unter Vorbehandlungen versteht man mechanische, chemische und physikalische Behandlungen für Kunststoffe, die sich nur schwer verkleben lassen. Bedeutend sind dabei das Entfetten und Reinigen, gegebenenfalls das Aufrauen der Oberfläche. Weiters wichtige Vorbehandlungen sind vor allem die thermische mit Gas- oder Plasmaflamme sowie die elektrische durch Korona-Entladung oder die Vorbehandlung durch Fluorierung. Dadurch kommt es zu einer chemischen Änderung der Klebefläche und somit zur Verbesserung der Klebbarkeit [2, 8].

Die Klebstoffarten für Kunststoffe werden in drei Gruppen, die Lösungsmittel-, Reaktions- und Schmelzklebstoffe eingeteilt. Weiters kann zwischen Adhäsions- und Diffusionsklebung unterschieden werden. Die Adhäsionsklebung ist nur bei Reaktionsklebstoffen gegeben. Dort treten Bindekräfte zwischen Kunststoffteil und Klebstoff nur durch Adsorptions- und Bindevorgänge auf. Bei Verklebungen von Kunststoffen mit anderen Werkstoffen kann nur Adhäsionsklebung zum Einsatz kommen. Während bei der Adhäsionsklebung zwischenmolekulare Kräfte für die Haftung ausschlaggebend sind, beteiligen sich bei der Diffusionsklebung auch die Hauptvalenzkräfte, die zu einer wesentlich höheren Festigkeit der Klebung führen. Die Diffusionsklebung (siehe Abbildung 20) tritt dort auf, wo durch Lösungsmittel oder Monomere die Kunststoffoberfläche angelöst oder aufgequollen wird. Auf Grund dessen wird diese Art der Klebung auch Quellschweißen genannt [8].

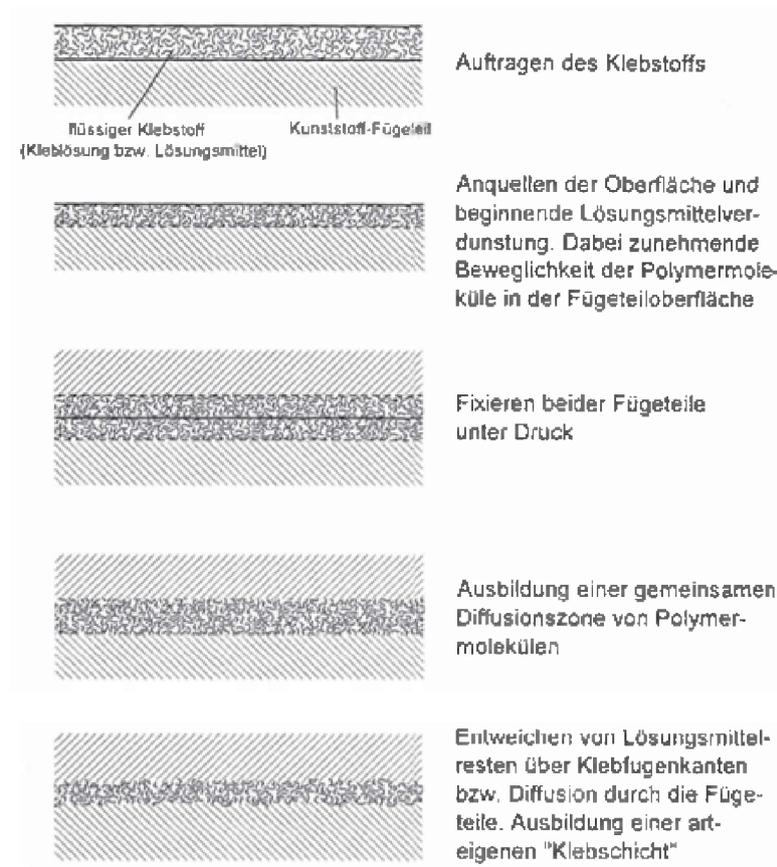


Abbildung 20: Prinzip der Diffusionsklebung bei Kunststoffen [7]

Bei Klebungen mit Lösungsmittelklebstoffen muss die Tatsache berücksichtigt werden, dass es sich um einen zeit- und temperaturabhängigen Prozess handelt. Dies bedeutet, dass erst nach völliger Diffusion beziehungsweise Verdunstung des Lösungsmittels aus der Klebeschicht eine vollständige Festigkeit der Klebung gewährleistet ist [8].

Die Klebung bei Reaktionsklebstoffen erfolgt vor allem auf Basis von Epoxidharzen, Polyurethanen und ungesättigten Polyestern. Der Nachteil gegenüber den Lösungsmittelklebstoffen liegt im Wesentlichen an der Oberflächenbehandlung. Nur wenige Kunststoffe wie zum Beispiel Polycarbonat, Polymethylmethacrylat oder Polystyrol sind ohne Behandlung klebbar [8].

Beim Kleben mit Schmelzklebstoffen werden viele auf Temperaturen nahe oder über Erweichungstemperatur der Kunststoffteile erhöht. Dies kann zu Verformung der Fügeteile führen. Hier muss deswegen während des Fügens mit Druck und Temperatur ein möglicher Ausgleich geschaffen werden, um Formänderung zu vermeiden [8].

3 Herstellungsprozess für den Salem-Chip

3.1 Überblick über die Prozesskette

Abbildung 21 zeigt eine schematische Darstellung der gesamten Prozesskette des Salem-Chips. Die Übersicht bildet sowohl die einzelnen Produkte, angefangen beim Silizium-Wafer bis hin zum Endprodukt, als auch die einzelnen Prozessschritte selbst (z.B. Belacken, Bonden) ab.

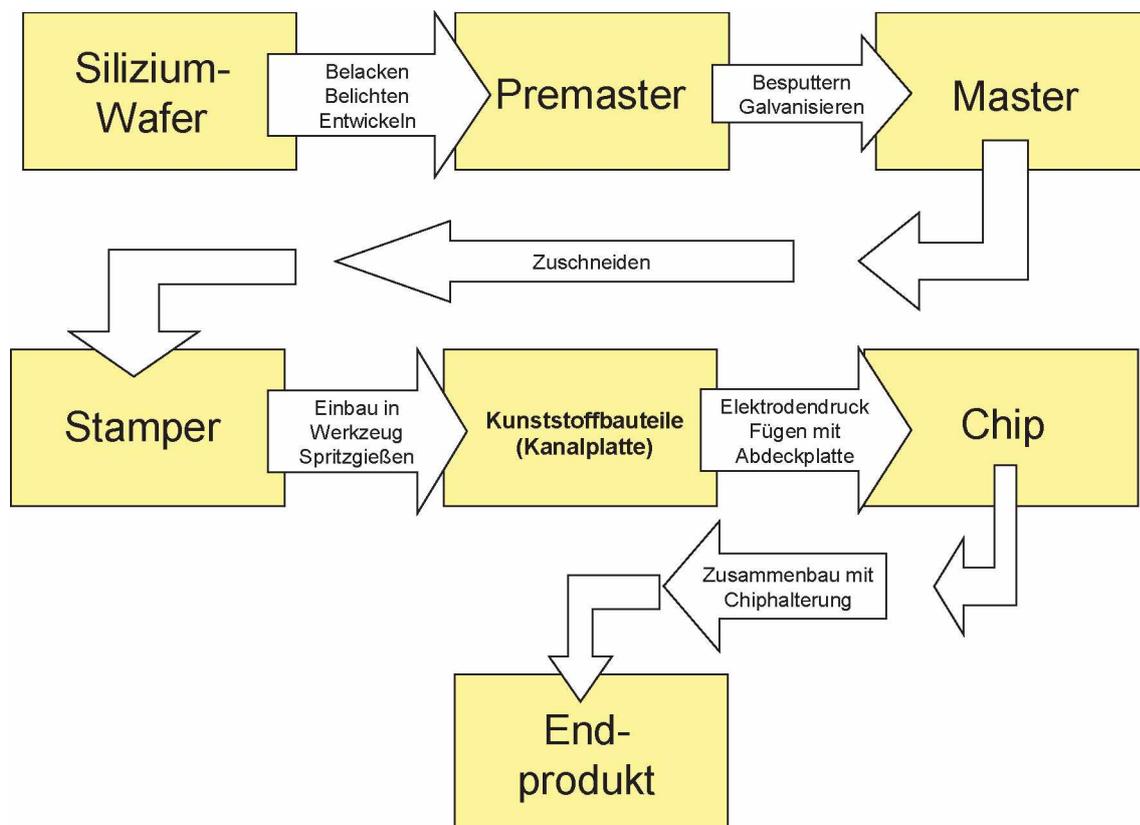


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Herstellung des Salem-Chips

Die Prozesskette des Salem-Chips beginnt bei der Belackung eines Silizium-Wafers mit Resist. Dieser wird mit Hilfe von Lasern belichtet. Dadurch wird eine definierte Struktur aufgebracht. Nach dem Entwickeln erhält man den sogenannten Premaster. Durch Besputtern mit Nickel und anschließendem Galvanisieren entsteht ein Negativbild des Premasters, der Master. Um ihn zu erhalten, muss der Premaster entfernt werden. Der Master besitzt nun schon die vorgegebene Struktur des Stampers, muss jedoch noch auf die Spritzgießwerkzeuggröße zugeschnitten werden. Nach dem Zuschnitt wird der Stamper ins Werkzeug eingesetzt und es

3. Herstellungsprozess für den Salem-Chip

kann mit der Produktion der Kunststoffbauteile begonnen werden. Um die zwei Flüssigkeiten in der Reaktionskammer miteinander vereinen zu können (siehe Kapitel „1 Einleitung und Zielsetzung“, S. 3) muss ein elektrisches Feld erzeugt werden. Dafür werden an bestimmten Stellen der Kanalplatte Elektroden aufgedruckt. Anschließend werden Kanal- und Abdeckplatte mittels Fügens miteinander zum Chip verbunden. Schließlich werden auf dem Chip noch Dichtungen aufgebracht. Im letzten Schritt wird der Chip in eine Chiphalterung eingebaut. Abbildung 22 zeigt die Einzelkomponenten des Chips.

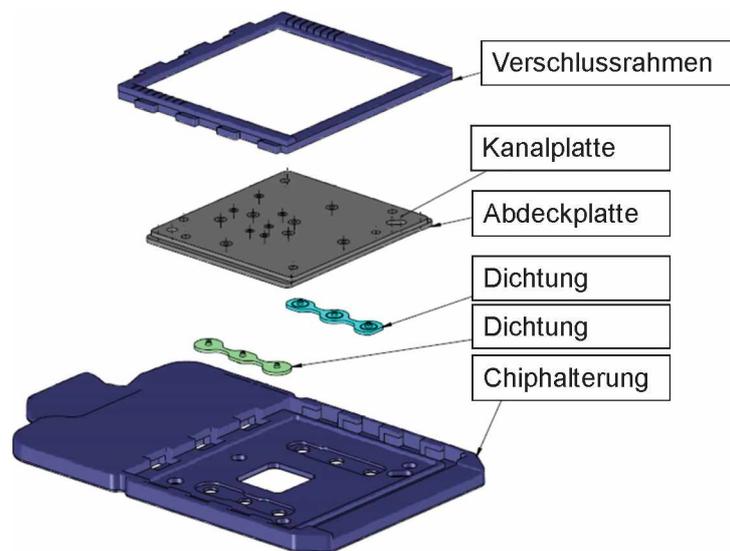


Abbildung 22: Komponenten des Endproduktes [16]

3.2 Wesentliche Qualitätskriterien je Prozess

In Tabelle 2 sind die wesentlichen Qualitätskriterien der einzelnen Prozesse aufgelistet.

Tabelle 2: Kritische Größen während der Prozesse

Prozess	Prozesskette im Detail	Qualitätskriterien
Mastering	Silizium-Wafer	
	Belacken	Schichtdicke (verteilung) Oberflächenqualität
	Belichten	Kanaltiefe Oberflächenqualität
	Entwickeln	Kanaltiefe
	Premaster	
Plating (inklusive Zuschneiden)	Besputtern/ Galvanisieren	homogene Nickelschichtdicke Ver-/Durchbiegung Oberflächenqualität
	Master	
	Zuschneiden	Schnittgröße Ver-/Durchbiegung
	Stamper	
Replikation	Einsetzen in Werkzeug	Ver-/Durchbiegung Beschädigung der Struktur
	Spritzgießen	Abformung der Struktur Entformungsgrate Ver-/Durchbiegung Dickenverteilung Schwindung Rauheit Oberflächenqualität
	Kunststoffbauteil	
Druck	Elektrodendruck	Haftung des Druckes Leitfähigkeit Verunreinigung
	Bedrucktes Teil	
Deckeln	Fügen	Kanalgeometrie Dichtheit der Kanäle
Assemblierung	Chip	
	Zusammenbau	Beschädigung des Chips
	Endprodukt	

3.3 Prozessschritte

Grundsätzlich muss bei der Herstellung von Chips für den medizintechnischen Bereich sehr stark auf Reinheit und Sauberkeit geachtet werden. Dies ist nötig, um das Maß an Verunreinigung möglichst klein zu halten und eine hohe Oberflächenqualität der einzelnen Produkte zu erzielen.

Im Folgenden werden die wichtigsten und bis jetzt bekannten Einflussfaktoren auf die einzelnen Prozesse genauer erläutert.

3.3.1 Belacken

Das Belacken des Silizium-Wafers mit dem Resist findet nicht bei Sony DADC selbst statt. Es muss daher auf das Prozessknowhow der Zulieferer vertraut werden.

3.3.2 Belichten

Der Resist wird mit einem Laser belichtet. Somit entstehen die Strukturen in der Schicht. Durch Variation der Laserleistungen können verschiedene Tiefen in die Lackschicht aufgebracht werden. Wird die Laserleistung zu stark gewählt, können zu tiefe Strukturen bis hin zu Durchlöcher entstehen, die sich bis zur Grundplatte durchziehen können.

3.3.3 Entwickeln

Nur durch das richtige Zusammenspiel von Belacken, Belichten und Entwickeln können vorgegebene Struktur Tiefen auch präzise erreicht werden.

3.3.4 Besputtern / Galvanisieren

Bei diesem komplexen Prozessschritt muss noch einmal im Besonderen auf die Sauberkeit geachtet werden um sicherstellen zu können, dass durch gute Haftung eine homogene Nickelschicht aufgebracht wird. Ungenügende Haftung zwischen Oberfläche und aufgalvanisiertem Metall führt zu schlechter Abformung des Resists und zu Defekten in der Metallschicht. Außerdem muss besonders auf die Zusammensetzung der Elektrolyte geachtet werden, um eine homogene Verteilung des Nickels zu gewährleisten.

Weiters muss auch das Entfernen des Premasters vom Master mit Sorgfalt durchgeführt werden, um irreversible Beschädigungen am Master zu vermeiden.

3.3.5 Spritzgießen

Erfahrungswerte zeigen, dass vor allem beim Spritzgießen von Mikrostrukturen Durchbiegung, schlechtere Abformung, Gratbildung und große Schwindung auftreten können. Diese Faktoren werden im Besonderen durch

- Einspritzgeschwindigkeit
- Schmelztemperatur
- Werkzeugtemperatur
- Entformungstemperatur
- Nachdruckzeit sowie
- Nachdruckhöhe

beeinflusst [9].

3.3.6 Elektrodendruck

Beim Elektrodendruck treten folgende zwei Fehlerbilder häufig auf. Auf Grund von Rauheit kommt es zu keiner vollständigen Haftung des Drucks am Kunststoffteil. Weiters kann Druck aus den Kanälen austreten. Die Gründe dafür sind noch nicht geklärt. Beide Fälle können jedoch dazu führen, dass die Elektroden nicht mehr leitfähig sind.

3.3.7 Fügen

Schwierigkeiten zeigen sich nach dem Fügen in der Dichtheit und Geometrie der Kanäle. Diese hängen stark von den Entformungsgraten und auch der Durchbiegung der Kunststoffteile ab.

4 Experimentelles

4.1 Material

Für diese Arbeit wurde ein Cycloolefinpolymer (COP) mit der Bezeichnung Zeonor 1060R (Zeon Corporation, Japan) verwendet. Auf Grund seiner hohen Transparenz, der guten Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit, guten Fließeigenschaften, sowie der geringen Wasseraufnahme und Viskosität wird es häufig für die Anwendung im Bereich Medizintechnik eingesetzt. Die chemische Struktur von COP ist in Abbildung 23 gezeigt. Einige der wichtigsten Materialdaten lassen sich Tabelle 3 finden [1, 19, 20].

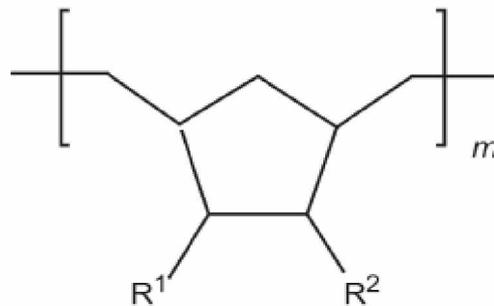


Abbildung 23: Chemische Struktur von COP [34]

Tabelle 3: Einige wichtige Materialdaten von Zeonor 1060R [1, 19, 20]

Eigenschaft	Messwert	Einheit	Prüfmethode
Wasseraufnahme	<0,01	%	ASTM D570
Feuchtigkeitsdurchlässigkeit	0,29	g/m ² 24h	JIS Z0280 (300 µm)
Lichtdurchlässigkeit	92	%	ASTM D1003
Glasübergangsbereich	90-100	°C	JIS K7121
MFR	14	g/10min	JIS K6719 (260 °C; 21,18 N)
Schwindung	0,1-0,3	%	ASTM D955

4.2 Bauteil und Messpositionen

Abbildung 24 zeigt eine schematische Darstellung des Bauteils. Die Zahlen geben Messpositionen für die Messung der Kanaltiefe und Abformungsdifferenz an. Es wurden die gleichen Positionen ausgehend vom Premaster bis hin zum Chip definiert um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Weiters wurden an denselben Positionen Fotos mit Hilfe eines Lichtmikroskops vor und nach dem Fügen der Kunststoffteile gemacht.

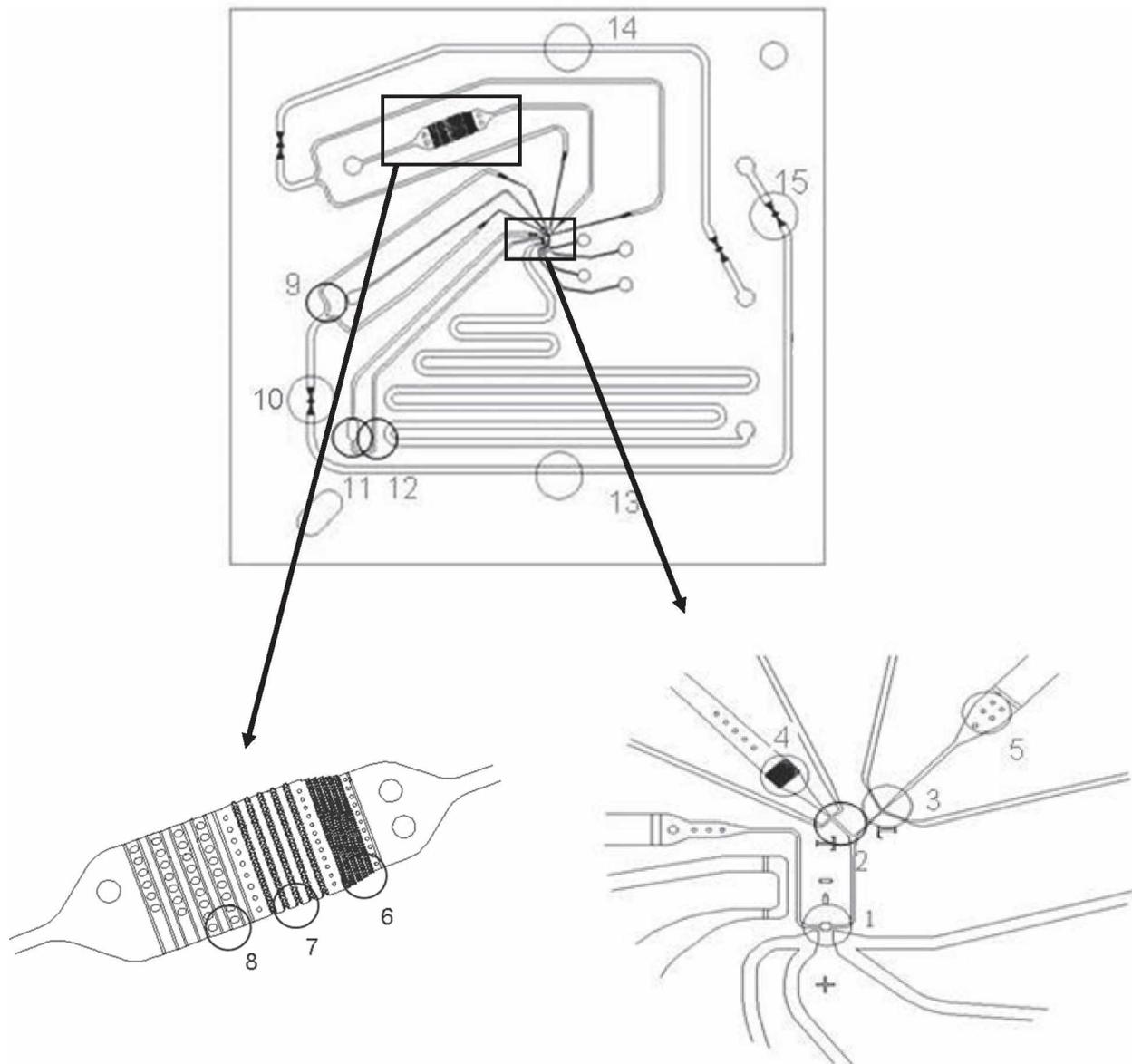


Abbildung 24: 15 definierte Positionen; oben: gesamtes Bauteil, unten links: große Filterstruktur, unten rechts: Kanalstruktur in der Mitte des Bauteils [16]

4.3 Verwendete Anlagen

Im Folgenden werden kurz die untersuchten Stationen der Chipherstellung und die dabei verwendeten Geräte genauer erklärt.

4.3.1 Spritzguss

Alle Kunststoffteile (sowohl Kanal- als auch Abdeckplatte) in den Versuchen und der Produktion wurden an vollelektrischen, holmlosen Spritzgießmaschinen ENGEL e-motion 200/100 der Firma Engel Austria GmbH, Österreich hergestellt. Die variotherme Werkzeugführung wurde durch fluidische Temperierung der festen Werkzeugplatte realisiert.



Abbildung 25: ENGEL e-motion 200/100 [21]

Um den Stamper in das Werkzeug einbauen zu können, wird dieser zu erst in einen Rahmen eingespannt (siehe Abbildung 26). Danach wird eine Distanzplatte in den Rahmen eingelegt (siehe Abbildung 27). Mit Hilfe von Schrauben wird der Rahmen mit eingespanntem Stamper und Distanzplatte in das Spritzgießwerkzeug eingebaut.

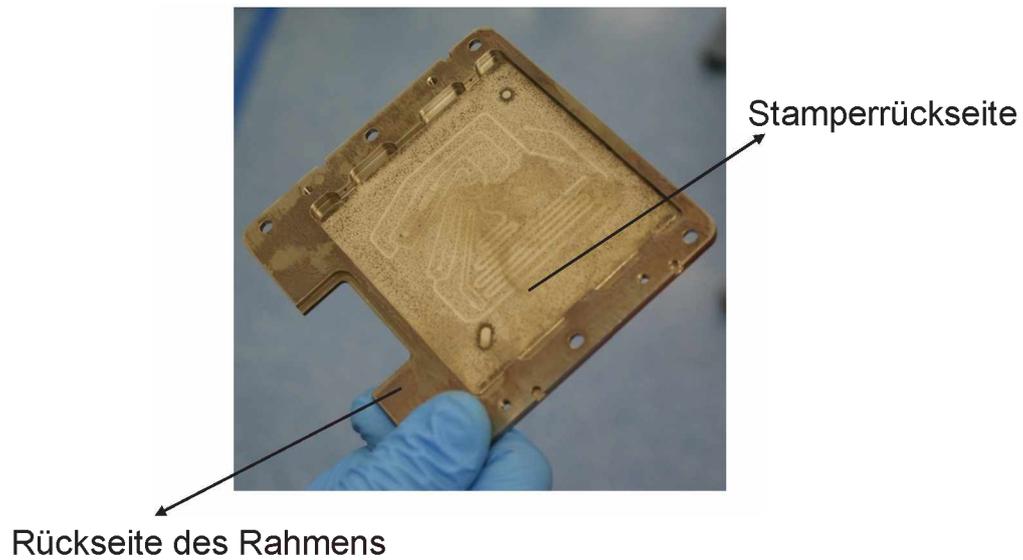


Abbildung 26: Stamper in Rahmen eingespannt

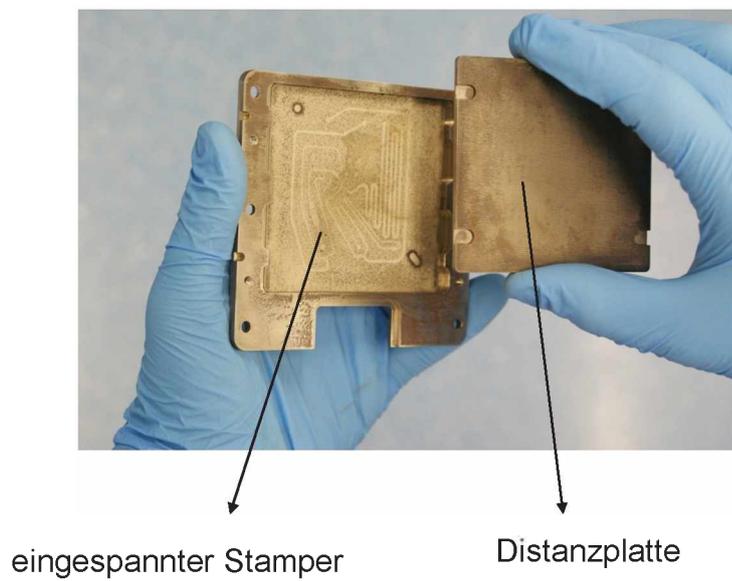


Abbildung 27: Stamper mit Distanzplatte

4.3.2 Elektrodendruck

Um nach dem Spritzgießen auf der Kanalplatte den Elektrodendruck aufbringen zu können, musste auf die zu bedruckenden Bereiche (siehe rote Markierung in Abbildung 28) der Kunststoffteile zuerst ein Haftvermittler aufgebracht werden. War dieser ausgehärtet, so wurden die Teile mit Hilfe des Druckers DIMATIX DMP 2831 der Firma Fujifilm DIMATIX Inc., USA bedruckt und zum Verdampfen der überschüssigen Tinte ausgelagert.

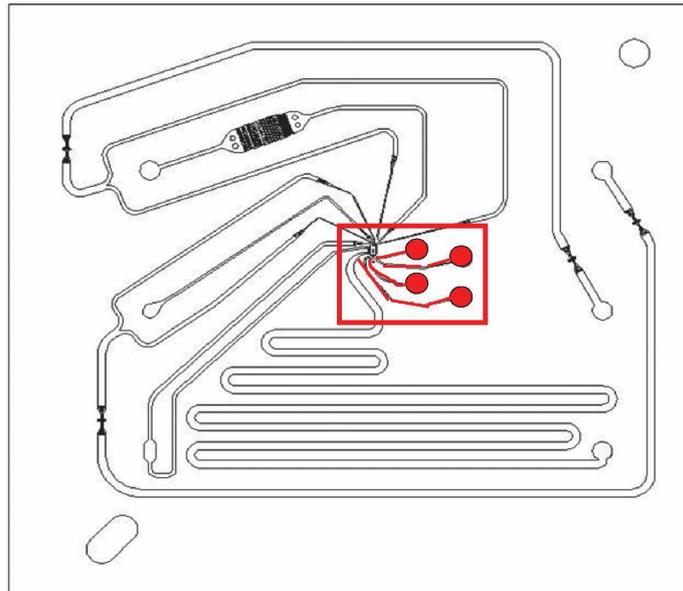


Abbildung 28: Bedruckte Bereiche auf der Kanalplatte [16]



Abbildung 29: Drucker DIMATIX DMP 2831 [22]

4.3.3 Fügen

Um einen Chip zu erhalten, mussten Kanal- und Abdeckplatte zusammengefügt werden. Zuerst wurde deswegen eine Oberflächenbehandlung der Abdeckplatte mit einem geeigneten Lösungsmittel durchgeführt. Diese führte zur Aktivierung der Oberfläche. Mittels Zentrierung konnten Kanal- und Abdeckplatte in die Schmidt ServoPress 460 (siehe Abbildung 30) der Firma SCHMIDT Technology GmbH, Deutschland eingelegt und zusammengefügt werden.

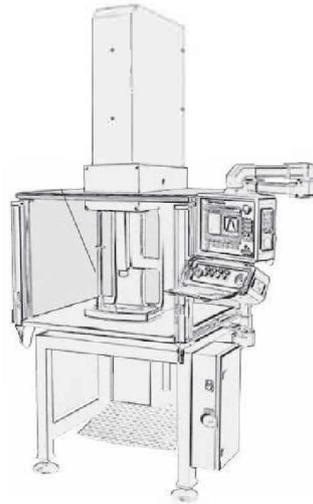


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Schmidt ServoPress 460 [23]

4.4 Prüfplan

Es wurde ein Konzept für die Vereinheitlichung der Prüfungen im Bereich Qualitätssicherung, angefangen beim Premaster bis hin zum Chip, ausgearbeitet. Tabelle 4 zeigt den Konzeptvorschlag für den Prüfplan. Die mit „x“ markierten Zellen zeigen jene Messungen an, die vor dem Konzeptvorschlag standardmäßig durchgeführt wurden. Die mit „o“ markierten zeigen jene, die noch hinzugefügt wurden. Bestimmte Messungen, wie jene der Kanaltiefe und -breite am Lichtmikroskop, konnten nicht für alle Teile der Prozesskette übernommen werden, da für diese Untersuchung das Teil zerschnitten werden muss. Messungen des Premasters am Lichtmikroskop und Topographiemessgerät waren auf Grund der Lichtempfindlichkeit des Resists nicht möglich. Weiters konnten Messungen am REM auf Grund der baulichen Situation erst ab dem Stamper durchgeführt werden.

Tabelle 4: Prüfplan (schwarz gekennzeichnet: nicht möglich, gestreift gekennzeichnete: nicht sinnvoll)

		Premaster	Master	Stamper	Kunststoffteile	bedruckter Bereich am Teil	Chip
Messgröße	Methode						
Kanaltiefe	Konfokalmikroskop	x	o	x	x		
	Lichtmikroskop				o		x
Kanalbreite	Lichtmikroskop				o		x
Oberflächenqualität	Lichtmikroskop		o	o	o		x
	REM			o	o		
Durchbiegung	Topographiemessgerät		x	o	x		
Abformungsdifferenz	Konfokalmikroskop				x		
Entformungsgrate	Konfokalmikroskop				x		
Dickenverteilung	Mikrometerschraube				x		
Schwindung	Optisches Messgerät			o	o		
Rauheit im Kanal	Konfokalmikroskop	o	o	o	o		
Haftung des Drucks	Lichtmikroskop					x	
Durchgängigkeit des Drucks	Lichtmikroskop					x	
Dichtheit	Lichtmikroskop						x

4.5 Verwendete Messgeräte und Messdurchführung

Folgende Kapitel beschreiben die verwendeten Messgeräte und Messdurchführungen sowie -auswertungen. Untersucht wurden Premaster, Master, Stamper sowie unbedruckte und bedruckte Kanalplatten und der fertige Chip. Messungen am Silizium-Wafer und im eingebauten Chip wurden keine gemacht. Alle Messungen und Auswertungen wurden bei Sony DADC durchgeführt.

4.5.1 Konfokalmikroskop

Die Kanaltiefe, Abformungsdifferenz und Entformungsrate am Kunststoffteil sowie die Rauheit im Kanal konnten mit Hilfe des Konfokalmikroskops FRT MicroSpy Topo (siehe Abbildung 31) der Firma FRT GmbH, Deutschland, untersucht werden. Die Messungen wurden mit zwei verschiedenen Objektiven, 50x für Premaster und Master sowie 20x für Stamper und Kunststoffteil (siehe Tabelle 5), durchgeführt. Das Objektiv 50x wurde benutzt, um mögliche Verformungen an den Kanten der Kanäle durch den Belichtungs- und Entwicklungsprozess besser sichtbar zu machen. Die Auswertung erfolgte durch das Auswertungsprogramm FRT Mark III Version 3.8.22.1.



Abbildung 31: Konfokalmikroskop FRT MicroSpy Topo [24]

Tabelle 5: Wichtige Daten der Objektive des FRT MicroSpy Topo [24]

Objektiv	Höhenmessbereich in μm	Auflösung z in nm	Auflösung x,y in μm	Messfeld in μm
50x	400	2	0,463	356 x 267
20x	400	3	1,16	890 x 655

4. Experimentelles

Die Messungen der Kanaltiefe, Abformungsdifferenz und Entformungsgrate wurden an allen 15 Positionen (siehe Kapitel „4.2 Bauteil und Messpositionen“, S. 26) durchgeführt. Vor der eigentlichen Auswertung musste eine Nivellierung der Profilmessung mit Hilfe zweier Punkte, links und rechts neben der Struktur (siehe rote Punkte in Abbildung 32 bis Abbildung 34), durchgeführt werden. Die ausnivellierte Ebene ist durch die blaue Gerade in Abbildung 32 bis Abbildung 34 dargestellt. Die Kanaltiefe wurde gemessen als der y-Abstand der ausnivellierten Ebene und eines tiefen Strukturpunkts. Bei schlechter Abformung wurde beobachtet, dass die Zäpfchen der Filterstrukturen nicht präzise abgeformt wurden. Die Abformungsdifferenz war somit der Höhenunterschied zwischen ausnivellierter Ebene und Zäpfchen. Weiters wurde der Entformungsgrat, der y-Abstand zwischen nivellierter Ebene und höchstem Strukturpunkt, gemessen. Dieser Grat ist das Ergebnis der Abscherung des noch schmelzflüssigen Kunststoffteils am Stamper beim Einformen. Der maximale Grat war immer an der Kante der Filterstruktur zu finden. Abbildung 32 bis Abbildung 34 zeigen beispielhaft die Durchführung der Auswertung.

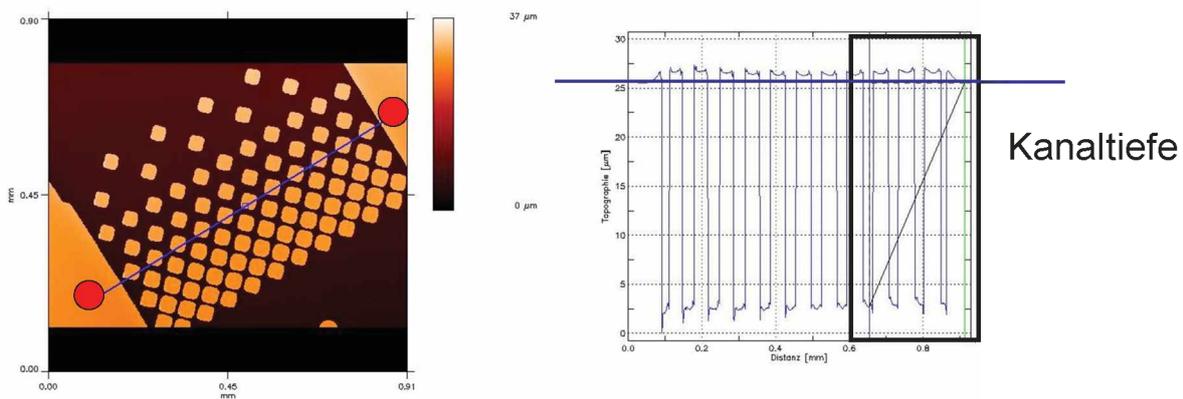


Abbildung 32: Auswertung der Kanaltiefe

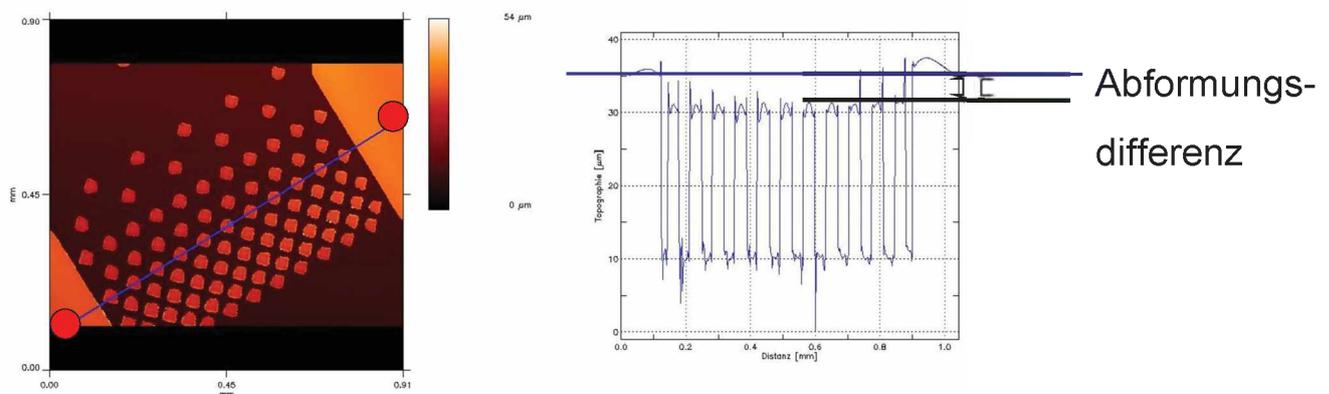


Abbildung 33: Auswertung der Abformungsdifferenz der Struktur

4. Experimentelles

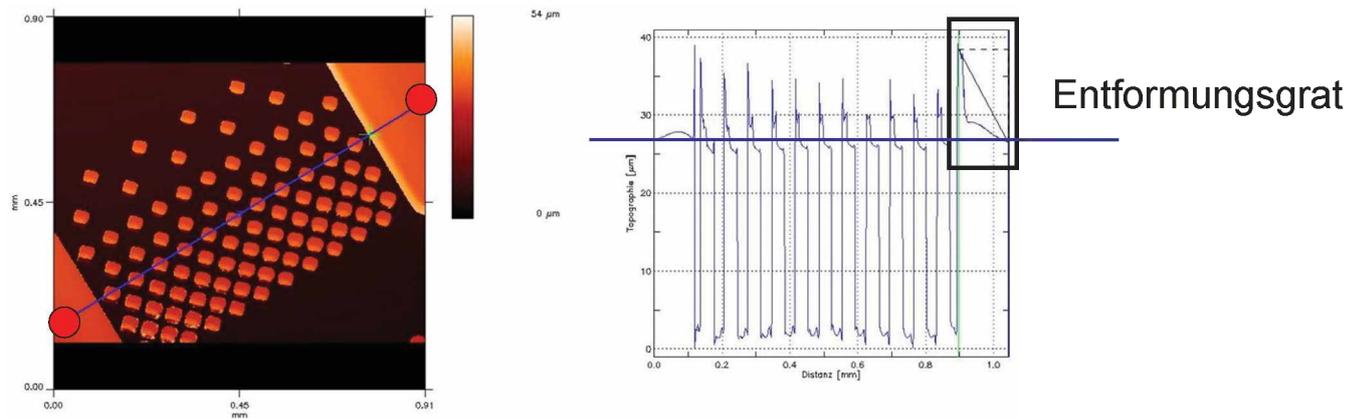


Abbildung 34: Auswertung des Entformungsgrats

Die Rauheit im Verbindungskanal und in der -kammer hat einen möglichen Einfluss auf den Verbindungsprozess der Tröpfchen. Deshalb wurden Rauheitsmessungen an Position 1, in der Verbindungskammer, an drei Stellen, an den Kunststoffteilen durchgeführt (siehe Abbildung 35). Die Rauheit wurde auch am Premaster, Master und Stamper auf dieselbe Weise untersucht.

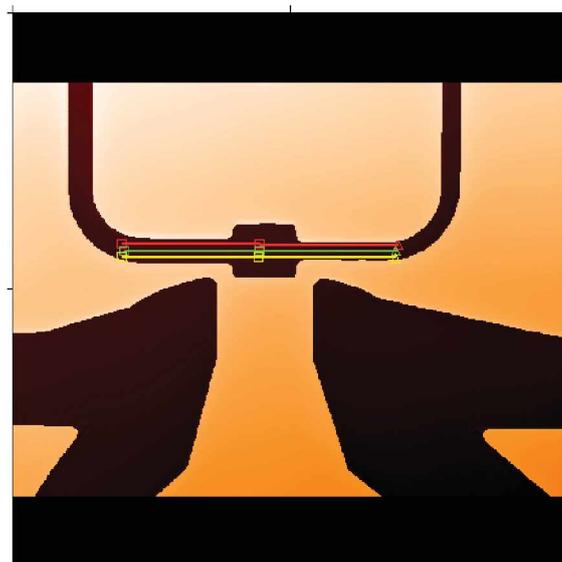


Abbildung 35: Messung der Rauheit (rot: Messung oben, grün: Messung Mitte, gelb: Messung unten)

Außerdem wurden Rauheitsmessungen in den Kanälen, in denen sich der Elektrodendruck befindet, durchgeführt, da die Rauheit Einfluss auf die Haftung des Elektrodendrucks haben kann. Die Messungen fanden an fünf Stellen zu je drei Positionen (Stellen: zwei Elektrodenpunkte, zwei Elektrodenkanäle, Elektrodenspitze; Positionen: oben, Mitte, unten; siehe rote Markierung in Abbildung 36) statt.

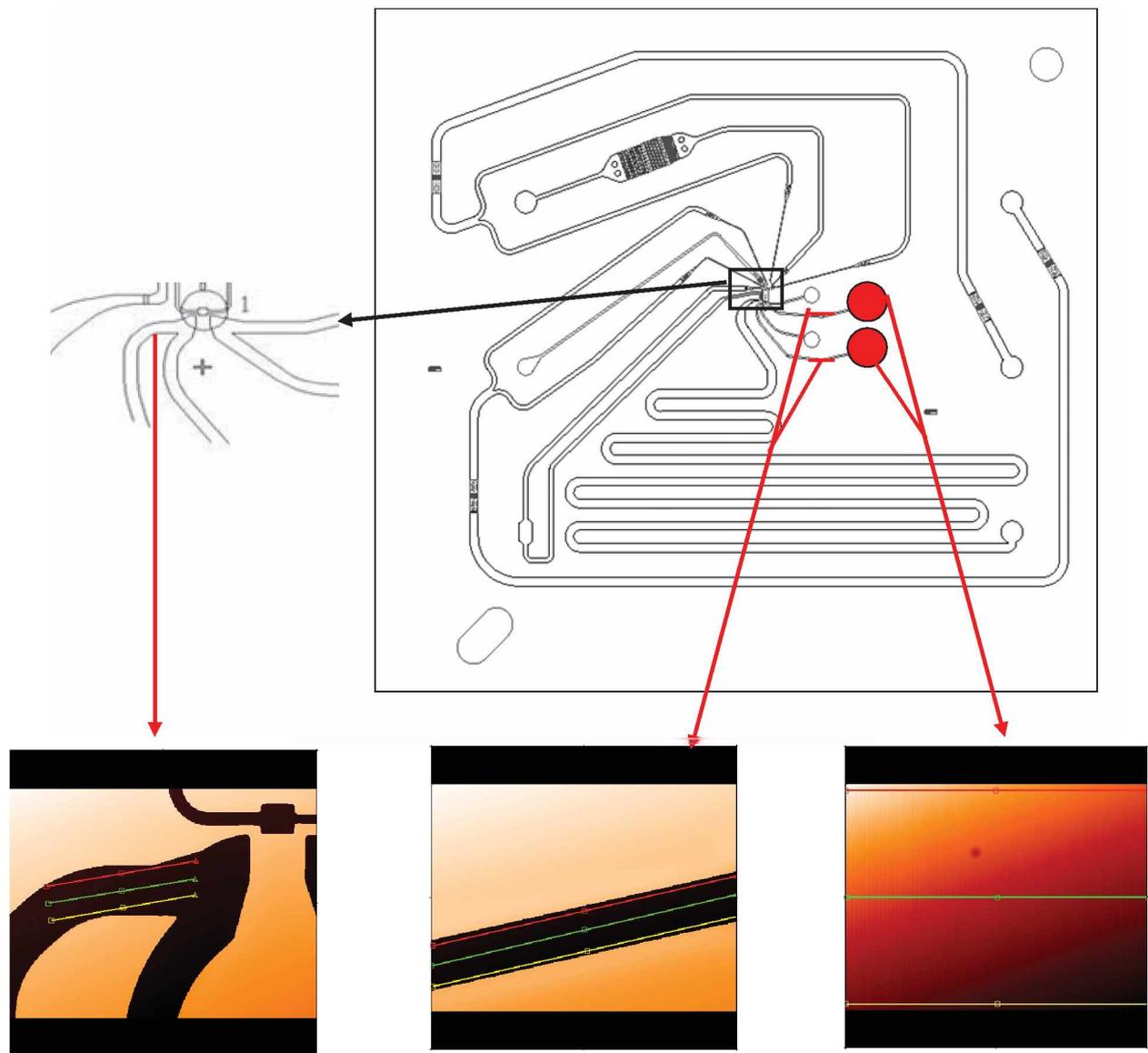


Abbildung 36: Messpositionen; links: Elektrodenspitze, Mitte: Elektrodenkanal, rechts: Elektrodenpunkt (rot: Messung oben, grün: Messung Mitte, gelb: Messung unten)

4.5.2 Topographiemessgerät

Die Topographie der Master und Stamper sowie der Kunststoffteile wurde mit Hilfe des FRT MicroProf 200 (siehe Abbildung 37) der Firma FRT GmbH, Deutschland, mit einem chromatischen Weißlicht Sensor (CWL-Sensor) gemessen. Die wichtigsten Daten des Sensors lassen sich in Tabelle 6 finden. Das aufgenommene 3D-Bild wurde mit dem Programm Aquire Version 1.38 Software ausgewertet.

Tabelle 6: Wichtige Daten des CWL-Sensors [25]

Messbereich in mm	Auflösung z in nm	Auflösung x,y in μm	Messwinkel in $^\circ$
3	30	6	90 ± 30



Abbildung 37: Topographiemessgerät FRT MicroProf 200 [26]

Die Auswertung der Durchbiegung am 3D-Bild erfolgte an mehreren Positionen. Es wurden drei Messungen in Quer- und Längsrichtung (x1 bis x3 sowie y1 bis y3) durchgeführt. Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen die schematische Darstellung der Messpositionen sowie die Messung der Durchbiegung selbst. Zur Darstellung der Durchbiegung in den Diagrammen wurde die maximale Durchbiegung herangezogen.

4. Experimentelles

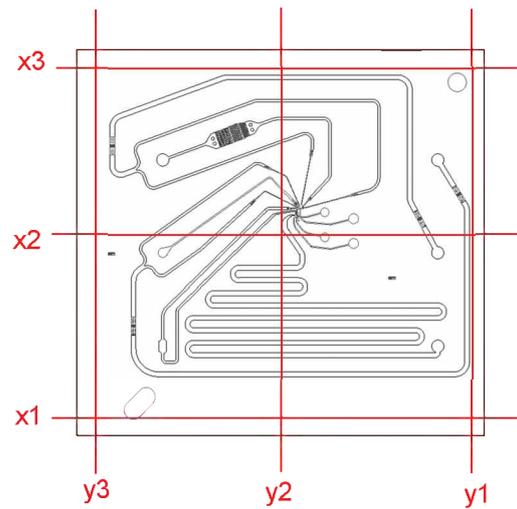


Abbildung 38: Schematische Darstellung der Messpositionen für die Durchbiegung (Linien x1 bis x3 sowie y1 bis y3) [16]

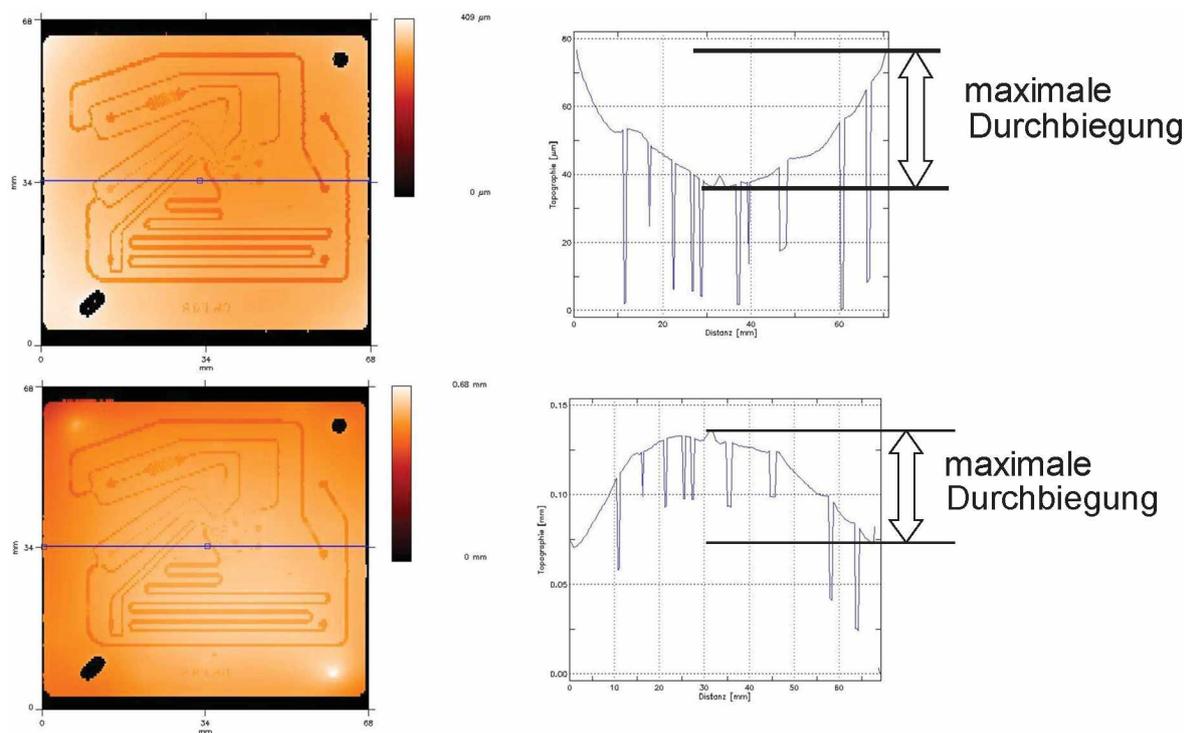


Abbildung 39: Messung der Durchbiegung, oben: positive maximale Durchbiegung, unten: negative maximale Durchbiegung

4.5.3 Optisches Messgerät

Zur Bestimmung von Abmaßen wie zum Beispiel Länge und Breite der Bauteile oder anderer Abstände am Kunststoffteil wurde das optische Messgerät Werth ScopeCheck 200 der Firma Werth Messtechnik GmbH, Deutschland, verwendet (siehe Abbildung 40). Mit Hilfe der Prüfergebnisse war es möglich, Schwindungsberechnungen durchzuführen.



Abbildung 40: Optisches Messgerät Werth ScopeCheck 200 [27]

Zur Berechnung der Schwindung müssen dieselben Messpositionen am Stamper sowie am Kunststoffteil bestimmt werden. Die roten Kreise in Abbildung 41 zeigen die dafür gemessenen Messpositionen an. Die Abstände x und y wurden zur Schwindungsberechnung herangezogen.

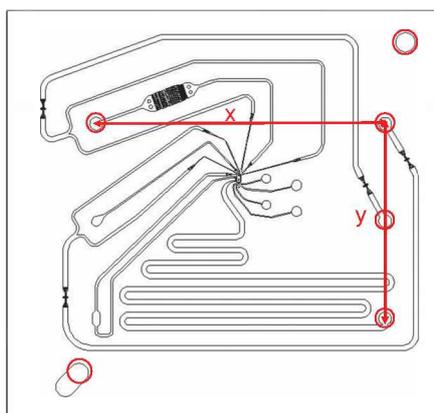


Abbildung 41: Messpositionen für Schwindungsmessung [16]

4.5.4 Dickenmessung

Die Dicke der Kunststoffteile wurde mit Hilfe einer Mikrometerschraube im Abstand von 5 mm von der Außenkante in der Mitte jeder Seitenkante gemessen (siehe rote Kreise in Abbildung 42). Die Dickenverteilung (maximaler - minimaler Wert) konnte aus den gemessenen Daten berechnet werden.

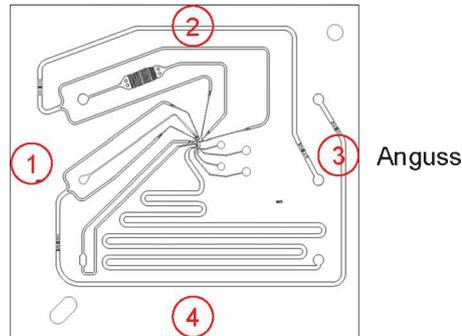


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Messpositionen für die Dickenverteilung (Kreise 1 bis 4) [16]

4.5.5 Rasterelektronenmikroskop (REM)

Mit Hilfe des REM HITACHI S-4000 (Hitachi High-Technologies Corporation, Japan) war es möglich, Untersuchungen der Oberfläche an den Positionen in der Zentralstruktur von Stamper und Kunststoffteilen durchzuführen. Man konnte mit Hilfe des REMs die Rauheit im Kanal optisch sichtbar machen. Das Messgerät ist in Abbildung 43 dargestellt. Um Messungen an den Kunststoffteilen durchführen zu können, mussten diese zuerst mit einer dünnen Goldschicht beschichtet werden.



Abbildung 43: REM HITACHI S-4000 [28]

4.5.6 Lichtmikroskop

Untersuchungen der Oberfläche wurden auch mit dem Lichtmikroskop Nikon Eclipse LV100 (siehe Abbildung 44) der Firma Nikon GmbH, Deutschland, durchgeführt. Es wurden an bestimmten Positionen Fotos vom Kunststoffteil vor und nach dem Fügen geschossen, um etwaige Änderungen in der Struktur aufzeigen zu können. Nach dem Fügen wurde weiters die Dichtheit der Kanäle (z. B. keine Lufteinschlüsse direkt am Kanal) mit dem Mikroskop optisch beurteilt.



Abbildung 44: Lichtmikroskop Nikon Eclipse LV100 [29]

Es war außerdem möglich, durch Fotos von bedruckten Teilen sowohl Aussagen über die Haftung des Drucks als auch über die Durchgängigkeit des Drucks zu treffen (siehe Abbildung 45).

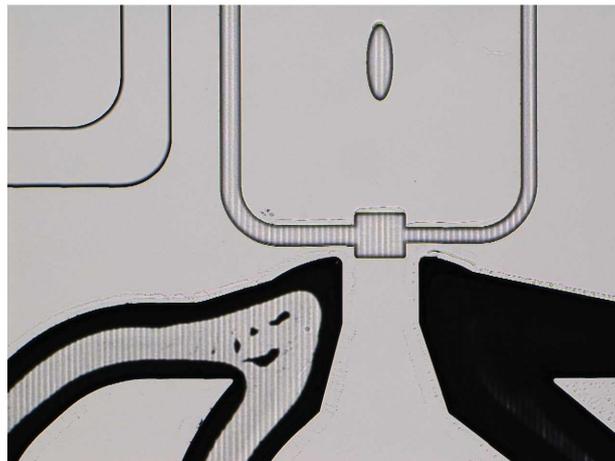


Abbildung 45: Ungenügende Haftung des Drucks in linker Elektrodenspitze

Das Mikroskop diente auch zur Vermessung der Kanalquerschnitte. Der Chip wurde dafür zerschnitten und die Schnittstelle mit Hilfe eines Mikrotoms verfeinert.

4. Experimentelles

Dadurch konnte die Kanalbreite und -tiefe sowie eventuelle Deformationen ermittelt werden. Die Messpositionen wurden auf Grund der besonderen Bedeutung für die Funktionalität des Chips in den Kanälen vor und nach der Verbindungskammer ausgewählt (siehe Abbildung 46 und Abbildung 47).

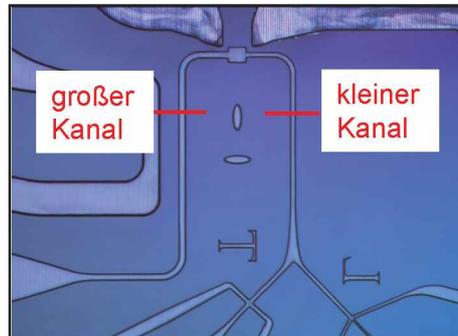


Abbildung 46: Messposition für Kanaltiefe und -breite nach dem Fügen (rote Markierung zeigt Position des Schnittes)

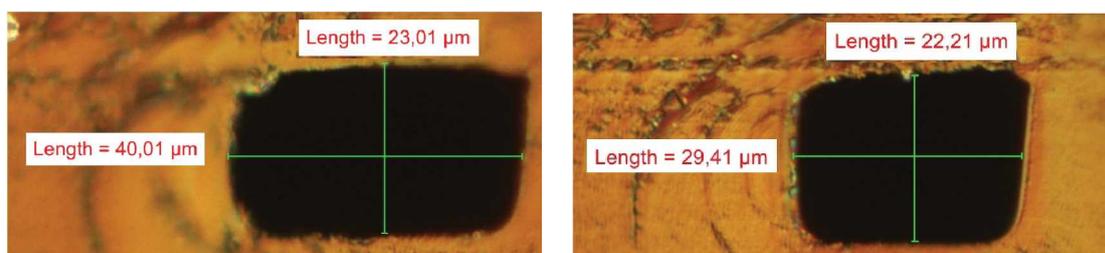


Abbildung 47: Messung der Kanaltiefe und -breite am großen (linkes Bild) und kleinen Kanal (rechtes Bild)

4.6 Ermittlung des Prozessfensters von Spritzguss und Fügen

Um Prozessfenster zu ermitteln, wurden Versuchspläne für das Spritzgießen und Fügen ausgearbeitet und durchgeführt.

4.6.1 Versuche im Spritzgießprozess

Für die Faktorenversuchspläne wurden drei Stamper (Stamper 9.21, Stamper 9.24 und Stamper 10.4) verwendet. Diese unterschieden sich ausschließlich in ihrem Herstellungsdatum. Stamper 9.21 wurden am 20.08.2011, Stamper 9.24 am 27.08.2011 und Stamper 10.4 am 29.10.2011 hergestellt.

Die Auswahl der zu variierenden Prozessparameter erfolgte auf Grund von Erfahrung durch Vorversuche. Es wurden die Werkzeugtemperatur beim Einspritzen, die Einspritzgeschwindigkeit sowie die Nachdruckhöhe als zu variierende Parameter ausgewählt. Für jeden Parameter wurden drei verschiedene Einstellungen bestimmt. Es sollten Versuche mit isothermer und variothermer Werkzeugführung durchgeführt werden, um mögliche Unterschiede aufzeigen zu können. Aus Vorversuchen zeigte sich, dass eine Werkzeugtemperatur von 75 °C beim Entformen beste Formstabilität des Bauteils und noch vertretbare Zykluszeiten lieferte. Bestimmt wurde die Werkzeugtemperatur mit Hilfe eines Temperatursensors einen Millimeter unter der Oberfläche. Es wurde für alle Versuche diese Entformungstemperatur beibehalten und nur die Werkzeugtemperatur am Beginn des Einspritzvorgangs verändert. Dadurch kam es zu einer Zykluszeitänderung infolge der verschiedenen Werkzeugtemperaturen beim Einspritzen. Hier soll weiters darauf hingewiesen werden, dass bei isothermer Werkzeugführung eine andere Prozessführung nötig war.

Der Prozessbereich wurde breit angelegt. Dadurch wurden die Grenzen der sinnvollen Prozessführung gefunden. Die Variation der Einstellungen ist in Tabelle 7 zu finden. Es wurden 27 Versuche durchgeführt. Pro Einstellungen wurden zuerst fünf Teile gespritzt, bevor zehn Teile entnommen und zur Auswertung herangezogen wurden.

Die Auswertung des Versuchsplans befindet sich im Kapitel „5. Ergebnisse“, S. 26.

4. Experimentelles

Tabelle 7: Parametereinstellung für die ersten Spritzgießversuche

Versuchsnummer	Werkzeug - temperatur beim Einspritzen in °C	Einspritz - volumenstrom in cm ³ /s	Nachdruckhöhe in bar	Werkzeugführung
1	75	10	510	isotherm
2	75	10	600	isotherm
3	75	10	1000	isotherm
4	75	40	510	isotherm
5	75	40	600	isotherm
6	75	40	1000	isotherm
7	75	100	510	isotherm
8	75	100	600	isotherm
9	75	100	1000	isotherm
10	85	10	510	variotherm
11	85	10	600	variotherm
12	85	10	1000	variotherm
13	85	40	510	variotherm
14	85	40	600	variotherm
15	85	40	1000	variotherm
16	85	100	510	variotherm
17	85	100	600	variotherm
18	85	100	1000	variotherm
19	100	10	510	variotherm
20	100	10	600	variotherm
21	100	10	1000	variotherm
22	100	40	510	variotherm
23	100	40	600	variotherm
24	100	40	1000	variotherm
25	100	100	510	variotherm
26	100	100	600	variotherm
27	100	100	1000	variotherm

4. Experimentelles

Nach Auswertung der ersten Versuche wurde ein weiterer Versuchsplan mit engeren Grenzen erstellt (siehe Tabelle 8). Es zeigte sich, dass der Einspritzvolumenstrom nur einen geringen Einfluss auf den Prozess hatte. Somit wurde dieser Parameter im zweiten Versuchsplan konstant bei 40 cm³/s gehalten. Die Werkzeugtemperatur von 75 °C beim Entformen wurde weiterhin gewählt. Die Zykluszeitänderung infolge der verschiedenen Werkzeugtemperaturen lag bei wenigen Sekunden.

Es wurde ebenfalls, wie auch in der ersten Versuchsreihe, pro Einstellungen zuerst fünf Teile gespritzt, bevor zehn Teile entnommen und zur Auswertung herangezogen wurden. Die Auswertung dazu lässt sich ebenfalls im Kapitel „5. Ergebnisse“, S.26, finden.

Tabelle 8: Parametereinstellung für die zweiten Spritzgießversuche

Versuchsnummer	Werkzeug - temperatur beim Einspritzen in °C	Nachdruckhöhe in bar	Werkzeugführung
1	80	600	variotherm
2	80	700	variotherm
3	80	800	variotherm
4	85	600	variotherm
5	85	700	variotherm
6	85	800	variotherm
7	90	600	variotherm
8	90	700	variotherm
9	90	800	variotherm

4.6.2 Versuch beim thermischen Fügen

Schon aus vorausgehenden Versuchen zeigte sich, dass die Aktivierungszeit der Abdeckplatte sowie die Füge­temperatur den größten Einfluss auf die Chipqualität hatten. Aus der Vielzahl an Einflussparametern auf das Fügen wurden somit jene zwei ausgewählt. Die Variation der Einstellungen ist in Tabelle 9 zu finden. Die Versuche wurden an Teilen aus der generellen Salem-Produktion durchgeführt. Pro Einstellung wurden fünf Teile untersucht.

Tabelle 9: Parametereinstellung für den Versuchsplan

Versuchsnummer	Aktivierungszeit	Fügetemperatur
1	kurz	niedrig
2	kurz	mittel
3	kurz	hoch
4	mittel	niedrig
5	mittel	mittel
6	mittel	hoch
7	lang	niedrig
8	lang	mittel
9	lang	hoch

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Spritzgießversuche

5.1.1 Festlegung der Grenzen für ein Prozessfenster

Erste Versuchsreihe

Die Teile aus dem ersten Versuchsplan wurden an allen Positionen in Hinblick auf Entformungsrate und Abformungsdifferenz ausgewertet. In Abbildung 48 ist dies beispielhaft für die Werkzeugtemperatur beim Einspritzen bei 85 °C, einem Nachdruck von 600 bar und einem Einspritzvolumenstrom von 40 cm³/s dargestellt. Es zeigte sich, dass vor allem an drei Positionen (Position 10, 13 und 15) große Entformungsrate und eine Veränderungen jener, bei einer Variation der Parameter zu erkennen waren. Somit wurden nur die Entformungsrate an den Positionen 10 (angussfern), Position 13 (Kanal) und Position 15 (angussnah) zur Auswertung herangezogen. Außerdem wurde die Abformungsdifferenz an Position 15 und die Durchbiegung des gesamten Kunststoffteils gemessen.

5. Ergebnisse

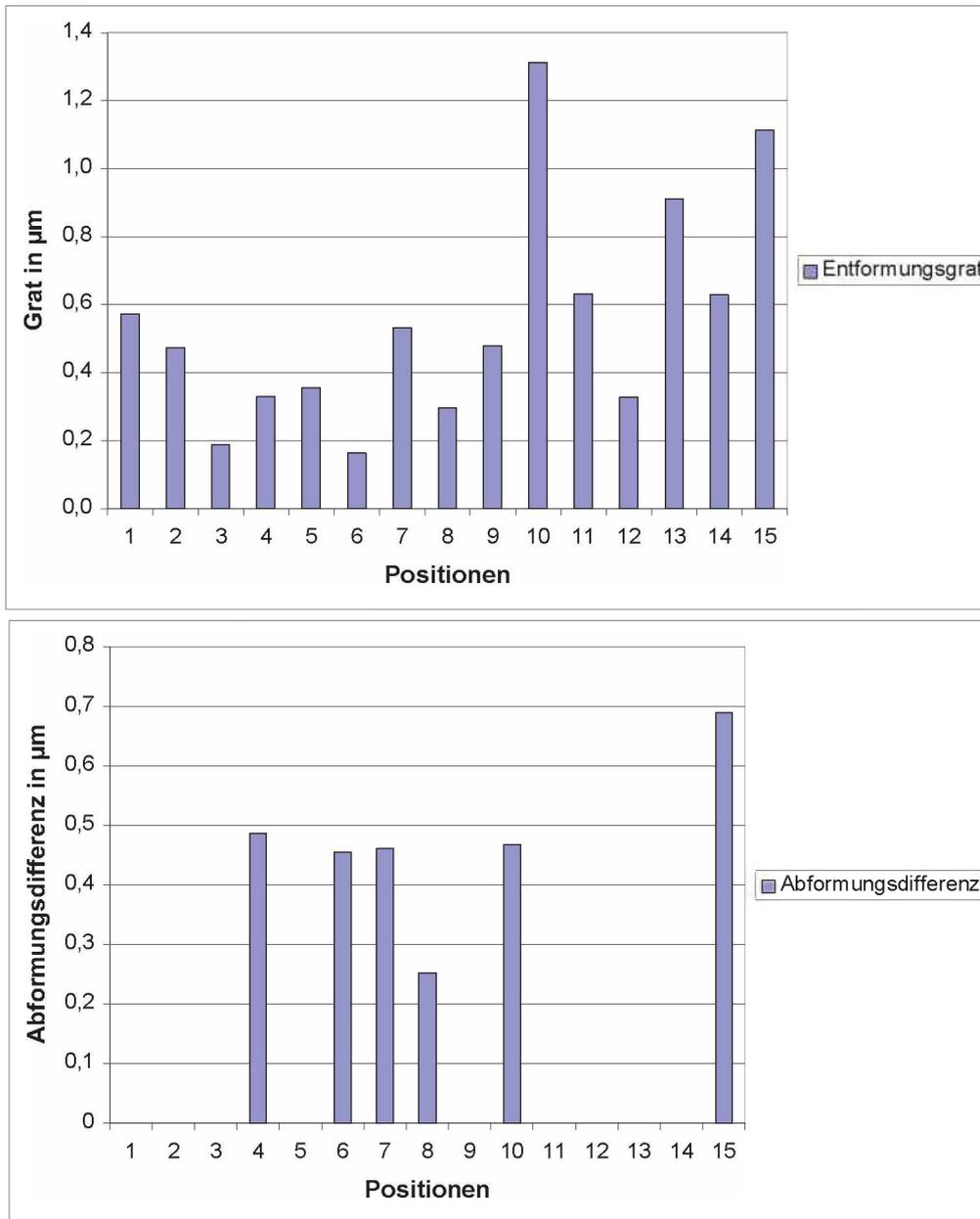


Abbildung 48: Entformungsgrat (oben) und Abformungsdifferenz (unten) bei einer Werkzeugtemperatur von $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, Nachdruck von 600 bar und einem Einspritzvolumenstrom von $40\text{ cm}^3/\text{s}$

Grate

Abbildung 49 zeigt den Grat an den verschiedenen Positionen bei geringer Einspritzgeschwindigkeit, geringem Nachdruck sowie iso- (75 °C) und variothermer (85 °C und 100 °C) Werkzeugführung.

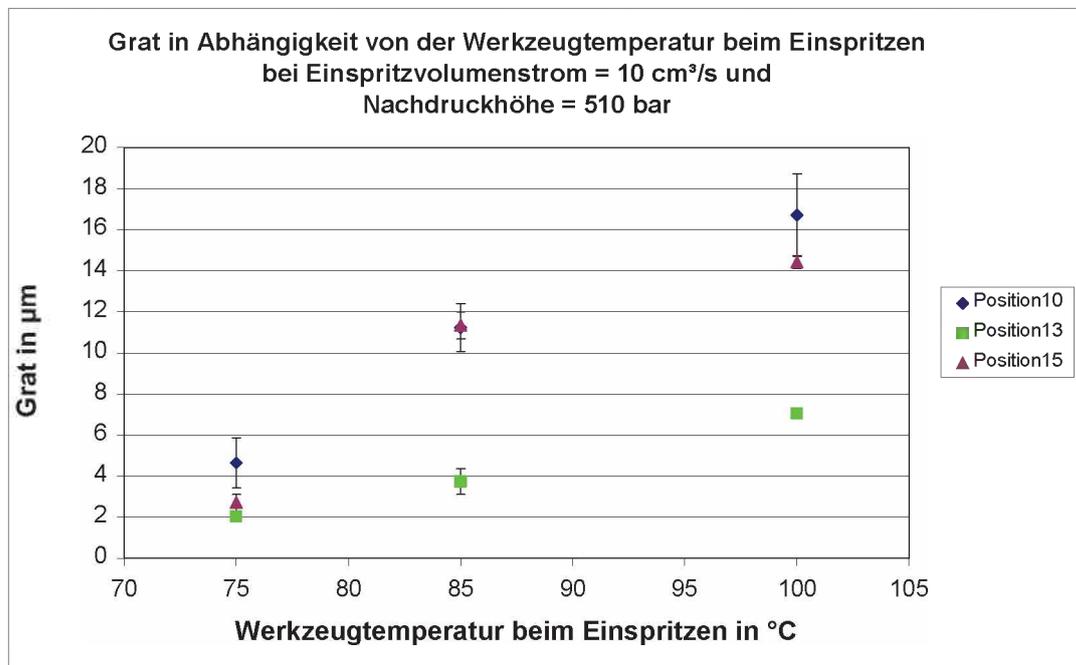


Abbildung 49: Grat bei geringer Einspritzgeschwindigkeit und geringem Nachdruck (Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

Bei variothermer Führung zeigte sich, dass die Grate der Filterstrukturen wesentlich höher als jener des Kanals ausfallen. Dies lässt sich vor allem durch den Strukturunterschied (viele dünne Zapfen bei den Filterstrukturen) erklären. Bei isothermer Führung wurden Grate im Bereich von 2-6 μm beobachtet. Außerdem lagen die die Grate der Filterstrukturen und des Kanals im selben Wertebereich.

Außerdem ist ersichtlich, dass je größer der Unterschied zwischen Einspritz- und Entformungstemperatur des Werkzeugs, umso größer sind die Grate. Vermutlich ist der Grund für dieses Phänomen die unterschiedlich lange Kühl- und Zykluszeit und somit auch unterschiedliche Formteilmperatur beim Entformen des Bauteils.

Nachfolgende Abbildung (Abbildung 50) zeigt Entformungsgrate bei hoher Einspritzgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur beim Einspritzen.

5. Ergebnisse

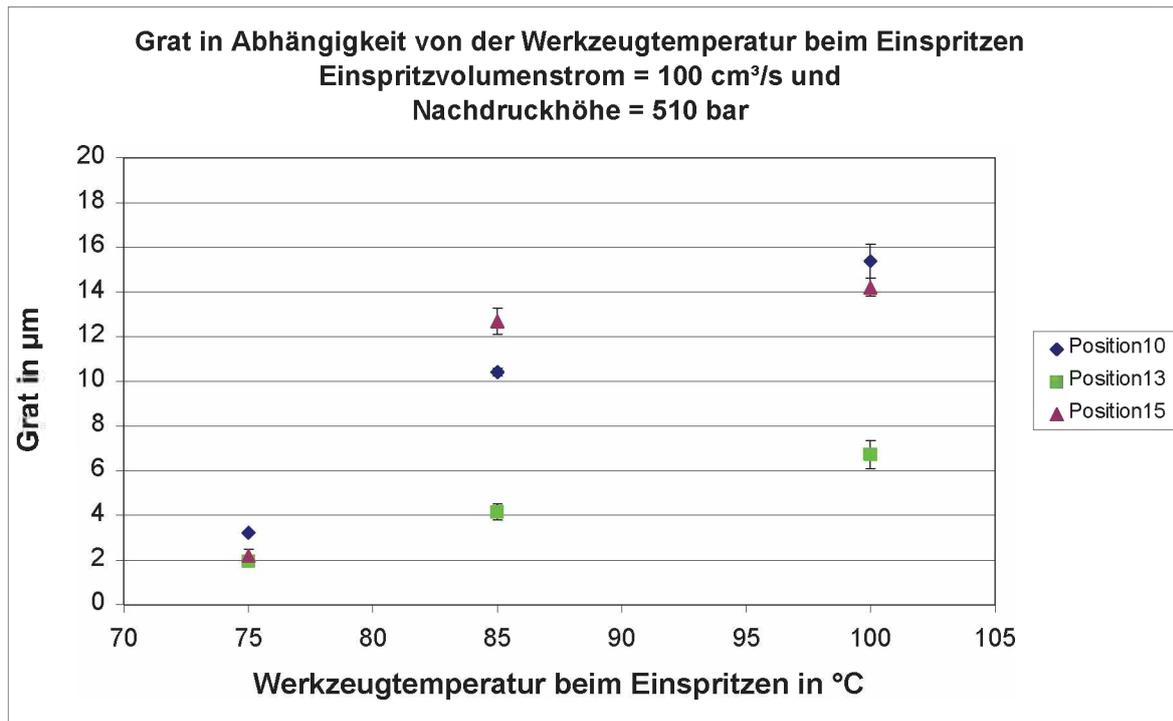


Abbildung 50: Grat bei großer Einspritzgeschwindigkeit und geringem Nachdruck (Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

Durch die Erhöhung des Einspritzvolumenstroms von 10 auf 100 cm³/s zeigte sich sowohl bei iso- als auch variothermen Versuchen keine wesentliche Veränderung der Gratbildung. Dies wird beispielhaft in Abbildung 51 für 85 °C für alle drei Positionen gezeigt.

5. Ergebnisse

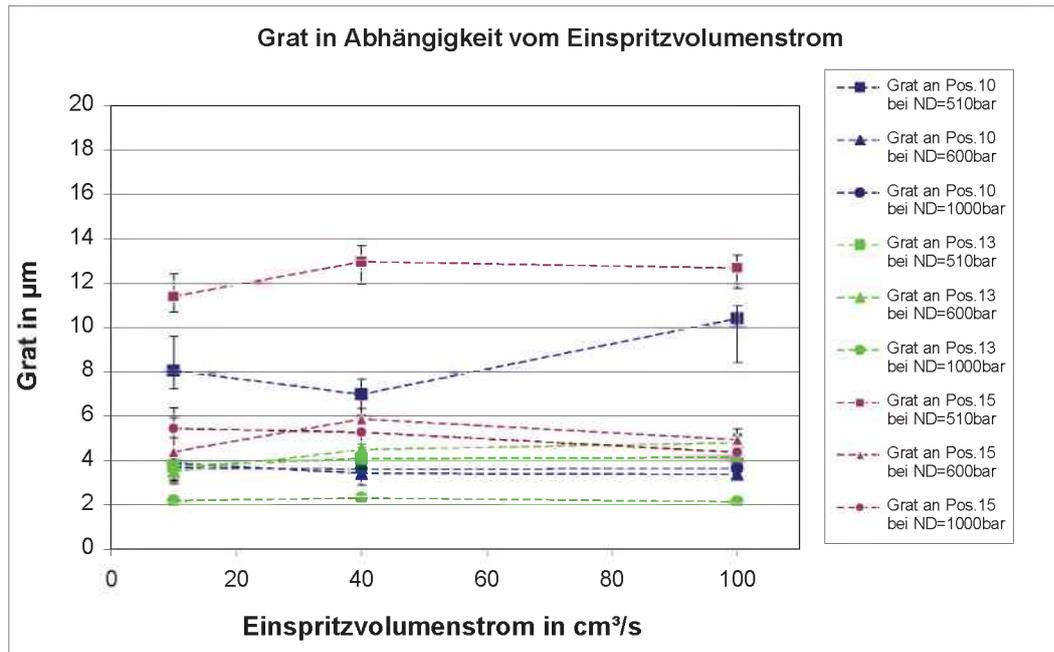


Abbildung 51: Grat in Abhängigkeit vom Einspritzvolumenstrom bei einer Werkzeugtemperatur von 85 °C (ND = Nachdruckhöhe, Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

Die Auswirkung der Erhöhung des Nachdrucks bei isothermer und variothermer Werkzeugtemperierung bei niedriger Einspritzgeschwindigkeit wird in Abbildung 52 gezeigt.

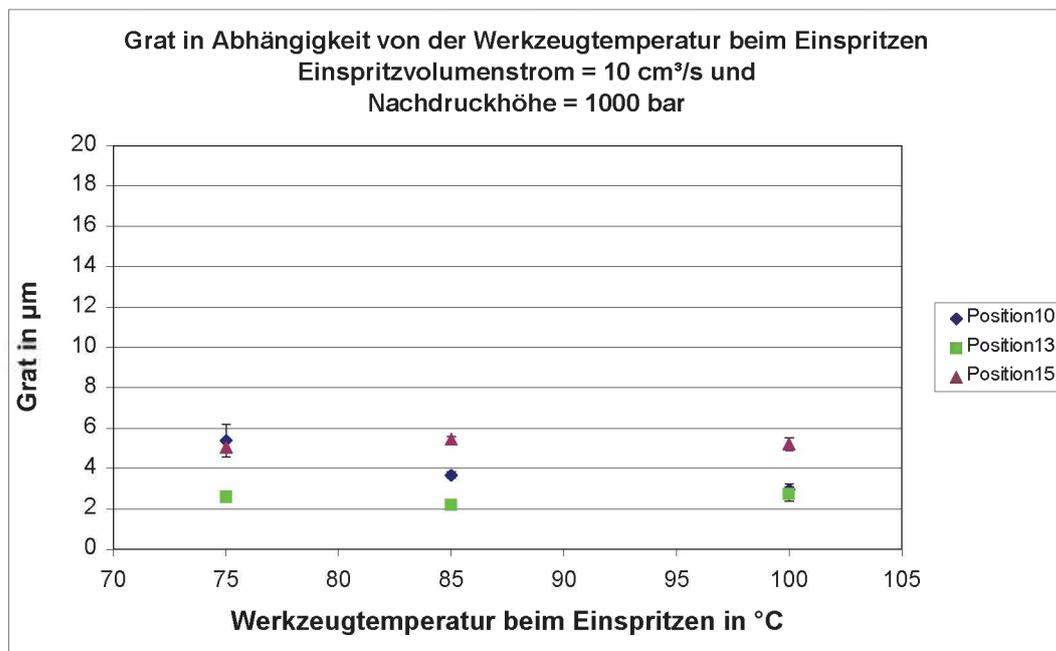


Abbildung 52: Grat bei geringer Einspritzgeschwindigkeit und großem Nachdruck (Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

5. Ergebnisse

Durch Vergrößerung des Nachdrucks kam es zu einer Verringerung der Gratbildung. Grund dafür ist die geringere Schwindung der Bauteile infolge größeren Nachdrucks. Dadurch war eine leichtere Entformung möglich.

Durchbiegung

Ebenso wie bei der Gratbildung war auch bei der maximalen Durchbiegung bei der Erhöhung der Einspritzvolumenstrom von 10 auf 100 cm³/s nahezu keine Veränderung ersichtlich. Abbildung 53 zeigt beispielhaft die Durchbiegung in Abhängigkeit von der Einspritzgeschwindigkeit für 85°C.

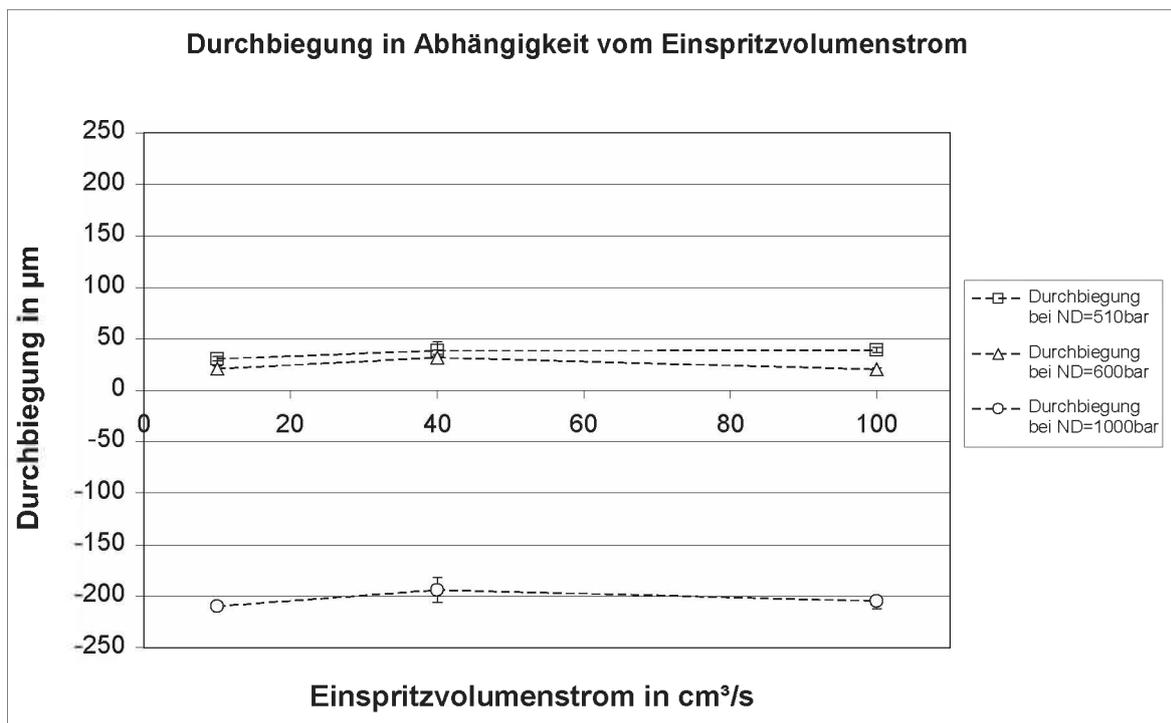


Abbildung 53: Maximale Durchbiegung in Abhängigkeit vom Einspritzvolumenstrom bei einer Werkzeugtemperatur von 85 °C (ND = Nachdruckhöhe, Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

In Abbildung 54 ist die maximale Durchbiegung bei einem Einspritzvolumenstrom von 40 cm³/s dargestellt.

5. Ergebnisse

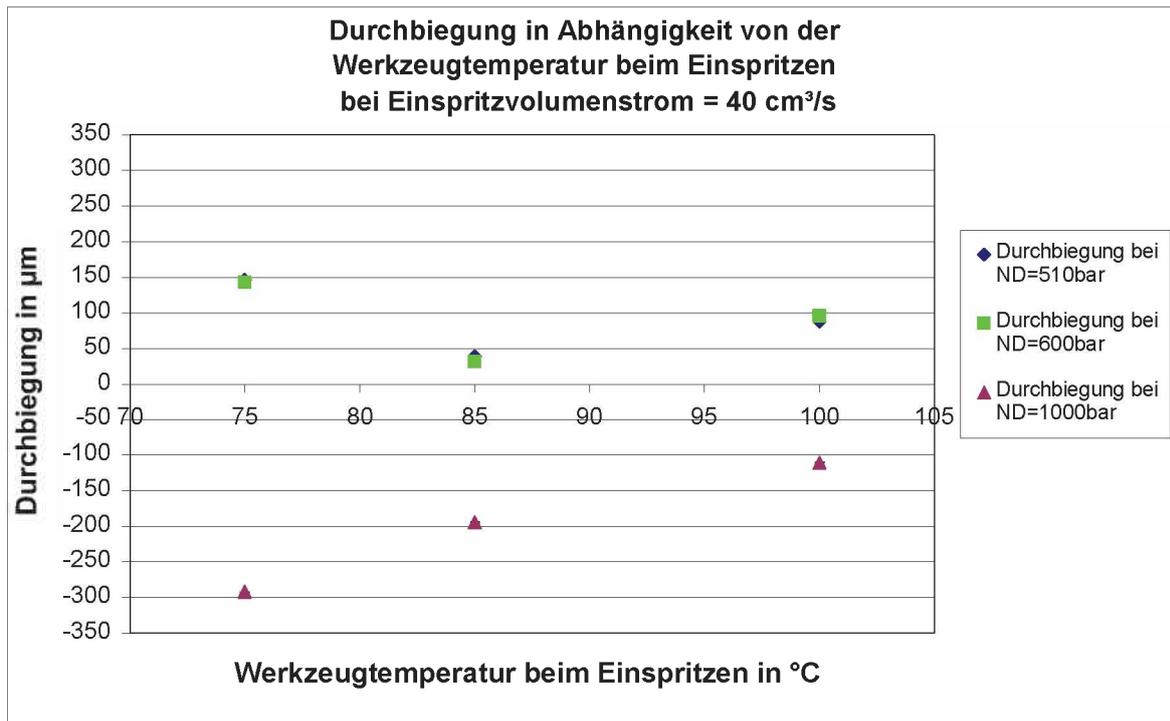


Abbildung 54: Maximale Durchbiegung bei mittlerer Einspritzgeschwindigkeit und verschiedenen Nachdrücken (ND = Nachdruckhöhe, Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

Die Durchbiegung bei einer Nachdruckhöhe von 510 und 600 bar lieferte sowohl für iso- als auch für variotherme Werkzeugführung sehr ähnliche Ergebnisse und eine positive Durchbiegung. Es zeigte sich durch Steigerung des Nachdrucks auf 1000 bar eine negative Durchbiegung. Das kann durch das Hineinpressen der Schmelze in die Kavität erklärt werden. Unter Umständen kommt es aufgrund der hohen Nachdrücke zu einer Deformation des Stampers. In diese Richtung gehend müssen noch genauere Untersuchungen vorgenommen werden.

Die größten Durchbiegungen zeigten sich bei der isothermen Einstellung. Dieses Phänomen könnte möglicherweise an einer höheren mittleren Formteiltemperatur beim Entformen, auf Grund zu gering gewählter Zykluszeit, oder an der niedrigen Werkzeugtemperatur liegen. Die Durchbiegung würde somit vermutlich beim Auswerfen verursacht werden. Hier müssen noch genauere Untersuchungen vorgenommen werden.

Abformungsdifferenz

Abbildung 55 zeigt die Abformungsdifferenz der Struktur bei einem Einspritzvolumenstrom von $40 \text{ cm}^3/\text{s}$.

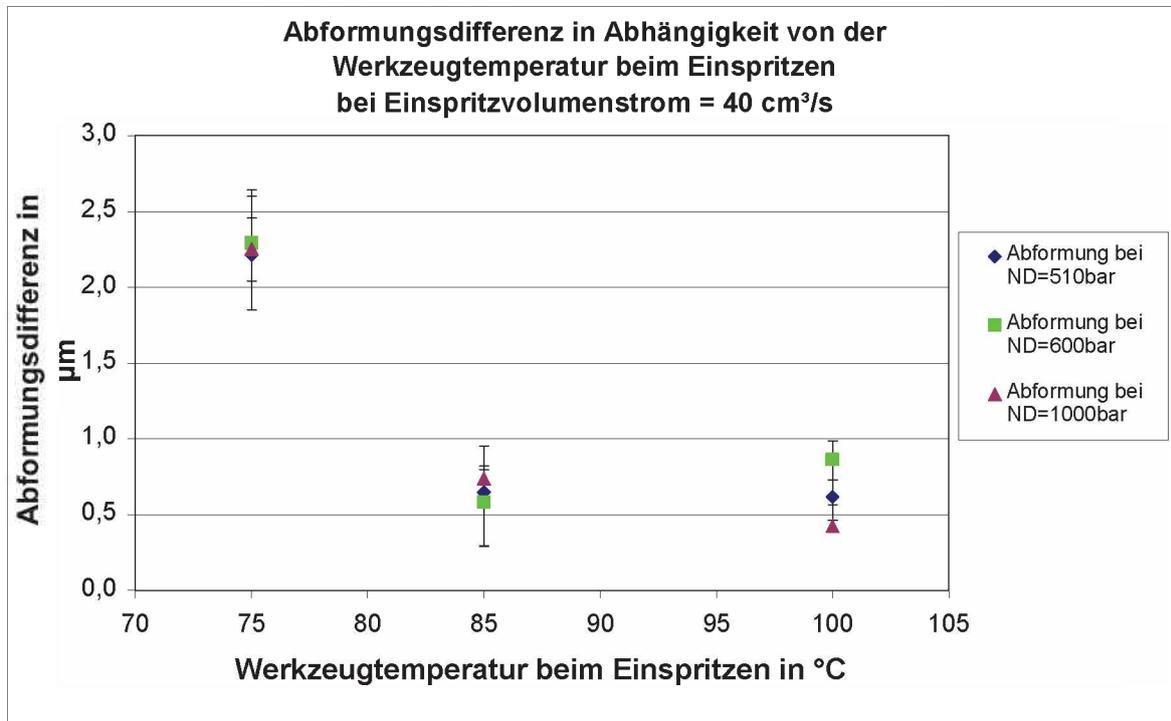


Abbildung 55: Abformungsdifferenz bei mittlerer Einspritzgeschwindigkeit und verschiedenen Nachdrücken (ND = Nachdruckhöhe, Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

Wie schon aus der Literatur [13, 32] bekannt zeigte sich bei isothermer Temperaturführung eine schlechtere Abformung der Struktur. Jedoch kann dieses Phänomen auch an der niedrigeren Werkzeugtemperatur liegen. Die Abformungsdifferenz lag im Bereich von 2 und $2,5 \mu\text{m}$. Erst bei variothermer Werkzeugtemperierung konnte eine gute Abformung erlangt werden, wobei $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ausreichend sind und eine Erhöhung auf $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ keine weitere Verbesserung bringt. Die Nachdruckhöhe hatte auf die Abformungsdifferenz selbst keinen Einfluss.

Prozessbereich

Die Grenzen zur Herstellung zufriedenstellender Teil wurden durch den Fügeprozess bestimmt. Innerhalb der Grenzen von ca. 60 μm Durchbiegung und ca. 7 μm Grat sowie ca. 1,6 μm Abformungsdifferenz konnten geeignete Kunststoffteile für das Fügen hergestellt werden.

Abbildung 56 und Abbildung 57 sowie Abbildung 58 zeigen nun die Prozessbereiche (grünes Feld), die in Abhängigkeit von der Durchbiegung, vom Grat und von der Abformungsdifferenz gefunden wurden. In diese Auswertung wurden die isothermen Versuche nicht miteinbezogen, da sie mit der variothermen Prozessführung nicht direkt verglichen werden können. Sie dienen rein zu Illustrationszwecken.

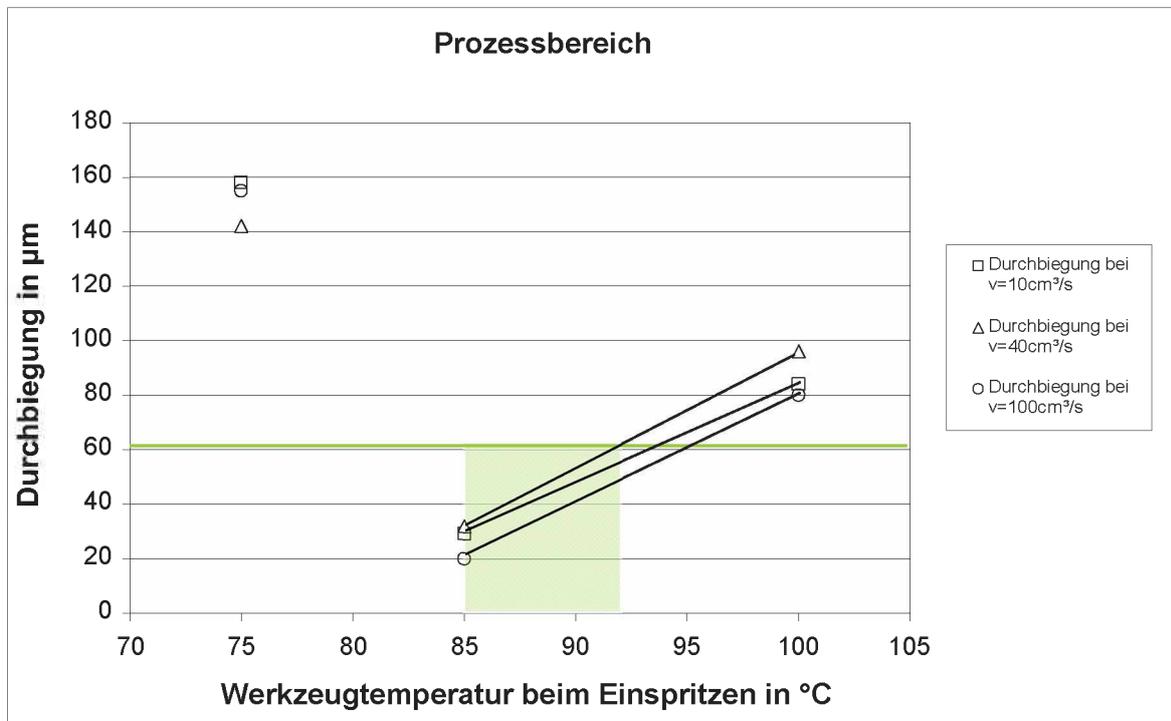


Abbildung 56: Prozessbereich in Abhängigkeit von der Durchbiegung bei einem Nachdruck von 600 bar (v = Einspritzvolumenstrom; grüne Linie definiert Prozessgrenze)

5. Ergebnisse

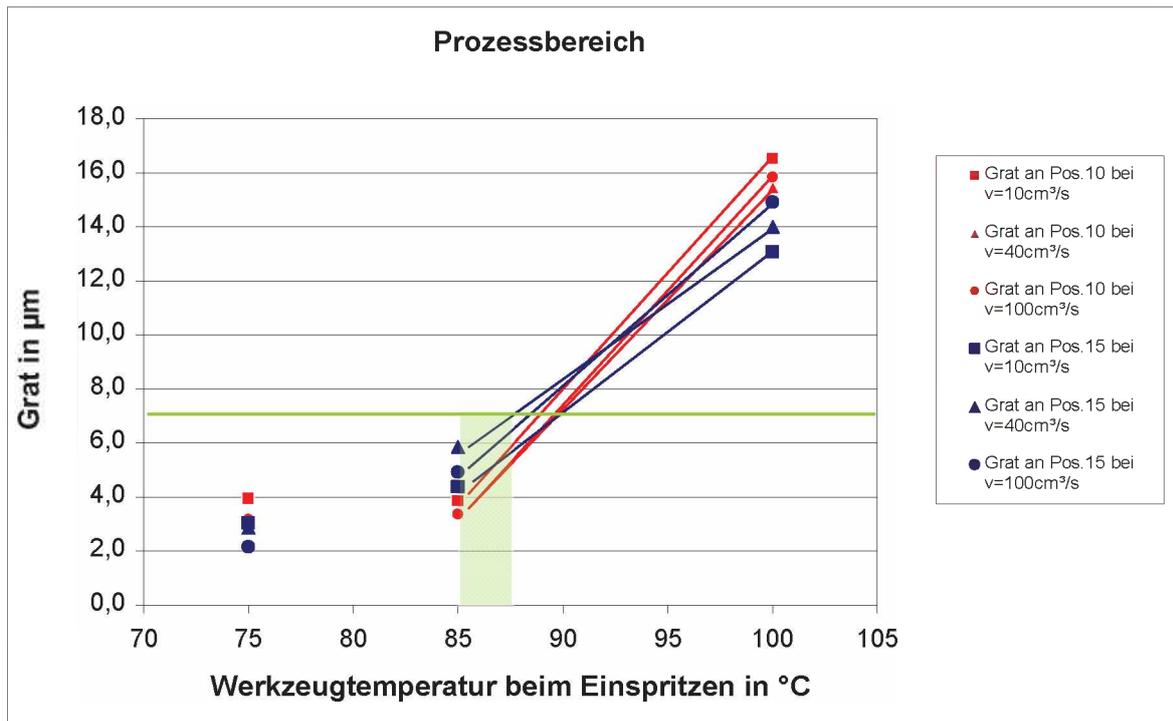


Abbildung 57: Prozessbereich in Abhängigkeit vom Grat bei einem Nachdruck von 600 bar (v = Einspritzvolumenstrom; grüne Linie definiert Prozessgrenze)

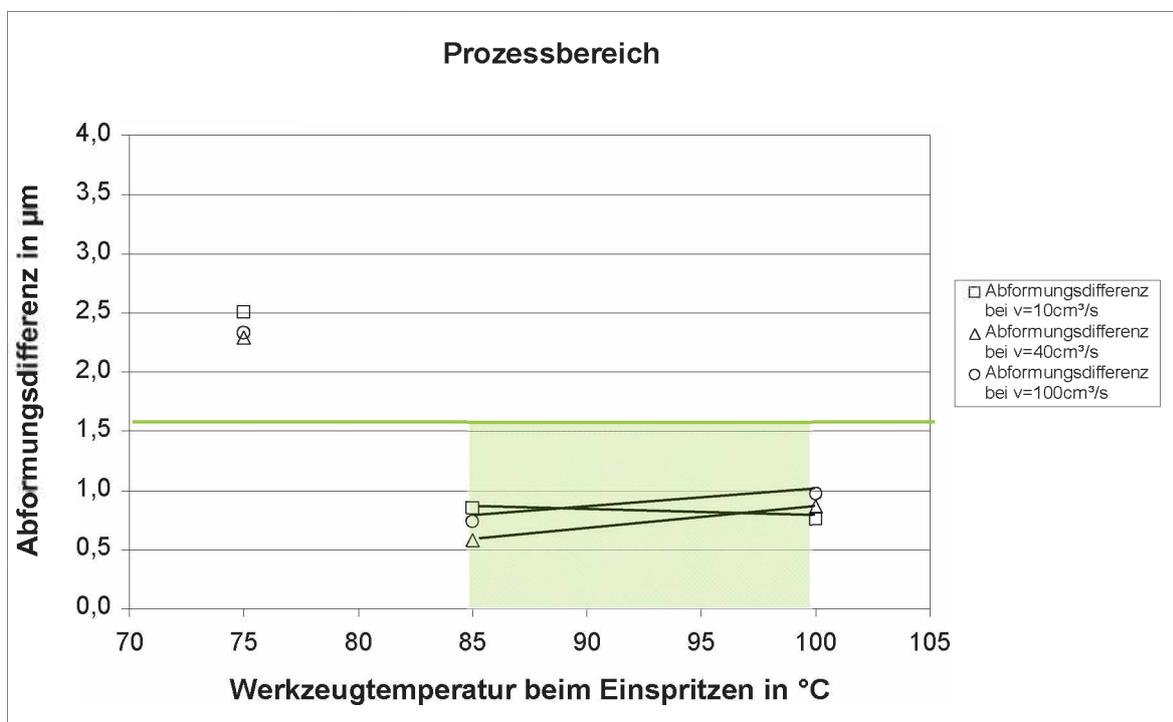


Abbildung 58: Prozessbereich in Abhängigkeit von der Abformungsdifferenz bei einem Nachdruck von 600 bar (v = Einspritzvolumenstrom; grüne Linie definiert Prozessgrenze)

5. Ergebnisse

Die obere Grenze wurde durch die Grate definiert (ca. 87 °C). Die untere durch Durchbiegung und Abformungsdifferenz. Dies kann hier aber durch die unterschiedliche Prozessführung isotherm/variotherm nicht interpoliert werden.

Es zeigte sich ein Prozessfenster bei einem Nachdruck von 600 bar, einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 bis 100 cm³/s und einer Werkzeugtemperatur beim Einspritzen bis 87 °C. Wie schon oben erwähnt, lagen zwar die Grate bei isothermer Werkzeugführung wesentlich unter der Grenze von 7 µm. Die Abformungsdifferenz jedoch lag um ca. 1 µm höher als die vorgegebene Grenze.

Wie schon in Kapitel „4.6.1 Versuche im Spritzgießprozess“, S. 26, erwähnt wurde auf Basis dieser Erkenntnis ein zweiter Faktorenversuch durchgeführt. Die Grenzen lagen bei einer Werkzeugtemperatur von 80 bis 90 °C sowie einem Nachdruck von 600 bis 800 bar.

Zweite Versuchsreihe

Die Teile aus dem zweiten Faktorenversuch wurden nach den gleichen Kriterien wie jene aus dem ersten Versuch ausgewertet.

Grate

Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen die Gratbildung der Teile bei geringem beziehungsweise großem Nachdruck in Abhängigkeit der Werkzeugtemperatur beim Einspritzen.

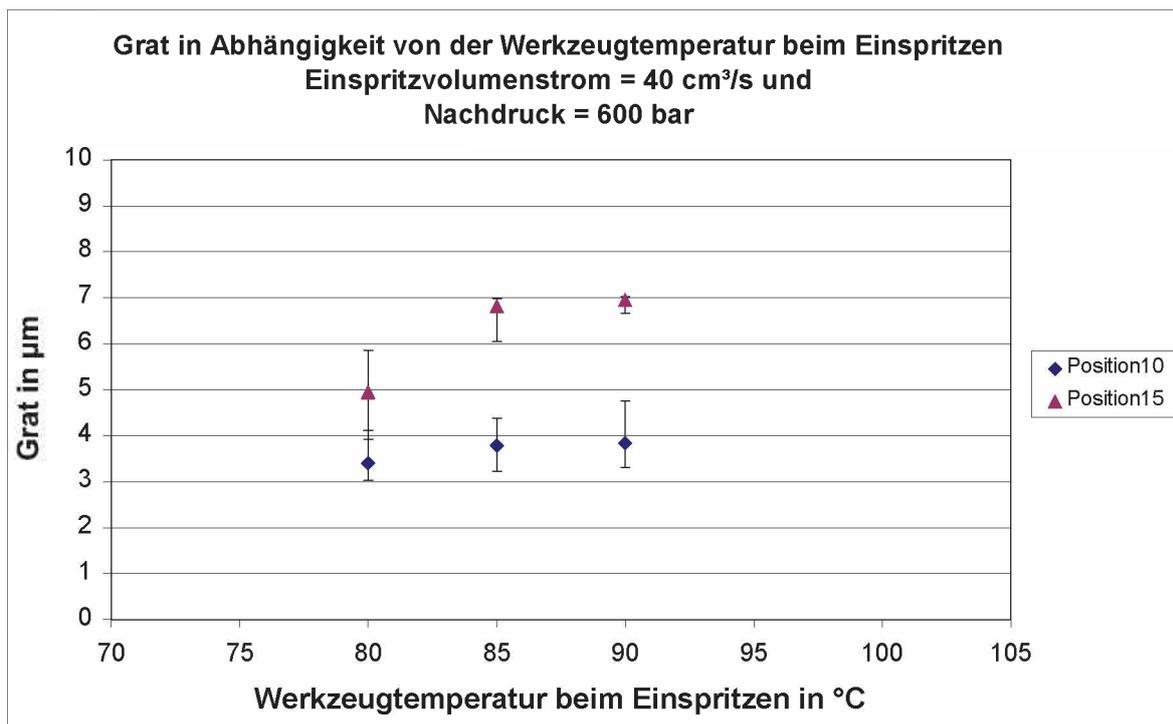


Abbildung 59: Grat bei geringer Einspritzgeschwindigkeit und geringem Nachdruck aus dem zweiten Faktorenversuch (Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

In Abbildung 60 ist die Gratbildung bei höherem Nachdruck ersichtlich.

5. Ergebnisse

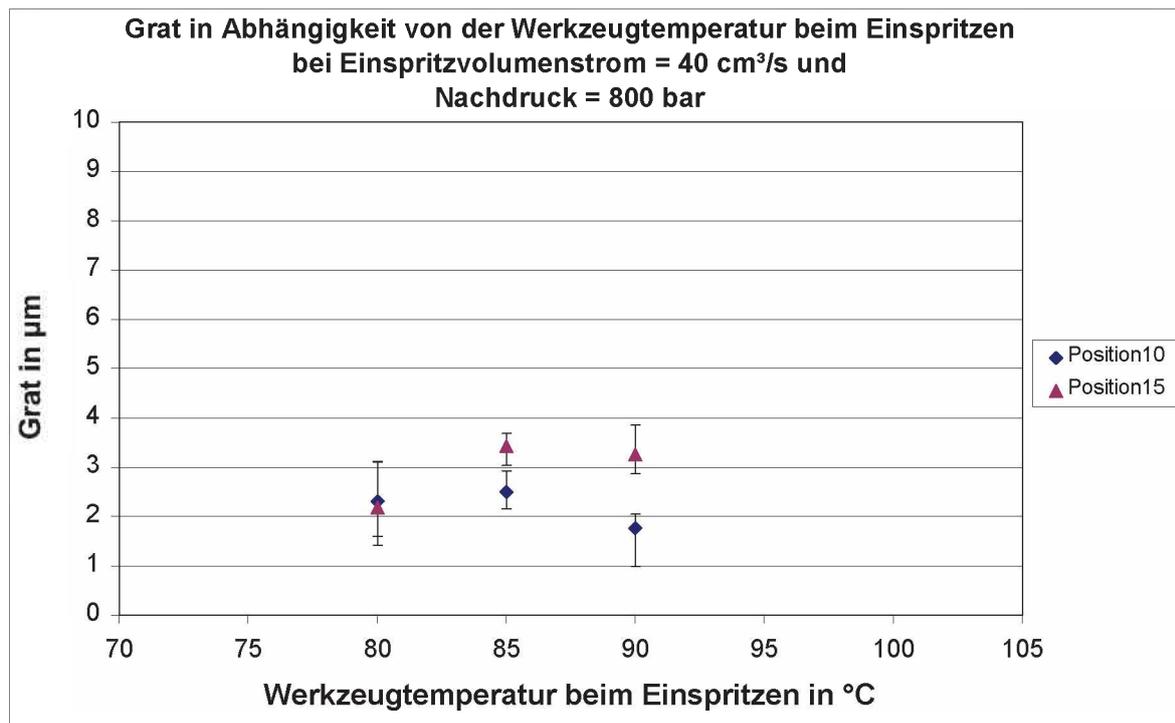


Abbildung 60: Grat bei Erhöhung des Nachdrucks (Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

Vergleichbar zu den ersten Versuchen wurden auch hier bei Erhöhung des Nachdrucks etwas geringere Grate beobachtet.

Durchbiegung

Abbildung 61 zeigt die maximale Durchbiegung der Bauteile in Abhängigkeit der Werkzeugtemperatur beim Einspritzen und der Nachdruckhöhe.

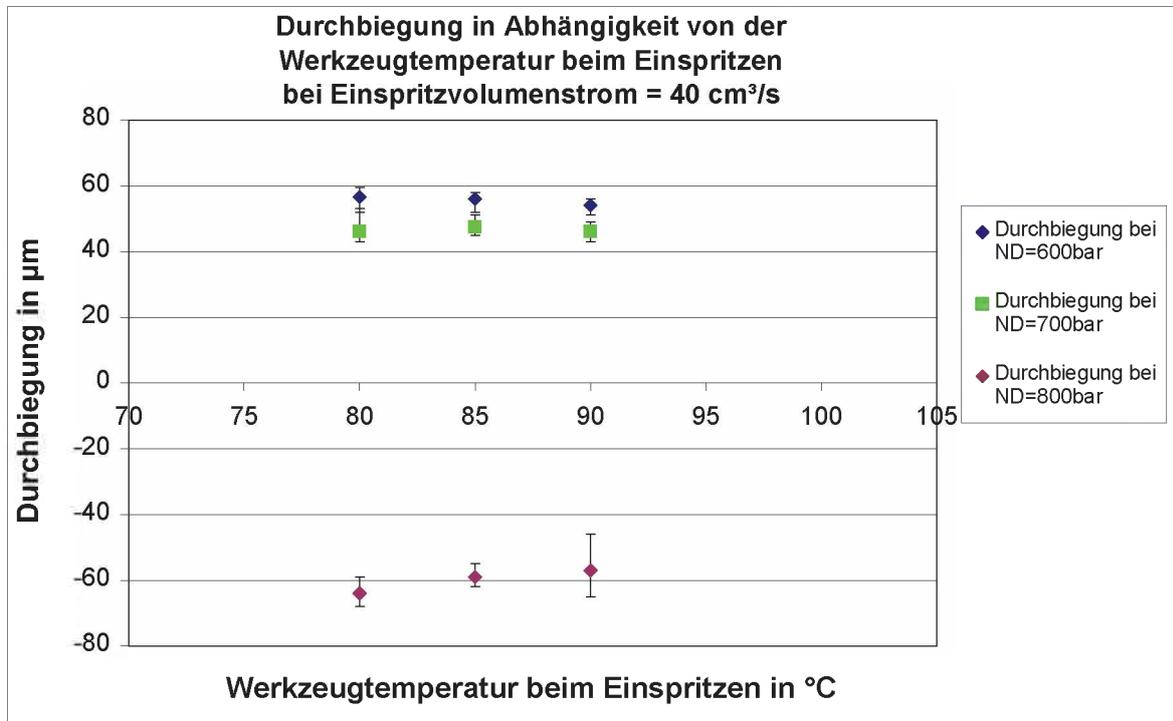


Abbildung 61: Maximale Durchbiegung bei verschiedenen Nachdrücken (ND = Nachdruckhöhe, Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

Durch Steigerung des Nachdrucks von 600 auf 700 bar zeigte sich eine Verringerung der positiven Durchbiegung. Bei einem Nachdruck von 800 bar war eine negative Durchbiegung zu erkennen. Das kann vermutlich wiederum durch das Hineinpressen der Schmelze in die Kavität und der damit endstehenden Deformation des Stampers erklärt werden.

Prozessbereich

Bei den Versuchen wurde auf Grund der variothermen Werkzeugführung keine schlechte Abformung festgestellt. Deswegen wurden Prozessbereiche (grün gekennzeichnet in Abbildung 62 und Abbildung 63) nur in Abhängigkeit der Durchbiegung und Grate dargestellt. Die Grenzen wurden wieder bei 60 µm Durchbiegung und 7 µm Grat gelegt. Es zeigte sich ein zufriedenstellendes Ergebnis im untersuchten Bereich bei einem Nachdruck von 600 und 700 bar.

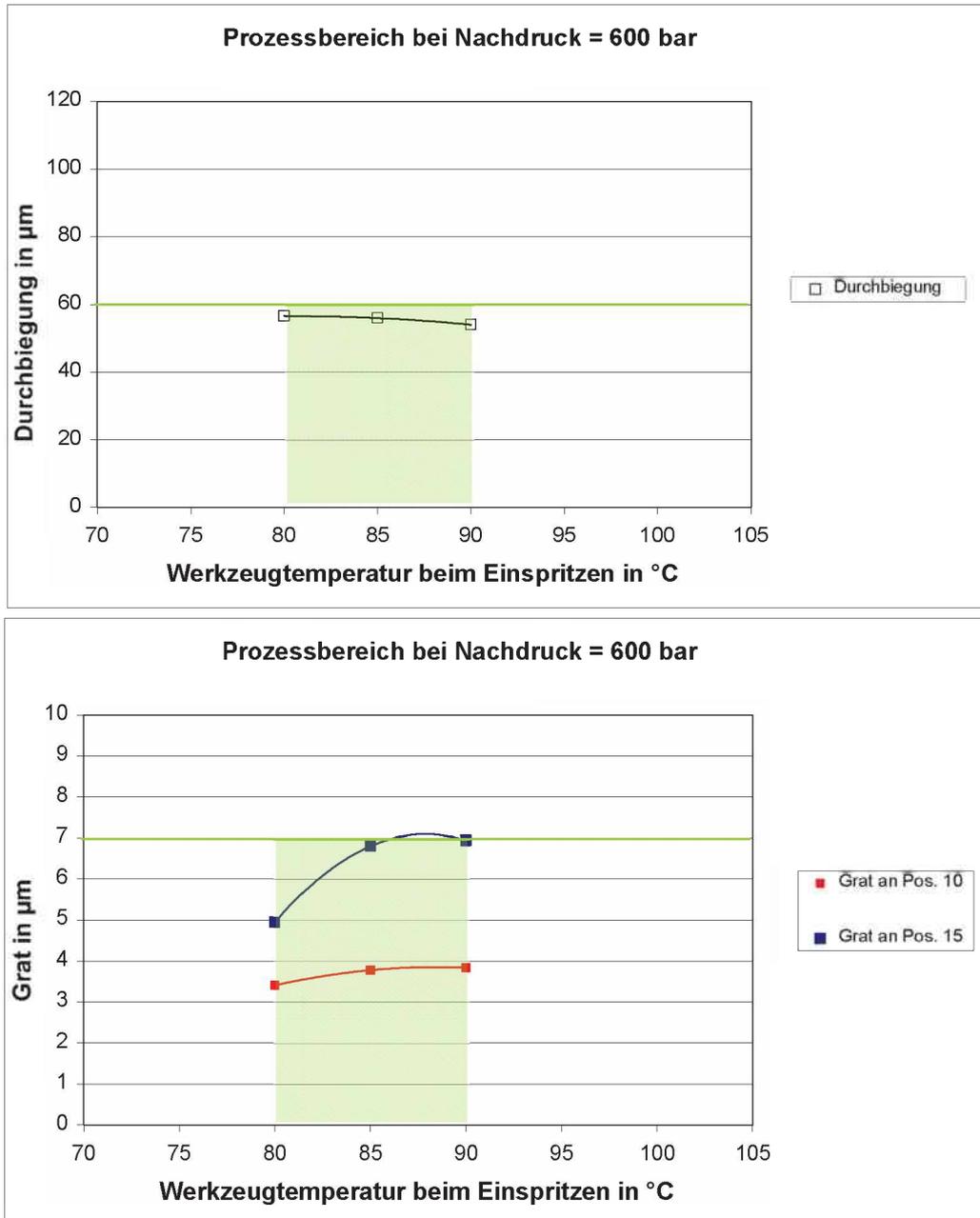


Abbildung 62: Prozessbereich in Abhängigkeit von der Durchbiegung (oben) und den Graten (unten) bei einem Nachdruck von 600 bar (grüne Linie definiert Prozessgrenze)

5. Ergebnisse

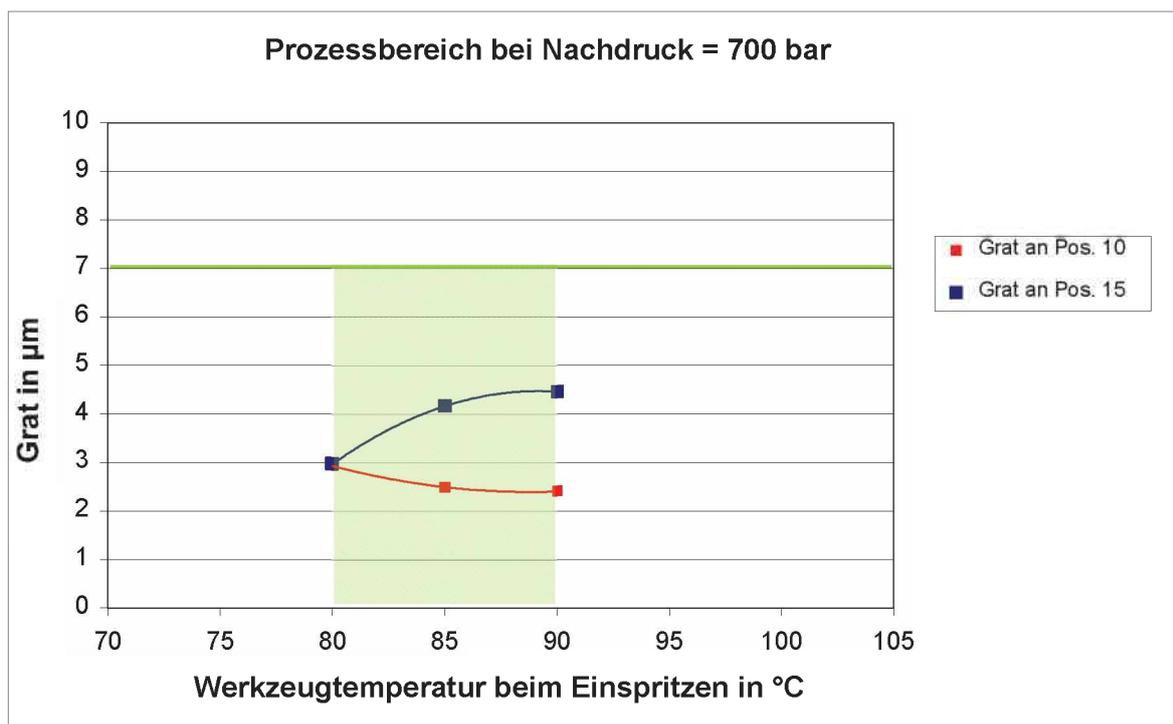
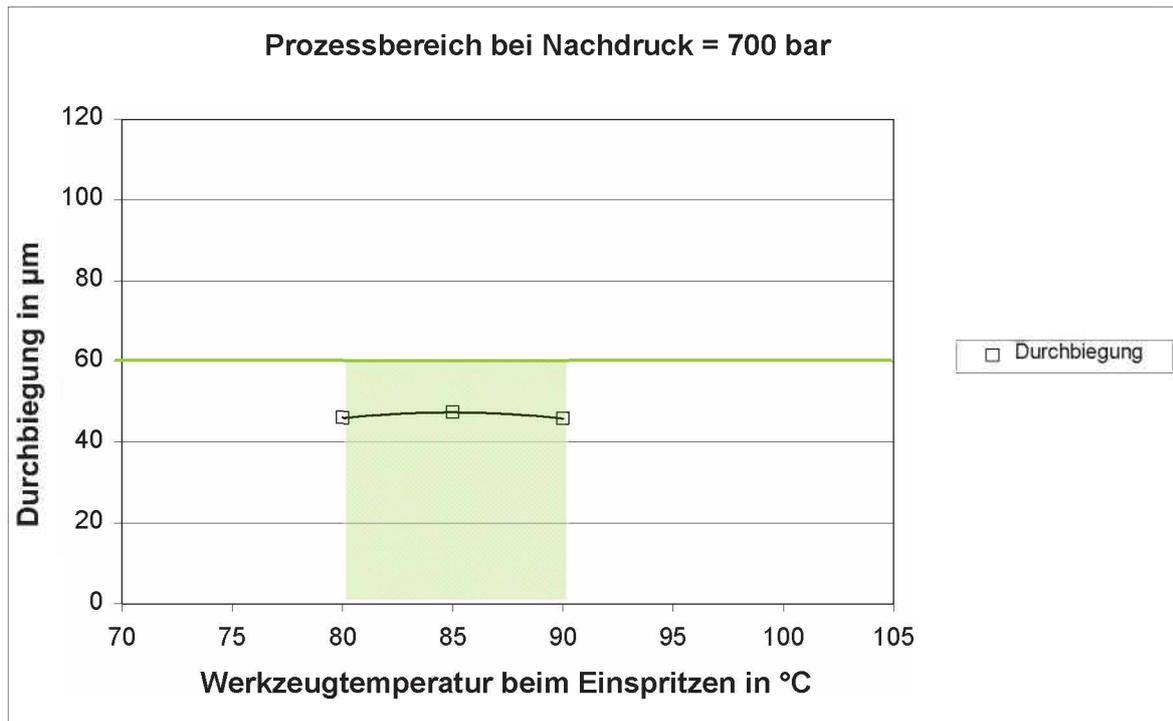


Abbildung 63: Prozessbereich in Abhängigkeit von der Durchbiegung (oben) und den Graten (unten) bei einem Nachdruck von 700 bar (grüne Linie definiert Prozessgrenze)

5. Ergebnisse

Zusammenfassend wurde aus den beiden Versuchen für dieses Kunststoffbauteil folgendes Prozessfenster ermittelt (siehe Tabelle 10 und Abbildung 64). Innerhalb dieses Fensters ist es möglich zufriedenstellende Teile für das Fügen herstellen zu können.

Tabelle 10: Prozessfenster des untersuchten Bereiches

Werkzeug - temperatur beim Einspritzen in °C	Werkzeug - temperatur beim Entformen in °C	Einspritzvolumenstrom in cm ³ /s	Nachdruckhöhe in bar
80-90	75	10-100	600-700

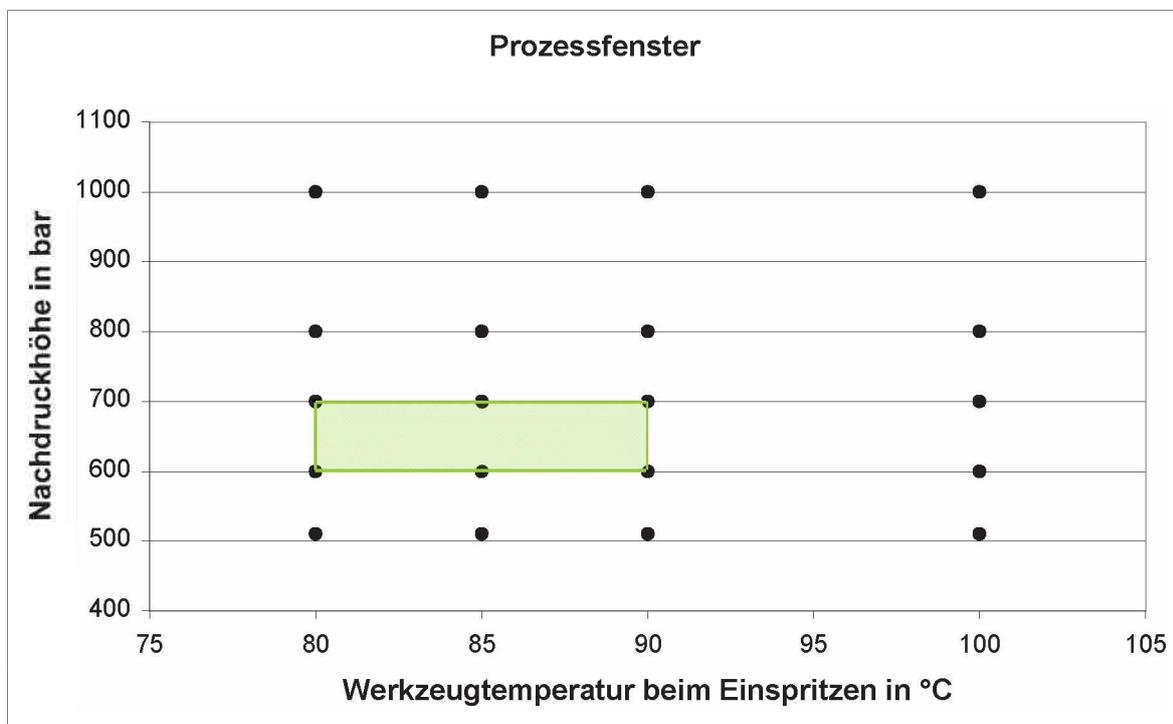


Abbildung 64: Prozessfenster des untersuchten Bereiches

Vermutlich können geeignete Kunststoffteile mit noch geringeren Werkzeugtemperaturen beim Einspritzen (zwischen 75 und 80 °C – begrenzt durch Abformungsdifferenz) und sowohl niedrigeren als auch höheren Nachdrücken als 600-700 bar hergestellt werden. Die höheren Nachdrücke (zwischen 700 und 800 bar) sind jedoch begrenzt durch die Durchbiegung. Dies muss durch weitere

5. Ergebnisse

Versuche bestätigt werden. Somit wäre es dann möglich ein größeres Prozessfenster zu definieren.

Prinzipiell zeigte sich folgendes: Eine Änderung der Einspritzgeschwindigkeit hatte keinen wesentlichen Einfluss. Die Erhöhung des Nachdrucks im gefundenen Bereich lieferte geringere Entformungsgrate und Durchbiegung. Die Steigerung der Werkzeugtemperatur beim Einspritzen lieferte wiederum größere Entformungsgrate und eine bessere Abformung.

5.1.2 Ergebnisse der Schwindungsmessung

Die Messungen zur Berechnung der Schwindung der Kunststoffteile wurde wie in Kapitel „4.5.3 Optisches Messgerät“, S. 26 (Abbildung 41) dargestellt durchgeführt.

Pro Einstellung wurden zehn Teile vermessen und ausgewertet. Weiters wurde die Schwindung von je zehn Teilen bei einer Maschineneinstellung und verschiedenen Stampfern miteinander verglichen. Es wurden außerdem auch Teile einer generellen Salem-Produktion (mit Stamper 9.24 und derselben Maschineneinstellung) vermessen und mit den Ergebnissen aus den Faktorenversuchen verglichen um mögliche vorhandene Prozessschwankungen aufzeigen zu können.

Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen die Schwindung der Teile in Abhängigkeit von der Nachdruckhöhe und Werkzeugtemperatur. Zur beispielhaften Darstellung wurden die gemittelten Schwindungswerte der Teile des Stampers 9.21 bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 40 cm³/s herangezogen.

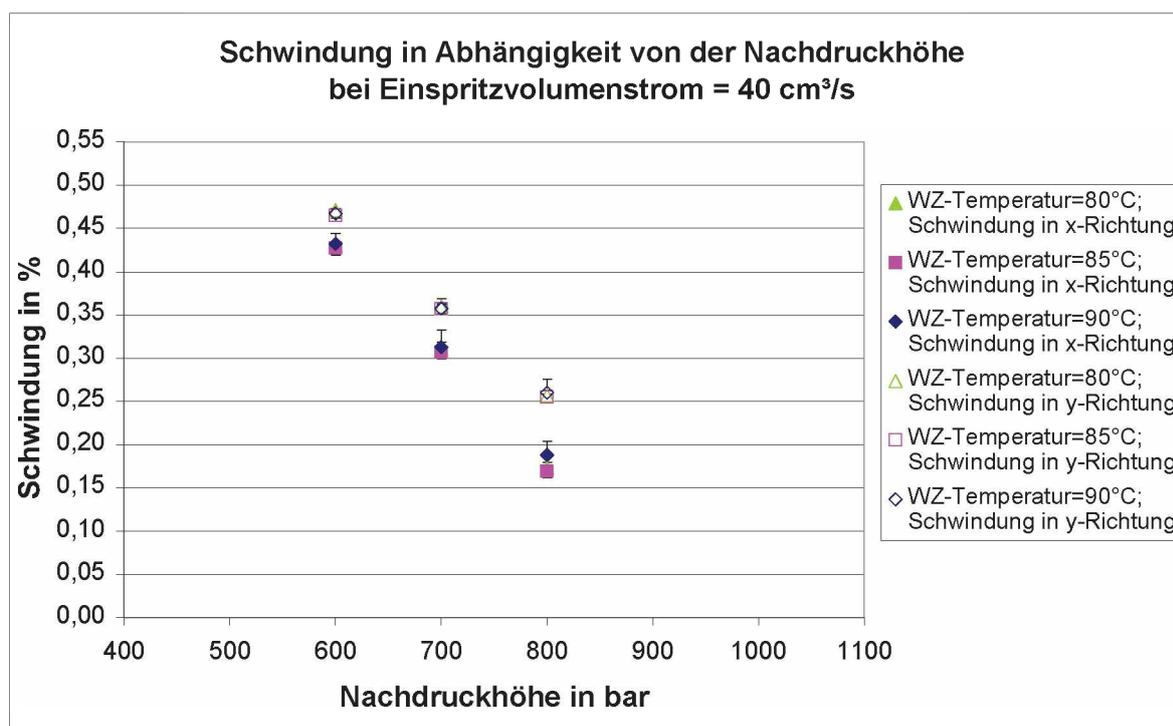


Abbildung 65: Schwindung in Abhängigkeit der Nachdruckhöhe für die Teile des Stampers 9.21 (WZ-Temp= Werkzeugtemperatur, Fehlerbalken zeigt Minima und Maxima)

5. Ergebnisse

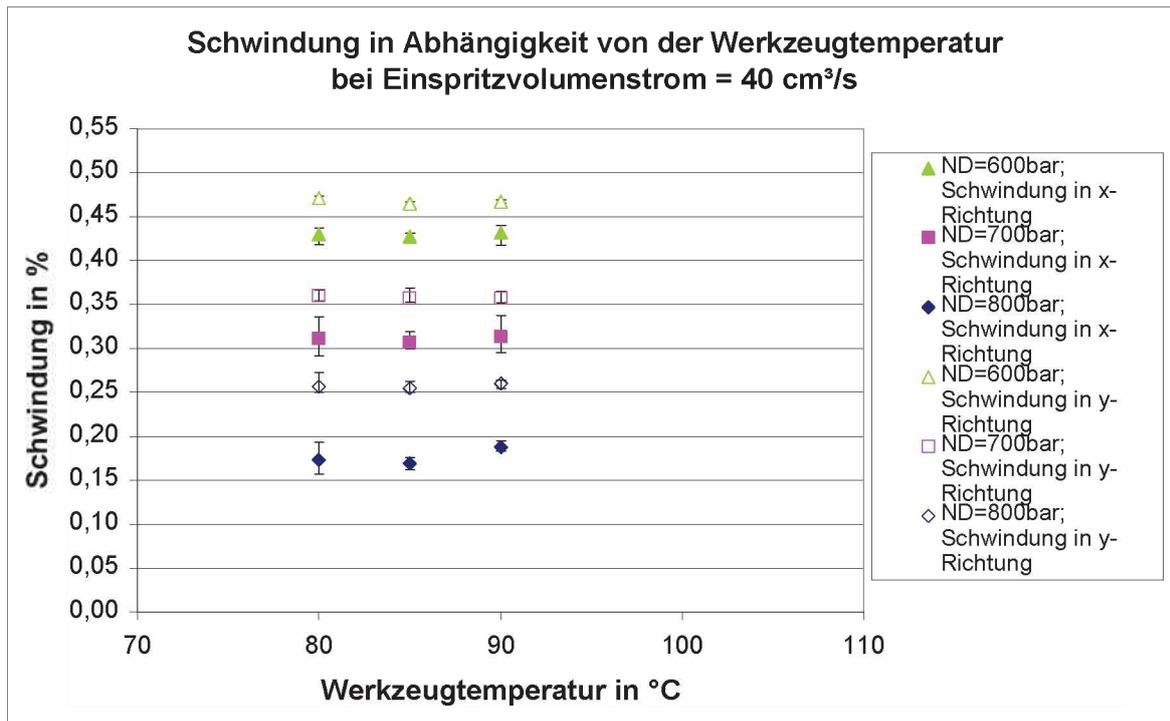


Abbildung 66: Schwindung in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur für die Teile des Stampers 9.21 (ND = Nachdruckhöhe, Fehlerbalken zeigt Minima und Maxima)

Wie aus der Literatur bekannt kam es zu einer Abnahme der Schwindung bei Erhöhung des Nachdrucks. Außerdem zeigt sich keine Veränderung des Schwindungsverhaltens bei Variation der Werkzeugtemperatur. Jedoch war zu erkennen, dass sich die Schwindung in x- und y-Richtung unterschiedlich verhielt. Es kam bei jeder Einstellung zu einer minimal größeren Schwindung in y-Richtung (quer zur Fließrichtung). Diese Differenz lag im Durchschnitt bei ca. 0,05%.

Dieser Unterschied zeigte sich auch beim Vergleich der einzelnen Stämper. Zum Vergleich der verschiedenen Stämper wurde die Schwindung der Teile bei einer Maschineneinstellung (Einspritzvolumenstrom = 40 cm³/s, Werkzeugtemperatur = 85 °C und Nachdruckhöhe = 600 bar) ausgewertet (siehe Tabelle 11 und Abbildung 67).

5. Ergebnisse

Tabelle 11: Schwindung der Teile verschiedener Stamper bei gleicher Maschineneinstellung

Stamper	Durchführung	Schwindung in x-Richtung in %	Standardabweichung in x-Richtung in %	Schwindung in y-Richtung in %	Standardabweichung in y-Richtung in %
9.21	Faktorenversuch	0,43	0,01	0,47	0,01
9.24	Faktorenversuch	0,45	0,01	0,49	0,01
9.24	Produktion	0,43	0,02	0,47	0,02
10.4	Faktorenversuch	0,43	0,01	0,49	0,01

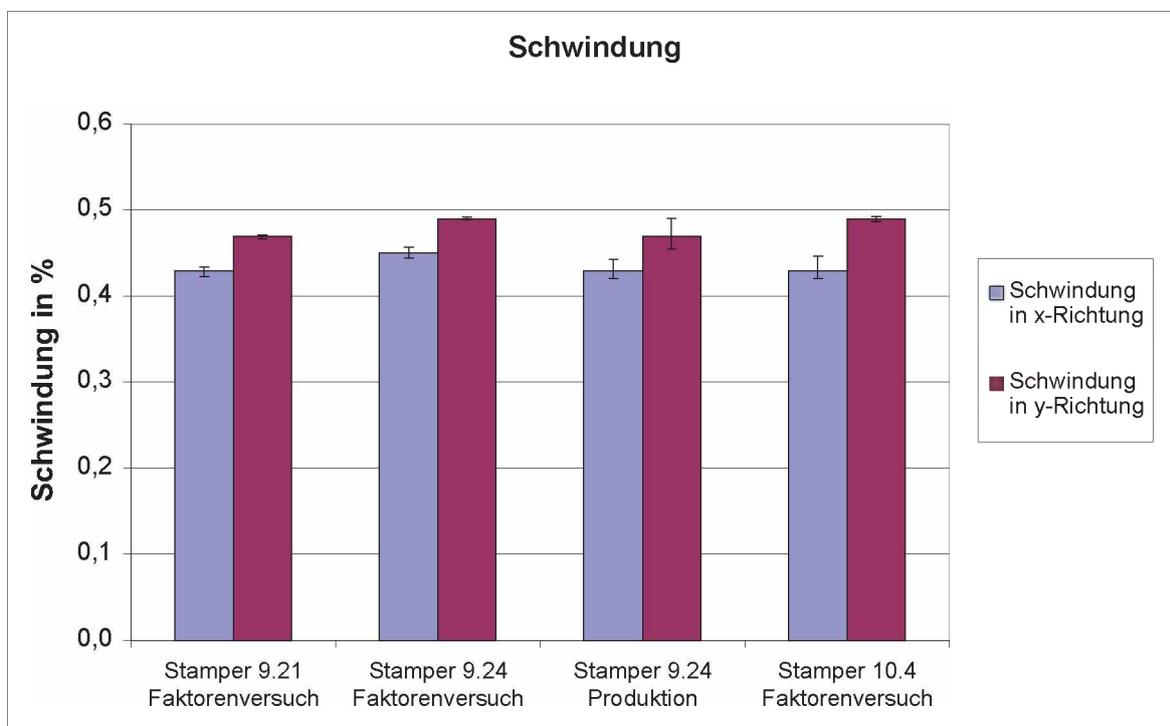


Abbildung 67: Schwindung der Teile bei gleicher Maschineneinstellung (Fehlerbalken zeigt die Minima und Maxima)

Es zeigten sich, wie zu erwarten war, keine Unterschiede in der Schwindung von einem zum anderen Stamper.

5.1.3 Ergebnisse der Dickenverteilung

Es zeigte sich bei allen Versuchen, dass die Kunststoffteile angussnah und angussfern verschiedene Dicken aufwiesen. Dies kann mit der Druckübertragung im Werkzeug begründet werden. Abbildung 68 zeigt den Einfluss von Nachdruckhöhe und Werkzeugtemperatur auf die Wanddicke, angussnah und angussfern. Zur Darstellung wurde eine gemittelte Wanddicke von je zehn Teilen pro Einstellung herangezogen. Weiters wurden wiederum je zehn Teile verschiedener Stampfern und einer Maschineneinstellung miteinander verglichen. Es wurden außerdem auch Teile einer generellen Salem-Produktion (mit Stamper 9.24 und derselben Maschineneinstellung) vermessen und mit den Ergebnissen aus den Faktorenversuchen verglichen um mögliche vorhandene Prozessschwankungen aufzeigen zu können.

Es ist ersichtlich, dass es zu einer Erhöhung der Dicke mit steigendem Nachdruck kommt. Je größer der Nachdruck umso mehr Material kann noch in die Kavität gepresst werden. Weiters zeigte sich, dass es zu Verringerung der Bauteildicke mit Erhöhung der Werkzeugtemperatur kam. Diese Feststellungen decken sich auch mit den Angaben aus der Literatur (siehe [10]).

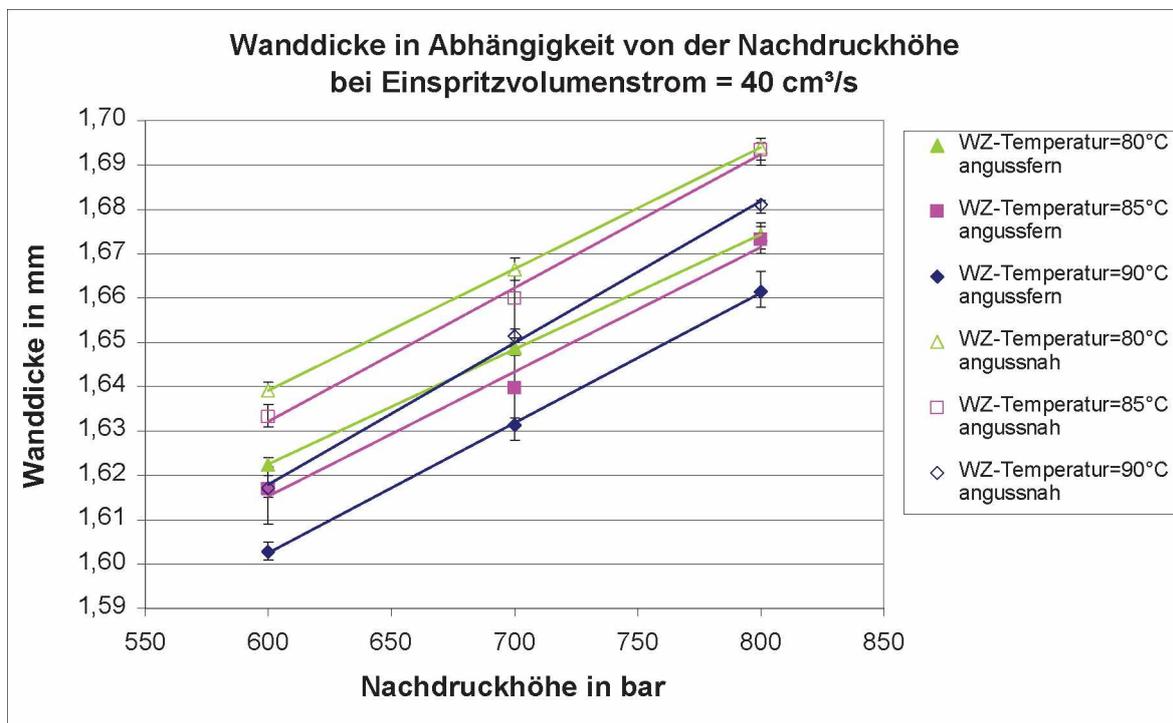


Abbildung 68: Zusammenhang zwischen Nachdruckhöhe und Wanddicke für die Teile des Stampers 9.21 (WZ-Temperatur = Werkzeugtemperatur)

5. Ergebnisse

In Abbildung 69 ist nun die Dickenverteilung der Teile des Stampers 9.21 bei einem Einspritzvolumenstrom von $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ ersichtlich, wobei die Fehlerbalken die Minima und Maxima anzeigen.

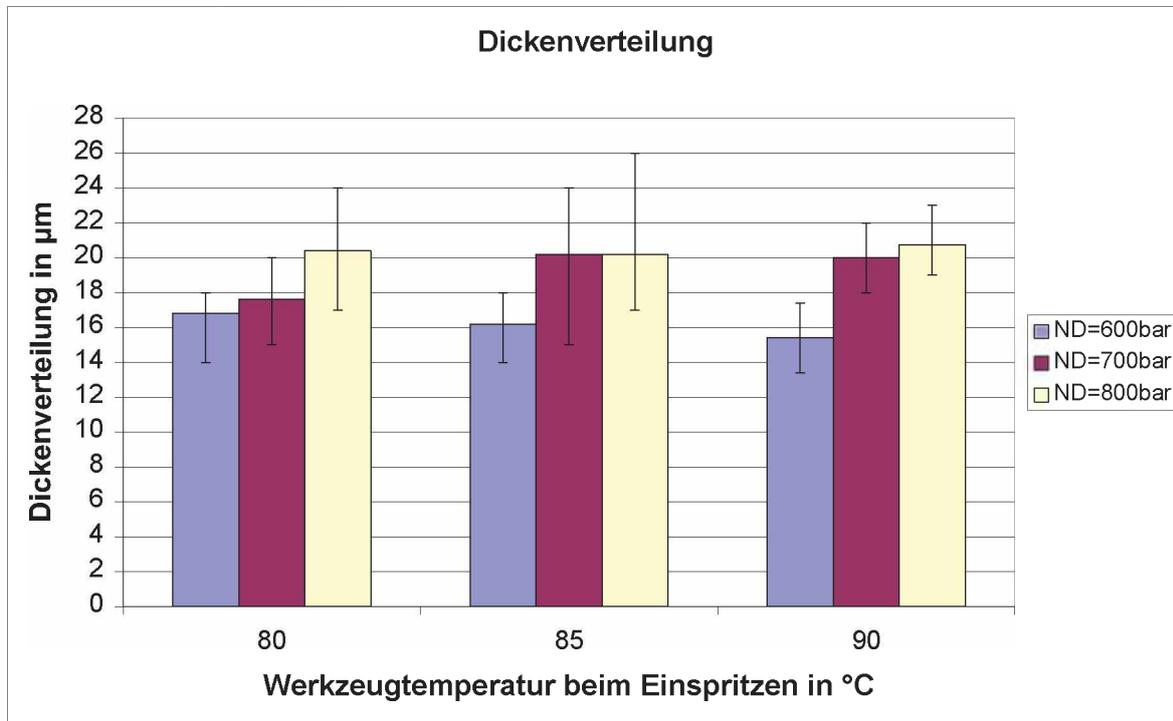


Abbildung 69: Dickenverteilung für die Teile des Stampers 9.21 bei unterschiedlichen Nachdrücken (ND)

Tendenziell kann durch Steigerung der Nachdruckhöhe ein größerer Dickenunterschied zwischen angussnaher und angussferner Bauteildicke erkannt werden. Dies wurde auch durch die Versuche an den weiteren Stampern und durch Literatur [10] bestätigt. Eine Änderung der Dickenverteilung durch Variation der Werkzeugtemperatur beim Einspritzen war nicht ersichtlich.

Zum Vergleich der verschiedenen Stampen wurden die Dickenunterschiede der Teile bei einer Maschineneinstellung (Einspritzvolumenstrom = $40 \text{ cm}^3/\text{s}$, Werkzeugtemperatur = 85 °C und Nachdruckhöhe = 600 bar) ausgewertet (siehe Tabelle 12 und Abbildung 70).

5. Ergebnisse

Tabelle 12: Dickenverteilung der Teile verschiedener Stamper bei gleicher Maschineneinstellung

Stamper	Durchführung	Dickenverteilung in μm	Standardabweichung in μm
9.21	Faktorenversuch	16	2
9.24	Faktorenversuch	12	3
9.24	Produktion	10	4
10.4	Faktorenversuch	12	3

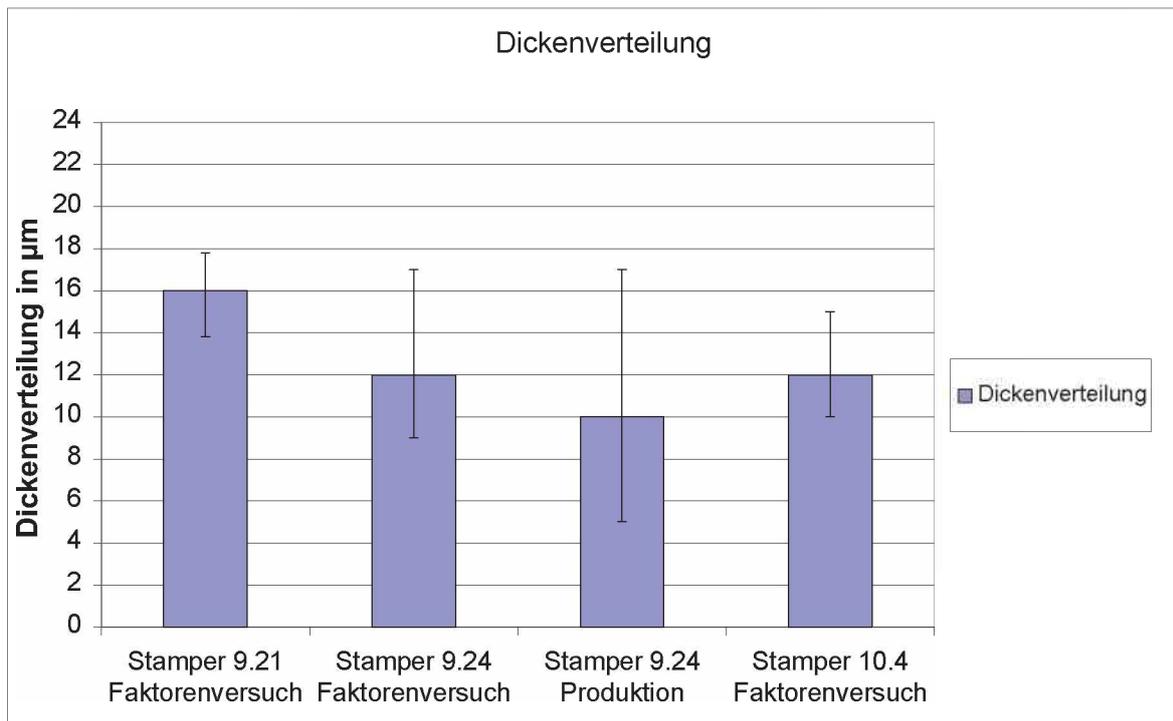


Abbildung 70: Dickenverteilung der Teile bei gleicher Maschineneinstellung (Fehlerbalken zeigen Minima und Maxima)

Zwischen den einzelnen Stampern waren geringe Unterschiede zu sehen. Um darüber jedoch genau Aussage treffen zu können müssen in weiteren Versuchen auch die Stamper selbst auf Dickenunterschiede hin untersucht werden. Es zeigte sich, dass die Dickenunterschiede, angussnah zu angussfern, am Kunststoffteil unter $20\ \mu\text{m}$ lagen. Dies entspricht einer Dickenänderung über das gesamte Bauteil von ca. 1,2% und ist somit nicht relevant.

5.1.4 Ergebnisse der Rauheit in der Verbindungskammer

Wie schon in Kapitel „4.5.1 Konfokalmikroskop“, S. 26, erklärt, gab es Schwierigkeiten beim Verbinden der Tröpfchen in der Verbindungskammer bei den Teilen des Stampers 9.21. Somit wurde ein Vergleich der Rauheitswerte von Teilen der drei verschiedenen Stamer durchgeführt. Schon anhand der REM-Bilder der Kunststoffteile (Abbildung 71 bis Abbildung 73) war ein Unterschied erkennbar. An den Teilen des Stampers 9.21 waren in der Kammer (Abbildung 71) Auffälligkeiten (Hell- und Dunkelbereich durch Unebenheiten, siehe rote Markierung) erkennbar.

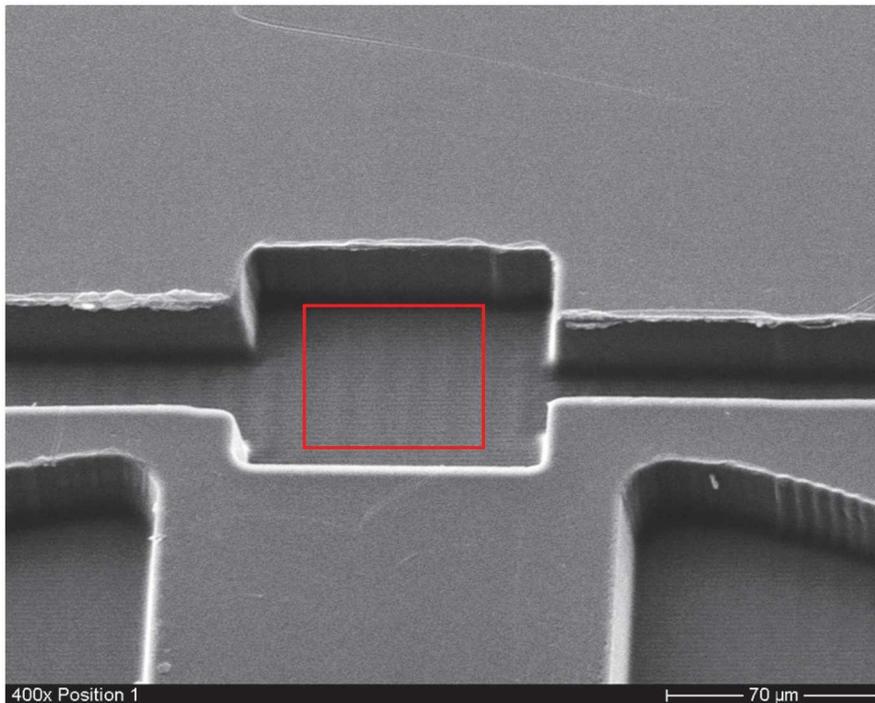


Abbildung 71: REM-Bild der Verbindungskammer eines Kunststoffteils des Stampers 9.21, rote Markierung zeigt Auffälligkeiten

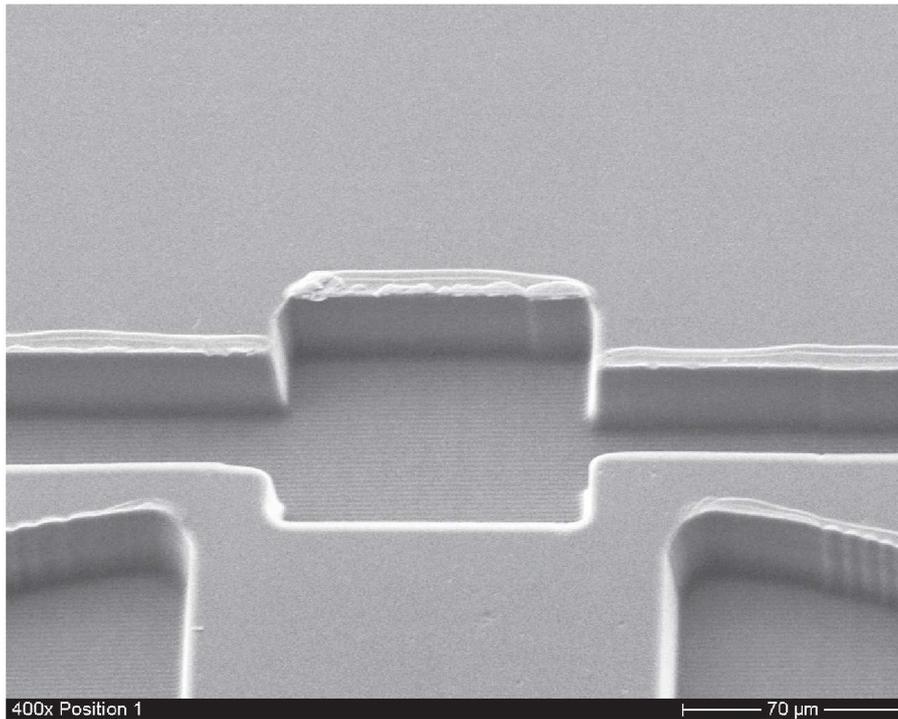


Abbildung 72: REM-Bild der Verbindungskammer eines Kunststoffteils des Stamper 9.24

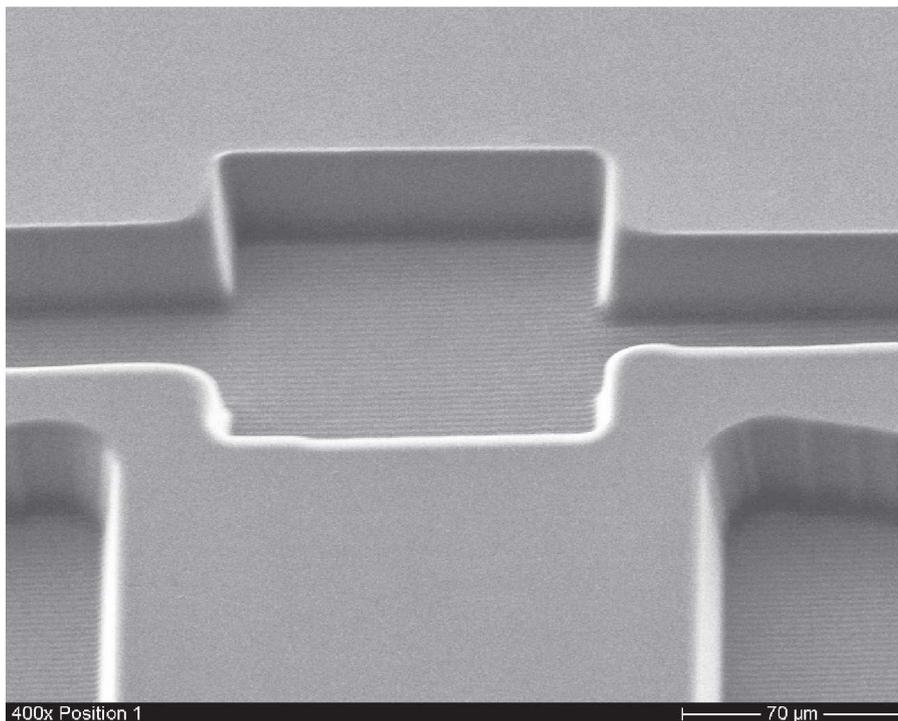


Abbildung 73: REM-Bild der Verbindungskammer eines Kunststoffteils des Stamper 10.4

5. Ergebnisse

Diese Auffälligkeit wurde auch durch die Messungen der Rauheit bestätigt (siehe dazu Tabelle 13 und Abbildung 74). Zum systematischen Vergleich wurde die Rauheit der Teile exemplarisch bei einer Maschineneinstellung (Einspritzvolumenstrom = 40 cm³/s, Werkzeugtemperatur = 85 °C und Nachdruckhöhe = 600 bar), dargestellt. Zur Darstellung wurden gemittelte Rauheitswerte von je zehn Teilen herangezogen. Grundsätzlich wurden keine namhaften Veränderungen der Rauheit durch Änderungen der Maschineneinstellung gefunden.

Tabelle 13: Rauheit Ra, Rq, Rz in der Verbindungskammer der Teile aller Stamper

Stamper		Ra in µm	Rq in µm	Rz in µm
9.21	oben	0,046	0,058	0,233
	Mitte	0,051	0,063	0,235
	unten	0,058	0,073	0,285
9.24	oben	0,031	0,038	0,161
	Mitte	0,030	0,039	0,149
	unten	0,032	0,040	0,155
10.4	oben	0,045	0,061	0,190
	Mitte	0,042	0,057	0,171
	unten	0,042	0,057	0,178

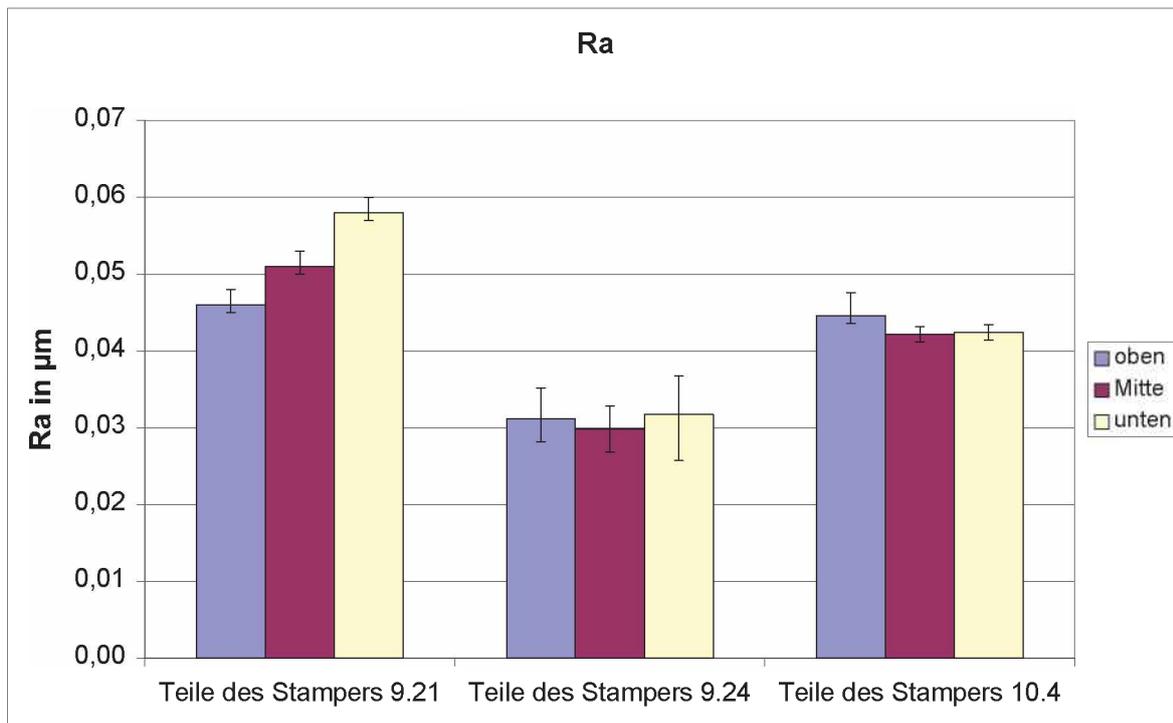


Abbildung 74: Ra der Kunststoffteile der verschiedenen Stamper (Fehlerbalken zeigen Minima und Maxima)

Stellt man die Rauheitswerte der Kunststoffteile der verschiedenen Stamper gegenüber, so erkennt man einen klaren Unterschied. Die Kunststoffteile lieferten unterschiedliche Rauheitswerte. Teile des Stampers 9.21 zeigten zum Beispiel beinahe doppelte so hohe Werte als jene des Stampers 9.24. Ähnliche Ergebnisse lieferten auch die Stamper selbst. Auf einen Vergleich von Stamper zu Kunststoffteil wird in Kapitel „5.4.2 Rauheit in der Verbindungskammer“, S. 26, noch genauer eingegangen.

Außerdem zeigen sich verschiedene Tendenzen an den Messpositionen (oben, Mitte, unten). Zwar kann für Stamper 9.24 und 10.4 auf Grund der Messschwankungen keine konkrete Aussage getroffen werden. Bei Stamper 9.21 zeigte sich jedoch eine Differenz von mehr als 0,01 µm an den verschiedenen Messpositionen. Hier liegen Rauheitsunterschiede an den gemessenen Stellen vor.

5.2 Ergebnisse der Fügeversuche

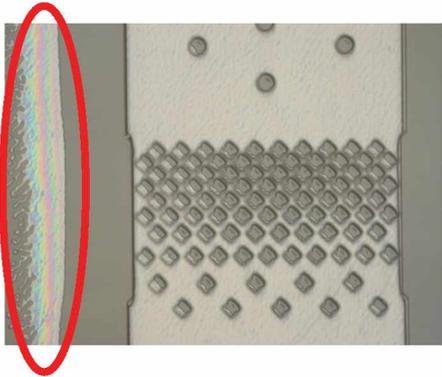
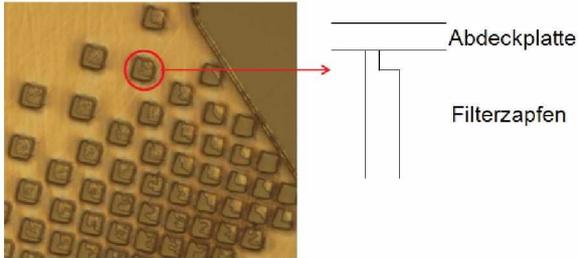
Alle Teile des Faktorenversuchs wurden vor dem Fügen genau untersucht. Es wurden Messungen der Kanaltiefe und Entformungsrate an allen 15 Positionen durchgeführt. Außerdem wurden an denselben Positionen Bilder mit Hilfe der Kamera des Lichtmikroskops aufgenommen. Weiters wurde die maximale Durchbiegung des Kunststoffteils gemessen.

5.2.1 Festlegung der Grenzen für ein Prozessfenster

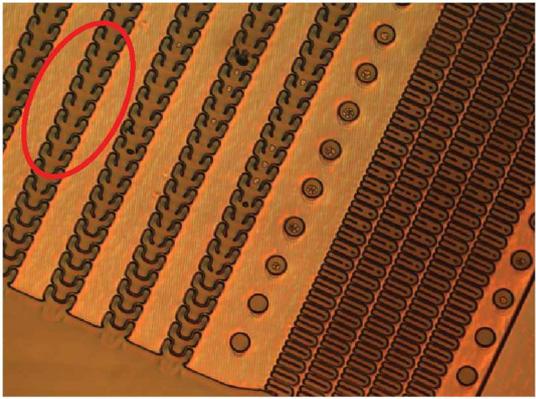
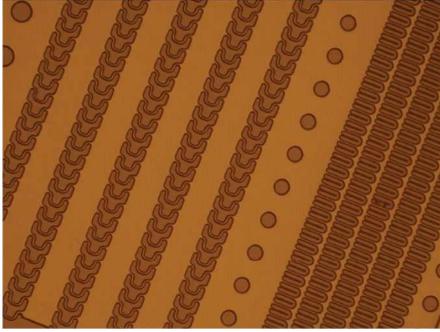
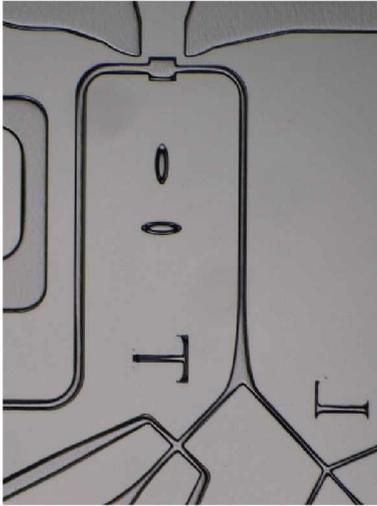
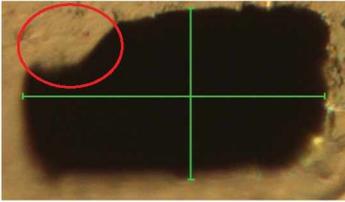
Nach dem Fügen zeigten sich vor allem Schwierigkeiten an den größeren Filterstrukturen (Position 6, 7, 8, 10 und 15) sowie im Zentralbereich der Chips (Position 1, 2 und 3).

Je nach Einstellung zeigten sich verschiedene Phänomene (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Phänomene nach dem Fügen

Phänomen	Beeinträchtigung des Chips	Beispielbild
Lufteinschlüsse (siehe rote Markierung im Bild)	nein (wenn Lufteinschluss Kanal nicht berührt)	
Kanal nicht ganz geschlossen	ja	

5. Ergebnisse

Phänomen	Beeinträchtigung des Chips	Beispielbild
<p>Zusammenwachsen der Filterelemente (siehe rote Markierung im oberen Bild)</p>	<p>ja</p>	<p>schlechte Filterstruktur</p>  <p>im Vergleich dazu eine gute Filterstruktur</p> 
<p>„Lines“: „aktiviertes“ Material der Abdeckplatte wird in die Kanäle der Kanalplatte gepresst - siehe roter Kreis im unteren Bild; Im Durchlicht- mikroskopbild sind dadurch die Kanalkanten stark verbreitert oder wirken gar wie Doppellinien.</p>	<p>ja</p>	 

5. Ergebnisse

Die Chips des Faktorenversuchs wurden nach den oben genannten Kriterien ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 ersichtlich. Die grün-markierten Zeilen zeigen jene Einstellungen ohne Beeinträchtigung des Chips.

Tabelle 15: Auswertung des Faktorenversuchs (grüne Zeilen: keine Beeinträchtigung des Chips)

kurze Aktivierungszeit		
1.Einstellung	niedrige Füge-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Lufteinschlüsse • Kanal nicht ganz geschlossen
2.Einstellung	mittlere Füge-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Lufteinschlüsse • Kanal nicht ganz geschlossen
3.Einstellung	hohe Füge-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • kein Phänomen
mittlere Aktivierungszeit		
4.Einstellung	niedrige Füge-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • kein Phänomen
5.Einstellung	mittlere Füge-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • kein Phänomen
6.Einstellung	hohe Füge-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenwachsen der Filterelemente • geringe Lines
lange Aktivierungszeit		
7.Einstellung	niedrige Füge-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenwachsen der Filterelemente • Lines
8.Einstellung	mittlere Füge-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenwachsen der Filterelemente • Lines
9.Einstellung	hohe Füge-temperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenwachsen der Filterelemente • Lines

5. Ergebnisse

Beste Ergebnisse wurden mit kurzer Aktivierungszeit und hoher Fügetemperatur sowie mittlerer Aktivierungszeit und niedriger bis mittlerer Fügetemperatur erzielt. In Hinblick auf Produktivität ist jene Einstellung mit kurzer Aktivierungszeit und hoher Fügetemperatur wohl die zufriedenstellendste.

Es zeigte sich, dass Lufteinschlüsse nur bei kurzer Aktivierungszeit und niedriger Fügetemperatur auftraten. Diese Einschlüsse führen bei keiner direkten Berührung der Kanäle zu keiner Beeinträchtigung des Chips. Berühren die Einschlüsse jedoch den Kanal, so kann die Dichtheit der Kanäle nicht mehr gewährleistet werden.

Weiters konnte gezeigt werden, dass bei kurzer Aktivierungszeit und niedriger bis mittlerer Fügetemperatur die Filterstruktur auf Grund von zu großen Entformungsgraten nicht komplett geschlossen werden konnten.

Mittlere Aktivierungszeit und hohe Fügetemperatur sowie lange Aktivierungszeiten führten zum Verschmelzen der Filterstrukturen miteinander. Außerdem konnte „Lines“-Bildung im Zentralbereich der Chips beobachtet werden.

5.2.2 Grate beim Fügen

Grate haben vor allem beim Fügen einen Einfluss auf die Chipqualität. Es zeigte sich bei kurzer Aktivierungszeit und geringer bis mittlerer Fügetemperatur an den Positionen 10 und 15, dass der Kanal nicht ganz geschlossen werden konnte. An allen anderen Positionen und bei allen anderen Einstellungen war ein Einfluss der Grathöhe nicht zu erkennen. In Tabelle 16 sind die Grathöhen, gemittelt für alle 45 Teile (fünf Teile je Einstellung), an den verschiedenen Positionen der Kanalplatte dargestellt.

Tabelle 16: Grathöhe an den verschiedenen Positionen

Position	gemittelte Grathöhe in μm	Standardabweichung in μm
1	1,59	0,32
2	0,47	0,29
3	1,84	0,36
4	1,19	0,40
5	1,16	0,40
6	0	0
7	2,77	0,58

5. Ergebnisse

Position	gemittelte Grathöhe in μm	Standardabweichung in μm
8	2,11	0,35
9	4,65	0,42
10	3,92	0,96
11	3,61	1,15
12	2,80	0,76
13	7,63	1,63
14	2,52	0,52
15	5,76	0,86

Für kurze Aktivierungszeit und geringe bis mittlere Fügetemperatur waren Grathöhe an Position 10 von ca. 4 μm und an Position 15 von ca. 5,5 μm nicht mehrfügbar. Für kurze Aktivierungszeit und hoher Fügetemperatur sowie mittlerer Aktivierungszeit und geringer bis mittlerer Fügetemperatur wurde eine Grenze von ca. 7 μm gefunden. Diese wurde auch als oberer Grenzwert bei der Prozessfensterauswertung herangezogen.

5.2.3 Durchbiegung beim Fügen

In den Fügeversuchen wurden Kunststoffteilen mit einer Durchbiegung von ca. 60 μm zusammengefügt. Diese Durchbiegung stellte bei keiner Einstellung des Faktorenversuchs eine Schwierigkeit dar. Es waren keine Auffälligkeiten im Vergleich mit gefügten Chips bei geringerer Durchbiegung zu erkennen.

Auf den Einfluss der Durchbiegung auf die gesamte Prozesskette wird in Kapitel „5.4.3 Durchbiegung“, S. 26, noch genauer eingegangen.

5.2.4 Ergebnisse der Kanaltiefen- und breiten

Die Kanaltiefe (in den Kanälen vor und nach der Verbindungskammer) am selben Teil wurde vor und nach dem Fügen bestimmt. Vor dem Fügen wurden Messungen am Konfokalmikroskop durchgeführt. Nach dem Fügen war es jedoch nicht mehr möglich die Chips am Konfokalmikroskop zu untersuchen. Sie wurden deshalb mit Hilfe des Lichtmikroskops gemessen. Sie mussten dafür zerstört werden.

Um etwaige Messdifferenzen zwischen der Messung der Kanaltiefe am Konfokalmikroskop und dem Lichtmikroskop aufzuzeigen, wurden zehn Messungen an beiden Mikroskopen durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der

5. Ergebnisse

Messungen am Lichtmikroskop um ca. $0,5 \mu\text{m}$ (ca. 2%) kleiner waren, als jene am Konfokalmikroskop. Dieser Unterschied wurde in die Auswertung mit einberechnet.

Abbildung 75 zeigt die Kanaltiefe der Standardteile vor dem Fügen, unter Berücksichtigung der Messdifferenz, sowie die gemittelte Kanaltiefe von fünf Chips je Einstellungen. Einstellung 9 wurde bei diesen Auswertungen nicht berücksichtigt, da eine Messung der Kanaltiefe am Chip nach dem Fügen auf Grund der starken Ausprägung der „Lines“ nicht mehr möglich war.

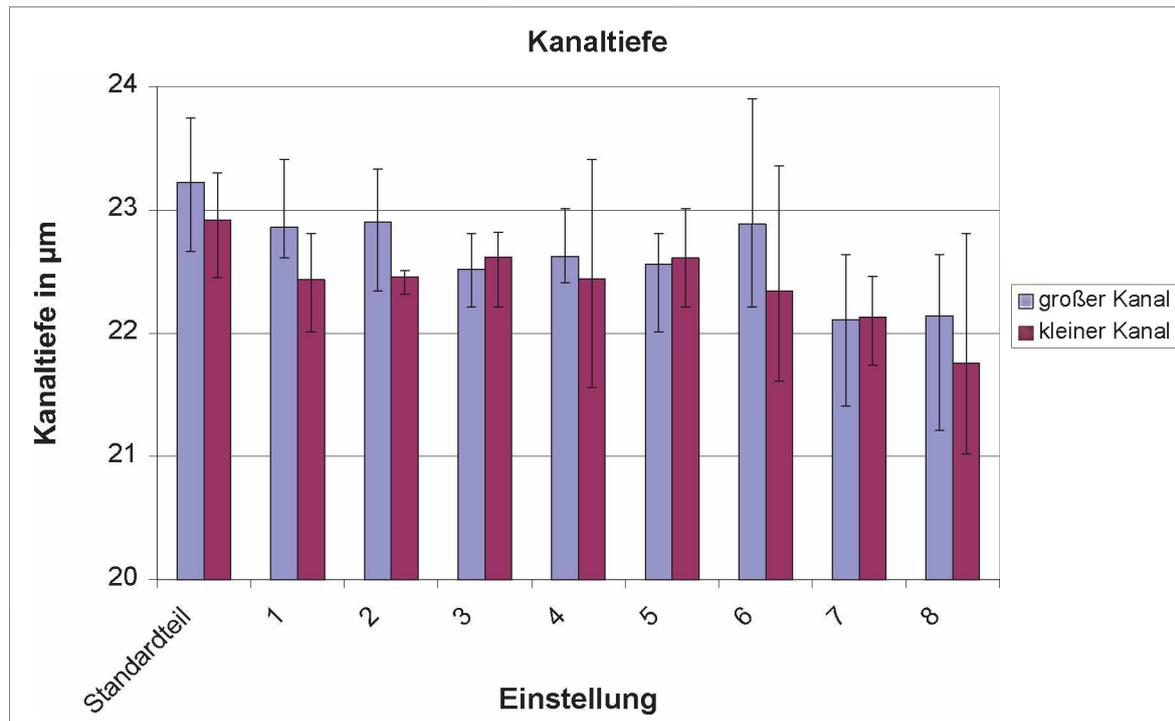


Abbildung 75: Kanaltiefe des Standardteils (ungebondetes Teil vor dem Fügen) sowie der Chips nach dem Fügen (Fehlerbalken zeigen die Minima und Maxima)

Die Differenzen der Kanaltiefen vor und nach dem Fügen der Teile sind in Tabelle 17 dargestellt. Es zeigte sich bei wiederholten Messung am Lichtmikroskop eine Gesamtmessabweichung von ca. $0,45 \mu\text{m}$. Vergleicht man die Kanaltiefe der ungefügten Kanalplatten mit den gefügten so zeigte sich bei kurzer und mittlerer Aktivierungszeit oftmals eine Differenz, die im Bereich dieser Messabweichung lag. Tendenziell gesehen kam es zu einer Verringerung der Kanaltiefe bei kurzer und mittlerer Aktivierungszeit, jedoch konnte an Hand dieser Messmethode keine genaue Aussage getroffen werden. Bei größerer Aktivierungszeit zeigten sich größere Differenzen in der Kanaltiefe. Diese lagen im Bereich von $0,8-1,1 \mu\text{m}$.

5. Ergebnisse

Auf den Einfluss der Kanaltiefe auf die gesamte Prozesskette wird in Kapitel „5.4.1 Kanaltiefe“, S. 26, noch genauer eingegangen.

Tabelle 17: Differenz der gemittelten Kanaltiefen vor und nach dem Fügen

Einstellung	Kanal	Differenz in μm	Differenz in %
1	großer	0,37	1,57
	kleiner	0,48	2,10
2	großer	0,32	1,39
	kleiner	0,46	2,00
3	großer	0,70	3,03
	kleiner	0,30	1,32
4	großer	0,60	2,59
	kleiner	0,48	2,07
5	großer	0,66	2,86
	kleiner	0,31	1,34
6	großer	0,34	1,46
	kleiner	0,58	2,51
7	großer	1,12	4,80
	kleiner	0,79	3,45
8	großer	1,08	4,66
	kleiner	1,16	5,07
9	großer	-	-
	kleiner	-	-

Es war nicht möglich die Kanalbreite vor und nach dem Fügen am selben Teil zu bestimmen. Die Messungen am Konfokalmikroskop vor dem Fügen zeigten keine zufriedenstellende Ergebnisse. Auch die Messung des Querschnitts am Lichtmikroskop konnte nicht durchgeführt werden, da die Teile vor dem Messen zerstört werden müssten. Somit wurden Teile aus derselben Produktion zur Messung am Lichtmikroskop herangezogen und mit den gefügten Teilen (je fünf Teile pro Einstellung) verglichen (siehe Abbildung 76). Wiederum wurde Einstellung 9 auf Grund der Deformation nicht in die Auswertung miteinbezogen.

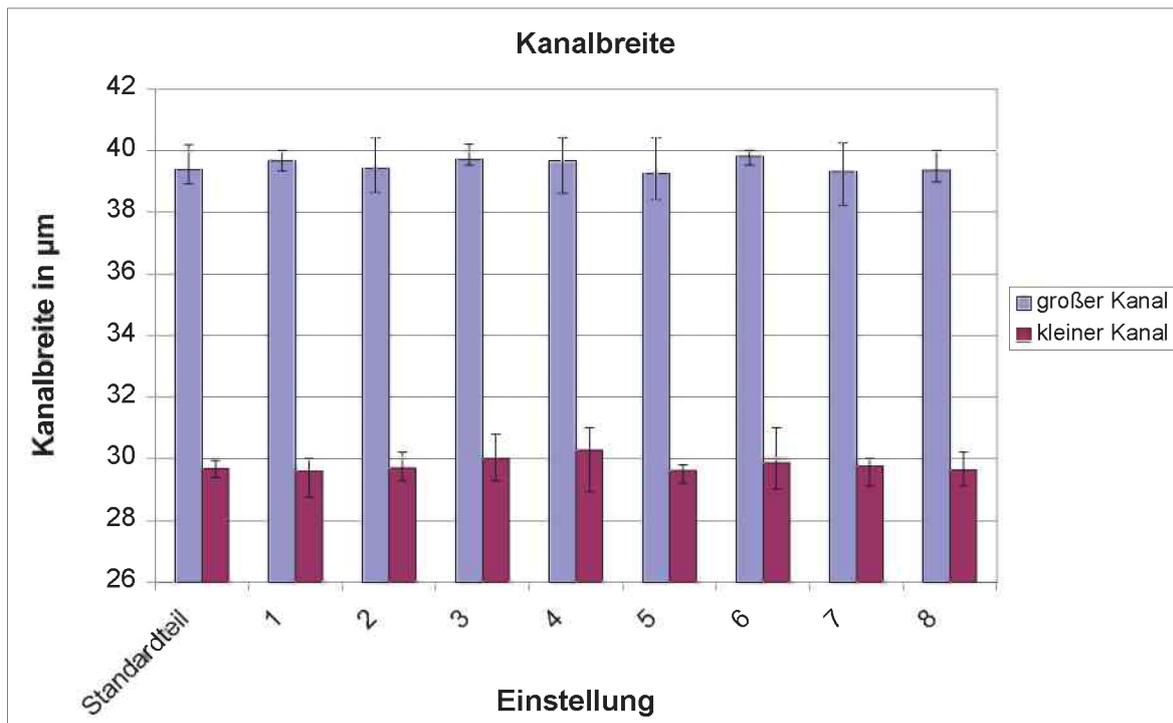


Abbildung 76: Kanalbreite des Standardteils (ungebondetes Teil vor dem Fügen) sowie der Chips nach dem Fügen (Fehlerbalken zeigen die Minima und Maxima)

Aus Abbildung 76 ist ersichtlich, dass mit dem Lichtmikroskop keine Kanalbreitenänderung festgestellt werden konnte.

5.3 Ergebnisse des Elektrodendruckversuchs

Es wurden Rauheitsmessungen an unbedruckten Kanalplatten durchgeführt, um Aussagen über Rauheit und der Haftung des Drucks auf dem Kunststoffteil treffen zu können. Es konnten jedoch an der untersuchten Versuchsreihe keine Haftungsprobleme festgestellt werden. Somit war keine Aussage über den Zusammenhang von Haftung und Rauheit möglich. Auf Grund dessen müssen noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

5.4 Auswirkungen entlang der Prozesskette

In diesem Kapitel werden nun aus den durchgeführten Analysen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Prozessschritten untersucht. Dadurch wird es möglich Auswirkungen von einem Prozessschritt auf nachfolgende Prozessschritte zu erklären.

5.4.1 Kanaltiefe

Die Kanaltiefe ist ein wesentliches Merkmal des Chips und bestimmt maßgeblich die Eigenschaften. Das Ziel der Untersuchung der Kanaltiefe ist es, die Möglichkeit der Früherkennung von Ausschuss aufzuzeigen und somit weitere, unnötige Prozessschritte zu vermeiden. Die zentrale Frage ist, ob es möglich ist, anhand des Premasters schon eine genaue Aussage über die spätere Kanaltiefe des Kunststoffteils und gefügten Chips treffen zu können.

In Abbildung 77 und Tabelle 18 sind die gemessenen Tiefen und berechneten Differenzen verschiedener Positionen des Premasters, Masters und Stampers 9.21 zu sehen. Die Positionen 1 und 3 befinden sich im Zentralbereich der Struktur. Außerdem wurden Filterstrukturen (Position 6 und 8) sowie ein Kanal (Position 13) im äußeren Bereich der Struktur untersucht. Es zeigte sich, dass durch den Platingprozess eine Änderung der Kanaltiefe in einem Bereich von 0,5-0,8 μm entstand. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Gesamtmessabweichung hier bei ca. 0,3 μm lag. Generell liegt der Unterschied von Master und Stamper rein an den äußeren Abmessungen und es sollten keine Kanaltiefenunterschiede zu sehen sein. Dies wollte hier auch noch einmal gezeigt werden.

5. Ergebnisse



Abbildung 77: Kanaltiefen an verschiedenen Positionen am Premaster – Master – Stamper 9.21 (Fehlerbalken zeigen Minima und Maxima)

Tabelle 18: Differenzen der Kanaltiefe an verschiedenen Positionen

Position	Differenz Premaster-Stamper in µm	Differenz Premaster-Stamper in %
1	0,76	3,20
3	0,62	2,66
6	0,75	3,18
8	0,48	2,06
13	0,69	1,42

Für Premaster, Master und Stamper 9.24 wurden dieselben Messungen durchgeführt. Hier zeigten sich zwischen Premaster und Stamper keine namhaften Unterschiede. Die Differenz lag zwischen 0,1–0,3 µm, also in der Gesamtmessabweichung. Dies lässt vermuten, dass beim Platingprozess wohl nicht immer konstante Bedingungen vorherrschen.

5. Ergebnisse

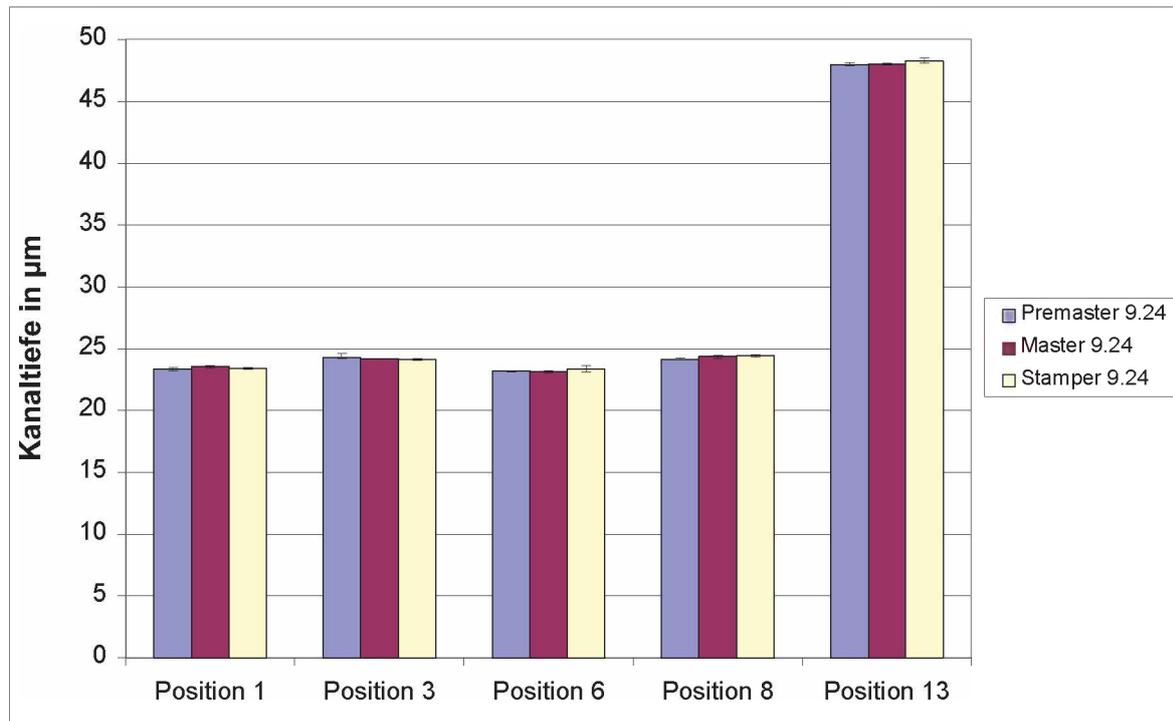


Abbildung 78: Kanaltiefen an verschiedenen Positionen am Premaster – Master – Stamper 9.24 (Fehlerbalken zeigen Minima und Maxima)

Beim Vergleich der Kanaltiefe des Stampers mit den Kunststoffteilen sowie den gefügten Chips wurde keine Kanaltiefenänderung festgestellt (siehe auch Kapitel „5.2.4 Ergebnisse der Kanaltiefen- und breiten“, S. 26). Die Differenz der Kanaltiefe zwischen Stamper und Kunststoffteil gemessen am Konfokalmikroskop lag bei wenigen Nanometern, so dass sich diese Unterschiede in der Messabweichung des Messsystems wiederfanden. Somit ist es jedoch auch möglich, mit dem Wissen der Kanaltiefe des Stampers auch Aussagen über die Kanaltiefe der Kunststoffteile, bis auf wenige Nanometer, treffen zu können. Es zeigte sich bei den gefügten Chips zwar eine tendenzielle Verringerung der Kanaltiefe im Bezug auf die ungefügten Teile, doch auch hier war es nicht möglich mit den zur Verfügung stehenden Messmitteln eine konkrete Aussage über die Abnahme treffen zu können, da sie zu gering war. Grundsätzlich ist somit eine Vorhersage der Kanaltiefe von Premaster auf den Chip mit einer Abweichung von 1 bis 2 µm möglich.

5.4.2 Rauheit in der Verbindungskammer am Stamper

Abbildung 79 bis Abbildung 81 zeigen REM-Bilder der Verbindungskammer der Stamper 9.21, 9.24 und 10.4. Vergleicht man die beiden Bilder miteinander, so lässt sich sofort ein Unterschied erkennen. Im ersten Bild zeigte sich eine wellenartige Oberfläche der Verbindungskammer. In den anderen hingegen zeigte sich eine ebene, glatte Fläche (siehe rote Markierungen). Vermutlich entsteht diese Unebenheit beim Galvanisieren. Die genaue Ursache dafür ist jedoch noch nicht geklärt.

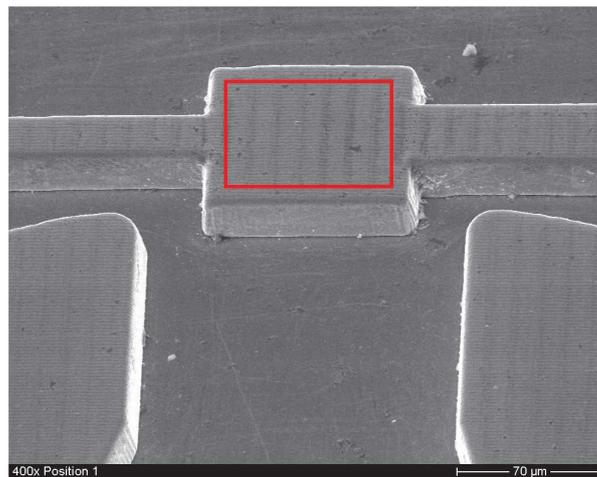


Abbildung 79: REM-Bild der Verbindungskammer des Stamper 9.21, rote Markierung zeigt Auffälligkeit

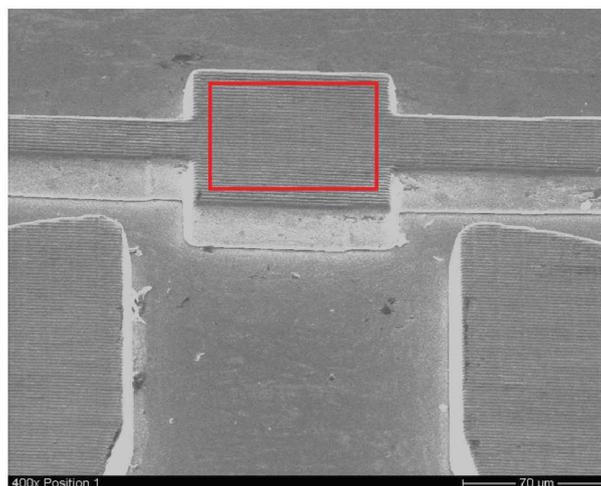


Abbildung 80: REM-Bild der Verbindungskammer des Stamper 9.24

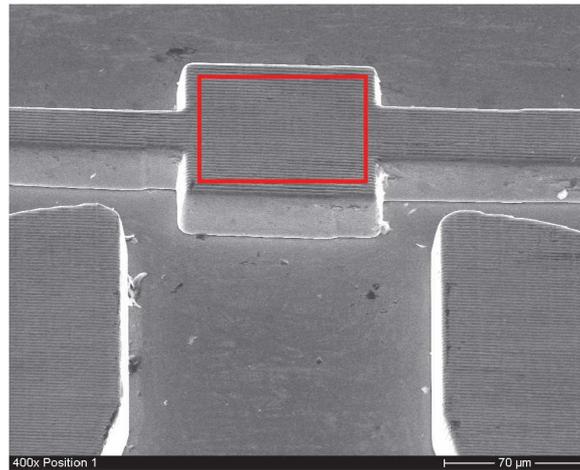


Abbildung 81: REM-Bild der Verbindungskammer des Stamper 10.4

Diese Auffälligkeit wurde auch durch die Messungen der Rauheit bestätigt. Es zeigten sich wesentliche Unterschiede. In Tabelle 19 sind die Rauheitswerte Ra für Premaster, Master, Stamper und Kunststoffteil ersichtlich. Abbildung 82 zeigt nun die Rauheitswerte Ra ausgehend vom Premaster bis hin zum Kunststoffteil. Zur Darstellung der Rauheitswerte der Kunststoffteile wurden gemittelte Rauheitswerte von je 45 Teilen herangezogen. Premaster, Master und Stamper wurden je zehn Mal vermessen.

Tabelle 19: Rauheit Ra in der Verbindungskammer für Premaster, Master, Stamper und Kunststoffteil

		Ra in µm			
		Premaster	Master	Stamper	Kunststoffteil
9.21	oben	0,029	0,048	0,046	0,043
	Mitte	0,028	0,050	0,047	0,048
	unten	0,035	0,052	0,050	0,055
9.24	oben	0,031	0,031	0,029	0,030
	Mitte	0,032	0,029	0,029	0,029
	unten	0,031	0,031	0,032	0,031
10.4	oben	0,023	0,039	0,041	0,045
	Mitte	0,018	0,033	0,037	0,041
	unten	0,023	0,034	0,036	0,042

5. Ergebnisse

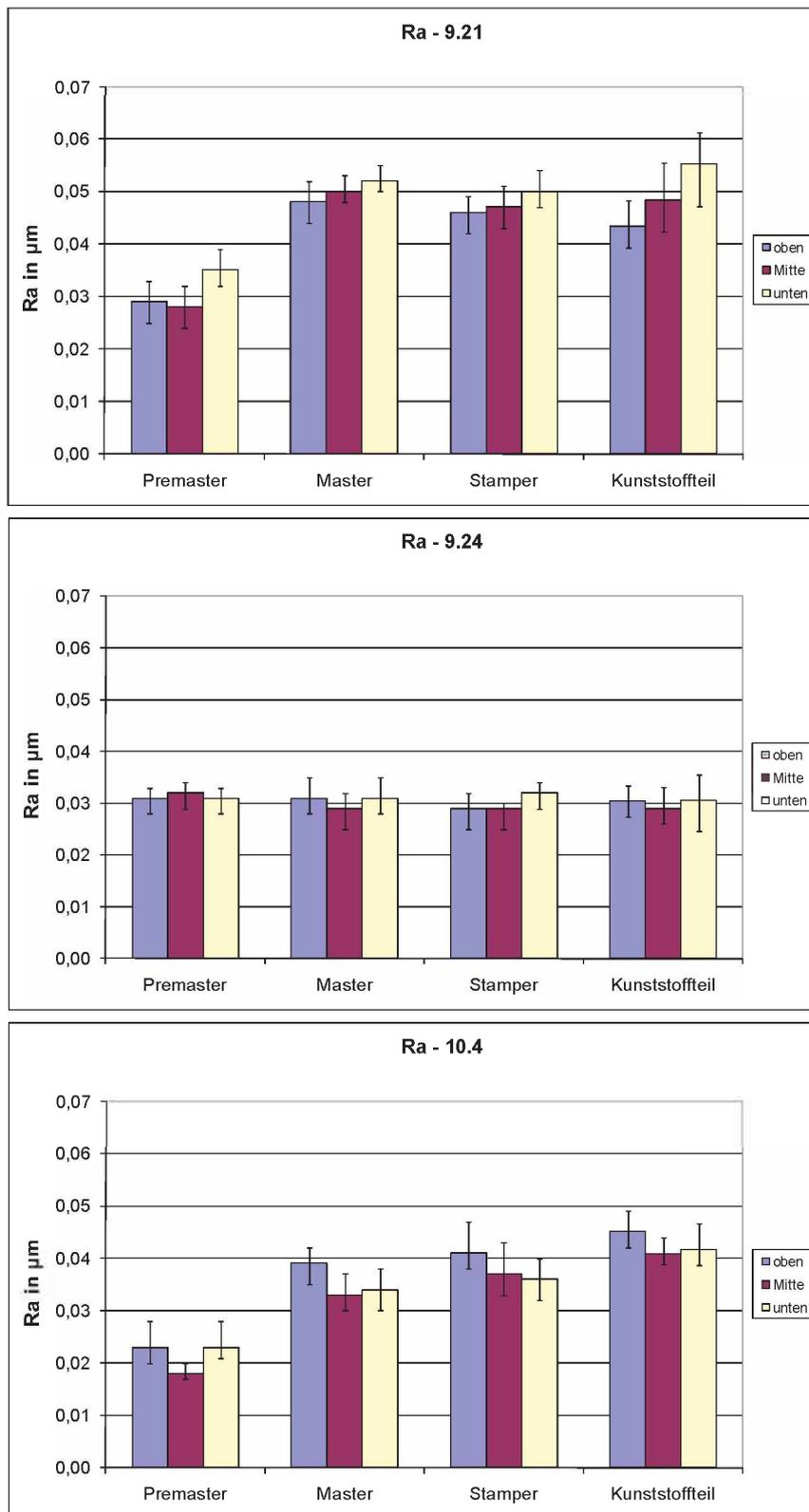


Abbildung 82: Ra vom Premaster bis hin zum Kunststoffteil (oben: für 9.21, Mitte: für 9.24, unten: für 10.4; Fehlerbalken zeigen Minima und Maxima)

Vergleich man die Messwerte entlang einer Prozesskette untereinander, so zeigte sich folgendes: Bei 9.21 und 10.4 waren die Rauheitswerte der Premaster geringer

5. Ergebnisse

als jene der dazugehörigen Master, Stamper und Kunststoffteile. Die Differenz lag im Bereich von $0,02 \mu\text{m}$ (Steigerung von ca. 60% beziehungsweise 100%). Bei den Versuchen an 9.24 zeigte sich über die ganze Prozesskette jedoch ein anderer Zustand. Die Rauheitswerte entlang der Prozesskette blieben nahezu konstant. Die Messungen zeigten, dass durch den Platingprozess eine Steigerung der Rauheit möglich ist, dieses Phänomen jedoch nicht immer auftritt. In diese Richtung müssen noch weitere Untersuchungen angesetzt werden.

Weiters wurde für alle Prozessketten beobachtet, dass die Ergebnisse der Messungen am Master und Stamper, wie zu erwarten war, nahezu identisch waren und auch die Kunststoffteile ähnliche Rauheitsergebnisse lieferten. Diese Feststellung deckt sich auch mit der Literatur [3].

Außerdem zeigten sich auch Schwankungen zwischen den einzelnen Premastern. Der Unterschied der Rauheitswerte von Premaster 10.4 zu den beiden anderen lag bei $0,01 \mu\text{m}$ (Steigerung von ca. 50%). Auch dieses Phänomen muss noch weiter untersucht werden. Vermutlich entsteht dies bei der Abrasterung durch den Laser.

5.4.3 Durchbiegung

Es wurde die Durchbiegung an den verschiedenen Mastern beziehungsweise Stampfern sowie den dazugehörigen Kunststoffteilen gemessen. Die Messung und Auswertung wurde wie in Kapitel „4.5.2 Topographiemessgerät“, S. 26, erklärt durchgeführt. Gemessen wurde die Durchbiegung nur an der strukturierten Seite. Dadurch ist die Durchbiegung oder Planheit der unstrukturierten Seite nicht geklärt. Somit wurde auch der Aspekt eines Dickeneffekts nicht berücksichtigt. Auf Grund dessen sind die hier gemessenen Werte nur bedingt gültig. Für genauere Aussagen müssen über denselben Querschnitt sowohl Dicke als auch Durchbiegung an beiden Seiten bestimmt werden.

Untersucht wurde, inwieweit der Zuschnitt auf Formeinsatzgröße die Durchbiegung beeinflusst und ob Stamper Einfluss auf die Durchbiegung der Kunststoffteile haben. Außerdem wurde der Einfluss der Durchbiegung auf den Fügeprozess überprüft.

Tabelle 20 zeigt die Ergebnisse der Messungen der Durchbiegung an Master und Stamper. Außerdem sind auch beispielhaft die Messwerte der Kunststoffteile für eine Maschineneinstellung (Einspritzvolumenstrom = 40 cm³/s, Werkzeugtemperatur = 85 °C und Nachdruckhöhe = 600 bar) angegeben. Für Master 9.24 sind keine Messwerte vorhanden, da bei Beginn dieser Arbeit der Master schon zugeschnitten war. In Abbildung 83 und Abbildung 84 sind die Durchbiegungen grafisch dargestellt.

Tabelle 20: Durchbiegung von Master, Stamper und Kunststoffteile

	Durchbiegung an					
	x1 in µm	x2 in µm	x3 in µm	y1 in µm	y2 in µm	y3 in µm
Master 9.21	99	78	113	75	53	81
Stamper 9.21	19	49	12	49	106	27
Kunststoffteile	52	44	56	54	48	53
Master 9.24	-	-	-	-	-	-
Stamper 9.24	14	108	12	59	138	31
Kunststoffteile	25	22	32	18	16	20
Master 10.4	109	94	103	159	143	151
Stamper 10.4	79	135	79	90	129	70
Kunststoffteile	58	55	57	64	52	48

5. Ergebnisse

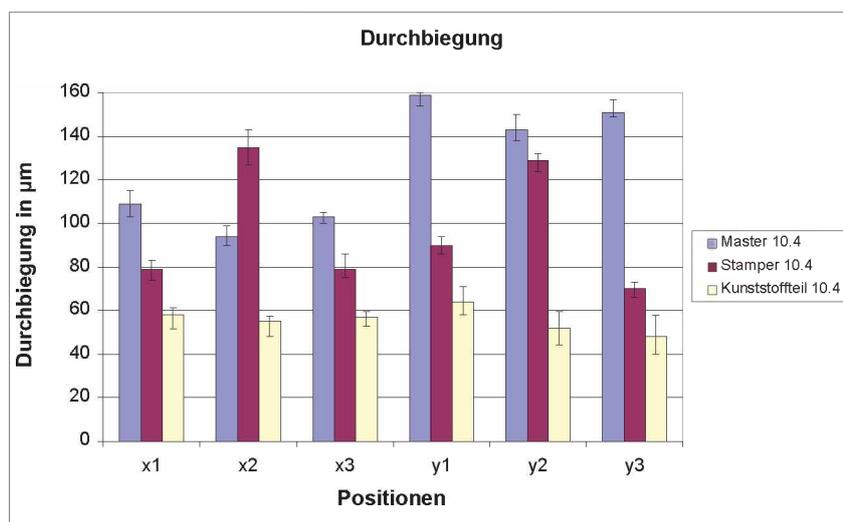
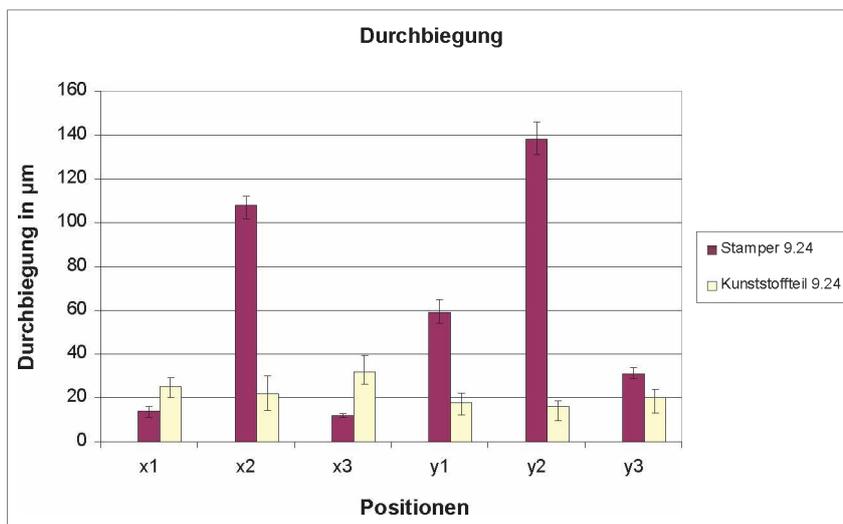
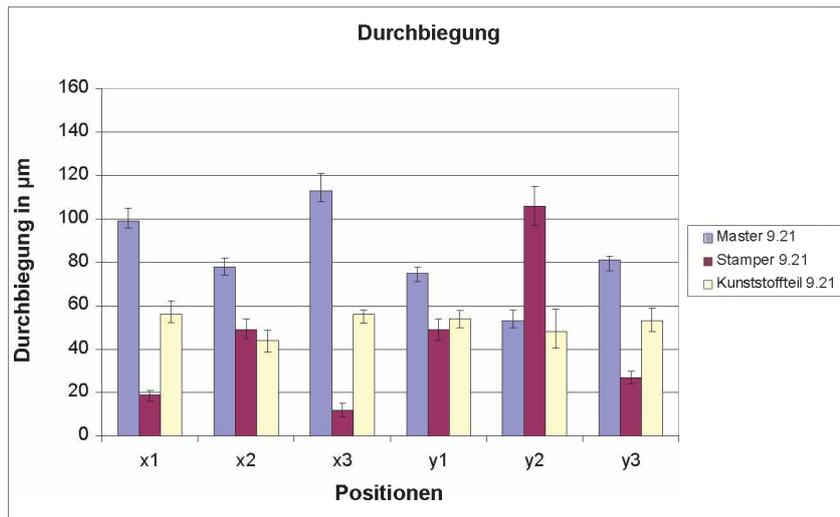


Abbildung 83: Durchbiegung von Master bis hin zum Kunststoffteil (oben: für 9.21 Mitte: für 9.24, unten: für 10.4; Fehlerbalken zeigen Minima und Maxima)

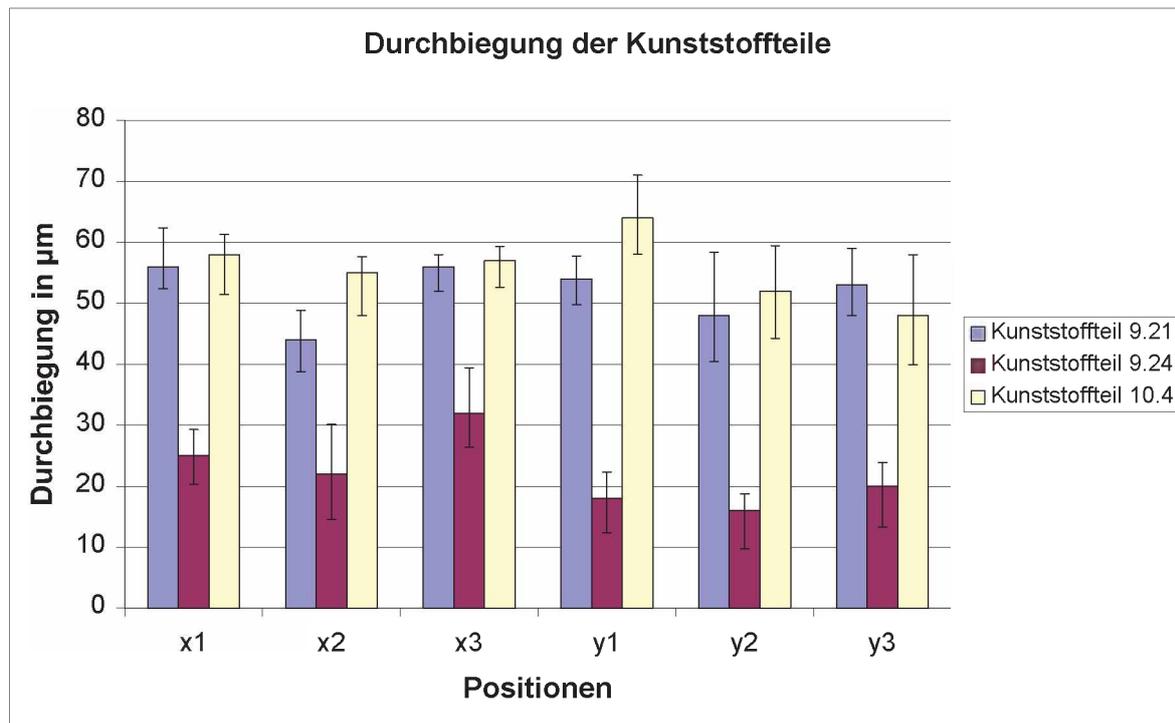


Abbildung 84: Durchbiegung der Kunststoffteile für eine Maschineneinstellung (Fehlerbalken zeigen Minima und Maxima)

Durch den Zuschnitt waren Veränderungen an der Durchbiegung erkennbar. Entlang der Seitenkanten (x1 und x3 sowie y1 und y3) kam es zu einer Verringerung. Die Messungen der Durchbiegung durch die Mitte (x2 und y2) lieferten wechselnde Ergebnisse. Es kam entweder zu einer Verringerung der Durchbiegung an Position x2 und Steigerung der Durchbiegung an Position y2 oder umgekehrt. Grundsätzlich war jedoch für alle Stämper eine maximale negative Durchbiegung entlang x2 oder y2 erkennbar.

Vergleicht man die Kunststoffteile mit den Stämpern so sieht man, dass die maximale positive Durchbiegung bei dieser Einstellung nicht an den Positionen x2 und y2 sondern an den Positionen x3 (bei Teilen von Stämper 9.21 und 9.24) und y1 (bei Teilen von Stämper 10.4), also entlang der Seitenkanten, zu finden waren. Für andere Maschineneinstellungen, durch zum Beispiel Änderung der Werkzeugtemperatur beim Einspritzen oder der Nachdruckdruckhöhe (vergleiche dazu Abbildung 61), wurden wiederum andere Positionen und Messwerte der maximalen Durchbiegung gefunden. Vermutlich haben Schwindung und Verzug auf die Durchbiegung mehr Einfluss als der Stämper selbst.

Stellt man die Messwerte der Durchbiegung der Kunststoffteile, die mit verschiedenen Stämpern hergestellt wurden gegenüber, so ist folgendes ersichtlich:

5. Ergebnisse

Teile der Stamper 9.21 und 10.4 lieferten ähnliche Ergebnisse. Die Auswertung der Durchbiegung des Stampers 9.24 lieferte im Vergleich gänzlich andere Werte. Auch bei anderen Einstellungen war ein Unterscheid ersichtlich. In ersten optischen Untersuchungen an der Rückseite aller Stamper mit dem Konfokal- und Lichtmikroskop konnten Unterschiede der Oberflächenbeschaffenheit (Bereiche mit unterschiedlicher Rauheit) der drei Stamper erkannt werden. Möglicherweise beeinflusst dieses Phänomen die Wärmeübertragung von Werkzeug, Stamper und Kunststoffteil. Diese Vermutung muss jedoch erst durch weitere Untersuchungen und Versuche verifiziert werden.

Weiters wurde, wie bereits oben erwähnt, die Durchbiegung der unstrukturierten Seite des Stampers nicht berücksichtigt. Möglicherweise könnte es vor allem bei beidseitig gebogenen Stampern und hohen Nachdrücken zu einem Geradebiegen des Stampers im Werkzeug kommen und somit zu unterschiedlichen Ergebnissen der Durchbiegung bei unterschiedlich gebogenen Rückseiten der Stamper. Auch dieses Phänomen muss jedoch erst untersucht werden.

Vermutlich wird die Durchbiegung der Kunststoffteile durch die Durchbiegung der Stamper und insbesondere durch Maschineneinstellungen beeinflusst. Der Einfluss des Stampers selbst muss wie oben bereits erklärt noch genauer untersucht werden.

Wie schon in Kapitel „5.2.3 Durchbiegung beim Fügen“, S. 26, ersichtlich, wurden Teile mit einer Durchbiegung von bis zu 60 µm ohne Probleme zusammengefügt. In bereits geplanten Versuchen werden Kunststoffteile mit wesentlich größerer Durchbiegung gefügt werden, um einen oberen Grenzwert festlegen zu können.

6 Zusammenfassung

Es wurden bestimmte Einflussfaktoren im Spritzguss- und Fügeprozess eines mikrofluidischen Chips und deren Auswirkungen auf nachfolgende Prozessschritte untersucht. Es konnten mit Hilfe definierter und vereinheitlichter Prüfungen Aussagen über wichtige Eigenschaften des Chips getroffen werden.

Spritzguss

Im Prozessschritt Spritzguss wurde ein Prozessfenster für die Herstellung der Kunststoffteile in Abhängigkeit von Einspritzgeschwindigkeit, Werkzeugtemperatur beim Einspritzen und Nachdruckhöhe ermittelt. Zur Auswertung wurden Entformungsrate, Abformungsdifferenz und Durchbiegung der Kunststoffteile herangezogen. Es konnte ein zufriedenstellendes Prozessfenster bei einem Einspritzvolumenstrom von 10-100 cm³/s, einer Werkzeugtemperatur beim Einspritzen von 80-90 °C und einer Nachdruckhöhe von 600-700 bar gefunden werden. Eine Änderung der Einspritzgeschwindigkeit hatte nahezu keinen Einfluss auf die Messgrößen. Eine Steigerung der Werkzeugtemperatur beim Einspritzen lieferte größere Entformungsrate, aber eine bessere Abformung. Bei Erhöhung des Nachdrucks kam es zu geringen Entformungsgraden und Durchbiegungen.

Im Zuge von Faktorenversuchen wurden auch Schwindung, Dickenverteilung und Rauheit des Kunststoffteils untersucht. Die Schwindung des verwendeten amorphen Cycloolefinpolymers lag im untersuchten Bereich zwischen 0,15 und 0,50%. Sie sank mit zunehmender Nachdruckhöhe. Auch die Dickenverteilung zeigte eine Abhängigkeit der Nachdruckhöhe. Die Änderung lag insgesamt jedoch bei nur ca. 1,2%. Die Auswertungen der Rauheitsmessungen zeigten keine Abhängigkeiten der Parametervariationen.

Fügen

Beim Fügeprozess wurde durch Parametervariation ein Prozessfenster in Abhängigkeit von Aktivierungszeit des Lösungsmittels und Füge­temperatur gefunden. Es wurde ein negativer Einfluss der Entformungsgrathöhe der untersuchten Teile beim Fügen mit kurzen Aktivierungszeiten und niedriger bis mittlerer Füge­temperatur beobachtet. Außerdem zeigten sich bei diesen Einstellungen Lufteinschlüsse. Weiters wurde, vor allem bei größeren Aktivierungszeiten, ein Verschmelzen der Mikrostrukturen und somit eine Zerstörung des Chips beobachtet. Beste Ergebnisse wurden mit kurzer Aktivierungszeit und hoher Füge­temperatur sowie mittlerer Aktivierungszeit und

geringer bis mittlerer Fügetemperatur erzielt. In Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Produktivität ist jene Einstellung mit kurzer Aktivierungszeit und hoher Fügetemperatur wohl die zufriedenstellendste.

Auswirkung entlang der Prozesskette

Die Kanaltiefe, Rauheit und Durchbiegung wurde entlang der gesamten Prozesskette untersucht.

Das Ziel der Untersuchung der Kanaltiefe war es, die Möglichkeit der Früherkennung von Ausschuss aufzuzeigen und somit weitere, unnötige Prozessschritte zu vermeiden. Es konnte gezeigt werden, dass es entlang der Prozesskette bis hin zum Stamper, zu einer Abnahme der Kanaltiefe von maximalen $0,8 \mu\text{m}$ kam. Unterschiedliche Einsätze lieferten jedoch unterschiedliche Ergebnisse. In Zukunft müssen deswegen noch weitere Untersuchungen in diese Richtung vorgenommen werden. Mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Messmethoden konnten außerdem keine signifikanten Unterschiede in der Kanaltiefe nach dem Spritzgießen und Fügen gefunden werden. Grundsätzlich ist somit eine Vorhersage der Kanaltiefe von Premaster auf den Chip mit einer Abweichung von 1 bis $2 \mu\text{m}$ möglich.

Rauheitsmessungen entlang der Prozesskette bis hin zum Stamper zeigten, je nach untersuchtem Einsatz, keine Veränderung oder eine Steigerung der Rauheit. Auf Grund dessen müssen Untersuchungen, die Herstellung der Einsätze betreffend, durchgeführt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Rauheit der Kunststoffteile jedoch ausschließlich vom eingesetzten Stamper beeinflusst wird.

Die Durchbiegung, gemessen entlang der Prozesskette, zeigte folgendes: Es kam zu einer Veränderung der Durchbiegung beim Zuschnitt des Formeinsatzes auf Stampergröße. Außerdem wurden Unterschiede in der Durchbiegung zwischen verschiedenen Stampfern gefunden. Weiters zeigte sich, dass die Durchbiegung der Kunststoffteile maßgeblich von den gewählten Parametereinstellungen beim Spritzgussprozess abhängt und auch vom Stamper beeinflusst wird. Letzterer Einfluss muss jedoch noch genauer untersucht werden. Das Fügen von untersuchten Teilen mit einer Durchbiegung von bis zu $60 \mu\text{m}$ stellte keine Schwierigkeit dar. Um einen oberen Grenzwert für einen problemlosen Fügevorgang definieren zu können, müssen noch weitere Versuche mit größeren Durchbiegungen durchgeführt werden.

7 Literatur

- [1] *Bäumer, S.:* „Handbook of Plastic Optics“, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Deutschland, 2010
- [2] *Becker, G.:* „Kunststoff – Handbuch“, Hanser, München, Wien, 1990
- [3] *Domininghaus, H.:* „Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften“, Springer, Berlin, 2006
- [4] *Ehrfeld, W.:* „Handbuch Mikrotechnik, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2002
- [5] *Erhard, G.:* „Konstruieren mit Kunststoffen“, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [6] *Fischer, J.M.:* „Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage“, Plastics Design Library, Norwich, USA, 2003
- [7] *Habenicht, G.:* „Kleben – erfolgreich und fehlerfrei“, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, Deutschland, 2008
- [8] *Habenicht, G.:* „Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendung“, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006
- [9] *Herschel, M.:* „Abformung von Nanostrukturen im Spritzgießverfahren zur Erzeugung von Antireflexoberflächen“, Univ.-Verl. der TU, Berlin, Deutschland, 2006
- [10] *Johannaber, F et al.:* „Handbuch Spritzgießen“, Carl Hanser Verlag München, 2004
- [11] *Kück, H.:* „Spritzgießen in der Mikrotechnik“, Universität Stuttgart, Institut für Zeitmeßtechnik, Fein- und Mikrotechnik, 2003
- [12] *Lucyshyn, T.:* „Messungen von pvT-Daten bei prozessnahen Abkühlraten und deren Einfluss auf die Simulation von Schwindung und Verzug mit Moldflow Plastics Insight“, Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 2009
- [13] *Menges, G et al.:* „Anleitung zum Bau von Spritzgießwerkzeugen“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1999
- [14] *Menon, R. et al.:* „Maskless Lithography“, Materials Today, Ausgabe: Februar, 2005

7. Literatur

- [15] *Menz, W. et al.*: „Mikrosystemtechnik für Ingenieure“, VCH, Weinheim, Deutschland, 1997
- [16] *N.N.*: „Schematische Zeichnungen“, Sony DADC Austria AG, Intern, 2011
- [17] *N.N.*: „Funktion des Chips“, <http://www.raindancetechnologies.com/>;
Stand: 26.11.2010
- [18] *N.N.*: „LIGA-Verfahren“,
<http://www.fachschaft.informatik.unifreiburg.de/~ehrenfeu/ersticd/mst/vorlesungen/mst2/MST2-LIGA-Verfahren.pdf>, Stand: 11.03.2011
- [19] *N.N.*: Produktinformation „Zeonor – high-performance Thermoplastics from Zeon Corporation“, Zeon Corporation, Japan, 2004
- [20] *N.N.*: Produktinformation: „Zeonor 1060R“, <http://www.zeonex.com/>;
Stand: 26.11.2010
- [21] *N.N.*: Produktinformation „Engel e-motion 2007100“, ENGEL Austria GmbH, Österreich, 2007
- [22] *N.N.*: Produktinformation „Fujifilm DIMATIX DMP 2831“, Fujifilm DIMATIX Inc., USA, 2008
- [23] *N.N.*: Produktinformation „Schmidt ServoPresse 460“, Schmidt Technology GmbH, Deutschland, 2010
- [24] *N.N.*: Produktinformation „FRT MicroSpy Topo“, FRT GmbH, Deutschland, 2010
- [25] *N.N.*: Produktinformation „CWL-Sensor“, FRT GmbH, Deutschland, 2010
- [26] *N.N.*: Produktinformation „FRT MicroProf 200“, FRT GmbH, Deutschland, 2010
- [27] *N.N.*: Produktinformation „Werth ScopeCheck 200“, Werth Messtechnik GmbH, Deutschland, 2010
- [28] *N.N.*: Produktinformation „HITACHI S-4000“, Hitachi High-Technologies Corporation, Japan, 2010
- [29] *N.N.*: Produktinformation „Nikon EclipseLV100“, Nikon GmbH, Deutschland, 2010
- [30] *Potente, H.*: „Fügen von Kunststoffen“, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004

- [31] *Schift, H.:* „Enformungsmechanismen“, Paul Scherrer Institut, Labor für Mikro- und Nanotechnologie, 2010
- [32] *Schinköthe, W.:* „Temperierkonzepte für das Mikrospritzgießen im Vergleich“, Universität Stuttgart, Veröffentlichung am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik zum 18.Stuttgarter Kunststoff – Kolloquium, 2003
- [33] *Schinköthe, W. et al.:* „Zykluszeiten verringern“, Kunststoffe, Ausgabe 5, 2000, S. 62
- [34] *Shin, J.Y.et al.:* „Chemical Structure and Physical Properties of Cyclo Olefin Polymers“ (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem., Vol. 77, No. 5, 2005, S. 801-814
- [35] *Tewald, A.:* „Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung“, Dissertation Universität Stuttgart IKFF, 1997
- [36] *Uebbing, M.:* „Fügen von Kunststoffen“, Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag, Düsseldorf, 1998
- [37] *Volk, R.:* „Rauheitsmessungen: Theorie und Praxis“, Beuth Berlin Wien Zürich, 2005
- [38] *Zeitner, U.-D. et al.:* „Laser – Lithographie of non – planar surfaces, Optics Express, Vol.15, No.3, S. 1167-1174

8 Verwendete Symbole und Abkürzungen

Symbol / Abkürzung	Bezeichnung
α	Absorptionskoeffizient
COP	Cycloolefinpolymer
d	Schichtdicke
DNA	Desoxyribonukleinsäure
ES	Entformungsschwindung
GS	Gesamtschwindung
l_k	Maß des Kunststoffteils
l_w	Maß des Werkzeugs
λ	Wellenlänge
NS	Nachschwindung
Ra	arithmetischer Mittenrauwert
Rq	quadratischer Mittenrauwert
Rz	gemittelte Rautiefe
REM	Rasterelektronenmikroskop
S	Schwindung
T	Transmission
t	Zeit
t_H	Heizzeit
t_K	Kühlzeit
t_Z	Zykluszeit
E	Entformungstemperatur
M	Massetemperatur
w	Werkzeugtemperatur
VS	Verarbeitungsschwindung