

# Verfahrensvergleich zur Herstellung von mikro- und nanostrukturierten Oberflächen

eingereichte

## Masterarbeit

am Institut für Kunststoffverarbeitung  
Montanuniversität Leoben

In Zusammenarbeit mit  
Polymer Competence Center Leoben GmbH

und

SonyDADC Austria AG



**Stefan LEMMERER**

Betreuung:

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. W. Friesenbichler  
Montanuniversität Leoben

Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald R. Berger  
Polymer Competence Center Leoben GmbH

Dipl.-Ing Martin Karl  
SonyDADC Austria AG

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei jenen Personen bedanken, die mir bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit behilflich waren.

Großer Dank gebührt dem Vorstand des Instituts für Kunststoffverarbeitung der Montanuniversität Leoben, o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Clemens Holzer für die Begutachtung und Beurteilung sowie Hinweise zur Interpretation der Ergebnisse dieser Arbeit.

Weiters möchte ich mich bei Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Walter Friesenbichler für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit, seine Hilfestellung bei der Organisation und seine zahlreichen fachlichen Hinweise bei der schriftlichen Abfassung dieser Masterarbeit bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mir bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerald R. Berger, der mir mit unermüdlichen Einsatz und vielen Hinweisen beim praktischen Teil und bei der Erstellung zur Seite stand. Ohne seinen großen Beitrag hätte diese Diplomarbeit nie die aktuelle Form erreicht.

Zudem möchte ich mich SonyDADC Austria für die Möglichkeit bedanken, den praktischen Teil meiner Diplomarbeit am Standort Anif durchführen zu können.

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Abteilung MPD von SonyDADC Austria, im Besonderen Hr. Dipl.-Ing. Martin Karl bedanken, welche mir während meines Aufenthaltes bei SonyDADC stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Eltern dafür bedanken, dass sie mich laufend unterstützt haben und mir mein Studium an der Montanuniversität Leoben ermöglicht haben.

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

---

Datum

---

Unterschrift

## Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Abformung von V-Kerben mit Abmessungen im Submikrometerbereich mit den Verfahren Spritzgießen, Spritzprägen und Spritzgießen mit variothermer Prozessführung untersucht. Die variotherme Werkzeugtemperierung wurde mit einem Infrarotstrahler realisiert. Für die Tests wurden die Materialien PP Dow H734-52 RNA und COP Zeonor 1060R verwendet. Die Parameter Masstemperatur und Einspritzgeschwindigkeit sowie Werkzeugtemperatur und Nachdruck wurden in 2 vollfaktoriellen Versuchsplänen auf Effekte und Wechselwirkungen im Hinblick auf die Höhenreplikation der V-Kerben untersucht.

Mit höherer Werkzeugtemperatur und Masstemperatur konnte die Qualität der Abformung deutlich gesteigert werden. Höherer Nachdruck verbessert die Abformung geringfügig. Mit steigender Einspritzgeschwindigkeit wurde die Abformung schlechter. Der Einsatz der Prägetechnik bringt eine geringfügige Verbesserung der Abformung.

Bei beiden Materialien konnten die Strukturen nur mit dem Einsatz von variothermer Prozesstechnik zufriedenstellend abgeformt werden. Für die vollständige Abformung von Mikrostrukturen in COP ist eine Werkzeugtemperatur im Bereich der Glasübergangstemperatur notwendig. Bei PP ist die erforderliche Werkzeugtemperatur hingegen um mindestens 20 °C geringer als die Kristallitschmelztemperatur.

## Abstract

This thesis deals with the replication of v-grooves in the sub-micron range by injection moulding, injection compression moulding and variotherm injection moulding. The variotherm mould temperature was achieved by an infrared radiator. The tests were performed with PP Dow H734-52 RNA and COP Zeonor 1060R. The effects and interactions of the parameters melt temperature and injection speed as well as mould temperature and holding pressure were investigated by using two 2<sup>2</sup>-factorial designs.

Higher mould temperature and higher melt temperature increase the quality of replication significantly. Holding pressure leads to slightly better replication. Increasing injection speed shows a tendency towards worse results. The use of injection compression moulding slightly increases the structure replicaton.

The v-grooves were replicated in a good manner when variotherm injection moulding is used. Mould temperatures at or above the glass transition temperature are necessary for full replicated of v-grooves with COP. The lowest temperature for full replication of v-grooves with PP is at least 20 °C below its crystallisation temperature.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Verarbeitungsverfahren	3
2.1.1	Spritzgießen	3
2.1.2	Spritzgießen mit variothermer Prozessführung	4
2.1.3	Spritzprägen	7
2.1.4	Heißprägen	8
2.2	Abformungsmechanismen und Abformgüte	9
2.3	Entformung	12
<b>3</b>	<b>Experimentelles</b>	<b>14</b>
3.1	Verwendete Kunststoffe	14
3.2	Probekörper und Mikrostrukturen	19
3.3	Verwendete Maschinen und Geräte	21
3.3.1	Spritzgießmaschine	21
3.3.2	Temperiertechnik und Werkzeuge	22
3.3.3	Parameter und Messtechnik	26
3.4	Abformungsversuche	34
3.4.1	IR-variotherme Versuche	35
3.5	Auswertung und Fehlerbetrachtung	37
3.5.1	Bestimmung der abgeformten Höhe	37
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>41</b>
4.1	Thermisches Verhalten des Werkzeuges „SonyMold 04“	41

4.1.1	Aufheiztests	41
4.1.2	Temperaturhomogenität des Formeinsatzes	43
4.2	Ergebnisse aus dem faktoriellen Versuchsplan	44
4.2.1	Konventionelles Spritzgießen	44
4.2.2	Konventionelles Spritzprägen	49
4.2.3	Spritzgießen mit Infrarot-variothermer Temperierung	54
4.2.4	Vergleich von konventionellem Spritzgießen und Spritzprägen	58
4.2.5	Vergleich von Spritzgießen und Spritzgießen mit variothermer Prozessführung	63
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>72</b>
7.1	Code des Programms „AFMEval“	72
7.2	Effektdiagramme	77
7.2.1	Effektdiagramme Spritzgießen	77
7.2.2	Effektdiagramme Spritzprägen	81
7.2.3	Effektdiagramme Spritzgießen mit variothermer Prozessführung	85
7.3	Verwendete Abkürzungen	89
7.4	Messdaten für spezifische Wärmekapazität und Viskosität	90
7.4.1	Messdaten für die spezifische Wärmekapazität	90
7.4.2	Messdaten für die Viskosität	91
7.5	Bildverzeichnis	92
7.6	Tabellenverzeichnis	96

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Im Zuge der Miniaturisierung ist es in den vergangenen Jahrzehnten wichtiger geworden, Strukturen im Mikrometerbereich mit konstanter Qualität herzustellen. Davon sind nicht nur rein mechanische Bauteile wie Zahnräder oder Schrauben betroffen, wie beispielsweise in Uhrwerken oder Präzisionsmessgeräten, sondern auch optische und strömungsmechanische Anwendungen. Damit beispielsweise die Funktion eines optischen Trägermediums gewährleistet ist, muss die Oberfläche bestimmte Eigenschaften erfüllen, d.h. die Mikro- oder Nanostrukturen müssen in vertikaler und in lateraler Richtung deutlich genug ausgeprägt sein, um von einem Laserstrahl abgetastet und von einem Detektor erkannt werden zu können.

Die in den vergangenen Jahren entwickelten Anwendungen im Bereich der so genannten Mikrofluidik eröffnen neue Einsatzgebiete, nicht zuletzt wegen der vielseitigen Eigenschaften. Auf Grund der geringen Abmessungen steigt das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und im selben Maße nehmen damit verbundene Einflüsse wie Oberflächenspannung, Reibung, thermisches Ansprechverhalten oder elektrokinetische Eigenschaften zu. Andererseits nimmt der Einfluss der Schwerkraft wegen der geringen Massen ab.

Diese veränderten Eigenschaften stellen nicht nur eine Herausforderung für die Hersteller von mikro- oder nanostrukturierten Bauteilen sondern vor allem ein enormes Potenzial für analytische Anwendungen, beispielsweise in den Bereichen Medizin und Chemie, dar. Dazu kommt eine Reihe von Vorteilen, wie sehr geringe Probenmenge, geringe Analysendauer, kompakte Bauweise, einfache Anwendung, Kombination von mehreren Funktionen in einem Bauteil und, möglicherweise in der Zukunft, größere Genauigkeit als bei vergleichbaren Messgeräten.

Bisher wurden derartige Strukturen meist aus Glas oder Silizium hergestellt. Der Nachteil liegt im hohen Preis der Grundstoffe sowie den aufwändigen Verfahren. Aus diesem Grund versucht man, derartige Produkte aus Kunststoffen zu fertigen, und damit deren Vorteile wie geringe Materialkosten und hohe Reproduzierbarkeit zu nutzen. Dazu sind mehrere Kunststoffverarbeitungsverfahren geeignet, unter anderem das Spritzgießverfahren, das Spritzgießverfahren mit variothermer Prozessführung, das Spritzprägeverfahren und das Heißprägeverfahren.

Bei der Verarbeitung muss die Formnestoberfläche möglichst genau abgeformt werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn sich der Kunststoff im Moment der



Abformung noch in der fließfähigen Phase befindet, was im konventionellen Spritzguss durch die rasche Ausbildung einer erkalteten Randschicht nur bedingt zutrifft. Parameter wie die Schmelztemperatur, die Werkzeugtemperatur und das lokale Schmelzedruckniveau spielen eine entscheidende Rolle. Höhere Werkzeugtemperatur ergibt zwar durch langsamere Randschichtbildung eine bessere Abformqualität, jedoch steigt die Kühlzeit, die indirekt proportional zur Wirtschaftlichkeit ist, wonach möglichst viele Einheiten in einem definierten Zeitraum hergestellt werden sollen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die oben genannten Verfahren auf signifikante Prozessparameter untersucht und untereinander verglichen. Dazu werden ein Formeinsatz mit einer sägezahnförmig strukturierten Oberfläche, sowie zwei unterschiedliche Kunststoffe, COP und PP, verwendet. Als Vergleichskriterium kommt der Abformungsgrad zum Einsatz. Durch eine statistische Versuchsplanung soll ein Prozessfenster ermittelt werden, in dem die bestmögliche geometrische Abformung der Mikro- bzw. Nanostruktur erreicht wird.

Mit diesen Ergebnissen sollen bestehende Prozesse, die für die optische Disc bereits vollautomatisch und qualitätsgesichert umgesetzt sind, auf höhere Aspektverhältnisse übertragen werden. Mit dem Ziel des technisch und wirtschaftlich optimalen Prozesses soll beim Verfahren Spritzgießen mit variothermer Prozessführung zusätzlich der Einfluss der Oberflächentemperatur des zu beheizenden Formeinsatzes auf die Abformung untersucht werden.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Verarbeitungsverfahren

#### 2.1.1 Spritzgießen

Mit dem konventionellen Spritzgießverfahren können komplexe Formteilgeometrien realisiert werden. Dabei wird Kunststoffgranulat in einer Schubschnecken-Plastifiziereinheit aufgeschmolzen und unter hohem Druck in den Formhohlraum (Kavität) einer kalten Spritzgießform eingespritzt. Zur Schwindungskompensation wird während der anschließenden Nachdruckphase zusätzlicher schmelzflüssiger Kunststoff in das Formteil gedrückt. Nach Abkühlen des Formteiles auf Entformungstemperatur, welche die für das anschließende Entformen erforderliche mechanische Stabilität gewährleistet, werden die beiden Werkzeughälften geöffnet und das Formteil wird entnommen oder ausgeworfen. Während des Einspritzens erstarrt die Randschicht der Schmelze durch den großen Temperaturgradienten beim Kontakt mit der kalten Kavitätsoberfläche sehr schnell und bildet dadurch die Oberflächenstruktur zumeist nicht vollständig nach (Bild 1). Hohe Abformgüten kleinerer Mikrostrukturen können daher nur mit relativ hohen, unwirtschaftlichen Werkzeugtemperaturen erreicht werden.

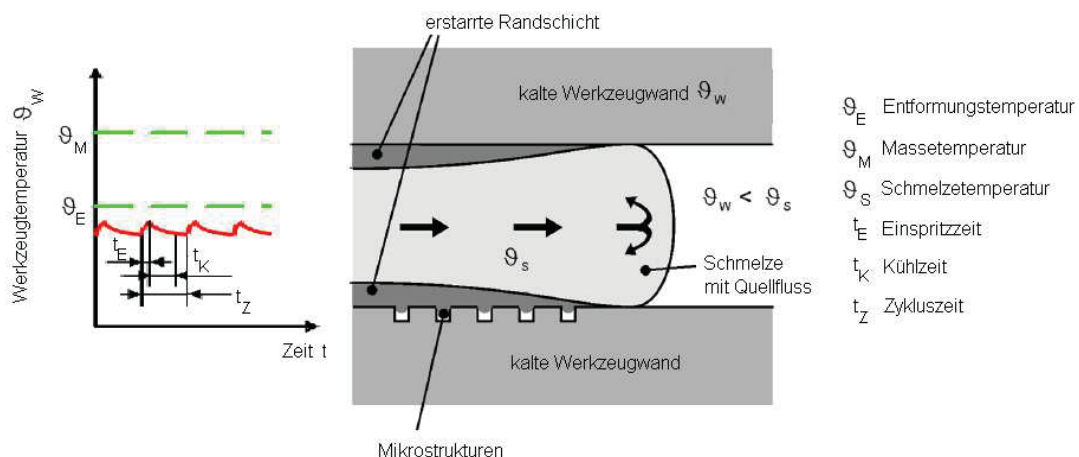
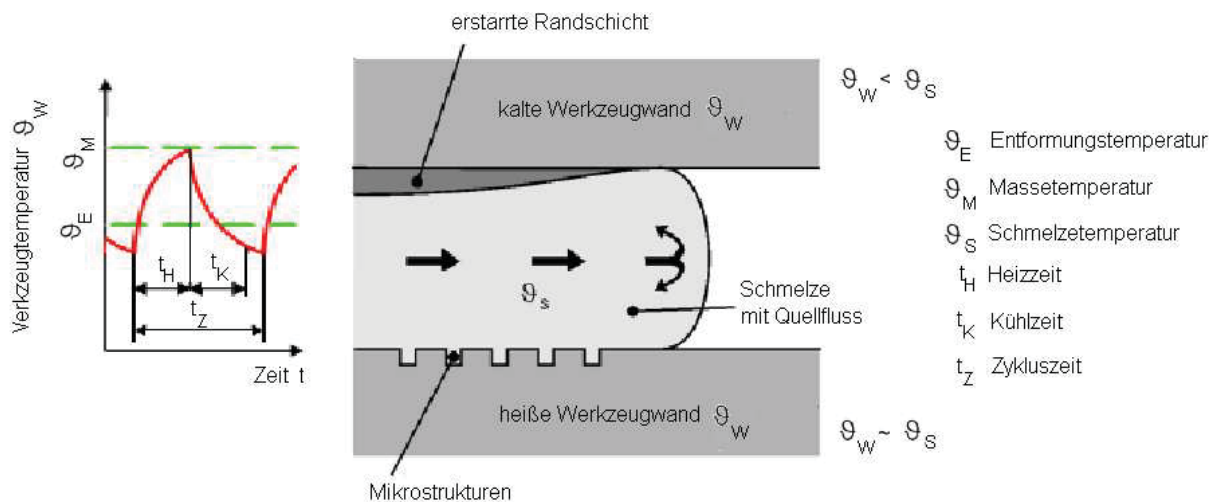


Bild 1: Randschichterstarrung im konventionellen Spritzgießen [26].

Eine ausreichende Abformung von geometrischen Nanostrukturen ist durch das konventionelle Spritzgießverfahren nicht möglich. Bei dreidimensionalen Bauteilen verursachen ferner Phänomene wie der makroskopische Schrumpf beim Erstarren Spannungen, die zu Entformungsschwierigkeiten bzw. zum Abscheren der Strukturen bei der Entformung führen können.

### 2.1.2 Spritzgießen mit variothermer Prozessführung

Beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung wird die Werkzeugoberfläche zuerst auf eine Temperatur, zumeist über Glasübergangstemperatur bzw. nahe der Kristallitschmelztemperatur des verwendeten Kunststoffes, erhitzt, um während des Einspritzens eine langsamere Schmelzeerstarrung und somit eine vollständige Füllung von Mikrospritzgussteilen bzw. bessere Abformung von Mikrostrukturen zu gewährleisten. Anschließend muss die Werkzeugoberfläche intensiv gekühlt werden, um das Formteil auf Entformungstemperatur abzukühlen (Bild 2). Wegen der höheren Werkzeugtemperatur bildet sich an der strukturierten Werkzeugoberfläche keine erstarrte Randschicht und die Schmelze kann in die Oberflächengeometrie der Kavität einfließen und diese sehr gut abformen. Für gute Abformung ist die Kavität in der Regel zu evakuieren.

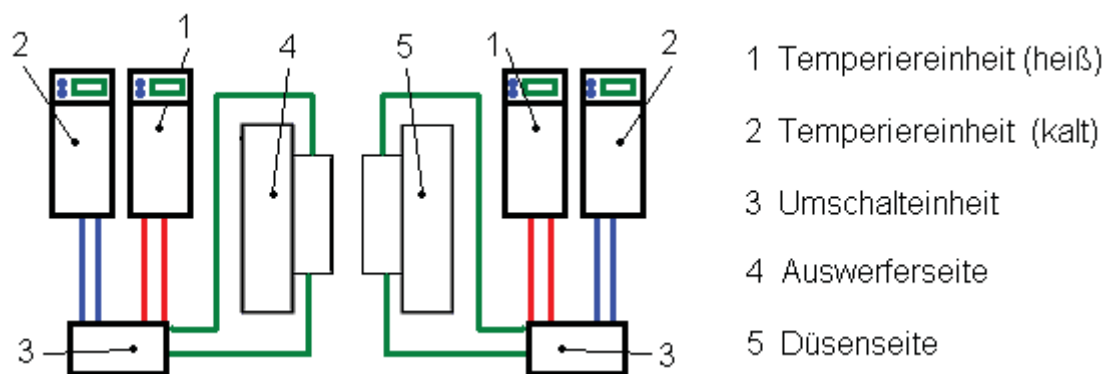


*Bild 2: Temperaturverlauf im Werkzeug und Randschichterstarrung beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung [26].*

Je nach Verfahren werden bei variothermer Prozessführung das gesamte Werkzeug, einzelne Formeinsätze oder nur die oberflächennahen Bereiche der Kavitätsoberfläche wechselweise aufgeheizt und abgekühlt. Für das Aufheizen werden unterschiedliche Methoden angewendet. Diese unterscheiden sich in der Handhabung, der beheizten Masse, der erreichbaren Aufheizgeschwindigkeit, der erreichbaren Temperatur, der Oberflächentemperaturhomogenität und auch den Kosten. Neben der verbesserten Strukturabformung können durch variotherme Prozessführung zusätzlich Verzug und Eigenspannungen der Formteile reduziert, die

Bildung von Bindenähten vermieden und die Oberflächenqualität und -beschaffenheit verbessert werden [9].

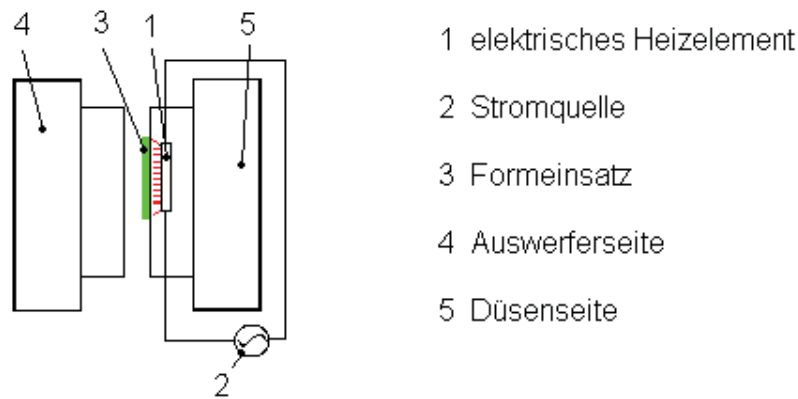
Die einfachste Methode besteht darin, das **Werkzeug mit unterschiedlich temperierten Medien wechselweise zu beheizen oder abzukühlen**. Eine Umschalteneinheit schaltet zwischen heißem und kaltem Medium (z.B. Wasser) um. Diese werden von zwei Temperiergeräten in hoher und niedriger Temperatur zur Verfügung gestellt (Bild 3). Das gesamte Werkzeug bzw. die zu beheizende Werkzeughälfte wird vor dem Einspritzen mit dem heißen Medium bis zur eingestellten Zieltemperatur aufgeheizt. Nach dem Einspritzen schaltet die Umschalteneinheit um und leitet das kalte Medium in die Kühlkanäle bzw. leitet die vorher zugeführte Wärme wieder ab. Nach dem Erreichen der Entformungstemperatur bzw. dem Entformen des Formteils wird wieder das heiße Medium in die Kavität geleitet und das Werkzeug für den nächsten Zyklus erwärmt.



*Bild 3: Variotherme Werkzeugtemperierung mittels Umschalteneinheit und unterschiedlichen Temperiermitteltemperaturen an 2 Heizgeräten [9].*

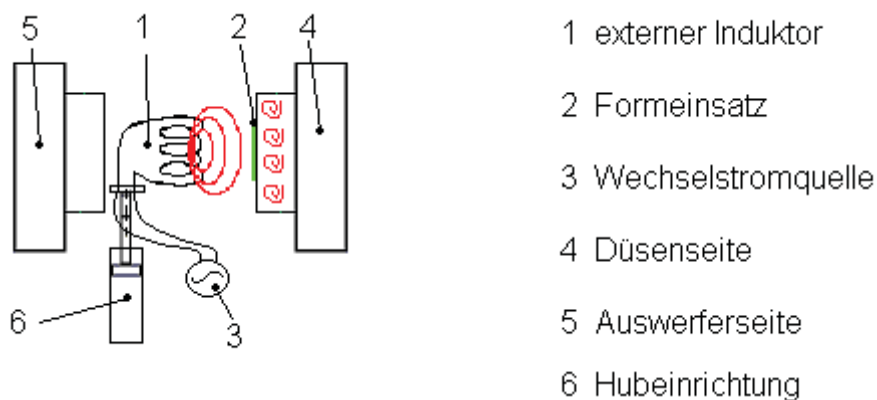
Alternativ dazu kann die variotherme Werkzeugtemperierung mit **elektrischen Heizelementen** erfolgen. Diese werden im Werkzeug eingebaut und heizen dieses nach Bedarf (Bild 4). Eine Alternative zu Heizpatronen, welche die Wärme ungerichtet in das gesamte Werkzeug abgeben und sich schlecht regeln lassen, stellen neu entwickelte elektrisch leitfähige Keramiken, so genannte HTDM (High Temperature Dynamics Material) dar.

HTDM und deren Einsatz in der so genannten „Blitzheizungstechnologie“ zeichnen sich unter anderem durch hohe Standfestigkeit, einen großen Temperaturbereich, punktuelle Temperierung und sehr schnelle Beheizung aus [4].



*Bild 4: Variotherme Werkzeugtemperierung durch den Einsatz von elektrischen Heizelementen [4].*

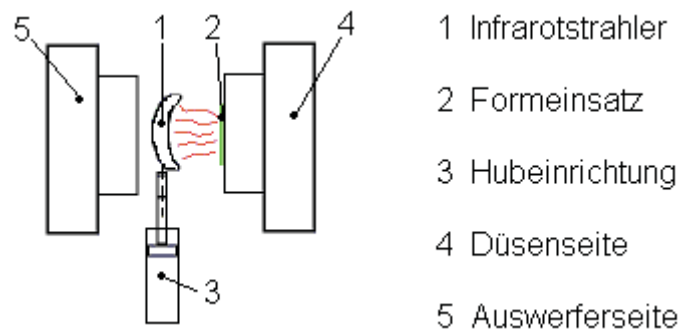
Ferner kann man die **Erwärmung eines elektrischen Leiters in einem elektromagnetischen Wechselfeld** nutzen. Dieses Wechselfeld wird von einem von hochfrequentem Wechselstrom durchflossenen externen **Induktor** aufgebaut. Dieses Feld induziert im Leiter in einer dünnen Oberflächenschicht elektrische Ströme. Die Verlustleistung dieser Ströme, verursacht durch den ohmschen Widerstand, setzt sich in Wärme um und beheizt so das Werkzeug. Da sich der Induktor auch erwärmt, muss dieser gekühlt werden (Bild 5), [3, 25].



*Bild 5: Variotherme Werkzeugtemperierung durch den Einsatz eines externen Induktors [3, 25].*

**Variotherme Werkzeugtemperierung mittels Wärmestrahlung** erfolgt durch Bestrahlung der zu erwärmenden Fläche mit elektromagnetischen Wellen im Infrarotbereich. Meist wird ein Infrarot-Strahler in das Werkzeug eingefahren, welcher danach die Oberfläche bestrahlt und damit aufheizt (Bild 6). Für die Aufheizrate und -dauer sind dabei das Absorptionsverhalten des verwendeten Werkzeuges und die Strahlungsintensitätsverteilung des verwendeten Infrarot-Strahlers entscheidend.

Das Absorptionsverhalten kann durch Beschichtung der Werkzeugoberfläche beeinflusst werden. Die Strahlungsintensitätsverteilung des Infrarotstrahlers hängt von der Temperatur des Strahlungskopfes und der räumlichen Anordnung zur aufzuheizenden Kavitätsoberfläche ab. Die Grenzen hierbei sind die Leistung des Infrarotstrahlers und die Temperaturbeständigkeit der für den Strahler verwendeten Materialien [10].



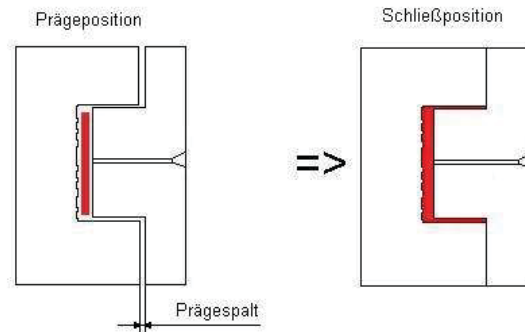
*Bild 6: Variotherme Werkzeugtemperierung mittels Infrarotstrahlung [9].*

Bei der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten IR-variothermen Werkzeugtemperierung wird lediglich ein während der Aufheizphase abgehobener Formeinsatz aufgeheizt. Beim Schließvorgang treten große Temperaturverluste an der Rückseite dieses Formeinsatzes auf, da der Formeinsatz an die deutlich kältere Werkzeugwand gedrückt wird. Durch den Wärmeleitwiderstand des Formeinsatzes ergibt sich eine zeitverzögerte Abkühlung der Formeinsatzoberfläche, d.h. in einem kurzen Zeitfenster wird die für eine sehr gute Abformung erforderliche, hohe Formeinsatzoberflächentemperatur gewährleistet. Diese sinkt jedoch rapide mit einer Kühlrate von bis zu ca. 20 K/s ab. Durch eine geringere Werkzeugtemperatur wird ein größerer Temperaturgradient während der Kühlphase erreicht und somit eine schnelle, zykluszeitreduzierende Formteilkühlung ermöglicht. Das Zeitfenster, während dessen die Temperatur des Formeinsatzes hoch genug ist, kann durch Überhitzen des Formeinsatzes vergrößert werden [20].

### 2.1.3 Spritzprägen

Das Spritzprägeverfahren als Sonderverfahren mit mehreren Verfahrensvarianten ist dem Spritzgießen ähnlich, allerdings ist die Form beim Spritzprägen mit der beweglichen Werkzeughälfte während des Einspritzens noch nicht ganz geschlossen, sondern hat noch einen kurzen Weg, den so genannten Prägehub, bis

zum vollständigen Schließen zurückzulegen. Erst nach dem Einspritzen einer definierten Menge von Schmelze wird die Form, die als Tauchkantenwerkzeug ausgeführt ist, komplett geschlossen. Die in der Kavitätssmitte gehaltene Schmelze wird durch die Schließbewegung sehr rasch bis in die Randgebiete der Kavität gedrängt (Bild 7).



*Bild 7: Werkzeugbewegung beim Spritzprägen.*

Durch den geringeren Druckverlust entlang des Fließweges und die sehr kurze Füllzeit kann eine höhere Abformgüte von Mikrostrukturen erreicht werden. Danach wird das Werkzeug geöffnet und das Formteil ausgeworfen. Diese Variante des Spritzgießens ermöglicht die Herstellung von Produkten mit hoher Maß- und Formgenauigkeit, geringeren Eigenspannungen sowie höherer Planizität bei kürzeren Zykluszeiten als beim gewöhnlichen Spritzgießen. Mit diesem Verfahren wird bei der Produktion von optischen Discs die vorgegebene Qualitätsschranke erreicht [29].

#### **2.1.4 Heißprägen**

Beim Heißprägen wird ein fester, plattenförmiger Kunststoffrohling auf eine evakuierte Form gelegt und von einer beheizten Platte auf diese gepresst. Durch die übertragene Wärme schmilzt der Rohling auf. Die Formteilgeometrie sowie die Oberflächenstruktur werden mit Hilfe des Prägedruckes abgebildet. Nach dem Abkühlen wird die Platte entfernt und das fertige Bauteil entnommen (Bild 8). Beim Heißprägen wird die höchste Abformgüte erreicht.

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen sowie die großen, zu temperierenden Werkzeugmassen ergibt sich beim Heißprägen die längste Zykluszeit aller hier angeführten Verfahren.

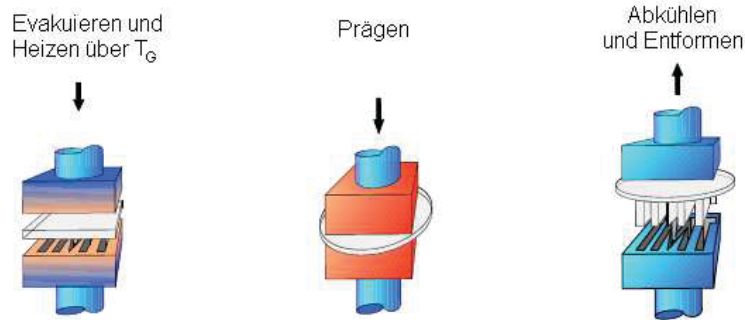


Bild 8: Prozessablauf des Heißprägens [29].

## 2.2 Abformungsmechanismen und Abformgüte

Damit die Funktion eines optischen Trägermediums gewährleistet ist, muss die Oberfläche bestimmte Eigenschaften erfüllen. Dazu müssen die Mikro- oder Nanostrukturen in Tiefen- und in lateraler Richtung deutlich genug ausgeprägt sein, um von einem Laserstrahl abgetastet und von einem Detektor erkannt werden zu können. Für Mikrofluidikanwendungen gilt, dass die Elemente entsprechend genau abgeformt werden müssen, damit die Funktion erfüllt wird. Bei der Verarbeitung muss demnach die Formnestoberfläche möglichst genau abgeformt werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn sich der Kunststoff im Moment der Abformung noch in der fließfähigen Phase befindet. Während des Einspritzens bildet sich in den Randbereichen eine erstarrte Randschicht an der kalten Werkzeugwand. Die Dicke dieser Schicht steigt mit der Zeit. Wenn die Schmelzefließfront über das Sackloch geströmt ist, steigt über diesem der örtliche Schmelzedruck. Dadurch wird die nachkommende Kunststoffschmelze in die Teilkavität gepresst. Sobald die erstarrte Randschicht dick genug ist, um den Hohlraum zu verschließen, findet kein Schmelzefluss von hinten mehr in die Mikrokavität statt (Bild 9). Parameter wie die Schmelztemperatur, die Werkzeugtemperatur und das lokale Schmelzedruckniveau spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Höhere Werkzeugtemperatur ergibt zwar durch langsamere Randschichtbildung eine bessere Abformqualität, jedoch steigt die Kühlzeit, die indirekt proportional zur Wirtschaftlichkeit ist, wonach möglichst viele Einheiten in einem definierten Zeitraum hergestellt werden sollen.



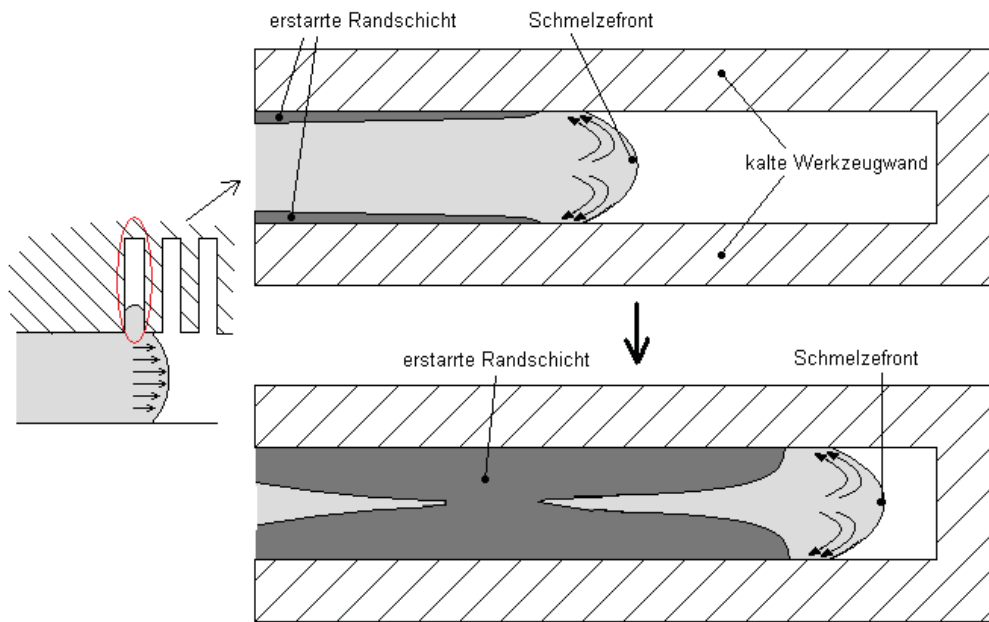


Bild 9: Füllung eines Segmentes einer strukturierten Oberfläche [28].

Zur Bestimmung der Abformgüte wird das Verhältnis zwischen maximal erreichbarer Abformung und tatsächlich erreichter Abformung bestimmt. Der Begriff „Abformgüte“ ist in diesem Zusammenhang jedoch nicht immer gleich definiert. Im Folgenden werden einige Definitionen kurz erläutert:

Die einfachste Beurteilungsmethode besteht aus der subjektiven Bewertung der Abformung an Hand von Bildern in mehreren Stufen von sehr guter bis schlechter Abformung. Die dafür benötigten Bilder werden mit unterschiedlichen bildgebenden Geräten ermittelt, wie beispielsweise Licht- oder Elektronenmikroskopen, Rasterkraftmikroskopen (auch Atomic Force Microscope), Weißlichtinterferometern oder Profilometern [21].

Nach der Methode der Höhenreplikation von Shen [23] wird die tatsächlich erreichte Höhe eines Elementes am Formteil mit der tatsächlichen Höhe eines Strukturelementes im Werkzeug ins Verhältnis gesetzt (Glg (1), Bild 10). Die Abformung  $\delta$  wird dabei als Verhältnis von abgeformter Höhe eines Strukturelementes  $h_1$  und der Strukturhöhe  $h_2$  am Formeinsatz berechnet.

$$\delta = \frac{h_1}{h_2} * 100\% \quad (1)$$

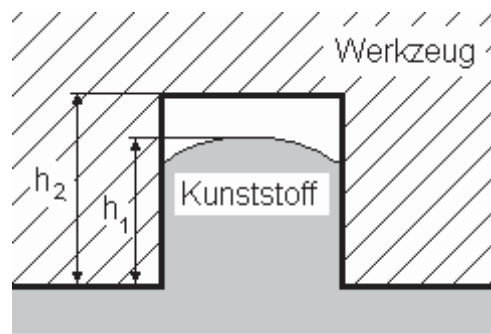


Bild 10: Höhenreplikation nach Shen [23].

In einem anderen Ansatz wird die Abformgüte über die abgeformte Querschnittsfläche oder das abgeformte Strukturvolumen definiert (Bild 11) [2].

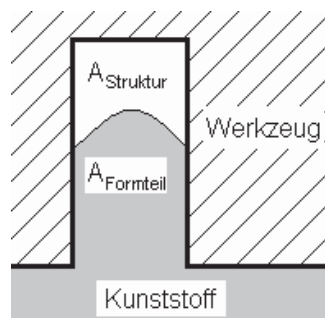


Bild 11: Abformungsbestimmung mittels Querschnittsflächenvergleich [2].

Diese Fläche wird zur tatsächlichen Fläche des Strukturelementes ins Verhältnis gesetzt. Für diese Art der Berechnung benötigt man Information über die tatsächlichen lokalen Abmessungen der untersuchten Oberflächenstrukturen (Topographie), welche je nach Strukturgröße mittels Rasterkraftmikroskopen (AFM), Weißlichtinterferometern oder Profilometern ermitteln werden können. Die Flächenquerschnitte kann man durch Linienmessungen mit den oben genannten Messgeräten oder durch einen Mikrotomschnitt und anschließender Vermessung unter einem Lichtmikroskop bestimmen. Für die Auswertung der Daten kann beispielsweise das Verfahren „AIXComp“, entwickelt am IKV Aachen, verwendet werden [7].

Nach der Methode von Yokoi und Han [10] setzt man die benetzte Fläche eines Strukturelementes ins Verhältnis zur gesamten Oberfläche des Strukturelementes (Glg (2)).

$$\text{Abformung} = \frac{D_K}{D_W} \qquad \text{Füllverhältnis} = \frac{\overline{ab} + \overline{de}}{\overline{ac} + \overline{ce}} \quad (2)$$

Dabei werden der Anteil der benetzten Fläche und das Füllverhältnis bestimmt. Der Nachteil dieser Methode liegt in der schwierigen Bestimmung der für die Berechnung erforderlichen Punkte a bis e (Bild 12).

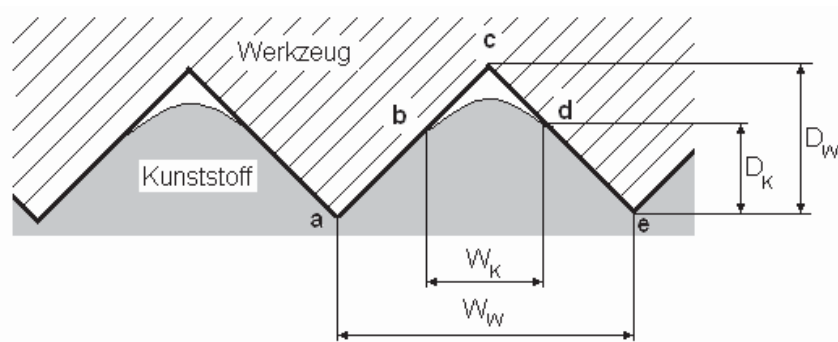


Bild 12: Definition der Abformung nach Yokoi und Han [10].

### 2.3 Entformung

Unter Entformung versteht man die Entnahme des gespritzten Formteils nach dem Erstarren und dem Abkühlen bis auf Entformungstemperatur aus dem Werkzeug. Der makroskopische Schrumpfung beim Abkühlen und das Wandhaften des Formteiles an der Formwand verursachen beim Erstarren Spannungen im Formteil.

Diese werden beim Öffnen des Werkzeugs auf Grund der Bewegung größer, bis die Haltekraft zwischen Formteil und Werkzeugoberfläche überwunden ist. Dabei gibt es eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Haltekraft (Bild 13). Die Entformungskraft verursacht im Formteil Spannungen, welche zu Verformung oder Zerstörung des Formteils oder zum Abreißen einzelner Teile des Formteils führen können. Dies stellt vor allem bei mikrostrukturierten Oberflächen ein Problem dar, da das Verhältnis von Oberfläche zu Querschnittsfläche, und damit Haltekraft zu mechanischer Belastbarkeit, mit zunehmendem Aspektverhältnis steigt [22].

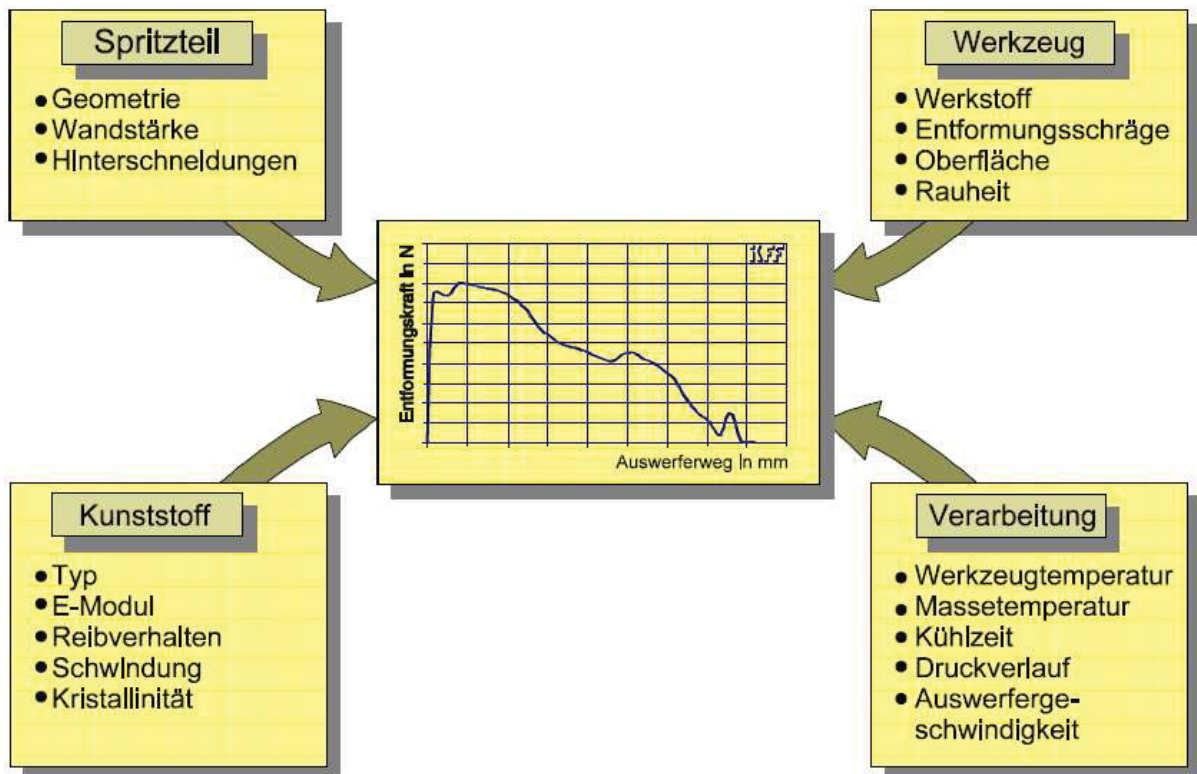


Bild 13: Einflussfaktoren auf die Entformungskraft während der Entformung [24].

Um die auftretenden Kräfte bei der Entformung zu verringern, werden an Flächen, die parallel zur Werkzeugöffnungsrichtung sind, so genannte Formschrägen angebracht. Beschichtungen, welche geringere Reibungskoeffizienten zwischen Werkzeugwand und Formteil ergeben, verringern die Haltekräfte und verbessern somit ebenso das Entformungsverhalten. Auch eine Verringerung des Werkzeuginnendruckes kann das Entformen erleichtern. Die erwähnten Maßnahmen stellen einen Teil aller Möglichkeiten dar. Ihnen ist gemeinsam, dass sie die auftretenden Spannungen minimieren und damit das Risiko vermindern, dass das Formteil beschädigt wird.

## 3 Experimentelles

### 3.1 *Verwendete Kunststoffe*

Die verwendeten Kunststoffe für die Abformversuche sind ein Polypropylen vom Typ Dow H734-52 RNA (The Dow Chemical Company, Horgen, Schweiz) und ein Cycloolefinpolymer vom Typ Zeonor 1060R (Zeon Chemicals L.P., Chiyoda-Ku, Tokyo, Japan). Diese Materialien liegen in granularer Form vor.

Die thermischen und rheologischen Materialdaten wurden mit folgenden Messgeräten ermittelt:

- Wärmeleitfähigkeitsmessgerät K-System II (Advanced CAE Technology, Inc., Ithaca, USA) für die Messung der Wärmeleitfähigkeit (Tabelle 1, Bild 14),
- Dynamisches Differenzkalorimeter DSC Maia 200<sup>®</sup> (Netzsch-Gerätebau GmbH, Selb, Deutschland) für die Messung der spezifischen Wärmekapazität (Bild 15 und Bild 16) sowie
- Hochdruckkapillarrheometer Rheograph 2002 (Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, Buchen, Deutschland) für die Messung der Viskositätskurven  
(

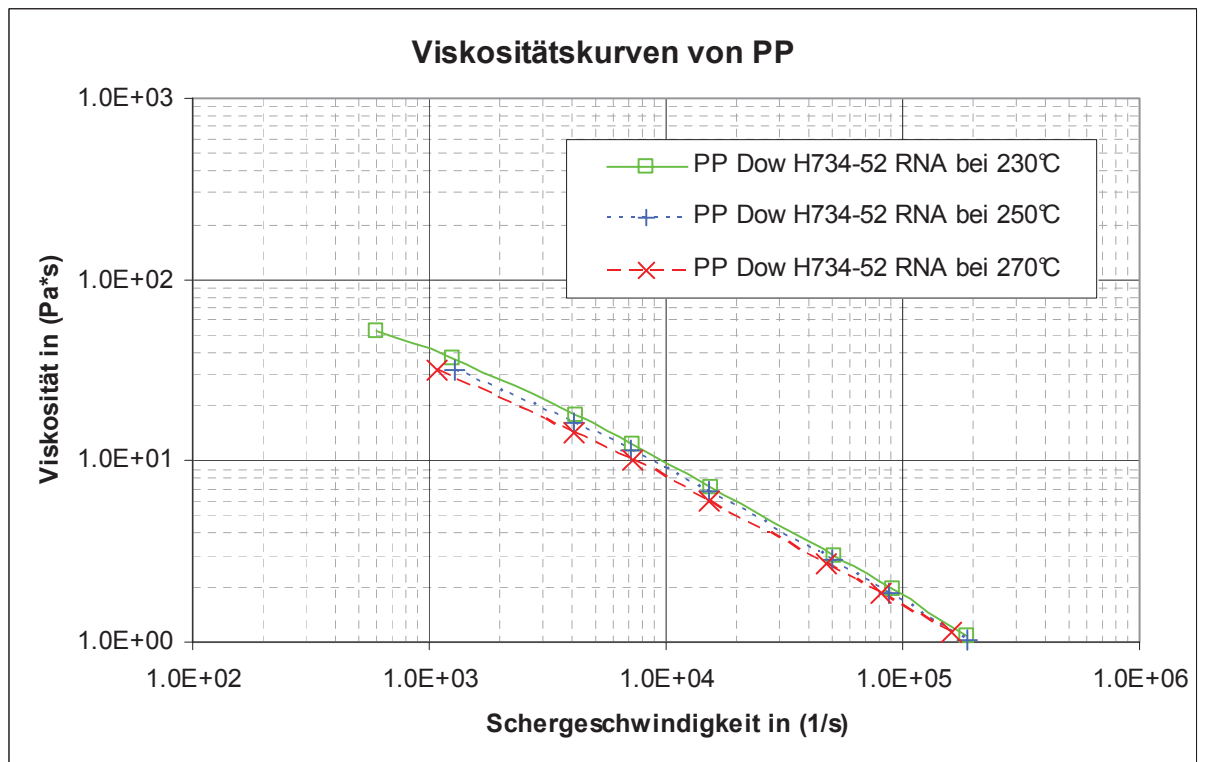


Bild 17 und Bild 18).

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von COP Zeonor 1060R und PP H734-52 RNA bei unterschiedlichen Temperaturen.

COP		PP	
Temperatur (°C)	$\lambda$ (W/m*K)	Temperatur (°C)	$\lambda$ (W/m*K)
28	0,171	21	0,194
50	0,180	59	0,196
70	0,188	101	0,195
111	0,202	136	0,196
149	0,213	175	0,169
185	0,218	201	0,174
232	0,222	228	0,174
274	0,223	270	0,174

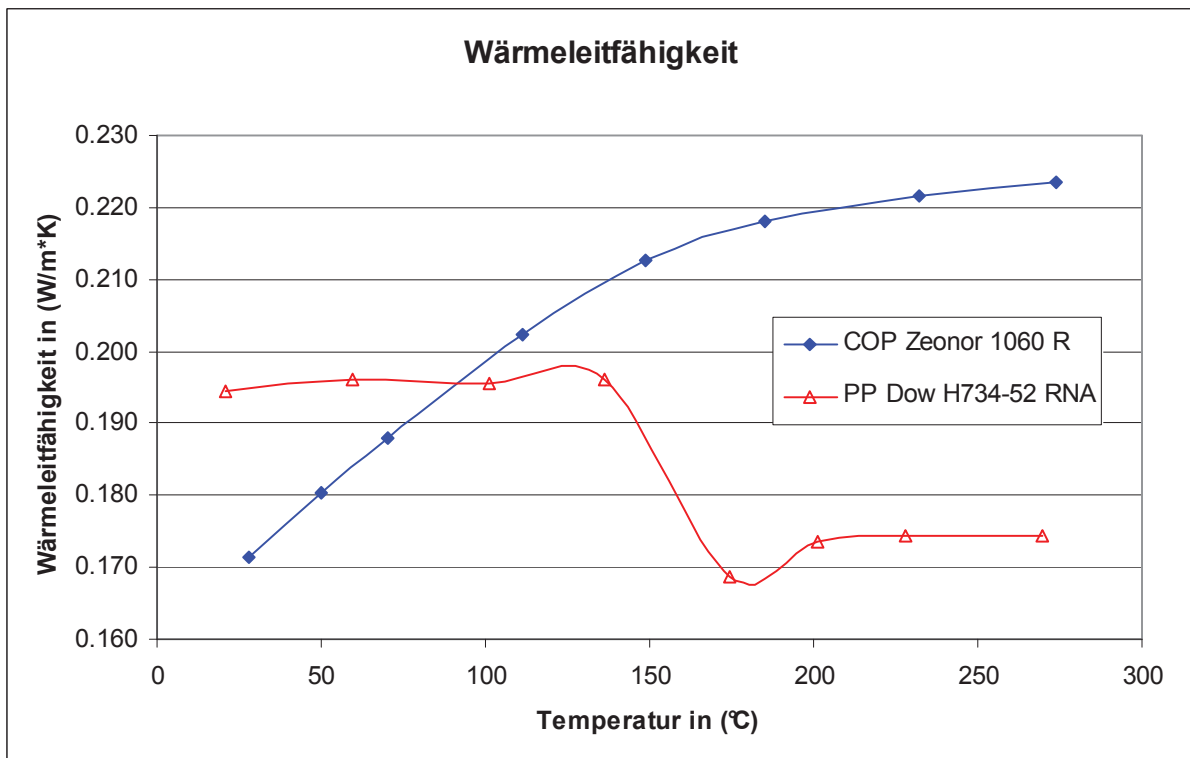


Bild 14: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von COP Zeonor 1060R und PP H734-52 RNA

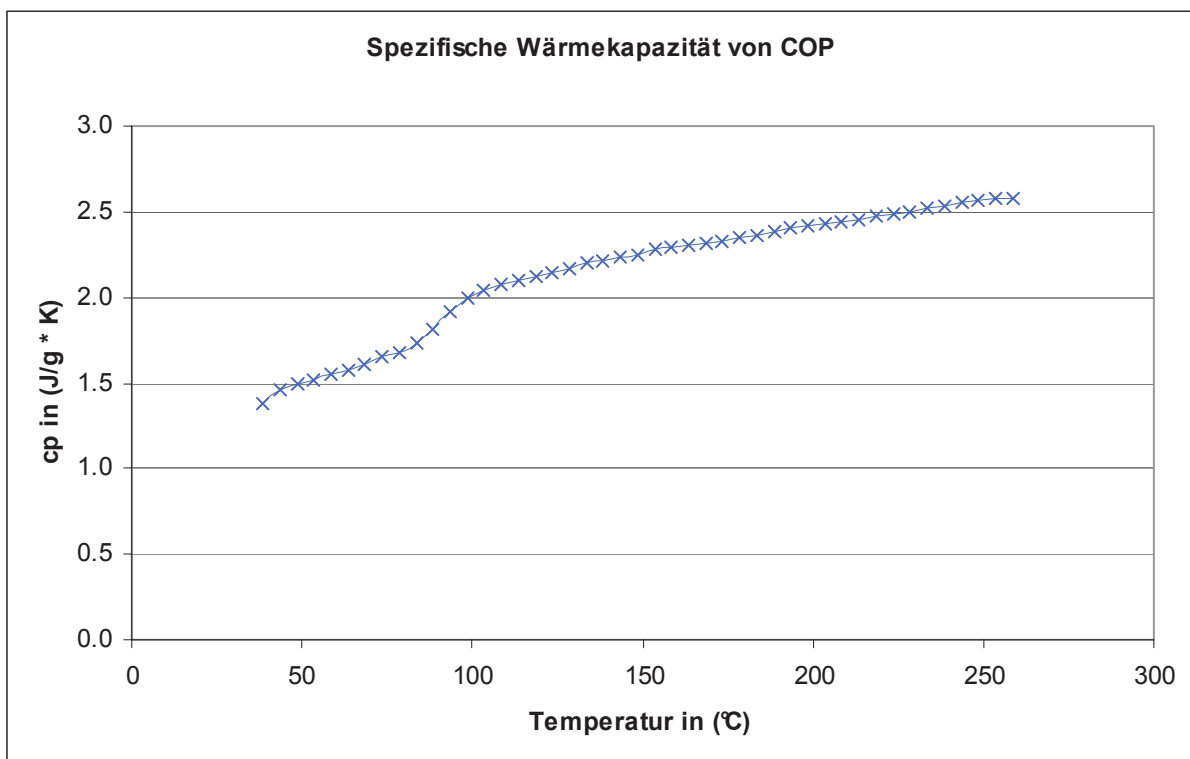


Bild 15: Verlauf der Spezifischen Wärmekapazität von COP beim Abkühlen.

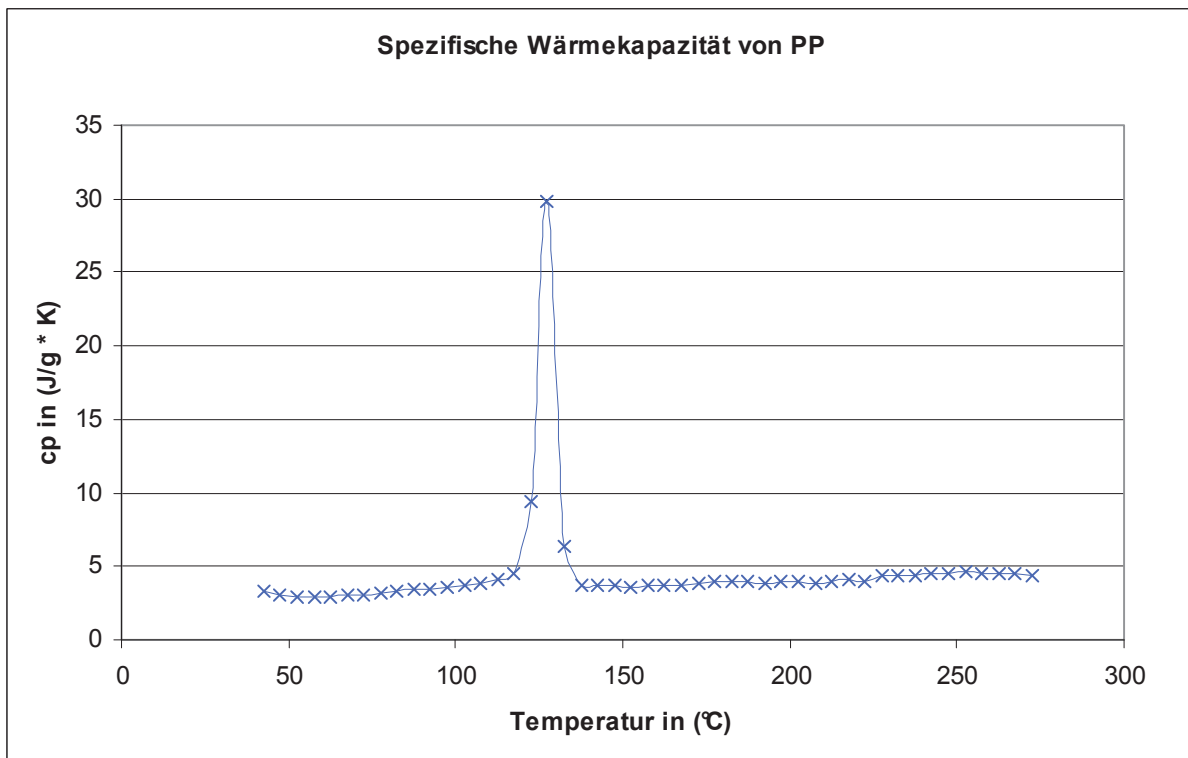


Bild 16: Verlauf der Spezifischen Wärmekapazität von PP beim Abkühlen.

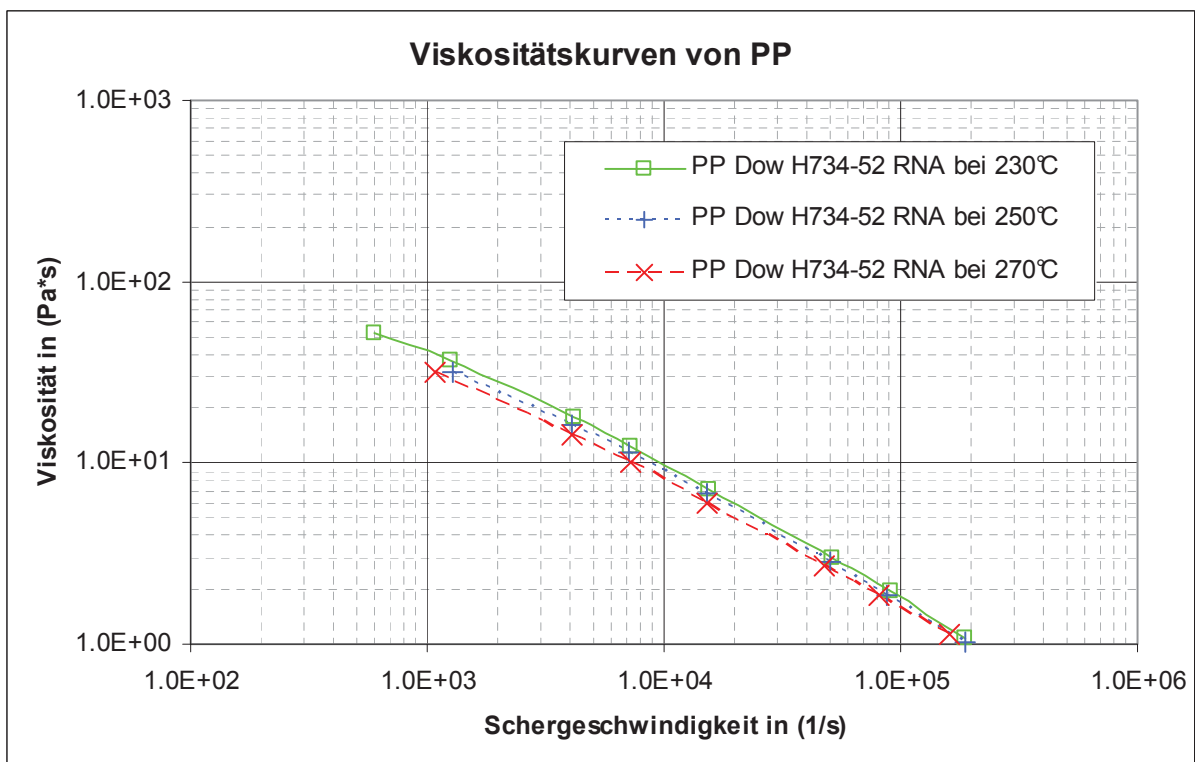


Bild 17: Viskositätskurven von PP Dow H734-52 RNA.



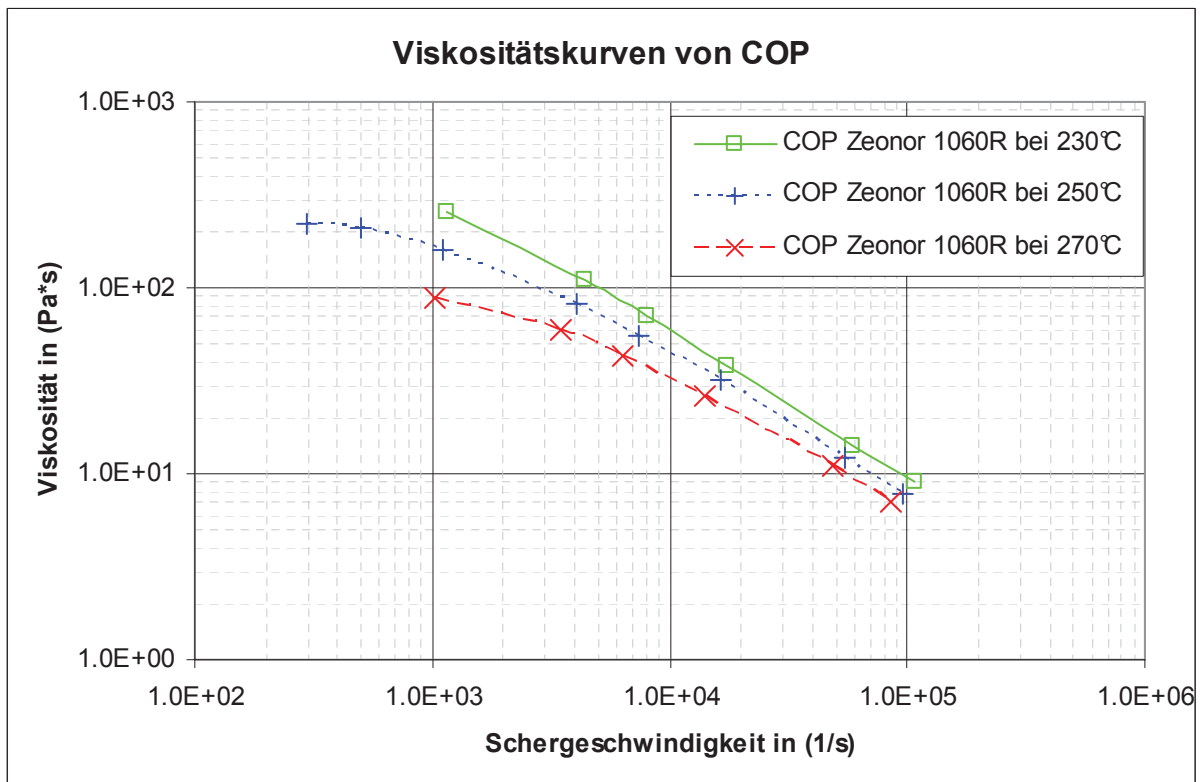
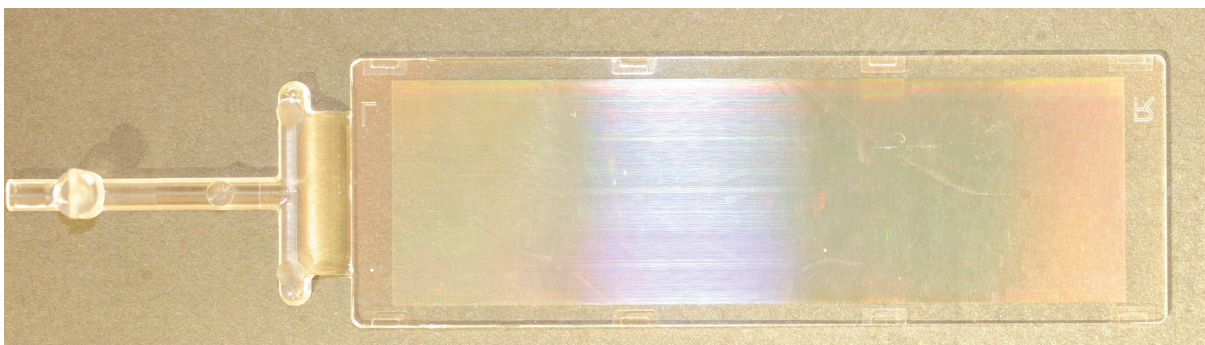


Bild 18: Viskositätskurven von COP Zeonor 1060R.

### 3.2 Probekörper und Mikrostrukturen

Die Probekörper sind 75 x 25 x 1,2 mm groß. Die Füllung der Formteile erfolgt über einen Filmanguss mit einer Breite B von 17 mm und einer Höhe von 0,4 mm (Bild 19). Die zu untersuchenden Mikrostrukturen, eine Serie von V-Kerben, sind auf einem auswechselbaren Formeinsatz aufgebracht. Die V-Kerben sind durchgängig und regelmäßig über den inneren Bereich des Formeinsatzes in 2 Bereiche mit unterschiedlicher Tiefe der V-Kerben bei einem Öffnungswinkel von 90° verteilt. Die Kerben im angussnahen Bereich sind 740 nm hoch, jene im angussfernen Bereich 925 nm. Der Überlappungsbereich zwischen den beiden Bereichen ist weniger als 10 µm lang. Die Kerben liegen quer zur Strömungsrichtung (Bild 20). Der Formeinsatz ist aus einem oberflächenmodifizierten Formenstahl (Böhler M310) gefertigt. Die Messungen am Rasterkraftmikroskop (Veeco Dimension 3100, Fa. Veeco Instruments, Plainview, USA) zeigen regelmäßige Strukturen, jedoch teilweise auch Schwankungen in der Tiefe der Kerben (Bild 21). Elektronenmikroskopaufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop Hitachi S-4000® (Hitachi, Ltd., Chiyoda-ku, Tokyo, Japan) (Bild 22 und Bild 23) zeigen an den Spitzen überhängende Grate und Ausbrüche an den Flanken der V-Kerben am Formeinsatz. Die überhängenden Grate wirken wie Hinterschnitte und können die abgeformten Strukturen im Kerbengrund beschädigen.



*Bild 19: Probekörper mit strukturierter Oberfläche aus PP (Filmanguss mit Breite 17 mm und Höhe 0,4 mm).*

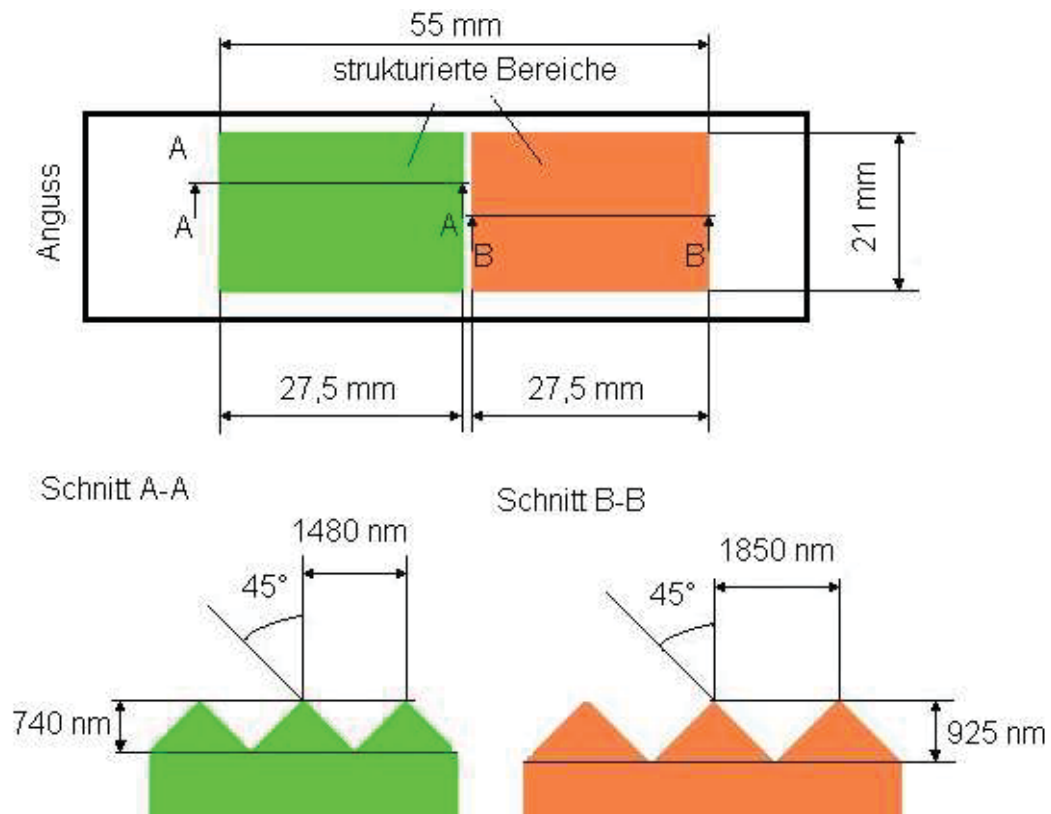


Bild 20: Abmessungen des Formeinsatzes mit der V-Kerbenstruktur.

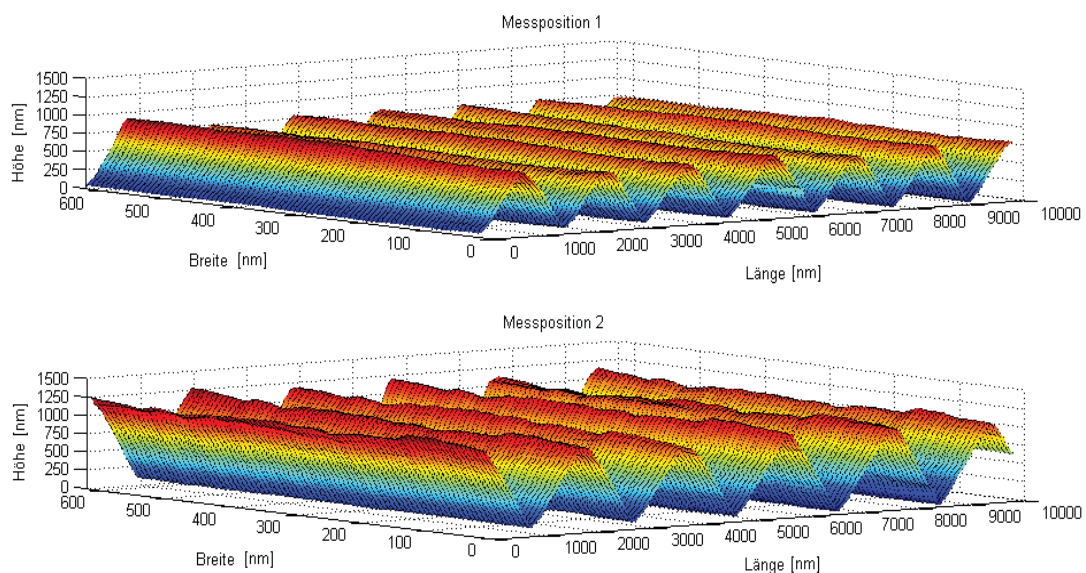
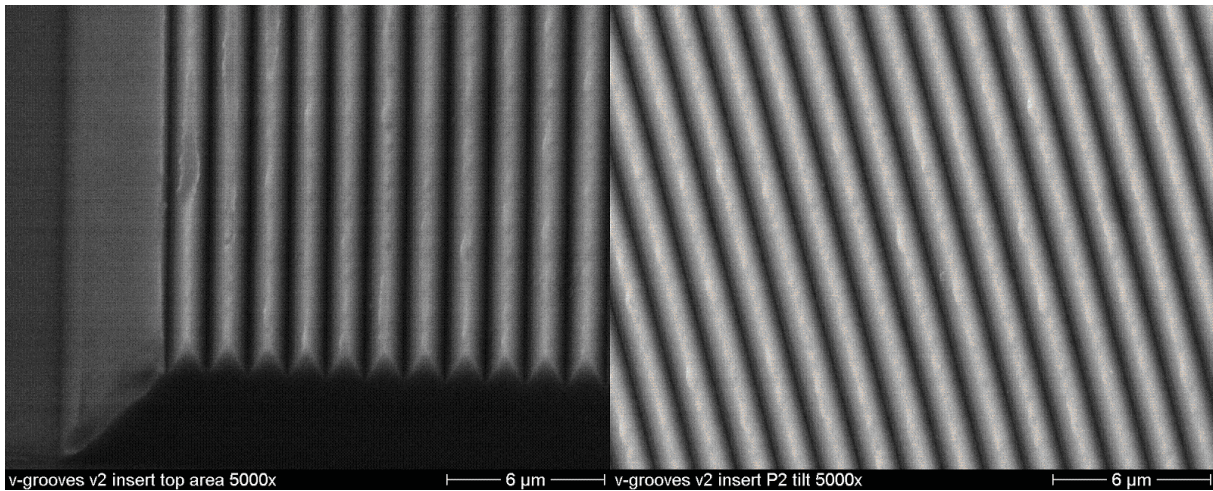
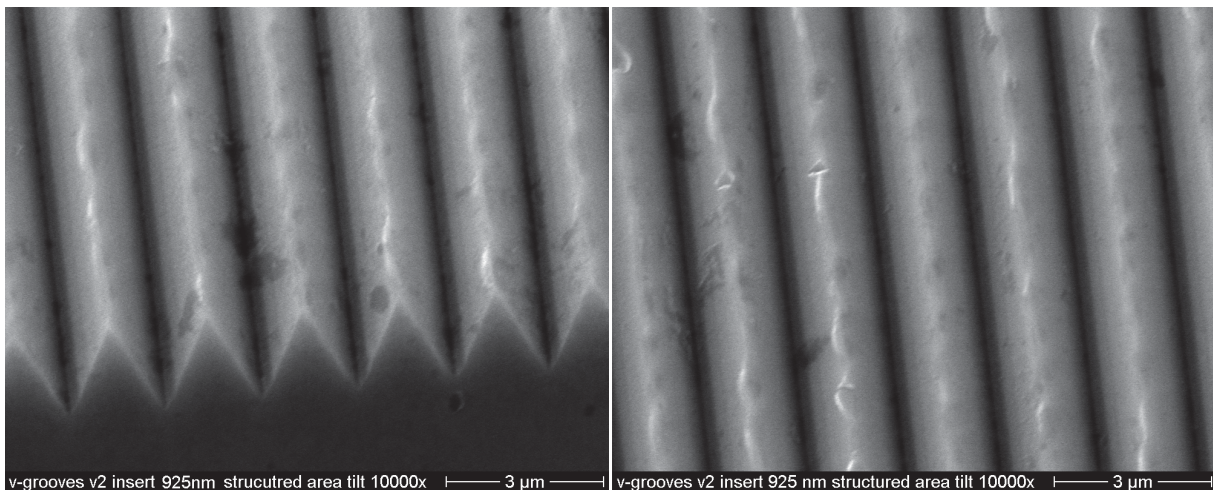


Bild 21: Formeinsatz mit V-Kerben, aus AFM Messungen generierte perspektivische Ansicht; angussnahe Strukturierung (oben), angussferne Strukturierung (unten).



*Bild 22: Formeinsatz mit V-Kerben, angussnahe Kante und strukturierter Bereich, 5.000-fache Vergrößerung.*



*Bild 23: Formeinsatz mit V-Kerben, Randbereich und angussferner strukturierter Bereich, 10.000-fache Vergrößerung.*

### **3.3 Verwendete Maschinen und Geräte**

#### **3.3.1 Spritzgießmaschine**

Für die Versuche wird eine vollelektrische Spritzgießmaschine „Engel e-motion 100/200“ der Fa. Engel Austria GmbH (Schwertberg, Österreich) verwendet (Bild 24). Der Schneckendurchmesser in der Plastifiziereinheit beträgt 18 mm, das Verhältnis von Länge zu Durchmesser beträgt 22,5. Der Zylinder der Plastifiziereinheit ist in 4 Bereiche gegliedert, welche mit keramischen Heizelementen einzeln geregelt temperiert werden können.



*Bild 24: Spritzgießmaschine "Engel e-motion 200/100" [19].*

Die Spritzgießmaschine wird mit der von Engel entwickelten Steuerung „CC 200“ gesteuert. Zusätzlich zum Programmablauf für das konventionelle Spritzgießen sind noch die Programmabläufe für den Spritzprägeprozess und für das Spritzgießen mit variothermer Prozessführung mittels Infrarotstrahler und Umschalteneinheiten für Temperiermedien integriert. Mehrere installierte Karten zur Aufnahme und Verarbeitung der Daten von integrierten Sensoren ermöglichen den Einsatz von bis zu 32 Sensoren.

### **3.3.2 Temperiertechnik und Werkzeuge**

Das für die Versuche verwendete Werkzeug SonyMold04 wurde von Zumtobel-Werkzeugbau GmbH (Dornbirn, Österreich) gefertigt. Dieses Werkzeug ist durch mehrere Sonderausstattungen vielseitig einsetzbar. Es ist mit 2 Kavitäten ausgestattet, wobei für die Versuche nur die untere Kavität mit dem V-Kerben-Formeinsatz genutzt wird. Zudem ist ein Heißkanalsystem mit Nadelverschlussdüse in das Werkzeug integriert.

Die auswerferseitige Formplatte ist als federnd gelagerte Prägeplatte ausgeführt. Beim Schließen des Werkzeugs werden über 4 Zentrierzapfen die auswerferseitige und die düsenseitige Formplatte axial zueinander ausgerichtet und in der Trennebene auf Kontakt gebracht. Die Vorspannung des Werkzeugs wird durch mehrere Federpakete hinter der Prägeplatte aufrechterhalten. Der Prägehub bleibt durch diese Vorspannung erhalten.

Erst wenn die Schnecke einen definierten parametrierbaren Punkt beim Einspritzen passiert hat, wird der Prägehub mit dem vorher eingestellten Prägegeschwindigkeitsverlauf bzw. Prägekraftverlauf überwunden.

Durch den modularen Aufbau des Werkzeugs können auch unterschiedliche Angussysteme realisiert werden. Zwischen dem Heißkanal und der Kavität ist ein austauschbarer Metallblock eingebaut. Unterschiedliche Angussarten können so je nach Bedarf vergleichsweise schnell realisiert werden. Nicht benötigte Kavitäten können auch geschlossen werden, indem ein Blindeinsatz an Stelle eines Angusses eingebaut wird. Für die Versuche wird ein Filmanguss mit den Angussabmessungen 17 x 0.4 mm verwendet.

Die Kavität kann evakuiert werden, um die Abformung zu verbessern. Eingeschlossene Luft wird sonst in Sacklöchern oder Kanälen eingeschlossen und kann so zu schlechterer Abformung, Lufteinschlüssen und Diesel-Effekten führen. Die Entlüftung erfolgt über einen Vakuumschlauch, welcher an eine externe Luftabsaugung (Hausvakuum) angeschlossen ist. Das erreichte Vakuum wird von der Maschinensteuerung überwacht, welche den Zyklus abbricht, falls ein Schwellwert überschritten wird.

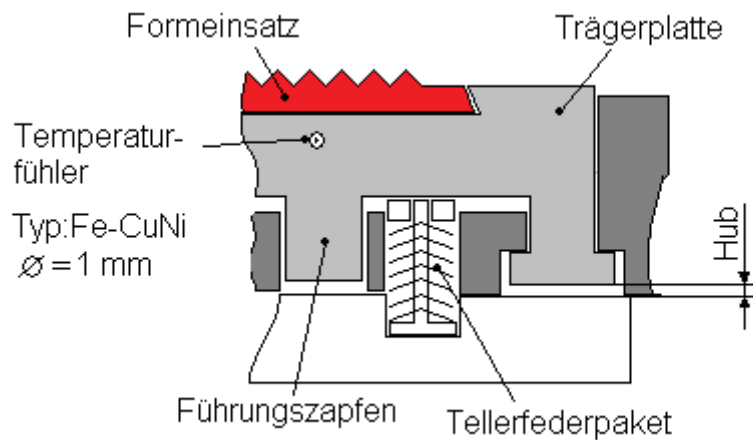
Die für die Versuche genutzte Kavität ist mit einem Forminnendrucksensor im Angusskanal und einem Infrarot-Temperatursensor in der Kavität ausgestattet.

Der Formeinsatz ist auf einem abhebenden Träger montiert. Dieser ermöglicht während der Aufheizphase mittels IR-Strahlung eine thermische Entkopplung des Einsatzes vom Rest des Werkzeuges und verringert die zu erwärmende Masse erheblich von 350 kg auf 0,5 kg. Um die Temperatur des Formeinsatzes möglichst oberflächennah messen zu können, ist in die abhebende Trägerplatte ein Temperaturfühler integriert.

Wenn das Werkzeug geöffnet ist, wird die Trägerplatte mit dem Formeinsatz von mehreren Federpaketen vom dahinter liegenden Kühlblock durch die Federkraft abgehoben (Bild 25). Der daraus resultierende Luftspalt zwischen dem Kühlblock und der Trägerplatte wirkt thermisch isolierend. Lediglich an den Kontaktflächen der Führungszapfen findet ein Wärmestrom zum Kühlblock hin statt.

Beim Schließen des Werkzeuges wird die Vorspannkraft des Federpaketes durch die Schließkraft überwunden. Dadurch wird der Luftspalt zwischen der Trägerplatte und dem Kühlblock geschlossen. Über die daraus entstehende Kontaktfläche wird die

Wärme der Trägerplatte und der heißen Kunststoffschmelze in den hinteren Werkzeugbereich abgeleitet.



*Bild 25: Abhebende Trägerplatte mit Formeinsatz im abgehobenen Zustand.*

Damit beim Aufheizen möglichst wenig der Strahlungsenergie des Infrarotstrahlers in die Umgebung abgestrahlt wird, muss der Strahler möglichst nah an der zu beheizenden Oberfläche sein. Die Führungssäulen und die Zentrierzapfen sind speziell für derartige Anwendungen außerhalb des Einsatzbereiches des Strahlers angebracht. Zudem dürfen sich keine temperaturempfindlichen Bestandteile, wie beispielsweise Dichtungsringe, innerhalb des bestrahlten Bereiches befinden.

### 3.3.2.1 Wassertemperiertes Spritzgießwerkzeug

Das wassertemperte Spritzgießwerkzeug kann an der Düsen- und an der Auswerferseite variabel temperiert werden. Als Temperiermedium wird Wasser verwendet. Eine Umschalteneinheit (Variotherm HB-VT 160-20, Grossenbacher Apparatebau AG, St. Gallen, Schweiz) leitet jeweils eines von zwei unterschiedlich temperierten Medien in die Temperierkanäle auf einer Seite des Werkzeugs. Jede Umschalteneinheit wird von jeweils zwei Temperiergeräten (HB – 140 U1, Grossenbacher Apparatebau AG, St. Gallen, Schweiz) mit den Medien versorgt. Ein pneumatisch betätigtes Ventil schaltet zwischen den Kreisläufen um (Bild 26).

Nach Erreichen der in der Steuerung eingestellten Zieltemperatur an einem Messfühler im Werkzeug wird der Spritzgießzyklus mit dem Einspritzen der Schmelze in die Kavität gestartet. Da das gesamte Werkzeug beheizt wird, ist in dieser Anwendung mit sehr großen Zykluszeiten zu rechnen. Vorversuche zeigen,

dass mit dieser Technik Heizraten zwischen 0,05 und 0,1 K/s erreicht werden können.

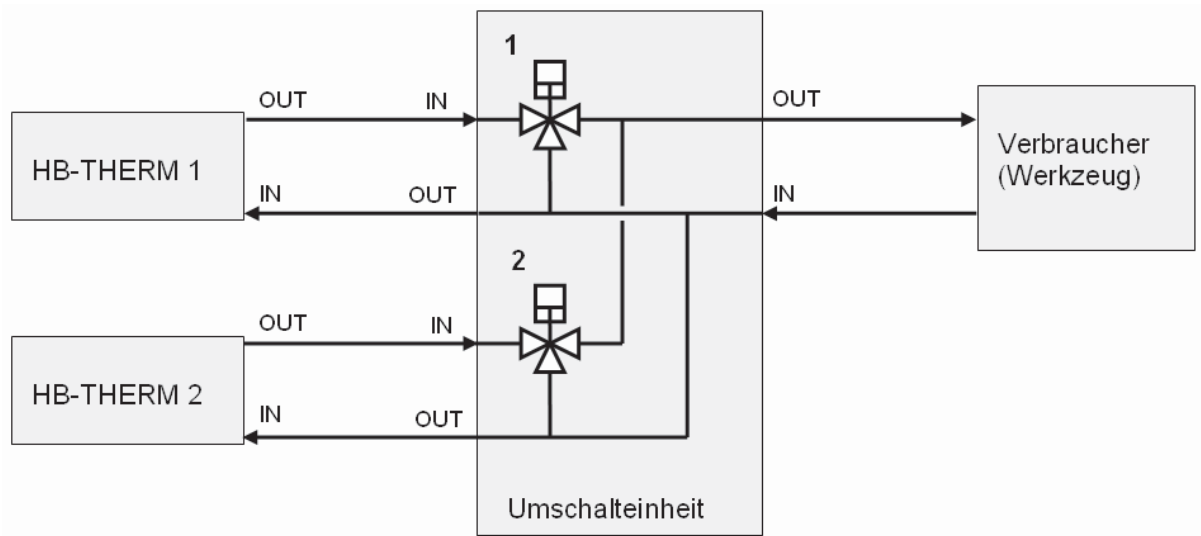


Bild 26: Schematische Darstellung der Umschalteinheit und der Temperiergeräte sowie des Verbrauchers [14].

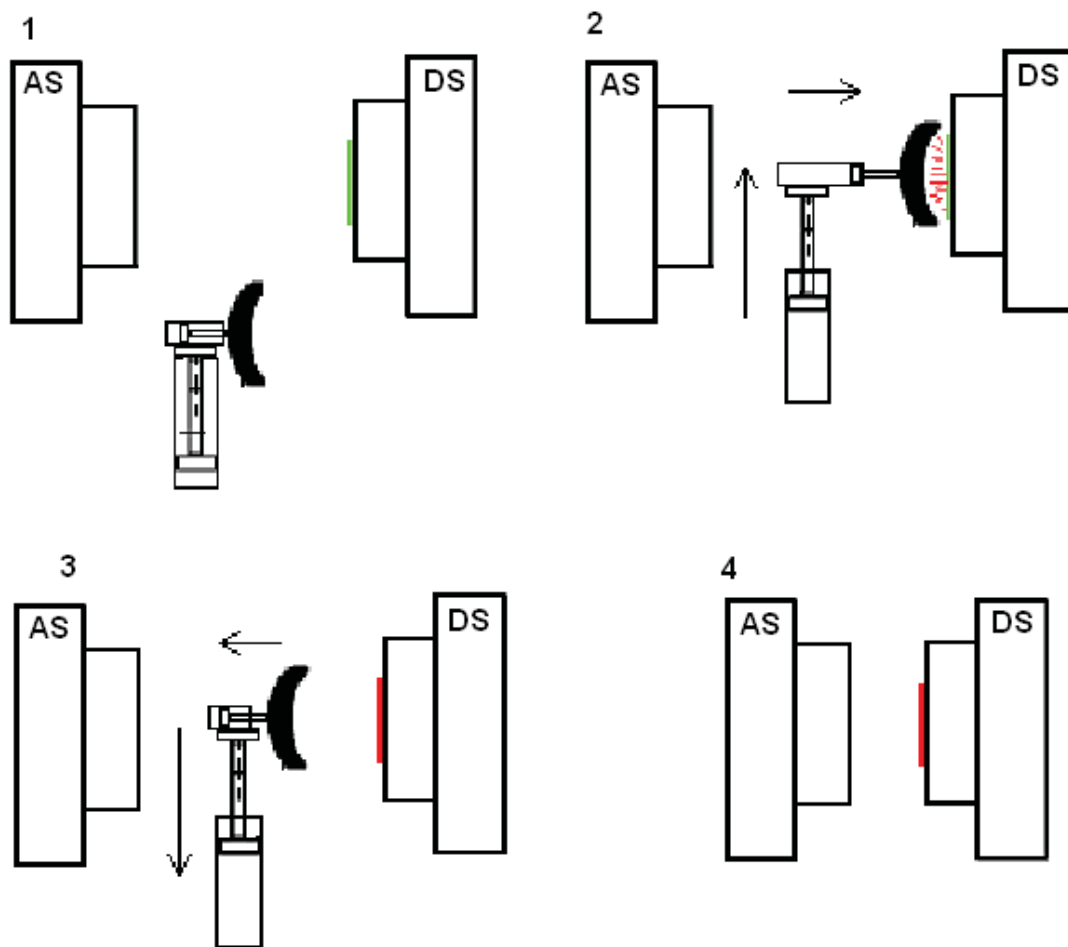
### 3.3.2.2 Infrarot-temperiertes Spritzgießwerkzeug

Bei dem Infrarot-temperierten Spritzgießwerkzeug wird ein Infrarot-Strahler als Energiequelle eingesetzt, der die abhebende Trägerplatte und den Formeinsatz über die Absorption der Strahlungsenergie an der Formeinsatzoberfläche erwärmt. Dazu wird ein kurzwelliger Zwillingsrohr-Infrarot-Strahler aus Quarzglas, Typ 8004 3437 (Fa. Heraeus Noblelight, Kleinostheim, Deutschland) verwendet. Die Heizleistung des Strahlers wird über einen Thyristor-Leistungssteller vom Typ Heratron TG 55 (Fa. Heraeus, Kleinostheim, Deutschland) geregelt. Die maximal erreichbare Strahlungsleistung beträgt 22 kW.

Zum Aufheizen wird der Strahler mit pneumatischen Zylindern in das geöffnete Werkzeug eingefahren und an die Werkzeugoberfläche angenähert. Dadurch wird der Spalt zwischen dem Strahler und der zu beheizenden Oberfläche verringert. Dies verbessert die Energieeinbringung, da die Strahlungsverluste vom Strahler in die Umgebung minimiert werden. Die abgegebene Strahlungsleistung des Strahlers kann an einem Potentiometer am Funktionsgenerator eingestellt werden. Die Heizdauer ist, je nach Einstellung an der Spritzgießmaschine, wahlweise zeit- oder temperaturabhängig. Der in der Trägerplatte integrierte Sensor misst im zweiten Fall die Temperatur, nach der geregelt wird. Nach dem Heizen wird der Infrarot-Strahler aus



dem Werkzeug ausgefahren. Danach startet der Zyklus mit dem Einspritzen der Schmelze in die aufgewärmte Kavität (Bild 27).



*Bild 27: Schematische Darstellung des Heizzyklus des Infrarot-Strahlers:  
1 Einfahren des Strahlers, 2 Annähern und Beheizen, 3 Ausfahren des Strahlers, 4 Werkzeug schließen und Einspritzen.*

Mit dem IR-Strahler konnten in Vorversuchen Heizraten bis zu 3 K/s erreicht werden. Zusätzlich zur reinen Heizzeit ist bei der Zykluszeit bei variothermer Werkzeugtemperierung noch das Ein- und Ausfahren des Strahlers zu berücksichtigen.

### 3.3.3 Parameter und Messtechnik

#### 3.3.3.1 Verarbeitungsparameter

Im Rahmen der Versuche werden Massetemperatur, Einspritzgeschwindigkeit, Nachdruck und Werkzeugtemperatur variiert und deren Einfluss untersucht. Diese Parameter können direkt in der Maschinensteuerung der Spritzgießmaschine

eingestellt werden. Zusätzlich zu diesen Größen werden der Forminnendruck im Anguss, die Temperatur der Kavitätsoberfläche und die Werkzeugtemperatur für jeden Zyklus aufgezeichnet und stichprobenweise untersucht.

Für die Steuerung des Spritzgießprozesses mit variothermer Prozessführung während der Aufheizphase wird die gemessene Temperatur des Sensors in der Trägerplatte herangezogen (vgl. Bild 25, S.24). Das Infrarotwerkzeuginnen-thermometer MTS 408 (FOS Messtechnik GmbH, Schacht-Audorf, Deutschland) misst zusätzlich zum Thermoelement in der abhebbaren Trägerplatte die aktuelle Oberflächentemperatur unmittelbar vor dem Einspritzen und die Temperatur der Randschicht während der Füllphase und der Abkühlphase. Zusätzlich zeichnet ein Forminnendrucksensor im Anguss den aktuellen Druck auf.

### **3.3.3.2 Messdatenerfassung**

Zur Erfassung von nicht einstellbaren Prozessgrößen wie z.B. der Schmelzetemperatur wird eine auf die Anwendung ausgelegte Messkette benötigt. Die für die Abformung relevanten Größen beim Spritzgießen, wie beispielsweise das lokale Druckniveau oder die aktuelle Schmelzetemperatur, können nur durch Sensoren in der Kavität präzise erfasst werden. Die Messsignale werden danach über ein Verbindungskabel zu einem Messverstärker und in weiterer Folge an das in die Steuerung der Spritzgießmaschine integrierte Datenverarbeitungssystem weitergeleitet. Von dort aus können die Daten am Bildschirm angezeigt oder als Textdatei exportiert und mit geeigneten Programmen weiter verarbeitet werden.

Die erreichte Abformung der Mikrostrukturen wird mit einem Rasterkraftmikroskop untersucht. Die damit aufgenommenen Daten können direkt am Gerät dargestellt und ausgewertet werden. Zusätzlich dazu bietet sich die Möglichkeit, die Daten im ASCII-Format zu exportieren und mit anderer Software auszuwerten.

Die Untersuchung des Verzugs erfolgt mit einem Oberflächenprofilometer. Die Messergebnisse werden in diesem Fall von einer eigenen, mit dem Profilometer mitgelieferten, Software weiterverarbeitet.

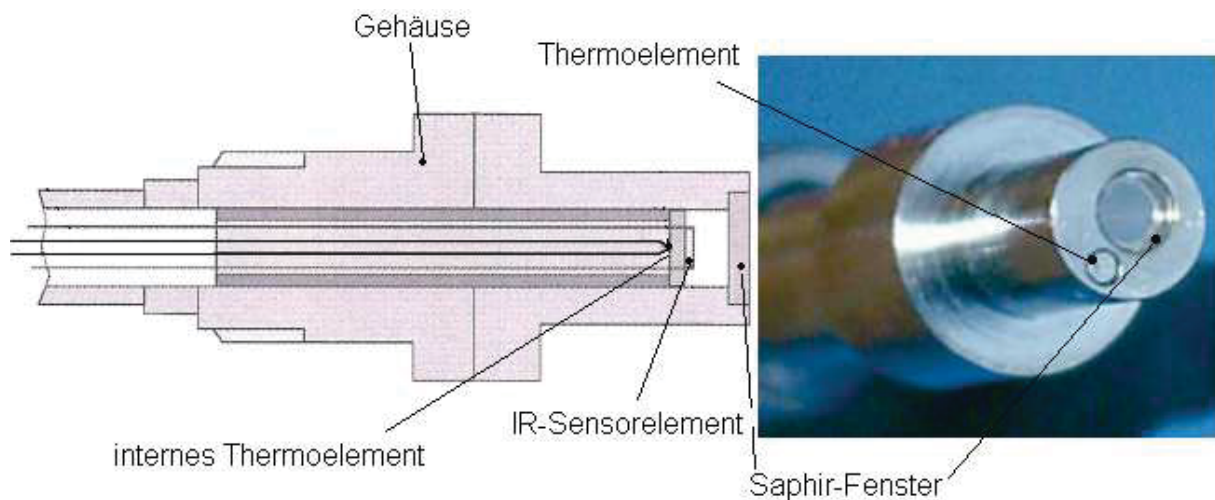
### **3.3.3.3 Messgeräte**

#### **Konventionelle Thermoelemente**

Im Werkzeug befinden sich mehrere konventionelle Thermoelemente vom Typ J (Materialpaarung Fe-CuNi). Diese dienen zur Überwachung der Werkzeugtemperatur in den einzelnen Bereichen. Für die Steuerung der Heizzeit des Infrarot-Strahlers bzw. der Umschaltzeit zwischen heißem und kaltem Medium wird das Thermoelement in der abhebbaren Trägerplatte verwendet. Alle anderen Thermoelemente im Werkzeug werden nur zur Überwachung, jedoch nicht zur Regelung, verwendet.

#### **Infrarot-Werkzeuginnenthermometer**

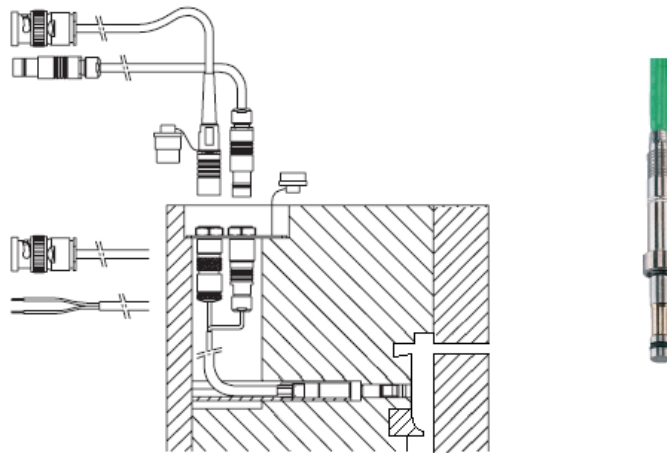
In der Kavität befindet sich nach dem Anguss ein Infrarot-Werkzeuginnenthermometer vom Typ MTS 408 von Fa. FOS Messtechnik GmbH (Schacht-Audorf, Deutschland). An der Frontseite des Sensors befindet sich ein temperaturfestes, für Strahlung bis zu einer Wellenlänge von etwa  $6,5 \mu\text{m}$  durchlässiges Fenster aus Saphir. Direkt hinter dem Fenster befindet sich das Infrarot-Sensorelement, welches die Strahlungsleistung in diesem Wellenlängen-Bereich absorbiert und in eine dazu proportionale Thermospannung umwandelt (Bild 28). Dieses Signal kann direkt weiter verarbeitet werden. Da es hier, im Gegensatz zu konventionellen Thermoelementen keine Massen gibt, die mit auf die zu messende Temperatur gebracht werden müssen, hat das Infrarot-Thermoelement sehr geringe Ansprechzeiten bis zu 15 ms. Ein internes Thermoelement misst die Temperatur des Sensors, um der Anteil der Thermospannung, der von der thermischen Strahlung des Sensors selbst verursacht wird, rückzurechnen. Im Messverstärker wird dieses bereinigte Signal verstärkt und kann dann in der Auswerteelektronik der Spritzgießmaschine in die tatsächlich gemessene Temperatur umgerechnet werden. Der Messbereich erstreckt sich von 30 bis  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Da die emittierte Strahlung proportional zur 4. Potenz der absoluten Temperatur ist, wird bei geringer Temperatur nur eine geringe Thermospannung erzeugt. Dies stellt vor allem dann ein Problem dar, wenn metallische Oberflächen mit schlechtem Absorptions-, und damit Emissionsverhalten, untersucht werden. Problematisch ist dies bei Temperaturen zwischen 30 und  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die nachfolgende Verstärkung und Digitalisierung des Signals verstärkt den oben beschriebenen Effekt. Dies führt zu einer Abweichung bei der Messung von metallischen Oberflächen von bis zu 5 % der tatsächlichen Temperatur. Die Messung der Temperatur von Kunststoffschmelzen erfolgt mit einer Genauigkeit von 1 % vom gemessenen Wert [8].



*Bild 28: Infrarot-Werkzeuginnenthermometer MTS 408 (FOS Messtechnik GmbH) [16].*

### **Druck-Temperatur-Sensor**

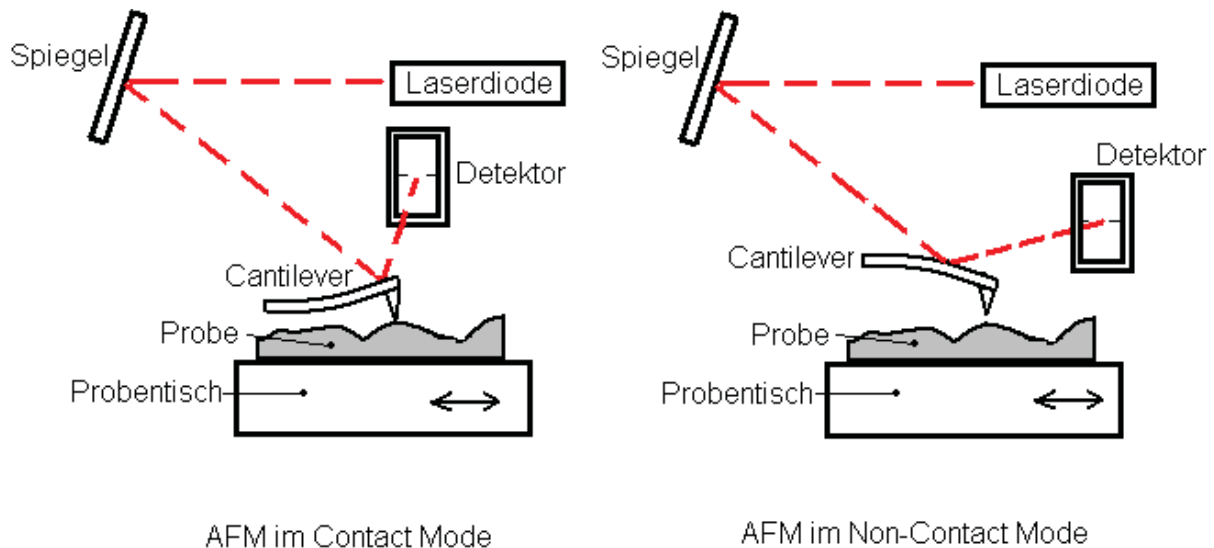
Im Angusskanal befindet sich vor dem Filmanschnitt ein Druck-Temperatur-Sensor vom Typ 6189A (Fa. Kistler, Winterthur, Schweiz). Sobald die Schmelzefront am Sensor vorbei fließt, wirkt Druck auf dessen Front. Das Messelement gibt eine dem Druck proportionale Ladung an den Messverstärker ab, welcher das Signal für die Weiterverarbeitung in der Steuerung der Spritzgießmaschine wandelt. Der Druckmessbereich reicht bis 2000 bar mit einer Genauigkeit von 1 %. Die Temperatur der Schmelze wird auf der Stirnseite des Sensors durch ein Thermoelement-Paar vom Typ K (Materialpaarung NiCr-Ni) gemessen. Hiermit können Schmelzetemperaturen bis 400 °C gemessen werden. Die Genauigkeit des Thermoelements erfüllt DIN IEC 584, Klasse 2. Dies entspricht einem Fehler von maximal 1 % des aktuellen Messwertes oder 1 °C [5]. Der Druck-Temperatur-Sensor wird nur zur Überwachung des lokalen Drucks eingesetzt (Bild 29).



*Bild 29: Schematische Darstellung der Einbauposition des kombinierten Druck-Temperatur-Sensors (Fa. Kistler) [15].*

### **Rasterkraftmikroskop Veeco Dimension 3100**

Das Rasterkraftmikroskop (auch: AFM, für Atomic Force Microscope) Veeco Dimension 3100 (Fa. Veeco Instruments, Plainview, USA) untersucht die Oberfläche einer Probe mit einer schlanken Nadel. Typische Spitzenradien der Nadel können von 1nm (bei single walled Carbon Nanotubetips) bis 20 nm (bei den am häufigsten verwendeten Nadeln aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) betragen. Die Nadel befindet sich am freien Ende eines Hebels, eines so genannten Cantilevers (Bild 30). Die Rückseite des Cantilevers ist mit einer reflektierenden Schicht versehen. Im Betrieb wird die Nadelspitze der Oberfläche so weit angenähert, bis der Cantilever auf Grund der Wechselwirkung zwischen den Atomen der Nadelspitze und der Oberfläche der Probe den Cantilever auslenkt. Während der Messung wird ein Laserstrahl auf die Rückseite des Cantilevers gesendet, der, je nach Auslenkung des Cantilevers, mit unterschiedlicher Winkelabweichung reflektiert wird. Der reflektierte Strahl wird von einem Detektor erfasst und ermöglicht eine Rückrechnung auf die aktuelle Position der Nadelspitze. Zieht man die Nadel über eine Probenoberfläche, kann die Querschnittsoberfläche entlang einer Linie gemessen werden. Rastert man die Oberfläche ab, kann so die Topographie der Oberfläche ermittelt werden [11].



*Bild 30: Schematische Darstellung des Messprinzips eines Rasterkraftmikroskops im Contact und Non-Contact Mode [11].*

Je nach Position der Nadel unterscheidet man zwischen Contact Mode, in dem die Nadel die Oberfläche mechanisch abtastet, und Non-Contact Mode, in dem die Nadel auf Grund der Van-der-Waals Kräfte ausgelenkt wird. Der so genannte Intermittent-Contact Mode (auch: Tapping Mode) ist eine Variante des Non-Contact Mode. Beim Intermittent-Contact Mode wird der Cantilever angeregt und schwingt knapp unter seiner Eigenfrequenz in vertikaler Richtung. Die Schwingungsamplitude ändert sich abhängig vom Abstand der Nadelspitze zur Probenoberfläche und ermöglicht so die Ermittlung der Höheninformation. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Oberfläche nur noch an Punktflächen berührt wird und somit der Probekörper geringer geschädigt wird als dies beim Contact Mode der Fall wäre.

### **Profilometer FRT Microprof 200®**

Das Profilometer FRT Microprof 200® (Fa. FRT GmbH, Bergisch-Gladbach, Deutschland) nutzt die chromatische Abberation von Linsen aus. Für die Untersuchung der Oberfläche wird weißes Licht von einer passiven Optik mit großer chromatischer Abberation vertikal unterschiedlich fokussiert. Die Lage des Fokuspunktes hängt von der Wellenlänge ab. Trifft dieses fokussierte Licht auf die Oberfläche, wird das Licht jener Wellenlänge am stärksten reflektiert, die auf der Oberfläche ihren Fokuspunkt hat. Das reflektierte Signal wird über die gleiche Optik und ein Glasfaserkabel in ein Spektrometer zur Analyse geführt. An Hand der

detektierten Wellenlänge kann dann auf den Abstand zwischen Oberfläche und Sensor geschlossen werden (Bild 31). Der Sensor wird über die gesamte Probe bewegt und kann so, durch Messung an mehreren Rasterpunkten, die Oberfläche des Probekörpers berührungslos messen. Die daraus gewonnenen Oberflächentopographiedaten können nun in der separaten Software Mark III<sup>®</sup> nachträglich bearbeitet und untersucht werden. Je nach verwendetem Sensor können unterschiedliche Auflösungen erreicht werden. In lateraler Richtung reicht die Auflösung, beschränkt durch die Abmessungen des Lichtpunktes, bis 1  $\mu\text{m}$ . Die vertikale Auflösung reicht bis 10 nm, je nach verwendetem Sensor.

Dieses Messgerät wird verwendet, um den Verzug der spritzgegossenen Teile zu untersuchen. Der verwendete Sensor ist ein chromatischer Messkopf vom Typ FRT CWL 3 mm mit einer lateralen Auflösung von 6  $\mu\text{m}$  und einer vertikalen Auflösung von 100 nm [17].

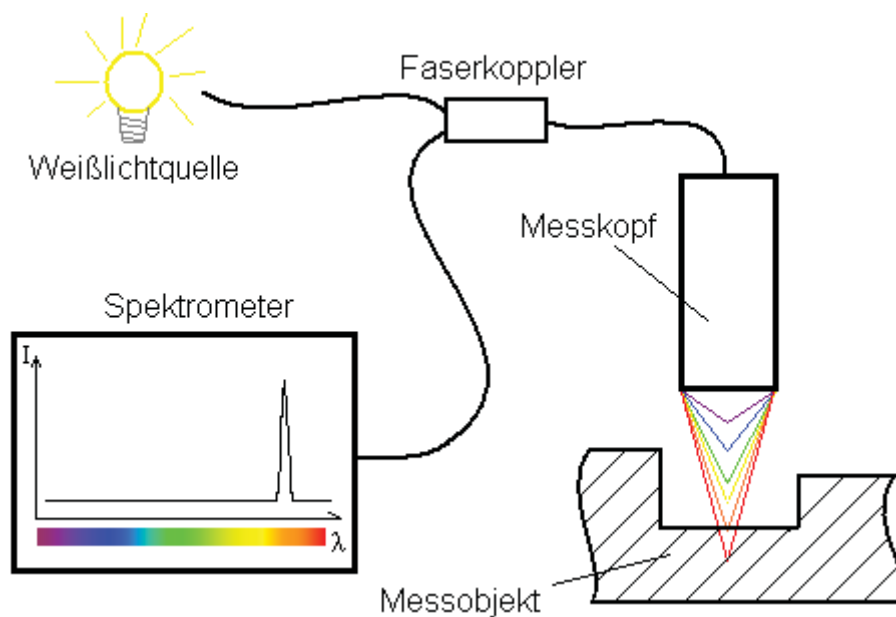


Bild 31: Schematische Darstellung des Messprinzips des FRT Microprof<sup>®</sup> 200 [17].

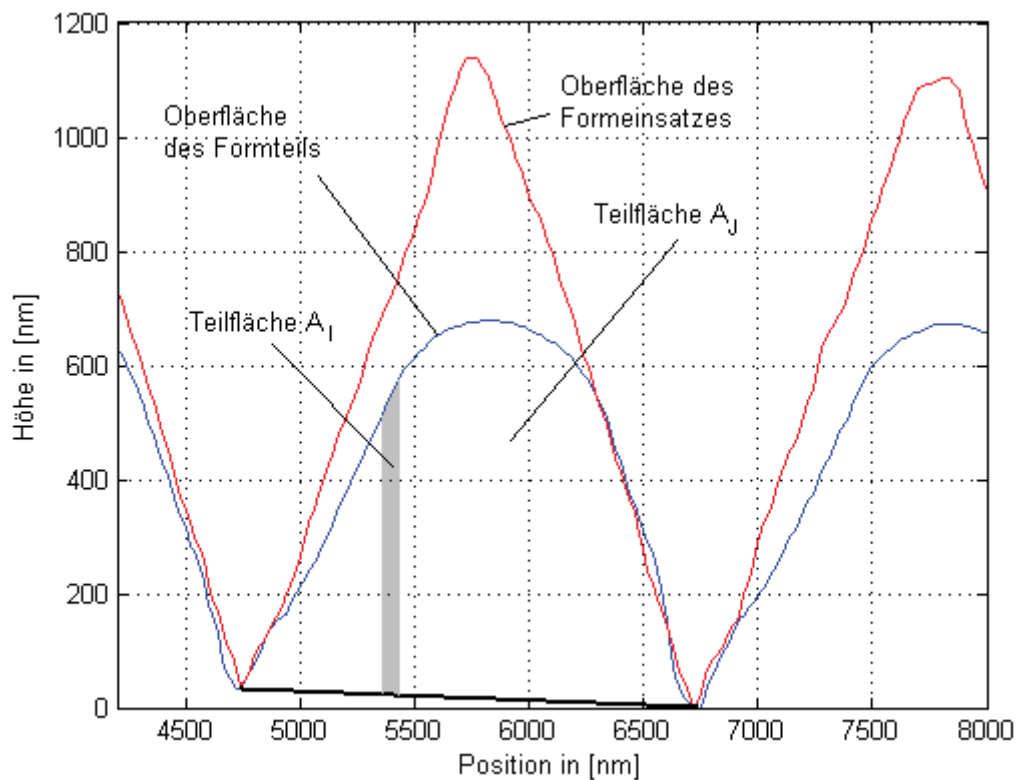
### MATLAB-basierte Auswertesoftware AFMEval

Zusätzlich zur Auswertung der Oberflächendaten, welche mit dem Rasterkraftmikroskop ermittelt wurden, wurde eine MATLAB-basierte Software programmiert. Diese berechnet die erreichte Abformung bei regelmäßigen V-Kerben. Analog zur numerischen Integration mit der Trapezregel wird die Fläche  $A_i$  zwischen einer Basislinie und der Oberflächenkontur zweier benachbarter Punkte errechnet (Bild 32). Dies wird für jede Teilfläche so oft wiederholt, bis die gesamte Fläche  $A_j$

einer Kerbe bestimmt werden kann. Diese Fläche wird mit der Teilfläche  $A_j$  des Formeinsatzes ins Verhältnis gesetzt. So kann eine Zahlenreihe mit der Abformung der einzelnen Segmente erstellt werden. Abschließend wird der Mittelwert dieser Reihe bestimmt. Im Wesentlichen gliedert sich der Programmaufbau in folgende Einzelschritte:

- Einlesen der Daten,
- Bereinigen der Daten von nicht besetzten Zeilen der Matrix,
- Bestimmung der Basislinie,
- Berechnung der Teilflächen und
- Vergleich mit dem Formeinsatz.

Der vollständige Programmcode ist im Anhang ersichtlich.



*Bild 32: Vergleich von Formeinsatz- und Formteiloberflächengeometrie mit dem Programm AFMEval.*



### Rasterelektronenmikroskop (SEM) Hitachi S-4000®

Das Rasterelektronenmikroskop (auch: SEM, Scanning Electron Microscope) Hitachi S-4000® (Hitachi, Ltd., Chiyoda-ku, Tokyo, Japan) wurde zur qualitativen Beurteilung der Proben heran gezogen. Eine detaillierte Beschreibung von Elektronenmikroskopen ist in [6] zu finden.

### Infrarotkamera ThermoCAM S65®

Für die Beurteilung des thermischen Verhaltens des Werkzeuges wurde eine Infrarotkamera vom Typ ThermoCAM S65® (FLIR Systems, Danderyd, Schweden) verwendet. Die von der Kamera generierten Daten wurden mit der mitgelieferten Software ThermoCAM Researcher Professional 2.8 SR-1 ausgewertet.

## 3.4 Abformungsversuche

Die Abformungsversuche wurden mit einem statistischen Versuchplan abgewickelt. Die variierten Parameter Masstemperatur  $T_M$ , Einspritzgeschwindigkeit  $v_E$ , Nachdruck  $p_N$  und Werkzeugtemperatur  $T_W$  wurden in zwei Blöcke aufgeteilt. Die Masstemperatur und die Einspritzgeschwindigkeit wurden in einem vollfaktoriellen Versuchsplan ( $2^2$ ) für jedes Verfahren variiert, während der Nachdruck und die Werkzeugtemperatur nicht verändert wurden, und umgekehrt (Tabelle 2 und Tabelle 3). Im Prägeprogramm wurde ein Prägehub von 0,15 mm festgelegt, welcher für alle Versuche mit dem Verfahren Spritzprägen konstant blieb. Die Prägekraft entsprach der Schließkraft beim Spritzgießen.

Tabelle 2: Versuchsplan für die Verfahren konventionelles Spritzgießen und Spritzprägen für COP Zeonor 1060R.

Planstufen				Eingestellte Werte			
$T_M$	$v_E$	$p_N$	$T_W$	$T_M$ (°C)	$v_E$ (cm <sup>3</sup> /s)	$p_N$ (bar)	$T_W$ (°C)
0	0	0	0	250	50	1200	60
-	-	0	0	230	30	1200	60
+	-	0	0	270	30	1200	60
-	+	0	0	230	70	1200	60
+	+	0	0	270	70	1200	60
0	0	-	-	250	50	1000	40
0	0	+	-	250	50	1400	40
0	0	-	+	250	50	1000	80
0	0	+	+	250	50	1400	80

Tabelle 3: Versuchsplan für die Verfahren konventionelles Spritzgießen und Spritzprägen für PP Dow H734-52 RNA.

Planstufen				Eingestellte Werte			
$T_M$	$v_E$	$p_N$	$T_W$	$T_M$ (°C)	$v_E$ (cm <sup>3</sup> /s)	$p_N$ (bar)	$T_W$ (°C)
0	0	0	0	240	50	500	60
-	-	0	0	220	30	500	60
+	-	0	0	260	30	500	60
-	+	0	0	220	70	500	60
+	+	0	0	260	70	500	60
0	0	-	-	240	50	400	40
0	0	+	-	240	50	600	40
0	0	-	+	240	50	400	80
0	0	+	+	240	50	600	80

### 3.4.1 IR-variotherme Versuche

Beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung wurde eine Werkzeuggrundtemperatur von 80 °C eingestellt. Die Temperaturdifferenz am Formeinsatz an der Düsenseite wurde mit dem Infrarot-Strahler mit maximaler Strahlungsleistung erzeugt. Die Glasübergangstemperatur von COP Zeonor 1060R bzw. die Kristallitschmelztemperatur von PP H734-52 RNA wurden als Richtwert für die Temperaturniveaus verwendet. Das hohe und niedrige Testniveau für den Versuchsplan wurde über und unter diesem Richtwert angesetzt. Die Obergrenze der möglichen Formeinsatztemperatur liegt aus Sicherheitsgründen bei 150°, da höhere Temperaturen ein Risiko für die im Werkzeug verwendeten Dichtungsringe im Werkzeug darstellten. Aus diesem Grund wurden für PP niedrigere Temperaturniveaus eingestellt. Die Auswerferseite wurde während der Aufheizphase mit 130° heißem Wasser aus dem Temperiergerät erwärmt (Tabelle 4 und Tabelle 5).

Tabelle 4: Versuchsplan für das Verfahren Spritzgießen mit IR-variothermer Prozessführung für COP Zeonor 1060R.

Planstufen				Eingestellte Werte			
$T_M$	$v_E$	$p_N$	$T_W$	$T_M$ (°C)	$v_E$ (cm <sup>3</sup> /s)	$p_N$ (bar)	$T_W$ (°C)
0	0	0	0	250	50	1200	115
-	-	0	0	230	30	1200	115
+	-	0	0	270	30	1200	115
-	+	0	0	230	70	1200	115
+	+	0	0	270	70	1200	115
0	0	-	-	250	50	1000	105
0	0	+	-	250	50	1400	105
0	0	-	+	250	50	1000	125
0	0	+	+	250	50	1400	125

Tabelle 5: Versuchsplan für das Verfahren Spritzgießen mit IR-variothermer Prozessführung für PP Dow H734-52 RNA.

Planstufen				Eingestellte Werte			
$T_M$	$v_E$	$p_N$	$T_W$	$T_M$ (°C)	$v_E$ (cm <sup>3</sup> /s)	$p_N$ (bar)	$T_W$ (°C)
0	0	0	0	240	50	500	140
-	-	0	0	220	30	500	140
+	-	0	0	260	30	500	140
-	+	0	0	220	70	500	140
+	+	0	0	260	70	500	140
0	0	-	-	240	50	400	130
0	0	+	-	240	50	600	130
0	0	-	+	240	50	400	150
0	0	+	+	240	50	500	140

Bei jeder Einstellung wurden zuerst 20 Schuss gefahren, um den Einfluss von Einschwingvorgängen der Spritzgießmaschine oder den Einfluss aus bereits gealtertem Material in der Plastifiziereinheit zu verringern. Danach wurden in unregelmäßigen Abständen Probekörper entnommen. Die Versuche jedes Niveaus wurden geblockt durchgeführt, da eine Randomisierung, wie von Kleppmann vorgeschlagen, die Dauer für die Durchführung der Versuche maßgeblich verlängert hätte. Vier Probekörper wurden am AFM auf die Abformung untersucht.

### 3.5 Auswertung und Fehlerbetrachtung

#### 3.5.1 Bestimmung der abgeformten Höhe

Die Probekörper aus den Versuchen wurden an zwei Positionen mit dem AFM im Tapping Mode untersucht (Bild 33). Der untersuchte Bereich ist  $10 \times 0,625 \mu\text{m}^2$  groß und wird in  $512 \times 32$  Punkten abgerastert. Dies entspricht einer Auflösung von  $19,53 \text{ nm}$ .

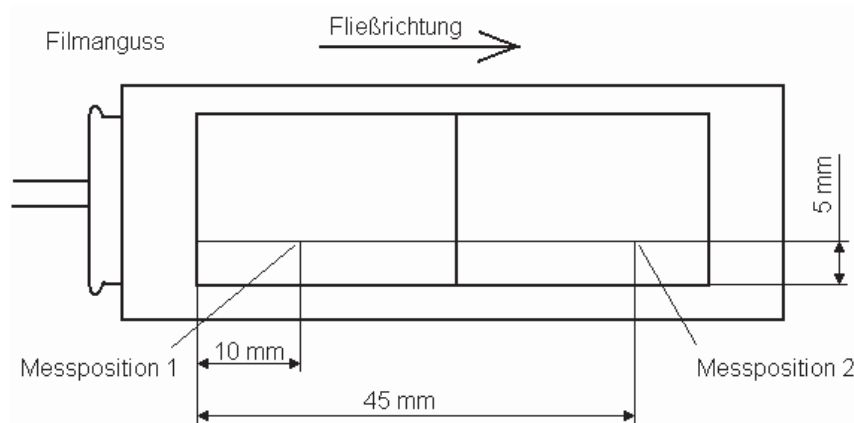


Bild 33: Messpositionen am Formteil.

Die resultierenden Oberflächendaten wurden mit der Veeco Nanoscope<sup>®</sup> Software weiter bearbeitet. Dabei wurde ein Schnitt quer zu den V-Kerben gelegt. An der Stelle mit der größten Höhendifferenz zwischen dem Kerbengrund und der Spitze und an jener mit der geringsten Höhendifferenz wurde die erreichte Höhe bestimmt (Bild 34).

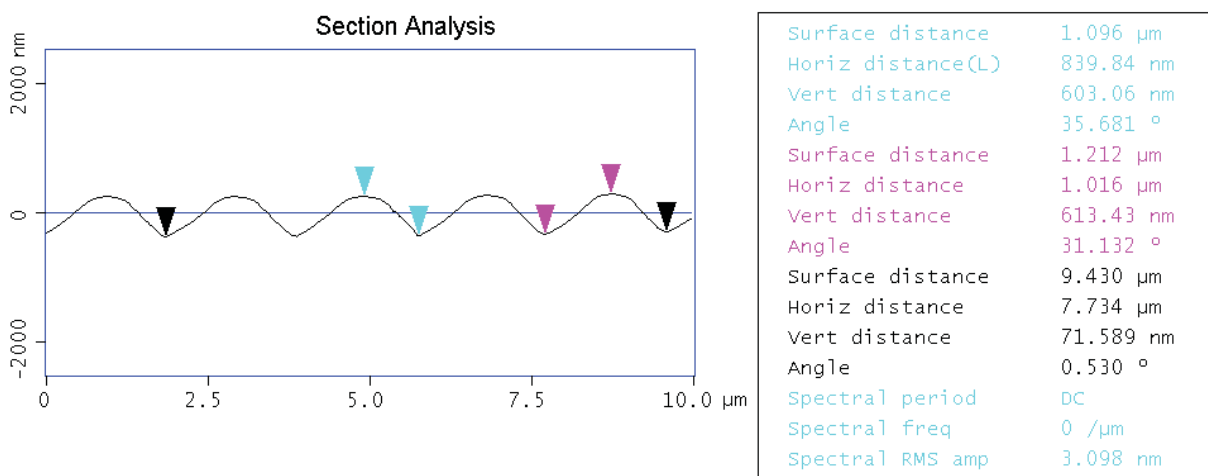


Bild 34: Untersuchung der abgeformten Höhe am Veeco Nanoscope<sup>®</sup> IIIa.

In Anlehnung an das Kriterium nach Shen (vgl. Kap. 2.2) wird **im Rahmen dieser Arbeit** die **Abformgüte AG als Verhältnis der abgeformten Tiefe zur Tiefe der Mikrokapazität** definiert (Bild 35, Glg. (3)). Als Referenzwert wurde die Nennhöhe der Struktur, 740 nm an der angussnahen Messposition 1 und 925 nm an der angussfernen Messposition 2, verwendet.



Bild 35: Definition der Abformgüte.

$$AG = \frac{h_1}{h_2} \quad (3)$$

Die Höhenauflösung des verwendeten Messgerätes beträgt 3 nm, d.h. der systematische Messfehler bei der Höhenbestimmung beträgt etwa +/- 2 %. Ein systematischer Skalierungsfehler von + 3 % auf alle Messwerte ist für die Betrachtung der Abformungsgüte nicht relevant, da sich dieser durchkürzt. Die zufällige Messwertschwankung wurde anhand von 10 Reproduzierbarkeitsmessungen am Formeinsatz zu max. +/- 5,9 % an Messstelle 1 und max. +/- 1,5 % an Messstelle 2 ermittelt.

Die Flächenreplikation wurde mit dem MATLAB-basierten Programm *AFMEval* berechnet (vgl. Bild 32). Dazu wurden die Daten vom AFM in ASCII-Format exportiert und weiter verarbeitet. Dabei zeigte sich, dass das Ergebnis der Berechnungen zu stark schwankt, um signifikante Abhängigkeiten ermitteln zu können. Vermutlich ist dies durch den Verzug der Formteile bedingt, der die Höhenlage des Kerbengrundes einzelner Kerben relativ zueinander deutlich verschiebt. Auf Grund der großen Schwankungen wurde das Flächenkriterium und dessen Ermittlung mit *AFMEval* für die Auswertung der Messergebnisse nicht angewendet.

Die Messergebnisse wurden mit Hilfe der Varianzanalyse auf Haupteinflussfaktoren hinsichtlich der erreichten Tiefenabformung untersucht. Um den Vergleich zwischen

den beiden Bereichen zu vereinfachen, wurden die Effekte der Parameter und der Wechselwirkungen normiert. Die Beurteilung der Signifikanz einzelner Parameter und deren Wechselwirkungen untereinander erfolgte nach Kleppmann unter der Annahme, dass die Ergebnisse jedes Testniveaus normalverteilt sind [13].

Dazu wurden von den Versuchen jedes Effektniveaus, beispielsweise hoher und niedriger Nachdruck, die Mittelwerte  $y_1$ ,  $y_2$  und die zugehörige Varianzen  $s_1^2$ ,  $s_2^2$  berechnet. Diese wurden dann verwendet, um einen Schätzwert für den Mittelwert und die Standardabweichung des Effektes zu ermitteln. Der Schätzwert für einen Effekt ist nach Glg. (4):

$$\bar{d} = \bar{y}_2 - \bar{y}_1 \quad (4).$$

Der Schätzwert für die Standardabweichung des Effektes  $s_d$  kann nach Glg. (5) berechnet werden:

$$s_d = \sqrt{\frac{4}{N} \cdot s^2} \quad (5),$$

wobei  $N$  die Anzahl aller Stichproben ist. Der Mittelwert der Varianzen  $s^2$  kann nach Glg. (6) bestimmt werden:

$$s^2 = \frac{s_1^2 + s_2^2}{2} \quad (6).$$

Mit Glg. (7) kann der Freiheitsgrad  $f$  bestimmt werden. Mit diesem kann aus tabellierten Werten der t-Verteilung (auch: Fisher-Verteilung) für die erforderliche Wahrscheinlichkeit  $p'$  (z.B. 99 %) der Wert für  $t$  abgelesen werden.

$$f = 2 \cdot (n - 1) = N - 2 \quad (7),$$

wobei  $n$  der Anzahl der Stichproben eines Effektniveaus entspricht. Damit sind alle Größen bekannt, um aus Glg. (8) die Grenzen zu berechnen, innerhalb jener der Effekt mit der Wahrscheinlichkeit  $p'$  liegt

$$\bar{d} - t \cdot s_d \leq \delta \leq \bar{d} + t \cdot s_d \quad (8),$$

wobei  $\delta$  dem tatsächlichen Effekt entspricht, der mit dem Schätzwert  $d$  angenähert werden soll. Moderne Statistik-Programme können diese Grenzen, und damit die Größe  $t$ , iterativ auf Grund der eingegebenen Messwerte bestimmen. Damit kann nun die zugehörige Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der der Wert des Effektes, der im Zuge eines weiteren Versuches festgestellt wird, innerhalb der Grenzen  $d \pm t \cdot s_d$  liegt.

Je höher diese Wahrscheinlichkeit ist, desto zuverlässiger (signifikanter) ist die berechnete Effekthöhe. Das Signifikanzniveau  $p$  gibt die Gegenwahrscheinlichkeit an, d.h. dass der Wert des Effektes bei der nächsten Messung nicht innerhalb dieser Grenzen liegt. Je kleiner der Wert von  $p$  also ist, desto zuverlässiger ist das Ergebnis eines Tests. Die Bestimmung von  $p$  erfolgte mit der kommerziellen Software STATISTICA® (StatSoft Inc., Tulsa, USA). Ein Effekt wurde dann als signifikant angesehen, wenn das zugehörige Signifikanzniveau  $p$  kleiner oder gleich 0,05 ist (Tabelle 6).

Tabelle 6: Signifikanzniveaus und deren Interpretation [13].

Signifikanzniveau $p$	Bewertung
$p \geq 0,05$	indifferent
$0,05 \geq p \geq 0,01$	signifikant
$p \leq 0,01$	hoch signifikant

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Thermisches Verhalten des Werkzeuges „SonyMold 04“

#### 4.1.1 Aufheiztests

Das Aufheizverhalten des Werkzeuges wurde untersucht, um für die nachfolgenden Versuche mit unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen die Heizdauer bestimmen zu können. Die an die Spritzgießmaschine angeschlossene Fluidtemperierung ermöglichte das Einstellen eines definierten Temperaturniveaus von 65°C im Werkzeug. Dann wurde jeweils 30 Sekunden lang mit maximaler Strahlungsleistung des Infrarot-Strahlers geheizt. Ein Fühler, welcher in der abhebbaren Trägerplatte eingebaut ist, maß die Temperatur 3,8 mm unter der Formnestoberfläche. Es wurden unterschiedliche Formeinsätze getestet, um die erreichbaren Heizraten und den damit verbundenen Temperaturverlauf bei unterschiedlichen Formeinsatzmaterialien abzuschätzen (Bild 36). Aus dem unterschiedlichen Absorptionsverhalten der Materialien im Infrarotbereich folgten unterschiedliche Aufheizraten (Tabelle 7). Aus den Versuchen zeigte sich, dass mit oberflächenbehandeltem Stahl die beste Aufheizrate erreicht werden konnte. Formeinsätze aus Nickel wiesen geringere Aufheizraten auf. Dies bedeutet, dass die notwendige Heizzeit, um den Formeinsatz aufzuheizen, bei dem Einsatz von reinen Nickel-Formeinsätzen höher ist. Dadurch steigt auch die Zykluszeit.

*Tabelle 7: Erreichte Aufheizraten bei den Aufheiztests mit dem Infrarot-Strahler bei maximaler Heizleistung.*

<b>Werkstoff</b>	<b>erreichte Aufheizrate (K/s)</b>
Stahl, oberflächenbehandelt	3
Nickel, mit Titannitrid beschichtet	2,3
Nickel	2,5

Die gemessene Temperatur am Fühler stieg erst mit einer kurzen Zeitverzögerung nach dem Einschalten des Infrarot-Strahlers an. Dies liegt daran, dass die Messstelle des Fühlers nicht unmittelbar an der Oberfläche, also an der beheizten Fläche, sondern knapp dahinter liegt. Je weiter die Messstelle von der Oberfläche entfernt ist, desto größer wird diese Zeitdifferenz [9]. Die maschineninterne Steuerung der



Spritzgießmaschine verwendete das Signal dieses Fühlers trotz dieser Zeitdifferenz zur Regelung der Heizdauer für die Abformversuche.

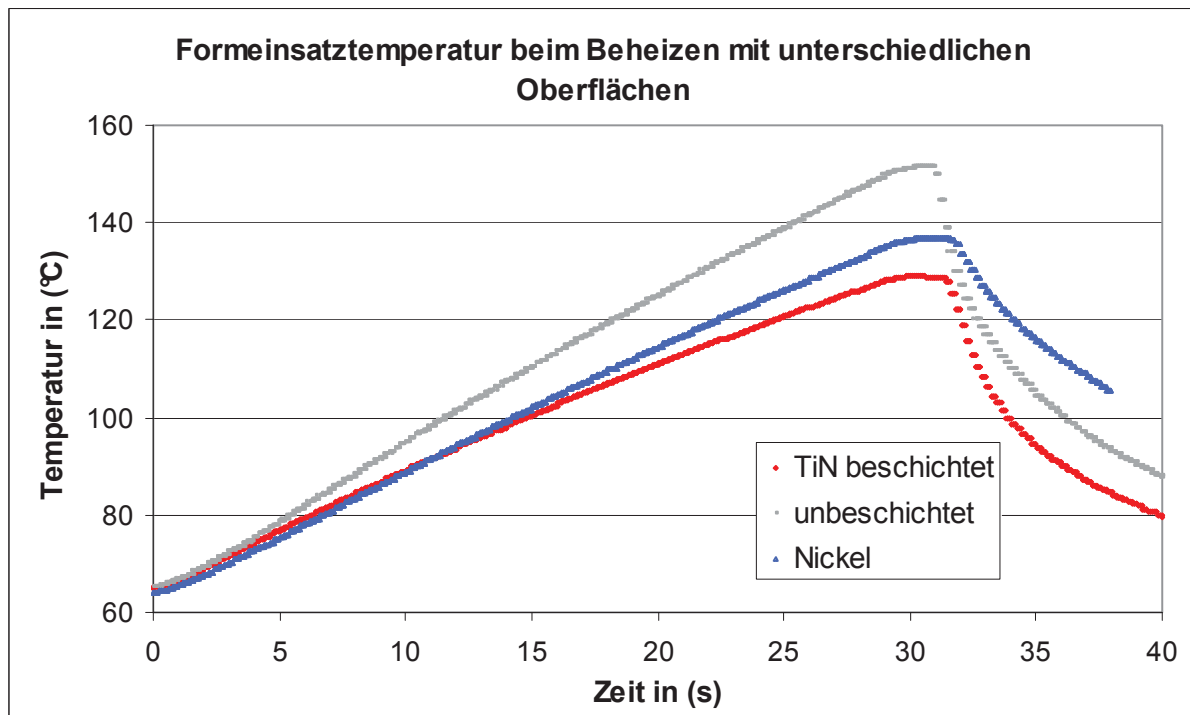
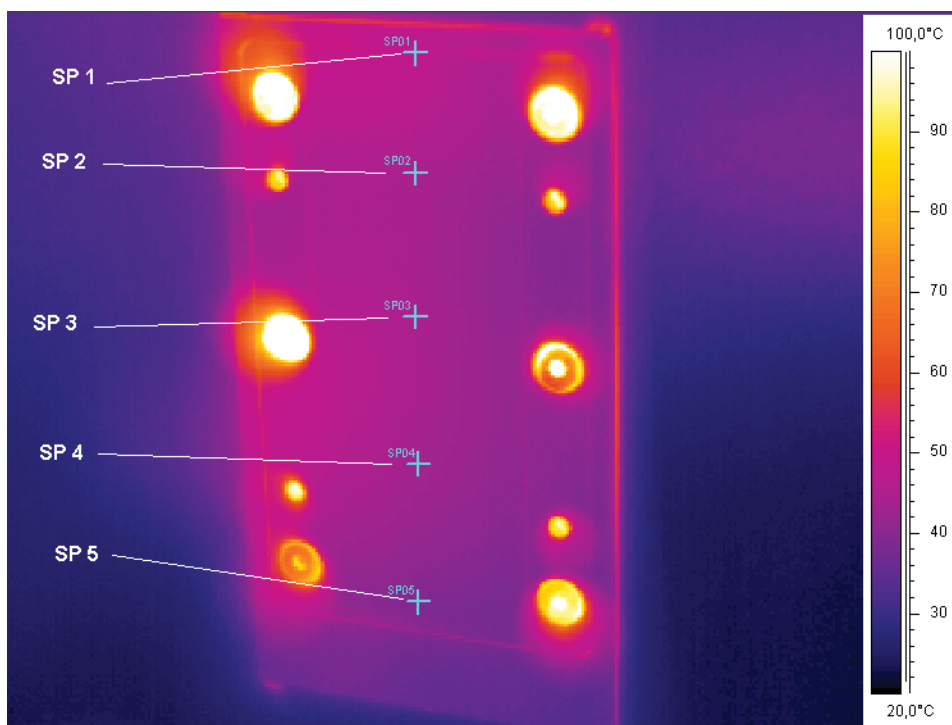


Bild 36: Formeinsatztemperatur beim Beheizen mit Infrarot-Strahlung und unterschiedlichen Formeinsatzwerkstoffen.

Die für den Versuchsplan notwendige Temperaturdifferenz, welche auch als variothermer Hub bezeichnet wird, konnte mit dem Infrarotstrahler innerhalb von 30 Sekunden erreicht werden. Hier machte sich bemerkbar, dass durch die abhebbare Trägerplatte die aufzuheizende Masse wesentlich geringer ist, als dies bei reiner Fluidtemperierung der Fall ist. Um den kleinsten, für die Versuche mit COP notwendigen, variothermen Hub von 80 °C Grundtemperatur auf 105 °C zu erreichen, musste man bei Fluidtemperierung mit Heizzeiten bis zu 240 Sekunden rechnen. Der notwendige Hub für die Versuche mit PP, 80 °C auf 130 °C, konnte mit der gegebenen Fluidtemperierung nicht erreicht werden. Aus diesem Grund wurden mit dieser Variante der variothermen Prozessführung keine Versuche durchgeführt. Um die hohen Temperaturen schneller zu erreichen, wäre ein größerer Temperaturgradient zwischen Werkzeug und Medium notwendig. Dabei würde der Druck des heißen Wassers in den Zuleitungsschläuchen zu hoch werden und diese platzen lassen.

### 4.1.2 Temperaturhomogenität des Formeinsatzes

Das thermische Verhalten des für die Versuche verwendeten Werkzeugs wurde mit mehreren, in das Werkzeug integrierten Sensoren untersucht. Da damit die Oberflächentemperatur des Formeinsatzes nicht gemessen werden konnte, wurde diese mit einer Infrarotkamera ermittelt. Die Infrarotkamera ermöglichte eine Untersuchung der Temperaturverteilung über die gesamte Oberfläche des Formeinsatzes sowie deren Verlauf über die Zeit. Für die Versuche wurde von einer Werkzeuggrundtemperatur von 40 °C ausgegangen. Diese Temperatur wurde mit den Temperiergeräten eingestellt. Davon ausgehend wurde testweise 10 Sekunden lang mit maximaler Heizleistung des Infrarotstrahlers geheizt. Mit der Infrarot-Kamera wurde nach dem Ausfahren des Strahlers eine Minute lang die Temperaturverteilung während des Abkühlens an der Oberfläche aufgezeichnet. Diese Daten konnten mit der zugehörigen Messsoftware ausgewertet werden. Es stellte sich heraus, dass die Temperatur an der Oberfläche nicht homogen verteilt ist (Bild 37 und Bild 38). Über die gesamte Fläche des Formeinsatzes trat eine Temperaturdifferenz von 10 °C auf.



*Bild 37: Oberflächentemperaturverteilung des abhebenden Formeinsatzes nach 10 Sekunden Heizen mit maximaler Heizleistung.*

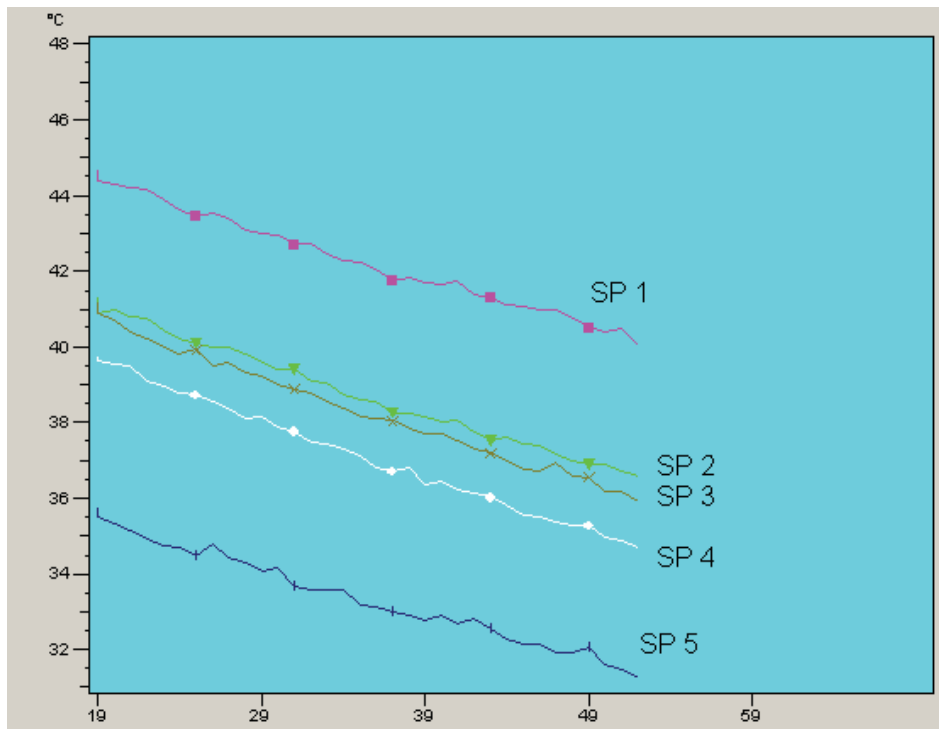


Bild 38: Verlauf der Formeinsatz-Oberflächentemperatur an mehreren Positionen entlang des Fließweges.

## 4.2 Ergebnisse aus dem faktoriellen Versuchsplan

### 4.2.1 Konventionelles Spritzgießen

Im Rahmen der konventionellen Spritzgießversuche wurden die Einflussgrößen Massetemperatur  $T_M$ , Einspritzgeschwindigkeit  $v_E$ , Nachdruck  $p_N$  sowie Werkzeugtemperatur  $T_W$  systematisch im Rahmen zweier vollfaktorieller  $2^2$ -Faktoren-Versuche untersucht. Die Ergebnisse im Hinblick auf den Abformungsgrad sind in Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10 dargestellt. Dafür wurde die Abformung an 2 Positionen am Formteil bestimmt (vgl. Bild 33).

Beim konventionellen Spritzgießen mit COP stieg mit zunehmender Massetemperatur die Abformgüte deutlich an. Die Einspritzgeschwindigkeit zeigte keinen signifikanten Einfluss, wobei eine leicht negative Tendenz bei steigender Massetemperatur bemerkbar war. Mit steigender Werkzeugtemperatur nahm bei niedrigem Nachdruck die Abformgüte zu. Bei hohem Nachdruck blieb die Abformung trotz höherer Werkzeugtemperatur konstant. Mit steigendem Nachdruck nahm die Abformgüte zu. Die Abformgüte war an Messposition 1 höher als an Messposition 2, wobei dieser Effekt bei hoher Massetemperatur nicht signifikant war. Bei niedrigem

Nachdruck nahm die Abformung zwischen Messposition 1 und Messposition 2 ab. Die beste Abformung konnte mit hoher Werkzeugtemperatur, hoher Massetemperatur, hohem Nachdruck und geringer Einspritzgeschwindigkeit erreicht werden. Das schlechteste Resultat ist mit geringer Massetemperatur, geringer Werkzeugtemperatur, geringem Nachdruck und hoher Einspritzgeschwindigkeit zu erwarten.

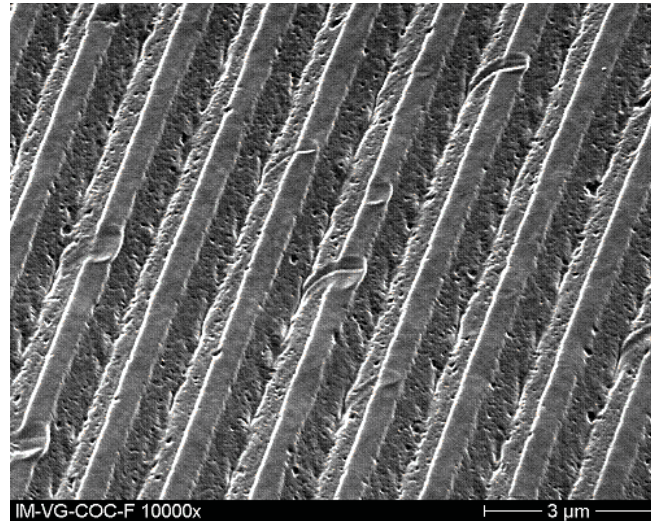
*Tabelle 8: Gemessene Abformungsgrade in COP und PP, hergestellt im konventionellen Spritzgießverfahren, Streuung der Messwerte: 0,032.*

$T_M$	$v_E$	COP		PP	
		Abformungsgrad		Abformungsgrad	
		Messposition 1	Messposition 2	Messposition 1	Messposition 2
mittel	mittel	0,53	0,54	0,56	0,62
niedrig	niedrig	0,38	0,33	0,56	0,58
hoch	niedrig	0,62	0,59	0,60	0,72
niedrig	hoch	0,39	0,31	0,55	0,59
hoch	hoch	0,61	0,59	0,54	0,67
$T_W$	$p_N$				
mittel	mittel	0,53	0,54	0,56	0,62
niedrig	niedrig	0,33	0,27	0,53	0,61
hoch	niedrig	0,47	0,41	0,55	0,67
niedrig	hoch	0,63	0,61	0,50	0,67
hoch	hoch	0,63	0,67	0,53	0,64

*Tabelle 9: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in COP und deren Signifikanzniveaus.*

COP	angussnah		angussfern	
	Effekt	Signifikanzniveau p	Effekt	Signifikanzniveau p
$T_M$	0,236	$5,57 \cdot 10^{-16}$	0,281	$4,45 \cdot 10^{-21}$
$v_E$	0,014	0,331	-0,007	0,531
Wechselwirkung $T_M$ und $v_E$	-0,009	0,516	0,007	0,539
$T_W$	0,231	$1,87 \cdot 10^{-14}$	0,298	$6,55 \cdot 10^{-21}$
$p_N$	0,066	$2,02 \cdot 10^{-4}$	0,092	$3,95 \cdot 10^{-9}$
Wechselwirkung $T_W$ und $p_N$	-0,048	$4,28 \cdot 10^{-3}$	-0,042	$5,00 \cdot 10^{-4}$

Am Elektronenmikroskop (Bild 39) zeigte sich die Abformung der V-Kerben bei COP. Am Grund waren die Poren gut zu erkennen, welche für eine gute Abformung in dem Anfangsbereich der Kerben sprechen. Die Kratzer an den Flanken stammten von kleinen Hinterschnitten im Kerbgrund. Die perspektivische Ansicht, welche aus den Daten des AFM generiert werden konnte, zeigte, dass die Kerben am Grund gut abgeformt wurden (Bild 40).



*Bild 39: SEM-Aufnahme des Formteils mit der besten Abformung in COP im konventionellen Spritzgießverfahren, 10.000-fache Vergrößerung.*

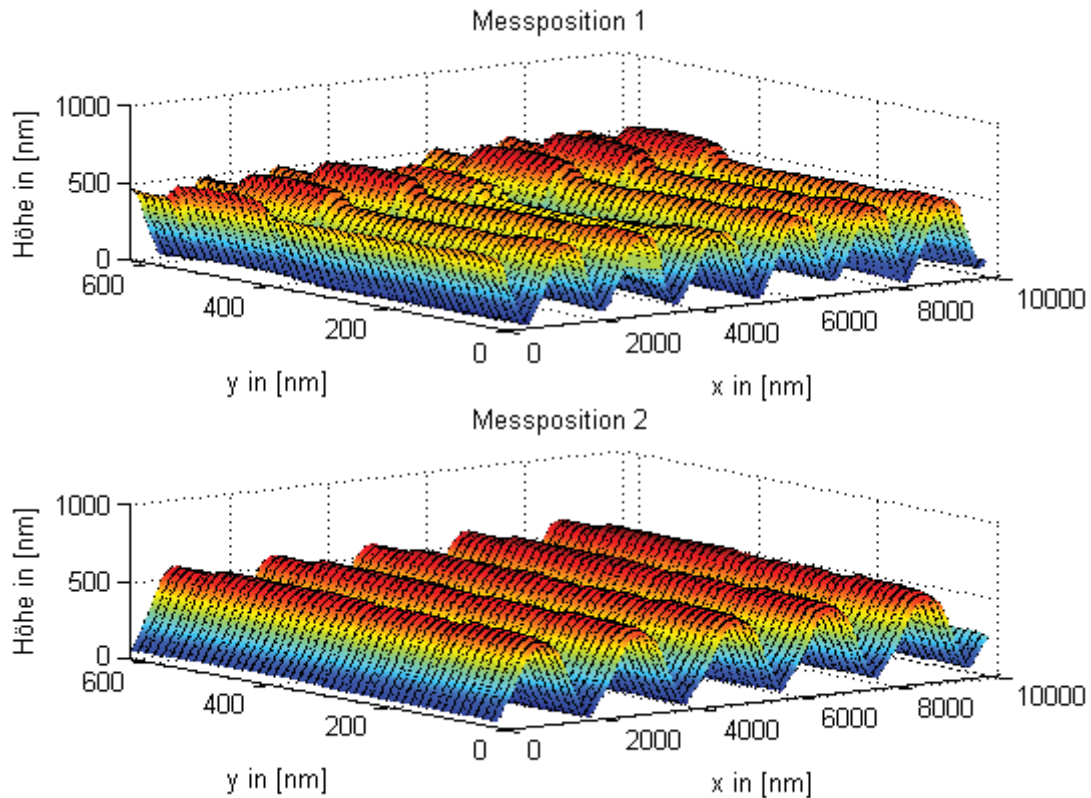


Bild 40: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im konventionellen Spritzgießverfahren, interpretiert mit MATLAB.

Tabelle 10: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in PP und deren Signifikanzniveaus.

PP	Messposition 1		Messposition 2	
	Effekt	Signifikanz-niveau p	Effekt	Signifikanz-niveau p
$T_M$	0,008	0,427	0,109	$7,20 \cdot 10^{-12}$
$v_E$	-0,037	0,001	-0,028	0,008
Wechselwirkung $T_M$ und $v_E$	-0,022	0,043	-0,034	0,002
$T_W$	-0,047	$7,20 \cdot 10^{-4}$	0,028	0,016
$p_N$	0,021	0,103	0,010	0,375
Wechselwirkung $T_W$ und $p_N$	-0,003	0,083	-0,025	0,026

Bei PP konnte mit steigender Massetemperatur bessere Abformung bewirkt werden. Nur bei hoher Einspritzgeschwindigkeit zeigte sich eine leichte Abnahme der erreichten Abformgüte. Mit steigender Einspritzgeschwindigkeit nahm bei hoher Massetemperatur die Abformung ab, bei niedriger Massetemperatur bleibt sie weitgehend konstant. Über den Fließweg zeigte sich bei hoher Massetemperatur

eine leichte Zunahme der Abformung. Dieser Effekt war bei niedriger Masstemperatur nur noch tendenziell feststellbar. Mit steigendem Abstand vom Anguss nahm die Abformgüte zu. Eine Ausnahme davon war bei steigendem Nachdruck, aber geringer Masstemperatur, feststellbar. Hier wurde ein geringer Anstieg der Abformung beobachtet. Wurde die Werkzeugtemperatur erhöht, nahm die erreichte Abformgüte angussnah tendenziell zu. Angussfern wurde unter denselben Bedingungen eine tendenzielle Abnahme bestimmt. Wie bei den Formteilen aus COP, wo an Messposition 2 bessere Abformung erzielt wurde, zeigte sich auch hier ein ähnlicher Effekt. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt ist die Struktur selbst. Die Breite der Kerbe zu Beginn an der angussnahen Messposition 1 (Breite  $b_1 = 1,48 \mu\text{m}$ ) ist kleiner als jene angussfernen Messposition 2 (Breite  $b_1 = 1,85 \mu\text{m}$ ). Dies verursacht einen größeren Widerstand beim Einströmen der Schmelze in die Kerbe an der angussnahen Position 1. Dadurch ist angussnah ein höherer Druck erforderlich, damit die Schmelze, relativ gesehen, gleich weit in die Struktur einfließen kann. Gute Abformung konnte mit hoher Masstemperatur, hoher Werkzeugtemperatur, niedrigem Nachdruck und niedriger Einspritzgeschwindigkeit erreicht werden. Mit niedriger Masstemperatur, niedriger Werkzeugtemperatur, hohem Nachdruck und hoher Einspritzgeschwindigkeit wurde das schlechteste Resultat erzielt. In den Aufnahmen aus dem Elektronenmikroskop (Bild 41) sieht man ansatzweise Abformung in den Kerben und sehr gute Abformung am Kerbengrund. Im Vergleich zu COP sieht man hier nur den Grund der Kerben, die Flanken hingegen sind kaum in Kontakt mit der Schmelze gewesen (vgl. Bild 39). Dies lässt sich vor allem an den Poren am Grund erkennen, welche auch an den Spitzen des Formeinsatzes zu sehen sind. Die Bereiche an der Oberseite, die auf den Bildern glatt erscheinen, hatten keinen Kontakt mehr zur Oberfläche des Formeinsatzes, es handelt sich also um die erstarrte Schmelzefront. Aus den Daten vom AFM (Bild 42) lässt sich die Oberfläche des untersuchten Bereiches darstellen. Dabei zeigt sich, dass die Strukturen angussnah quer zur Scanrichtung nach unten hin zunehmend tiefer liegen.

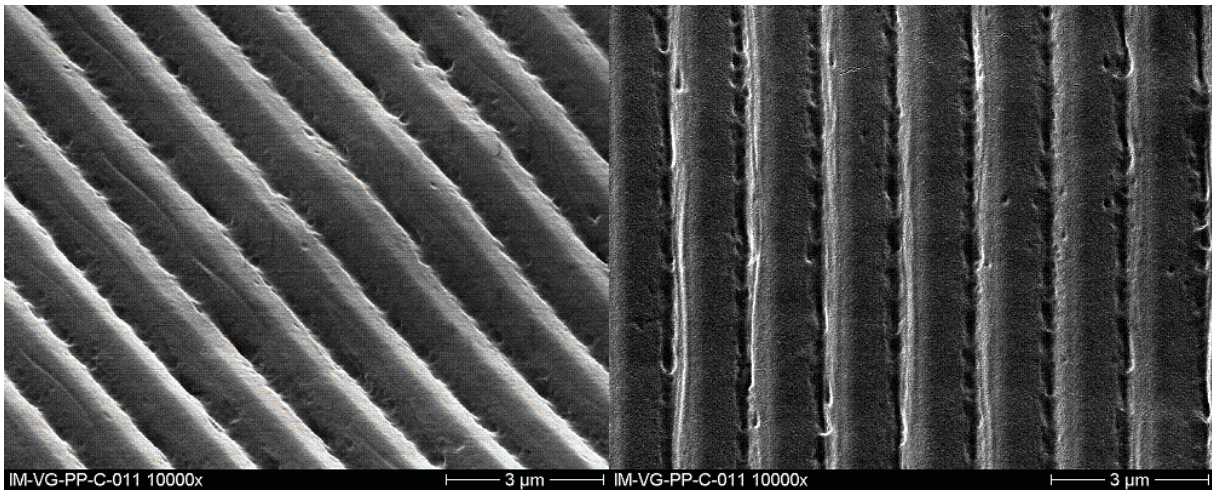


Bild 41: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im konventionellen Spritzgießverfahren, 10.000-fache Vergrößerung.

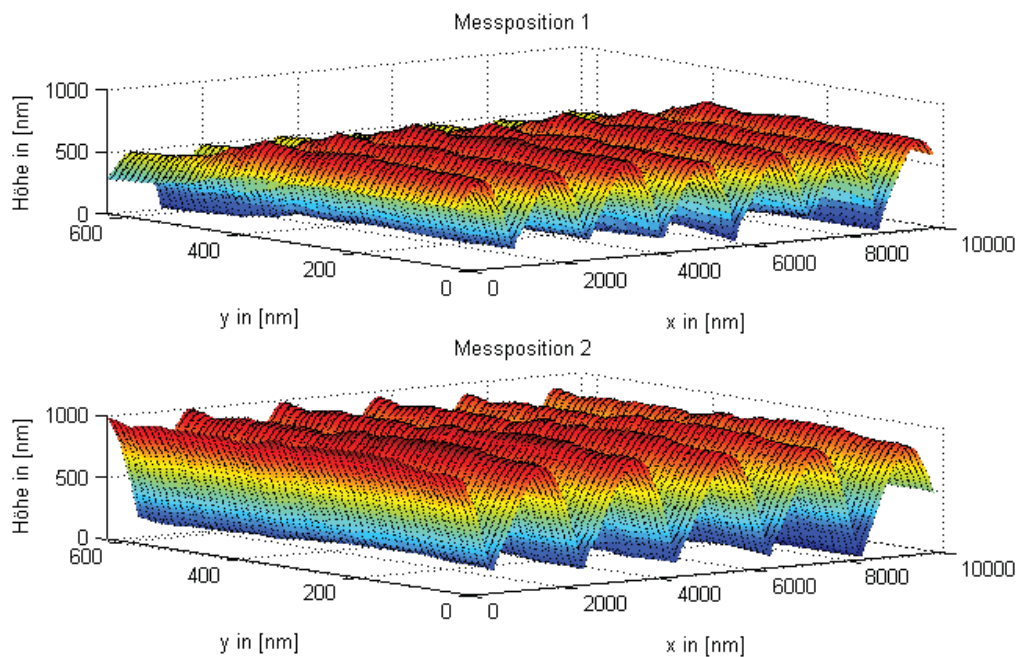


Bild 42: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im konventionellen Spritzgießverfahren, interpretiert mit MATLAB.

#### 4.2.2 Konventionelles Spritzprägen

Bei den konventionellen Spritzprägeversuchen wurden dieselben Parameter variiert wie bei den konventionellen Spritzgießversuchen. Die Effekte sowie deren statistische Signifikanz und die erreichten Abformungsgrade bei den unterschiedlichen Versuchsstufen sind in Tabelle 11,

*Tabelle 12* und

*Tabelle 13* angeführt.



Aus den Versuchen mit COP ging hervor, dass mit steigender Massetemperatur eine extreme Zunahme der Abformgüte verbunden war. Mit steigender Einspritzgeschwindigkeit nahm die Abformung an Messposition 2 tendenziell ab, an Messposition 1 hingegen tendenziell zu. Außer bei hohem Nachdruck, wo die Abformung konstant blieb, konnte mit steigender Werkzeugtemperatur immer bessere Abformung erreicht werden. Eine Erhöhung des Nachdrucks hatte bessere Abformung zur Folge. Die Fließweglänge hatte nahezu keinen Einfluss auf die Abformgüte. Die beste Abformung wurde bei hoher Masse- und Werkzeugtemperatur, niedriger Einspritzgeschwindigkeit und hohem Nachdruck erreicht. Das schlechteste Resultat wurde bei niedriger Massetemperatur, hoher Einspritzgeschwindigkeit, niedriger Werkzeugtemperatur und niedrigem Nachdruck beobachtet.

*Tabelle 11: Gemessene Abformungsgrade in COP und PP, hergestellt im konventionellen Spritzprägeverfahren. Streuung der Messwerte: 0,028.*

$T_M$	$v_E$	COP		PP	
		Abformungsgrad		Abformungsgrad	
		Messposition 1	Messposition 2	Messposition 1	Messposition 2
mittel	mittel	0,52	0,54	0,59	0,62
niedrig	niedrig	0,20	0,19	*1	*
hoch	niedrig	0,63	0,65	0,64	0,73
niedrig	hoch	0,23	0,17	0,59	0,55
hoch	hoch	0,65	0,63	0,51	0,60
$T_W$	$p_N$				
mittel	mittel	0,52	0,54	0,59	0,62
niedrig	niedrig	0,37	0,35	0,52	0,59
hoch	niedrig	0,47	0,44	0,54	0,64
niedrig	hoch	0,61	0,63	0,57	0,65
hoch	hoch	0,67	0,65	0,58	0,64

<sup>1</sup> Bei diesen Versuchen wurde das Werkzeug überspritzt. Aus diesem Grund sind hierfür keine Daten verfügbar.

Tabelle 12: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in COP und deren Signifikanzniveaus.

COP	Angussnah		Angussfern	
	Effekt	Signifikanzniveau p	Effekt	Signifikanzniveau p
$T_M$	0,431	$3,74 \cdot 10^{-25}$	0,447	$8,19 \cdot 10^{-30}$
$v_E$	0,001	0,572	-0,023	0,015
Wechselwirkung $T_M$ und $v_E$	0,002	0,854	-0,007	0,409
$T_W$	0,062	$9,86 \cdot 10^{-6}$	0,052	$3,11 \cdot 10^{-5}$
$p_N$	0,223	$1,10 \cdot 10^{-17}$	0,239	$1,01 \cdot 10^{-19}$
Wechselwirkung $T_W$ und $p_N$	-0,018	0,139	-0,037	0,001

Ähnlich dem Spritzgießen konnte man in den SEM-Aufnahmen die gute Abformung am Kerbengrund und die erstarre Schmelzefront erkennen (Bild 43). Auffallend ist die Regelmäßigkeit, mit der die Struktur abgeformt wird. Zwischen den einzelnen Kerben sind kaum Unterschiede erkennbar (Bild 44).

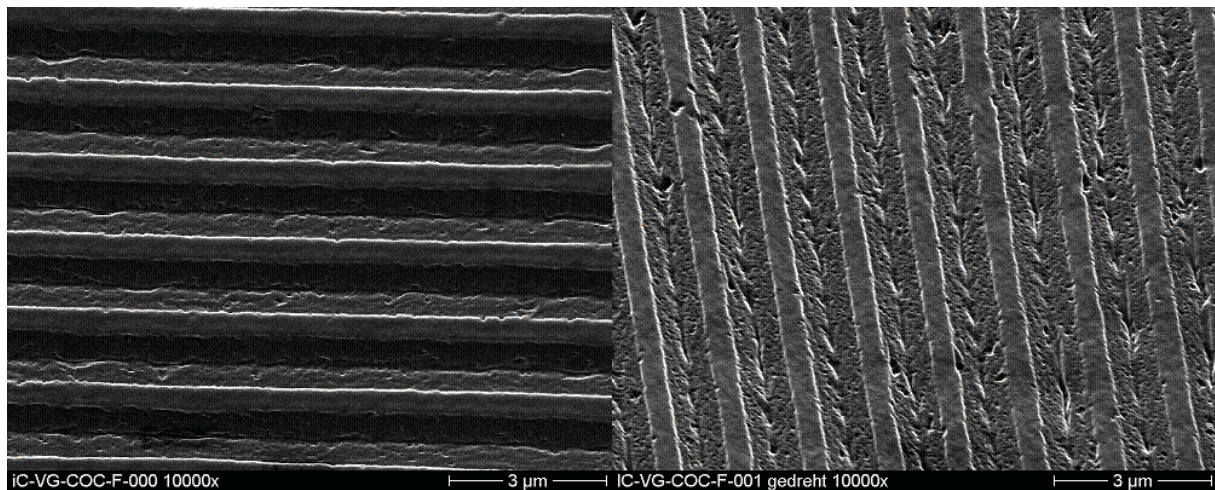


Bild 43: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im Spritzprägeverfahren, 10.000-fache Vergrößerung.

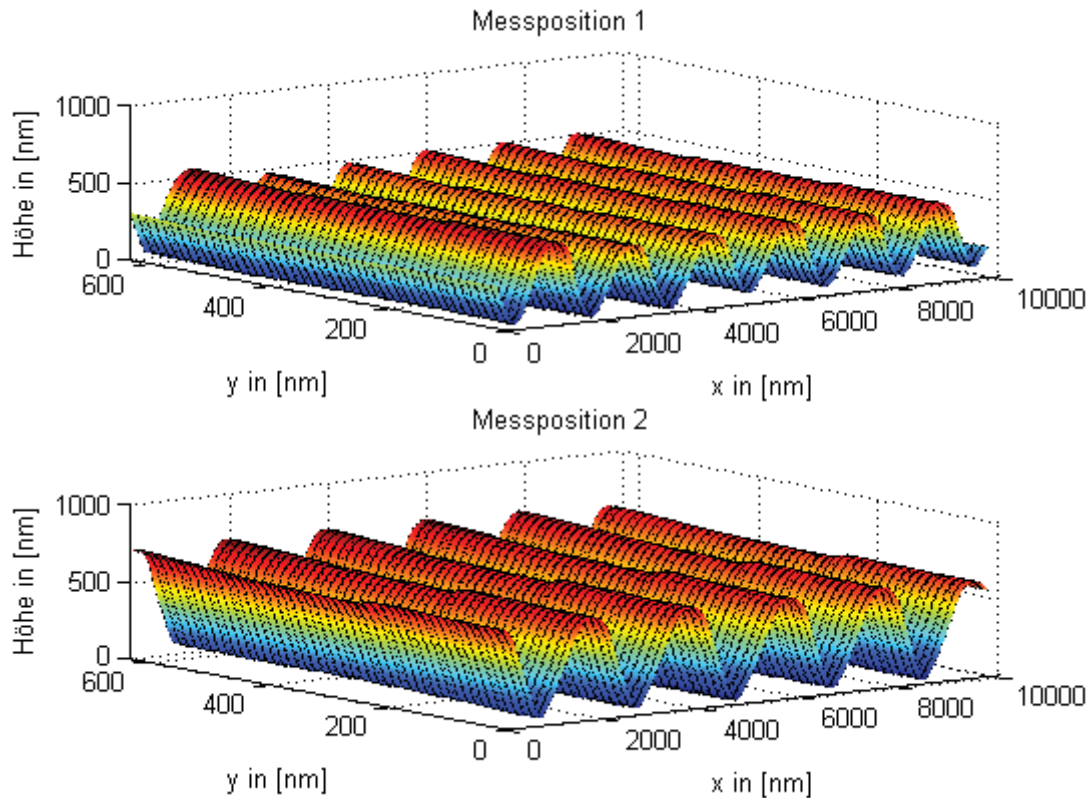


Bild 44: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im Spritzprägeverfahren.

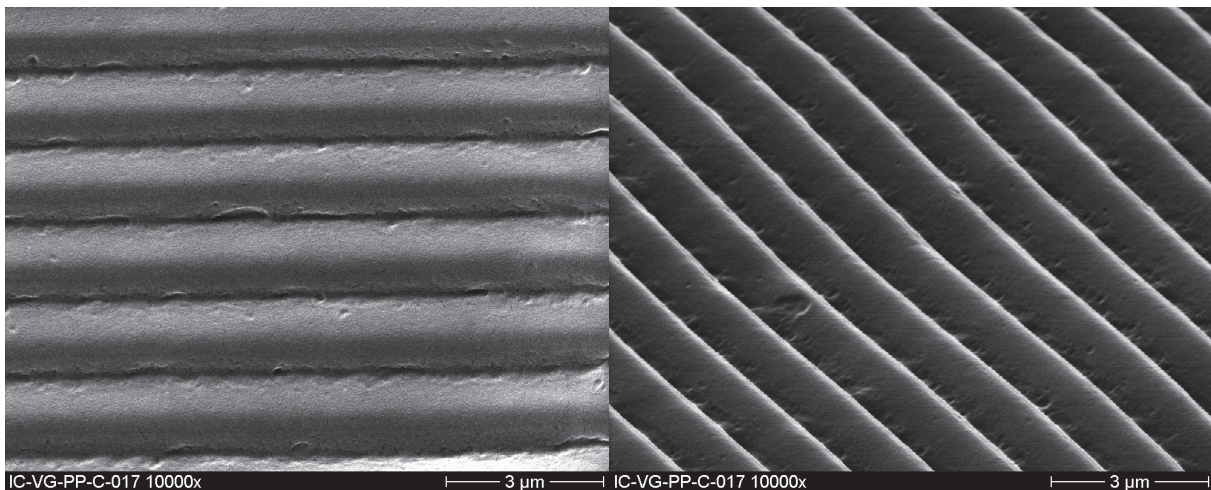
Tabelle 13: Effekte der veränderten Größen auf die normierte Abformung der Struktur in PP und zugehörige Signifikanzniveaus.

PP	Angussnah		Angussfern	
	Effekt	Signifikanzniveau p	Effekt	Signifikanzniveau p
$T_M$	-0,001	9,58E-01	0,092	1,53E-06
$v_E$	-0,049	1,41E-04	-0,077	2,10E-05
Wechselwirkung $T_M$ und $v_E$	-0,071	5,85E-07	-0,062	3,38E-04
$T_W$	0,031	5,16E-02	0,010	4,44E-01
$p_N$	0,030	6,33E-02	0,046	1,39E-03
Wechselwirkung $T_W$ und $p_N$	*	*	*	*

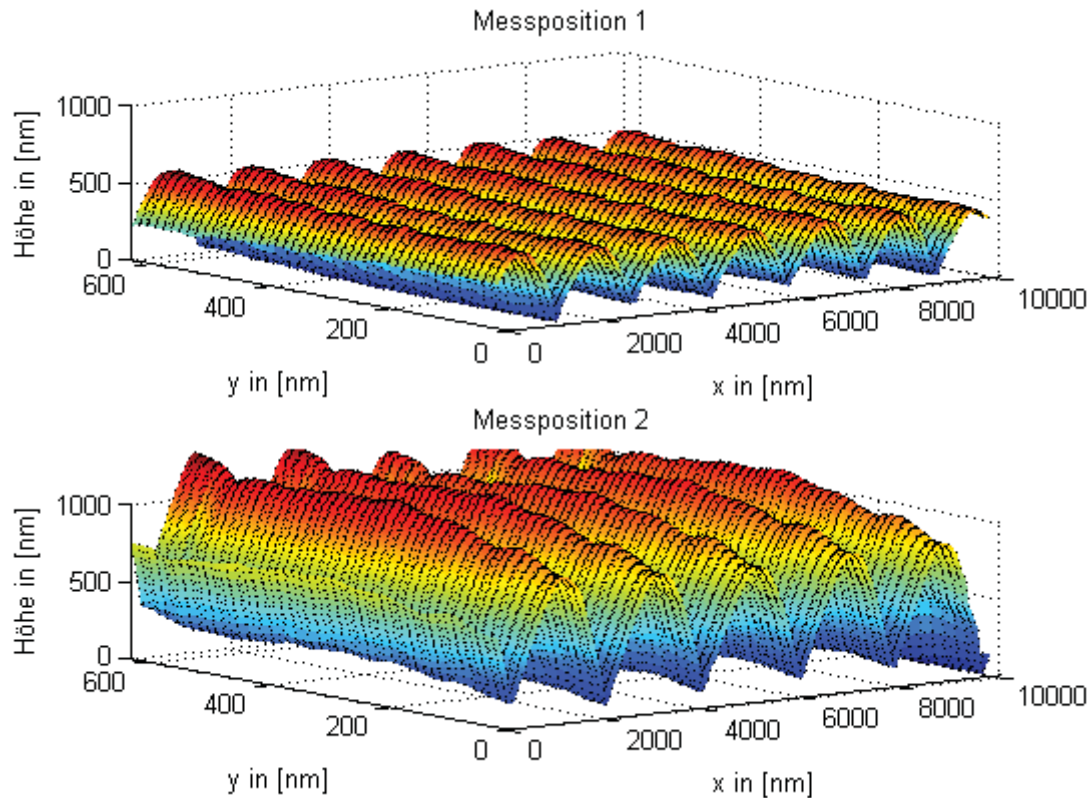
Beim Spritzprägen mit PP zeigte sich, dass höhere Massetemperatur an Messposition 2 zu besserer Abformung führte. Angussnah wurde bei hoher Einspritzgeschwindigkeit eine deutliche Abnahme mit steigender Massetemperatur gemessen. Mit steigender Einspritzgeschwindigkeit nahm die Abformung bei hoher Massetemperatur ab, bei niedriger Massetemperatur blieb die Abformgüte konstant. Mit steigendem Nachdruck und steigender Werkzeugtemperatur konnte eine

Verbesserung der Abformgüte erreicht werden. Über den Fließweg war eine Verbesserung der Abformung bemerkbar. Das beste Resultat konnte mit hohem Nachdruck, hoher Masse- und Werkzeugtemperatur und niedriger Einspritzgeschwindigkeit erreicht werden. Mit niedrigem Nachdruck, niedriger Masse- und Werkzeugtemperatur und hoher Einspritzgeschwindigkeit wurde die schlechteste Abformung erreicht.

Die Untersuchung im Elektronenmikroskop zeigte keine wesentlichen Unterschiede in der Abformung der Strukturen im Vergleich zu jenen Proben, die im Spritzgießverfahren hergestellt wurden (Bild 45). Man erkennt die gute Abformung am Kerbengrund. Man sieht weitgehend glatte Oberflächen mit wenigen Kratzern und Poren an den Flanken der Kerben (Bild 46). Dies bedeutet, dass die Schmelze nicht so lange an den Kerbenflanken entlang floss, wie dies bei COP der Fall war. Dies führt zu dem Schluss, dass die Schmelze durch den Druck in die Kerben gepresst wurde, die erstarrte Randschicht jedoch schon zu dick war, um die Kerben und Poren noch abzuformen. Ähnlich wie bei COP erschienen die Kerben in den Aufnahmen des AFM regelmäßiger. Dies gilt jedoch nur ausnahmsweise. An der angusssfernen Messstelle zeigte sich eine Verschiebung des Kerbengrundes und der Spitzen nach oben hin. Die Höhendifferenz zwischen Kerbengrund und Kerbenspitze änderte sich jedoch nicht (Bild 46).



*Bild 45: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im Spritzprägeverfahren, 10.000-fache Vergrößerung.*



*Bild 46: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im Spritzprägeverfahren.*

### 4.2.3 Spritzgießen mit Infrarot-variothermer Temperierung

Beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung wurden ebenfalls 2 vollfaktorielle 2<sup>2</sup>-Faktoren-Versuchspläne durchgeführt. Allerdings wurden die Versuchspläne leicht modifiziert. Um den Einfluss der unterschiedlichen Werkzeugtemperatur zu untersuchen, wurde das Werkzeug mit den Temperiergeräten auf 80 °C vorgeheizt und dann auf die entsprechende Zieltemperatur beheizt. Dies verkürzte auch die erforderliche Heizzeit. Die Ergebnisse der variothermen Versuche sind in Tabelle 14, Tabelle 15 und Tabelle 16 dargestellt.

Aus den Spritzgießversuchen mit variothermer Prozessführung bei COP ging hervor, dass die Abformung an Messposition 1 bei hoher Einspritzgeschwindigkeit mit steigender Massetemperatur zunahm. Angussfern, an Messposition 2, blieb die Abformung konstant. Nahm die Einspritzgeschwindigkeit oder die Massetemperatur ab, war auch bei der Abformung eine tendenzielle Verminderung feststellbar. Mit steigendem Nachdruck nahm die Abformgüte zu wobei dieser Effekt bei niedriger

Werkzeugtemperatur nur tendenziell war. Mit steigender Werkzeugtemperatur nahm die Abformung bei hohem Nachdruck geringfügig zu, bei niedrigem Nachdruck hingegen nahm sie geringfügig ab. Mit steigender Fließweglänge nahm die Abformung geringfügig zu. Hier trat vermutlich derselbe Effekt ein, der zuvor schon bei den Test mit PP vermutet wird, da die Schmelze wegen der höheren Werkzeugtemperatur länger fließfähig bleibt. Das beste Ergebnis konnte mit hoher Massetemperatur, hoher Werkzeugtemperatur, niedriger Einspritzgeschwindigkeit und hohem Nachdruck erreicht werden. Bei niedriger Werkzeugtemperatur, niedriger Massetemperatur, hoher Einspritzgeschwindigkeit und geringem Nachdruck wurde das schlechteste Ergebnis beobachtet.

Die Aufnahmen mit dem SEM bzw. dem AFM (Bild 47 und Bild 48) zeigen sehr gute Abformung. Die Spitzen der abgeformten Kerben sind deutlich erkennbar. An den Flanken und am Grund der Kerben sind Fehler vom Formeinsatz feststellbar.

*Tabelle 14: Gemessene Abformungsgrade in COP und PP, hergestellt im Spritzgießverfahren mit variothermer Prozessführung, Streuung der Messwerte: 0,041.*

$T_M$	$v_E$	COP		PP	
		Abformungsgrad		Abformungsgrad	
		Messposition 1	Messposition 2	Messposition 1	Messposition 2
mittel	mittel	0,97	0,97	0,94	0,92
niedrig	niedrig	0,96	0,98	0,95	1,00
hoch	niedrig	0,90	0,96	0,93	0,93
niedrig	hoch	0,91	0,97	0,94	0,92
hoch	hoch	0,93	0,97	0,90	0,90
$T_W$	$p_N$				
mittel	mittel	0,97	0,97	0,94	0,92
niedrig	niedrig	0,86	0,92	0,96	0,95
hoch	niedrig	0,81	0,87	0,95	0,91
niedrig	hoch	0,92	0,92	0,94	0,98
hoch	hoch	0,95	0,99	0,95	0,94

Tabelle 15: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in COP und deren Signifikanzniveaus.

COP	angussnah		angussfern	
	Effekt	Signifikanzniveau p	Effekt	Signifikanzniveau p
$T_M$	-0,021	0,238	-0,007	0,473
$v_E$	0,000	0,992	0,002	0,824
Wechselwirkung $T_M$ und $v_E$	0,022	0,224	0,011	0,260
$T_W$	0,097	$3,79 \cdot 10^{-7}$	0,071	$3,70 \cdot 10^{-5}$
$p_N$	-0,007	0,633	0,003	0,859
Wechselwirkung $T_W$ und $p_N$	0,035	0,021	0,041	$8,05 \cdot 10^{-3}$

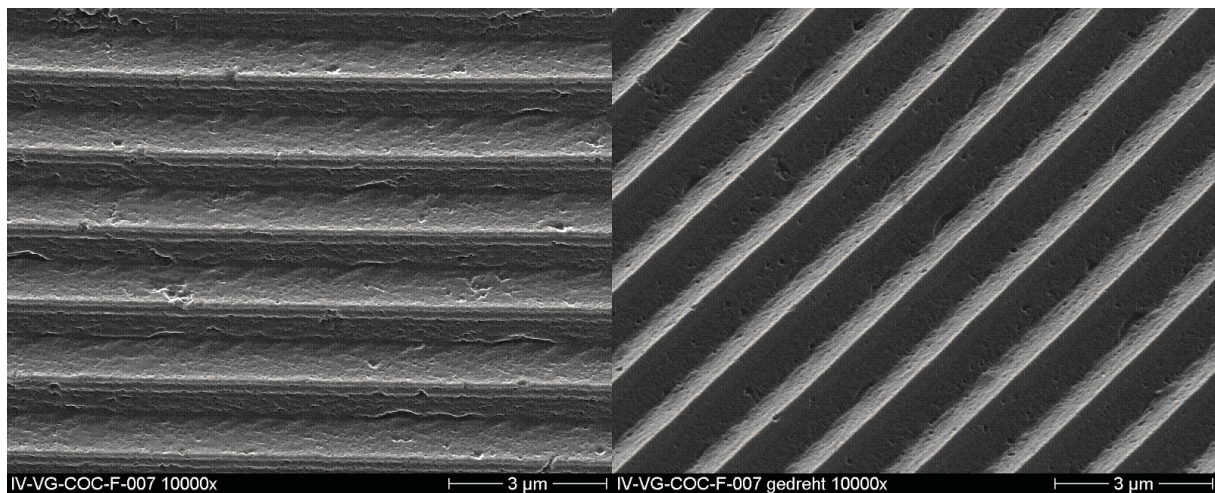


Bild 47: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im Spritzgießverfahren mit variothermer Prozessführung, 10.000-fache Vergrößerung.

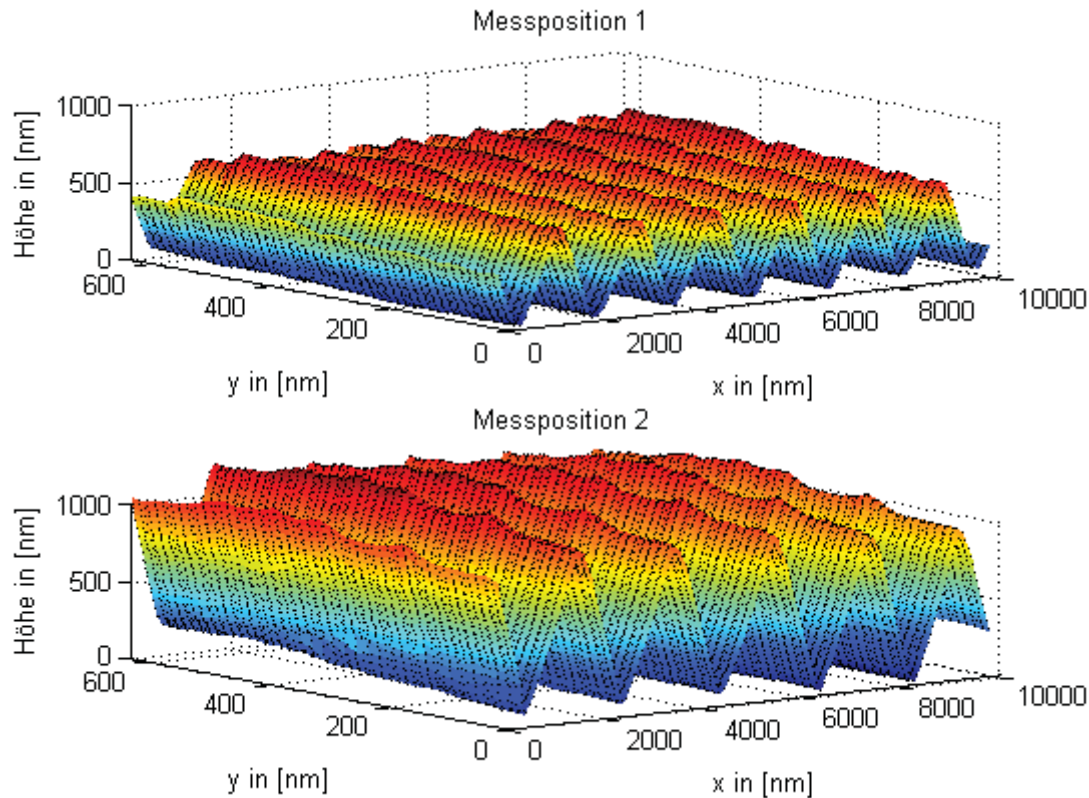


Bild 48: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im Spritzgießverfahren mit variothermer Prozessführung.

Tabelle 16: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in PP und deren Signifikanzniveaus.

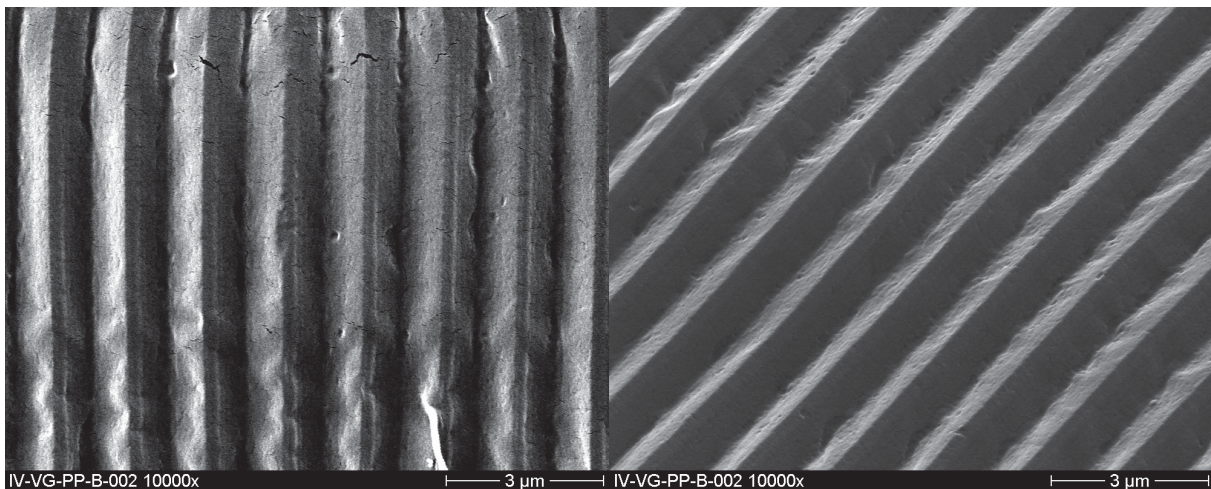
PP	angussnah		angussfern	
	Effekt	Signifikanz-niveau p	Effekt	Signifikanz-niveau p
$T_M$	-0,031	0,049	-0,016	0,382
$v_E$	-0,028	0,071	-0,039	0,040
Wechselwirkung $T_M$ und $v_E$	-0,031	0,052	0,015	0,427
$T_W$	-0,022	0,070	0,016	0,462
$p_N$	0,012	0,310	-0,019	0,370
Wechselwirkung $T_W$ und $p_N$	0,004	0,719	0,009	0,688

Bei den Versuchen mit PP zeigte sich, dass mit steigender Massetemperatur und steigender Einspritzgeschwindigkeit eine geringfügige Abnahme der Abformung einher geht. Ausgenommen davon ist eine geringe Massetemperatur, wo die Abformung konstant blieb. Mit steigendem Nachdruck nahm die Abformgüte bei hoher Werkzeugtemperatur tendenziell zu. Bei niedriger Werkzeugtemperatur blieb



sie mit steigendem Nachdruck konstant. Mit steigender Werkzeugtemperatur nahm die Abformgüte tendenziell ab, dieser Effekt konnte jedoch mit hohem Nachdruck ausgeglichen werden. Die Lage der Messposition zeigte kaum Einfluss auf die Abformung, außer bei niedriger Massetemperatur und niedriger Einspritzgeschwindigkeit, wo die Abformung geringfügig zunahm. Die beste Abformgüte konnte mit niedriger Massetemperatur, niedriger Einspritzgeschwindigkeit, hohem Nachdruck und hoher Werkzeugtemperatur erreicht werden. Das schlechteste Resultat wurde bei hoher Massetemperatur, hoher Einspritzgeschwindigkeit, niedriger Werkzeugtemperatur und niedrigem Nachdruck beobachtet.

Auf den Bildern aus dem Elektronenmikroskop kann man die sehr gute Abformung der V-Kerben aus PP erkennen (Bild 49). Sowohl der Kerbengrund als auch die Spitze sind deutlich erkennbar. Der Unterschied zwischen den besten und schlechtesten Teilen innerhalb des Prozessfensters ließ sich am Elektronenmikroskop nicht erkennen. Bei diesen Teilen nahm die Abformung über die Fließweglänge im Mittel leicht ab.



*Bild 49: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im Spritzgießverfahren mit variothermer Prozessführung, 10.000-fache Vergrößerung.*

#### **4.2.4 Vergleich von konventionellem Spritzgießen und Spritzprägen**

Für den Vergleich von Spritzgießen und Spritzprägen wurden die Daten aus den vollfaktoriellen Versuchen der jeweiligen Verfahren verwendet. Der Einsatz der Prägetechnik stellte hierbei eine dritte Faktorstufe dar. Somit konnten  $2^3$ -Faktoren-Versuche realisiert werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17, Tabelle 18 und

Tabelle 19 dargestellt. Das Prägeverfahren hatte einen positiven Einfluss auf die Regelmäßigkeit der Strukturen. Innerhalb des Messbereiches fanden sich weniger Ausreißer entlang einer Kerbe. Vergleich man die Kerben untereinander, waren diese sehr ähnlich. Dieser Effekt trat bei den Formteilen aus COP (vgl. Bild 39 und Bild 40 mit Bild 43 und Bild 44) deutlicher auf als bei jenen aus PP (Bild 41 und Bild 42 mit Bild 45 und Bild 46).

*Tabelle 17: Vergleich der gemessenen Abformung in PP und COP mit konventionellem Spritzgießen und Spritzprägen.*

Versuchsnummer	$T_m$	$v_e$	Prägen	COP		PP	
				Abformungsgrad		Abformungsgrad	
				angussnah	angussfern	angussnah	angussfern
2	niedrig	niedrig	aus	0,38	0,33	0,56	0,58
3	hoch	niedrig	aus	0,62	0,59	0,6	0,72
4	niedrig	hoch	aus	0,39	0,31	0,55	0,59
5	hoch	hoch	aus	0,61	0,59	0,54	0,67
6	niedrig	niedrig	ein	0,2	0,19	*	*
7	hoch	niedrig	ein	0,63	0,65	0,64	0,73
8	niedrig	hoch	ein	0,23	0,17	0,59	0,55
9	hoch	hoch	ein	0,65	0,63	0,51	0,6
Versuchsnummer	$T_w$	$p_n$	Prägen				
				COP		PP	
				angussnah	angussfern	angussnah	angussfern
2	niedrig	niedrig	aus	0,33	0,27	0,53	0,61
3	hoch	niedrig	aus	0,47	0,41	0,55	0,67
4	niedrig	hoch	aus	0,63	0,61	0,5	0,67
5	hoch	hoch	aus	0,63	0,67	0,53	0,64
6	niedrig	niedrig	ein	0,37	0,35	0,52	0,59
7	hoch	niedrig	ein	0,47	0,44	0,54	0,64
8	niedrig	hoch	ein	0,61	0,63	0,57	0,65
9	hoch	hoch	ein	0,67	0,65	0,58	0,64

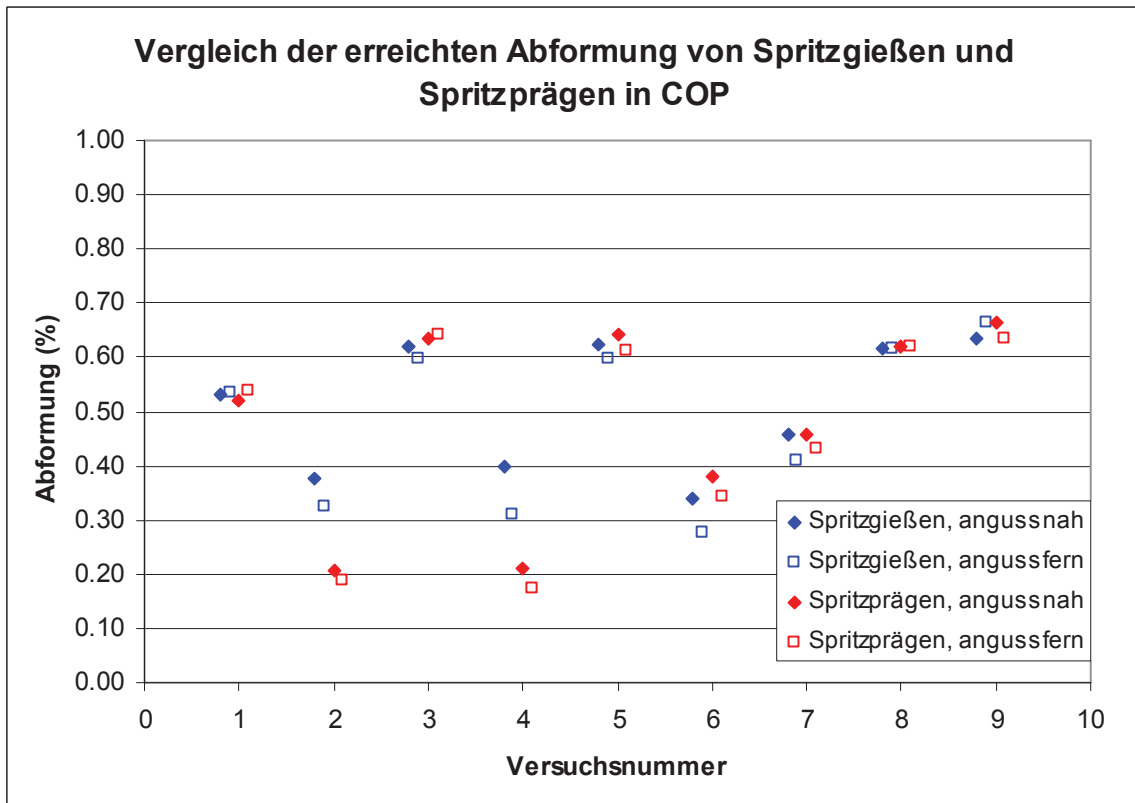
Bei COP konnte eine geringfügige Verbesserung festgestellt, wenn die Proben im Spritzprägeverfahren hergestellt wurden. Ausgenommen davon waren jene Versuche mit geringer Massetemperatur, bei denen mit dem Einsatz der Prägetechnik eine

wesentliche Verschlechterung der Abformung auftrat (Bild 50, Versuchsnummern 2 und 4). Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die erstarrte Randschicht bei geringer Massetemperatur so dick wird, dass die Struktur weder durch den lokalen Schmelzedruck in der Füllphase noch durch den Nachdruck gefüllt werden konnte.

Aus den Versuchen lässt sich zudem schließen, dass die Wechselwirkung zwischen Massetemperatur und Einsatz der Prägetechnik einen positiven Einfluss auf die Abformung hat.

*Tabelle 18: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in COP und deren Signifikanzniveaus.*

COP	Messposition 1		Messposition 2	
	Effekt [%]	Signifikanzniveau p	Effekt [%]	Signifikanzniveau p
$T_M$	0.333	0.00E+00	0.364	0.00E+00
$v_e$	0.010	2.62E-01	-0.014	4.01E-02
Prägen	-0.081	3.08E-12	-0.051	4.91E-10
Wechselwirkung $T_M$ und $v_e$	-0.004	6.98E-01	0.000	9.88E-01
Wechselwirkung $T_M$ und Prägen	0.098	4.46E-15	0.083	1.85E-17
Wechselwirkung $v_e$ und Prägen	-0.004	6.91E-01	-0.007	2.79E-01
$p_N$	0.063	1.63E-08	0.072	1.50E-13
$T_w$	0.228	1.39E-30	0.269	0.00E+00
Wechselwirkung $p_N$ und $T_w$	-0.032	1.53E-03	-0.040	1.54E-06
Wechselwirkung $p_n$ und Prägen	-0.001	9.18E-01	-0.020	8.10E-03
Wechselwirkung $T_w$ und Prägen	-0.004	6.54E-01	-0.030	1.96E-04



*Bild 50: Vergleich der erreichten Abformung in COP an zwei unterschiedlichen Stellen mit den Verfahren konventionelles Spritzgießen und Spritzprägen.*

Bei PP zeigte sich, dass durch den Einsatz der Prägetechnik die Abformung der mikrostrukturierten V-Kerben in PP nicht signifikant verbessert wurde (Bild 51). Davon ausgenommen sind die Versuche mit hohem Nachdruck (8 und 9), bei denen an Messposition 1 die Abformung verbessert wurde.

Tabelle 19: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in PP und deren Signifikanzniveaus.

PP	angussnah		angussfern	
	Effekt	Signifikanzniveau p	Effekt	Signifikanzniveau p
$T_M$	0,004	0,642	0,100	$8,64 \cdot 10^{-16}$
$v_e$	-0,043	$2,41 \cdot 10^{-6}$	-0,052	$3,46 \cdot 10^{-7}$
Prägen	0,018	0,034	-0,024	0,012
Wechselwirkung $T_M$ und $v_e$	-0,046	$4,62 \cdot 10^{-7}$	-0,048	$2,19 \cdot 10^{-6}$
Wechselwirkung $T_M$ und Prägen	-0,004	0,591	-0,009	0,34
Wechselwirkung $v_e$ und Prägen	-0,006	0,463	-0,025	0,009
$p_N$	0,026	0,011	0,010	0,242
$T_w$	-0,009	0,375	0,037	$4,87 \cdot 10^{-5}$
Prägen	0,033	0,001	-0,016	0,069
Wechselwirkung $p_N$ und $T_w$	-0,015	0,146	-0,027	0,002
Wechselwirkung $p_n$ und Prägen	0,005	0,611	0,000	0,984
Wechselwirkung $T_w$ und Prägen	0,039	$2,71 \cdot 10^{-4}$	0,009	0,275

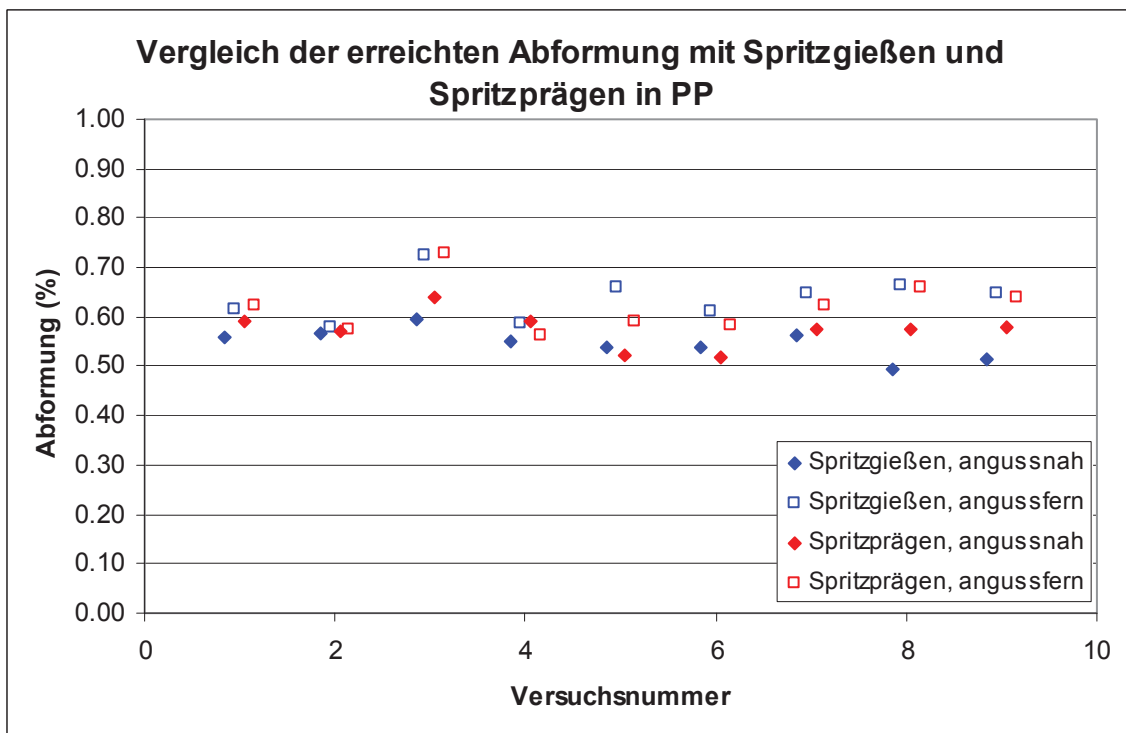


Bild 51: Vergleich der erreichten Abformung in PP an zwei unterschiedlichen Stellen mit den Verfahren konventionelles Spritzgießen und Spritzprägen.

#### 4.2.5 Vergleich von Spritzgießen und Spritzgießen mit variothermer Prozessführung

Für den Vergleich von konventionellem Spritzgießen und Spritzgießen mit variothermer Prozessführung wurde bei konstanten Bedingungen der Einfluss der erhöhten Werkzeugoberflächentemperatur untersucht. Die restlichen Faktoren wurden nicht mehr variiert. Um die Werkzeugoberflächentemperatur möglichst genau zu kennen, wurde zusätzlich zum Fühler, welcher in der abhebbaren Trägerplatte die Temperatur maß, noch das Signal des Forminnentempersensors MTS 408 verwendet. Mit diesem konnte man die Temperatur der Werkzeugoberfläche vor dem Einspritzen der Schmelze messen. Dadurch war die effektive Werkzeugoberflächentemperatur, mit welcher die Schmelze bei der Füllung in Kontakt kam, bekannt. Dabei traten Temperaturunterschiede zwischen den Messsignalen des Forminnenthermometers und des Thermoelements in der abhebbaren Trägerplatte von bis zu 15 °C auf. Dies ist auf den Abstand zwischen Werkzeugoberfläche und dem Thermoelement, das Abstrahlen der Wärme von der Oberfläche an die Umgebung und auf die Verzögerung durch den thermischen Widerstand bei der Wärmeleitung zurückzuführen. Im gegebenen Fall wäre es ungünstig gewesen, abzuwarten, bis sich die Temperaturen angleichen, da es dadurch zu einem Wärmeverlust von der Werkzeugoberfläche an die Umgebungsluft und in das Werkzeuginnere gekommen wäre. Dadurch wäre die Abformung verschlechtert worden. Die vom Forminnenthermometer gemessene Temperatur wurde zur Ermittlung der Kontakttemperatur zwischen Schmelze und Werkzeugoberfläche (Tabelle 20 und Tabelle 21) verwendet. Diese ist entscheidend für die Abformung [2]. Zur Bestimmung der Kontakttemperatur (Glg. (10)) benötigt man die Wärmeeindringzahl der beiden kontaktierenden Medien und deren Temperaturen. Die Wärmeeindringzahl (Glg. (9)) setzt sich aus der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der Dichte  $\rho$  und der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  zusammen [1]. Die temperaturabhängigen Materialdaten der Kunststoffe wurden für die aktuelle Schmelzetemperatur aus den entsprechenden Verläufen abgelesen (vgl. Kap. 3.1). Die Materialdaten für den verwendeten Formenstahl wurden aus [18] entnommen.

$$\text{Wärmeeindringzahl } b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (9)$$

$$\text{Kontakttemperatur } T_K = \frac{b_1 \cdot T_1 + b_2 \cdot T_2}{b_1 + b_2} \quad (10)$$

Tabelle 20: Eingestellte und mit dem MTS 408 Forminnthermometer gemessene Formeinsatzoberflächen- und Schmelzetemperatur und die daraus errechnete Kontakttemperaturen für COP.

Temperatur beim Einspritzen (°C)			
Solltemperatur der Werkzeugoberfl.	T <sub>Formeinsatz</sub>	T <sub>Schmelze</sub>	Kontakttemperatur
40	39,0	249,1	52,7
60	58,0	253,9	70,8
80	77,9	252,6	89,3
105	98,4	256,2	108,7
115	109,1	253,6	118,5
125	119,3	257,3	128,3

Tabelle 21: Eingestellte und mit dem MTS 408 Forminnthermometer gemessene Formeinsatzoberflächen- und Schmelzetemperatur und die daraus errechnete Kontakttemperatur für PP.

Temperatur beim Einspritzen (°C)			
Solltemperatur der Werkzeugoberfl.	T <sub>Formeinsatz</sub>	T <sub>Schmelze</sub>	Kontakttemperatur
40	39,0	233,7	52,2
60	58,0	236,7	70,1
80	77,9	238,1	88,8
130	121,3	234	129,0
140	129,4	244,4	137,2
150	133,0	234,9	139,9

Bei den Versuchen mit COP zeigte sich ein deutlicher, beinahe linearer Zusammenhang zwischen Werkzeugoberflächentemperatur und erreichter Abformung. Ab einer Temperatur von 100 °C erreichte man eine Abformung der V-Kerben bis zu 97 %, darüber konnte die Abformung nur noch geringfügig verbessert werden (Bild 52). Da noch nicht die maximale Abformung erreicht wurde, spielte hier vielleicht noch ein anderer Effekt, wie z.B. die Schwindung oder Unregelmäßigkeiten der Strukturen eine Rolle.

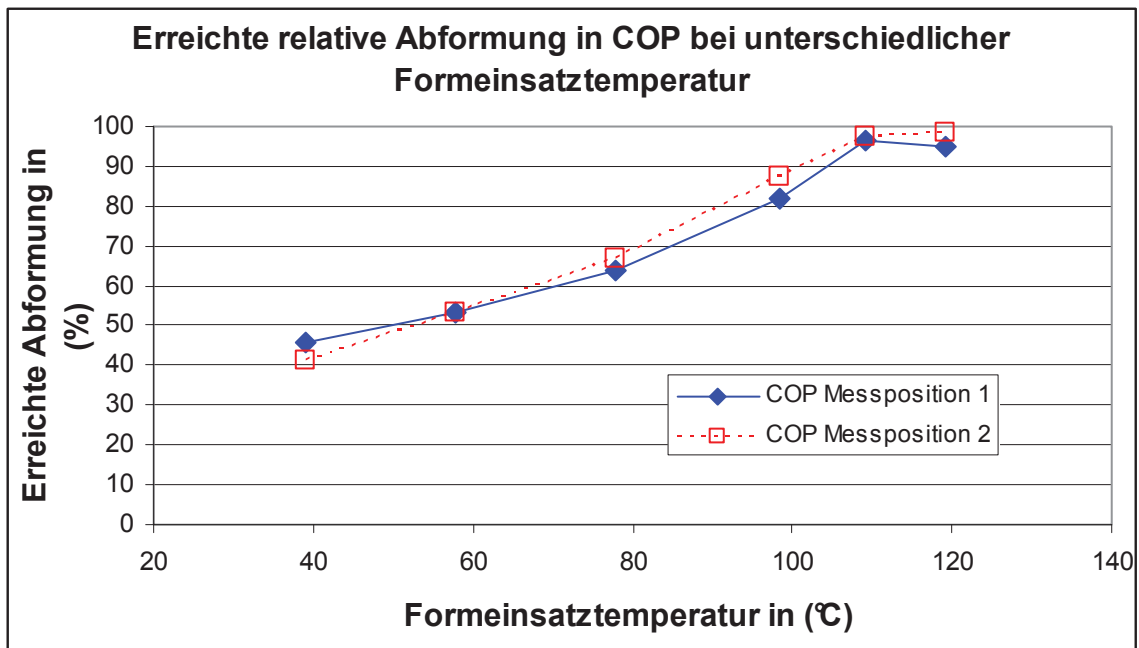


Bild 52: Mittels Spritzgießen in COP erreichte Abformung über der Formeinsatzoberflächentemperatur.

Die Untersuchung der Abformung in PP zeigte, dass die erreichte Abformung der V-Kerben bei den untersuchten erhöhten Temperaturniveaus wesentlich besser war als bei den niedrigen Temperaturen. Überraschenderweise zeigte sich bei den Tests mit variothermer Prozessführung auch, dass ab einer Formeinsatzoberflächentemperatur von etwa 120 °C keine signifikante Verbesserung der Abformung mehr erreicht wurde (Bild 53). Ob der Schwellwert, ab dem keine Verbesserung der Abformung mehr erreicht wird, bereits tiefer liegt, muss in einer eigenen Versuchsserie ermittelt werden.



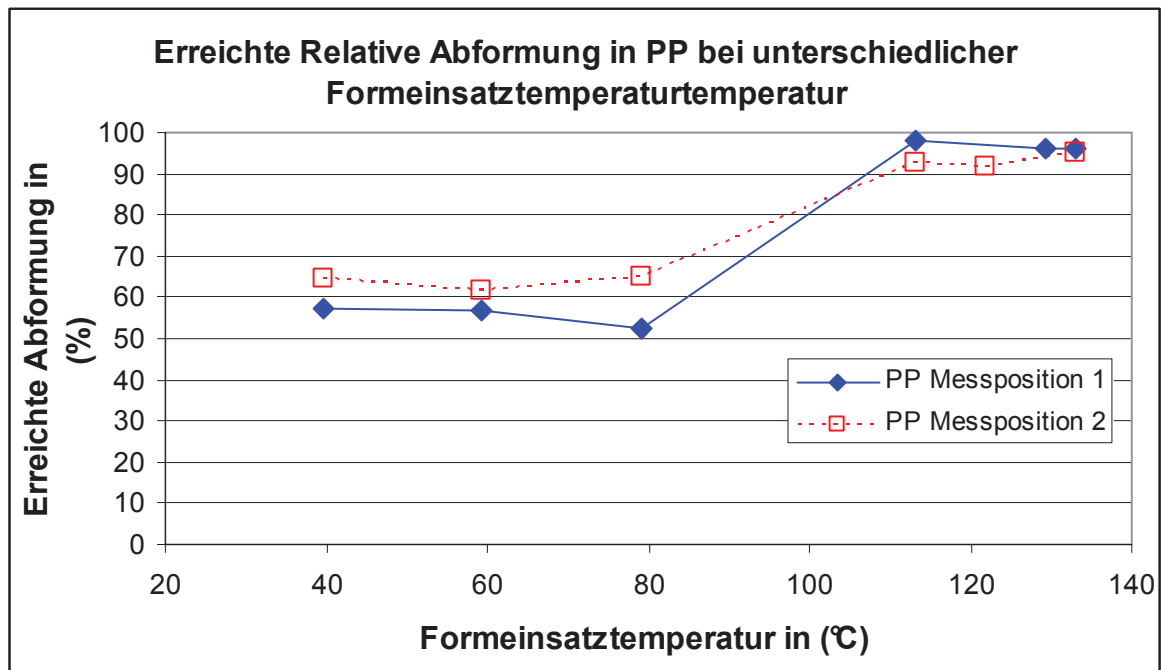


Bild 53: Mittels Spritzgießen in PP erreichte Abformung über der Formeinsatzoberflächentemperatur.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Abformung von V-Kerben mit Abmessungen im Submikrometerbereich mit den Verfahren Spritzgießen, Spritzprägen und Spritzgießen mit variothermer Prozessführung untersucht. Zudem wurden die Verfahren untereinander verglichen. Dafür wurden die Materialien COP Zeonor 1060R und PP Dow H734-52 RNA verwendet.

Die Variation der Spritzgießparameter im führte zu dem Schluss, dass die Werkzeugtemperatur den größten Einfluss auf die Abformung von mikrostrukturierten V-Kerben hat. Eine Erhöhung der Schmelztemperatur verbesserte das Abformungsverhalten, allerdings in geringerem Ausmaß. Steigender Nachdruck hatte nur bei COP positiven Einfluss auf die Abformung. Die Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit hatte zumeist schlechtere Abformung zur Folge. Die untersuchten Wechselwirkungen hatten bei allen Tests im Spritzgießverfahren geringfügig negativen Einfluss festgestellt werden. Beim Spritzprägen konnte die Abformung in COP mit steigender Massetemperatur enorm verbessert werden beobachtet werden, wogegen sich diese Steigerung bei PP gering ausfiel. Mit steigendem Nachdruck und steigender Werkzeugtemperatur konnte mit beiden Materialien die Abformung verbessert werden. Steigende Einspritzgeschwindigkeit wirkte auch hier negativ. Steigender Nachdruck verbesserte die Abformung bei beiden Materialien. Die Wechselwirkungen wirkten bei COP geringfügig negativ. Die Wechselwirkung aus Massetemperatur und Einspritzgeschwindigkeit hatte auf die Abformung in PP negativen Einfluss.

Bei Spritzgießen mit variothermer Prozessführung konnte mit steigender Werkzeugtemperatur und hohem Nachdruck die Abformung verbessert werden. Hohe Massetemperatur und hohe Einspritzgeschwindigkeit verschlechterten die Abformung.

Im Vergleich von Spritzgießen und Spritzprägen zeigte sich, dass mit den gewählten Parametern nur ein kleiner Unterschied feststellbar war. Bei COP wirkte sich die Wechselwirkung aus Massetemperatur und dem Einsatz der Prägetechnik positiv auf die Abformung aus. Der Vergleich von Spritzgießen und Spritzgießen mit variothermer Prozessführung zeigte, dass mit variothermer Werkzeugtemperierung die Abformung erheblich verbessert werden konnte. Hohe Abformgrade von über 90 % konnten sowohl mit PP als auch mit COP erreicht werden.

Für COP ist eine Werkzeugtemperatur im Bereich der Glasübergangstemperatur (z.B. 105 °C) für hohe Abformungsgrade ausreichend. Weitere Untersuchungen im

Hinblick auf die Abformung von Mikrostrukturen in PP sind noch notwendig. Offensichtlich liegt die für hohe Abformung notwendige Werkzeugoberflächentemperatur unter 120 °C. Die in der Produktion von optischen Datenträgern erfolgreich verwendete Prägetechnik führte zu keiner besseren Abformung. Zu diesem Ergebnis sollten noch tiefer gehende Untersuchungen, beispielsweise mit unterschiedlichen Prägehüben und -drücken, durchgeführt werden. Für weitere Anwendungen empfiehlt sich der Einsatz von variothermer Werkzeugtemperierung, wenn mikrostrukturierte Oberflächen in Kunststoffen abgeformt werden sollen. Dabei sollten allerdings auch Überlegungen zur Temperaturhomogenität in der Kavität und zur gleichmäßigen Abkühlung gemacht werden.

Weitere Untersuchungen zum Effekt der Schwindung von Kunststoffen, vor allem von teilkristallinen Materialien wie PP, auf die Struktur sind insofern interessant, da durch Schwindung beispielsweise die Funktionalität eines Mikrofluidikelementes beeinträchtigt werden kann.

In anderen Arbeiten wurde festgestellt, dass die Einspritzgeschwindigkeit ebenso Einfluss auf die Abformung hat, welcher hier nicht nachgewiesen werden konnte. Um hier Klarheit im Bezug auf die Abformung von mikrostrukturierten V-Kerben zu schaffen, wären detailliertere Untersuchungen notwendig.

## 6 Literatur

- [1] *Baur, E., Brinkmann, S., Osswald, T.A., Schmachtenberg, E.:* „Saechtling Kunststoff Taschenbuch“, Carl Hanser Verlag München, 2007.
- [2] *Berger, G.R.:* Untersuchungen zur Abformung geometrischer und stochastischer Strukturen an Spritzgießformteilen. Dissertation an der Montanuniversität Leoben, 2006.
- [3] *Burkard, E., Schinköthe, W.:* Induktive Beheizung von Spritzgießwerkzeugen – eine Übersicht. Tagungsbandbeitrag zur SKZ Fachtagung „Spritzgießen von Elastomeren“, Würzburg, 2006.
- [4] *Burr, A., Müller, A., Kübler, M.:* Blitzheizungswerkstoff HDTM revolutioniert die Werkzeugtemperierung und beheizbare Werkzeugelemente, Heilbronn, 2006.  
<http://www.kunststoffe.hs-heilbronn.de/inhalte/forschungsbericht-htdm.pdf>
- [5] *Ecker, H.:* Fernmündliche Auskunft zum Ansprechverhalten des kombinierten Druck-Tempersensoren 6189A. Fa. Kistler Österreich, Wien, 15.5.2009.
- [6] *Flegler, S.L., Heckmann, J.W., Klomparen, K.L.:* Elektronenmikroskopie. Grundlagen, Methoden, Anwendungen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1995.
- [7] *Gärtner, R.:* Analyse der Prozesskette zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile durch Spritzgießen. Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2005.
- [8] *Giese, E.:* Fernmündliche Auskunft zum MTS 408 und dessen Verhalten bei geringen Temperaturen. FOS Messtechnik GmbH, Schacht-Audorf, Deutschland, 24.4.2009.
- [9] *Gießauf, J.:* Variotherme Temperierung – Methoden und Einsatzmöglichkeiten. Beitrag zur VDI-Spritzgießertagung, Baden-Baden, 2008.
- [10] *Han, X., Yokoi, H.:* Visualization Analysis of the Filling Behavior of Melt into Microscale V-Grooves During the Filling Stage of Injection Molding. *Polymer Engineering and Science*, **46**, 2006, S. 1590-1597.
- [11] *Howland, R., Benatar, L.:* A practical guide to scanning probe microscopy. Informationsmaterial von Fa. ThermoMicroscopes, Sunnyvale, USA, 2000.

- [12] *Kemmann, O.*: Untersuchungen zum Füllverhalten von mikrostrukturierten Formteilen beim Mikrospritzgießen von Polymerschmelzen. Dissertation an der Universität Stuttgart, 2002.
- [13] *Kleppmann, W.*: Taschenbuch Versuchsplanung. Praxisreihe Qualitätswissen. Hanser Fachbuchverlag, 2003.
- [14] N.N.: Betriebsanleitung zu Umschalteinheit Variotherm HB-VT 160-20. Grossenbacher Apparatebau AG, St. Gallen, Schweiz, 2009.
- [15] N.N. : Datenblatt „p-T-Sensor Typ 6189A“. Fa. Kistler, Winterthur, Schweiz, 2007, <http://www.kistler.com/mediaaccess/000-536d-02.07.pdf>
- [16] N.N.: Datenblatt „Schnelles Infrarot-Werkzeuginnenthermometer MTS 408“. Fa. FOS Messtechnik GmbH, Schacht-Audorf, Deutschland, 2008.
- [17] N.N.: Datenblatt „FRT CWL 3mm Chromatischer Sensor“. FRT GmbH, Bergisch-Gladbach, Deutschland, 2009.  
[http://www.frt-gmbh.com/frt/upload/pdf\\_de/FRT\\_Sensor\\_CWL\\_3mm\\_DE.pdf](http://www.frt-gmbh.com/frt/upload/pdf_de/FRT_Sensor_CWL_3mm_DE.pdf)
- [18] N.N.: Edelstahl Handbuch Böhler. Böhler/Uddeholm AG, Kapfenberg, 2001.
- [19] N.N.: Engel e-motion. Broschüre, Fa. Engel Austria GmbH, Schwertberg, Österreich, 2007,  
[http://www.engelglobal.com/engel\\_web/global/de/media/de\\_prod\\_dl\\_e-motion\\_low.pdf](http://www.engelglobal.com/engel_web/global/de/media/de_prod_dl_e-motion_low.pdf)
- [20] *Pillwein, G.*: Thermische Simulation des Aufheizverhaltens eines abhebbaren Formeinsatzes. Elektronische Auskunft, Fa. Engel Austria GmbH, Schwertberg, Österreich, 03.10. 2008.
- [21] *Rogalla, A.*: Analyse des Spritzgießens mikrostrukturierter Bauteile aus Thermoplasten. Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1997.
- [22] *Ruprecht, R., Hanemann, T., Piotter, V., Haußelt, J.*: Polymer materials for microsystem technologies. *Microsystem technologies*, 48 (5), 1998, S.44-48.
- [23] *Shen, Y.K.*: Analysis of the Replication Properties of Lightguiding Plate Between Micro Injection Molding and Micro Injection Compression Molding.

- 
- 21<sup>st</sup> Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Polymer Processing Society, Leipzig, 2005.
- [24] *Walther, T.*: Einfluß von Verschleißschutzschichten auf die Entformungskraft beim Spritzgießen. Diplomarbeit am IKFF der Universität Stuttgart, 1996.
- [25] *Walther, T., Schinköthe, W.*: Einsatzmöglichkeiten der induktiven Werkzeugtemperierung beim Spritzgießen. Beitrag zum 17. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, 2001.
- [26] *Walther, T.*: Geräte und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Dissertation an der Universität Stuttgart, 2003.
- [27] *Weber, B.*: Information über den IR-Strahler. Elektronische Auskunft, Heraeus Noblelight GmbH, Kleinostheim, Deutschland, 02.10.2008.
- [28] *Yu, L.*: Experimental and numerical analysis of Injection Molding with microfeatures. PhD thesis, Ohio State University, 2004.
- [29] *Zengerle, R.*: Vorlesung zu „Mikrosystemtechnik Technologien Prozesse“. Institut für Mikrosystemtechnik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2006,  
[http://www.imtek.de/anwendungen/content/upload/vorlesung/2006/mst\\_t&p\\_12\\_heisspraegen\\_&\\_spritzguss\\_\(vom\\_15.02.2006\).pdf](http://www.imtek.de/anwendungen/content/upload/vorlesung/2006/mst_t&p_12_heisspraegen_&_spritzguss_(vom_15.02.2006).pdf).

## 7 Anhang

### 7.1 Code des Programms „AFMEval“

AFMEval ist eine MATLAB-basierte Auswertungssoftware.

```
function [data,refdata]=AFMEval(Filename1, Filename2, xmin, ztol)
% AFMimport Import of AFM Data (*.txt)
% [data, refdata] =AFMEval(Filename1, Filename2, xmin, ztol)
%
% Eingabe: Filename1, Filename2, xmin, ztol
% Filename1= Dateiname der Probe,
% Filename2= Dateiname der Vergleichsdaten
% xmin = Anzahl der Messpunkte zwischen 2 gültigen Minima
% ztol = höchster zulässiger Abstand in z-Richtung zwischen 2 gültigen Minima

if nargin<1
    help AFMimport
    return
end

try
    fid = fopen(Filename1);
    cdat1 = textscan(fid,'%f','delimiter','\t','Headerlines',1);
    cdat2 = textscan(fid,'%f','delimiter','\t','Headerlines',1);
    fclose(fid);
    fid = fopen(Filename2);
    refdat1 = textscan(fid,'%f','delimiter','\t','Headerlines',1);
    refdat2 = textscan(fid,'%f','delimiter','\t','Headerlines',1);
    fclose(fid);
    data.nm = reshape(cdat1{1},512,512);
    data.V = reshape(cdat2{1},512,512);
    refdata.nm=reshape(refdat1{1},512,512);
    refdata.V=reshape(refdat2{1},512,512);
```

```

% assignin('base', 'data', data.nm);
% assignin('base', 'refdata', refdata.nm);

catch ME
    data = [];
    msgbox(ME.message)
    refdata = [];
    msgbox(ME.message)
end

Sample1=antinullzeile(data.nm);    %entfernt Nullzeilen
Ref1=antinullzeile(refdata.nm);
assignin('base', 'data1', Sample1);
assignin('base', 'refdata1', Ref1);
Sample= antioffset(Sample1, xmin, ztol);    %entfernt Offset
Ref=antioffset(Ref1, xmin, ztol);
figure
subplot(2,1,1), surf( Sample), axis([0 600 0 40 0 1000]), title('Sample')
subplot(2,1,2), surf( Ref), axis([0 600 0 40 0 1000]), title('Reference')
assignin('base', 'Data', Sample);
assignin('base', 'Ref', Ref);
A_Sample=totalflaeche(Sample, xmin, ztol);    %bestimmt einen Mittelwert der
Fläche unter der Kontur
A_Ref=totalflaeche(Ref, xmin, ztol);
Abformungsgrad=A_Sample/A_Ref

function [A_mean]=totalflaeche(Sample, xmin, ztol)
% function [Atotal, Az_mean]=totalflaeche(Sample)
% Eingabe:
% "Sample": vom Offset bereinigte Messdaten ohne Nullzeilen
% (zB eine 32x512 Matrix)
%
% Ausgabe:

```



```

% "Az_mean": Vektor mit der mittleren ausgeformten Fläche pro Zeile
% "Atotal": Vektor mit der gesamten Fläche pro Zeile
lustigerzaehler=0;
A_mean=0;
for z=1:min(size(Sample));
    b=Sample(z,:);
    zaehler=0;
    indices=rausschmeisser(b, xmin, ztol);
    Az=0;
    k=1;
    Az_mean(z)=0;
    Atotal(z)=0;
    for k=1:(length(indices)-1)
        Ak=0;
        if indices(k+1)-indices(k)>100
        else
            b1=b(indices(k):indices(k+1)-1);
            b2=b(indices(k)+1:indices(k+1));
            Ak=sum((b1+b2)/2*20);
        end
        if Ak~=0
            zaehler=zaehler+1;
        end
        Az=Az+Ak;
    end
    if Az~=0
        lustigerzaehler=lustigerzaehler+1;
    end
    Az_mean(z)=Az/zaehler;
    Atotal(z)=Az;
end
Az_mean = Az_mean(~isnan(Az_mean));
Az_mean = Az_mean(find(Az_mean));
A_mean=mean(Az_mean);

```

---

```

function [Ohnnull]=antinullzeile(Mitnull)
% Eingabe:
% "Mitnull": n*m-Matrix mit mehreren Nullzeilen
% Ausgabe:
% "Ohnnull": (n-x)*m-Matrix ohne Nullzeilen
n= 1;
Ohnnull=zeros(1,length(Mitnull));
for k=1:length(Ohnnull)
    if (Mitnull(k,1)+Mitnull(k,2))==0;
    else
        Ohnnull(n,:)=Mitnull(k,:);
        n=n+1;
    end
end
end
function [Sample]=antioffset(Sample1, xmin, ztol)
% function [Sample]=antioffset(Sample1)
% Eingabe:
% "Sample1": Matrix ohne Nullzeilen mit Offset
%
% Ausgabe:
% "Sample": Matrix ohne Nullzeilen, ohne Offset
teilflaeche=0;
teilflaechezaehler=0;
xi=(1:length(Sample1));
for i=1:min(size(Sample1));
    xi=Sample1(i,:);
    indices=rausschmeisser(xi, xmin, ztol); %bestimmt die "guten" indices
    offsetfit=[indices;Sample1(i,indices)];
    P=polyfit(offsetfit(1,:),offsetfit(2,:),1);
    Sample(i,:)=Sample1(i,:)-polyval(P,xi);
    Sample(i,:)=Sample(i,:)-min(Sample(i,:));
end
end
function [gutindex]=rausschmeisser(y, distmin, ztolerance)
% function gutindex=rausschmeisser[y, distmin, ztolerance]

```

```
% Eingabe:
% "y": zu bearbeitende Zeile
% "distmin": Mindestabstand (in Anzahl Messpunkte) zwischen 2 Minima
% "ztolerance": Grenze für den größtmöglichen z-Abstand eines lokalen Minimums
% Ausgabe:
% "gutindex": Vektor mit allen Indices, die zur Weiterverarbeitung
% geeignet sind.
i=1;
linemin=min(y);
indi= gradient(y)>=0;
pindi = find(diff(indi)>0);
abstand=pindi;
while i<(length(abstand)-1)
    if abstand(i+1)-abstand(i)>distmin
        i=i+1;
    else
        if y(abstand(i))<y(abstand(i+1))
            abstand(i+1)=[];
            i=1;
        else
            abstand(i)=[];
            i=1;
        end
    end
end
end
i=1;
gutindex=abstand;
while i<length(gutindex)+1
    if y(gutindex(i))> linemin+ztolerance;
        gutindex(i)=[];
        i=1;
    end
end
i=i+1;
end
```

## 7.2 Effektdiagramme

### 7.2.1 Effektdiagramme Spritzgießen

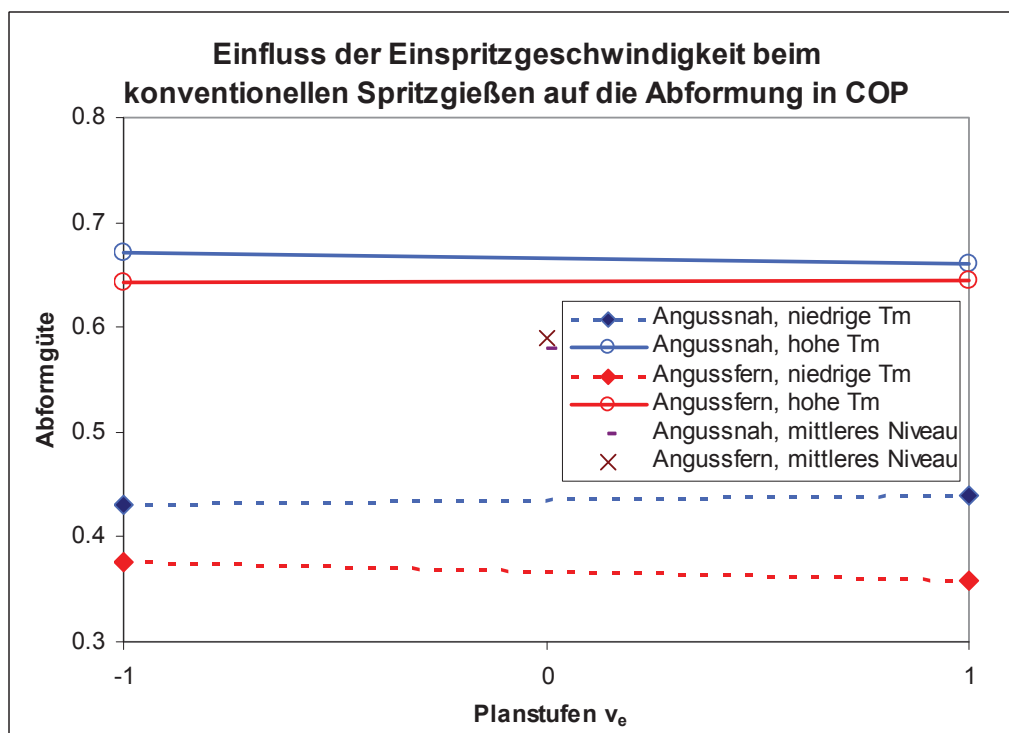


Bild 54: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in COP.

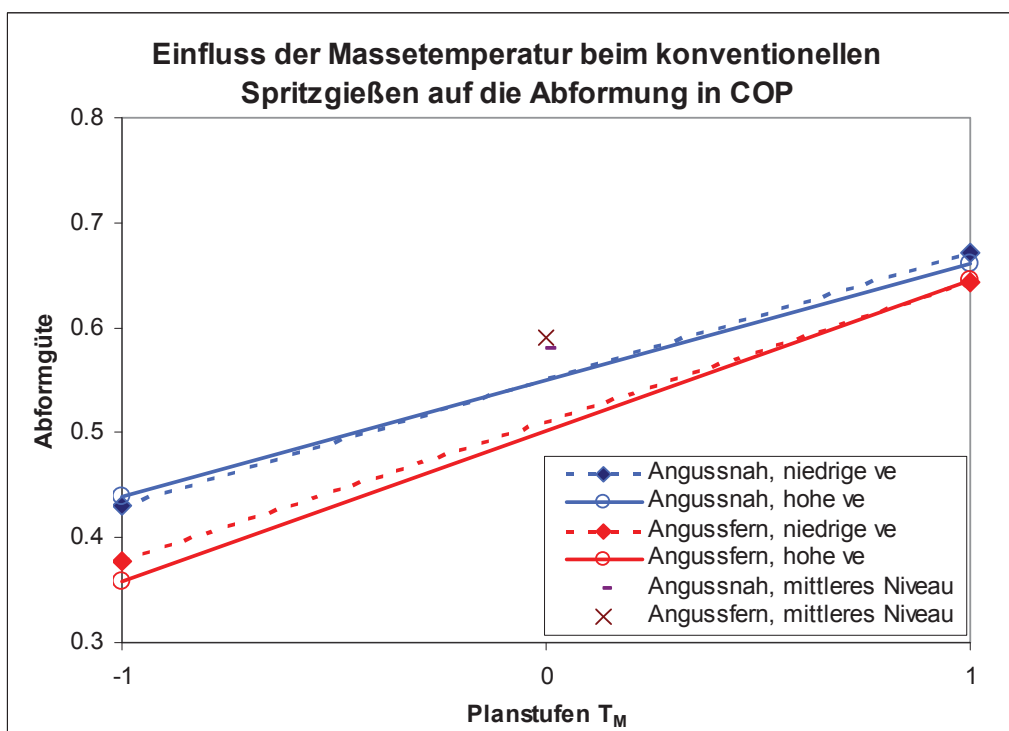


Bild 55: Einfluss der Massetemperatur beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in COP.

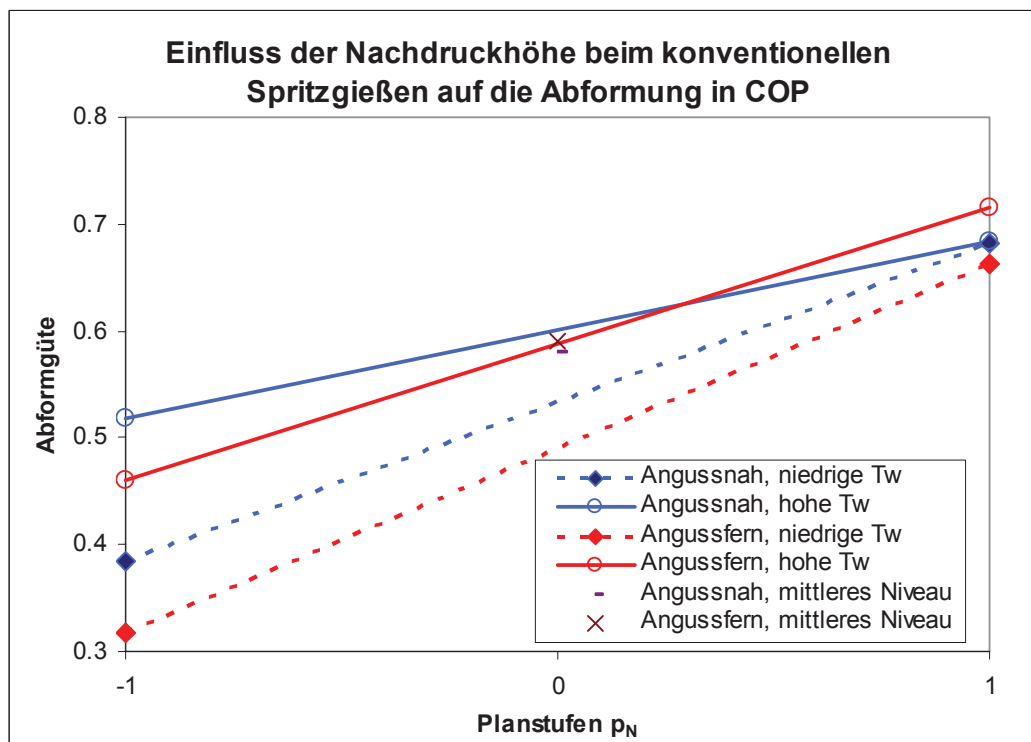


Bild 56: Einfluss der Nachdruckhöhe beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in COP.

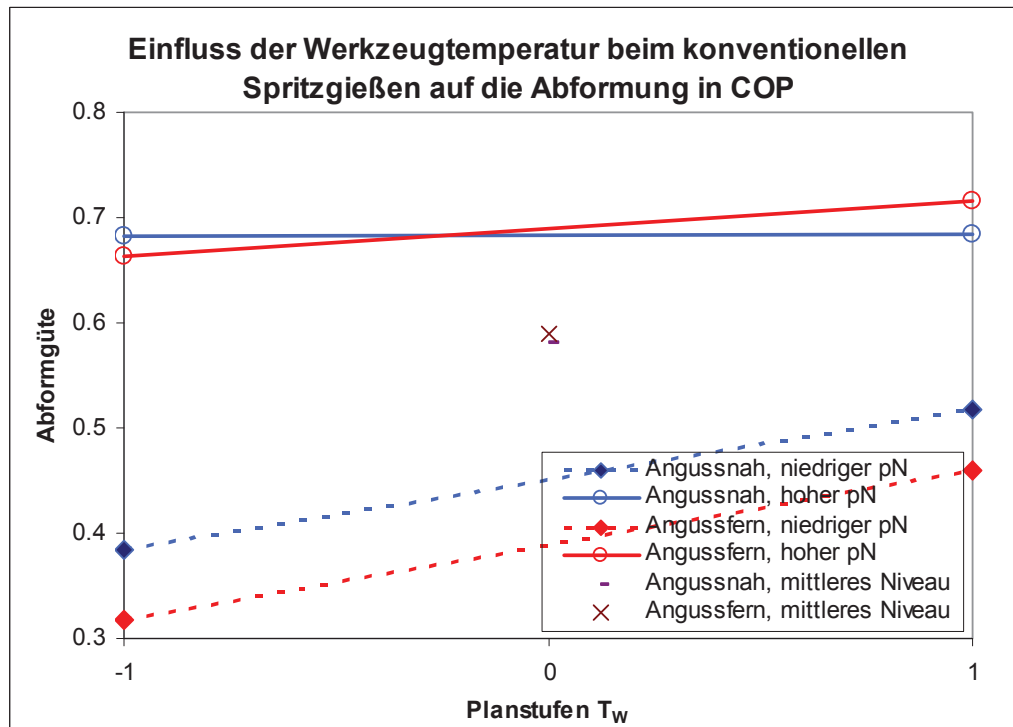


Bild 57: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in COP.

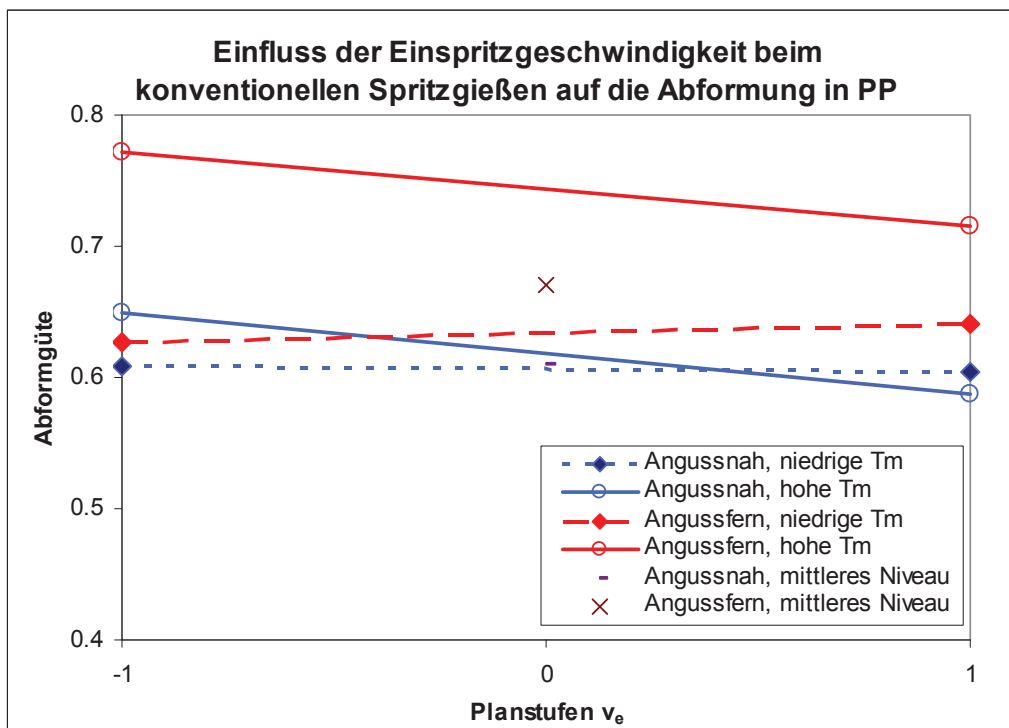


Bild 58: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in PP.

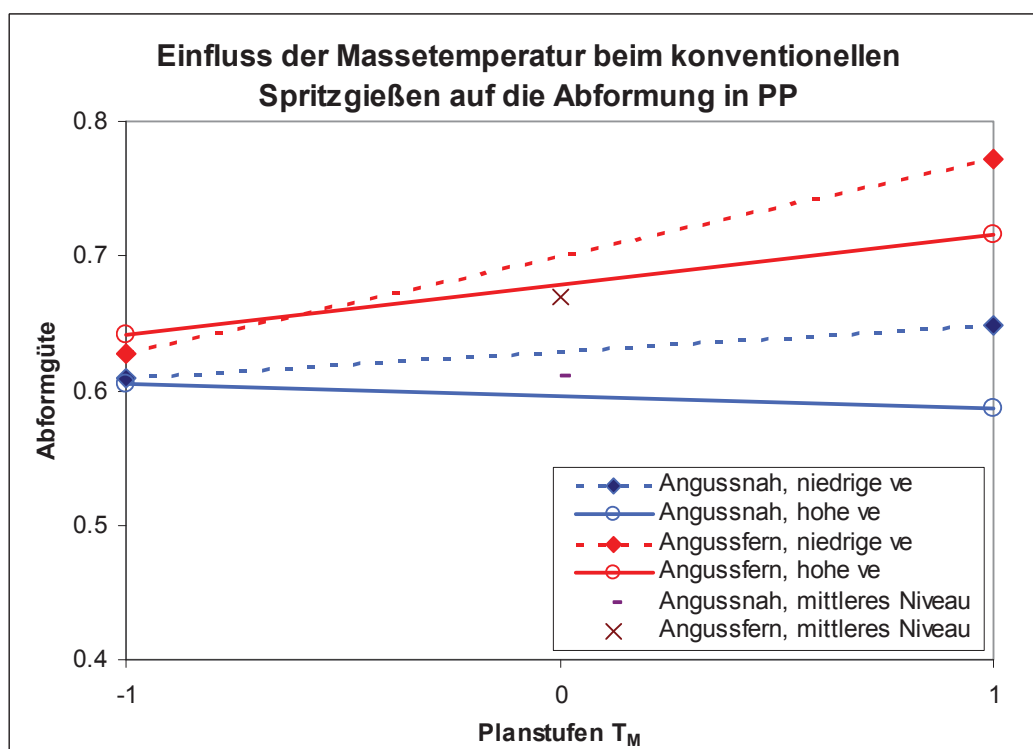


Bild 59: Einfluss der Massetemperatur beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in PP.

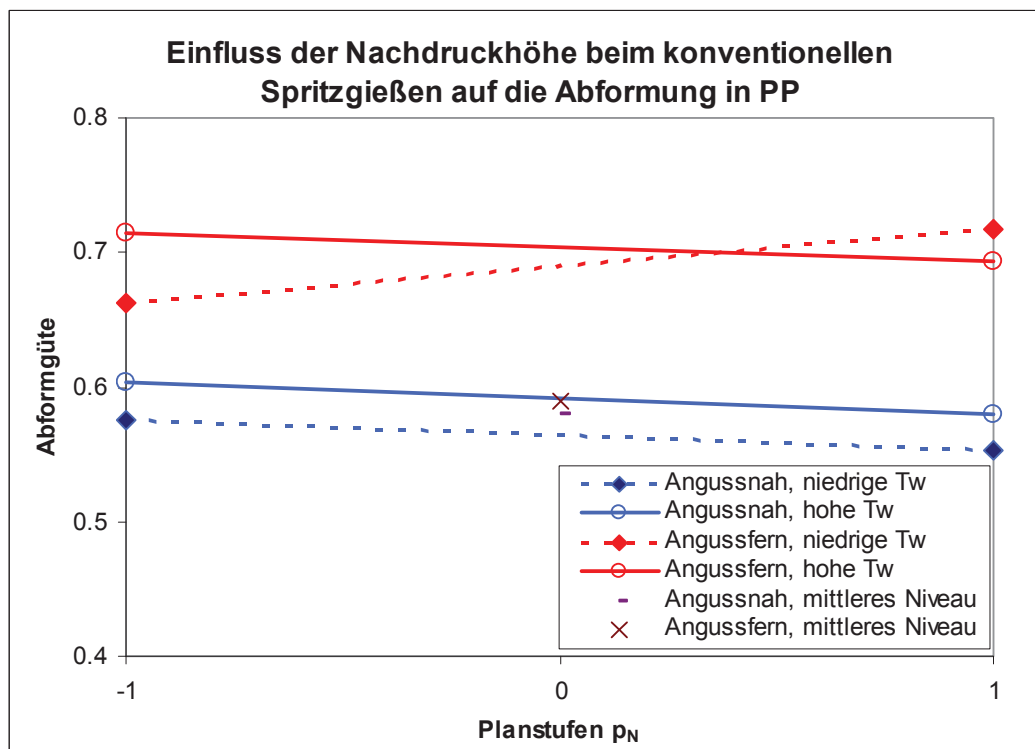


Bild 60: Einfluss der Nachdruckhöhe beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformgüte in PP.

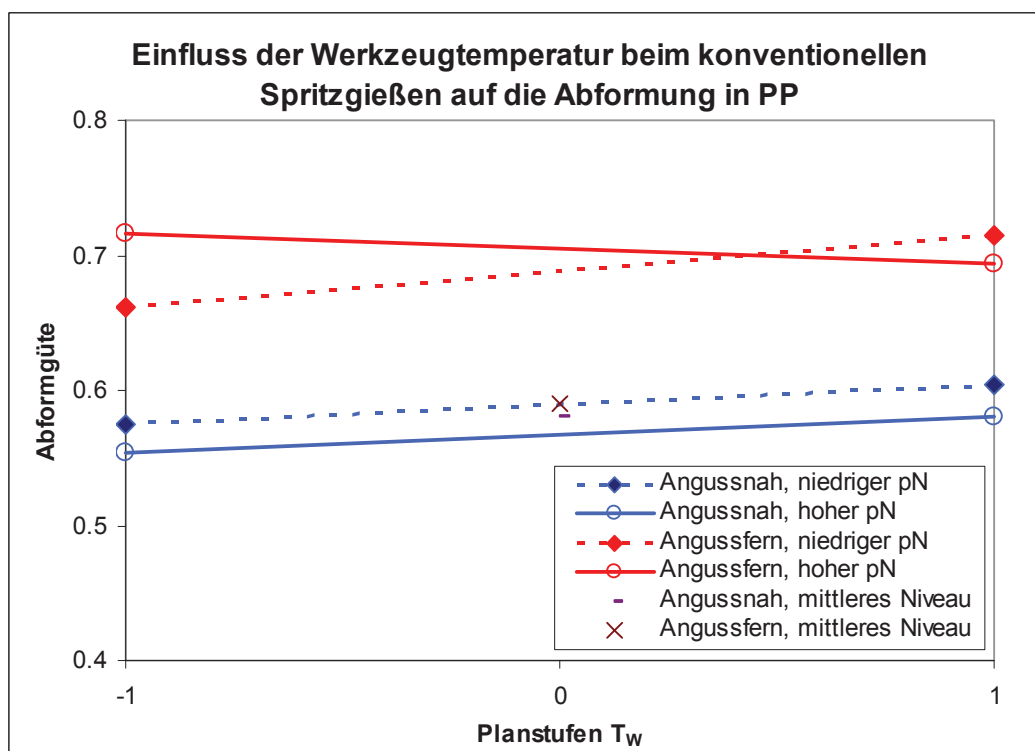


Bild 61: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformgüte in PP.

## 7.2.2 Effektdiagramme Spritzprägen

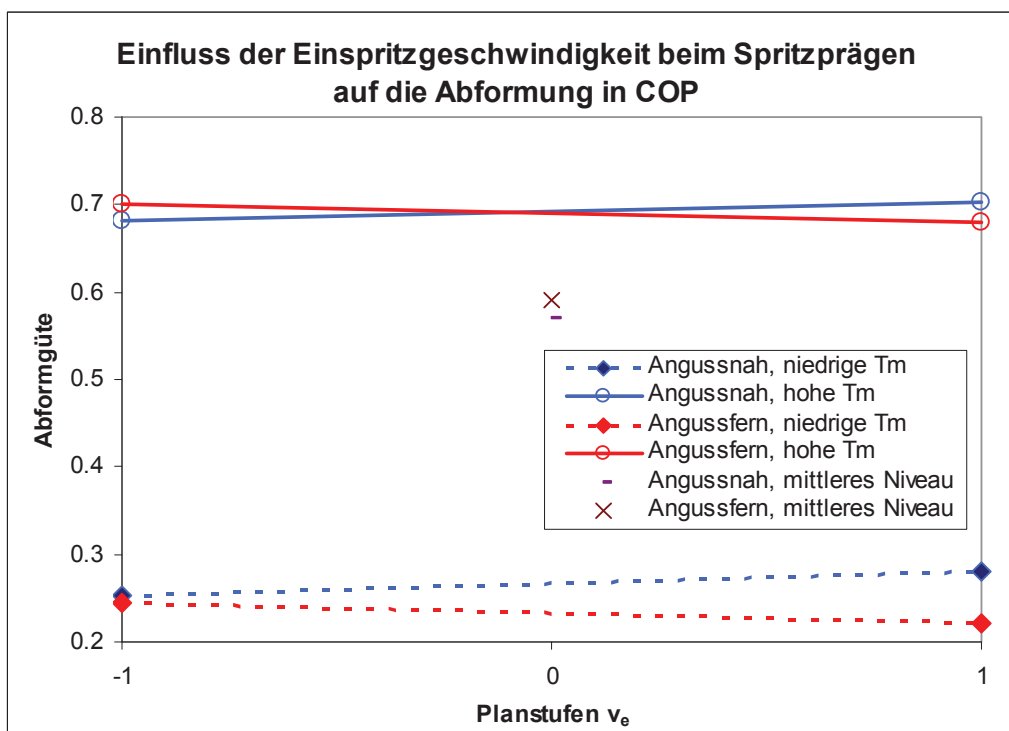


Bild 62: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim Spritzprägen auf die Abformung in COP.

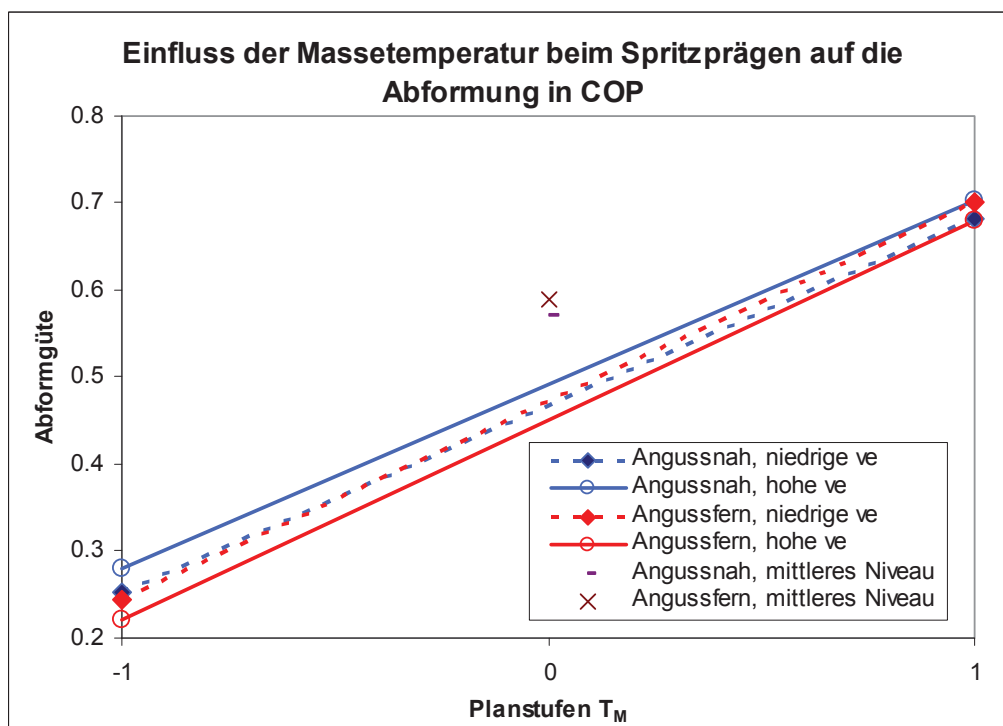


Bild 63: Einfluss der Massetemperatur beim Spritzprägen auf die Abformung in COP.



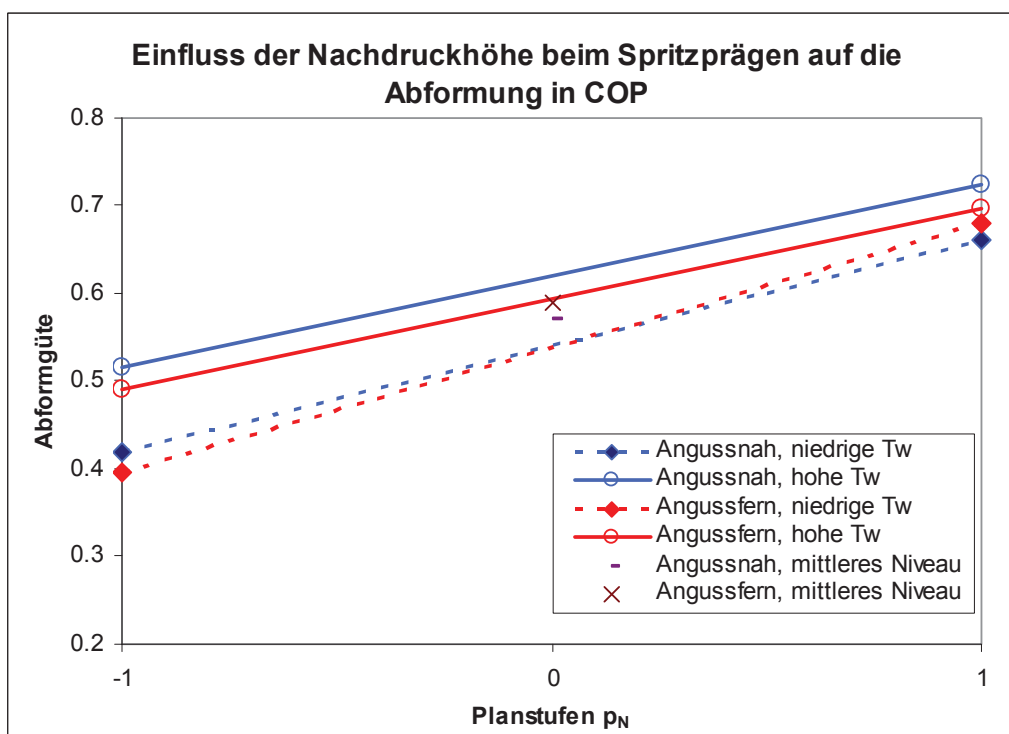


Bild 64: Einfluss der Nachdruckhöhe beim Spritzprägen auf die Abformung in COP.

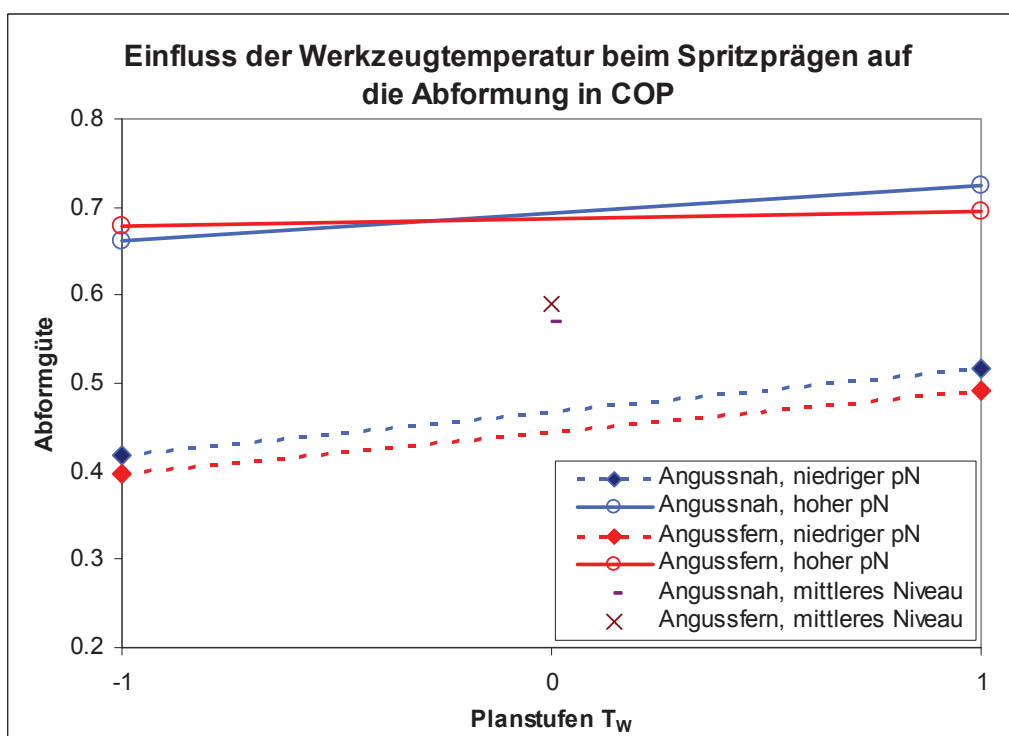


Bild 65: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim Spritzprägen auf die Abformung in COP.

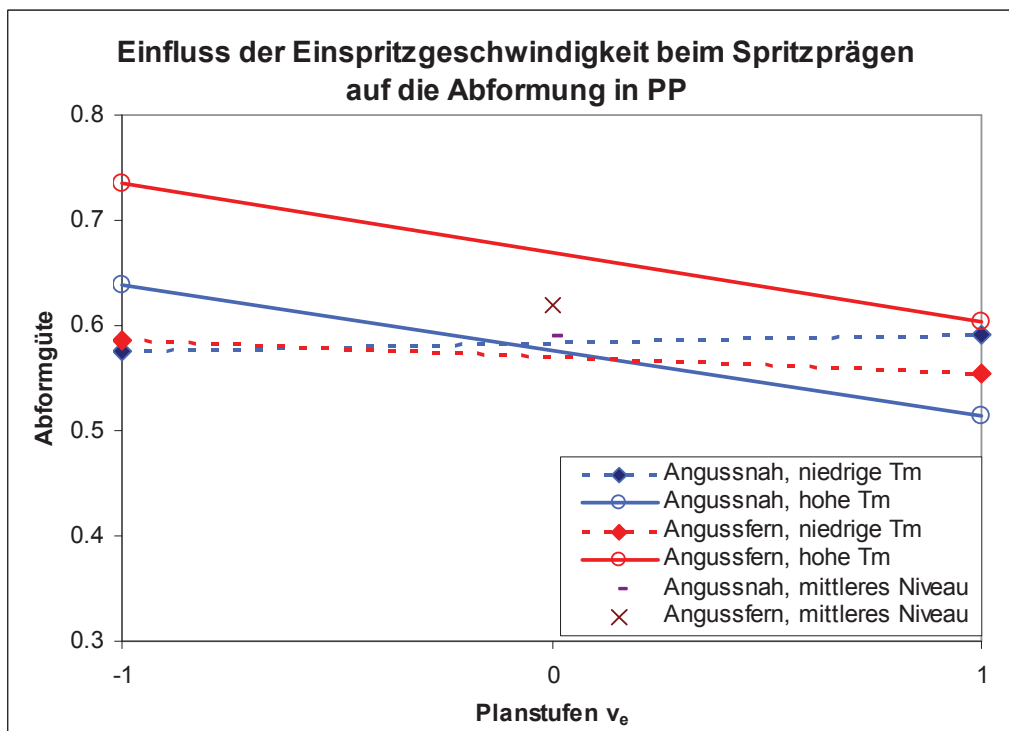


Bild 66: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim Spritzprägen auf die Abformung in PP.

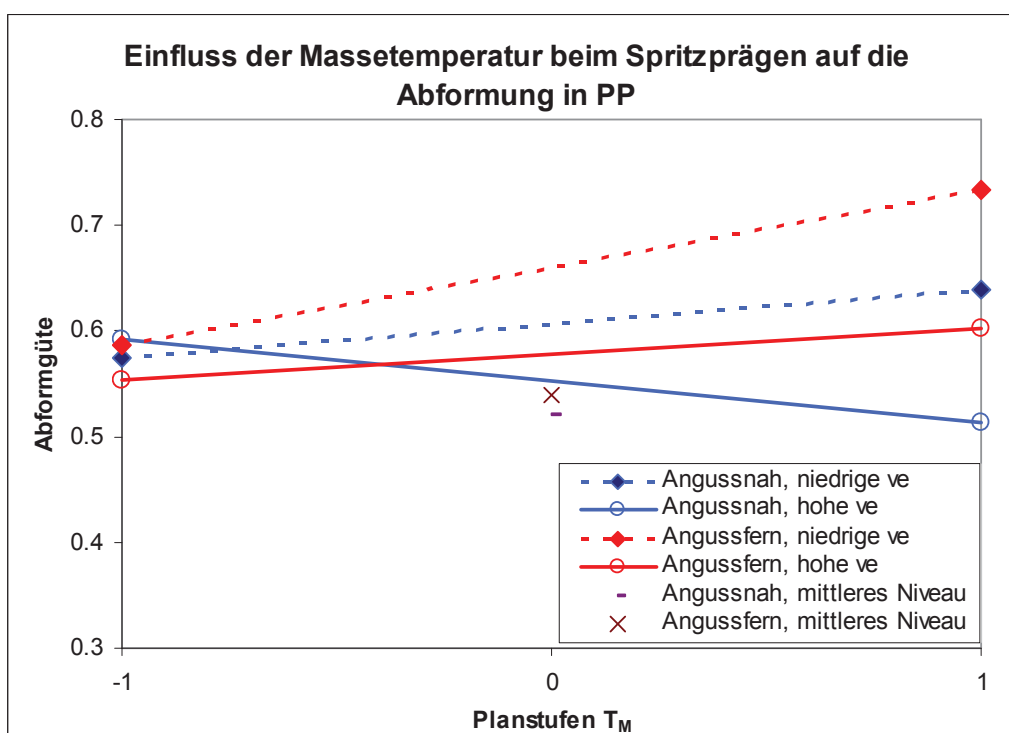


Bild 67: Einfluss der Massetemperatur beim Spritzprägen auf die Abformung in PP.

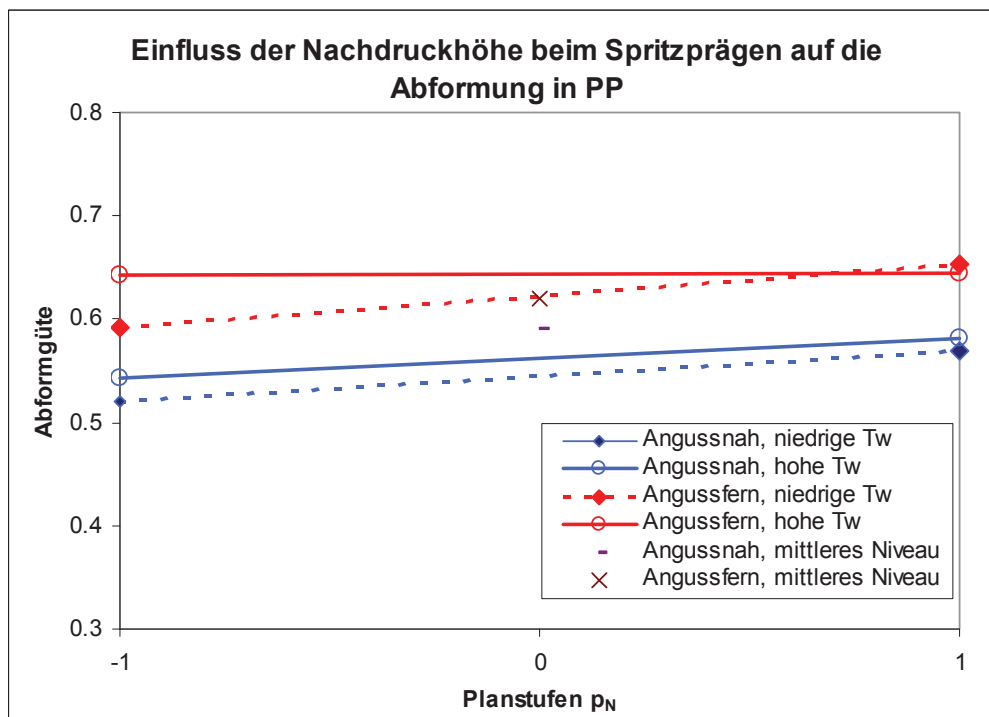


Bild 68: Einfluss der Nachdruckhöhe beim Spritzprägen auf die Abformung in PP.

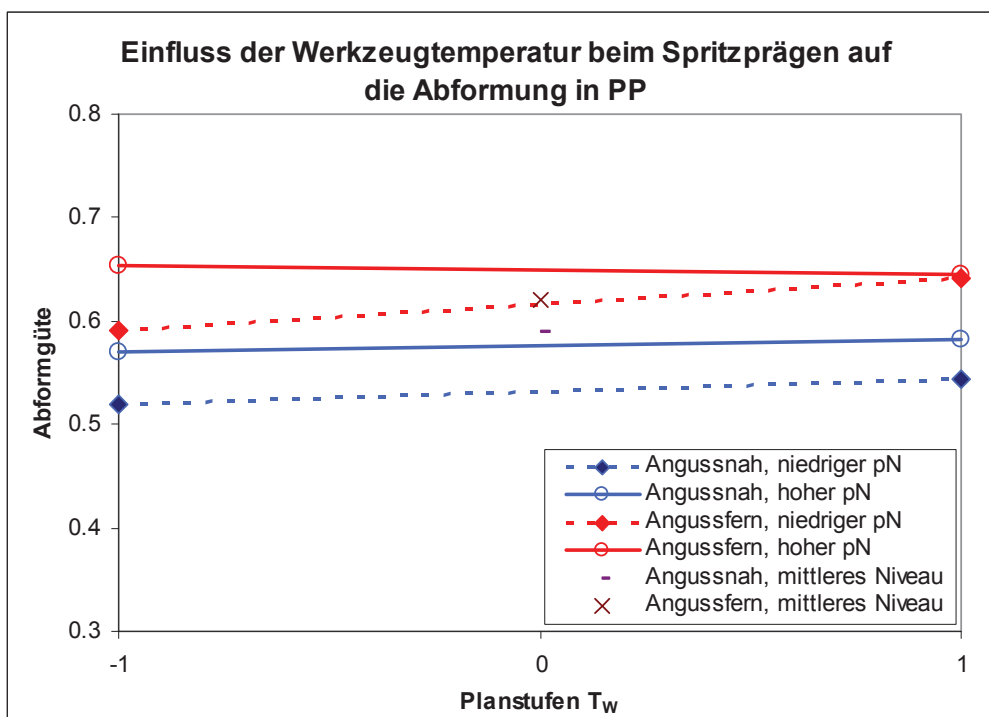


Bild 69: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim Spritzprägen auf die Abformung in PP.

## 7.2.3 Effektdiagramme Spritzgießen mit variothermer Prozessführung

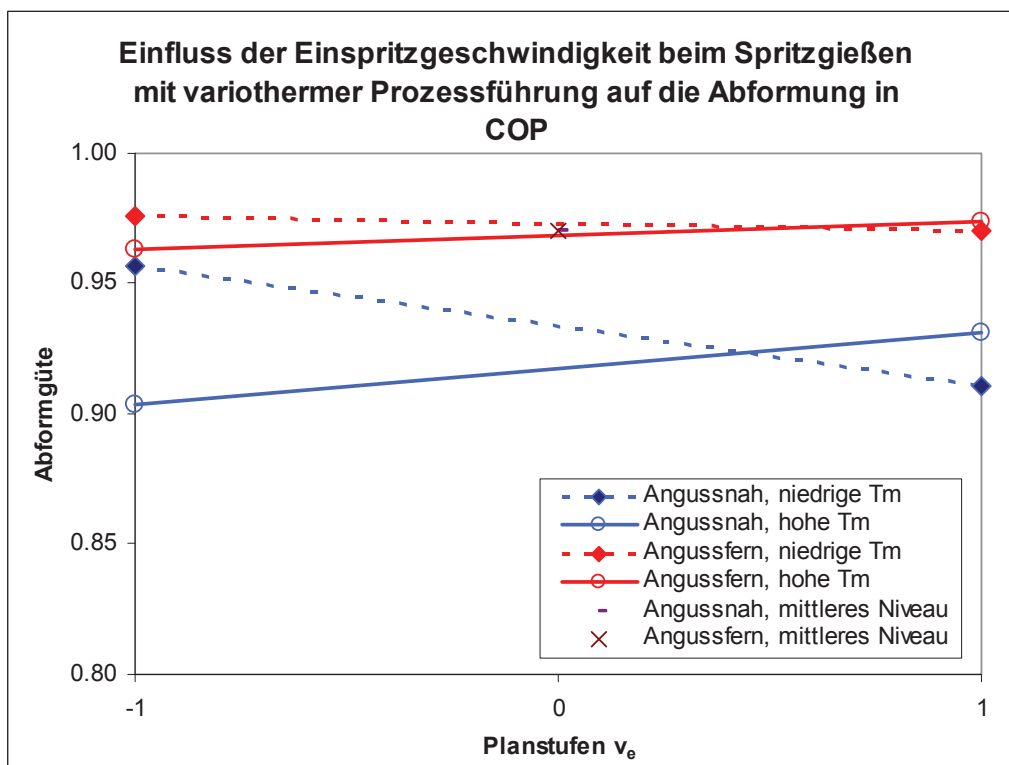


Bild 70: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in COP.

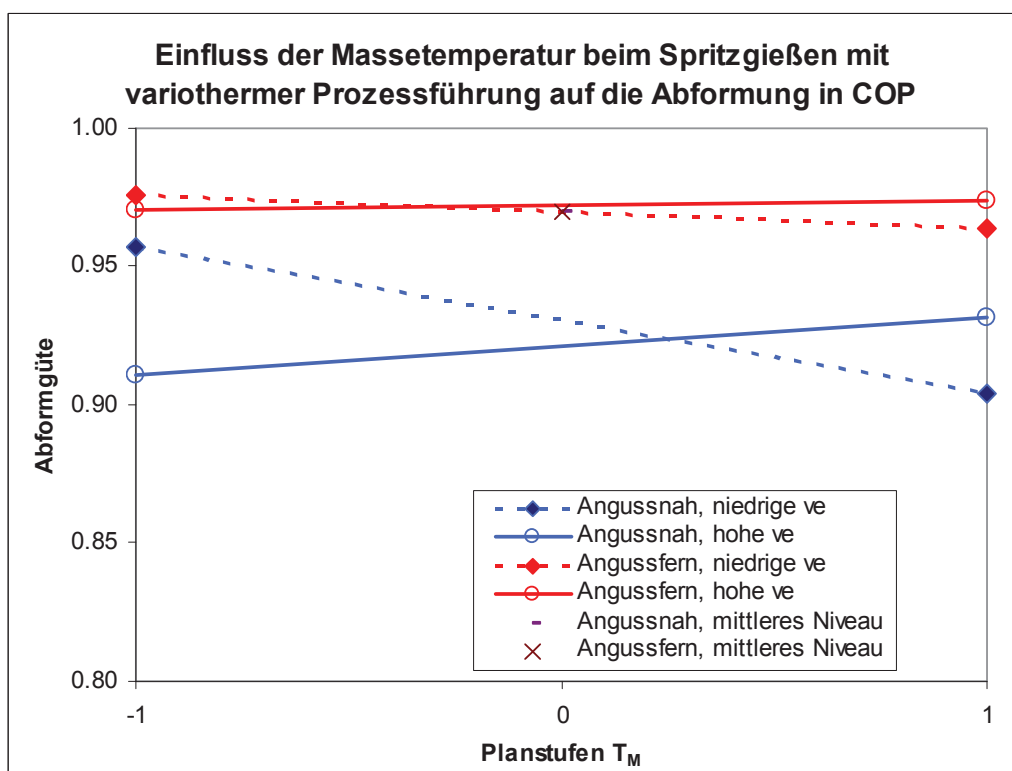


Bild 71: Einfluss der Massetemperatur beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in COP.

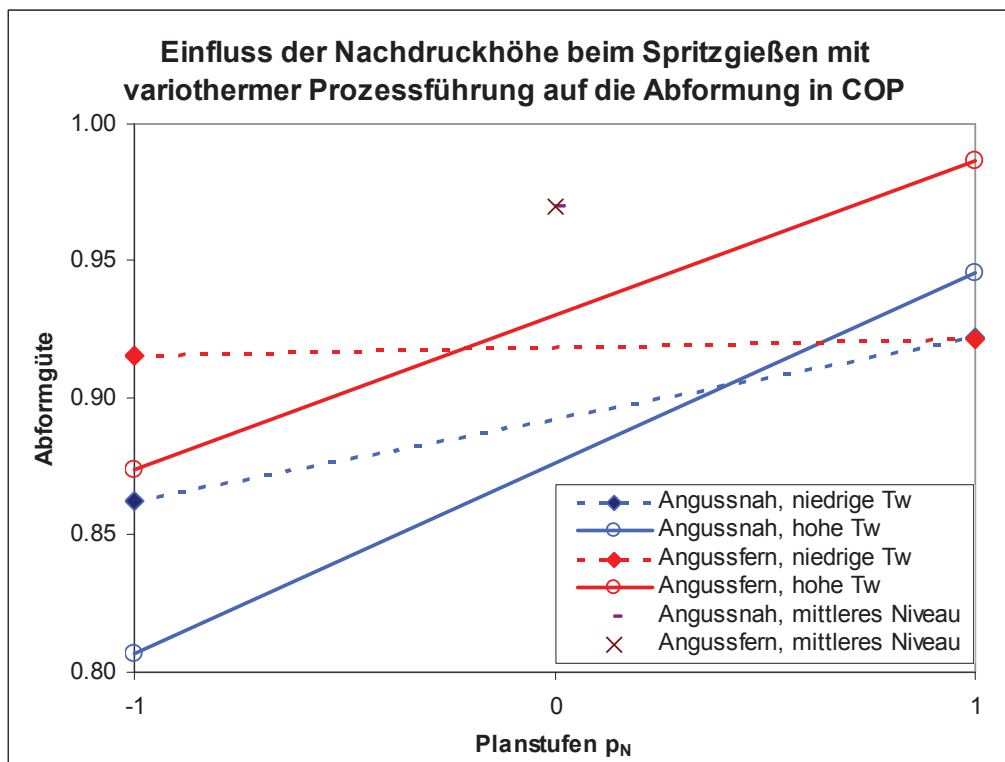


Bild 72: Einfluss der Nachdruckhöhe beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in COP.

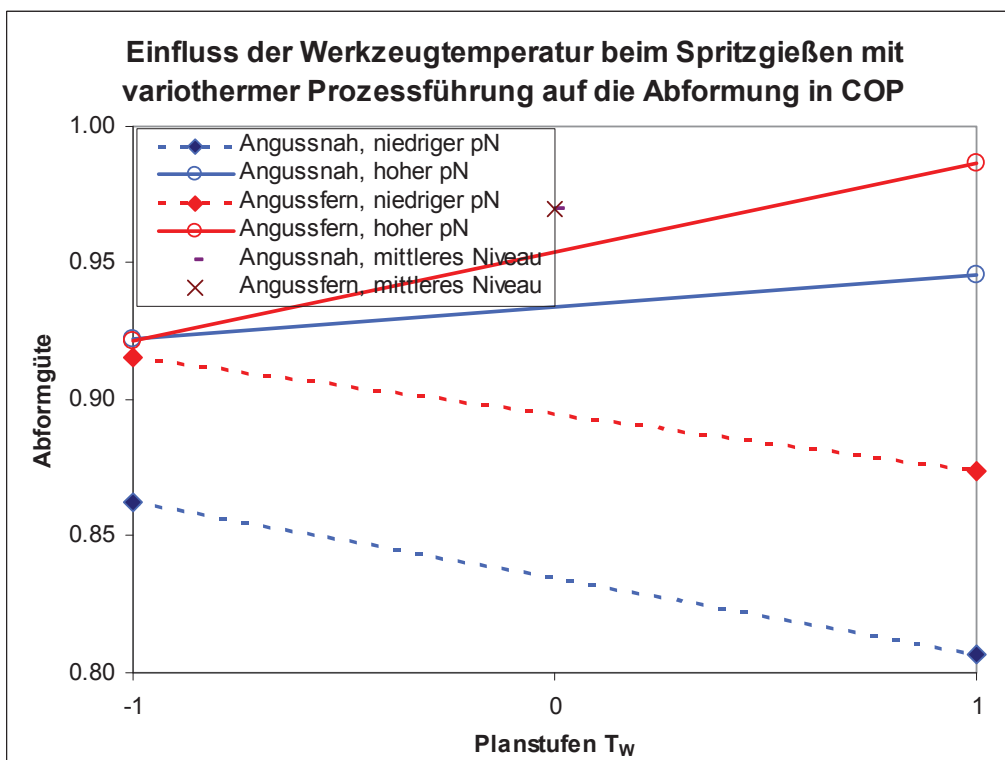


Bild 73: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in COP.

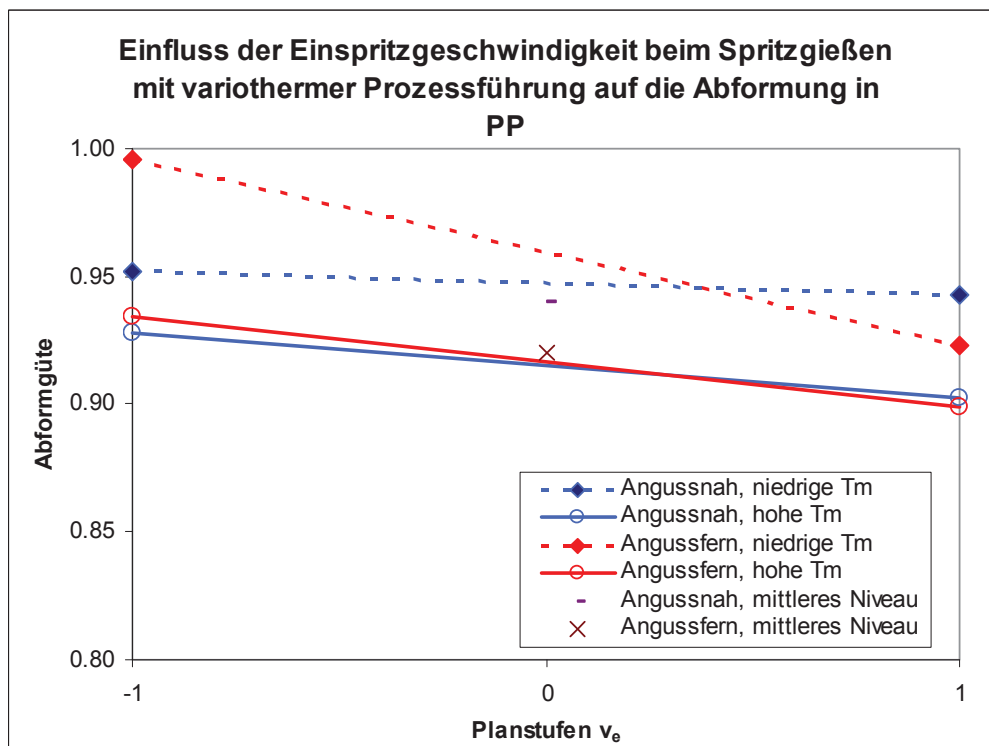


Bild 74: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in PP.

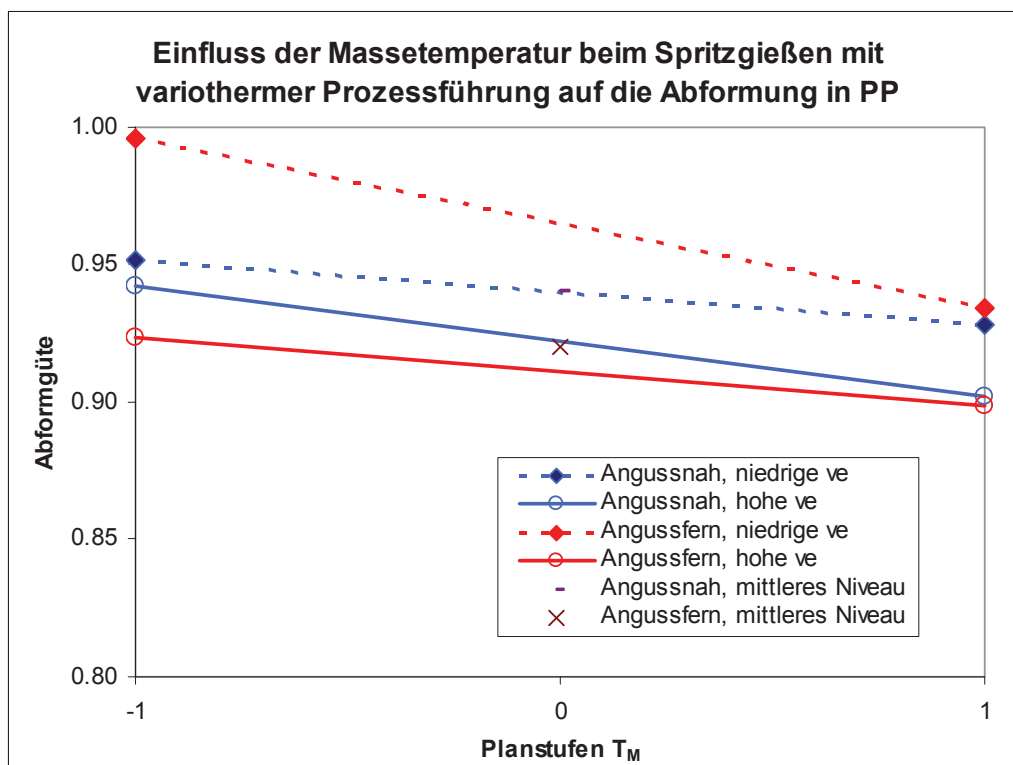


Bild 75: Einfluss der Massetemperatur beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in PP.

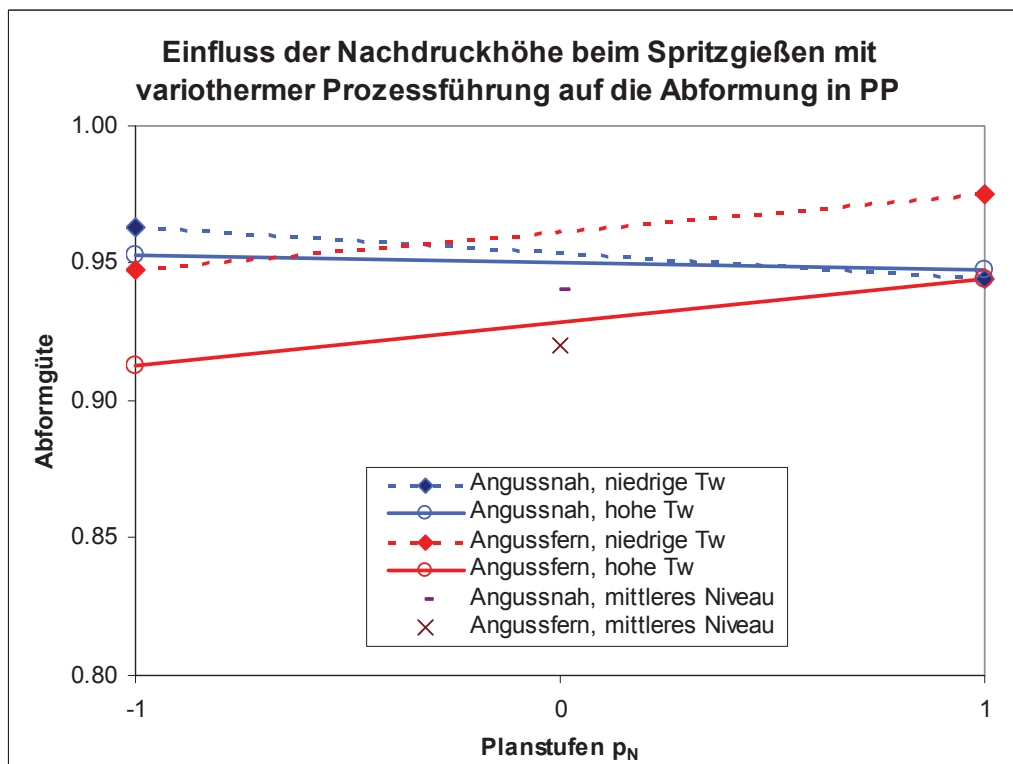


Bild 76: Einfluss der Nachdruckhöhe beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in PP.

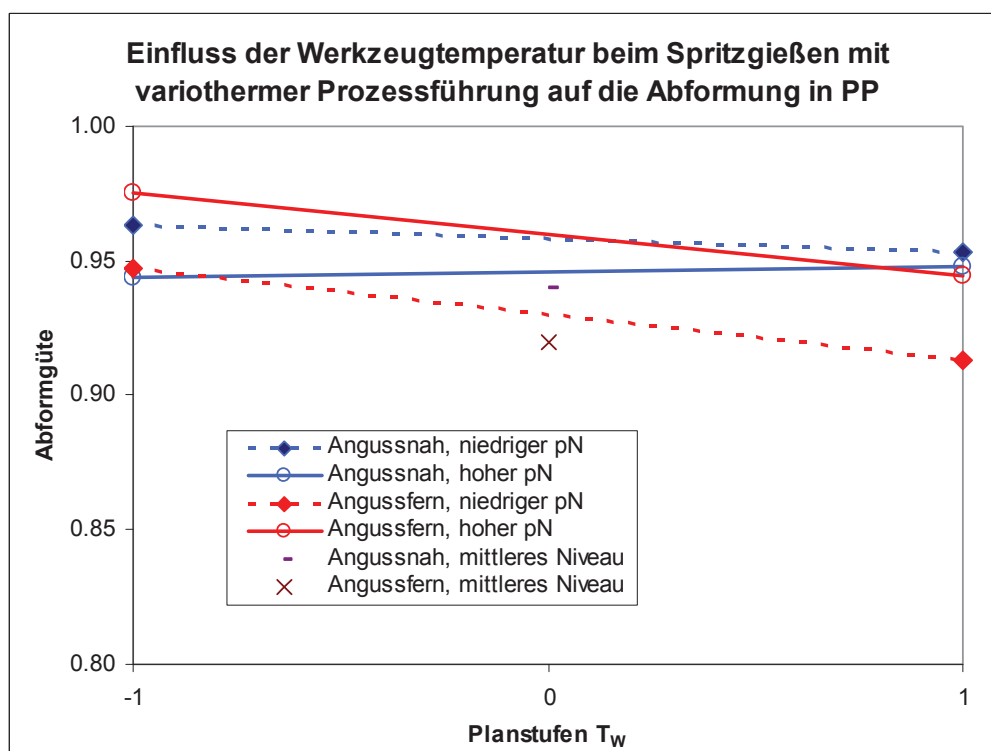


Bild 77: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in PP.

### 7.3 *Verwendete Abkürzungen*

AFM	Atomic Force Microscope, englisch für Rasterkraftmikroskop
AS	Auswerferseite
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
b	Wärmeeindringzahl
COP	Cyclo-olefin Polymer
$c_p$	spezifische Wärmekapazität
DS	Düsenseite
HDTM	High Dynamics Temperature Materials
IR	Infrarot
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
PP	Polypropylen
$p_N$	Nachdruck
$\rho$	Dichte
SEM	Scanning Electron Microscope, englisch für: Rasterelektronenmikroskop
$T_G$	Glasübergangstemperatur
$T_m$	Massetemperatur
$T_K$	Kontakttemperatur
$T_S$	Schmelzetemperatur
$T_w$	Werkzeugtemperatur
$t_k$	Kühlzeit
$t_e$	Einspritzzeit
$t_h$	Heizzeit
$t_z$	Zykluszeit
$v_e$	Einspritzgeschwindigkeit



## 7.4 Messdaten für spezifische Wärmekapazität und Viskosität

### 7.4.1 Messdaten für die spezifische Wärmekapazität

Tabelle 22: Messdaten für die spezifische Wärmekapazität für COP Zeonor 1060R und PP Dow H734-52 RNA.

COP Zeonor 1060R		PP Dow H734-52 RNA	
Temperatur (°C)	$c_p$ (J/g*K)	Temperatur (°C)	$c_p$ (J/g*K)
43,5	1,46	47,5	3,06
53,5	1,51	57,5	2,89
63,5	1,57	67,5	2,99
73,5	1,65	77,5	3,20
83,5	1,73	87,5	3,39
93,5	1,92	97,5	3,58
98,5	2,00	102,5	3,77
103,5	2,05	107,5	3,83
108,5	2,08	112,5	4,11
113,5	2,10	117,5	4,50
118,5	2,12	122,5	9,47
123,5	2,15	127,5	29,76
128,5	2,17	132,5	6,38
133,5	2,20	137,5	3,68
138,5	2,21	142,5	3,71
143,5	2,23	147,5	3,65
148,5	2,25	152,5	3,61
153,5	2,28	157,5	3,70
158,5	2,29	162,5	3,67
163,5	2,31	167,5	3,73
168,5	2,32	172,5	3,87
173,5	2,33	177,5	3,92
183,5	2,36	187,5	3,93
193,5	2,41	197,5	4,03
203,5	2,43	207,5	3,86
213,5	2,46	217,5	4,07
223,5	2,48	227,5	4,34
233,5	2,52	237,5	4,40
243,5	2,55	247,5	4,51
253,5	2,58	257,5	4,54
258,5	2,58	262,5	4,56

## 7.4.2 Messdaten für die Viskosität

Tabelle 23: Gemessene Viskosität von PP Dow H734-52 RNA.

230 (°C)		250 (°C)		270 (°C)	
$\dot{\gamma}_w$ (1/s)	$\eta_w$ (Pa*s)	$\dot{\gamma}_w$ (1/s)	$\eta_w$ (Pa*s)	$\dot{\gamma}_w$ (1/s)	$\eta_w$ (Pa*s)
$5,98 \cdot 10^2$	52,02				
$1,25 \cdot 10^2$	36,66	$1,28 \cdot 10^3$	31,28	$1,09 \cdot 10^3$	31,40
$4,16 \cdot 10^3$	17,74	$4,07 \cdot 10^3$	16,13	$4,12 \cdot 10^3$	14,36
$7,27 \cdot 10^3$	12,16	$7,08 \cdot 10^3$	11,31	$7,29 \cdot 10^3$	10,13
$1,55 \cdot 10^4$	7,15	$1,51 \cdot 10^4$	6,71	$1,52 \cdot 10^4$	5,93
$5,17 \cdot 10^4$	2,98	$5,02 \cdot 10^4$	2,81	$4,77 \cdot 10^4$	2,69
$9,03 \cdot 10^4$	1,96	$8,81 \cdot 10^4$	1,85	$8,04 \cdot 10^4$	1,86
$1,89 \cdot 10^5$	1,06	$1,86 \cdot 10^5$	1,02	$1,62 \cdot 10^5$	1,13

Tabelle 24: Gemessene Viskosität von COP Zeonor 1060R.

230 (°C)		250 (°C)		270 (°C)	
$\dot{\gamma}_w$ (1/s)	$\eta_w$ (Pa*s)	$\dot{\gamma}_w$ (1/s)	$\eta_w$ (Pa*s)	$\dot{\gamma}_w$ (1/s)	$\eta_w$ (Pa*s)
		$2,96 \cdot 10^2$	220,87		
		$4,98 \cdot 10^2$	211,26		
$1,15 \cdot 10^3$	258,64	$1,10 \cdot 10^3$	161,71	$1,03 \cdot 10^3$	87,60
$4,39 \cdot 10^3$	110,16	$4,07 \cdot 10^3$	81,90	$3,46 \cdot 10^3$	58,88
$8,00 \cdot 10^3$	71,39	$7,39 \cdot 10^3$	55,89	$6,30 \cdot 10^3$	43,21
$1,75 \cdot 10^4$	38,51	$1,63 \cdot 10^4$	31,97	$1,41 \cdot 10^4$	26,50
$5,93 \cdot 10^4$	14,17	$5,44 \cdot 10^4$	12,31	$4,88 \cdot 10^4$	10,96
$1,07 \cdot 10^5$	9,12	$9,52 \cdot 10^4$	7,89	$8,56 \cdot 10^4$	7,07

Tabelle 25: Konstanten des Carreau-Ansatzes für COP Zeonor 1060R und PP Dow 734-52 RNA.

Temperatur (°C)	230	250	270
	<b>COP Zeonor 1060R</b>		
<b>A (Pa*s)</b>	376,05	253,43	105,74
<b>B (s)</b>	6,907E-04	6,871E-04	3,104E-04
<b>C (l)</b>	0,8707	0,8289	0,8162
	<b>PP Dow H734-52 RNA</b>		
<b>A (Pa*s)</b>	87860	87860	87864
<b>B (s)</b>	389,7	111,1	101,0
<b>C (l)</b>	0,6097	0,6626	0,6758

## 7.5 Bildverzeichnis

Bild 1: Randschichterstarrung im konventionellen Spritzgießen [26].	3
Bild 2: Temperaturverlauf im Werkzeug und Randschichterstarrung beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung [26].	4
Bild 3: Variotherme Werkzeugtemperierung mittels Umschalteneinheit und unterschiedlichen Temperiermitteltemperaturen an 2 Heizgeräten [9].	5
Bild 4: Variotherme Werkzeugtemperierung durch den Einsatz von elektrischen Heizelementen [4].	6
Bild 5: Variotherme Werkzeugtemperierung durch den Einsatz eines externen Induktors [3, 25].	6
Bild 6: Variotherme Werkzeugtemperierung mittels Infrarotstrahlung [9].	7
Bild 7: Werkzeugbewegung beim Spritzprägen.	8
Bild 8: Prozessablauf des Heißprägens [29].	9
Bild 9: Füllung eines Segmentes einer strukturierten Oberfläche [28].	10
Bild 10: Höhenreplikation nach Shen [23].	11
Bild 11: Abformungsbestimmung mittels Querschnittsflächenvergleich [2].	11
Bild 12: Definition der Abformung nach Yokoi und Han [10].	12
Bild 13: Einflussfaktoren auf die Entformungskraft während der Entformung [24].	13
Bild 14: Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ von COP Zeonor 1060R und PP H734-52 RNA	16
Bild 15: Verlauf der Spezifischen Wärmekapazität von COP beim Abkühlen.	16
Bild 16: Verlauf der Spezifischen Wärmekapazität von PP beim Abkühlen.	17
Bild 17: Viskositätskurven von PP Dow H734-52 RNA.	17
Bild 18: Viskositätskurven von COP Zeonor 1060R.	18
Bild 19: Probekörper mit strukturierter Oberfläche aus PP (Filmanguss mit Breite 17 mm und Höhe 0,4 mm).	19
Bild 20: Abmessungen des Formeinsatzes mit der V-Kerbenstruktur.	20
Bild 21: Formeinsatz mit V-Kerben, aus AFM Messungen generierte perspektivische Ansicht; angussnahe Strukturierung (oben), angussferne Strukturierung (unten).	20
Bild 22: Formeinsatz mit V-Kerben, angussnahe Kante und strukturierter Bereich, 5.000-fache Vergrößerung.	21
Bild 23: Formeinsatz mit V-Kerben, Randbereich und angussferner strukturierter Bereich, 10.000-fache Vergrößerung.	21

---

Bild 24: Spritzgießmaschine "Engel e-motion 200/100" [19].....	22
Bild 25: Abhebende Trägerplatte mit Formeinsatz im abgehobenen Zustand. ....	24
Bild 26: Schematische Darstellung der Umschalteinheit und der Temperiergeräte sowie des Verbrauchers [14].....	25
Bild 27: Schematische Darstellung des Heizzyklus des Infrarot-Strahlers: 1 Einfahren des Strahlers, 2 Annähern und Beheizen, 3 Ausfahren des Strahlers, 4 Werkzeug schließen und Einspritzen. ....	26
Bild 28: Infrarot-Werkzeuginnenthermometer MTS 408 (FOS Messtechnik GmbH) [16].....	29
Bild 29: Schematische Darstellung der Einbauposition des kombinierten Druck- Temperatur-Sensors (Fa. Kistler) [15]. ....	30
Bild 30: Schematische Darstellung des Messprinzips eines Rasterkraftmikroskopes im Contact und Non-Contact Mode [11]. ....	31
Bild 31: Schematische Darstellung des Messprinzips des FRT Microprof® 200 [17]. .....	32
Bild 32: Vergleich von Formeinsatz- und Formteiloberflächengeometrie mit dem Programm AFMEval. ....	33
Bild 33: Messpositionen am Formteil. ....	37
Bild 34: Untersuchung der abgeformten Höhe am Veeco Nanoscope® IIIa. ....	37
Bild 35: Definition der Abformgüte. ....	38
Bild 36: Formeinsatztemperatur beim Beheizen mit Infrarot-Strahlung und unterschiedlichen Formeinsatzwerkstoffen. ....	42
Bild 37: Oberflächentemperaturverteilung des abhebenden Formeinsatzes nach 10 Sekunden Heizen mit maximaler Heizleistung. ....	43
Bild 38: Verlauf der Formeinsatz-Oberflächentemperatur an mehreren Positionen entlang des Fließweges. ....	44
Bild 39: SEM-Aufnahme des Formteils mit der besten Abformung in COP im konventionellen Spritzgießverfahren, 10.000-fache Vergrößerung. ....	46
Bild 40: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im konventionellen Spritzgießverfahren, interpretiert mit MATLAB. ....	47
Bild 41: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im konventionellen Spritzgießverfahren, 10.000-fache Vergrößerung. ....	49
Bild 42: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im konventionellen Spritzgießverfahren, interpretiert mit MATLAB. ....	49

Bild 43: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im Spritzprägeverfahren, 10.000-fache Vergrößerung.....	51
Bild 44: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im Spritzprägeverfahren.....	52
Bild 45: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im Spritzprägeverfahren, 10.000-fache Vergrößerung.....	53
Bild 46: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im Spritzprägeverfahren.....	54
Bild 47: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im Spritzgießverfahren mit variothermer Prozessführung, 10.000-fache Vergrößerung. ....	56
Bild 48: AFM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in COP im Spritzgießverfahren mit variothermer Prozessführung. ....	57
Bild 49: SEM-Aufnahmen des Formteils mit der besten Abformung in PP im Spritzgießverfahren mit variothermer Prozessführung, 10.000-fache Vergrößerung. ....	58
Bild 50: Vergleich der erreichten Abformung in COP an zwei unterschiedlichen Stellen mit den Verfahren konventionelles Spritzgießen und Spritzprägen.	61
Bild 51: Vergleich der erreichten Abformung in PP an zwei unterschiedlichen Stellen mit den Verfahren konventionelles Spritzgießen und Spritzprägen.....	62
Bild 52: Mittels Spritzgießen in COP erreichte Abformung über der Formeinsatzoberflächentemperatur. ....	65
Bild 53: Mittels Spritzgießen in PP erreichte Abformung über der Formeinsatzoberflächentemperatur. ....	66
Bild 54: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in COP. ....	77
Bild 55: Einfluss der Massetemperatur beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in COP. ....	77
Bild 56: Einfluss der Nachdruckhöhe beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in COP. ....	78
Bild 57: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in COP. ....	78
Bild 58: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in PP. ....	79

---

Bild 59: Einfluss der Massetemperatur beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in PP. ....	79
Bild 60: Einfluss der Nachdruckhöhe beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in PP. ....	80
Bild 61: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim konventionellen Spritzgießen auf die Abformung in PP. ....	80
Bild 62: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim Spritzprägen auf die Abformung in COP. ....	81
Bild 63: Einfluss der Massetemperatur beim Spritzprägen auf die Abformung in COP. ....	81
Bild 64: Einfluss der Nachdruckhöhe beim Spritzprägen auf die Abformung in COP. ....	82
Bild 65: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim Spritzprägen auf die Abformung in COP. ....	82
Bild 66: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim Spritzprägen auf die Abformung in PP. ....	83
Bild 67: Einfluss der Massetemperatur beim Spritzprägen auf die Abformung in PP. ....	83
Bild 68: Einfluss der Nachdruckhöhe beim Spritzprägen auf die Abformung in PP. .	84
Bild 69: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim Spritzprägen auf die Abformung in PP. ....	84
Bild 70: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in COP. ....	85
Bild 71: Einfluss der Massetemperatur beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in COP. ....	85
Bild 72: Einfluss der Nachdruckhöhe beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in COP. ....	86
Bild 73: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in COP. ....	86
Bild 74: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in PP. ....	87
Bild 75: Einfluss der Massetemperatur beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in PP. ....	87
Bild 76: Einfluss der Nachdruckhöhe beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in PP. ....	88

Bild 77: Einfluss der Werkzeugtemperatur beim Spritzgießen mit variothermer Prozessführung auf die Abformung in PP. ....	88
--	----

## 7.6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ von COP Zeonor 1060R und PP H734-52 RNA bei unterschiedlichen Temperaturen. ....	15
Tabelle 2: Versuchsplan für die Verfahren konventionelles Spritzgießen und Spritzprägen für COP Zeonor 1060R. ....	34
Tabelle 3: Versuchsplan für die Verfahren konventionelles Spritzgießen und Spritzprägen für PP Dow H734-52 RNA. ....	35
Tabelle 4: Versuchsplan für das Verfahren Spritzgießen mit IR-variothermer Prozessführung für COP Zeonor 1060R. ....	36
Tabelle 5: Versuchsplan für das Verfahren Spritzgießen mit IR-variothermer Prozessführung für PP Dow H734-52 RNA. ....	36
Tabelle 6: Signifikanzniveaus und deren Interpretation [13]. ....	40
Tabelle 7: Erreichte Aufheizraten bei den Aufheiztests mit dem Infrarot-Strahler bei maximaler Heizleistung. ....	41
Tabelle 8: Gemessene Abformungsgrade in COP und PP, hergestellt im konventionellen Spritzgießverfahren, Streuung der Messwerte: 0,032... ..	45
Tabelle 9: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in COP und deren Signifikanzniveaus. ....	45
Tabelle 10: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in PP und deren Signifikanzniveaus. ....	47
Tabelle 11: Gemessene Abformungsgrade in COP und PP, hergestellt im konventionellen Spritzprägeverfahren. Streuung der Messwerte: 0,028. ....	50
Tabelle 12: Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in COP und deren Signifikanzniveaus. ....	51
Tabelle 13: Effekte der veränderten Größen auf die normierte Abformung der Struktur in PP und zugehörige Signifikanzniveaus. ....	52

---

Tabelle 14:	Gemessene Abformungsgrade in COP und PP, hergestellt im Spritzgießverfahren mit variothermer Prozessführung, Streuung der Messwerte: 0,041. ....	55
Tabelle 15:	Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in COP und deren Signifikanzniveaus. ....	56
Tabelle 16:	Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in PP und deren Signifikanzniveaus. ....	57
Tabelle 17:	Vergleich der gemessenen Abformung in PP und COP mit konventionellem Spritzgießen und Spritzprägen. ....	59
Tabelle 18:	Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in COP und deren Signifikanzniveaus. ....	60
Tabelle 19:	Effekte der variierten Parameter auf den Abformungsgrad der Struktur in PP und deren Signifikanzniveaus. ....	62
Tabelle 20:	Eingestellte und mit dem MTS 408 Forminnenthermometer gemessene Formeinsatzoberflächen- und Schmelzetemperatur und die daraus errechnete Kontakttemperaturen für COP. ....	64
Tabelle 21:	Eingestellte und mit dem MTS 408 Forminnenthermometer gemessene Formeinsatzoberflächen- und Schmelzetemperatur und die daraus errechnete Kontakttemperatur für PP. ....	64
Tabelle 22:	Messdaten für die spezifische Wärmekapazität für COP Zeonor 1060R und PP Dow H734-52 RNA. ....	90
Tabelle 23:	Gemessene Viskosität von PP Dow H734-52 RNA. ....	91
Tabelle 24:	Gemessene Viskosität von COP Zeonor 1060R. ....	91
Tabelle 25:	Konstanten des Carreau-Ansatzes für COP Zeonor 1060R und PP Dow 734-52 RNA. ....	91