

**Abgeformte polymere Mikrostrukturen
für die optische Informationstechnik**

von der Fakultät für Elektrotechnik

der

Universität Dortmund

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Stefan Kalveram

Dortmund

Jahr: 2000

Tag der mündlichen Prüfung: 6.3.2001

Hauptreferent: Prof. Dr. A. Neyer

Korreferent: Prof. Dr. J. Petermann

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1994 bis 1998 am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Fakultät Elektrotechnik an der Universität Dortmund bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Neyer im wesentlichen im Rahmen eines BMBF-Projektes.

Herrn Prof. Neyer danke ich für die interessante Themenstellung, die Betreuung und Begleitung der vorliegenden Arbeit durch zahlreiche Gespräche, Diskussionen und Anregungen sowie den hervorragenden Arbeitsbedingungen an seinem neu eingerichteten Arbeitsgebiet.

Für die Übernahme des Korreferates möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Prof. Petermann bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Rainer Wiesmann, Herrn Dipl.-Ing. Stefan Rudolph, Herrn Dr. Matthias Jöhnck und Herrn Dr.-Ing. Guido Pompe danke ich für ihre Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit. Ihnen allen ist zu danken für das gute Arbeitsklima am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik.

Mein besonderer Dank gilt auch den vielen Studien- und Diplomarbeitern, die wichtige Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben. Hier seien nur stellvertretend für alle Holger Gester, Dirk Müntefering und Dirk Siepe genannt.

Frau Iris Spengler, Frau Petra Sauerland, Herrn Hans-Georg Scholz und allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik sei für das fruchtbare Arbeitsklima und die gute Zusammenarbeit gedankt. Der mechanischen Werkstatt der Elektrotechnik unter Leitung von Herrn Glatzel möchte ich danken für die präzise und oftmals spontane Ausführung von Aufträgen, ohne die wir oftmals länger auf den Betrieb der Maschine hätten warten müssen.

Meinen Eltern gilt großer Dank, da sie mir das Studium und damit auch diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Ganz besonders möchte ich an dieser Stelle meiner Frau Sandra danken.

1 EINLEITUNG	1
2 ABFORMTECHNIKEN	5
2.1 Das Spritzgießen.....	5
2.2 Das Spritzgießen von Mikrostrukturen.....	7
2.2.1 <i>Materialien für spritzgegossene Mikrostrukturen</i>	7
2.2.2 <i>Entlüftung des Formnestes</i>	8
2.2.3 <i>Temperierung des Werkzeuges</i>	8
2.2.4 <i>Zykluszeitenminimierung</i>	9
2.2.5 <i>Optische Spritzgießkomponenten</i>	11
2.2.6 <i>Füllphase</i>	12
2.2.7 <i>Einspritzen und Dosieren</i>	12
2.2.8 <i>Reinraumfertigung</i>	12
2.2.9 <i>Weitere Anwendungen</i>	13
2.3 Angewandte Spritzgieß-Prozesse	13
2.3.1 <i>Das Standard-Spritzgießen</i>	15
2.3.2 <i>Das Standard-Spritzprägen</i>	16
2.3.3 <i>Das modifizierte Mikro-Spritzprägen</i>	16
2.4 Das Heißprägen	17
2.5 Das Heißprägen von Mikrostrukturen	17
2.5.1 <i>Besonderheiten und Vorteile des Heißprägens</i>	18
2.5.2 <i>Temperierung beim Heißprägen</i>	19
2.5.3 <i>Durch Heißprägen hergestellte Komponenten</i>	19
2.6 Angewandte Heißpräge-Prozesse mit geschlossener Kavität.....	19
2.6.1 <i>Modulares Heißprägewerkzeug</i>	20
2.6.2 <i>Zyklusablauf beim Heißprägen von Mikrostrukturen mit geschlossener Kavität</i>	20
3 POLYMERE MATERIALIEN	22
3.1 Verwendete Spritzgießmassen.....	23
3.1.1 <i>Polymethylmethacrylat, PMMA</i>	24
3.1.2 <i>Polymethacrylmethylimid, PMMI</i>	27

3.1.3 Lacton-Methylmethacrylat-Copolymere, EML-MMA	29
3.2 Verwendete Heißprägematerialien	30
3.2.1 Große Kavität	30
3.2.2 Kleine Kavität	30
3.3 Verwendete Kernmonomere für die Wellenleiter.....	30
3.3.1 EGDMA (D14)/TFPMA.....	31
3.3.2 PFPMA/TeCEA	33
3.4 Andere optische Polymere/Monomere	35
4 EINBINDUNG DER ABFORMTECHNIK IN DIE SIGA-TECHNIK.....	36
4.1 Übersicht über die SIGA-Technik	36
4.2 Silizium-Mikrostrukturierung.....	37
4.3 Galvanische Replikation und Formeinsatzbearbeitung	40
4.4 Abformung in Kunststoff.....	42
4.5 Wellenleiterherstellung.....	43
4.6 Alternative Prozeßschritte oder Bearbeitungsmöglichkeiten	44
5 EQUIPMENT.....	46
5.1 Spritzgießmaschine.....	46
5.2 Spritzgießwerkzeug	48
5.3 Heißprägewerkzeug	50
5.4 Temperiergeräte und Temperierung des Heißprägewerkzeuges.....	54
5.5 Heißkanalgerät.....	57
5.6 Vernetzung der Geräte	57
6 PROZESSE, QUALITÄTSKRITERIEN, OPTIMIERUNGEN.....	62
6.1 Qualitätskriterien beim Spritzgießprozess.....	62
6.1.1 Abformgenauigkeit.....	62
6.1.2 Substratdurchbiegung.....	64
6.2 Optimierungen beim Spritzgießen.....	65
6.3 Qualitätskriterien beim Heißprägeprozess.....	68
6.4 Optimierungen beim Heißprägen	68

6.5 Verschiedene Temperierungsarten	68
6.6 Mikrostrukturierte Nickelbleche.....	69
7 ABGEFORMTE MIKROSTRUKTUREN	71
7.1 Spritzgießkomponenten für die Integrierte Optik.....	71
7.1.1 Grundelemente der integriert-optischen Strukturen.....	72
7.1.2 Oberflächenplanität.....	75
7.2 Heißprägekomponenten für die Integrierte Optik.....	78
7.2.1 Große Kavität, Backplane	78
7.2.2 Oberflächenplanität.....	81
7.2.3 Kleine Kavität, thermooptischer Schalter	82
7.3 Nicht-optische Heißprägekomponenten	84
8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	88
9 LITERATUR	91

1 Einleitung

In der modernen Gesellschaft, die sich Informationsgesellschaft nennt, existiert ein hoher Bedarf an Information, der einher geht mit dem ebenso hohen Bedarf an einer leistungsfähigen Informationsübertragung und Informationsverteilung. Hierfür werden Technologien und Techniken benötigt, die es meist erst zu entwickeln gilt.

Zur Informationsübertragung und -verteilung dienen in unserer Zeit und voraussichtlich auch in der Zukunft leistungsfähige optische Übertragungssysteme, da die konventionellen Kupferkabel in ihren verschiedenen Ausführungen, z.B. als Zweidrahtleitungen oder Koaxialleitungen, dem hohen Bedarf an Datenübertragung nicht mehr genügen. Für die großen Bandbreiten, die z.B. bei Telekommunikations-, Video-, TV- oder anderen Datensignalen („Internet“) benötigt werden, sind hochbitratige optische Glasfasernetze notwendig.

Die optischen Glasfasernetze, die sich in den letzten Jahren in der Übertragungstechnik über längere Strecken (einige 100 km) durchgesetzt haben, werden sich in naher Zukunft voraussichtlich auch bei den kürzeren (km-Bereich) und letztendlich auch bei den kürzesten Strecken (m-Bereich) etablieren.

Bei der optischen Übertragung kann man im wesentlichen zwischen zwei Übertragungstechniken unterscheiden, der Monomode- und der Multimodetechnik. Während die Erstere den Vorteil hat, die größtmögliche Bandbreite zur Verfügung zu stellen, so liegen die Vorteile der Letzteren in der einfacheren Handhabung aufgrund der größeren mechanischen Toleranzen [Jöh1], die man sich bei der Konfektionierung erlauben kann, ohne stark erhöhte Verluste zu erhalten. Obwohl zur Zeit in den Kurzstreckenverbindungen (bis ca. 150 m) die Multimodetechnik vorherrscht, wird sich auch hier in absehbarer Zeit die Monomodetechnik durchsetzen, da immer größere Bandbreiten gefordert sind, die mittels Multimodetechnik nicht mehr zu bewältigen sind.

Zusätzlich zu den eigentlichen optischen Übertragungstrecken, die aus Glasfasern bestehen, werden mit einer weiteren Verbreitung der optischen Technik in niedrigere Netz-Hierarchie-

ebenen auch Komponenten gebraucht, welche die übertragenen Informationen auf optischer Ebene verteilen, umleiten und weiterverarbeiten. Eine Umwandlung der optischen in elektrische Signale, die dann weiterverarbeitet und wieder in optische Signale zurückgewandelt werden, ist aufwendig und daher nur für die obersten Netzhierarchien möglich. Sobald sich das optische Netz mehr verzweigt („Verästelung“), sind Elemente nötig, die z.B. eine Verteilung der Signale rein optisch vornehmen. Dafür werden beispielsweise optische Power-Splitter benötigt. Andere Komponenten sind z.B. Schalter [Hor], die durch einfaches Umschalten einen alternativen Weg für die optischen Signale festlegen, wenn z.B. eine Übertragungsstrecke defekt ist. Weitere optische Elemente sind z.B. Transceiver-Module, die einen bidirektionalen Datenverkehr an den Endstellen der optischen Netze auf niedrigster Ebene ermöglichen [Rob]. Heutzutage sind integriert-optische Komponenten aus folgenden Materialien/Materialsystemen herstellbar:

- Lithiumniobat (LiNbO_3) [Alm, Leo],
- Glas [Buc, Fue],
- Silizium [HofM, MülJ],
- Halbleiter wie GaAs, InP... [Tro, Gin, Bis, Ped],
- Polymere [Kei2, Fis, Die, Dan1, Hec4].

Wellenleitende Strukturen werden im Falle von LiNbO_3 durch die Eindiffusion von Titan hergestellt, im Falle von Glas durch die Eindiffusion von Silberionen aus einer Schmelze. Dieses sind aufwendige Prozeßschritte, die mit jedem einzelnen Bauteil durchgeführt werden müssen. Ebenso verhält es sich bei der Herstellung von Siliziumnitrid-Wellenleitern, die mittels Dünnschichttechniken auf einem Siliziumwafer aufgebracht werden. Integriert-optische Komponenten auf der Basis von Halbleitern, wie Indiumphosphid (InP) oder Galliumarsenid (GaAs) sind aufgrund der exklusiven Materialien und der Herstellungsverfahren recht teuer und werden nur in Spezialfällen eingesetzt.

Die Verfahren zur Herstellung von integriert optischen Komponenten auf Polymerbasis kann man in zwei Klassen einteilen. Zum einen werden integriert optische Strukturen in einer dünnen Polymerschicht auf einem Träger aus einem anderen Material, meist Silizium, Glas

oder Keramik, hergestellt. Zum anderen werden massive Substrate mittels Replikationstechniken an der Oberfläche mikrostrukturiert.

Für eine zügige Verbreitung der optischen Übertragungstechnik in untere Hierarchieebenen der Netze ist es notwendig, kostengünstige Herstellungsverfahren für die benötigten optischen Komponenten mit einfachen Materialien zu haben. Dazu gehören Massenfabrikationsverfahren wie die Replikationstechniken in Kunststoffen, die einige entscheidende Vorteile gegenüber anderen Technologien und Materialien haben. Die Komponenten können identisch zu Tausenden hergestellt werden, ohne daß die einzelne Komponente den aufwendigen und meist komplizierten Prozeß durchläuft, bei dem die wellenleitenden Strukturen definiert werden. Werden Polymere nur als wellenleitende Struktur eingesetzt, beispielsweise auf einem Siliziumwafer [Kei1, Hik, Ima], so haben die einzelnen Bauteile den kompletten Strukturierungsprozeß zu durchlaufen und sind dementsprechend teuer.

Es wird also eine Technologie benötigt, die ein Massenfabrikationsverfahren mit kostengünstigen Materialien kombiniert, wie z.B. die SIGA-Technik [Ney4].

Die in dieser Arbeit beschriebene Abformtechnik ist dabei ein wesentlicher Bestandteil, die anderen Technologieschritte werden in Kapitel 4 erläutert.

Die hier entwickelte und vorgestellte Abformtechnik in Polymeren ist dabei nicht nur in der Informationstechnik für integriert-optische Komponenten einsetzbar, sondern ebenso in weiteren Wachstumsmärkten wie der Sensorik, der Medizintechnik, der Mikrofluidik und der Mikroanalytik. Dabei kann für die verschiedenen Anwendungsfelder aus einer Vielzahl von verfügbaren Polymeren das Material ausgewählt werden, das den Anforderungen für die spezielle Anwendung entspricht.

Im folgenden Kapitel werden zunächst allgemein verschiedene Abformtechniken vorgestellt, dann werden die speziellen Eigenarten bei der Anwendung auf Mikrostrukturen geschildert, hier im speziellen Fall der integriert-optischen Komponenten. Anschließend werden die für die

SIGA-Technik relevanten Verfahren, modifiziertes Mikrospritzprägen und Heißprägen mit geschlossener Kavität, näher erläutert.

Im Kapitel 3 werden die verwendeten Polymere, inklusive der Einsatzfelder in der Integrierten Optik und der aus den Materialeigenschaften resultierenden Forderungen an die Technologie, beschrieben.

Die SIGA-Technik und die Einbindung der Abformtechnik in dieselbe wird in Kapitel 4 vorgestellt. Als Beispiele für hergestellte integriert-optische Strukturen werden passive Power-Splitter mit integrierten Faserführungsstrukturen, thermooptische Schalter sowie eine optische Backplane beschrieben. Ebenso wird auf Modifikationen an der SIGA-Technik eingegangen, z.B. wie durch alternative Prozeßschritte die eigentliche Silizium-Mikrostrukturierung sinnvoll ergänzt werden kann.

In Kapitel 5 werden das verwendete Equipment inklusive der Spritzgießmaschine, die entwickelten und optimierten Werkzeuge sowie die zum Prozeß des Abformens notwendige Peripherie beschrieben. Ebenso wird näher auf den temperaturgesteuerten Prozeßablauf des Abformens eingegangen, sowohl beim Spritzgießen als auch beim Heißprägen, im Rahmen der durchgeführten Implementierung des Variotherm-Spritzgießzyklusses. Beide Verfahren werden auf derselben Spritzgießmaschine durchgeführt.

Kapitel 6 beschreibt die Qualitätskriterien und die Abformtreue der Mikrostrukturen und zeigt Grenzen der Technologie auf. Ferner werden Ansatzpunkte zur Optimierung erläutert. Ein weiterer Punkt ist die Vorbehandlung der Formeinsätze, die ebenfalls vorgestellt wird.

In Kapitel 7 werden schließlich die für die optische Informationstechnik abgeformten Strukturen beschrieben. Dabei wird zwischen spritzgegossenen und heißgeprägten Komponenten unterschieden. Außerdem wird am Beispiel einer nicht-optischen Komponente das Potential der SIGA-Technik und der Mikroabformtechnik in Polymeren veranschaulicht.

Eine Zusammenfassung und ein Ausblick folgen in Kapitel 8.

2 Abformtechniken

Der entscheidende Vorteil der Abformtechnik besteht darin, daß aus einem präzisen Formeinsatz Tausende von Duplikaten in Kunststoff hergestellt werden können. Das bekannteste Beispiel für in einer Massenfabrikationstechnologie hergestellten Duplikate sind CDs.

Ausgangsbasis für die Abformung von Mikrostrukturen in Kunststoffen sind sogenannte Formeinsätze aus Metall, meist Nickel, die die Mikrostrukturen enthalten. Diese können dann auf folgende Weise in Kunststoff abgeformt werden:

- Spritzgießen,
- Heißprägen,
- Gießen,
- Reaktionsgießen.

Hier sollen nur die ersten beiden, bedeutenderen Arten im folgenden näher erläutert werden. Dabei werden jeweils zuerst die allgemeinen Verfahren zur Herstellung polymerer Komponenten erläutert, später wird auf die speziellen Eigenarten bei der Abformung von Mikrostrukturen eingegangen. Anschließend folgt eine Darstellung der in dieser Arbeit verwendeten Verfahren, mit der Erklärung aller Besonderheiten.

2.1 Das Spritzgießen

Ein normaler Spritzgießzyklus (siehe Bild 2.1) beginnt mit dem Schließen des Werkzeuges (①), durch das Bewegen der losen Werkzeugplatte der Spritzgießmaschine (siehe Bild 2.2).

Nachdem die Plastifiziereinheit (Einspritzeinheit) zum Werkzeug bewegt worden ist (②), wird während der Füllphase (③) die flüssige Formmasse mittels der Schnecke in die Kavität, das sogenannte Formnest, eingespritzt. Dabei wird die Schnecke als Kolben benutzt. Wenn das Formnest fast gefüllt ist, beginnt die Nachdruckphase (④), während der nochmal kurz und kräftig mit der Schnecke nachgedrückt wird, um die Formmasse zu verdichten. Wesentlicher Unterschied zwischen Füllphase und Nachdruckphase ist, daß bei ersterer die Einspritzgeschwindigkeit (Volumen oder Schneckenweg pro Zeiteinheit) konstant ist, während in der Nachdruckphase der aufgebaute Druck konstant gehalten wird. Es schließt sich die Restkühlzeit an, während der die Formmasse im Formnest erstarren kann. Füllphase, Nachdruckphase und Restkühlzeit bestimmen zusammen die gesamte Kühlzeit, die so gewählt werden muß, daß das Formteil am Ende stabil genug, d.h. kalt genug ist.

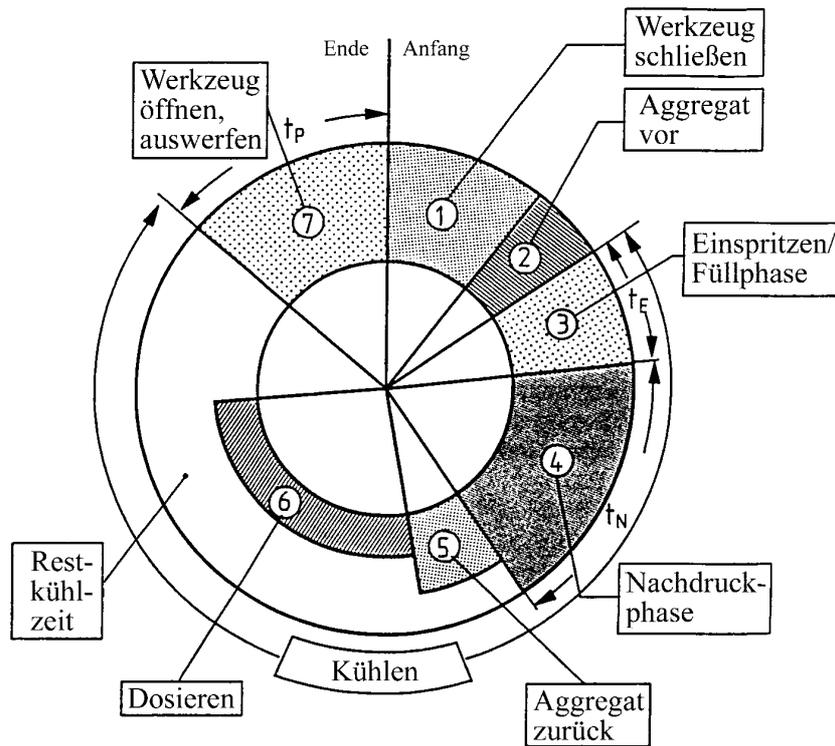


Bild 2.1 Zyklusablauf beim Spritzgießen [Mic3]

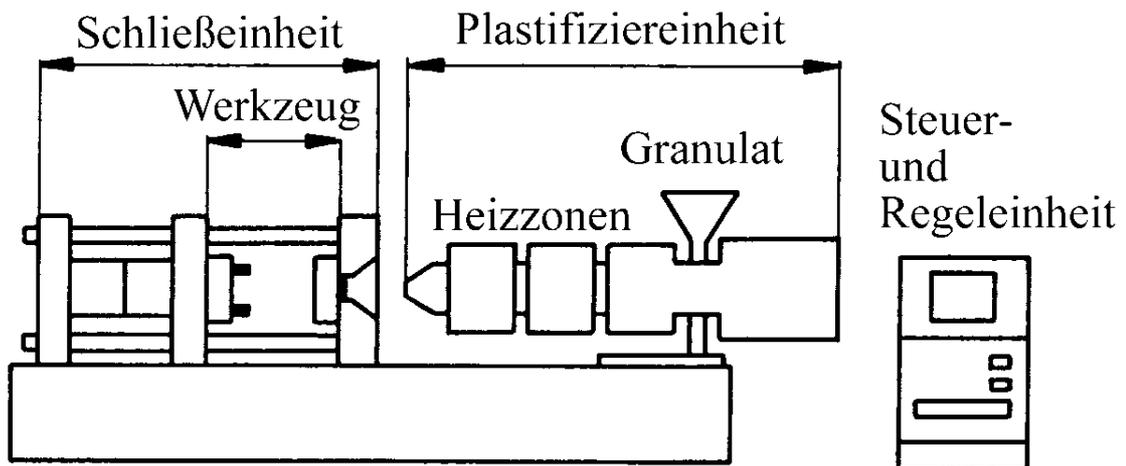


Bild 2.2 Schema einer Spritzgießmaschine [Mic2]

Kurz vor Ende der Restkühlzeit wird durch Drehen der Schnecke neues Material aus dem Materialeinzug und Granulattrichter gefördert (⑥), durch die Heizzonen und die entstehende Reibungswärme aufgeschmolzen und vermengt (homogenisiert). Durch das nach vorne in den

Schneckenorraum strömende Material wird die Schnecke nach hinten gedrückt, und gelangt in die Position für die nächste Füllphase beim nachfolgenden Teil. Direkt nach dieser Aufdosierphase wird das Werkzeug geöffnet und mit Hilfe des Auswerfers das fertige Kunststoffteil entformt (⑦).

2.2 Das Spritzgießen von Mikrostrukturen

Infolge der Entwicklung des LIGA-Verfahrens (Röntgen-**L**ithographie, **G**alvanoformung und **A**bformung) wurden vermehrte Anstrengungen im Bereich der Abformung von Mikrostrukturen in Kunststoff unternommen, dem wesentlichen Prozeßschritt bei diesem Verfahren, der eine Massenfabrikation erst ermöglicht. Dabei spielen, wie schon erwähnt, Spritzgießen und Heißprägen die wichtigste Rolle, und haben das früher wichtigere Reaktionsgießen verdrängt [Nök].

So wird Spritzgießen als Verfahren zur Massenproduktion von Mikrostrukturen u.a. aus Polymeren [Pio, Rup1], Metallen [Rup2] und Keramiken [Bau] eingesetzt. Im folgenden wird auf einige Aspekte eingegangen, die besonders beim Spritzgießen von Mikrostrukturen wichtig sind. Auf die Herstellung von metallischen Mikrostrukturen mit dem Umweg über „verlorene Formen“, d.h. spritzgegossene polymere Strukturen, die in großen Stückzahlen galvanisch in metallische Strukturen repliziert werden, wird hier nicht näher eingegangen [Thi].

2.2.1 Materialien für spritzgegossene Mikrostrukturen

Während im allgemeinen Polymere verwendet werden, um Mikrostrukturen mittels Spritzgießverfahren herzustellen, gibt es auch einige Anwendungsfälle, in denen andere Materialien verwendet werden sollen oder müssen. Ist z.B. hohe Temperaturfestigkeit, hohe Leitfähigkeit oder große Resistenz gegenüber Chemikalien oder aggressiven Atmosphären notwendig, ist der erhöhte Aufwand der Herstellung von Mikrostrukturen aus Metallen oder Keramiken gerechtfertigt. Bei diesen Verfahren wird beispielsweise der Polymermasse ein Pulver zugesetzt und in einem üblichen Spritzgießzyklus verarbeitet. Anschließend wird beim so erhaltenen „Grünling“, normalerweise durch eine oxidierende Atmosphäre, der Kunststoff entfernt, was den „Braunling“ ergibt [Rup2]. Beim anschließenden Sintern wird der „Braunling“ zu einer kompakten verdichteten Mikrostruktur. Ein Problem, das bei diesem Verfahren auftritt, besteht darin, daß die Teile während des Sinterns schrumpfen, was entsprechend im Design vorgehalten werden muß. Ein weiteres Problem ist die geringere

Oberflächenqualität im Vergleich zu Polymeren. Aufgrund der nicht unendlich kleinen Partikelgröße der verwendeten Pulver ergeben sich keine optimal glatten Strukturen. Wesentlich ist hierbei auch das Verhältnis zwischen Partikelgröße und Partikelanteil der Einspritzmasse, welches sich erheblich auf die Qualität der Teile auswirkt.

Allgemein gibt es einige Besonderheiten zu beachten, wenn Mikrostrukturen spritzgegossen werden sollen, im folgenden dargestellt für den häufigeren Fall von polymeren Mikrostrukturen.

2.2.2 Entlüftung des Formnestes

Aufgrund der relativ kleinen Strukturen, die gefüllt werden müssen, ist meist die normalerweise übliche Entlüftung über Riefen in der Trennebene nicht möglich, da die Mikrostrukturen von der gleichen Größenordnung sind. Um die kleinen Mikrostrukturen komplett zu füllen, muß die Schmelze eine niedrige Viskosität aufweisen und würde so auch in eben diese Entlüftungskanäle in der Trennebene gedrückt werden.

Eine Entlüftung ist aber zwingend nötig, um eine komplette Füllung des Formnestes zu gewährleisten und ein Verbrennen der Formmasse, vor allem in Sacklöchern, zu verhindern (Dieseleffekt). Deshalb wird meist das Formnest vor dem Füllvorgang evakuiert, üblicherweise bis zu einem Druck von weniger als 1 mbar [Nök, Rog]. Eine andere Variante der Entlüftung wird in Kapitel 2.3 beschrieben.

2.2.3 Temperierung des Werkzeuges

Eine Temperierung der Spritzgießwerkzeuge auf konstante Temperatur, wie beim Standardspritzguß normalerweise üblich, ist bei Mikrostrukturen nur möglich bei Strukturabmessungen größer als ca. 5 µm bzw. Aspektverhältnissen kleiner als 2 [ArnJ].

Mikrostrukturen, die kleiner sind bzw. ein höheres Aspektverhältnis haben, werden im sogenannten Variothermverfahren [Del] hergestellt. Dabei durchläuft das Werkzeug einen Temperaturzyklus (siehe Bild 2.3), der gewährleistet, daß die einströmende Polymermasse nicht sofort schlagartig an den Werkzeugwänden erstarrt, sondern erst die Mikrostrukturen komplett ausfüllt und erst fest wird, während das Werkzeug auf die Entformungstemperatur heruntergekühlt wird, die unterhalb der Glas temperatur des jeweiligen Kunststoffes liegt.

Dieser Temperaturzyklus verlängert die normalerweise üblichen Spritzgießzyklen von unter 1 Minute auf einige Minuten, da bei jedem herzustellenden Teil das Werkzeug auf eine

Temperatur deutlich oberhalb der Glastemperatur aufgeheizt und anschließend wieder auf eine Temperatur darunter abgekühlt werden muß, bei der das Formteil sicher entformt werden kann, ohne zu verbiegen oder sonstigen Schaden zu nehmen.

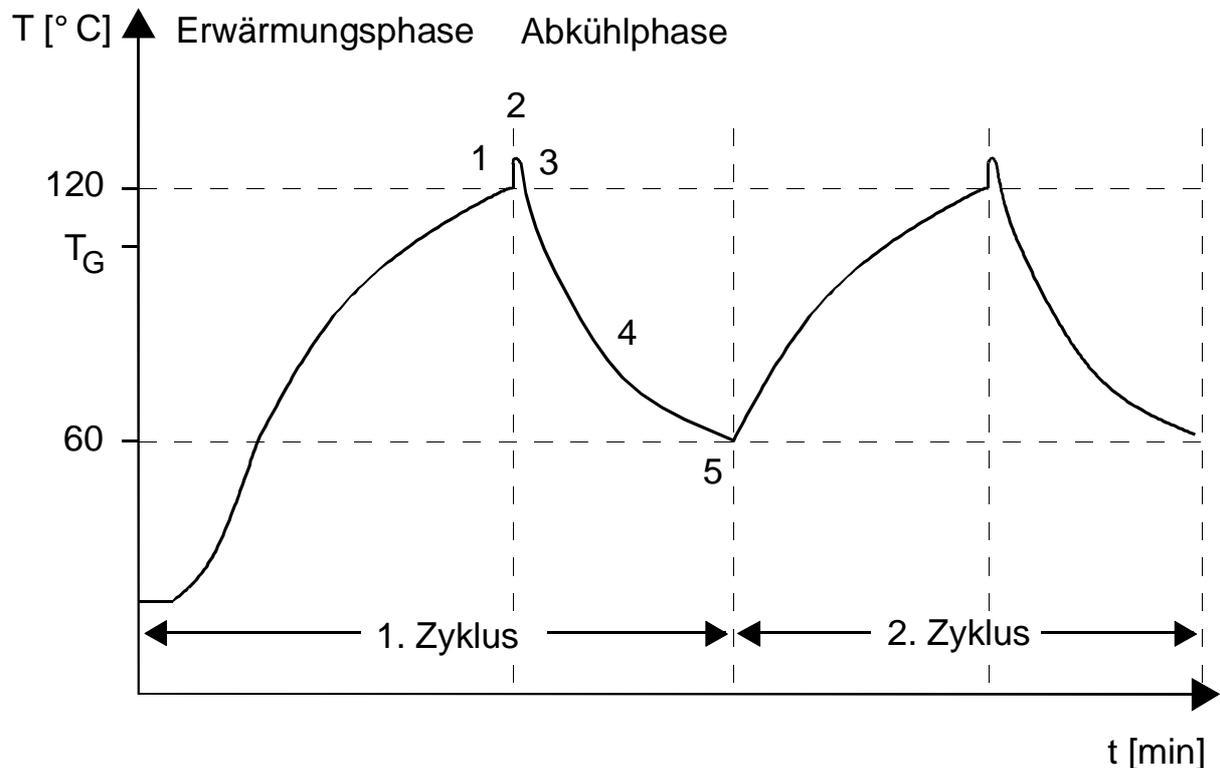


Bild 2.3 Variotherm-Temperaturzyklus

2.2.4 Zykluszeitenminimierung

Einer wirtschaftlichen Produktion steht im Prinzip das für hochwertige Mikrostrukturen notwendige lange Variothermverfahren entgegen. Zur Reduzierung der Zykluszeiten bzw. der Erhöhung des Durchsatzes (Mikrostrukturen pro Zeit) gibt es unterschiedliche Ansätze. Dazu können folgende Faktoren variiert werden:

- Temperierungsart (Medium),
- Temperierkonzept,
- Werkzeugmasse (Größe),
- Anzahl der Formnester je Formeinsatz,
- Anzahl der Formeinsätze je Werkzeug,
- Isolierung der Werkzeuge, bzw. der Formnester.

Um eine effiziente Temperierung, Heizung wie Kühlung, für den Variothermzyklus zu erreichen, können unterschiedliche Temperiermedien eingesetzt werden. Dies sind u.a. elektrische Heizpatronen, Wasser, Öl und Luft bzw. Gase. Nachteil der elektrischen Heizpatronen ist, daß sie nur zum Heizen verwendet werden können, und eine begrenzte Flexibilität bei der Wahl der Heizstellen haben. Wasser kann in Druckwassergeräten bis maximal 200 Grad geheizt werden, nachteilig ist der extrem hohe Druck, den insbesondere Zuleitungen und Temperierkanäle im Werkzeug aushalten müssen. Luft und Gase sind eher zur Kühlung geeignet, indem sie sehr kalt während der Kühlphase in entsprechende Kühlbohrungen eingelassen werden. Öle bieten sich als Medium zum Heizen und zum Kühlen an, da sie mit handelsüblichen Temperiergeräten beispielsweise zwischen 20 und 250 (oder 350) °C temperiert werden können [Hec2].

Eine auf Werkzeugseite aufwendige Möglichkeit, einen kurzen Temperierzyklus zu erreichen, ist, das Werkzeug mit Temperierkanälen anstelle von herkömmlichen Bohrungen zu versehen, also als Wärmetauscher zu konzipieren.

Ein weiterer Punkt bei der Reduktion der Zykluszeit ist, das zu temperierende Werkzeug möglichst klein zu halten. Ein interessantes Konzept sieht ein zweistufig konstruiertes, also gekapseltes Werkzeug vor, dessen äußerer Mantel konstant auf der Entformungstemperatur gehalten wird, wohingegen eine kleine Masse rund um das Formnest variabel temperiert wird [Mic1].

Ein neueres Verfahren für eine schnellere Heizphase im Variothermzyklus ist, Induktionswärme mittels eines Generators und einem dem Formnest angepaßten Induktor im Werkzeug, aber direkt an der Oberfläche zu erzeugen [Tew]. Vorteil dieser Methode ist die Erwärmung des Werkzeuges dort, wo eine höhere Temperatur benötigt wird, an den Formnestwänden, die in direkten Kontakt mit der Polymermasse kommen.

Neuere Heizelemente erzeugen z.B. einen Temperaturanstieg von $\Delta T=70^\circ$ innerhalb von nur 0,2s und sind sicherlich für bestimmte Anwendungsfälle gut zu gebrauchen [Jan].

Zur Vermeidung unnötiger Aufheizung der Maschine und der Umgebung sollte in jedem Fall, gleichgültig nach welcher Methode temperiert wird, das Werkzeug nach Möglichkeit wärmeisoliert sein, z.B. durch Wärmedämmplatten [Tew].

Um die effektive Zykluszeit je Formteil erheblich zu reduzieren, bietet es sich an, je mikrostrukturiertem Formeinsatz mehrere Formnester (4 bis 90) zu befüllen (siehe Bild 2.4),

bzw. in einem Werkzeug mehrere Formeinsätze (2 bis 4) zu verwenden. So kann die Zeit für ein Formteil von wenigen Minuten auf einige 10 Sekunden reduziert werden [Rup1]. Am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik wird ein Spritzgießwerkzeug eingesetzt, das für zwei Formeinsätze vorgesehen ist, welche jeweils für 4 Formnester zuständig sind, insgesamt also 8 Formnester aufweist.

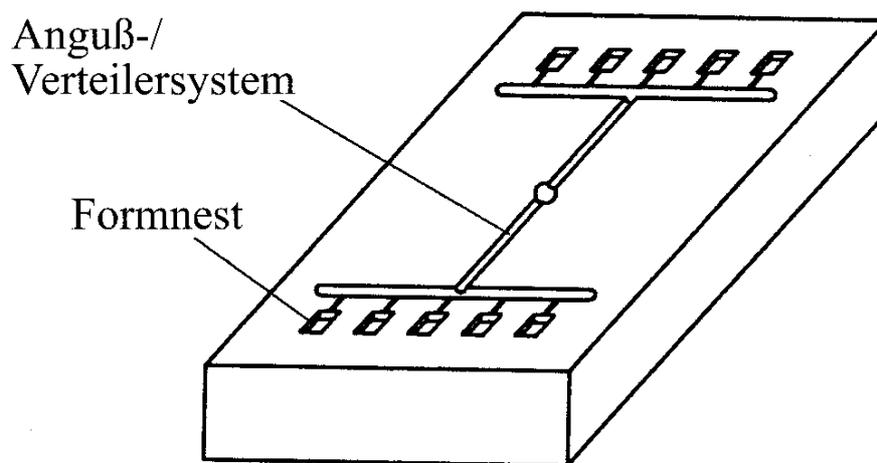


Bild 2.4 Mehrfachwerkzeug mit 10 Formnestern (Kavitäten) [Mic3]

2.2.5 Optische Spritzgießkomponenten

Ein wesentlicher Aspekt bei der Reduktion der Zykluszeit - vor allem bei der Herstellung optischer und mikrooptischer Komponenten - ist der Temperaturgradient beim Kühlen des Werkzeuges und damit des hergestellten Formteiles von der Einspritz- auf die Entformtemperatur. Durch eine zu schnelle Abkühlung werden durch den Einspritzprozeß induzierte Orientierungserscheinungen, sogenannte innere Spannungen, eingefroren [Woe]. Sie führen zu unterschiedlichen Brechzahlen und damit zur Doppelbrechung, die für optische Komponenten absolut unerwünscht ist [Hec2]. In der Literatur [Bus1...Bus4] ist ein einfaches thermoviskoelastisches Materialmodell zur Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Werkzeugtemperatur und Schrumpfung bzw. Streß entwickelt worden. Wichtigste Aussage für bei optischen Anwendungen verwendete amorphe Thermoplaste ist, daß eine höhere Abkühlgeschwindigkeit Streß im Formteil verursacht, und daß ein Temperaturgradient im Werkzeug zu einer Durchbiegung des Formteiles führt. Eine langsame Abkühlrate wirkt auf das Formteil wie ein zusätzlicher Temperungsschritt, der die Reduzierung innerer Spannungen

bewirkt [Hec1]. Hieraus folgt die Forderung nach einer unbedingt notwendigen temperaturgesteuerten Prozeßkontrolle für optische Präzisionsmikrostrukturen, wie z.B. Wellenleitergräben für Monomodetechnik und optische Gitter [Kol].

2.2.6 Füllphase

Ein weiterer Unterschied bei der Herstellung von polymeren Mikrostrukturen im Unterschied zu normalen Spritzgießprodukten liegt in der Füllphase des Spritzgießzyklusses. Mikrostrukturen werden nicht komplett in der Füllphase, sondern erst mit Hilfe der Nachdruckphase befüllt. Dies ist möglich durch die wesentlich höheren Temperaturen beim Variothermzyklus, bei dem die Masse nicht sofort an den Werkzeugwänden erstarrt. Die Füllung in der Nachdruckphase kann wesentlich genauer und reproduzierbarer geschehen. Ein Teil des unabdingbaren Schwundes (durch den Unterschied zwischen Masse- und Werkzeugtemperatur) kann so sofort ausgeglichen werden. Eine genauere Steuerung, sowie ein spezielles Temperaturprogramm sind allerdings Voraussetzung hierfür [WebL].

2.2.7 Einspritzen und Dosieren

Für Mikrostrukturen, die sich nicht nur reliefartig auf einer größeren Oberfläche befinden (wie die während dieser Arbeit hergestellten), sondern insgesamt nur 0,1 bis 1 g schwer sind, ist es vorteilhaft, auf ein neues Einspritz- und Dosierkonzept überzugehen [Mic1, Rog]. Bei dieser Variante ist die herkömmliche Schnecke einer Einspritzeinheit aufgeteilt in eine Dosiereinheit zum Aufschmelzen, Homogenisieren und Dosieren und eine Einspritzeinheit, die nur aus einem Kolben und Zylinder besteht. Eine wesentlich genauere Dosierung und Einspritzmenge kann realisiert werden durch den kleinen Kolbendurchmesser, der bei einer Schnecken-einspritzeinheit mechanisch nicht mehr machbar wäre.

2.2.8 Reinraumfertigung

Für anspruchsvolle Mikrostrukturen ist absolute Sauberkeit Grundvoraussetzung bei der Produktion. Dies ist vorrangig nötig für medizinische und optische Mikrostrukturen. Der Spritzgießprozeß ist dabei ein selbstreinigender Prozeß, allerdings muß für eine Sauberkeit der mikrostrukturierten Formeinsätze und des Spritzgießgranulates gesorgt werden. Für die Weiterverarbeitung der frisch hergestellten Teile gibt es verschiedene Konzepte zur Reinraumfertigung [ThoH]. So ist ein unter Überdruck stehender Tunnel von der Maschine

bzw. der Schließeinheit zum Reinraum möglich. Andererseits kann der komplette Schließ- und Werkzeugbereich der Maschine in einem Reinraumzelt bzw. in einer Reinraumkabine sein. Die dritte Möglichkeit ist, daß sich der Schließbereich der Maschine im Reinraum befindet, der andere Maschinenbereich durch eine Wand getrennt ist. Ebenfalls möglich ist die Produktion im Reinraum, dies ist allerdings nur sinnvoll bei vollelektrischen Maschinen.

2.2.9 Weitere Anwendungen

Eine weitere sinnvolle Anwendungsmöglichkeit der Spritzgießtechnik liegt in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Hier ist insbesondere die Herstellung sogenannter Motherboards [Göt] oder optischer Bänke [SchH] in Kunststoff für die Aufnahme anderer in Hybridtechnik hergestellter Mikrostrukturen zu nennen [Bre, Bäck]. Außerdem können Steckersysteme [Ger], Gehäuse [Rob] usw. gefertigt werden. Insbesondere für die optische Multimodetechnik ist die Herstellung von Steckersystemen durch Spritzgießen von Polymeren geradezu ideal, da bei der Multimodetechnik eine größere Steckertoleranz möglich ist, die zu keinerlei Problemen, wie zusätzlicher hoher Dämpfung, führt [Zie]. Auch als Vorform für andere Verfahren wie z.B. das Microtransfer-Molding werden Mikrostrukturen benötigt, um dreidimensionale Netze und Gitter aufzubauen [Zha].

2.3 Angewandte Spritzgieß-Prozesse

Am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik wird die Abformtechnik auf einer konventionellen Spritzgießmaschine (siehe Bild 2.5) durchgeführt, die nur geringfügig erweitert worden ist (siehe Kapitel 5). Die Besonderheit liegt dabei in der eingesetzten Werkzeugtechnik. Dabei werden sowohl zum Spritzgießen, als auch zum Heißprägen Werkzeuge mit einer geschlossenen Kavität eingesetzt, in die entweder die heiße Polymermasse eingespritzt wird, oder aber ein Polymerrohling eingelegt wird. Integriert in die Werkzeuge ist ein Prägezylinder, der für eine besonders gute Übertragung der Mikrostrukturen vom Formeinsatz in den Kunststoff sorgt, indem der bei der Verarbeitung auftretende Schrumpf durch Druck kompensiert wird.

Bei dieser Variante ist eine Evakuierung des Formnestes, zumindest bei Mikrostrukturen mit kleineren Aspektverhältnissen (bis etwa 5), nicht extra notwendig, da die Rückseiten der Formnester beweglich sind (zum Prägen) und somit einen kleinen Spalt aufweisen, durch den die Luft entweichen kann.

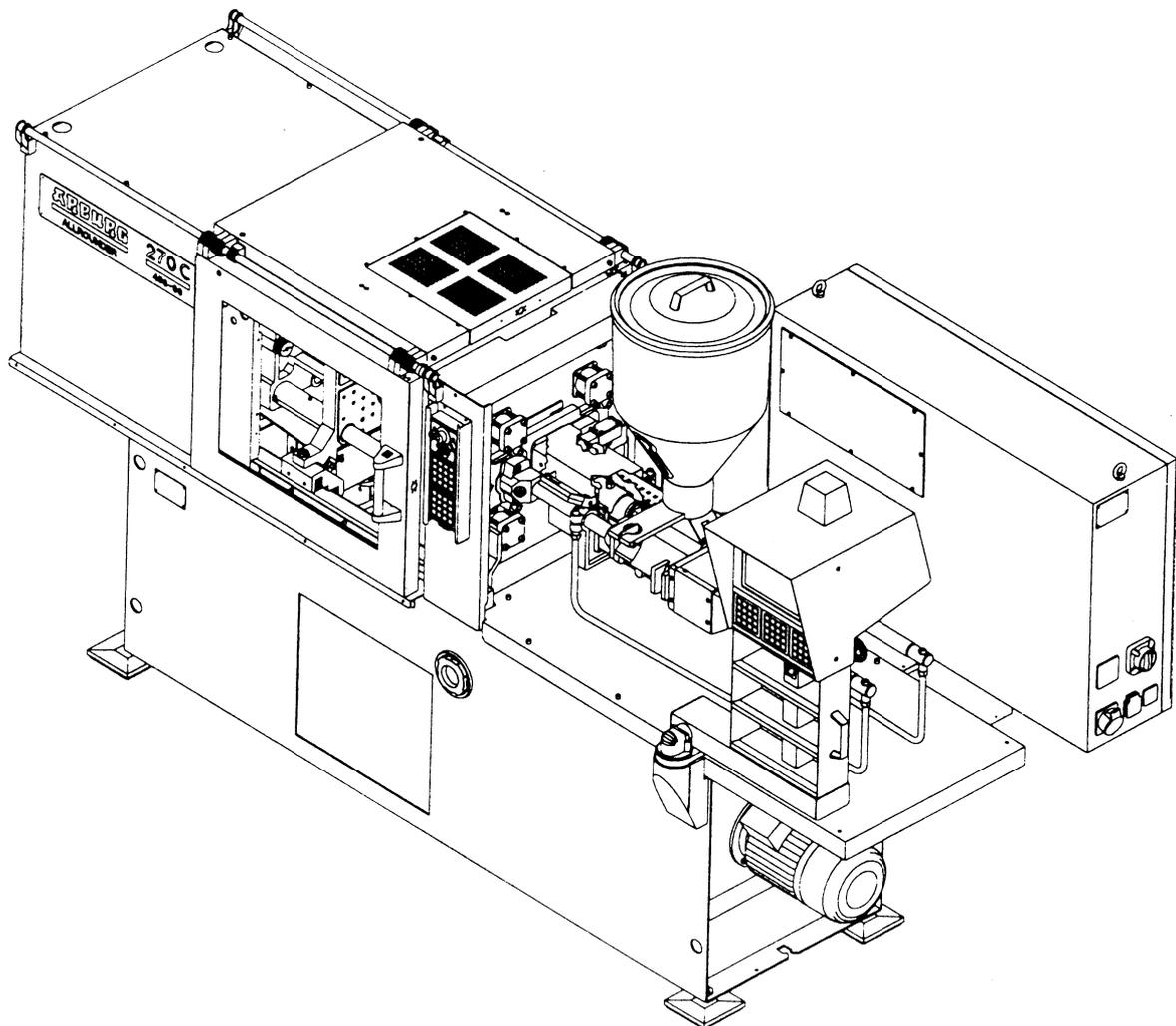


Bild 2.5 Schnecken-spritzgießmaschine Arburg Allrounder 270 C 400-90

In Bild 2.6 ist das verwendete Spritzgießwerkzeug schematisch dargestellt, mit dem drei verschiedene Prozesse realisiert werden können, die nachfolgend beschrieben werden.

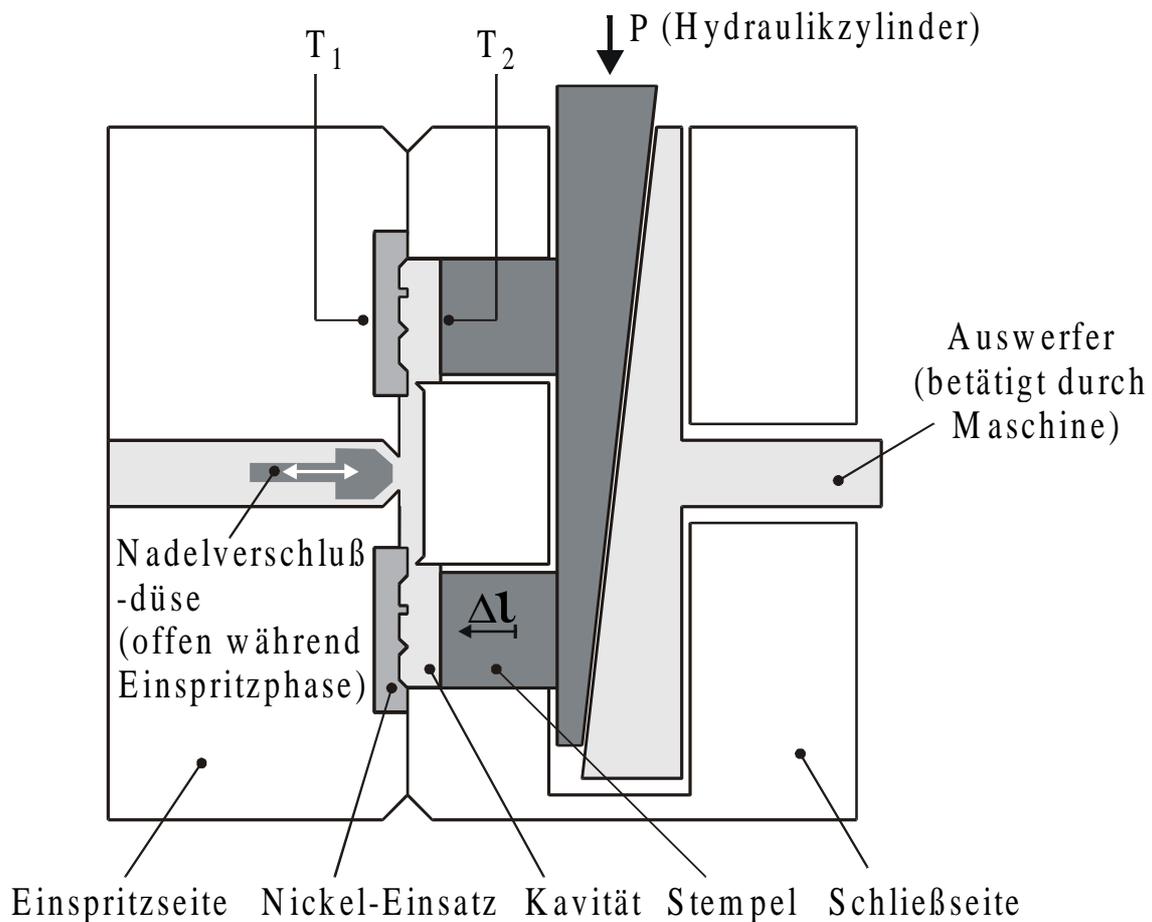


Bild 2.6 Schema des Spritzgießwerkzeuges

2.3.1 Das Standard-Spritzgießen

Der Spritzgießzyklus beginnt mit dem vollständigen Schließen der beiden Werkzeughälften. Beim Standard-Spritzgießen wird die flüssige Polymermasse in der Füllphase in die Kavitäten gefüllt. Nach einem kurzen Nachdruck mit der Schnecke verbleibt die Masse im Werkzeug und kühlt ab. Dieses Abkühlen und Erstarren beginnt an den Werkzeugwänden und setzt sich dann zum Inneren der Schmelze fort. Dem dabei auftretenden Schrumpfung kann nur in sehr begrenztem Umfang durch den sehr kurzen Nachdruck direkt nach der Füllphase entgegengewirkt werden. Der Prägezylinder im Werkzeug ist in dieser Betriebsart ohne Funktion.

2.3.2 Das Standard-Spritzprägen

Beim Standard-Spritzprägen [ThoO1, ThoO2, Tra] wird das Werkzeug normalerweise nicht komplett geschlossen, sondern bleibt beim Füllvorgang einen Spalt weit auf. Erst nach Beendigung des Füllvorganges wird das Werkzeug geschlossen, und übt so einen zusätzlichen Druck auf die Formmasse aus. Üblicherweise muß das Werkzeug dazu mit einer sogenannten Tauchkante ausgestattet sein, damit kein Material in die Werkzeugtrennebene zwischen die beiden Werkzeughälften gelangen kann [Rot]. Dieser Prozeßablauf wird mit unserem Werkzeug derart simuliert, daß zwar in das vollständig geschlossene Werkzeug eingespritzt wird, nach der Füllphase aber der am Werkzeug befindliche Druckzylinder einmal mit Druck beaufschlagt wird, und so in die Kavität hineinprägt.

2.3.3 Das modifizierte Mikro-Spritzprägen

Das modifizierte Mikro-Spritzprägen weicht in einigen Punkten von den beiden schon beschriebenen Verfahren ab. Der grundlegende Unterschied besteht darin, daß das Werkzeug während des Spritzgießzyklusses einen Temperaturzyklus durchläuft („Variothermzyklus“). Wird bei den anderen Verfahren die Werkzeugtemperatur unterhalb der Schmelztemperatur des verwendeten Polymers gehalten, so wird hierbei vor dem Einspritzvorgang das Werkzeug auf eine Temperatur aufgeheizt, die oberhalb der Schmelztemperatur des verwendeten Polymers liegt. Erst wenn diese Temperatur erreicht worden ist, wird der Einspritzvorgang gestartet. Nach dem Füllen der Kavität folgt wieder eine kurze Nachdruckphase mit Hilfe der Schnecke. Dann wird die hydraulisch betätigte Nadelverschlußdüse zurückgefahren, damit keine Masse in die Schnecke zurückströmen kann. Der zusätzliche Druckzylinder wird nun angesteuert und prägt über die schiefe Ebene in die Kavität. Gleichzeitig wird das Werkzeug heruntergekühlt bis auf eine Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur des verwendeten Polymers, bis dieses sich nicht mehr verformen läßt. Erst kurz bevor das fertige Formteil entformt wird, endet der Prägevorgang. Durch die konstante Prägung während der gesamten Abkühlphase wird gewährleistet, daß die Mikrostrukturen präzise in den Kunststoff abgeformt werden.

Als Beispiel und zur Veranschaulichung dienen hier die verwendeten Temperaturwerte für verarbeitetes PMMA (Polymethylmethacrylat, VQ 101 S der Firma Röhm, siehe Kapitel 3.1) in der nachfolgenden Tabelle.

Tabelle 2.1 Verarbeitungstemperaturen von VQ 101 S für 3 verschiedene Verfahren

Einspritztemperatur (Masse)	235°C
Werkzeugtemperatur Standard	50-70°C
Variothermtemperatur Zyklusstart	120°C
Variothermtemperatur Entformung	60-80°C
Vicat-Schmelztemperatur VST_B	98°C

2.4 Das Heißprägen

Beim Heißprägen von Strukturen in Polymeren wird zwischen zwei Platten ein Substratrohling eingelegt (Bild 2.7). Dann werden die Platten entweder elektrisch oder mittels eines Mediums aufgeheizt und üblicherweise durch einen Hydraulikzylinder gegeneinandergefahren. Dabei wird die Struktur übertragen, die sich auf der zweiten Platte befindet. Anschließend werden die beiden Platten, nachdem sie in einer Abkühlphase mittels eines Mediums (z.B. Luft oder Wasser) gekühlt werden, auseinandergefahren und das geprägte Teil entnommen.

2.5 Das Heißprägen von Mikrostrukturen

Es sind schon seit Jahren immer wieder in Kunststoff hergestellte Mikrostrukturen vorgestellt worden. So unter anderem bereits in den 70er Jahren durch einfachste Heißprägetechniken in Kunststofffolien [Ulr, Aum, WebH1, WebH2]. Das Heißprägen ist zur Zeit ein Verfahren, das hauptsächlich für anspruchsvollere Mikrostrukturen im Laborbereich angewandt wird. Erste Entwicklungen zielen aber auch schon auf die Fertigung von Kleinserien und darüber hinaus gehende Stückzahlen [Roe, Hec4, Lin].

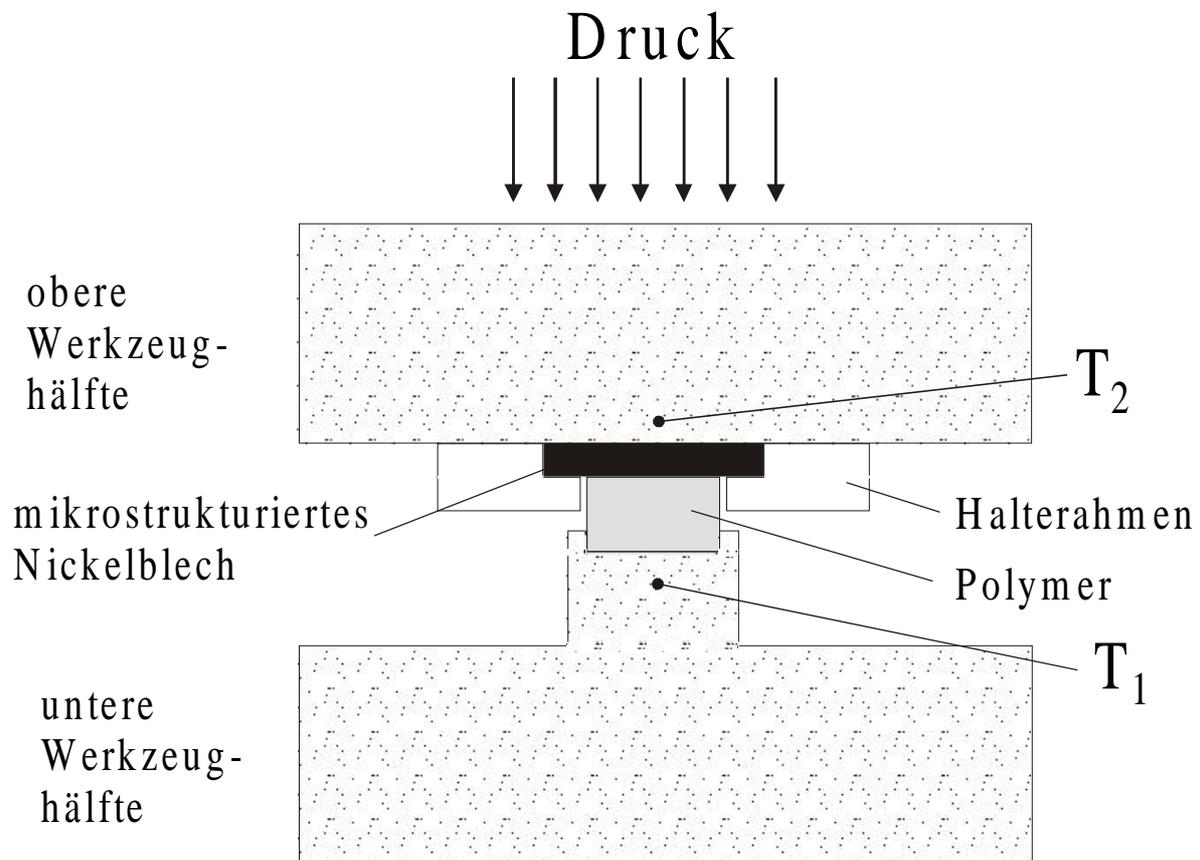


Bild 2.7 Schema einer Heißpräganlage

2.5.1 Besonderheiten und Vorteile des Heißprägens

Im Gegensatz zum Spritzgießen muß beim Heißprägen die zu strukturierende Polymermasse keine langen Fließwege zurücklegen, was sich vor allem bei optischen Komponenten in wesentlich geringeren inneren Spannungen niederschlägt. Der beim Mikro-Spritzgießen meist aufwendige Anguß entfällt, wodurch das Werkzeug vereinfacht wird [MenW]. Durch die bei der Strukturierung auftretenden geringeren Geschwindigkeiten der Masse werden die Molekülketten nicht beschädigt, was zu einer höheren Stabilität führt [Hec3]. Wie schon erwähnt werden durch Heißprägen vor allem anspruchsvollere Mikrostrukturen hergestellt, wie z.B.:

- Multilayer-Komponenten [Hec4],
- Mikrostrukturen mit Abmessungen bis zu 25 nm [Cho1],
- Mikrostrukturen im Mikrometerbereich mit Aspektverhältnissen bis zu 100 [Hec4].

Für diese anspruchsvollen Strukturen müssen natürlich Prägedruck und Abformtemperaturen fein einstellbar und sehr genau kontrollierbar sein [Hec3]. Trotz dieser Voraussetzungen sind Heißprägeverfahren für Mikrostrukturen einfacher als die entsprechenden Spritzgießverfahren [EldH]. Bei Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen wird ausnahmslos vakuumgeprägt, um die tiefen Gräben sauber abzuformen [BacW2].

2.5.2 Temperierung beim Heißprägen

Die Temperierung der Werkzeuge beim Heißprägen ist etwas aufwendiger als beim Spritzgießen, da man mit höheren Temperaturen arbeiten muß, um die Mikrostrukturen abformen zu können [MenW, Roe, Kie]. Daraus folgt, daß meistens mit Öl [Hec2] oder elektrisch geheizt wird. Die Abkühlung der Prägwerkzeuge geschieht ebenfalls mit einem geeigneten Medium, wobei jedoch darauf zu achten ist, daß eine geringe Abkühlrate wie ein Temperungsschritt wirkt, der gerade bei optischen Komponenten wünschenswert sein kann, um innere Spannungen zu vermeiden [Hec1].

2.5.3 Durch Heißprägen hergestellte Komponenten

Durch Heißprägen werden zahlreiche unterschiedliche Komponenten hergestellt, viele davon allerdings noch im Labormaßstab. Zu den wichtigsten zählen:

- Mikrospektrometer für den UV- und VIS-Bereich [Hec4],
- Beschleunigungssensoren [Roe, Hec1],
- kontaktlos geprägte Linsenarrays [Pic],
- Wellenleitergräben [Bar, SchA],
- Gitterstrukturen [Dan1, Sar].

Ein großes Potential bietet auch das justierte Prägen von dünnen Polymerlayern auf CMOS-Substrate [Bot] und auf Keramik-Metall-Strukturen [Roe]. Allgemein bleibt zu sagen, daß das Abformen von integriert-optischen oder anderen Mikrostrukturen mit Aspektverhältnissen größer als 1 anspruchsvoller ist als das einfache Prägen von diffraktiven oder holographischen Folien oder das Abformen von CD's [Gal].

2.6 Angewandte Heißpräge-Prozesse mit geschlossener Kavität

Das auf der Spritzgießmaschine eingesetzte Heißprägwerkzeug verfügt wie das Spritzprägwerkzeug über eine geschlossene Kavität und einen Prägemechanismus. Lange,

dünne optische Komponenten, wie beispielsweise eine mikrostrukturierte optische Rückwand (Backplane), lassen sich erst mit Heißprägen herstellen, da beim Heißprägen wesentlich weniger Masse fließt, was zu geringeren inneren Spannungen führt.

Der Vorteil der geschlossenen Kavität beim Heißprägen, im Gegensatz zu vielfach angewandten offenen Systemen [Bar], liegt in erster Linie in den wohl definierten Außenabmessungen des geprägten Formteiles, welches in nachfolgenden Prozessschritten noch weiterverarbeitet werden muß.

2.6.1 Modulares Heißprägewerkzeug

Das auf der Spritzgießmaschine verwendete Heißprägewerkzeug ist modular aufgebaut (siehe Bild 2.8 und Kapitel 5.3). Mit dem Wechsel einer Werkzeugplatte und des dazugehörigen Prägestempeleinsatzes lassen sich verschieden große Polymersubstrate bis maximal $25 \times 25 \text{ cm}^2$ prägen. Zur Zeit sind 2 Größen verfügbar: $1 \times 4 \text{ cm}^2$ und $2 \times 25 \text{ cm}^2$, eine dritte Größe ist in Zukunft verfügbar: $10 \times 15 \text{ cm}^2$, dann aber zusätzlich mit Vakuumanschluß zum Abformen von Strukturen mit größerem Aspektverhältnis. Auf der zweiten Werkzeugseite (beim Spritzgießen Einspritzseite genannt) wird nur der Halterahmen für den jeweiligen Formeinsatz gewechselt. Die Prägemechanik und ein Großteil der Temperierung des Werkzeuges sind bei allen Größen gleich. Mit den entsprechend eingelegten mikrostrukturierten Nickelblechen lassen sich so mit einem Werkzeug viele verschiedene Komponenten herstellen. Die zweite Werkzeughälfte, auf die der Halterahmen für die Nickelbleche geschraubt wird, ist aufwendig mit Temperierkanälen durchzogen und vakuumverlötet worden, um eine optimale Temperierung des Formeinsatzes zu gewährleisten.

2.6.2 Zyklusablauf beim Heißprägen von Mikrostrukturen mit geschlossener Kavität

Beim Heißprägen wird das gesamte Werkzeug nach dem Schließen der beiden Werkzeughälften auf eine Temperatur aufgeheizt, die deutlich über der Glasktemperatur des verwendeten, vorher eingelegten Polymer-Rohlings liegt. Typischerweise werden um 40°C höhere Starttemperaturen verwendet [Rup1]. Nach Erreichen der Prägestarttemperatur wird mittels integriertem Prägezylinder der Prägevorgang gestartet, mit dem der Polymerrohling gegen die abzuformende metallische Mikrostruktur gedrückt wird. Gleichzeitig erfolgt das Umschalten von Heizen auf Kühlen. Für die Anwendung bei optischen Komponenten ist auf eine kleine Kühlrate zu achten, damit keine inneren Spannungen entstehen. Nach Erreichen der

Entformtemperatur, die unterhalb der Glastemperatur des verwendeten Polymers liegt, wird das Werkzeug geöffnet, indem die beiden Werkzeughälften auseinander gefahren werden. Die Entformung des geprägten Substrates geschieht über den Prägestempel, der im geöffneten Werkzeug nach vorne gefahren wird, und so eine Entnahme des Substrates ermöglicht.

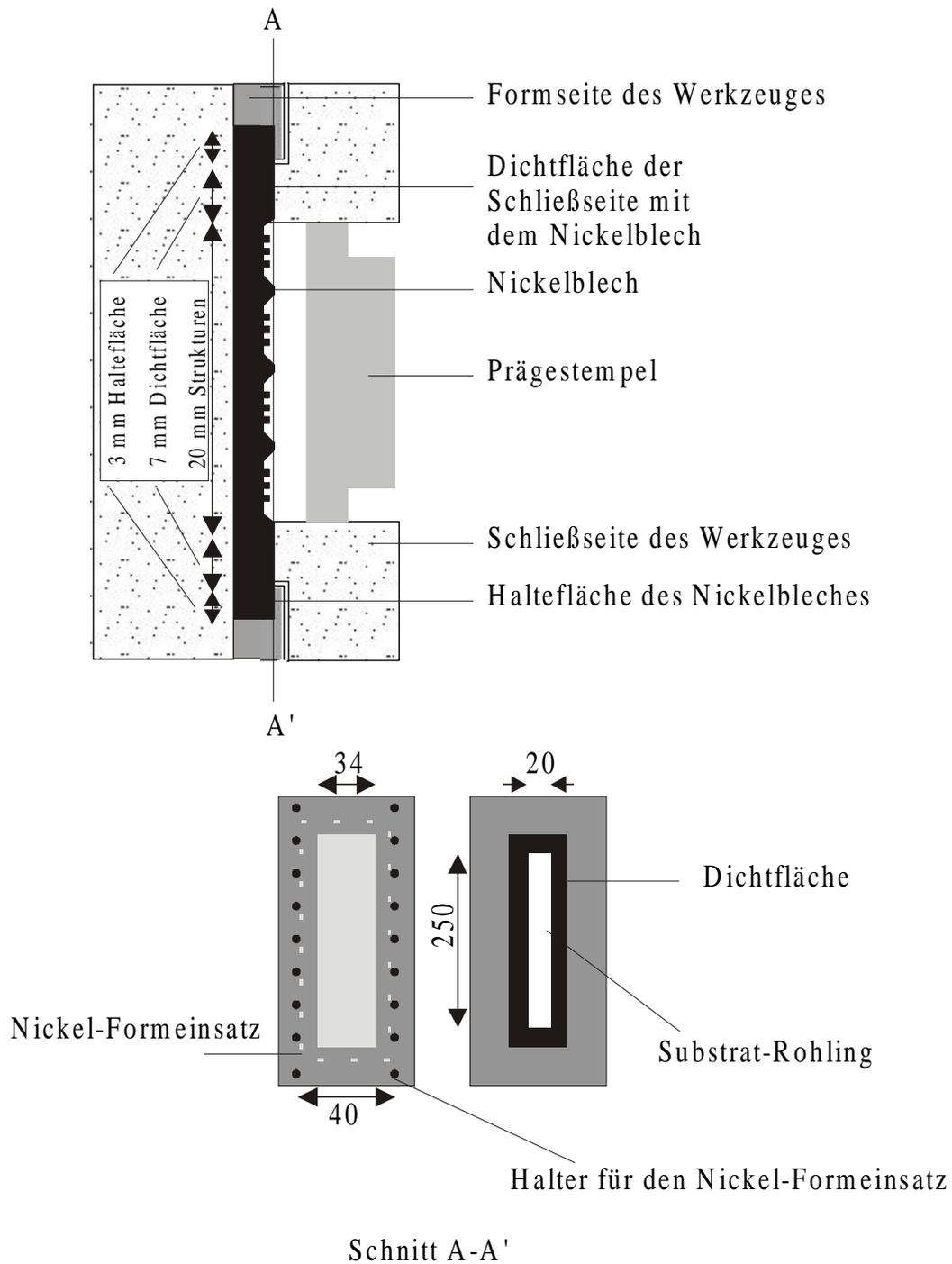


Bild 2.8 Schema des Heißprägewerkzeuges [Mün]

3 Polymere Materialien

Kunststoffe bestehen aus sehr langen Molekülketten, die verknäult oder verkettet sind. Einzelne Molekülketten bestehen dabei oft aus mehr als 10000 Einzelbausteinen, den Monomeren. Eine grobe Einteilung der Kunststoffe ist in Bild 3.1 dargestellt. Für die in dieser Arbeit durchgeführte Abformtechnik sind nur Thermoplaste einsetzbar, für Anwendung im optischen Bereich verringert sich die Auswahl auf amorphe Thermoplaste [Heb], deren Molekularstruktur ähnlich dem Glas ist, und die deshalb wie Glas durchsichtig sind. Die teilkristallinen Thermoplaste haben ein milchig-opakes Aussehen und sind aufgrund der geordneten Molekülketten für optische Zwecke nicht geeignet. Eine Ausnahme bildet das Material ZeonexTM, ein modifiziertes Polyolefin, eigentlich teilkristallin, durch die Modifizierung aber amorph [Kno1], das hier aber nicht zum Einsatz kam.

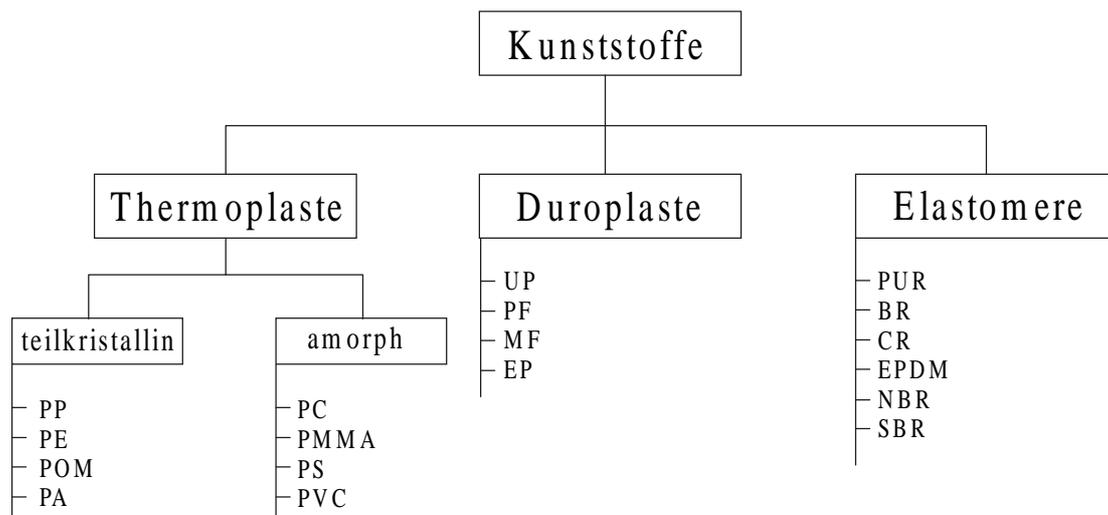


Bild 3.1 Einteilung der Kunststoffe [Mic2]

Der Vorteil der Thermoplaste ist die Verformbarkeit im warmen Zustand, ohne bei normaler Gebrauchstemperatur die Eigenschaften der Polymere zu verändern. Zur Veranschaulichung der Eigenschaften ist in Bild 3.2 das Formänderungsverhalten eines amorphen Thermoplasten dargestellt, aufgetragen sind die Zugfestigkeit [Lia] und die Dehnung bei Höchstkraft in Abhängigkeit der Temperatur.

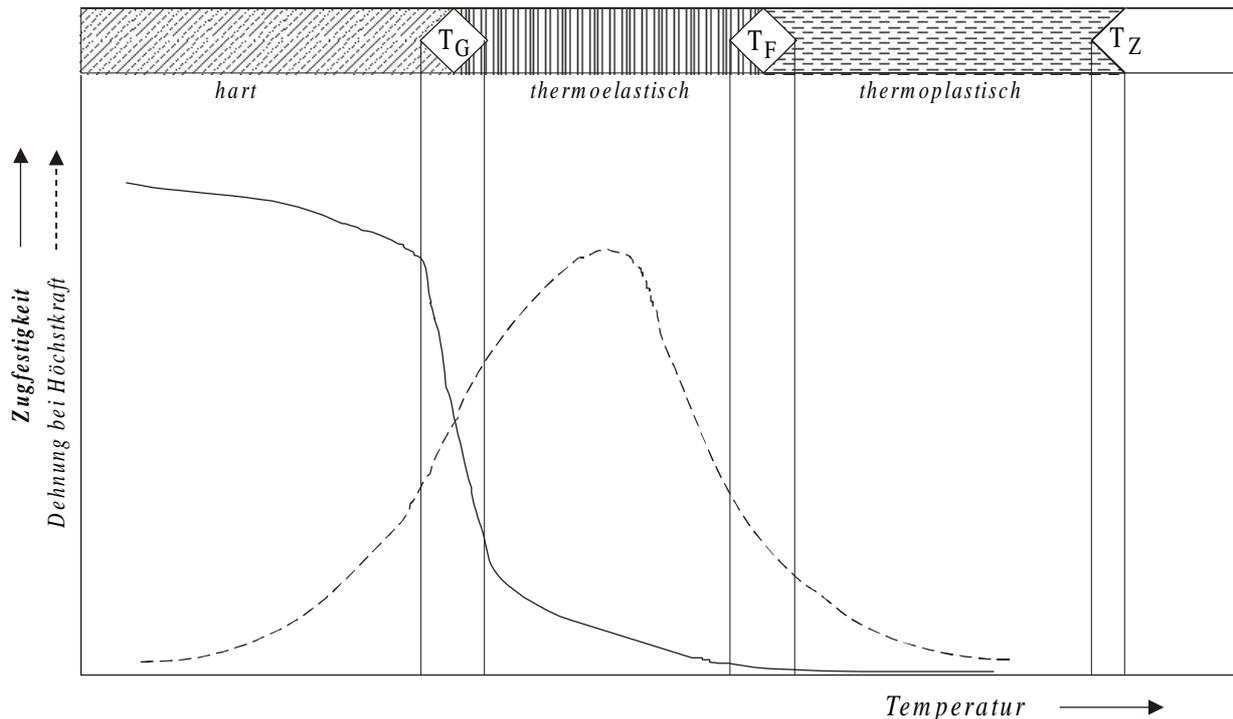


Bild 3.2 Formänderungsverhalten eines amorphen Thermoplasten [Mic2]

Bei Raumtemperatur liegt der Kunststoff als harter Werkstoff vor. Nach Überschreiten der Glasübergangstemperatur (T_G) sind die zwischenmolekularen Kräfte so gering geworden, daß sich die Molekülketten bei Einwirken äußerer Kräfte gegeneinander verschieben können. In diesem Temperaturbereich befindet sich der Kunststoff in einem kautschuk- oder thermoelastischen Zustand. Bei weiterer Temperaturerhöhung werden die zwischenmolekularen Kräfte ganz aufgehoben, der Kunststoff geht kontinuierlich vom thermoelastischen in den thermoplastischen Zustand (Schmelze) über. Diesen Übergang charakterisiert die Fließtemperatur (T_F), die nicht exakt anzugeben ist. Bei weiterer Temperaturerhöhung wird der chemische Aufbau des Kunststoffes bei der Zerstörungstemperatur (T_Z) durch Zersetzung verändert.

Für die hier eingesetzten Abformverfahren des Spritzgießens ist der thermoplastische Bereich interessant, für das Heißprägen der thermoelastische Temperaturbereich.

3.1 Verwendete Spritzgießmassen

An die verwendeten Spritzgießmassen müssen einige Anforderungen gestellt werden. So wird, wie schon erwähnt, die Auswahl auf amorphe Thermoplaste beschränkt, um optische Komponenten spritzgießen zu können. Nun gibt es einige Faktoren, die die Auswahl weiter

einschränken, wenn es darum geht, integriert-optische Komponenten in Monomode-Technik herzustellen. So müssen beim nachfolgenden Herstellungsschritt der Wellenleiterherstellung (siehe Kap. 4.5) Materialien verwendet werden, die zum Spritzgießmaterial kompatibel sind. Zu beachten sind erstens die chemische Kompatibilität und zweitens die passende Brechzahl, um Wellenleiter mit einem sehr geringen Brechzahlhub (schwache Wellenleitung) herzustellen, die erst dann einen monomodalen Charakter aufweisen. Ferner müssen die Spritzgießmassen optisch transparent sein im für die Übertragungstechnik wichtigen Bereich bei 1300 und 1550 nm Wellenlänge. Die Brechzahl des Spritzgießmaterials muß im Bereich der Brechzahl von Glasfasern ($n_D^{20} \approx 1,45$) liegen, um Rückflußdämpfungen (L_R) durch Reflexionsverluste zu minimieren, die bei der Ankopplung von Glasfasern in Abhängigkeit der Brechzahldifferenzen entsprechend der folgenden Gleichung entstehen:

$$L_R = -10 \cdot \lg\left(\frac{P_R}{P_i}\right) \text{dB} = -10 \cdot \lg\left(\frac{n_f - n_w}{n_f + n_w}\right)^2 \text{dB}$$

mit P_R : reflektierte Leistung, P_i : Eingangsleistung,
 n_f : Faserkernbrechzahl, n_w : Wellenleiterkernbrechzahl

Aufgrund dieser Bedingungen wurde mit Polymethylmethacrylat (PMMA) gearbeitet, bzw. mit modifizierten Spritzgießmassen auf der Basis von PMMA oder MMA (Methylmethacrylat).

3.1.1 Polymethylmethacrylat, PMMA

Es sind zwei spezielle PMMA-Spritzgießmassen verwendet worden, die für optische Anwendungen ausgelegt sind, einerseits VQ101S und andererseits OF104, beide von der Firma Röhm. Die Daten beider Massen sind in Tabelle 3.1 kurz zusammengefaßt. Die Strukturformel des Polymethylmethacrylat (PMMA) ist in Bild 3.3 dargestellt.

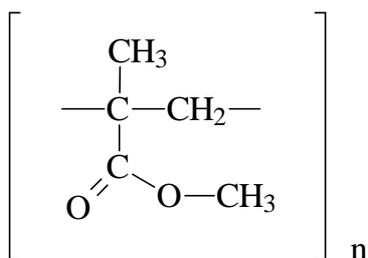


Bild 3.3 Strukturformel Polymethylmethacrylat (PMMA)

Tabelle 3.1 Materialkenndaten PMMA-Spritzgießmassen: VQ101S, OF104 [Röh3, Röh4]

Spritzgießmasse Plexiglas (Röhm)	VQ 101 S	OF 104
Dichte ρ in g/cm^3	1,19	1,19
E-Modul E in N/mm^2	3300	3300
Formbeständigkeit VST_B in $^\circ\text{C}$	97	108
Brechungszahl n_D^{20}	1,491	1,491
Transmissionsgrad in %, $\lambda=400\text{-}700\text{ nm}$	92	92
Wasseraufnahme in %, bei $T=23^\circ\text{C}$	2,0 (Sättigung)	0,3 (nach 1 Tag)
Schmelzindex $\text{MFI}_{230/3,8}$ in $\text{g}/10\text{min}$	23	0,8
Längenausdehnungskoeffizient in $1/\text{K}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$

Die spektrale Transmission (3 mm Proben) der beiden verwendeten Spritzgießmassen ist aus den Bildern 3.4 und 3.5 ersichtlich.

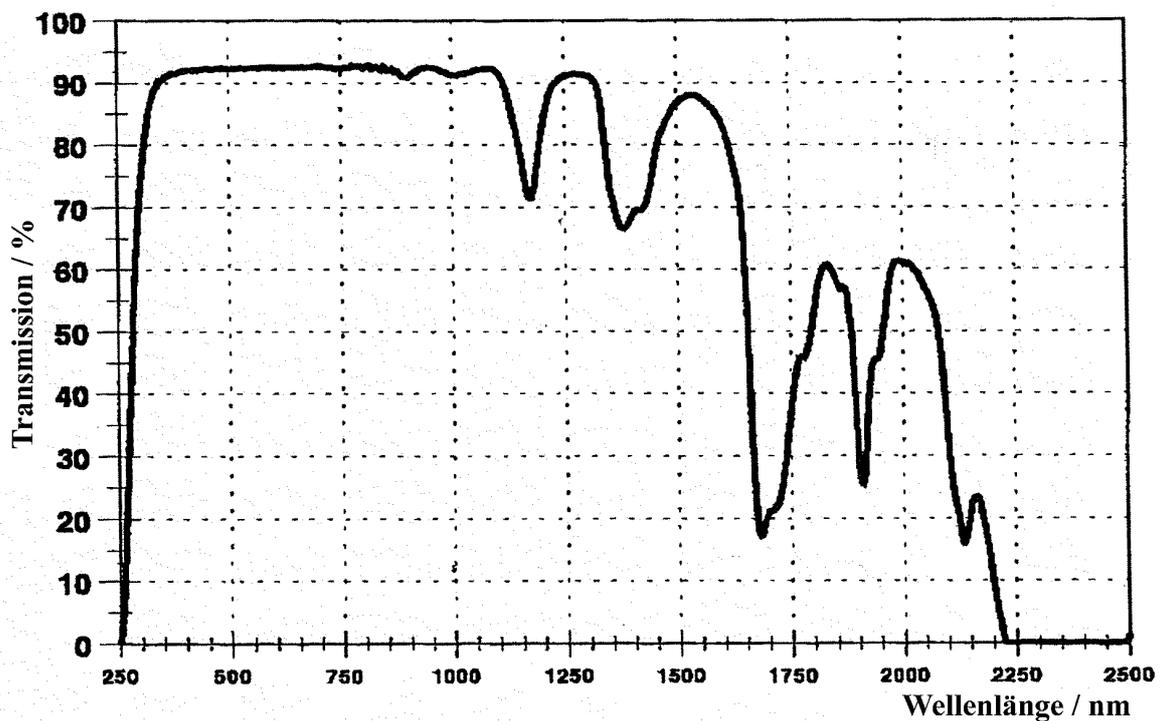


Bild 3.4 Spektrale Transmission VQ101S [Röh2]

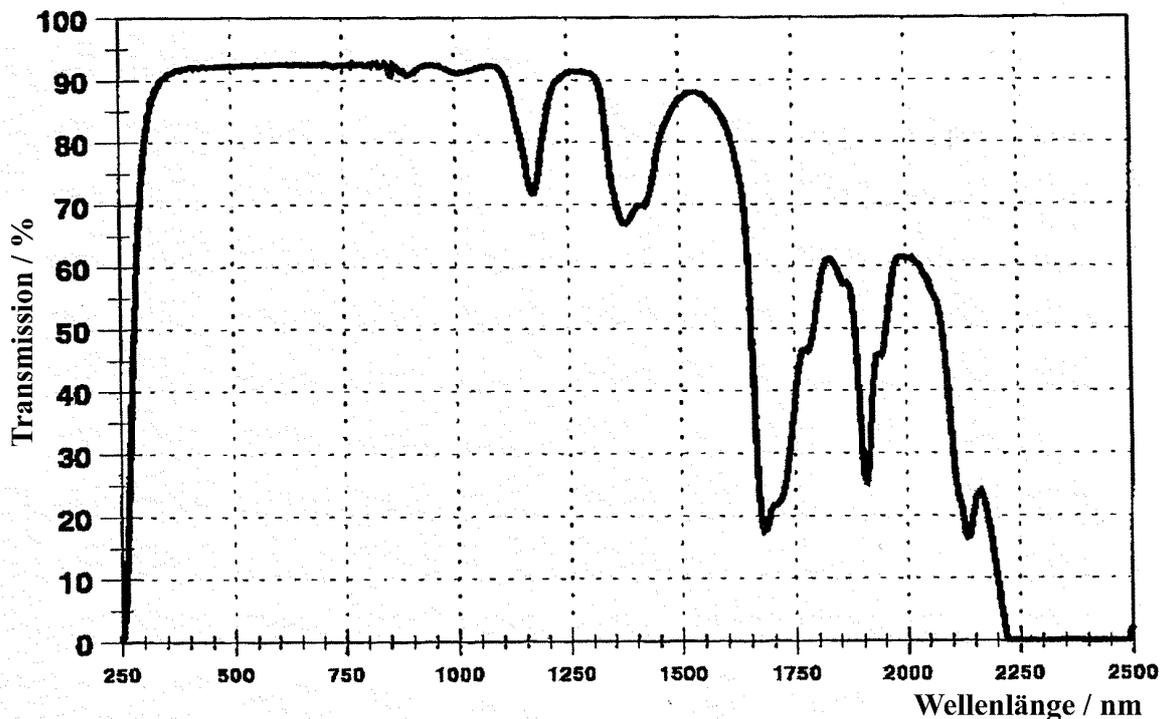


Bild 3.5 Spektrale Transmission OF104 [Röh2]

Gut ersichtlich sind bei diesen Materialien die beiden spektralen Fenster bei den interessanten Wellenlängen von 1300 und 1550 nm. Dies ist auch ein Grund, weshalb PMMA zur Herstellung integriert-optischer Komponenten verwendet wird, auch wenn die Transmission im Bereich um 1550 nm Wellenlänge geringfügig schlechter ist als bei 1300 nm.

Ein weiterer entscheidender Vorteil von PMMA ist die temperaturabhängige Brechzahländerung, die zwischen -23°C und $+93^{\circ}\text{C}$ nahezu linear verläuft von $dn/dT \approx -1,25 \cdot 10^{-4}$ bei -23°C bis $dn/dT \approx -1,2 \cdot 10^{-4}$ bei 93°C [Car]. Dieser Effekt wirkt sich positiv aus bei der Verwendung für thermooptische Schalter [Pom3, Koe, Die], sowohl für PMMA als auch für Polymere, die auf PMMA oder MMA basieren. Ein nicht unerheblicher Punkt zum Einsatz von PMMA ist, daß in umfangreichen Tests unter anderem bestätigt worden ist, daß polymeroptische Komponenten auf PMMA-Basis bei entsprechendem Packaging witterungsbeständig und stabil sind [MülC].

3.1.2 Polymethacrylmethylimid, PMMI

Ein Nachteil des PMMA ist die begrenzte Gebrauchstemperatur bis maximal ca. 100 °C, je nach verwendeter Materialsorte. So sind Anwendungen in der Entwicklung, z.B. thermooptische Schalter, bei denen zu der Umgebungstemperatur, die in Schaltschränken bis zu 70°C betragen kann, eine nicht unerhebliche Temperaturerhöhung von ca. 40-50 °C hinzukommt, die durch das Schalten hervorgerufen wird.

Um die guten Eigenschaften des verwendeten PMMA mit einer höheren Temperaturfestigkeit zu vereinen, gibt es mehrere Ansätze. Einer ist die Einbindung von Imidringen in die Polymerhauptkette, die so eine höhere Steifigkeit und damit Temperaturtoleranz erhält. Auf diese Weise erhält man Polymethacrylmethylimid (PMMI, Handelsname z.B. Pleximid™ von Röhm). Die Strukturformel für PMMI ist in Bild 3.6 angegeben. Die Materialkennndaten der beiden verwendeten Sorten (Plex 8805 F, Plex 8817 F) sind in Tabelle 3.2 kurz dargestellt.

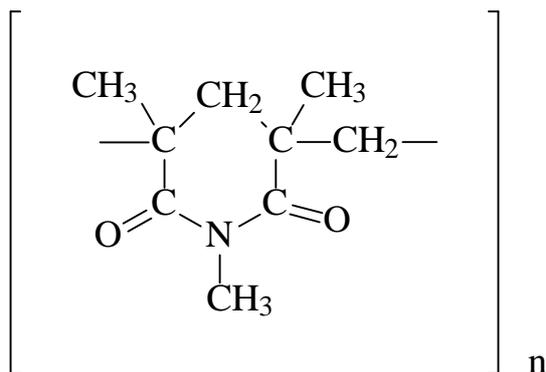


Bild 3.6 Strukturformel Polymethacrylmethylimid (PMMI)

Tabelle 3.2 Materialkennndaten PMMI: Plex 8805 F und Plex 8817 F, Röhm [Röh1, Röh6]

Spritzgießmasse Pleximid (Röhm)	Plex 8805 F	Plex 8817 F
Dichte ρ in g/cm^3	1,21	1,22
E-Modul E in $\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$	4000	4200
Formbeständigkeit VST_B in °C	150	170
Brechungszahl n_D^{20}	1,530	1,538
Transmissionsgrad in %, $\lambda=400-700 \text{ nm}$	90	89
Wasseraufnahme in %, bei $T=23^\circ\text{C}$	2,5	3,5
Schmelzindex $\text{MVR}_{260/21,6}$ in $\text{cm}^3/10\text{min}$	11	3,5
Längenausdehnungskoeffizient in $1/\text{K}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$

In den Bildern 3.7 und 3.8 sind die spektralen Transmissionskurven der beiden verwendeten Pleximide von Röhm dargestellt (3 mm Proben). Gut zu erkennen ist die im Vergleich zu den oben dargestellten PMMA-Sorten (Bild 3.4 und 3.5) nur geringfügig schlechtere Transmission bei 1300 nm, aber auch die um mehr als 10% verschlechterte Transmission bei 1550 nm, wobei hier das Plex 8817 F noch deutlich schlechter als das Plex 8805 abschneidet. Die höhere Temperaturfestigkeit wird also mit einer wesentlich schlechteren Transmission, vor allem bei 1550 nm erkauft. Ein zweiter wichtiger Faktor ist die Brechzahl, die bei beiden PMMI-Sorten deutlich über der des PMMA liegt (Mehr dazu in Kapitel 3.3 bei den Kernmonomeren). Wichtig ist auch der Unterschied im UV-Bereich unterhalb 400 nm, bei dem beide PMMI-Sorten im Gegensatz zu PMMA nicht mehr transparent sind. Dies spielt vor allem eine wichtige Rolle beim UV-initiierten Aushärten der Kernmonomere, das je nach verwendeter Verklebepresse (Kap. 4.5) durch das Substrat hindurch vorgenommen werden muß.



Bild 3.7 Spektrale Transmission Plex 8805 F [Röh2]

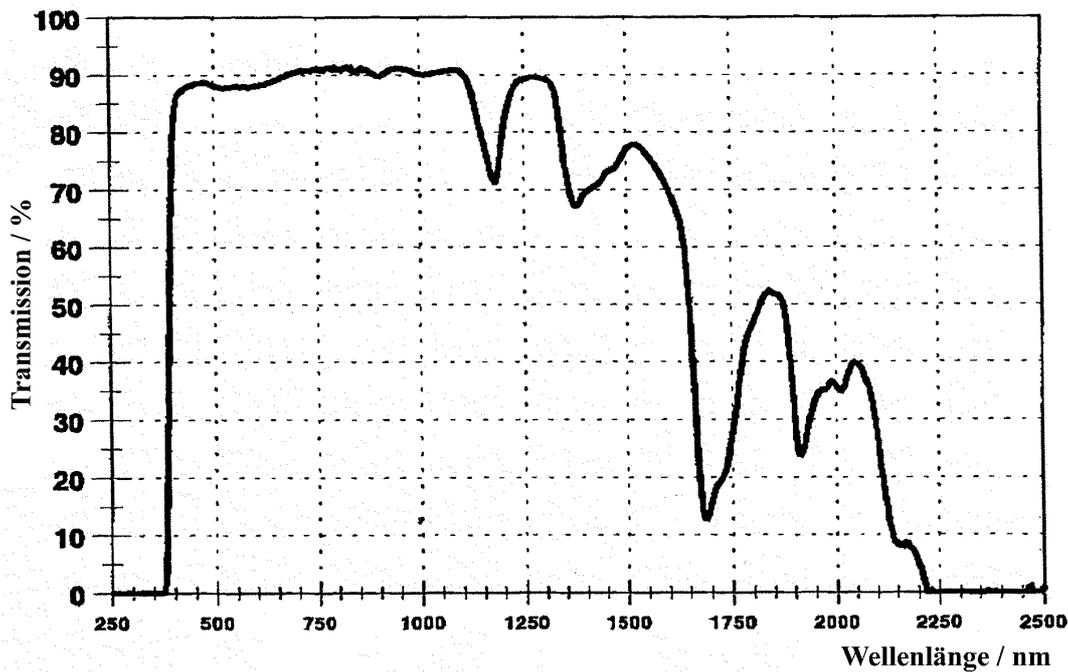


Bild 3.8 Spektrale Transmission Plex 8817 F [Röh2]

3.1.3 Lacton-Methylmethacrylat-Copolymere, EML-MMA

Ein anderer Ansatzpunkt, um ein Material zu bekommen, das bei höheren Temperaturen eingesetzt werden kann, wird in [ArnD] beschrieben. Dort wird über Copolymere aus exo-Methylenlactonen (EML) und Methylmethacrylat (MMA) berichtet. Die Strukturformeln dieser Komponenten sind in Bild 3.9 dargestellt. Abhängig vom Gehalt an EML erhält man eine große Bandbreite von Copolymeren, die mit einem Gehalt von 15 bis 40 % EML von praktischem Interesse sind. Im Rahmen dieser Arbeit ist testweise mit einem Lacton-MMA-Copolymer mit einem EML Gehalt von 22% gearbeitet worden. Die Temperaturfestigkeit dieses verwendeten Copolymers beträgt in etwa 150 °C (Glastemperatur, T_G) bzw. 137 °C (Vicatemperatur, VST_B). Die Brechzahl beträgt $n_D^{20}=1,497$ und liegt damit zwar über der des PMMA, aber noch deutlich unter der von PMMI, was Auswirkungen auf die Verwendung des entsprechenden Kernmaterials hat, die in Kap. 3.3 beschrieben ist.

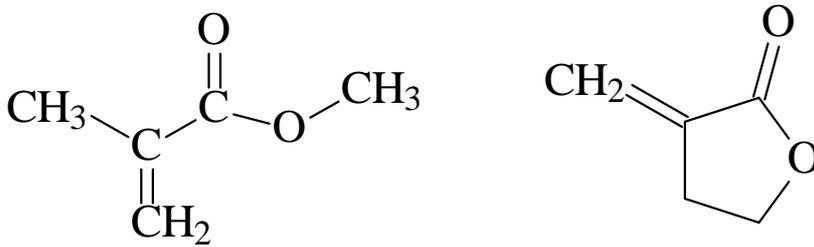


Bild 3.9 Strukturformeln von MMA und exo-Methylenlacton [ArnD]

3.2 Verwendete Heißprägematerialien

Das Heißprägen ist ein thermoplastisches Umformverfahren. U.a. wird das Thermoformen, bei dem beispielsweise mit Heißluft eine Polymerfolie oder Platte einer Kontur angepaßt wird, industriell eingesetzt. Anders als beim Spritzgießen muß beim Heißprägen das verwendete Polymer nicht bis zum thermoplastischen, sondern nur bis zum thermoelastischen oder kautschukelastischen Zustand (Bild 3.2) aufgeheizt werden.

3.2.1 Große Kavität

Beim Heißprägen sind Rohlinge aus gegossenem PMMA-Plattenmaterial von Röhm (Plexiglas GS) in den für das Heißprägewerkzeug passenden Abmessungen von $20 \times 250 \times 3 \text{ mm}^3$ für die große Kavität eingesetzt worden. Die Materialeigenschaften sind mit denen der Spritzgießmassen VQ 101 S und OF 104 S identisch. Die Vicat-Erweichungstemperatur nach V_{STB} beträgt $115 \text{ }^\circ\text{C}$ [Röh5] und liegt damit über der von PMMA-Spritzgießmassen [Dom].

3.2.2 Kleine Kavität

Für die kleine Kavität ($10 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$) sind die Rohlinge aus Spritzgießgranulat hergestellt worden. Mittels eines einfachen Plattenwerkzeuges sind $50 \times 50 \times 2 \text{ mm}^3$ große Kunststoffplatten spritzgegossen worden, aus denen dann je Platte 2 Rohlinge ausgefräst worden sind. Auf diese Weise konnte auf alle Materialien aus Kap. 3.1 zurückgegriffen werden.

3.3 Verwendete Kernmonomere für die Wellenleiter

Die Kernmonomere sind ein wesentlicher und wichtiger Bestandteil der polymeren Wellenleiter [Jöh3], die mittels SIGA-Technik (Kap. 4) hergestellt werden. So gibt es einige Bedingungen, welche die Kernmonomere erfüllen müssen, um in die engere Wahl zu kommen. Dazu zählen folgende Eigenschaften [Ney3]:

-
- sie müssen flüssig sein mit niedriger Viskosität, um die Wellenleitergräben optimal zu füllen,
 - sie müssen thermische und chemische Stabilität aufweisen,
 - die Brechzahl muß geringfügig über der des Substrates liegen, um Wellenführung zu ermöglichen,
 - die Polymerisation muß z.B. mittels UV- oder thermischem Radikalstarter initiiert werden können,
 - die Monomere müssen bei den entsprechenden Betriebswellenlängen 1300 und 1550 nm extrem transparent sein,
 - die Brechzahl muß mit hoher Genauigkeit im Bereich 1/1000 fein einstellbar sein,
 - die chemische Kompatibilität mit dem verwendeten Substratpolymer muß gewährleistet sein.

Mittels Simulationen kann man die Wellenleitung vor der Herstellung berechnen und so Faktoren für die Geometrien und die Eigenschaften der Materialien festlegen [Kim], bzw. aus vorgegebenen Materialkennwerten die erforderlichen Geometrien berechnen.

Gerade die Brechzahl-Feinabstimmbarkeit auf 1/1000 ist eine harte Bedingung, die am einfachsten über die Copolymerisation von zwei verschiedenen, geeigneten Monomeren erfüllt werden kann.

3.3.1 EGDMA (D14)/TFPMA

Ein passendes, hier verwendetes Materialsystem ist beispielsweise ein Copolymer, bestehend aus Ethylenglykoldimethacrylat (EGDMA, Strukturformel in Bild 3.10), welches normal oder in voll deuterierter Form EGDMA D14 zum Einsatz kommt, und Tetrafluorpropylmethacrylat (TFPMA, Strukturformel in Bild 3.11). Die Deuterierung wird vorgenommen, um eine bessere Transmission bei 1300 nm zu erreichen, verbunden allerdings mit der höheren Dämpfung bei 1550 nm. Die Brechzahl des Copolymers wird dabei durch die Anteile der beiden Monomere feinabgestimmt [Ney2]. Die wesentlichen Daten der drei Wellenleitermaterialien sind in Tabelle 3.3 aufgelistet.

In Bild 3.12 ist die spektrale Transmission der Wellenleiterkernmaterialien zu sehen. Die Messung ist an polymerisierten Bulkproben erfolgt. Die bessere Transmission des voll

deutierten EGDMA D14 bei 1300 nm ist deutlich zu erkennen, allerdings ebenso die wesentlich höhere Dämpfung bei 1550 nm durch eine Verschiebung der Schwingungsbanden.

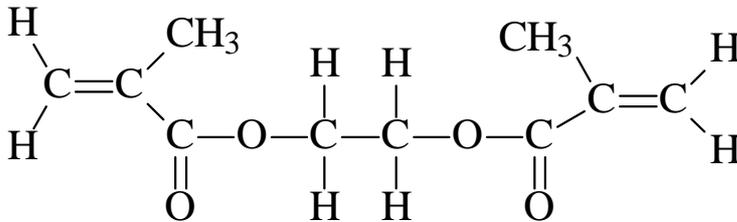


Bild 3.10 Strukturformel Ethylenglykoldimethacrylat, EGDMA

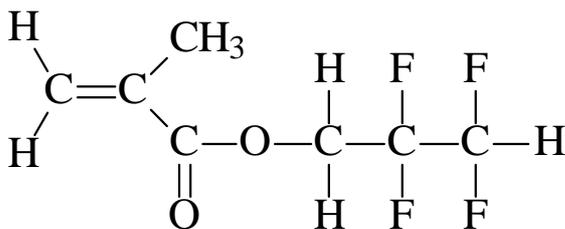


Bild 3.11 Strukturformel Tetrafluorpropylmethacrylat, TFPMA

Tabelle 3.3 Materialkenndaten: EGDMA (D14), TFPMA [Kno1]

Bulkproben, polymerisiert	EGDMA	EGDMA D14	TFPMA
Brechzahl n_D^{20}	1,509	1,510	1,428
Dämpfung bei 1300nm in dB/cm	0,24	0,08	0,21
Dämpfung bei 1550nm in dB/cm	0,76	1,52	0,57

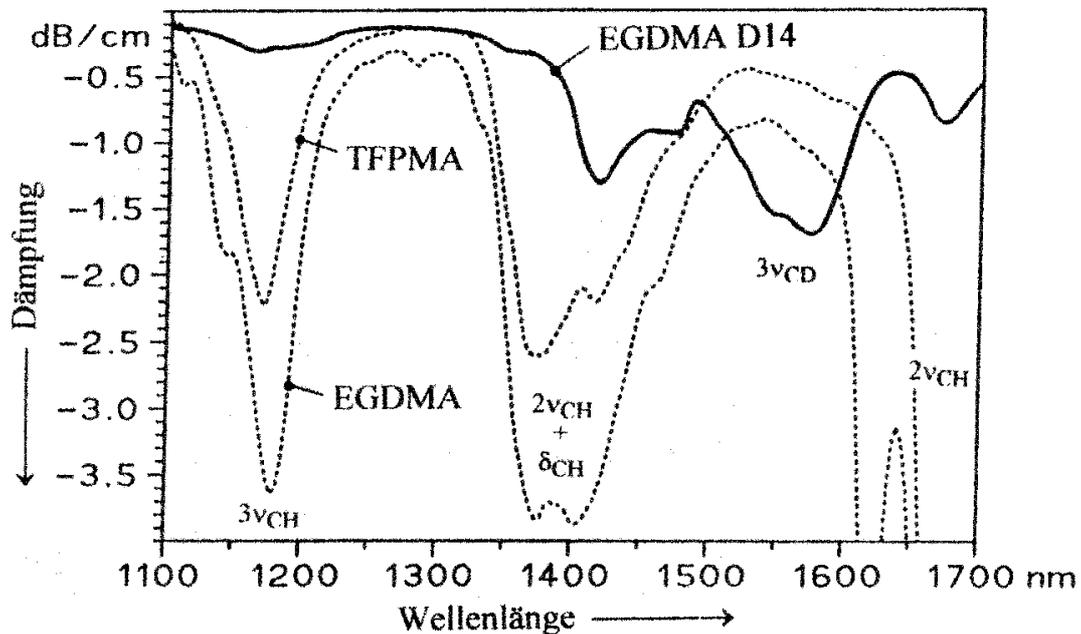


Bild 3.12 Spektrale Dämpfung Wellenleitermaterial EGDMA (D14) / TFPMA

3.3.2 PFPMA/TeCEA

Ein zweites passendes, verwendetes Materialsystem besteht aus Pentafluorphenylmethacrylat (PFPMA, Strukturformel in Bild 3.13) und Tetrachlorethylacrylat (TeCEA, Strukturformel in Bild 3.14).

Bei diesen wird ausgenutzt, daß die Verwendung fluorierter oder chlorierter Gruppen die durch C-H Gruppen ausgelösten Absorptionsschwingungen (n-ter Ordnung) zu höheren Wellenlängen verschiebt und abschwächt [Kno1]. Die wesentlichen Daten der beiden Wellenleitermaterialien sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

Bild 3.15 zeigt die spektrale Dämpfung des Wellenleitermaterialsystems PFPMA / TeCEA. Im Vergleich mit dem oben vorgestellten System EGDMA (D14) / TFPMA (Bild 3.12) ist die deutlich bessere Transparenz bei 1300 und 1550 nm zu erkennen. Die Dämpfung ist vor allem bei 1550 nm nur geringfügig schlechter als bei 1300 nm. Als Vergleich ist PMMA als Substratmaterial eingezeichnet, das bei 1550 nm wesentlich weniger transparent ist als bei 1300 nm.

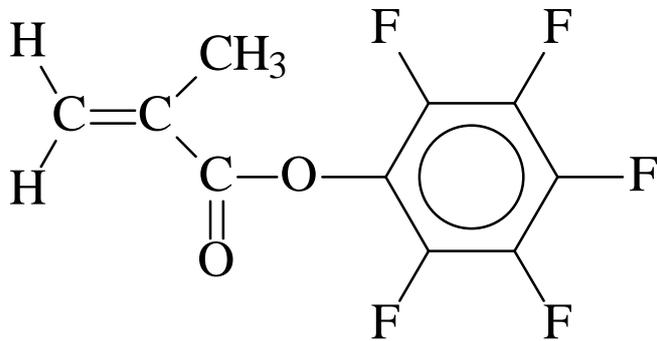


Bild 3.13 Strukturformel Pentafluorphenylmethacrylat, PFPMA

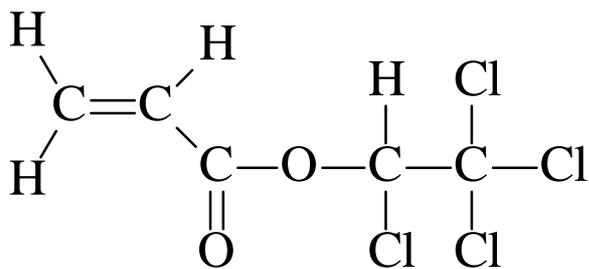


Bild 3.14 Strukturformel Tetrachlorethylacrylat, TeCEA

Tabelle 3.4 Materialkennndaten: PFPMA, TeCEA [Kno1]

Bulkproben, polymerisiert	PFPMA	TeCEA
Brechzahl n_D^{20}	1,485	1,530
Dämpfung bei 1300nm in dB/cm	0,10	0,07
Dämpfung bei 1550nm in dB/cm	0,31	0,26

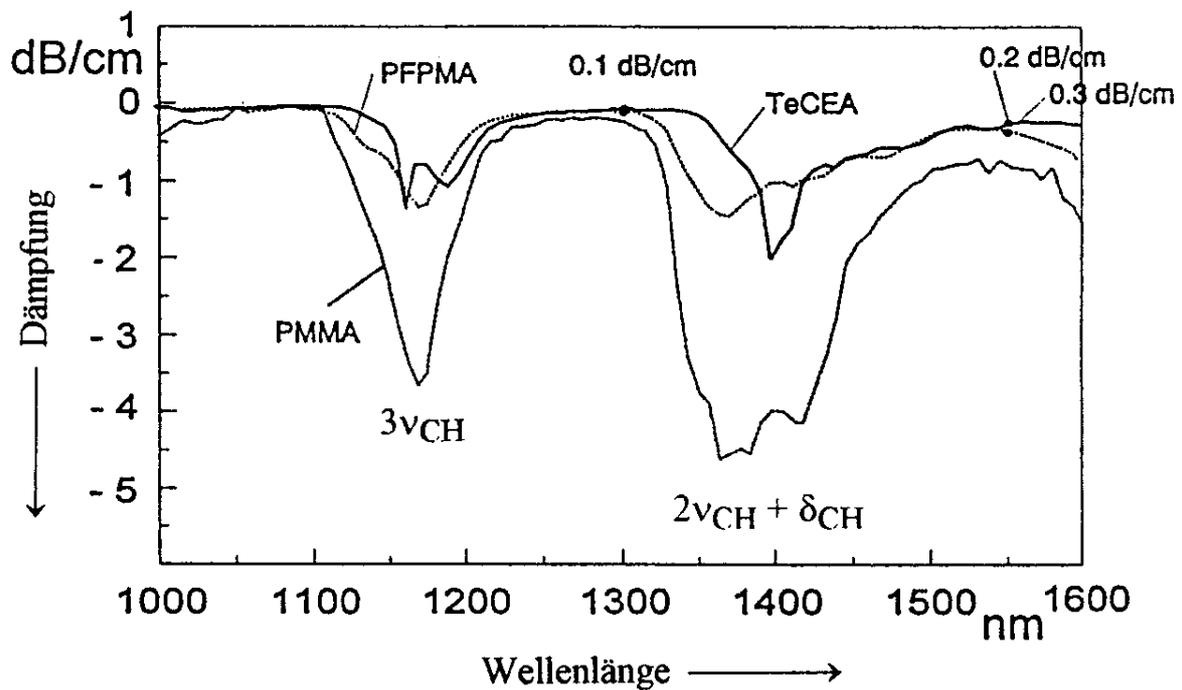


Bild 3.15 Spektrale Dämpfung Wellenleitermaterial PFPMA / TeCEA

3.4 Andere optische Polymere/Monomere

Ebenfalls eingesetzte optische Polymere und optische Kleber sollen hier nur kurz erwähnt werden. Es werden beispielsweise kommerziell erhältliche optische Kleber der Firma Norland verwendet [Ger]. Ormocere, modifizierte Silane, werden als Wellenleiterkernmaterial eingesetzt, als Substrat dient PMMA [Dan2, SchD]. Ebenfalls werden deuterierte Polysiloxane [Hik], deuteriertes Fluormethacrylat [Ima], fluorierte Polyimide [Mar] und diverse andere, meist modifizierte, Polymere [Kno1] verwendet. Diese Materialien können in dieser hier verwendeten Technologie nicht eingesetzt werden, weil sie entweder

- in der Brechzahl nicht an die verwendbaren Substrate angepaßt werden können,
- chemisch nicht zu den Substratmaterialien kompatibel sind,
- eine zu hohe Dämpfung bei 1300 und 1550 nm Wellenlänge aufweisen,
- für eine kostengünstige Massenfabrikationstechnologie zu teuer sind.

4 Einbindung der Abformtechnik in die SIGA-Technik

Zur Herstellung von integriert optischen Mikrostrukturen ist am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik ein Massenfabricationsverfahren, das SIGA-Verfahren (**S**ilizium-Mikrostrukturierung, **G**alvanische Replikation und **A**bformung in Polymeren) entwickelt worden. Mit dieser Technik können ähnlich der CD-Herstellung und der LIGA-Technik kostengünstig polymere integriert optische Mikrostrukturen hergestellt werden.

4.1 Übersicht über die SIGA-Technik

Prinzipiell werden dabei folgende Prozessschritte durchgeführt, die im Bild 4.1 schematisch dargestellt sind.

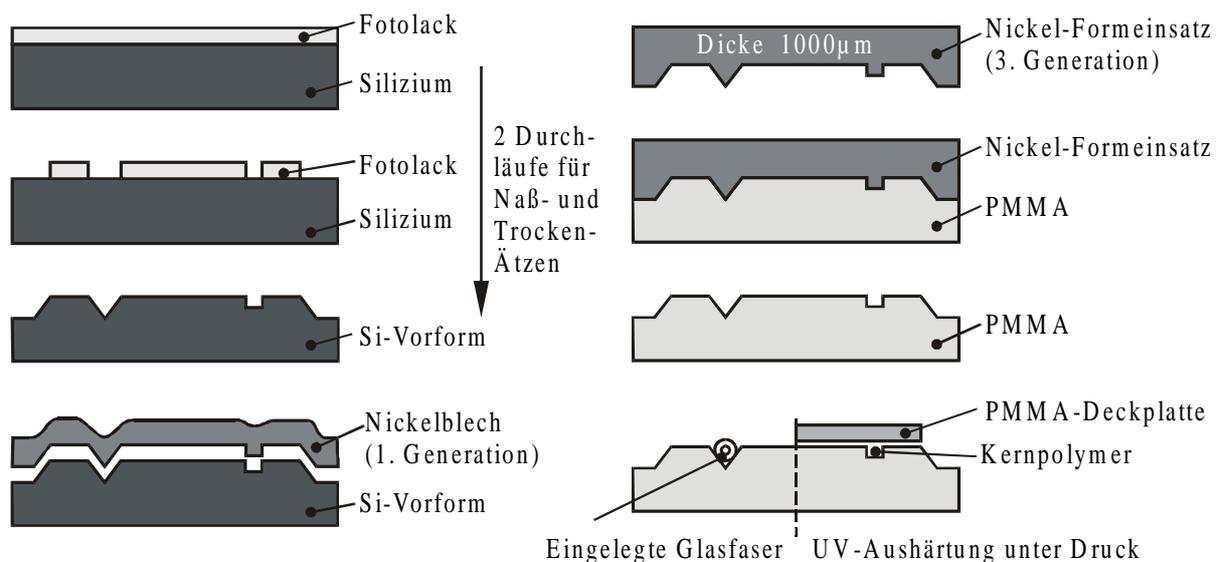


Bild 4.1 SIGA-Verfahren für polymere integriert optische Strukturen

Im ersten Schritt wird mittels Fotolack und UV-Lithographie das Design für die V-Gruben auf einen 100-Silizium-Wafer übertragen, der in Kalilauge (KOH) naßchemisch geätzt wird. Anschließend werden in einem Lithographieschritt die Wellenleiterstrukturen definiert, die dann in einem Plasmaprozess trockenchemisch geätzt werden. Die beiden verwendeten Masken müssen dabei sehr genau zueinander justiert werden, da zur späteren passiven Ankopplung der Glasfasern, die in die V-Gruben (157,3 µm Breite) eingelegt werden, an die Wellenleitergräben

(Querschnitt $6 \times 6 \mu\text{m}^2$) eine Genauigkeit von besser $1 \mu\text{m}$ erreicht werden muß. Dies resultiert aus der Koppeleffektivität gleichartiger Wellenleiter bzw. Faser/Wellenleiter nach [Hul, Wie4]:

$$T_t = T_{long} \cdot \exp\left(-T_{long} \cdot \frac{x^2}{w_1^2}\right) \quad \text{mit} \quad T_{long} = \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{2 \cdot z_0}\right)^2} \quad \text{und} \quad z_0 = \pi \cdot w_1^2 \cdot \frac{n_i}{\lambda},$$

bzw. für die Dämpfung: $D = -10 \cdot \lg(T_t)$, mit w_1 =Fleckweite Wellenleiter/Faser1, n_i = Brechzahl des Zwischenraumes zwischen Wellenleiter 1 und 2 (index-matching), x : radialer Versatz und z : lateraler Abstand.

Die so hergestellte sehr präzise Silizium-Masterform wird für ein Design nur einmal benötigt, da in dem nächsten Schritt, nach Aufputtern einer Silberschicht, eine Replikation mittels Nickelgalvanik durchgeführt wird. Das erhaltene Nickelblech, welches die Mikrostrukturen in negativer Form (als Stege) enthält, kann wiederum galvanisch repliziert werden. Von dieser zweiten Generation, die wieder positive Strukturen enthält, werden dann in einem abschließenden Kopierprozess in der Galvanik die endgültigen Formeinsätze hergestellt, die zur Abformung in Kunststoff dienen. Vorher müssen die verwendeten Formeinsätze (Nickel 3. Generation) ausgesägt und von der Rückseite geschliffen werden. Nach dem Abformschritt in Kunststoff, der mittels Spritzgieß- oder Heißprägeprozessen durchgeführt werden kann, werden die Wellenleitergräben mit einem hochviskosen Kernmonomer höherer Brechzahl aufgefüllt. Es wird ein Deckel aufgelegt und das Kernmonomer unter Druck mit Hilfe von UV-Licht polymerisiert, d.h. ausgehärtet. In die V-Gruben werden Glasfasern eingelegt und ebenfalls verklebt. Man erhält so ein passiv Glasfaser-gekoppeltes integriert-optisches Bauteil.

Im folgenden wird näher auf die einzelnen Prozeßschritte eingegangen, mit den entsprechenden Modifikationen, die für spezielle Komponenten, wie eine optische Backplane und thermo-optische Schalter, am oben kurz dargestellten SIGA-Prozeß vorgenommen werden müssen.

4.2 Silizium-Mikrostrukturierung

Auf einen 100-Siliziumwafer wird eine dünne Siliziumnitrid- oder Siliziumoxidschicht aufgebracht, auf die wiederum dünner Fotolack aufgeschleudert wird. Mittels UV-Lithographie wird dann der Fotolack entsprechend der späteren Lage der V-Gräben strukturiert, d.h. die belichteten Lackstrukturen werden beim Entwickeln herausgelöst. Anschließend erfolgt eine

Strukturierung der dünnen Nitrid- oder Oxidschicht mittels Ätzen in Flußsäure oder mittels reaktivem Ionenätzen (RIE). Diese dünne strukturierte Nitrid- oder Oxidschicht dient bei der eigentlichen Ätzung des Siliziumwafers als resistente Maskierung, da der Fotolack von der verwendeten Kalilauge (KOH) angegriffen wird [Heu].

Das Ätzen von 100-Silizium mit KOH ist ein selektiver Ätzprozeß, bei dem die 111-Ebenen freigelegt werden, da der Ätz-Vorgang in 111-Richtung (19 nm/min) um den Faktor 30 langsamer ist als in 100-Richtung (0,54 $\mu\text{m}/\text{min}$) [KleR]. Daher ist dieser Prozeß sehr gut geeignet, um genau definierte Breiten herzustellen, die bei den V-Gruben gebraucht werden. So wird gewährleistet, daß die Glasfasern im fertigen Bauteil direkt vor den Wellenleitergräben positioniert sind. Wird die Strukturbreite im Maskendesign (150 μm) etwas unter der erforderlichen Breite (157,3 μm) gewählt, so kann man sehr genau die Unterätzung in 111-Richtung kontrollieren und damit die erforderliche Breite einstellen.

Der Siliziumwafer wird nach erfolgter Ätzung der Strukturen in KOH, wie oben beschrieben für V-Gruben, aber entsprechend auch für Mikrospiegel [Wie3], abermals mit einer Fotolackschicht versehen. Nun wird mit der zweiten Maske des verwendeten Maskensatzes eine zu den schon vorhandenen Strukturen genau justierte Belichtung durchgeführt, um die Wellenleitergräben direkt vor die V-Gruben zu positionieren. Dazu befinden sich auf beiden Masken Justiermarken, mit denen eine Justierung besser als 0,5 μm möglich ist. Die Justiermarken (siehe Bild 4.2) sind im Wafer, im Nickel und im Polymersubstrat sichtbar, und so kann selbst beim abgeformten Bauteil eine eventuelle Fehljustierung gezeigt werden.

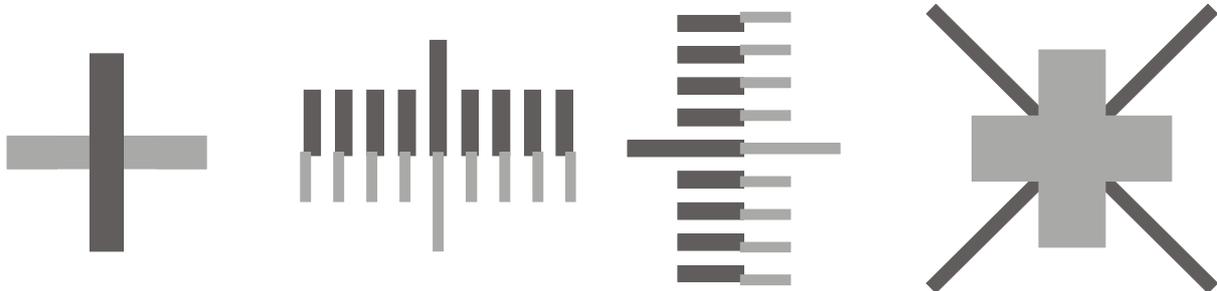


Bild 4.2 Justiermarken (auf zwei Masken eines Maskensatzes, hell: KOH-Maske, dunkel: RIE-Maske)

Nach der Belichtung und Entwicklung des Fotolackes erfolgt eine Trockenätzung in einer Plasmaätzanlage mit reaktiven Ionen [EldJ]. Dazu wird der Wafer auf die untere Platte (Kathode) der Ätzkammer gelegt. Nach der Evakuierung der Kammer wird ein HF-Feld zwischen oberer und unterer Platte angelegt und ein Gemisch aus SF_6 und Freon eingeleitet. Das SF_6 dient dabei als primäres Reaktionsgas und wird im HF-Feld ionisiert. Durch die Zugabe von Freon zum Plasma erreicht man eine gute Anisotropie eines ansonsten isotropen Verfahrens [Rud]. Die durch Ionen von der Waferoberfläche abgesputterten Fotolackpartikel bewirken in Verbindung mit dem Freon eine Passivierung der geätzten Strukturen mit einer Polymerschicht. Nur senkrecht auftreffende Ionen haben genug Energie um die dünne Polymerschicht zu durchdringen und das Silizium zu ätzen. Dieses führt zu einer gerichteten Ätzung [Kas], wobei die Flanken geschützt werden.

Nach dem so erfolgten Ätzen wird mittels einer Wafersäge ein Sägeschnitt am Ende der V-Gruben entlang der Front der Wellenleitergräben angebracht, um die störende Flanke der V-Gruben zu entfernen (dritte Dimension der V-Gruben). Diese würden im späteren Bauteil verhindern, daß die Glasfasern direkt bis vor die Wellenleitergräben positioniert werden können.

Eine schematische Darstellung der geätzten Strukturen im Silizium ist in Bild 4.3 zu sehen. Man erkennt deutlich die Wellenleitergräben, den Sägeschnitt und die V-Gruben. Die geätzten Strukturen befinden sich auf einer Art Plateau. Dieses ist notwendig, damit die V-Gruben nach vorne bzw. hinten offen sind, damit die Glasfasern eingelegt werden können.

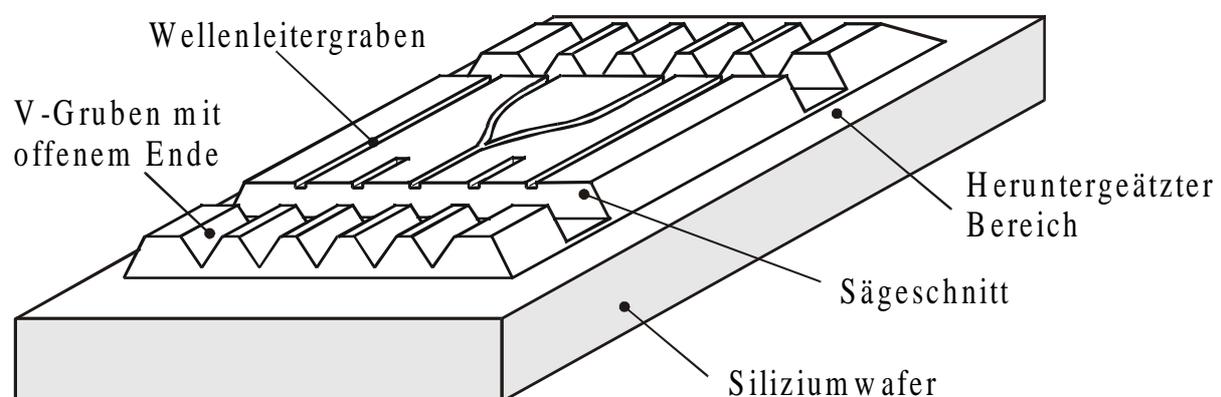


Bild 4.3 Silizium-Vorform mit Wellenleitergräben, V-Gruben und Sägeschnitt

Beim späteren Prozeßschritt der Formeinsatz-Präparation ist dieses Plateau ein entscheidender Vorteil (siehe Kapitel 4.3), wenngleich es bei der Silizium-Mikrostrukturierung vor allem die Belackung für den Schritt des Reaktiven Ionen-Ätzens (RIE) erschwert. Erhabene Plateaus sind schwieriger homogen zu belacken als plane Wafer mit einigen kleinen geätzten Strukturen. Für bestimmte integriert-optische Komponenten muß die Silizium-Mikrostrukturierung entsprechend angepaßt werden. So werden für eine Backplane beispielsweise Mikrospiegel mit integriert, die nichts anderes sind, als kleinere V-Gruben, die zu allen Seiten geschlossen sind. Positioniert man eine solche kleine Grube direkt vor einen Wellenleitergraben, so kann man die gegenüberliegende Flanke der V-Grube als Spiegelflanke benutzen, um eine Strahlumlenkung zu realisieren. Ferner kann für die Herstellung einer polymeren Backplane mit Abmessungen ≥ 20 cm nicht mehr ein kompletter Wafer verwendet werden, da selbst bei der nunmehr verwendeten 6"-Technologie maximale Strukturlängen von nur knapp 15 cm möglich wären. Deshalb wird ein Siliziumwafer zersägt und passiv aneinanderjustiert, um längere Strukturen zu erhalten [Kal1, Wie4]. Dies geschieht durch umgekehrtes Auflegen der Siliziumstücke auf im richtigen Abstand gespannte Glasfasern, so daß entsprechend mitprozessierte V-Gruben einrasten. Dabei sind lange Strukturen hergestellt worden mit einer Genauigkeit an der Stoßkante unter $0,5 \mu\text{m}$ (Bild 4.4).

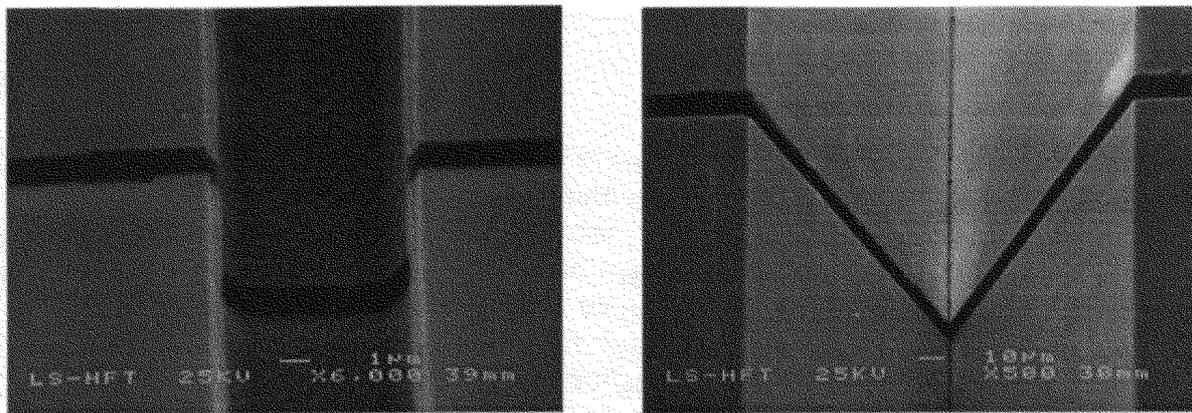


Bild 4.4 Stoßkante in Siliziumvorform, Versatz $< 0,5 \mu\text{m}$

4.3 Galvanische Replikation und Formeinsatzbearbeitung

Nach erfolgter Mikrostrukturierung wird der gründlich gereinigte Siliziumwafer auf einen Halter aufgespannt und mit einer 200 nm dicken Silberschicht besputtert. Diese dient als leitfähige Startschicht für die anschließende Galvanik, da die Eigenleitfähigkeit des Siliziums

nicht ausreichend ist. Für die Mikrostrukturierung wird am besten nur gering dotiertes Silizium mit möglichst fehlerarmer Kristallstruktur verwendet.

Der versilberte Wafer wird kontaktiert und mitsamt dem Halter als Kathode in ein Nickelsulfamatbad gehangen. Bei Stromdichten von $2\text{-}3\text{ A/dm}^2$ wächst auf der Kathodenseite (Wafer) Nickel entsprechend der Reduktion $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \Rightarrow \text{Ni}$ auf. Für ein 1mm dickes Nickelblech dauert eine solche Galvanik mehrere Stunden [MülL]. Das so erhaltene Nickelblech wird mechanisch vom Siliziumwafer getrennt, der dabei normalerweise zerstört wird. Nach einer Entfernung der Siliziumreste mittels KOH-Ätzlösung kann von dem Original-Nickelblech (1. Generation) durch erneutes Abscheiden von Nickel eine Kopie hergestellt werden. Das resultierende Nickelblech (2.Generation, Positivform) kann von dem Nickelblech der 1.Generation getrennt werden, wobei die 200 nm dicke Silberschicht auf dem Blech der 1.Generation verbleibt, so daß die Strukturen wieder die gleichen Abmessungen haben. Die Oberfläche des Nickelbleches zweiter Generation muß vor dem weiteren Kopierschritt mittels Kaliumdichromatlösung passiviert werden, damit das abgeschiedene Nickel dritter Generation von der zweiten Generation getrennt werden kann. Dabei verringern sich die Strukturabmessungen allerdings um 2 nm durch die Passivierung. Von dem Blech der 2.Generation können mehrere Nickelbleche 3.Generation (Negativform) hergestellt werden, die als Formeinsätze im entsprechenden Spritzgieß- oder Heißprägewerkzeug dienen.

Das Nickelblech der 3.Generation, das eine größere Stärke aufweisen muß, wird dann passend für das jeweils verwendete Werkzeug ausgesägt und auf einer Planschleifmaschine mit der Strukturseite nach unten von der Rückseite präzise auf ein Maß von $1000 \pm 5\text{ }\mu\text{m}$ geschliffen (siehe Bild 4.5). Dieses Rückseiten-Planarisieren [Kal1] ist notwendig, da sich einerseits während der Galvanik alle Strukturen von der Vorderseite nach hinten übertragen (zu sehen an V-Gruben...) und andererseits große Flächen aufgrund der begrenzten Homogenität des elektrischen Feldes nicht homogen galvanisiert werden können [ArnJ, EldH]. Daraus resultiert eine Schwankung in der resultierenden Dicke. Diese Methode der Rückseitenbearbeitung ist erst durch die Strukturen, die sich auf dem Siliziumwafer auf einem Plateau befinden, möglich, da die Strukturen als Negativform (Nickel 3.Generation) in einer Wanne geschützt vorliegen. Dadurch kommen die Strukturen nicht mit dem Permanentmagneten in Kontakt. Sollten größere Plateaus vorliegen (beide Seiten größer als ca. 10 mm), so können zur Sicherheit Stützstrukturen mit integriert werden, damit sich beim Rückseitenschleifen das Nickelblech

nicht durchbiegt. So haben beim Layout der optischen Backplane die langen V-Gruben (siehe Kapitel 7.2.1), die sich zwischen den eigentlichen Wellenleitern befinden, eine Doppelfunktion. Einerseits dienen sie der Aufnahme von Glasfasern bei der passiven Justage mehrerer Silizium-Masterformen, andererseits dienen sie bei der Rückseitenplanarisierung als zusätzliche Stützstrukturen.

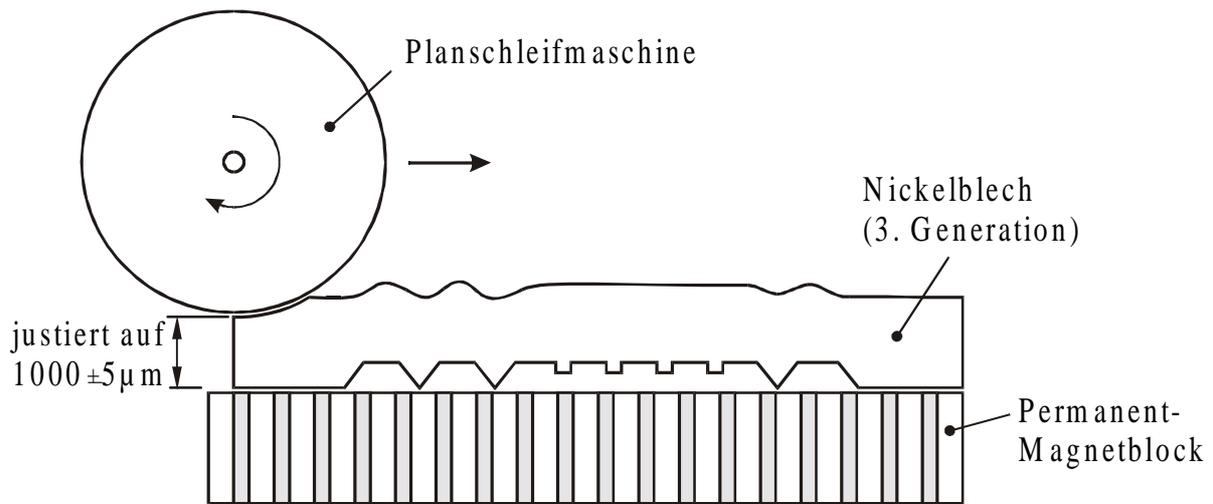


Bild 4.5 Rückseiten-Planarisierung der 3. Generation-Nickel-Formeinsätze

4.4 Abformung in Kunststoff

Die so im Nickelblech vorliegenden negativen Mikrostrukturen lassen sich auf verschiedene Art und Weise in Kunststoff abformen. Interessant sind die vier folgenden Verfahren:

- Gießtechnik
- Reaktionsgießen
- Spritzgießen und Spritzprägen
- Heißprägen

Bei der einfachen Gießtechnik [KleG] wird die Nickelform mit einem flüssigen Polymer überzogen, ausgehärtet und dann getrennt. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise Sensoren herstellen [Wie1]. Das Reaktionsgießen ist etwas aufwendiger, geschieht in einer Vakuumkammer und ergibt temperaturfestere polymere Mikrostrukturen, weil dabei beispielsweise quervernetzte Polymere eingesetzt werden [Kra, Pom3]. Die beiden häufiger angewendeten Verfahren zum Abformen, das Spritzgießen [HofA] und das Heißprägen [Hec1],

sind ausführlich in Kapitel 2 dargestellt worden. Die Abformung der im Nickelblech vorliegenden Mikrostrukturen im Rahmen des SIGA-Prozesses ist mittels Heißprägen und Spritzprägen vorgenommen und ebenfalls in Kapitel 2 beschrieben worden. Die hergestellten Strukturen werden in Kapitel 7 vorgestellt.

4.5 Wellenleiterherstellung

Die mittels Spritzgieß- oder Heißprägeprozess hergestellten polymeren Substrate werden anschließend zu integriert optischen Komponenten weiterverarbeitet. Dazu wird auf die Oberfläche, die die Wellenleitergräben enthält, ein hochviskoses Kernmonomer (Kap. 3.3) mit einem Anteil an Photoinitiator geträufelt. Anschließend wird ein PMMA-Deckel aufgelegt und das ganze unter einer Pneumatikpresse zusammengefahren. Durch Bestrahlung mit UV-Licht setzt der Photoinitiator Radikale frei. Diese sorgen für die Polymerisation des Monomers, was schließlich zu fertigen integriert optischen Komponenten führt. Die Zwischenschicht, die sich bei diesem Prozeßschritt zwangsläufig einstellt, ist z.T. unerwünscht, da das in die Wellenleiter eingekoppelte Licht bei entsprechender Dicke dieser Schicht in dieselbe auskoppeln kann und somit zu Verlusten führt [Ney1]. Ziel ist es nun, diese Schicht, auf die nicht ganz verzichtet werden kann, zu minimieren (siehe Bild 4.6), weil sie zur Klebung zwischen Deckel und Substrat beiträgt. Hieraus resultiert, daß in erster Linie für die Herstellung polymerer Wellenleiter die Substratoberflächen eine hohe Planität aufweisen müssen, um eine über die gesamte Substratfläche homogene Zwischenschicht zu erhalten.

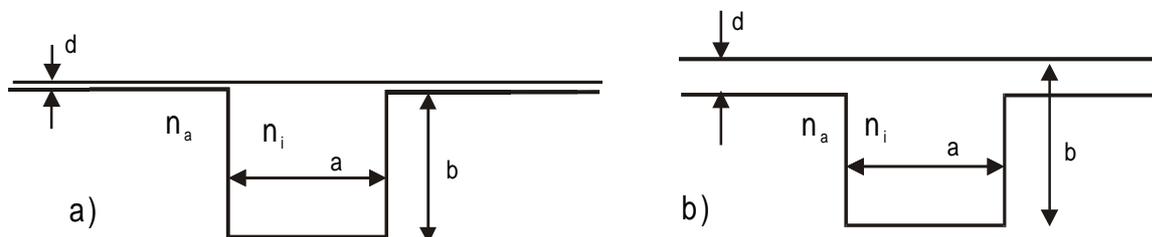


Bild 4.6 Zwischenschicht: a) notwendig und b) unerwünscht

Die passive Ankopplung von Glasfasern kann entweder beim Verkleben, d.h. bei der Generierung der Wellenleiter geschehen, oder aber nach der Herstellung, wenn die V-Gruben bei dieser geschützt werden [Pom1].

Die Fertigung der polymeren Backplane geschieht aufgrund ihrer Größe nicht mehr auf einer Pneumatik- sondern einer Hydraulikpresse.

Bei der Herstellung thermooptischer Schalter werden anstelle des PMMA-Deckels beispielsweise eine Folie aus Mylar (Fa. DuPont) oder eine dünne Nickelfolie beim Verkleben verwendet. Diese haben den Vorteil, daß sie anschließend zur benötigten Elektrodenstrukturierung auf der Oberfläche wieder entfernt werden können [Pom2].

4.6 Alternative Prozeßschritte oder Bearbeitungsmöglichkeiten

Für die Silizium-Mikrostrukturierung gibt es bei bestimmten Anwendungsfällen alternative bzw. zusätzliche Möglichkeiten. So können beispielsweise Wellenleitergräben direkt durch die Strukturierung von 6 µm dicken Fotolackschichten auf einem Siliziumwafer hergestellt werden. Eine Kombination mit Mikrofunkenerosion, bei der durch eine Drahtelektrode Silizium erodiert und weggespült wird, ist ebenso möglich [Ehr, Hee, Wol]. Ferner wird die Laser-Ablation mittels eines Excimerlasers angewendet [ArnJ, WebL]. Mit diesem können Strukturgeometrien im Silizium oder in aufgetragenem Fotolack realisiert werden, die sonst nicht so ohne weiteres mittels Ätztechniken hergestellt werden könnten. Hierzu zählen beispielsweise Spiegelflanken beliebiger Winkel oder aber auch gestufte Substrate. Ferner ist es möglich, kleinste Strukturen mit Abmessungen, die jenseits der Auflösung von UV-Lithographie liegen [Cho2], mittels Elektronenstrahl in eine dünne Lackschicht zu schreiben (siehe hierzu Kapitel 7.3). Alle diese auf verschiedene Art und Weise hergestellten Mikrostrukturen auf einem Siliziumwafer als Masterform können in die SIGA-Technik einbezogen werden.

Für Anwendungen mit Strukturgrößen im 100 µm Bereich können Substrate auch mittels Mikrofräsen, Mikrosägen, Mikrobohren und Mikroschleifen [Jöh2, Fah, Ruz, WebL] bearbeitet werden. Eine weitere Möglichkeit der Strukturierung ist die UV-Dicklacktechnik [Loe], bei der ein bis zu einige 100 µm dicker Fotoresist (z.B. SU-8) direkt mit UV-Licht und entsprechender Maske belichtet und dann entwickelt wird. Dieses Verfahren kann angewendet werden, wenn nur niedrigere Aspektverhältnisse (<20) und keine sub-µm-Auflösung benötigt werden [Lor].

Der Vorteil aller dieser Techniken ist die fast beliebige Kombinierbarkeit dieser Mikrotechniken, um eine möglichst günstige, präzise oder auch schnell herstellbare Vorform zu generieren. Dabei müssen aber im Hinblick auf die Abformtechnik bestimmte Bedingungen bezüglich Geometrien und Abmessungen eingehalten werden. So dürfen keine Hinterschnitte entstehen, die nicht mehr entformt werden könnten. Die Abmessungen müssen sich gegebenenfalls am vorhandenen Abformwerkzeug orientieren, auf das im nächsten Kapitel näher eingegangen wird.

5 Equipment

Hier sollen die wesentlichen Geräte und Werkzeuge aus dem Bereich der Abformtechnik vorgestellt werden, mit denen im Rahmen dieser Arbeit polymere Mikrostrukturen für die optische Informationstechnik hergestellt worden sind. Nach der Beschreibung der einzelnen Geräte wird in Kapitel 5.6 auf die für den Prozeß notwendige Vernetzung eingegangen.

5.1 Spritzgießmaschine

Zum Abformen von polymeren Mikrostrukturen mittels Spritzgieß- und Heißprägetechnik wird eine Standard-Schneckenspritzgießmaschine (wie schon in Kap. 2 erwähnt) eingesetzt.

Diese ist - als wichtigste Besonderheit - mit einer schwenkbaren Schließenheit (Bild 5.2) ausgestattet, so daß zum Heißprägen die Rohlinge in das Werkzeug eingelegt werden können.

In Bild 5.1 ist die Maschine in normaler, horizontaler Betriebsweise skizziert.

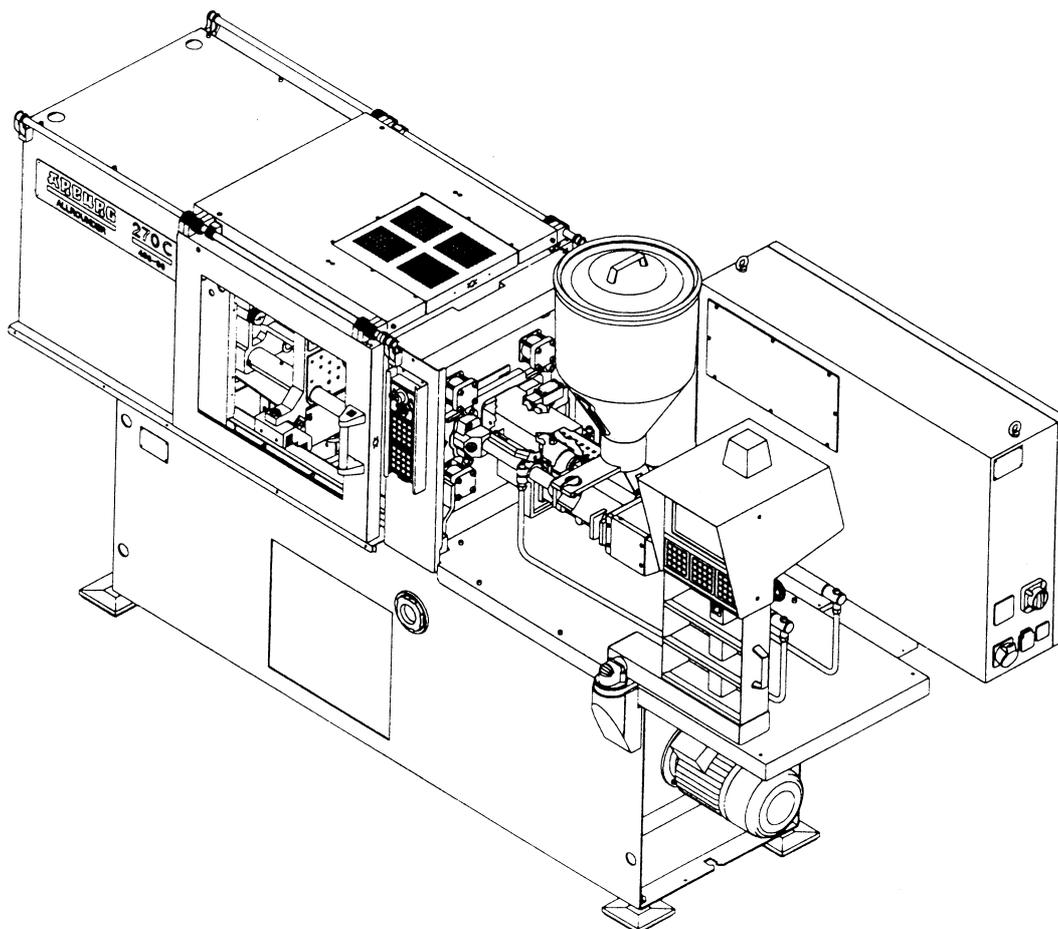


Bild 5.1 Spritzgießmaschine Arburg Allrounder 270 C 400-90

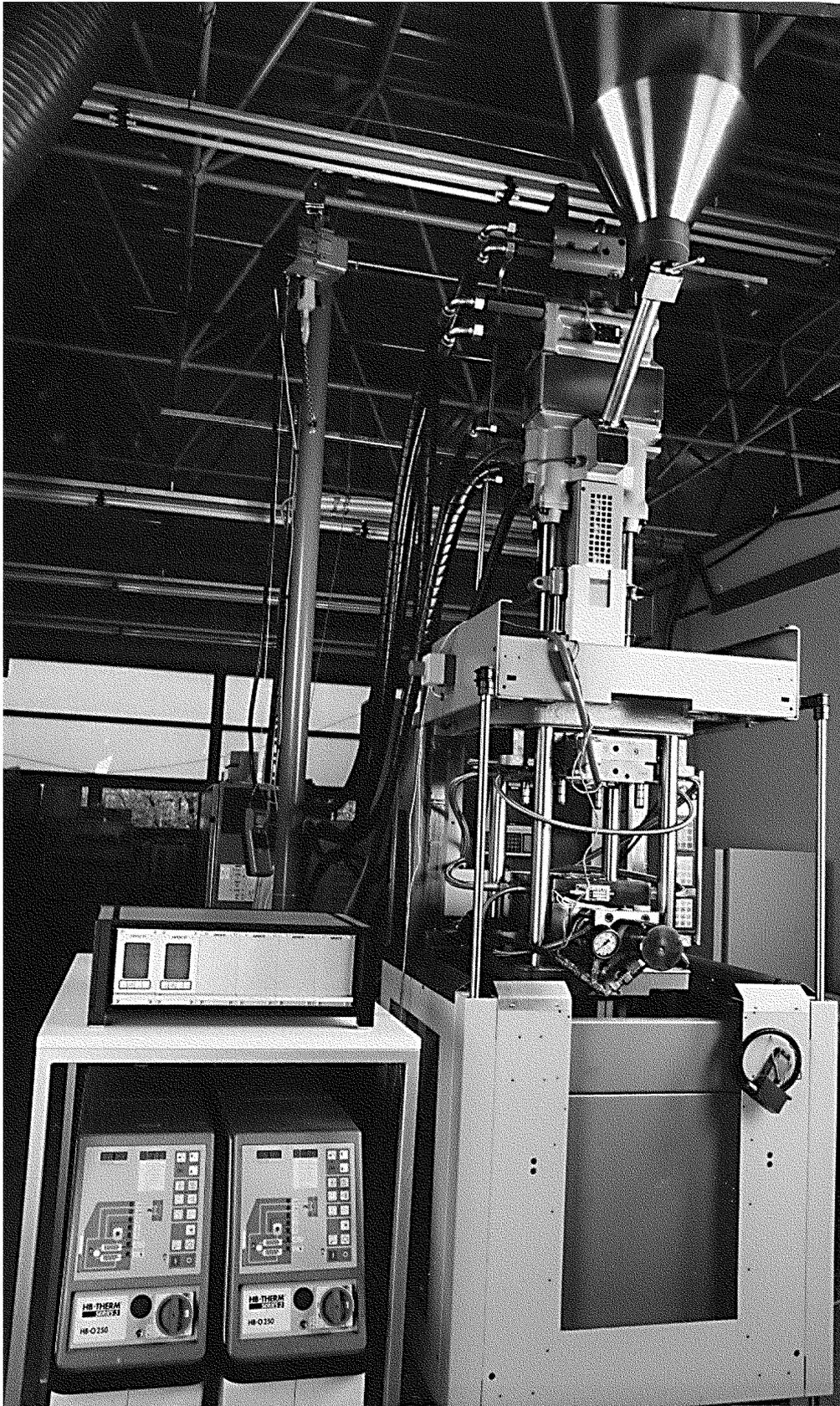


Bild 5.2 *Spritzgießmaschine mit geschwenkter Schließeinheit und Peripherie*

Ferner besitzt die Spritzgießmaschine eine Kernzugsteuerung, mit der ein zusätzlicher, am Werkzeug befindlicher Hydraulikzylinder angesteuert werden kann, der den Prägevorgang im Werkzeug durchführt. Eine weitere Besonderheit der Maschine sind die sogenannten PEAs, programmierbare Ein- und Ausgänge, mit deren Hilfe es möglich ist, auf der standardmäßig zeitgesteuerten Maschine einen temperaturgesteuerten Prozeß zu realisieren. Dazu wartet die Maschine im Spritzgießzyklus bei bestimmten Stellen auf externe Signale, die temperaturabhängig gesendet werden (siehe Kap. 5.6). Bild 5.2 zeigt die Spritzgießmaschine in geschwenkter Ausführung mit dem verwendeten Spritzgießwerkzeug (Kap. 5.2), den beiden Temperiergeräten (Kap. 5.4) und dem Heißkanalgerät (Kap. 5.5). Die Maschine hat einen Holmabstand von 270 mm, wobei durch Ziehen eines oder zweier Holme Werkzeuge bis zu $400 \times 400 \text{ mm}^2$ eingebaut werden können. Dieses wird beim Heißprägewerkzeug ausgenutzt.

5.2 Spritzgießwerkzeug

Auf das verwendete Spritzgießwerkzeug ist schon kurz in Kapitel 2 eingegangen worden. Das Prinzip des Werkzeuges ist nochmal in Bild 5.3 dargestellt.

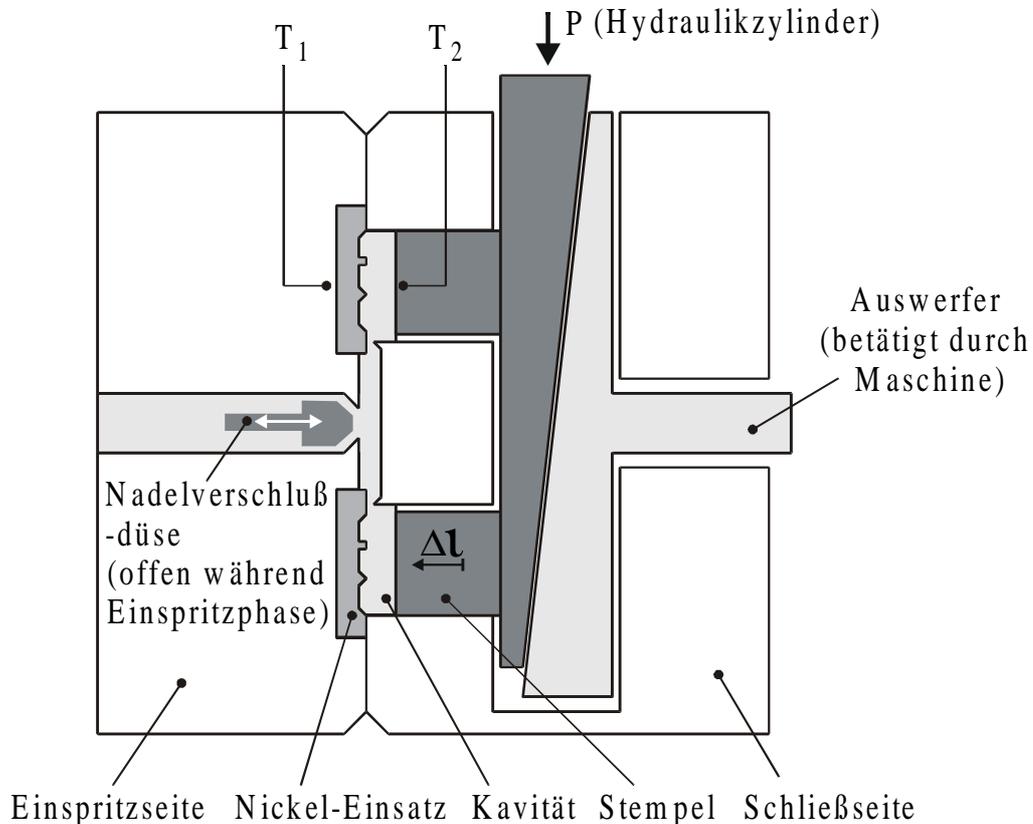


Bild 5.3 Schema des Spritzgießwerkzeuges

Die wesentlichen Besonderheiten des Spritzprägewerkzeuges sind die beweglichen Rückseiten der insgesamt 8 Kavitäten (siehe Bild 5.4), die über die schiefe Ebene (2° Winkel) mit Hilfe des zusätzlichen Hydraulikzylinders in die Kavitäten prägen und so als Prägestempel wirken.

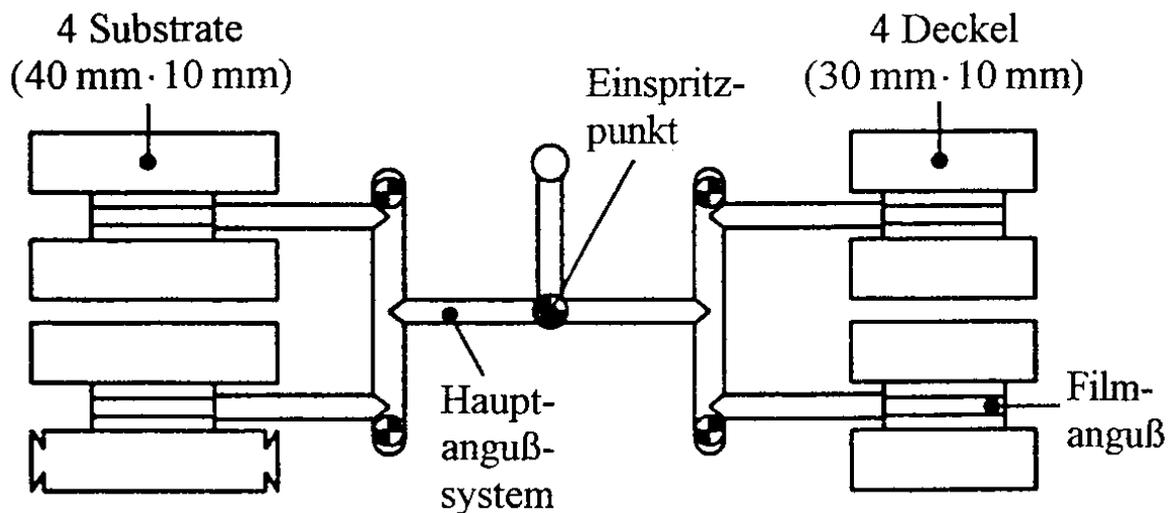


Bild 5.4 Kavitäten des Spritzgießwerkzeuges

Die Nadelverschlußdüse, die sich im Werkzeug am Ende des Heißkanals [MenG] befindet, dient als Rückstromsperre für die heiße Polymermasse. Sie wird nur während der Einspritzphase geöffnet und anschließend vor Beginn des Prägevorganges geschlossen. Beide Werkzeughälften besitzen Temperaturfühler, die möglichst nah an den Kavitäten die Temperatur messen. Der einspritzseitige Temperaturfühler befindet sich dazu direkt unter einem Nickelblech, der schließseitige Temperaturfühler genau gegenüber, nah der Oberfläche, in einem der Prägestempel. Das Bild 5.5 zeigt das Foto des eingebauten Spritzprägewerkzeuges in geöffnetem Zustand mit einem danebenliegenden, spritzgegossenen Polymersubstrat.

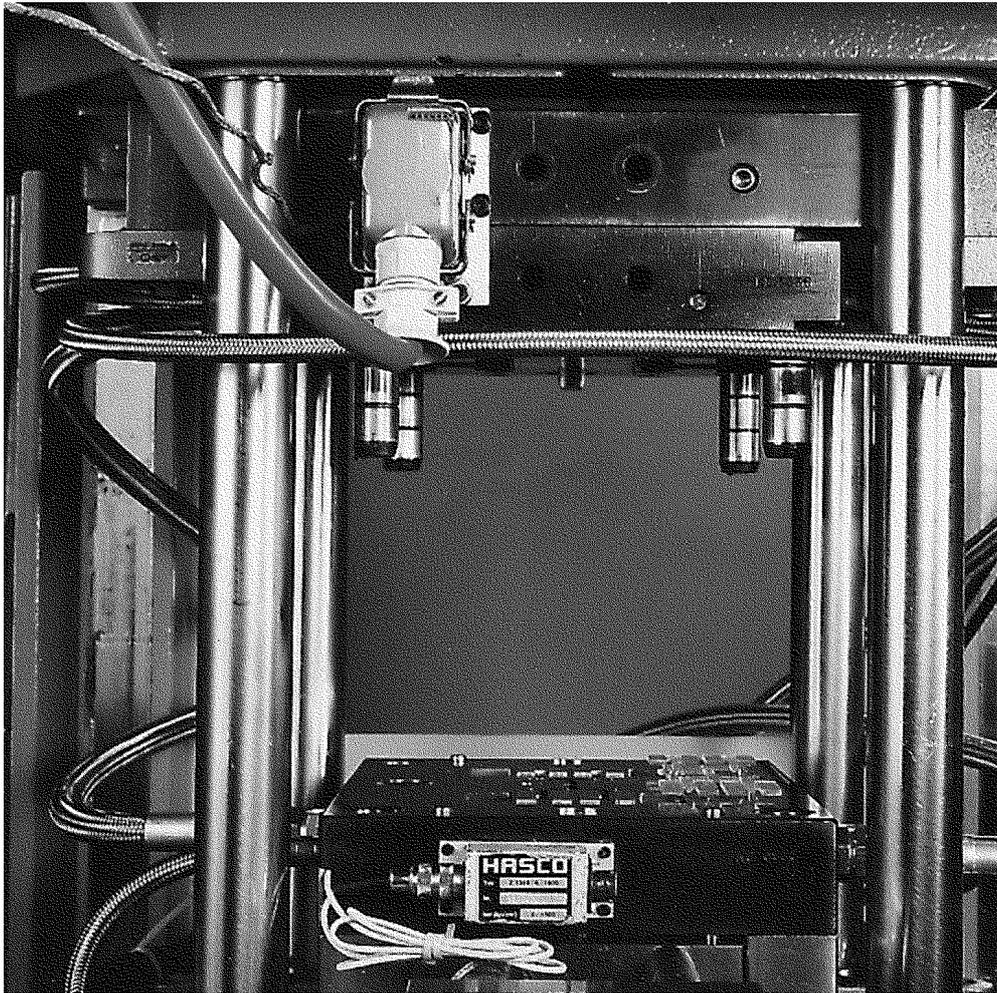


Bild 5.5 Spritzprägewerkzeug im eingebauten, geöffneten Zustand

5.3 Heißprägewerkzeug

Das Heißprägewerkzeug (Schema in Bild 5.6) ist schon kurz in Kap. 2 erläutert worden. Im wesentlichen ist das Heißprägewerkzeug ähnlich dem Spritzgießwerkzeug aufgebaut. Der größte Unterschied liegt darin, daß das Heißprägewerkzeug nicht über einen Angußkanal verfügt, da zum Prägen Rohlinge eingelegt werden. Die Prägemechanik ist im Prinzip identisch mit der des Spritzgießwerkzeuges, und die schiefe Ebene hat ebenfalls einen Winkel von 2° . Das Werkzeug ist modular aufgebaut, so daß für verschiedene Substratgrößen nur jeweils die vorderste Werkzeugplatte der Schließseite des Werkzeuges in Verbindung mit dem entsprechenden Prägestempel ausgetauscht werden muß. Die aufwendige Prägemechanik, der Auswerfermechanismus und der Hauptteil der Temperierung werden nicht gewechselt. Auf der anderen Werkzeugseite, auf der die entsprechenden mikrostrukturierten Nickelbleche

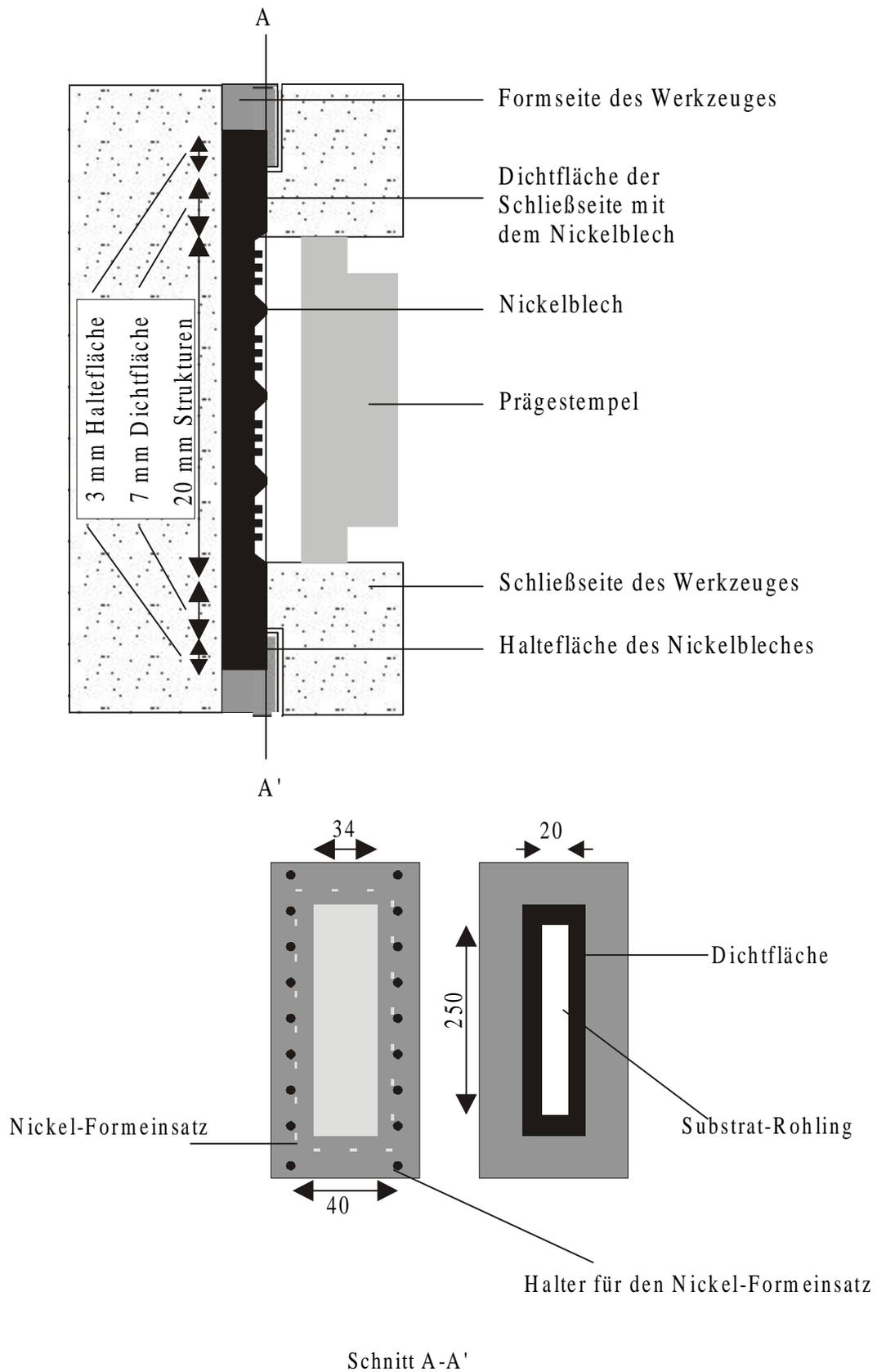


Bild 5.6 Prinzip des Heißprägewerkzeuges, große Kavität [Mün]

befestigt sind, wird nur der entsprechende Halterahmen gewechselt. Die Besonderheit neben der Modularität ist die Temperierung des Werkzeuges, das als Wärmetauscher konzipiert ist, um möglichst schnell und variabel temperiert zu werden. Dazu befinden sich in allen Werkzeugplatten zwei möglichst symmetrische, parallele Temperierkanäle, die in 2 Platten (hinter dem Nickelblech und direkt hinter dem Prägestempel) nicht auf konventionelle Art und Weise durch Bohren, sondern durch Fräsen und anschließendes Vakuumlöten angefertigt worden sind. Der eine Vorteil dieser Kanäle liegt in der gegenüber Bohrungen größeren Oberfläche, die einen besseren Wärmeübergang zwischen Medium und Werkzeug ermöglicht, der andere Vorteil darin, daß sie fast beliebig in einer Ebene in den Platten anzuordnen sind.

Für drei verschiedene Größen stehen Werkzeugplatten zur Verfügung:

- $10 * 40 \text{ mm}^2$, bei einer Dicke von 2 mm, z.B. für integriert-optische Bauteile (Bild 5.8),
- $20 * 250 \text{ mm}^2$, bei einer Dicke von 3 mm, z.B. für die optische Backplane (Bild 5.7),
- $100 * 150 \text{ mm}^2$, bei einer Dicke von 3 mm, z.B. für optische Motherboards (zukünftig).

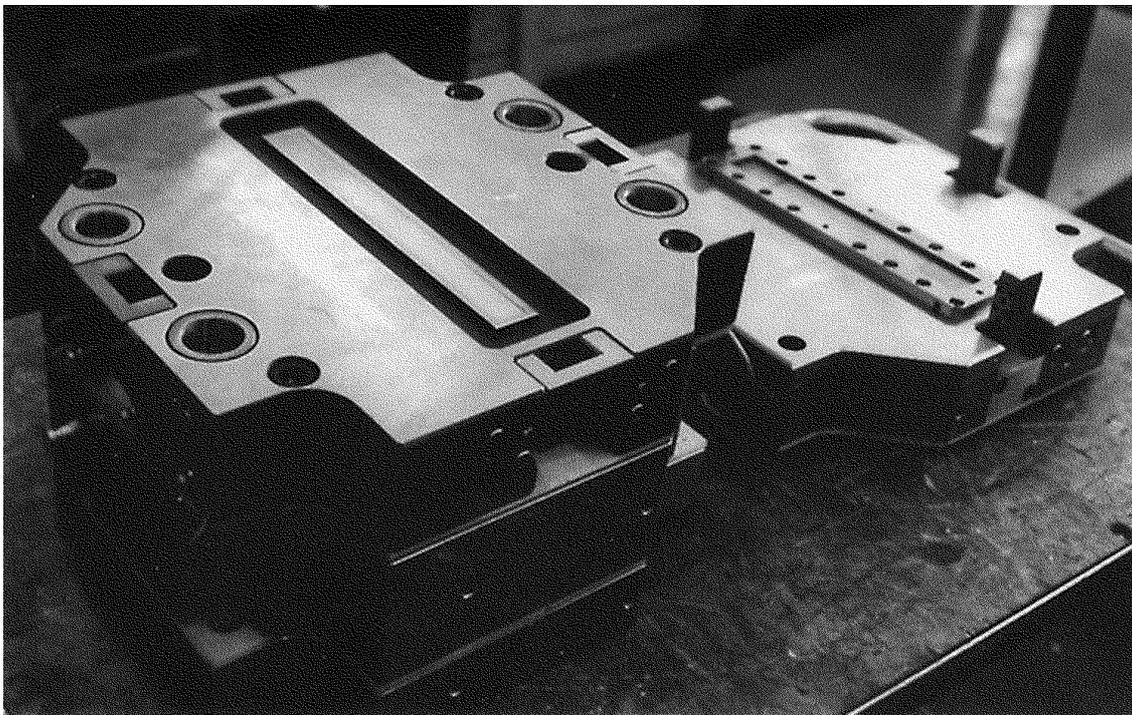


Bild 5.7 Heißprägewerkzeug mit großer Kavität, geöffnet

In Bild 5.7 ist das Heißprägewerkzeug im geöffneten Zustand zu sehen. Links befindet sich die Schließseite mit der für die Backplane notwendigen großen Kavität von $20 * 250 \text{ mm}^2$. Rechts im Bild ist die andere Werkzeughälfte zu sehen, auf der mit einem auswechselbaren Rahmen das mikrostrukturierte Nickelblech befestigt ist. In Bild 5.8 ist das Heißprägewerkzeug mit der montierten kleinen Kavität von $10 \times 40 \text{ mm}^2$ zu sehen.

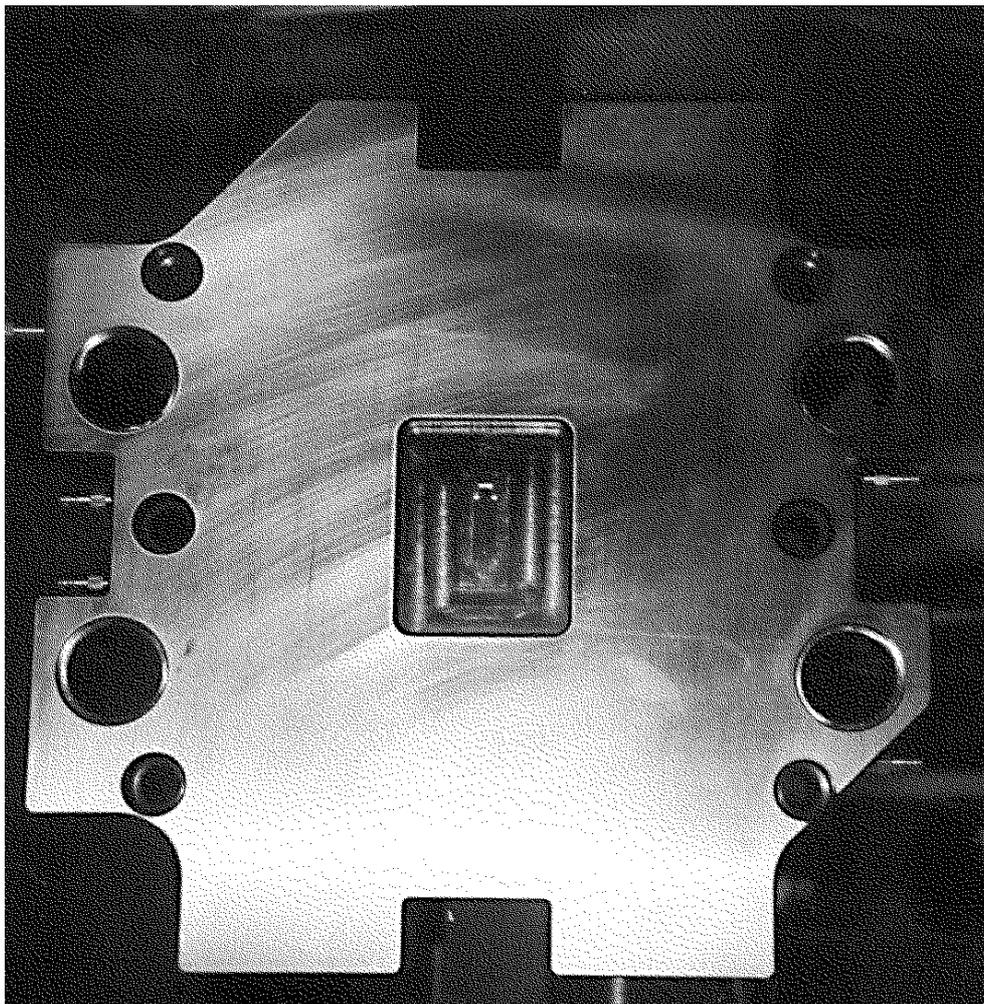


Bild 5.8 Kleine Kavität des Heißprägewerkzeuges [Mün]

Die neueste Werkzeugplatte von $100 * 150 \text{ mm}^2$ verfügt dabei über eine zusätzliche Abdichtung und einen Vakuumanschluß, damit vor dem Prägevorgang das Formnest evakuiert werden kann. Dies ist aufgrund der großen Fläche und der zu prägenden tieferen Strukturen nötig. Bei den anderen Größen kann die Luft immer noch über den Spalt zwischen Stempel und Werkzeug entweichen.

5.4 Temperiergeräte und Temperierung des Heißprägwerkzeuges

Die Temperierung des Spritzgießwerkzeuges und des Heißprägwerkzeuges geschieht mit zwei Öl-Temperiergeräten (siehe Bild 5.9), welche eine maximale Vorlauftemperatur von 250°C besitzen [Gro1]. Öl (Wärmeträgeröl) wurde dabei als Medium gewählt, da es höher erhitzt werden kann als z.B. Wasser und somit universeller einsetzbar ist, vor allem beim Heißprägen (siehe Kap. 2.2.4). Aufgrund der wesentlich aufwendigeren Temperierkanäle beim Heißprägwerkzeug (parallele Kanäle, erwähnt in Kap 5.3) ergeben sich beim Heißprägwerkzeug vier verschiedene, mögliche und verwendete Temperierungsvarianten, die in Bild 5.10 dargestellt sind und im folgenden kurz erläutert werden sollen.



Bild 5.9 Öl-Temperiergerät Grossenbacher HB-O-250 [Gro1]

Dabei kann auf zwei Öltemperiergeräte, sowie die Möglichkeit der Verwendung von Kühlwasser am Kühlwasserverteiler der Spritzgießmaschine (über zusätzliche Magnetventile gesteuert) zurückgegriffen werden:

- Variante 1:** Die Temperiergeräte sind jeweils für eine Werkzeughälfte (Schließseite bzw. „Einspritzseite“) zuständig, wobei jedes Temperiergerät entsprechend dem Variothermzyklus heizt und kühlt. Diese Variante wurde auch für den Spritzgießprozeß verwendet, da das Spritzgießwerkzeug nur über einfache Bohrungen temperiert werden kann.
- Variante 2:** Die Temperiergeräte laufen in dieser Variante nahezu parallel, d.h. sie heizen und kühlen beide Werkzeughälften und benutzen dazu die parallelen Kanäle.
- Variante 3:** In dieser Variante sind die Temperiergeräte wiederum jeweils für eine Werkzeughälfte zuständig, werden aber nur zum Heizen verwendet. Zum Abkühlen wird Kühlwasser durch die parallel verlaufenden Kanäle geleitet, das über ein Magnetventil vom Kühlwasserverteiler der Maschine geschaltet wird.
- Variante 4:** In dieser Variante, der sogenannten „Bypass“-Schaltung, wird ein Temperiergerät ständig bei hoher Vorlauftemperatur betrieben, wohingegen das zweite Temperiergerät bei niedriger Temperatur betrieben wird. Zum Heizen wird über ein Dreiwegeventil der Vorlauf des ersten Gerätes auf das Werkzeug geschaltet, während das zweite Gerät im kleinen Kreis (Bypass) auf niedriger Temperatur läuft. Zum Kühlen werden dann die beiden Dreiwegeventile umgeschaltet, so daß das Gerät 1 im Bypass auf hoher Temperatur läuft, und der Vorlauf des zweiten Gerätes, auf niedriger Temperatur laufend, mit dem Werkzeug verbunden wird. Diese Variante ist auch beim Spritzgießwerkzeug einsetzbar.

Die Steuerung der Temperiergeräte (USR-21) verfügt über eine serielle Schnittstelle, über die Temperaturen und Zustände abgefragt und Sollwerte vorgegeben werden können. Zusätzlich bietet die USR-21 die Aktivierung einer Rampenfunktion. Diese gibt einen festen Temperaturzyklus vor, bei dem zu bestimmten Zeitpunkten bestimmte Vorlauftemperaturen erreicht werden sollen [Gro2].

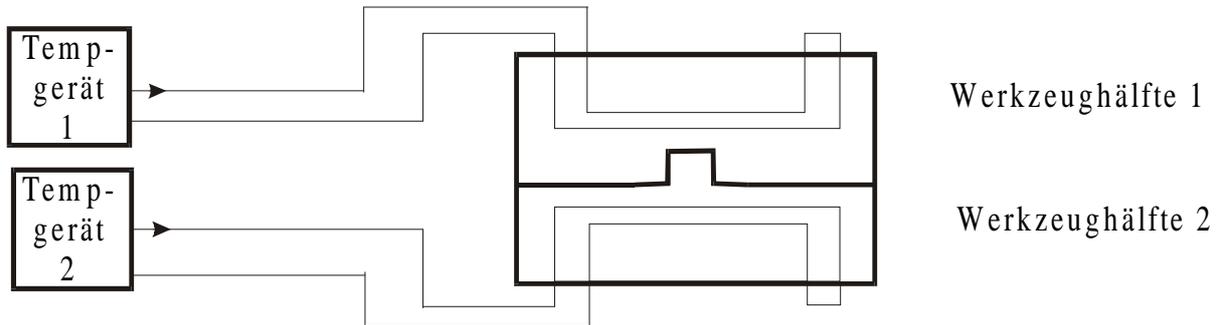
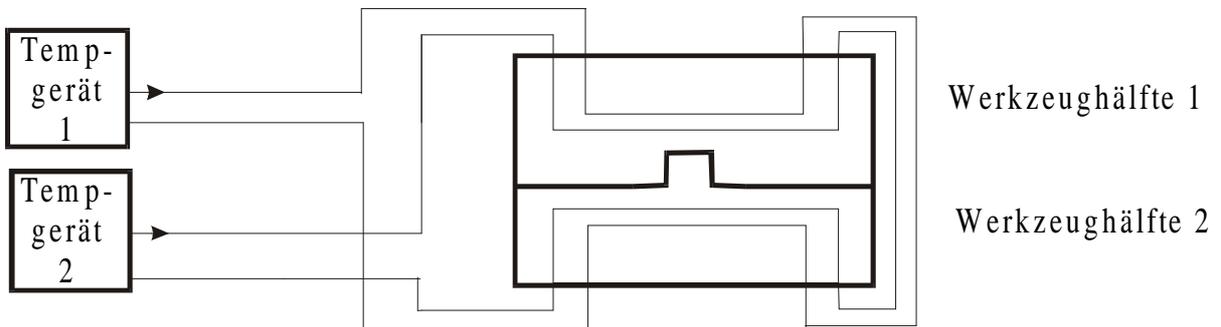
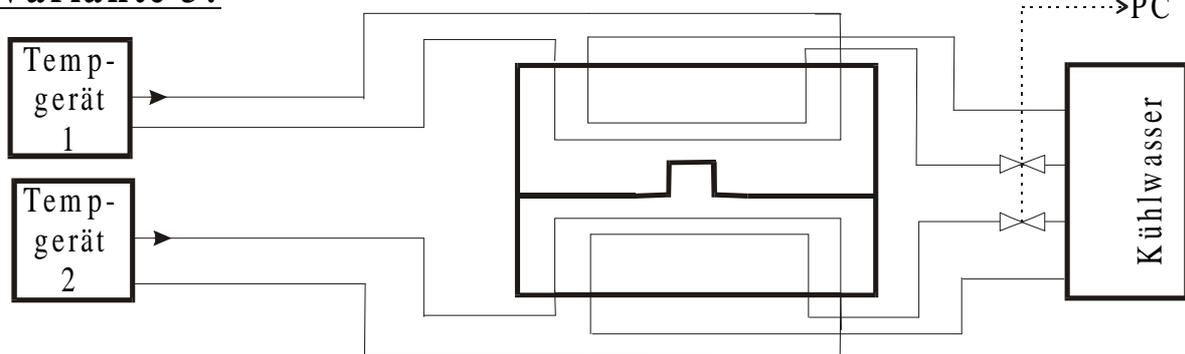
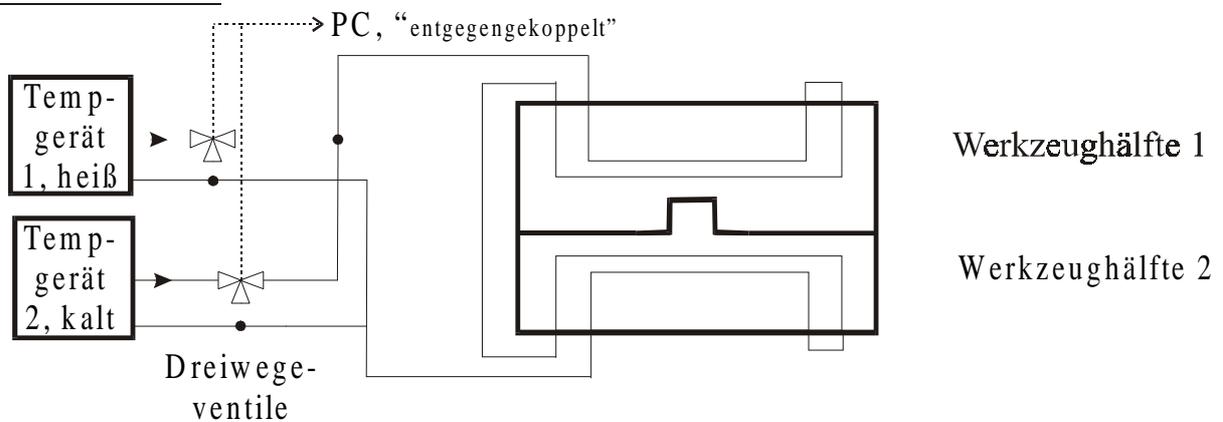
Variante 1:**Variante 2:****Variante 3:****Variante 4:**

Bild 5.10 *Verschiedene Temperierungsvarianten beim Heißprägen*

5.5 Heißkanalgerät

Beim Spritzgießprozeß kommt zusätzlich ein Heißkanalgerät (Bild 5.11) zum Einsatz, um die zwei Zonen des Heißkanals, der sich im Spritzgießwerkzeug befindet, zu heizen. Die Besonderheit des verwendeten Gerätes ist, daß es über eine serielle Schnittstelle fernsteuerbar ist, d.h. es kann ein- und ausgeschaltet werden und es können z.B. die Soll-Temperaturen der beiden Zonen festgelegt werden [Has]. Ein Auslesen der beiden Ist-Temperaturen ist ebenfalls möglich, beispielsweise um vor dem Einspritzen zu kontrollieren, ob der Heißkanal geheizt ist. Diese ist für die Nadelverschlußdüse wichtig.

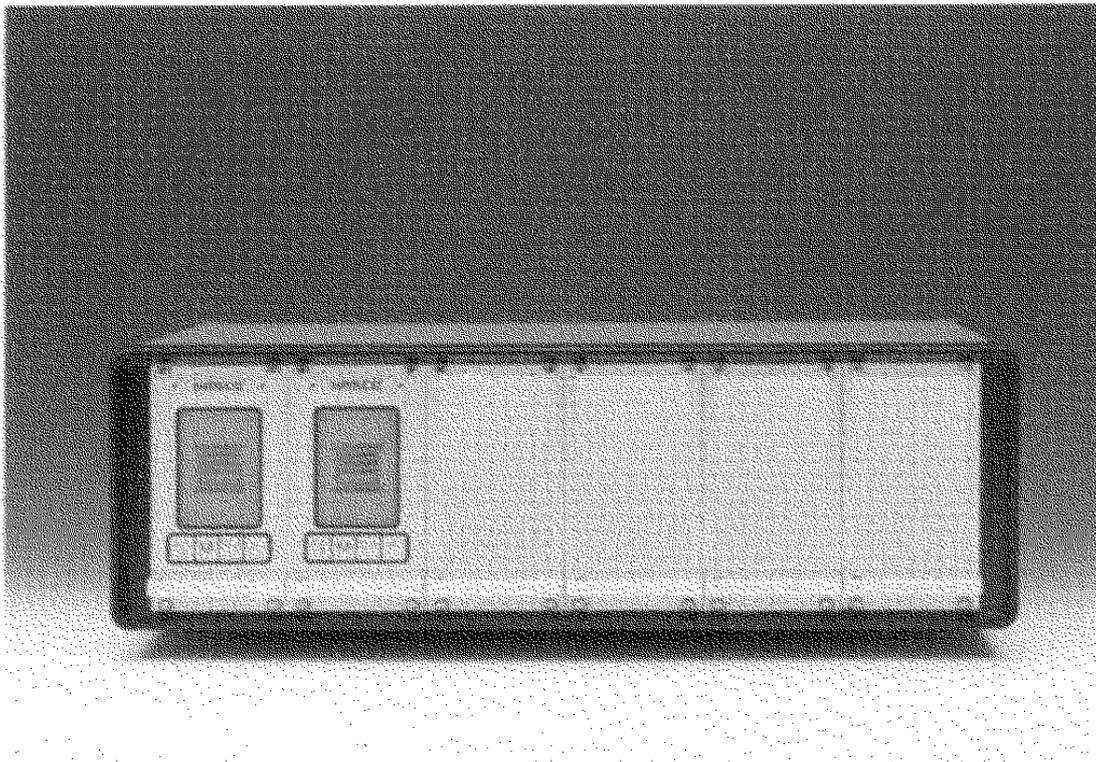


Bild 5.11 Heißkanalgerät Hasco Z124/2/N

5.6 Vernetzung der Geräte

Wird beim Spritzgießen von Vernetzung gesprochen, so denkt man normalerweise an die Vernetzung zwischen zentralem Leitreechner und den verschiedenen Spritzgießmaschinen, um Werkzeugdatensätze zentral zu speichern, zu bearbeiten und zu verwalten, sowie die Prozeßparameter und -daten der gefertigten Teile zu erfassen und die benötigten Spritzgießmassen zu verwalten und zu steuern [Mic4].

Am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik wird unter dem Begriff Vernetzung etwas anderes verstanden. Dabei soll Vernetzung heißen, daß die Spritzgießmaschine, die Temperiergeräte, das Heißkanalgerät und ein zentraler PC miteinander verbunden sind (Bild 5.12), um aus dem normalerweise zeitgesteuerten Spritzgießzyklus einen vollautomatischen temperaturgesteuerten Variotherm-Spritzgießzyklus zu machen. Gleiches gilt natürlich auch für den Heißprägezyklus, mit dem Unterschied, daß das Heißkanalgerät nicht angesteuert werden muß.

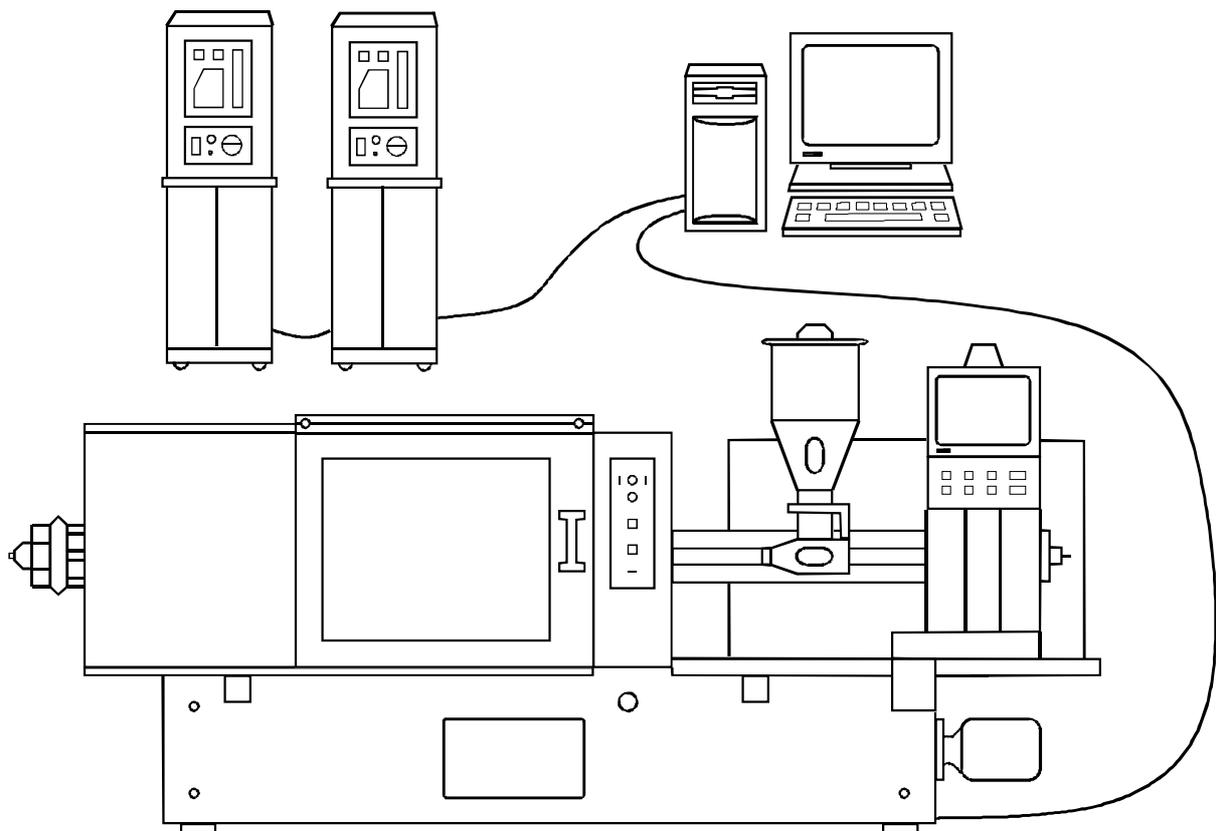


Bild 5.12 Vernetzung der Geräte, temperaturgesteuerter Zyklus [Ges1]

Die verwendeten Geräte sind dementsprechend ausgerüstet worden. Die beiden Temperiergeräte sind mit einer seriellen Schnittstelle nach RS 232 C ausgestattet und direkt mit einer seriellen Schnittstelle des verwendeten PC's verbunden. Die Geräte sind dabei in Reihe geschaltet (über RS 422) und werden über ihre Geräteadresse angesteuert (1 bzw. 2). Jedes Temperiergerät ist dabei mit einem Werkzeugtemperaturfühler verbunden. Das Heißkanalgerät verwendet die in der Industrie übliche serielle Schnittstelle nach RS 485 und ist über einen

Schnittstellenwandler mit der RS 232 C-Schnittstelle des PC's verbunden [Ges2]. Diese Geräte können dabei über die Schnittstellen Befehle empfangen (z.B. Sollwerte) und Daten ausgeben (z.B. Istwerte und Fehlermeldungen) [Gro3, Ges1].

Die Spritzgießmaschine ist mit sogenannten PEAs ausgestattet (programmierbare Ein- und Ausgänge, siehe auch Kap. 5.1), die entweder „seriell“ oder „parallel“ arbeiten, bezogen auf die Einbindung in den normalen Spritzgießzyklus. So wird ein „serieller“ Ausgang in den Zyklus mit eingebunden, d.h. der normale Zyklus stoppt, bis am Eingang ein Signal anliegt und fährt dann fort, wohingegen ein „paralleler“ Ausgang nur gestartet wird, ohne daß der Zyklus auf ein Rückmeldesignal am Eingang wartet. So läßt sich der normale zeitgesteuerte Zyklus (Kühlzeit für z.B. 20 Sekunden) temperaturgesteuert ausführen, um ein Variothermverfahren zu ermöglichen, bei dem folgende Temperaturwerte vorgegeben sind (Bild 5.13):

Parameter			
Eingabe			
T [Heizen 1]	130	T [Entformen]	60
T [Heizen 2]	125	T [Kühlen 2]	50
T [Start]	120	T [Kühlen 1]	20
T [Prägeende]	80	T [Delta]	5
Maschine		Weitere Relais setzen	
<input checked="" type="checkbox"/> Spritzguss		<input type="checkbox"/> Ja	
<input type="checkbox"/> Heissprägen		<input checked="" type="checkbox"/> Nein	
<input checked="" type="checkbox"/> OK	<input checked="" type="checkbox"/> Abbruch	<input checked="" type="checkbox"/> Hilfe	

Bild 5.13 Parameter für den Variothermprozeß, Eingabefenster [Ges1]

- **Starttemperatur:** Das Werkzeug ist auf die Temperatur aufgeheizt, bei der die Masse eingespritzt werden kann (oberhalb von T_G),
- **Prägeendtemperatur:** Das Werkzeug ist auf eine Temperatur unterhalb von T_G heruntergekühlt worden, das Prägen kann beendet werden,
- **Entformungstemperatur:** Das Werkzeug ist einige Grad unterhalb der Prägeendtemperatur, das gefertigte Teil kann jetzt problemlos entformt werden.

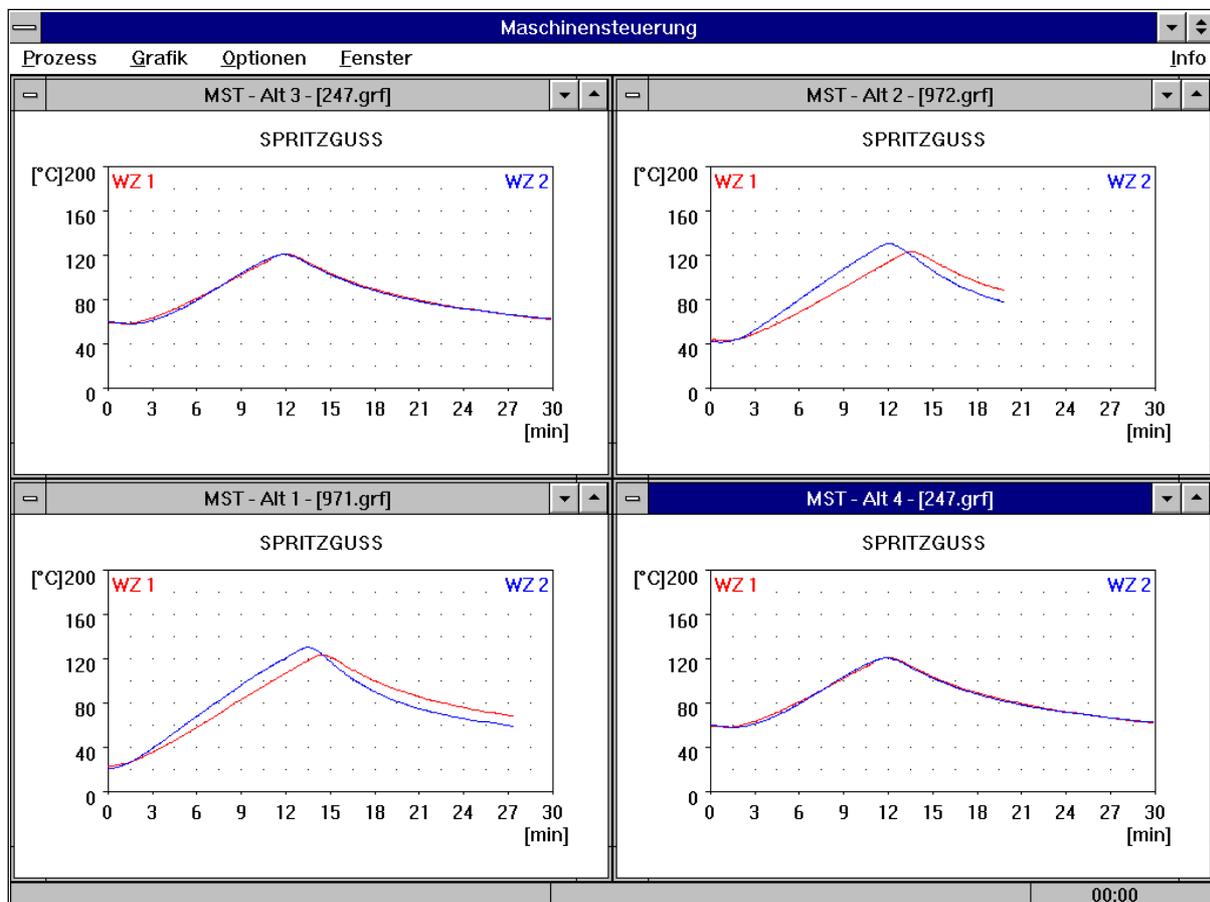
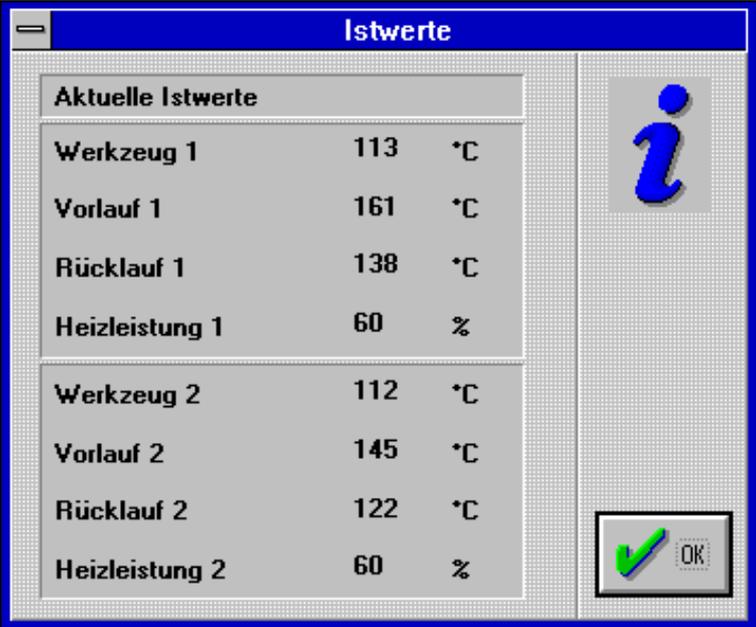


Bild 5.14 Windows-Programm zur Prozeßsteuerung, 4 Prozeßfenster [Ges1]

Die Anbindung des PC's geschieht dabei über eine einfache Relaiskarte an der parallelen Schnittstelle, mit deren Hilfe die entsprechenden Signale in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur an die Maschine geschickt werden können.

Die Steuerung des gesamten Variothermprozesses übernimmt dabei ein PC, auf dem ein Windows-Programm entwickelt worden ist [Ges1], das im wesentlichen die folgenden Aufgaben erfüllt:

- Kommunikation mit den Temperiergeräten, um die Solltemperaturen zum Heizen und Kühlen vorzugeben und die entsprechenden Istwerte der Werkzeugtemperaturfühler und der Vor- und Rücklauftemperaturen der Geräte auszulesen (siehe Bild 5.15),
- Kommunikation mit dem Heißkanalgerät, um die Temperaturen für die beiden Heißkanalzonen vorzugeben und die entsprechenden Istwerte direkt vor der Einspritzphase auszulesen, um die Nadelverschlußdüse zu schützen [Ges2],
- Kommunikation mit der Spritzgießmaschine durch Setzen der entsprechenden Relais für die drei verschiedenen Temperaturen, um im Spritzgieß- oder Heißprägezyklus fortzufahren (siehe auch Bild 5.13),
- Visualisierung von bis zu 6 Temperaturen in einem skalierbaren Bildschirmfenster (Bild 5.14), davon je 3 pro Temperiergerät (Vorlauf-, Rücklauf- und Werkzeugtemperatur),
- Speichern und Verwalten der Prozesse (eingestellte Temperaturwerte) und der Daten (Temperaturkurven der einzelnen Zyklen).



The screenshot shows a software window titled "Istwerte" with a blue header bar. The window contains a table of current values for two heating devices. To the right of the table is a large blue information icon 'i' and a green checkmark icon with the text "OK".

Aktuelle Istwerte		
Werkzeug 1	113	°C
Vorlauf 1	161	°C
Rücklauf 1	138	°C
Heizleistung 1	60	%
Werkzeug 2	112	°C
Vorlauf 2	145	°C
Rücklauf 2	122	°C
Heizleistung 2	60	%

Bild 5.15 Kommunikationsfenster mit Temperiergeräten, Istwerte-Darstellung [Ges1]

Mit diesem Programm und den aufgeführten und beschriebenen Geräten ist durch die Vernetzung ein temperaturgesteuerter Prozeß (Variothermzyklus) realisiert worden. Ferner konnten dadurch auch äußere Störgrößen, wie z.B. ein Aufheizen der Maschine und der Umgebung, eliminiert werden, um zu reproduzierbaren Ergebnissen zu gelangen.

6 Prozesse, Qualitätskriterien, Optimierungen

In diesem Kapitel soll näher auf die einzelnen Prozesse im Hinblick auf die ebenfalls beschriebenen Qualitätskriterien, die für integriert optische Komponenten auf polymerer Basis angesetzt werden, eingegangen werden. Dabei wird zuerst das Spritzgießen und dann das Heißprägen erläutert. Anschließend erfolgt jeweils eine Darstellung der durchgeführten und noch durchzuführenden Optimierungen.

6.1 Qualitätskriterien beim Spritzgießprozeß

Beim Spritzgießen gibt es die folgenden, in Kapitel 2.3 schon erläuterten Verfahren:

- Standard-Spritzgießen,
- Standard-Spritzprägen,
- modifiziertes Mikrospritzprägen.

Die mit den drei Verfahren hergestellten Strukturen werden in Kapitel 7.1 dargestellt. An dieser Stelle soll nur auf die Unterschiede eingegangen werden, die aus den verschiedenen Prozessen resultieren.

6.1.1 Abformgenauigkeit

Ein wichtiger Qualitätsfaktor ist die Abformgenauigkeit, mit der die Mikrostrukturen auf dem Nickelblech in den Kunststoff übertragen werden. Wesentlich ist die Entformung, bei der sauber abgeformte Strukturen auch sauber entformt werden müssen (siehe Bild 6.1).

Dabei muß verhindert werden, daß schräg zur Struktur entformt wird, da sonst die Strukturen ausreißen können (siehe Bild 6.2). Zur einfacheren Entformung werden die Strukturen mit einer kleinen Entformungsschräge versehen, d.h. die Strukturflanken sind nicht rechtwinklig zum Strukturboden (Bild 6.3 (a)), sondern besitzen einen etwas kleineren Winkel als 90° . Für die Wellenleitergräben ergibt sich so anstelle des quadratischen Querschnitts eine leichte Trapezform mit Flanken $\geq 85^\circ$ (Bild 6.3 (b)). Für die spätere Funktion als Wellenleiter hat dies nur einen unwesentlichen Einfluß. Die V-Gruben können prinzipbedingt aufgrund der schrägen Seiten sehr gut entformt werden.

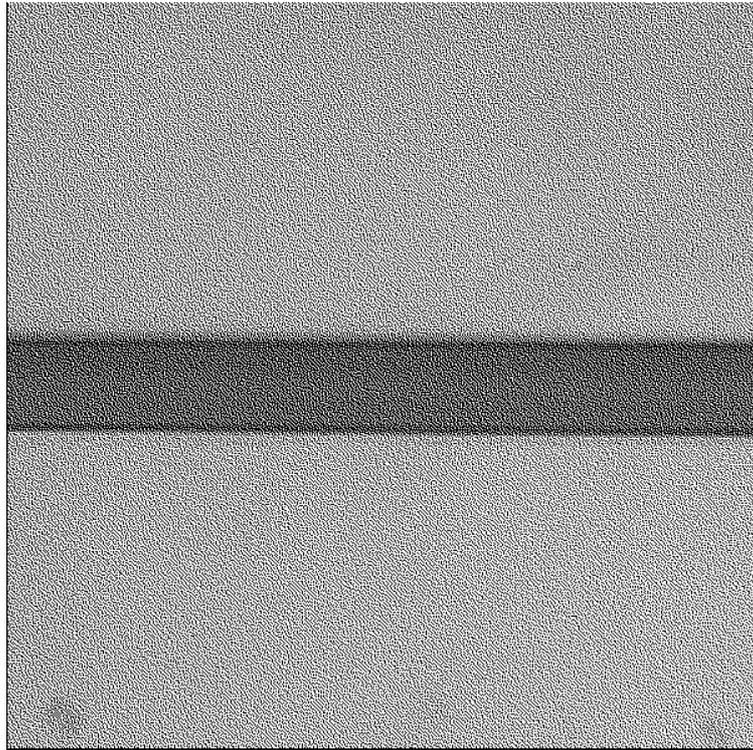


Bild 6.1 Gut abgeformter Wellenleitergraben

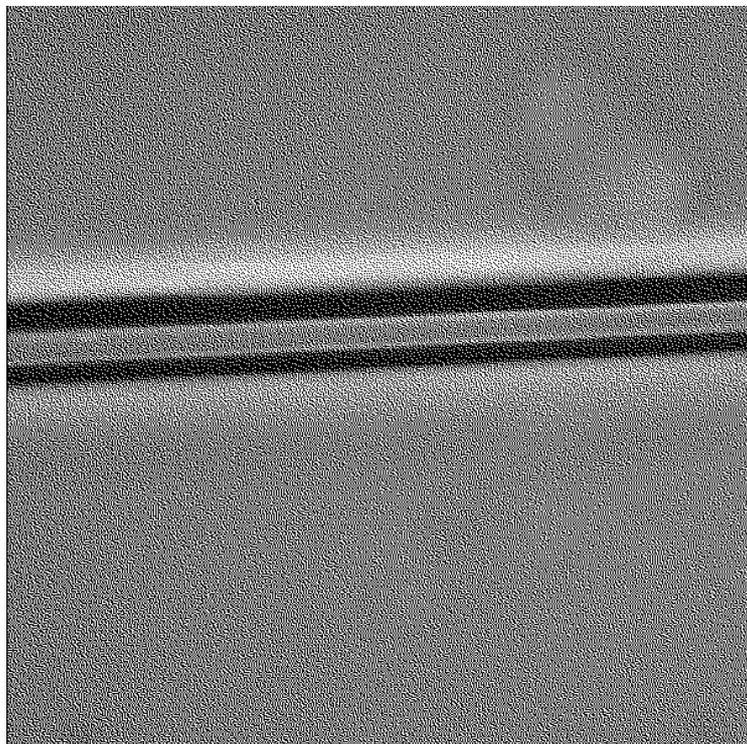


Bild 6.2 Schlecht abgeformter Wellenleitergraben, Abscherungen beim Entformen

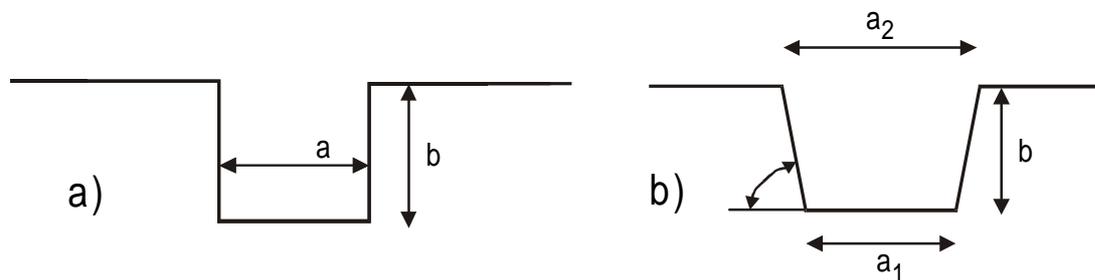


Bild 6.3 Idealer Wellenleitergraben (a), realer Wellenleitergraben (b)

Ein weiterer Aspekt für die Abformgenauigkeit ist die Rauigkeit der abgeformten Strukturen. Diese sollte für integriert optische Strukturen maximal bei 100 nm liegen, anzustreben sind 20 nm [Kar]. Die Rauigkeiten nehmen bei jedem Prozeßschritt des SIGA-Verfahrens (Kap. 4) zu, allerdings in sehr geringem Maße [Gal].

Der Hauptunterschied bei der Herstellung von Wellenleitergräben mit den oben genannten Verfahren liegt in der Abformgenauigkeit. So können nur mit dem modifizierten Mikrospritzprägen die Wellenleitergräben sauber abgeformt werden, da bei den beiden anderen Verfahren die heiße Polymermasse beim Einspritzen an der kalten Werkzeugwand erstarrt, bevor die kleinen Strukturen sauber ausgefüllt sind (siehe Kap. 7.1).

6.1.2 Substratdurchbiegung

Ein weiterer Qualitätsfaktor beim Spritzgießen und Spritzprägen ist die resultierende Substratdurchbiegung. Hierbei muß beachtet werden, daß die Substrate noch weiter-processed werden, indem das Wellenleitermaterial (Kernmonomer, Kap. 3.3) aufgeträufelt und anschließend mit einem planen Deckel weggedrückt wird. Dieses sorgt dafür, daß nur die Wellenleitergräben gefüllt sind und sich eine möglichst geringe Zwischenschicht von maximal etwa 0,5 µm Dicke ergibt (siehe Bild 4.6). Wenn die Substrate eine zu große Durchbiegung besitzen, beispielsweise zur Mitte hin einfallen (konkav), so würde sich beim Verkleben in der Mitte der Substrate eine zu große Zwischenschicht mit den in Kapitel 4.5 geschilderten Effekten ergeben. Diese Substratdurchbiegung muß beim Spritzgießprozeß minimiert werden. Dieses ist nur mit dem modifizierten Mikrospritzprägen möglich, da bei beiden anderen Verfahren die Durchbiegung der abgeformten Komponenten zu groß ist (siehe Kap. 7.1).

6.2 Optimierungen beim Spritzgießen

Durch Wahl der richtigen Temperaturen für Zyklusstart, Prägeende und Entformung, in Zusammenspiel mit den Einspritzparametern [Bic] und dem Prägedruck, können die Abformgenauigkeit, die Entformung und die Durchbiegung optimiert werden (Kap. 7.1).

Beim Spritzgießwerkzeug hat sich nach einiger Zeit herausgestellt, daß wahrscheinlich durch Abnutzung im Angußsystem die Kavitäten nicht mehr gleichzeitig gefüllt werden, d.h. das Angußsystem nicht mehr ausbalanciert ist. Dabei tritt der Effekt auf, daß beim Einspritzen etwas Polymermasse durch den schmalen Filmanguß in die erste Kavität gedrückt wird, dann erst Masse in eine andere Kavität gelangt, und anschließend die erste Kavität weiter gefüllt wird. Daraus ergeben sich in einzelnen Kavitäten sogenannte Fließfronten, die in Bild 6.4 deutlich zu sehen sind.

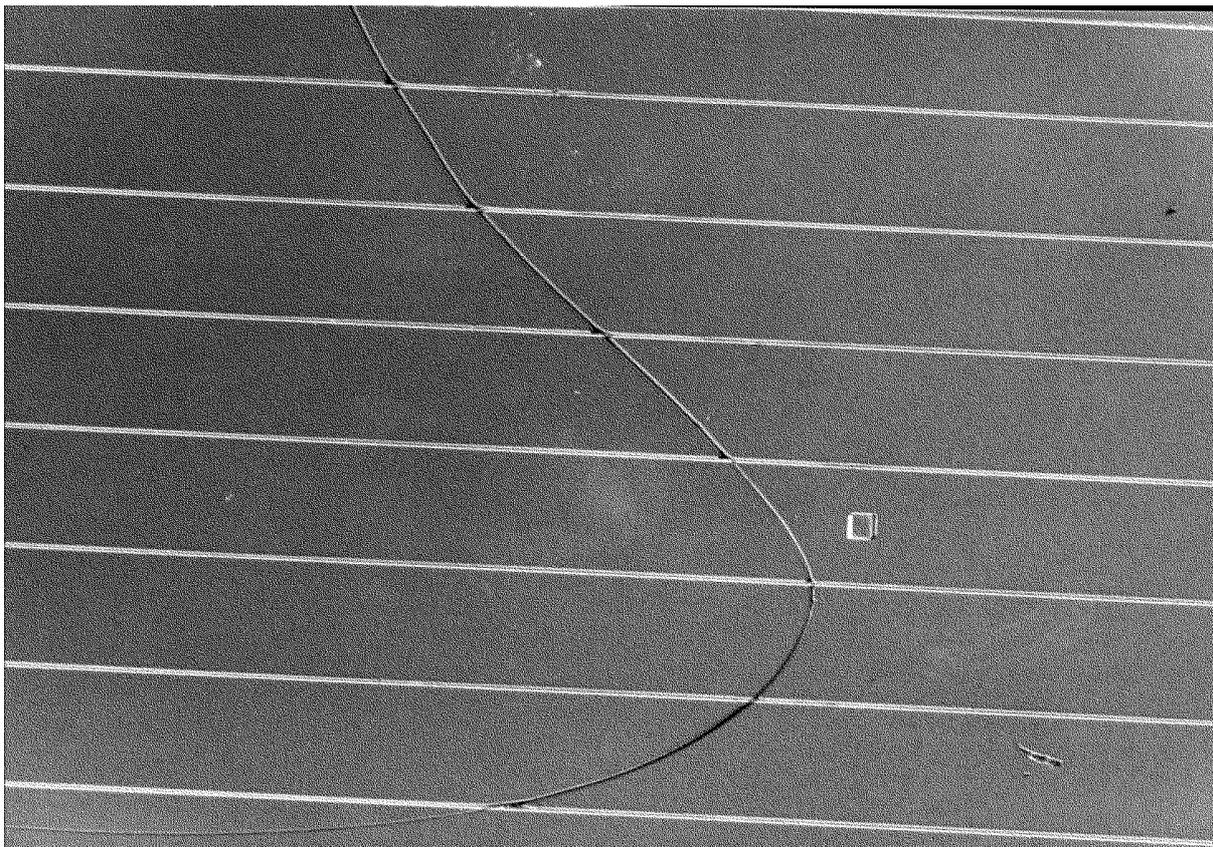


Bild 6.4 Fließfronten in einer Kavität durch fehlerhaftes Füllverhalten

Durch eine bestimmte Wahl der Einspritzparameter:

- langsames Einspritzen, fast ein Einfließen der Masse in die Kavitäten,
- etwas höhere Starttemperaturen,
- höhere Massetemperaturen,

kann dieser Effekt minimiert werden, so daß sich diese Fließfronten nicht mehr im Strukturbereich der Wellenleiter, sondern nur noch ganz am Rand der Substrate, direkt neben dem Filmanguß bemerkbar machen. Gleichzeitig ist der Filmanguß mechanisch durch Schleifen nachbearbeitet worden, um eine glattere Oberfläche zu erhalten.

Zusätzlich wurden am Spritzgießwerkzeug zwei Filmangüsse geändert. So erhielt der Filmanguß der Kavität A (ganz rechts in Bild 6.5) leichte Radien von 0,2 mm. Der Filmanguß der Kavität B (der zweite von rechts in Bild 6.5) wurde auf die gesamte Länge der Kavität erweitert. Kavität C (zweite von links) und Kavität D (mit „Schwalbenschwanz“, ganz links in Bild 6.5) wurden nicht geändert.

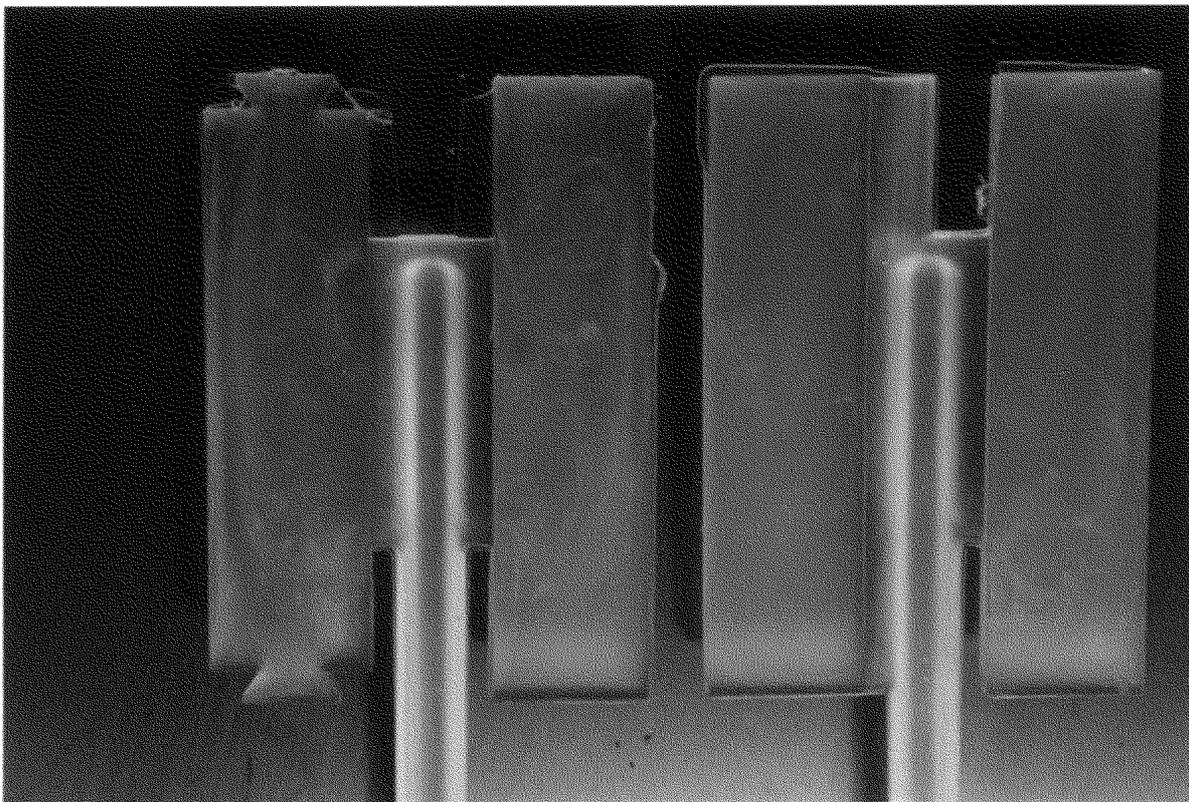


Bild 6.5 Geänderter Filmanguß der Kavitäten A und B (A ganz rechts)

In Bild 6.5 sieht man deutlich das bessere Füllverhalten der Kavität B. Sichtbar gemacht wurden die Unterschiede durch einen Materialwechsel von PMMI auf Lacton-MMA-Copolymer (siehe Kap. 3.1). Die Schlieren in den Kavitäten C und D deuten auf ein ungleichmäßiges Füllverhalten hin. Die leichten Radien am Filmanguß der Kavität A haben das Füllverhalten verbessert, sind aber noch nicht optimal. Ein Problem der Änderung an Kavität B ist die nun schlechtere Trennbarkeit des Substrates vom Anguß. Problematisch bleibt der Filmanguß an den Längsseiten der Kavitäten. Ein Delta-Anguß [Arb] an den Stirnseiten der Kavitäten nach Bild 6.6 wäre sicherlich optimal, ist allerdings aufwendig in das bestehende Werkzeug zu integrieren. Ursprünglich wäre diese Form nicht realisierbar gewesen, da eine einfache Steckverbindung zwischen einem Stecker mit Glasfaserbändchen und Substrat vorgesehen war. Daher weist die Kavität D auch noch den Schwalbenschwanz auf (siehe auch Bild 5.4 und 6.5 links).

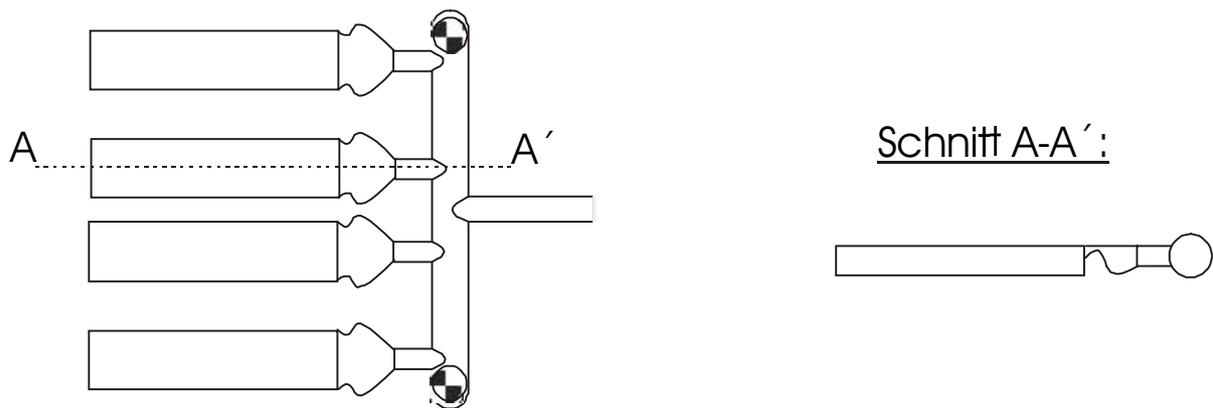


Bild 6.6 Besser geeigneter Delta-Filmanguß an den Stirnseiten der Kavitäten

6.3 Qualitätskriterien beim Heißprägeprozeß

Die Qualitätskriterien beim Heißprägen sind dieselben wie beim Spritzgießen:

- Abformgenauigkeit/Abformtreue,
- Substratdurchbiegung.

Durch die Substratgröße von bis zu 25 cm sind die Anforderungen, die an den Prozeß zu stellen sind, wesentlich höher [Git, Egg], da die Strukturgrößen wie bei den kleineren Substraten sind. So werden bei der Backplane 6*6 μm^2 große Wellenleitergräben mit einer Länge von bis zu 20 cm abgeformt. Beim Heißprägen von Wellenleitergräben für thermooptische Schalter (TOS) kann eine metallische Wärmesenke mit eingelegt werden, auf die eine dünne Polymerfolie auflaminiert und gleichzeitig strukturiert wird. [Pom3]. Dabei treten natürlich Probleme auf, da Metalle und die verwendeten Kunststoffe unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten haben. Dadurch kommt es nach dem Abkühlen von Entform- auf Raumtemperatur zu nicht erwünschten Spannungen im Material (siehe Kap. 7.2.3).

6.4 Optimierungen beim Heißprägen

Ähnlich den Optimierungen beim Spritzgießen steht natürlich die Wahl der drei Temperaturen (Start-, Prägeende- und Entformungstemperatur) an erster Stelle. Der Prägedruck muß dabei den Temperaturen angepaßt sein. Diese Parametersätze sind sowohl vom verwendeten Material (Kap. 3.2) als auch in gewissen Grenzen von der zu prägenden Struktur abhängig (siehe auch Kapitel 7.3).

Nach Problemen mit dem neu konstruierten Heißprägewerkzeug wurde die Kopplung der Prägemechanik entscheidend verändert, so daß der Auswerfer der Maschine beim Zurücksetzen den Prägestempel jetzt nicht mehr über den Umweg über den Prägezylinder sondern direkt zentral mitzieht. Dadurch konnte vermieden werden, daß der Stempel an den Wänden der Kavität verkantet.

6.5 Verschiedene Temperierungsarten

Die beim Heißprägewerkzeug möglichen Temperierungsvarianten (nach Kap. 5.4) sind alle getestet worden und führen zu den nachfolgend genannten Ergebnissen.

Die Variante 4 („Bypass“) mit einem Temperiergerät auf hoher und dem anderen Gerät auf niedriger Temperatur funktioniert im Prinzip, hat allerdings gegenüber den anderen Varianten

zwei entscheidende Nachteile. Erstens ist die Vorlauftemperatur aufgrund der Dichtungen der Dreiwegeventile auf 180 Grad begrenzt, was die möglichen Heißprägematerialien stark einschränkt. Zweitens wird eine große Menge Wärmeträgeröl zwischen den beiden Geräten hin- und hergepumpt, was zu Problemen beim Ölstand führt, und es häufiger vorkommt, daß ein Gerät abschaltet, weil zu wenig Öl im System ist.

Die Variante 3 (Kühlen mit Wasser) führt zwar zu den kürzesten Zykluszeiten, bringt aber die schlechtesten Ergebnisse, da Spannungen im Material eingefroren werden, die beim langsameren Abkühlen („Tempern“) nicht auftreten. Diese Temperierungsvariante ist für optische Komponenten nicht anwendbar.

Die Variante 2 („paralleler Betrieb“) hat einen höheren Aufwand beim „Verdrahten“ mittels Schläuchen, da zwei zusätzliche Verbindungen zwischen den Werkzeughälften benötigt werden.

Die Variante 1 („je Gerät eine Werkzeughälfte“) liefert bei geringerem Aufwand die gleichen Zykluszeiten und Ergebnisse und ist deshalb verwendet worden.

6.6 Mikrostrukturierte Nickelbleche

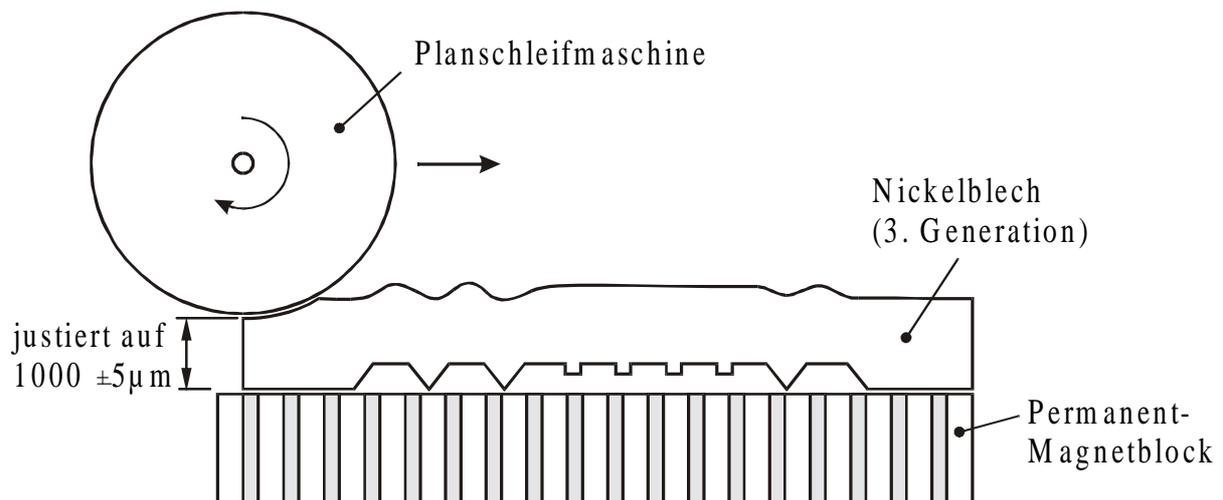


Bild 6.7 Rückseiten-Planschleifen der mikrostrukturierten Nickelbleche

Einen wesentlichen Anteil an der Qualität der abgeformten Mikrostrukturen haben die verwendeten Nickelbleche. So ist es unerlässlich, die zum Abformen verwendeten Nickelbleche

(meist 3. Generation, siehe Kap. 4.3) auf der Rückseite zu bearbeiten. Sonst würden sich die Rückseitenunebenheiten, die durch Ungleichmäßigkeiten in der Galvanik und durch eine starke Oberflächentopologie der Vorderseite hervorgerufen werden, beim Abformen durch den hohen Druck auf die Vorderseite, und damit auf das Polymersubstrat übertragen. Die Rückseiten der verwendeten Bleche werden daher auf einer Planschleifmaschine geschliffen (Bild 6.7). Dies ist erst durch die Verwendung von Strukturen auf Plateaus möglich, da diese dann beim Rückseitenschleifen der Nickelbleche (dritte Generation, Negativform) in einer Wanne geschützt sind.

Galvanische Nickelbleche eignen sich hervorragend zur Abformung von Mikrostrukturen in Polymeren, da sie:

- eine sehr gute Qualität beim Kopieren der Strukturen vom Original (meist Silizium) aufweisen [MülH],
- eine sehr geringe Rauigkeit besitzen [Gal],
- einige hunderttausend Abformzyklen mit hoher Qualität ermöglichen [Lor],
- bis ca. 400 °C einsetzbar sind, da die Härte der Bleche bis dahin nur geringfügig, und bis 200 °C gar nicht abnimmt [BacW1].

Die Bleche können dabei von der Rückseite geschliffen (Bild 6.7), gefräst [ArnJ], oder poliert werden [EldH].

7 Abgeformte Mikrostrukturen

Im Rahmen dieser Arbeit sind verschiedene Strukturen für die Integrierte Optik abgeformt worden. Im folgenden werden die wesentlichen vorgestellt, wobei auf die Besonderheiten bei den einzelnen Strukturen eingegangen wird. Dabei wird wieder zwischen den beiden verwendeten Verfahren Spritzgießen und Heißprägen unterschieden. Zum Abschluß dieses Kapitels folgen einige nicht-optische Komponenten, mit denen aber recht gut das Potential und die Grenzen des gesamten SIGA-Verfahrens aufgezeigt werden können.

7.1 Spritzgießkomponenten für die Integrierte Optik

Durch Spritzgießen sind im wesentlichen passive integriert-optische Komponenten für die optische Informationstechnik hergestellt worden, wobei sie passiv durch Einlegen von Glasfasern in mitproduzierte V-Gruben koppelbar sind [Kno2] (siehe Bild 7.1):

- einfache gerade Lichtwellenleiter (Wellenleitergräben),
- einfache Leistungsteiler (Y's) mit 2, 4 oder 8 Ausgängen bei einem Eingang [Kal3],
- 2 x 2 Koppler mit je 2 Ein- und Ausgängen und einem der Wellenlänge angepaßten parallelen Abschnitt geringen Koppelabstandes [Kim],
- adiabatische Koppler mit 2 Eingängen und 2 oder 8 Ausgängen [Kal2].

Diese Komponenten sollen im folgenden näher dargestellt werden.

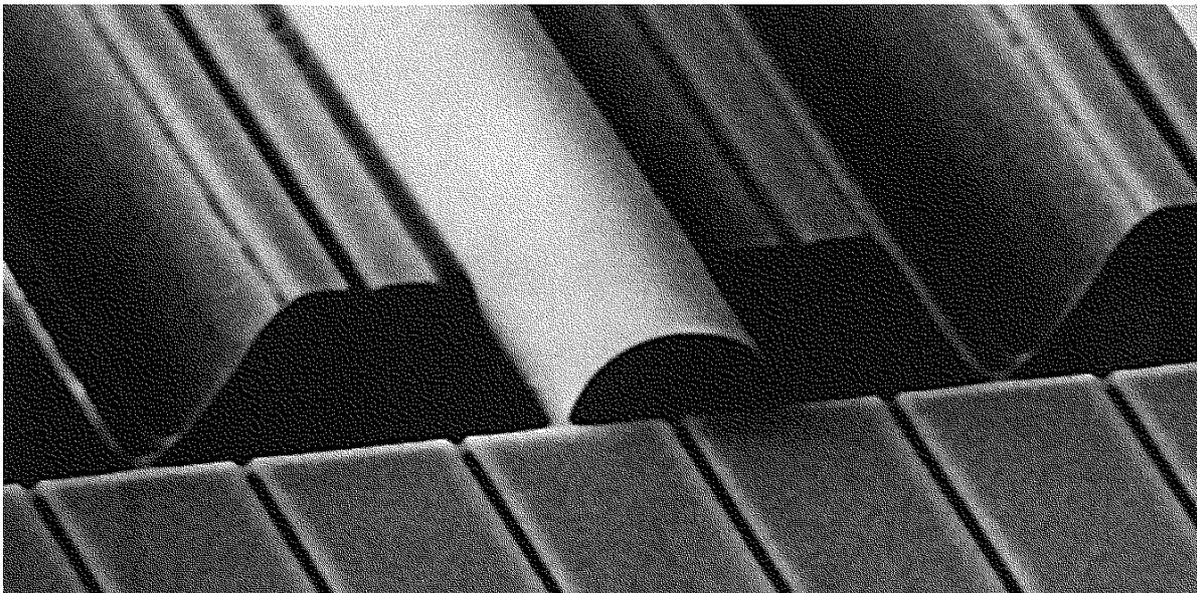


Bild 7.1 In V-Grube eingelegte Glasfaser, Wellenleitergraben, in PMMA spritzgeprägt

7.1.1 Grundelemente der integriert-optischen Strukturen

Im wesentlichen bestehen alle spritzgegossenen Komponenten für die optische Informationstechnik aus den 3 wesentlichen Elementen (siehe Bild 7.2):

- Wellenleiter zur funktionellen Lichtleitung (gerader Wellenleiter, Verteiler, Koppler...),
- V-Grube zur passiven Glasfaserankopplung,
- Sägeschnitt zur Entkopplung zwischen V-Grube und Wellenleitergraben, um die Glasfaser direkt vor den Wellenleitergraben positionieren zu können, wobei die störende Flanke der V-Grube entfernt wird.

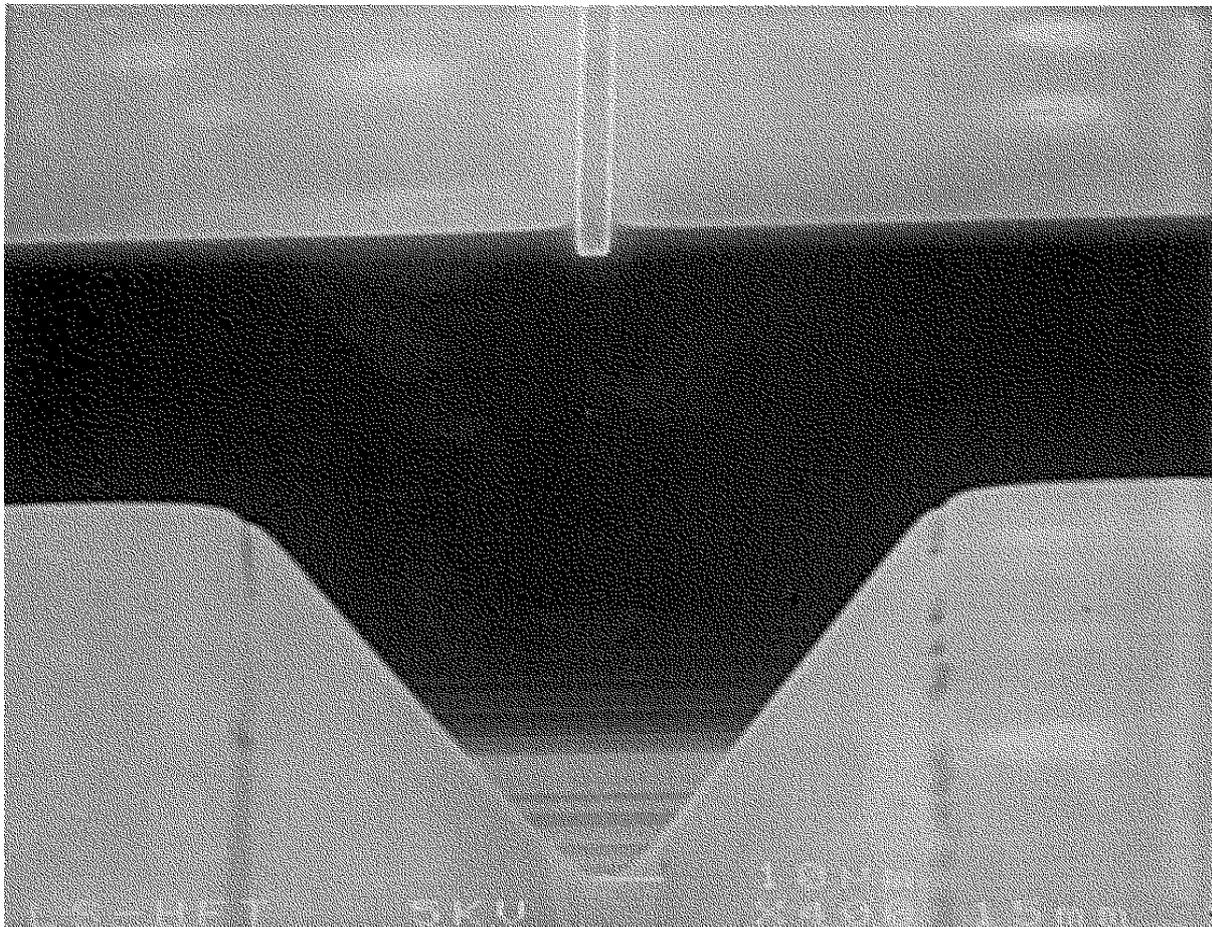


Bild 7.2 Die drei wesentlichen Elemente Wellenleitergraben, V-Grube und Sägeschnitt, in PMMA spritzgeprägt

An dieser Stelle soll auf die Abformqualität der drei durchgeführten Spritzgießverfahren (siehe Kap. 2.3 sowie 6.1) eingegangen werden. Nur das modifizierte Mikrospritzprägen ist als Verfahren, Mikrostrukturen sauber zu replizieren, geeignet, wie anhand eines

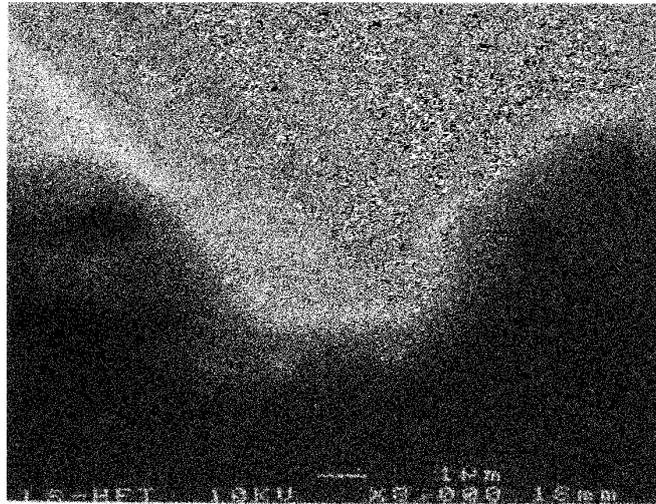


Bild 7.3 PMMA-Wellenleitergraben im Querschnitt, hergestellt mittels Spritzgießen

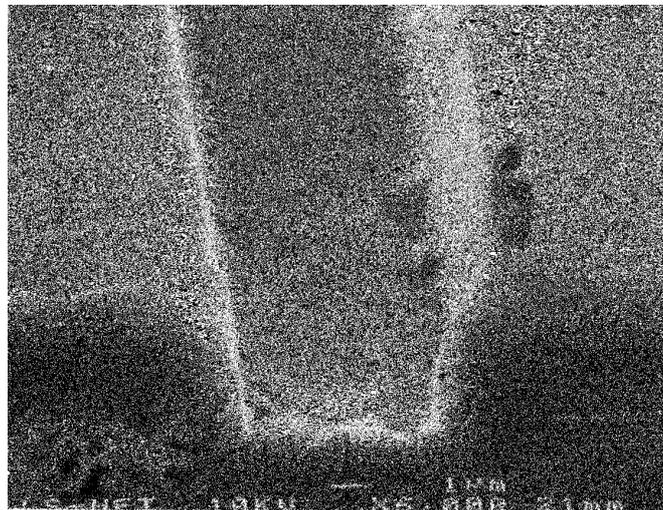


Bild 7.4 PMMA-Wellenleitergraben im Querschnitt, hergestellt mittels Spritzprägen



Bild 7.5 PMMA-Wellenleitergraben im Querschnitt, hergestellt mittels modifiziertem Mikrospritzgießen

Wellenleitergrabens im Querschnitt (Bilder 7.3, 7.4 und 7.5) zu sehen ist. Bei den anderen beiden Verfahren friert das eingespritzte heiße Polymer an den kalten Werkzeug-/Formeinsatzwnden fest, ohne vorher die Mikrostrukturen komplett ausfllen zu können. Dies ist an den Verrundungen der Wellenleiterflanken zu erkennen.

Die Besonderheit bei den Verteilern sind die Aufweitungsbereiche (Taperbereich), in denen die Wellenleiter eine doppelte Breite erreichen, bevor sie sich trennen und wieder die ursprüngliche Breite haben. Die dabei entstehende sehr feine Spitze (im Design einige Nanometer breit) kann prozeßtechnisch in der Lithographie nicht unendlich fein ausfallen und bildet dementsprechend in der Technologie eine dreidimensionale Spitze, kombiniert mit einer Rampe. Das heißt, die Spitze hat ganz vorne die Höhe Null und steigt dann auf die Höhe der Wellenleitergräben an. Solch eine Spitze, die bei jedem 1x2 Verteiler bzw. bei den größeren Verteilern in jeder Stufe vorkommt, ist in Bild 7.6 zu sehen. Deutlich ist zu erkennen, daß selbst so feine Strukturen präzise mittels des entwickelten Spritzprgeverfahrens abformbar sind.

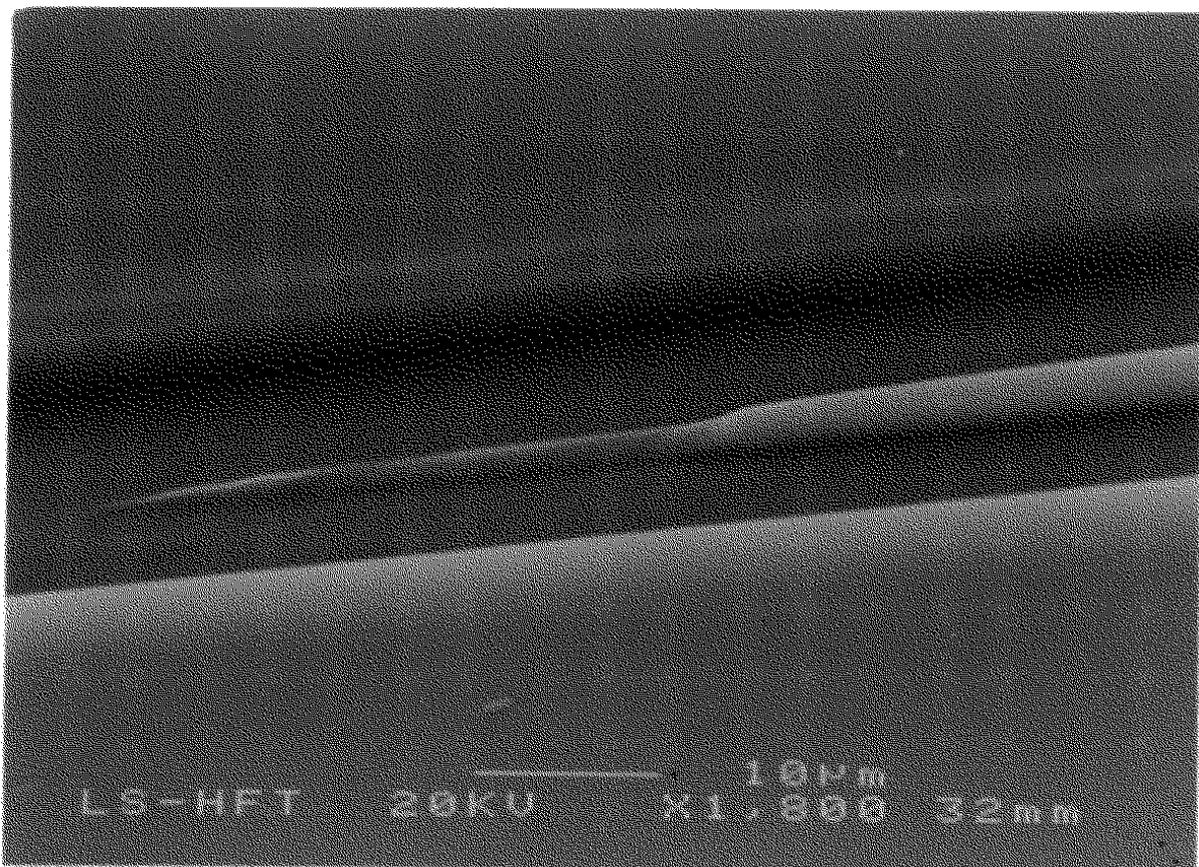


Bild 7.6 In PMMA abgeformte Y-Verteiler-Spitze, ansteigende Flanke

7.1.2 Oberflächenplanität

Ein im Rahmen der SIGA-Technik wichtiges Qualitätskriterium ist die Substratdurchbiegung (siehe Kap. 6.1.2). An dieser Stelle sollen die Oberflächen von Substraten verglichen werden, die mittels der drei verschiedenen Spritzgießprozesse (siehe Kap. 7.1.1, [Mün]) hergestellt worden sind. In Bild 7.7 und 7.8 sind die Durchbiegungen in Längs- und in Querrichtung von jeweils neun Proben aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, daß es nur mit dem modifizierten Mikrospritzprägen möglich ist, Substrate herzustellen, die sowohl in Längs- als auch in Querrichtung eine geringe Durchbiegung aufweisen und dabei sowohl zwischen den einzelnen Proben, als auch an den verschiedenen Meßstellen auf einer Probe, gut reproduzierbar sind,

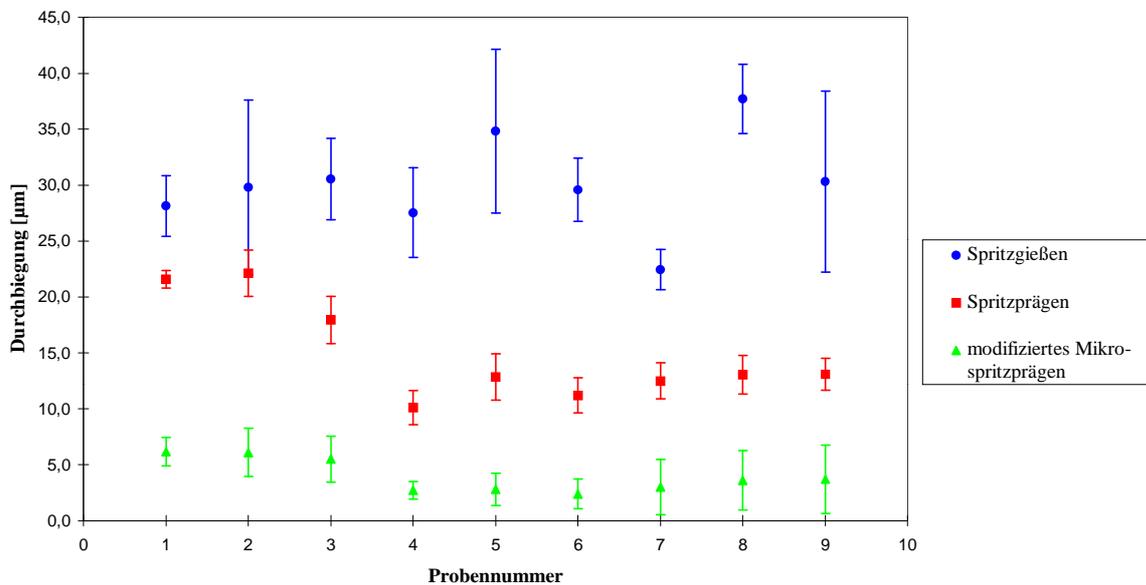


Bild 7.7 Längsdurchbiegungen von Proben, mittels drei verschiedener Spritzgieß-/präge-Verfahren hergestellt (Min-, Max-, Mittelwert; 3 Meßstellen je Probe)

In der Tabelle 7.1 sind noch einmal die Durchbiegungen von verschiedenen Proben aufgelistet, die mittels des modifizierten Mikrospritzprägens hergestellt worden sind. Dazu sind jeweils an den gleichen Stellen drei Längs- und drei Quermessungen auf der Probenoberseite vorgenommen worden, indem die Proben zur Messung mit dem optischen Oberflächenprofilometer in einen metallischen Halterahmen eingelegt worden sind.

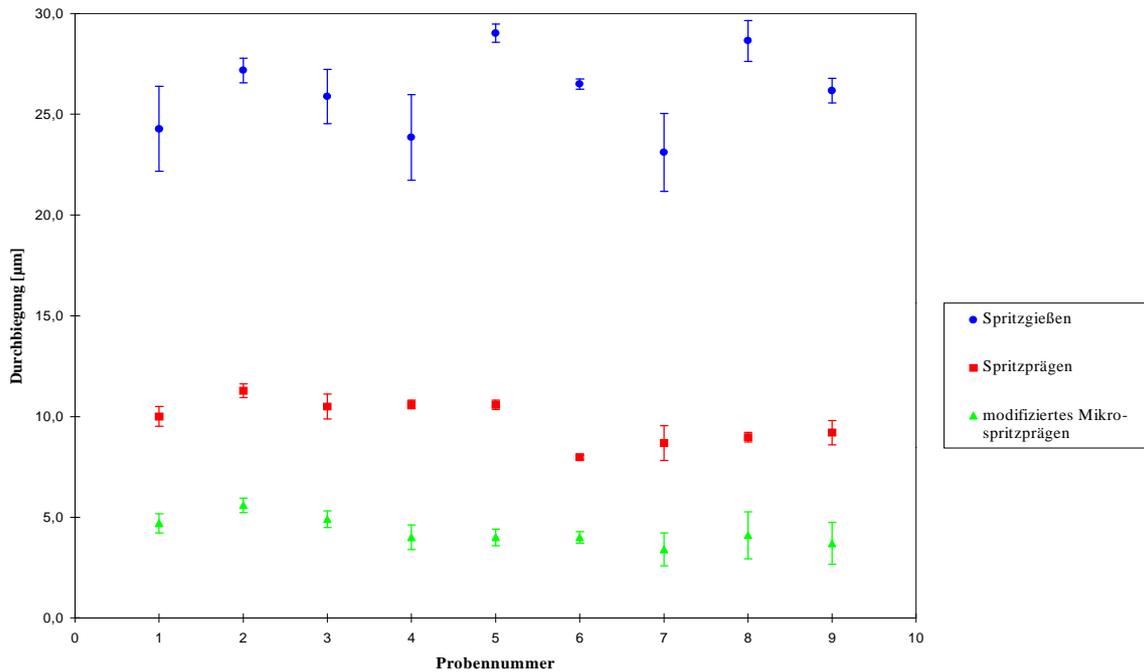


Bild 7.8 Querdurchbiegungen von Proben, mittels drei verschiedener Spritzgieß-/präge-Verfahren hergestellt (Min-, Max-, Mittelwert; 3 Meßstellen je Probe)

Tabelle 7.1 Längs- und Querdurchbiegungen (3 bzw. 1 cm, in µm) an Proben, mittels modifiziertem Mikrospritzprägen hergestellt, rückseitenbearbeitetes Blech

Teil-Nr.	längs 1	längs 2	längs 3	quer 1	quer 2	quer 3
1	3,4	3,9	3,7	3,1	4,6	4,2
2	0,8	3,5	3,9	3,8	4,7	3,8
3	2,0	1,2	1,4	3,4	4,1	3,5
4	3,3	2,0	1,0	3,8	4,4	3,8
5	3,5	1,5	1,0	3,5	4,2	3,9
6	2,8	4,8	3,1	3,4	4,4	4,2
7	1,6	2,0	6,3	3,2	4,3	3,7
8	0,6	3,8	3,9	4,0	4,2	3,6
9	10,9	11,6	11,9	1,0	0,2	0,3
10	0,7	1,9	1,1	3,6	3,2	3,4
11	1,8	5,0	5,4	3,5	4,0	4,2
12	4,3	1,5	0,8	3,9	4,8	4,0
13	3,0	1,7	1,0	3,2	4,3	3,7
14	3,6	5,7	7,0	4,7	5,4	5,1
	Mittelwert längs		3,4	Mittelwert quer		3,7
	Standardabw.		2,7	Standardabw.		1,1
	Maximalwert		11,9	Maximalwert		5,4
	Minimalwert		0,6	Minimalwert		0,2

Die in Kapitel 6.6 schon erwähnten Auswirkungen der Qualität eines Nickelbleches auf die Qualität einer abgeformten Probe sollen im folgenden kurz dargestellt werden. Dazu ist ein Nickelblech, auf dem sich direkt in 6 µm dickem Fotolack strukturierte Wellenleitergräben befinden, verwendet worden. Dieses Blech konnte aufgrund der fehlenden Plateaus (nicht mit KOH geätzt, siehe Kapitel 4.2) nicht rückseitenplanarisiert werden, da sonst die Wellenleitergräben beim Lösen des Bleches vom Magneten zerstört worden wären. Die Abformversuche mit diesem Blech sind mit 5 Materialien durchgeführt worden. Die im Variothermprozeß verwendeten Temperaturschaltpunkte sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

Tabelle 7.2 Temperaturschaltpunkte der Materialien (Kap. 3.1) im Spritzprägeprozeß

Material	Starttemperatur	Prägeendetemperatur	Entformungstemperatur
VQ 101 S	120°C	80°C	78°C
MMA/Lacton	160°C	120°C	118°C
Plex 8805 F	170°C	115°C	114°C
Plex 8817 F	190°C	150°C	149°C
OF 104 S	120°C	85°C	84°C

In Tabelle 7.3 sind die Längs- und Querdurchbiegungen der mit dem unbehandelten Nickelblech hergestellten Proben aufgelistet. Im Vergleich mit der Tabelle 7.1 (rückseitenbehandeltes Nickelblech) ist deutlich die schlechtere Oberflächenplanität zu erkennen, die auf das Nickelblech zurückzuführen ist. Die Dicke des Bleches wird in der Galvanik nicht ganz homogen, was zu der schlechteren Oberflächenhomogenität der spritzgeprägten Komponenten führt.

Tabelle 7.3 Längs- und Querdurchbiegungen von Proben, mit nicht rückseiten-bearbeitetem Blech hergestellt

Material	Durchbiegung längs (3cm)		Durchbiegung quer (1cm)	
	Mittelwert / [µm]	Stdabw. / [µm]	Mittelwert / [µm]	Stdabw. / [µm]
VQ 101 S	32,0	2,8	4,5	1,6
MMA/Lacton	19,6	1,3	2,6	0,3
OF 104 S	17,6	6,7	3,1	0,8
Plex 8805 F	22,4	1,8	2,2	0,1
Plex 8817 F	20,4	1,3	2,2	0,4

7.2 Heißprägekomponenten für die Integrierte Optik

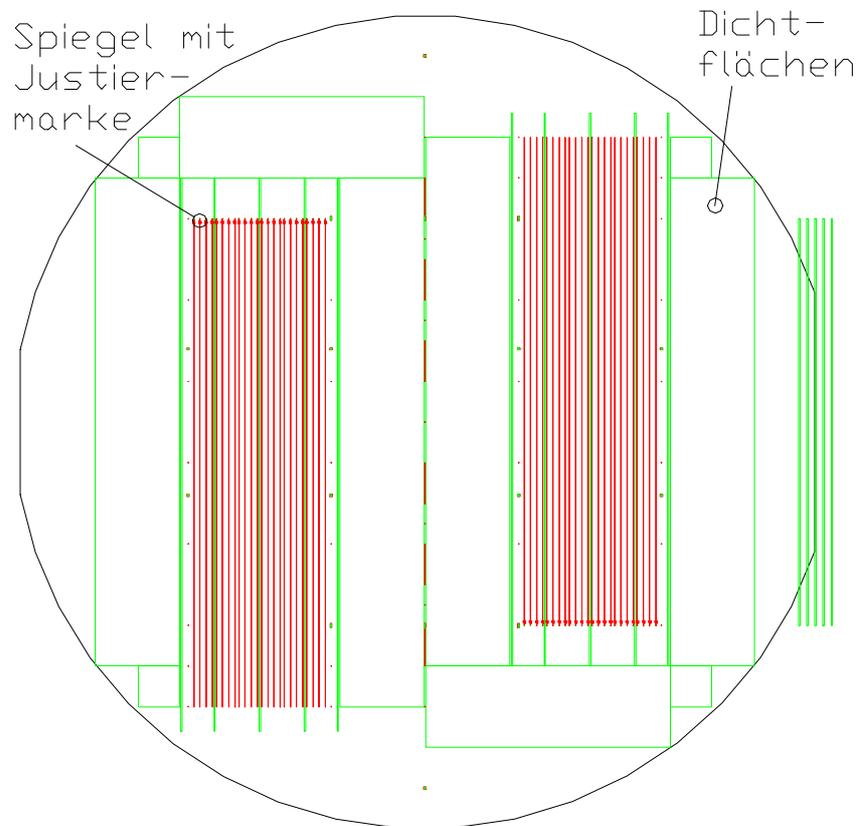
Mittels Heißprägen können beispielsweise Komponenten für die Integrierte Optik hergestellt werden, bei denen die Geometrie eine Herstellung durch Spritzgießverfahren sehr erschwert bzw. unmöglich macht. Dazu zählen im wesentlichen lange Strukturen mit dünnen Kanälen, wie z.B. eine optische Rückwand (Backplane, Kapitel 7.2.1) oder aber thermooptische Schalter mit Wärmesenke (Kapitel 7.2.3), bei denen nur eine dünne Polymerschicht strukturiert werden soll. Diese Strukturen sollen im folgenden vorgestellt werden.

7.2.1 Große Kavität, Backplane

Mittels der Werkzeugplatte mit dem großen Formnest ($20 \times 250 \times 3 \text{ mm}^3$) können durch Heißprägen optische Backplanes hergestellt werden. Eine Polymerplatte der entsprechenden Größe wird eingelegt, aufgeheizt und anschließend in Kontakt mit dem entsprechend mikrostrukturierten metallischen Formeinsatz heruntergekühlt, bis die Polymermasse wieder stabil genug ist, um entformt zu werden. Der Formeinsatz wird, wie schon in Kapitel 4.2 und 4.3 kurz erwähnt, hergestellt, indem zwei Strukturbereiche auf einem Wafer prozessiert werden, und vor dem Replizieren in Nickel passiv justiert aneinandergesetzt werden. Das Design der so verwendeten Strukturen ist in Bild 7.9 dargestellt. Die Backplane besitzt sowohl rechts als auch links Ein- bzw. Auskoppelspiegel, die durch Wellenleitergräben miteinander verbunden sind. Kurz vor den Spiegeln sind binär kodierte Meßstrukturen integriert, die für eine Justierung der Linsen des optischen Steckerinterfaces benötigt werden [Wie2]. Bild 7.10 zeigt auf dem Maskenlayout diese Justierstrukturen neben einem Wellenleiter und dem Rechteck, das den späteren Spiegel definiert.

In Bild 7.11 sind die beiden wesentlichen Elemente der optischen Backplane abgebildet: Ein mikrostrukturierter Spiegel sowie ein Wellenleitergraben, einmal in Silizium geätzt, dann in Nickel galvanisch repliziert und anschließend in PMMA heißgeprägt.

In Bild 7.12 ist die abgeformte Backplane mit einer Länge von 25 cm zu sehen. Die Wellenleitergräben haben dabei Abmessungen von $6 \times 6 \text{ }\mu\text{m}^2$, bei einer Länge von etwa 20 cm. Die Spiegel zum Ein- bzw. Auskoppeln der optischen Signale haben Abmessungen von $30 \times 60 \text{ }\mu\text{m}^2$ an der Oberfläche und im Maskenlayout. Im Silizium ergibt sich aus der schmalen Seite von $30 \text{ }\mu\text{m}$ und dem Kristallwinkel des Siliziums eine entsprechende Tiefe von $21 \text{ }\mu\text{m}$.



*Bild 7.9 Design der optischen Backplane, 6“-Wafer (150mm) mit 2 * 10 cm langen Strukturen zur Montage von 20 cm langen Wellenleiterstrukturen*

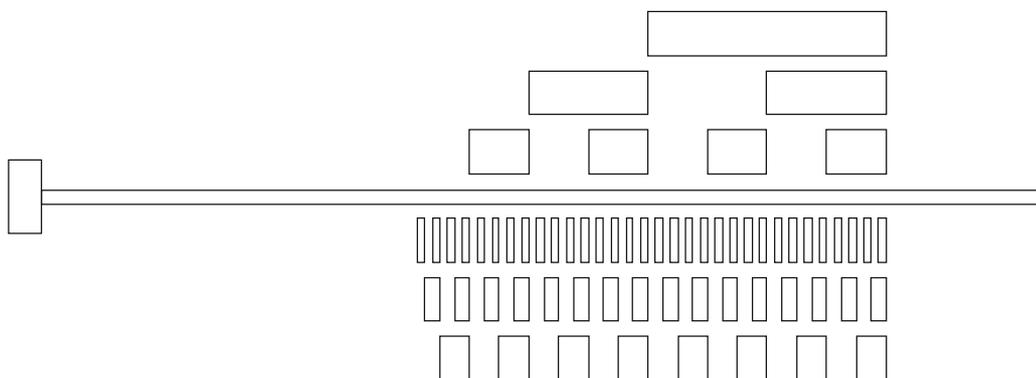


Bild 7.10 Maskenlayout: Justiermarken für die Ein-/Auskoppellinsen und Wellenleiter (mitte) sowie Spiegel (ganz links)

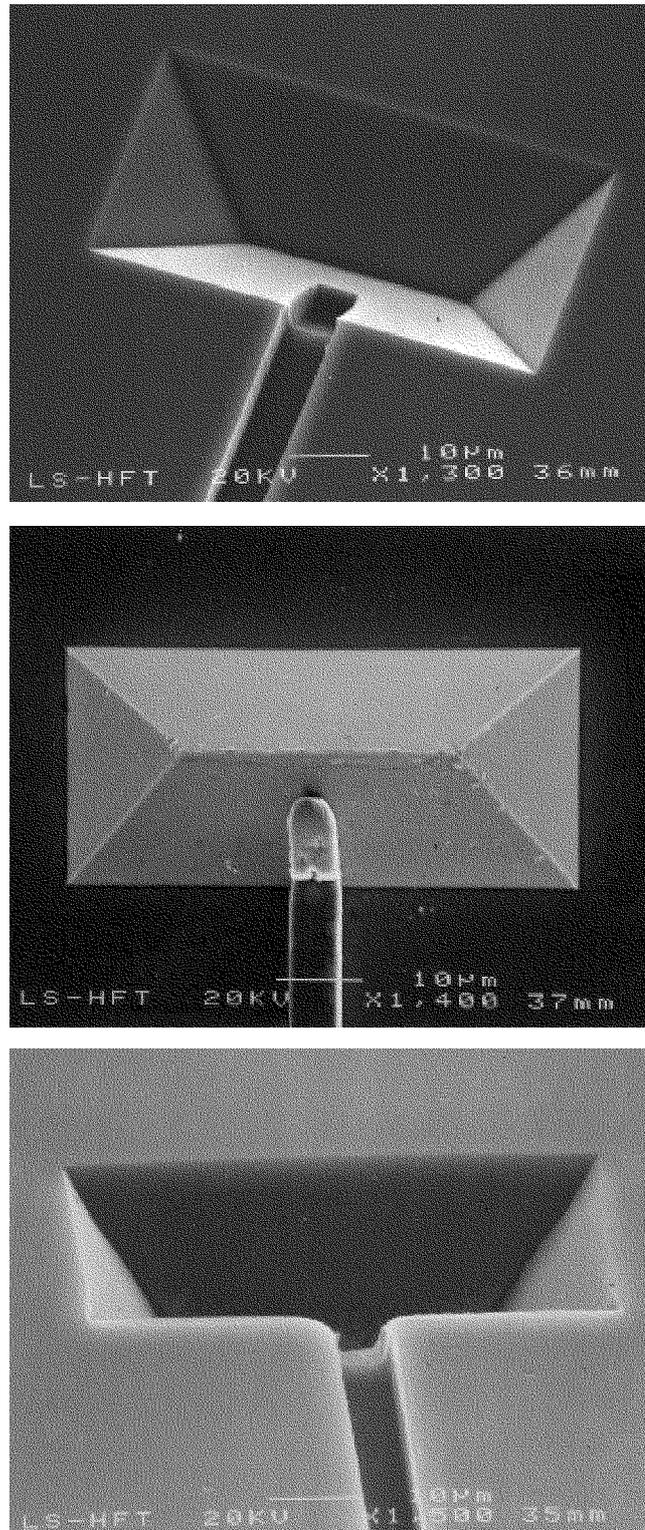


Bild 7.11 Die beiden wesentlichen Elemente einer integriert-optischen Backplane: mikrostrukturierter Spiegel und Wellenleitergraben, in Silizium (oben), Nickel (Mitte) und PMMA (unten).

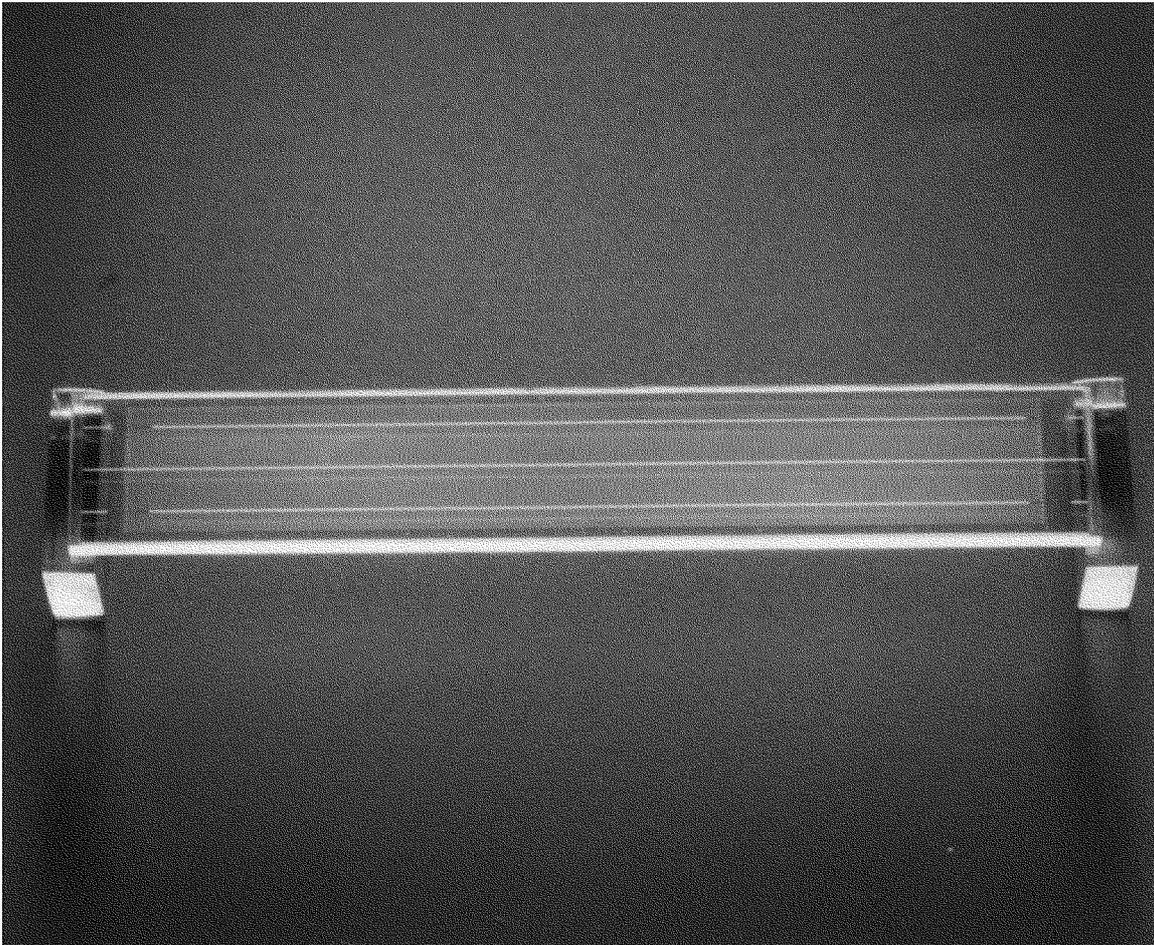


Bild 7.12 Abgeformte Backplane (25 cm lang) mit 20 cm langen Wellenleitergräben

7.2.2 Oberflächenplanität

Die Oberflächenplanität der heißgeprägten Backplane-Substrate wurde ebenfalls mit dem optischen Oberflächenprofilometer vermessen. Der Meßbereich ist allerdings durch die x-y-Verfahrtsche beschränkt, so daß die Backplane nur zum Teil untersucht werden konnte. Vermessen wurde der mittlere Bereich auf einer Länge von 100 mm. Die dabei erhaltenen Werte sind in Tabelle 7.4 dargestellt.

Deutlich ist zu erkennen, daß die Planität im Mittel einen schlechteren Wert als bei den wesentlich kürzeren spritzgeprägten Strukturen erreicht. Für eine Weiterprozessierung, d.h. Verkleben mit einem Deckel, sind beim Heißprägen die Durchbiegungen mit $30\ \mu\text{m}$ über 10 cm aber tolerierbar. In [Git] sind Durchbiegungen von $15\ \mu\text{m}$ über 30 mm als guter Wert angegeben.

Tabelle 7.4 Durchbiegung der Backplane-Substrate (gemessen 10 cm längs und 2 cm quer)

Teil-Nr. #	Prägedruck [bar]	Durchbiegung	
		längs (10cm) / [μm]	quer (2cm) / [μm]
1	90	28,2	4,7
2	95	19,0	3,5
3	100	24,7	3,4
4	100	27,9	1,1
5	100	17,2	8,4
6	100	26,1	3,7
7	100	12,7	11,9
8	100	8,6	4,0
	Mittelwert	20,6	5,1
	Standardabweichung	6,9	3,2
	Maximalwert	27,9	11,9
	Minimalwert	8,6	1,1

7.2.3 Kleine Kavität, thermooptischer Schalter

In der kleinen Kavität ($10 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$) sind Substrate für thermooptische Schalter heißgeprägt worden. Dazu ist der Heißprägeprozeß der Backplane auf die kleineren Oberflächen angepaßt worden. Dabei sind die Oberflächenplanitäten in Abhängigkeit zum Prägedruck vermessen worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.5 dargestellt.

Tabelle 7.5 Oberflächenplanitäten Heißprägen kleine Kavität, abhängig vom Prägedruck

Teil-Nr. #	Prägedruck [bar]	Durchbiegung	
		längs (3cm) / [μm]	quer (1cm) / [μm]
1	10	4,7	2,7
2	10	3	2,7
3	12	2,3	1,7
4	14	2	1,7
5	16	1,3	2
6	18	5,7	2,7
7	20	3,7	1,7

Ein optimaler Wert bzgl. der Durchbiegung ist im Bereich von ca. 12 bis 16 bar Prägedruck zu erkennen. Die Abformungsqualität, die unter einem Lichtmikroskop abgeschätzt worden ist, ist bei 12 bar Prägedruck optimal, so daß die nachfolgenden Teile mit diesem Parameter hergestellt werden [Sie]. Mit Hilfe des Mikroskops sind die Abscherungen der Wellenleitergräben betrachtet worden (siehe Kap. 6.1.1).

In Bild 7.13 ist ein Substrat für den thermooptischen Schalter, bei dem ein vorgefertigtes Kupferstück als Wärmesenke ins Heißprägewerkzeug eingelegt worden ist, zu sehen. Anschließend wird beim Heißprägen eine dünne (125-250 μm) PMMA-Folie auf das Kupfer auflaminiert und mit den entsprechenden Wellenleitergräben und V-Gruben strukturiert.

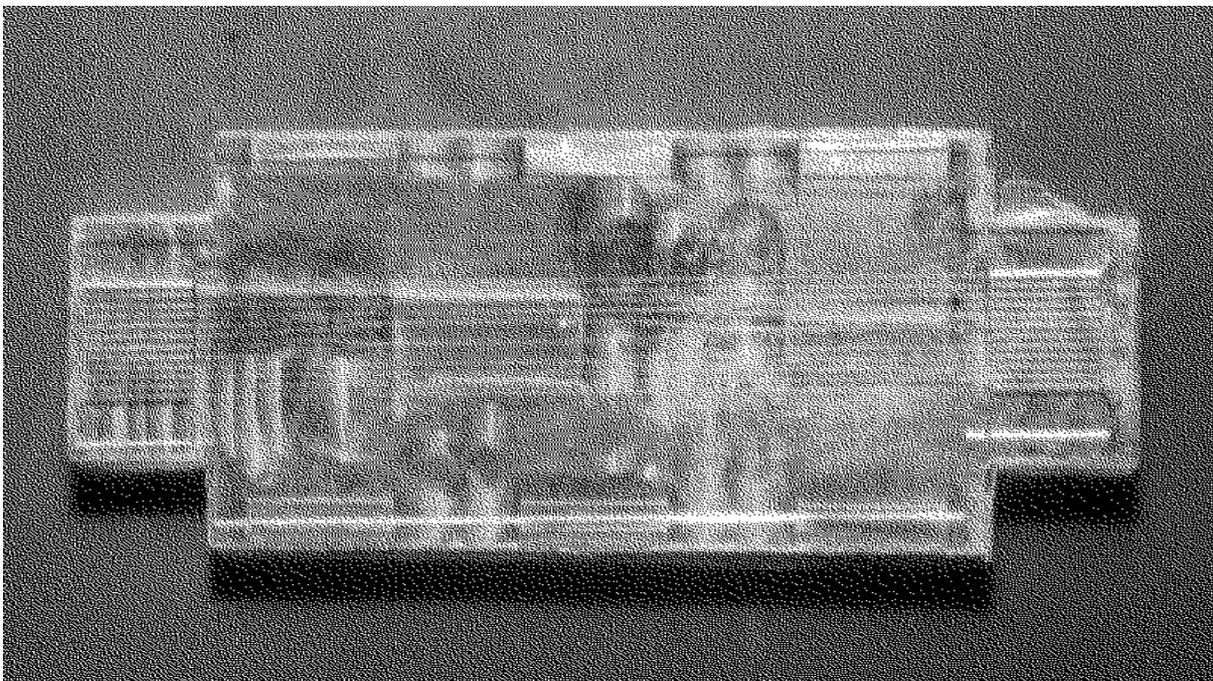


Bild 7.13 Auf Kupferwärmesenke auflaminierte und mikrostrukturierte PMMA-Folie

Dieses Verfahren hat sich beim Heißprägeprozess als durchführbar erwiesen, ohne daß sichtbare Spannungen auftreten, welche die Folie reißen oder abplatzen lassen. Allerdings werden beim nachfolgenden Verklebeprozess durch das im flüssigen Kernmonomer enthaltene Lösungsmittel Mikrorisse freigelegt, welche die Wellenleiter zerstören. Diese Versuche sind eingestellt worden, da sich die auflaminierten Substrate nicht weiterverarbeiten lassen.

7.3 Nicht-optische Heißprägekomponenten

Um die Möglichkeiten der SIGA-Technik zu testen und deren Grenzen zu erforschen, sind als Auftragsarbeit Strukturen im Nanometerbereich prozessiert worden, die im Bereich der Mikrofluidik als planare Filter eingesetzt werden sollen [Pev]. Ausgangsmaterial für unsere Versuche sind 3 Siliziumwafer mit mittels Elektronenstrahl in Fotolack geschriebenen rautenförmigen Strukturen gewesen, die je Wafer andere Abmessungen besaßen. Auf dem Wafer 1 haben sich 300 nm große Strukturen befunden, Wafer 2 hat die gleichen Strukturen in 150 nm gehabt, während sich die mit 60 nm kleinsten Strukturen auf Wafer 3 befunden haben. Die Wafer sind mit Silber besputtert, anschließend galvanisch repliziert und zum Abschluß mittels Heißprägen in PMMA abgeformt worden. Die Bilder 7.14 und 7.15 zeigen die 300 nm großen Strukturen in PMMA, einmal in der Übersicht und einmal ein Filterelement, bestehend aus zwei rautenförmigen Stümpfen, im Detail. Die Bilder stellen beide nur einen sehr kleinen Ausschnitt aus der insgesamt ca. $2 \times 4 \text{ mm}^2$ großen Filterfläche dar. Die Bilder 7.16 und 7.17 zeigen die 150 nm großen Strukturen in PMMA, einmal in der Übersicht, und einmal 4 Filterelemente, entsprechend 8 Strukturen. Die Bilder 7.18 und 7.19 zeigen die 60 nm großen Strukturen. Auf diesen beiden Bildern ist deutlich zu erkennen, daß die ehemals rautenförmigen Strukturen ihre ursprüngliche Form zumeist verloren haben.

Dies ist aber kein Fehler, der beim Heißprägen auftritt, sondern es stellt die Grenze des am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik für Strukturen im μm -Bereich optimierten Galvanikprozesses dar. So werden beim Kopieren von der ersten zur zweiten Generation die kleinen, nur 60 nm großen Sacklöcher meist nicht mehr vollständig mit der Nickel-Lösung benetzt, so daß folglich dort auch kein Nickel aufwachsen kann. Ein weiterer Effekt, der als mögliche Fehlerursache hinzukommt, besteht darin, daß beim Galvanikprozeß in den kleinen Löchern entstehender Wasserstoff verbleibt, und so das galvanische Aufwachsen des Nickels verhindert. Die Grenze der noch galvanisch replizierbaren Strukturgrößen am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik liegt demzufolge bei etwa 100 nm, zumindest mit Aspektverhältnissen von mehr als 5. Die Nanostrukturen haben nominell eine Strukturhöhe von 400 nm, was bei den 60 nm großen Strukturen zu einem Aspektverhältnis von etwa 7 führt, bei den 150 nm Strukturen zu etwa 3 und bei den 300 nm Strukturen zu etwa 1,5. In [Cho2] sind zwar auch

50 nm große Strukturen heißgeprägt worden, die allerdings eine zu unseren Strukturen inverse Form aufwiesen („Sacklöcher“), was prozesstechnisch wesentlich einfacher ist.

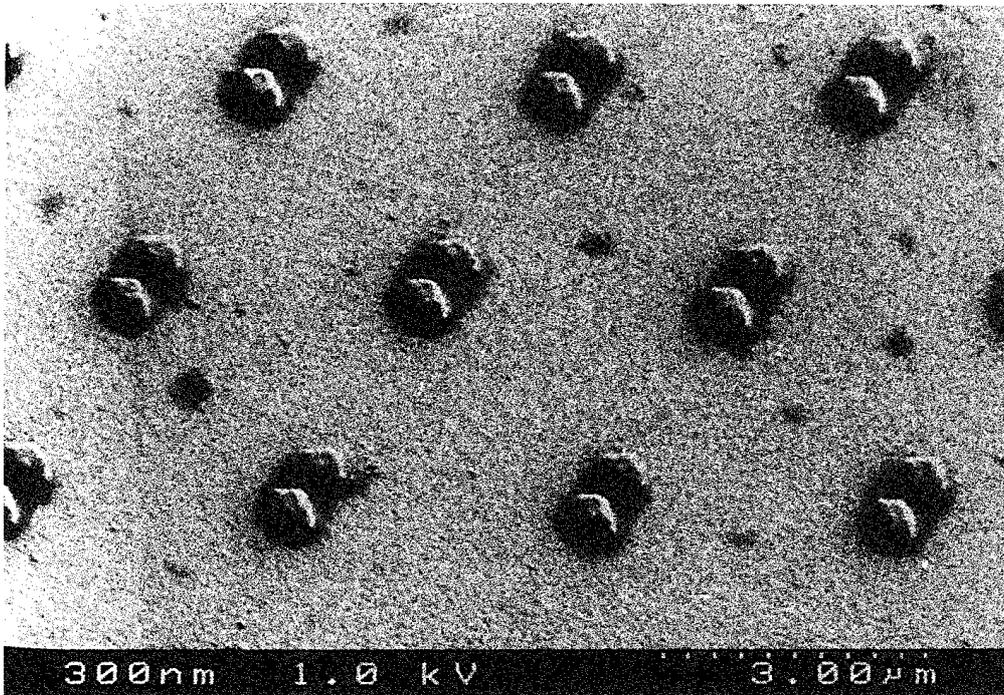


Bild 7.14 300 nm Strukturen in PMMA heißgeprägt, Übersicht

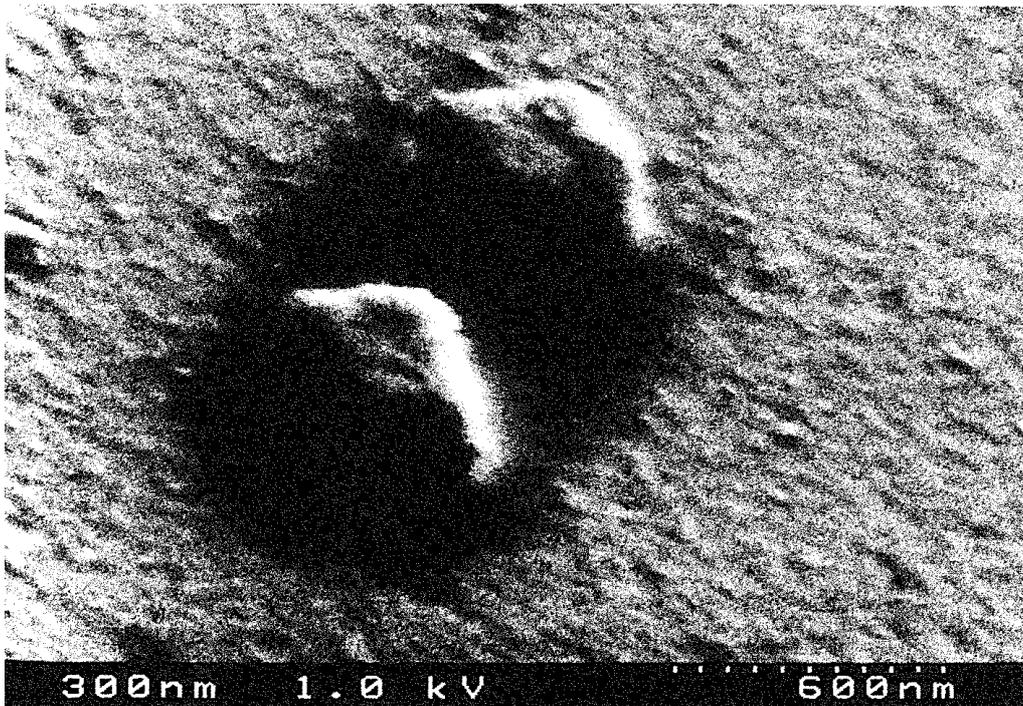


Bild 7.15 300 nm Strukturen in PMMA heißgeprägt, 1 Filterelement

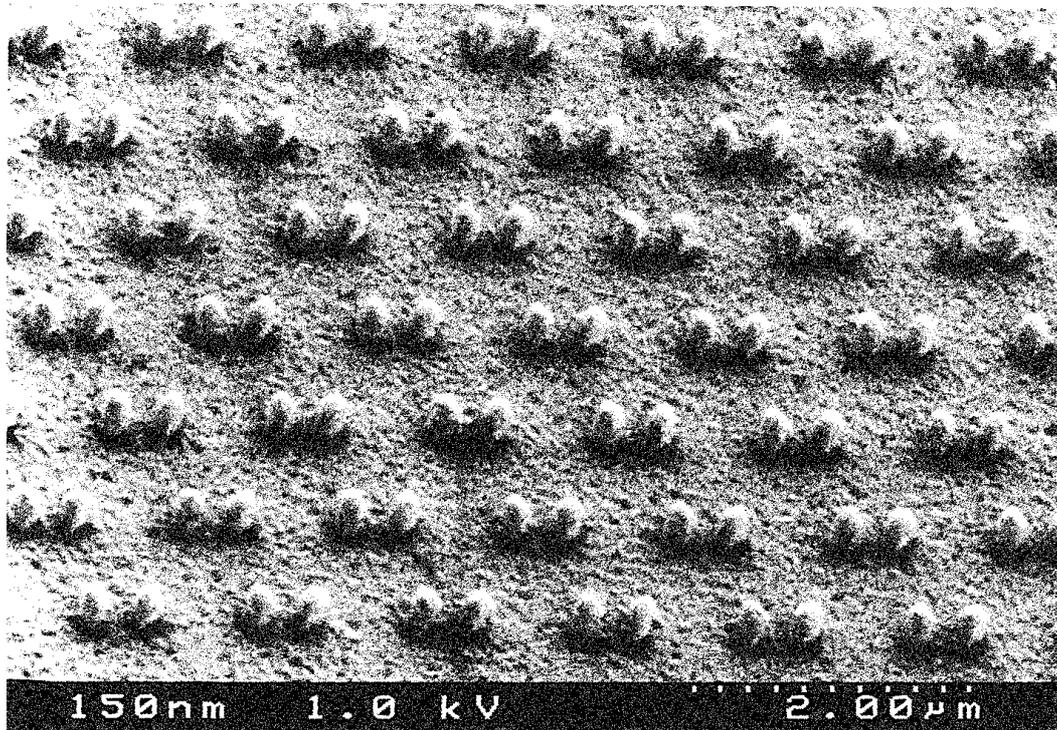


Bild 7.16 150 nm Strukturen in PMMA heißgeprägt, Übersicht

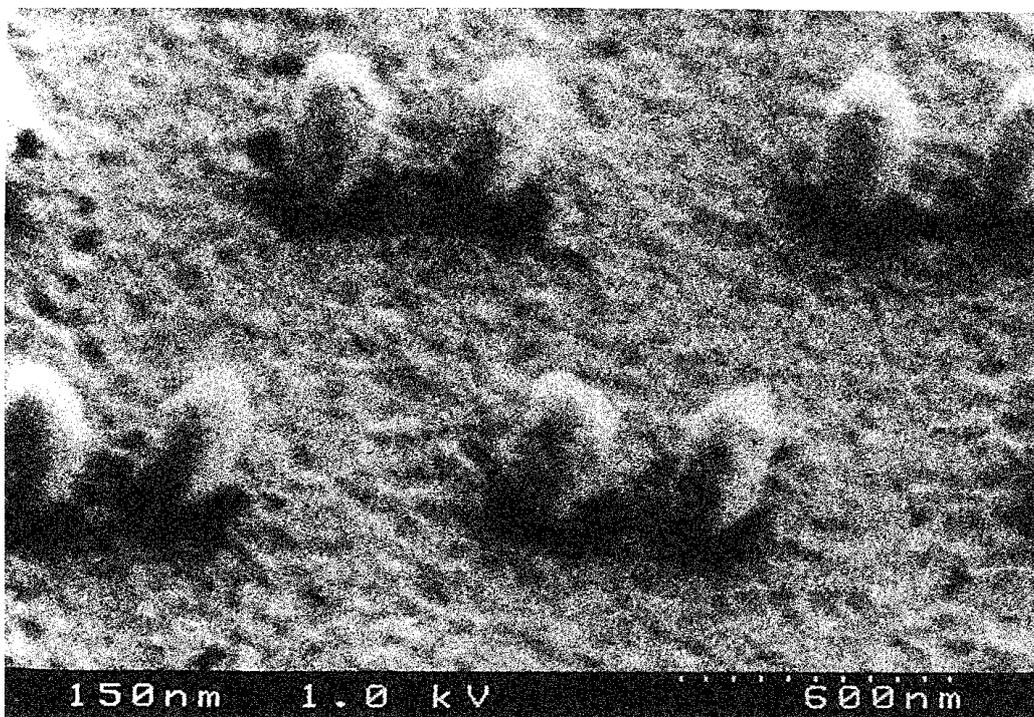


Bild 7.17 150 nm Strukturen in PMMA heißgeprägt, 4 Filterelemente

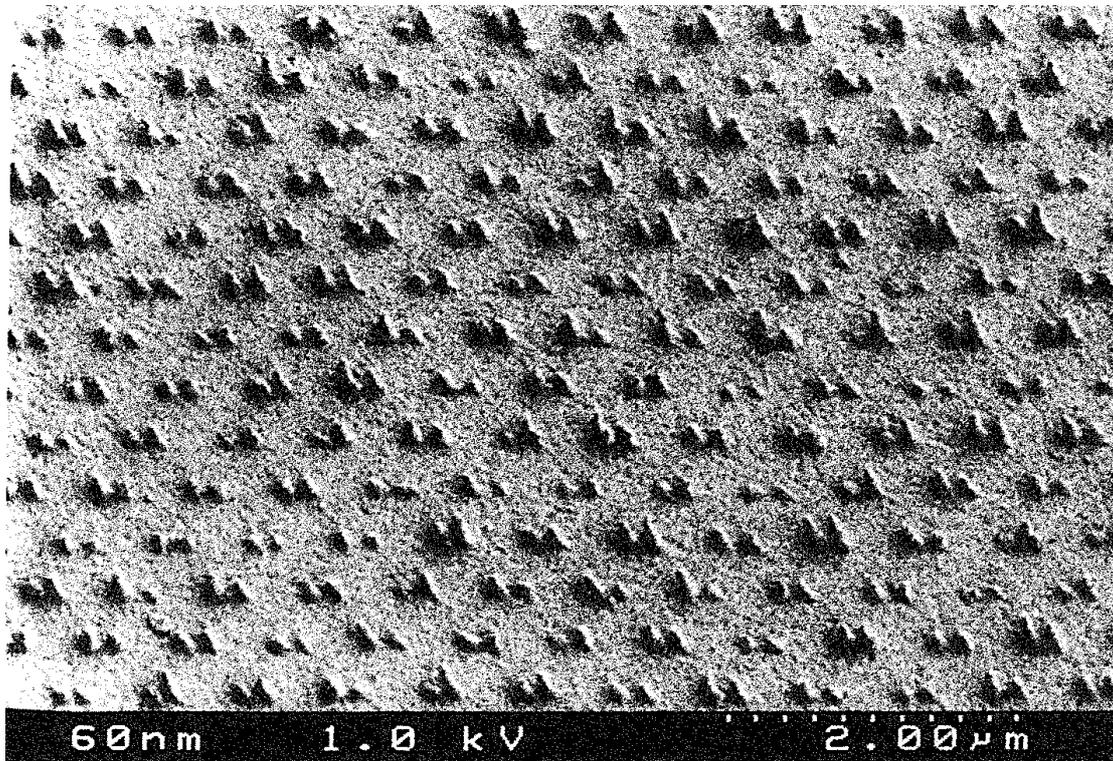


Bild 7.18 60 nm Strukturen in PMMA heißgeprägt, Übersicht

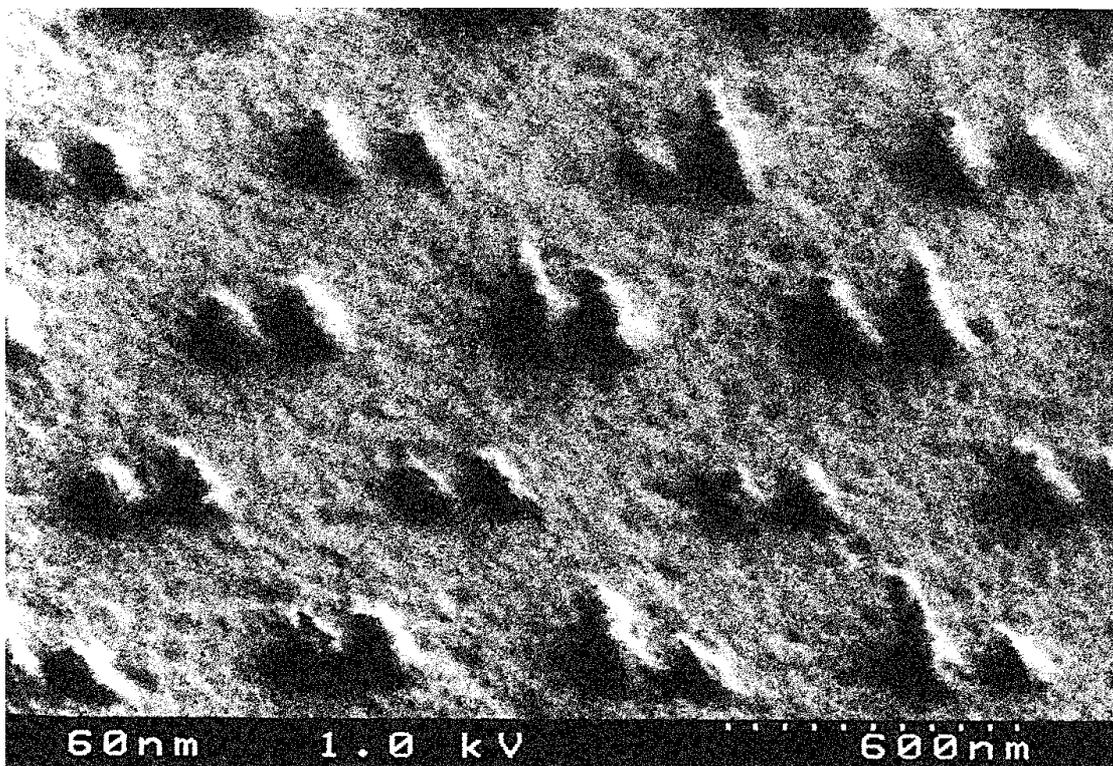


Bild 7.19 60 nm Strukturen in PMMA heißgeprägt, 15 Filterelemente

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit sind zwei Abformverfahren vorgestellt worden, um Mikrostrukturen im Rahmen der sogenannten SIGA-Technik in Kunststoff zu replizieren. Dabei ist es im wesentlichen um integriert-optische Mikrostrukturen für die optische Informationstechnik gegangen.

Beim ersten Verfahren hat es sich um ein modifiziertes Mikrospritzgießen gehandelt, bei dem mittels eines Variothermprozesses die Strukturen in einem speziell konstruierten Spritzgießwerkzeug spritzgeprägt werden konnten. Der Prägevorgang ist während der Kühlphase im geschlossenen Werkzeug mit einem zusätzlichen Prägestempel und -zylinder vorgenommen worden. Ferner konnte an einem Beispiel gezeigt werden, daß dieses Verfahren im Gegensatz zum klassischen Spritzgießen und normalen Spritzprägen geeignet ist, Mikrostrukturen für die Integrierte Optik zu erzeugen.

Für dieses Mikrospritzgießen ist auf einer Standard-Spritzgießmaschine ein temperaturgesteuerter Zyklus entwickelt und implementiert worden. Dazu sind ein PC, die Maschine und die Temperiergeräte vernetzt worden.

Beim zweiten Verfahren hat es sich um ein Heißprägeverfahren gehandelt. Dazu ist ein komplett neues Werkzeug entwickelt worden, in das Erkenntnisse aus dem Mikrospritzgießen mit eingeflossen sind. Das Heißprägen ist dabei auf derselben Spritzgießmaschine, allerdings mit abgeschalteter Einspritzeinheit, durchgeführt worden. Das Heißprägewerkzeug hat eine geschlossene Kavität besessen, in die mit Hilfe eines Prägestempels und -zylinders, analog zum Spritzgießwerkzeug, geprägt werden konnte. Ferner ist das Werkzeug modular aufgebaut gewesen, um relativ einfach verschiedene Substratgrößen bis zu $25 \times 25 \text{ cm}^2$ mikrostrukturieren zu können. Im Rahmen dieser Arbeit ist mit zwei Größen ($1 \times 4 \text{ cm}^2$ und $2 \times 25 \text{ cm}^2$) gearbeitet worden, eine dritte ($10 \times 15 \text{ cm}^2$) ist mittlerweile vorhanden. In das Heißprägewerkzeug sind viele parallel verlaufende Temperierkanäle integriert worden, um eine variable und möglichst homogene und intensive Temperierung zu ermöglichen. Dies ist durch gefräste Kanäle und anschließend vakuumverlötete Werkzeugplatten erreicht worden.

Mit Hilfe des Spritzprägewerkzeuges mit seinen 8 Kavitäten sind verschiedene Designs für integriert-optische Strukturen in Kunststoff, normalerweise PMMA, übertragen worden. Dazu ist von geraden Wellenleiterstrukturen mit mittels V-Gruben passiv-koppelbaren Glasfaseranschlüssen, sowie Verteilerstrukturen (Power-Splitter) mit 1 bis 2 Eingängen und bis zu 8 Ausgängen berichtet worden. Die Verteiler sind dabei teilweise als adiabatische Koppler, mit sehr kleinen Öffnungswinkeln von unter 1° zwischen einzelnen Wellenleiterarmen, ausgelegt.

Das Heißprägewerkzeug ist im wesentlichen zur Abformung optischer Backplanes im Rahmen eines BMBF-Projektes entwickelt und eingesetzt worden. Dazu ist über die Abformung von bis zu 20 cm langen mikrostrukturierten Wellenleitergräben mit Abmessungen von $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ und für die Strahlumlenkung notwendigen integrierten Mikrospiegeln berichtet worden.

Mit Hilfe der Werkzeugplatten für kleinere Substrate sind u.a. dünne Folien auf Metallträger auflaminiert und gleichzeitig mikrostrukturiert worden. Diese haben als Basis für thermooptische Schalter gedient, was dann aber aufgrund von Problemen beim nachfolgenden Prozeßschritt der Wellenleiterherstellung nicht weiter verfolgt worden ist.

Als Abschluß des Heißprägens sind, auch um die Möglichkeiten der eingesetzten Technologie abschätzen zu können, Nanostrukturen hergestellt worden, die als planare Filter in der Analytik eingesetzt werden sollten. Dazu ist gezeigt worden, daß die entwickelte Heißprägetechnik in der Lage ist, Strukturen mit Dimensionen unter 100 nm in Kunststoff zu übertragen, die Grenzen der Technologie aber in der verwendeten Mikrostruktur-Galvanik liegen. Erschwerend dabei ist sicherlich gewesen, daß die Strukturen im Kunststoff nicht als kleine Löcher, sondern als erhabene kleine „Pickel“ vorliegen mußten.

Um eine wesentlich höhere Gebrauchstemperatur der Polymerkomponenten zu ermöglichen, sind neben dem Standard PMMA noch einige andere Materialien getestet worden, in die ebenso Mikrostrukturen abgeformt werden konnten. Bei der Charakterisierung der abgeformten Strukturen ist einerseits auf die Detailtreue geachtet worden, andererseits auf die Oberflächenplanität, die eine wesentliche Voraussetzung für die nachfolgenden Prozeßschritte der verwendeten SIGA-Technik ist.

Im Rahmen der Arbeit sind zur Weiterentwicklung und Verfeinerung der hier vorgestellten Abformtechniken einige Aspekte angesprochen worden. Ein wesentlicher ist die Reduzierung der notwendigen Zykluszeit. Dazu gibt es einige Ansätze, die im einzelnen aufgeführt worden sind.

Ein weiterer Ansatzpunkt für zukünftige Anstrengungen sind höhertemperaturfeste thermoplastische Materialien, die für integriert-optische Komponenten aber immer auch ein kompatibles Monomer mit entsprechenden Eigenschaften mit enthalten müssen.

Die Optimierungen an den verwendeten Werkzeugen sind ebenfalls angesprochen worden. So sollte beim Spritzgießwerkzeug für einen optimaleren Delta-Anguß gesorgt werden, beim Heißprägwerkzeug ist eine bessere Mechanik für den Prägestempel denkbar.

Die Abformtechnik von Mikrostrukturen mittels Heißprägen und Spritzgießen ist nur ein kleiner Teil, ein Prozeßschritt in den Technologien der Mikrotechnik. Sie wird in der Zukunft sicherlich mitbestimmend für eine größere Verbreitung der Mikrotechnik auf dem Weltmarkt sein, d.h. nicht in Form von Prototypen und Kleinstserien, sondern bei polymeren Mikrostrukturen in großen Stückzahlen für den Massenmarkt. Erste Erfolge zielen in diese Richtung, sind allerdings noch relativ selten.

Literatur

- [Alm] *Almeida, J.M., Leite, A.P., De La Rue, R., Ironside, C., Caccavale, F., Mazzoldi, P.:* Optical Amplification in Cr diffusion-doped LiNbO₃. Proc. ECIO, Delft, The Netherlands, (1995) S.237-240
- [Arb] *n.n.:* Anschnittarten, Film-/Bandanschnitt. Kunststoff-Technologiekurs 1, Technologie des Spritzgießens. Arburg GmbH, (1994) S. 42.3.1-42.3.4(3)
- [ArnD] *Arnoldi, D., Dorn, K., Schwind, H., Haßkerl, T., Hauch, D.:* Wärmeformbeständig und optisch brillant. KUNSTSTOFFE, Bd. 87 Heft 6 (1997) S.734-736
- [ArnJ] *Arnold, J., Dasbach, U., Ehrfeld, W., Hesch, K., Löwe, H.:* Combination of excimer laser micromachining and replication processes suited for large scale production. Applied Surface Science, 86 (1995) S.251-258
- [Aum] *Aumiller, G.D., Chandross, E.A., Tomlinson, W.J., Weber, H.P.:* Submicrometer resolution replication of relief patterns for integrated optics. Journal of Applied Physics, Vol.45 No.10 (1974) S.4557-4562
- [BacW1] *Bacher, W., Bade, K., Matthis, B., Saumer, M., Schwarz, R.:* Fabrication of LIGA mold inserts. Microsystem Technologies, Vol. 4 (1998) S.117-119
- [BacW2] *Bacher, W., Ruprecht, R., Linder, G.:* Kunststoffverarbeitung erzeugt feinste Oberflächenstrukturen. MASCHINENMARKT, 100 (1994) S.34-39
- [Bäc] *Bäcklund, Y.:* Micromechanics in optical microsystems - with focus on telecom systems. J. Micromech. Microeng., Vol.7 (1997) S.93-98
- [Bar] *Baraldi, L., Kunz, R.E., Meissner, J.:* High-precision molding of integrated optical structures. SPIE Vol.1992 „Miniature and Micro-Optics and Micromechanics“, (1993) S.21-29
- [Bau] *Bauer, W., Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Hausselt, J.H.:* Slip casting of ceramic microcomponents. Microsystem Technologies, Vol.4 (1998) S.125-127
- [Bic] *Bichler, M.:* Prozeßparameter zur Qualitätssicherung auswählen und bewerten. KUNSTSTOFFE, Bd. 84 Heft 10 (1994) S.1397-1404
- [Bis] *Bissessur, H., Pagnod, P., Martin, B., Ripoche, G., Gaborit, F.:* Variation of passive waveguide birefringence with axial strain. Proc. ECIO, Delft, The Netherlands, (1995) S.287-290

-
- [Bot] *Both, A., Bacher, W., Hecke, M., Müller, K.D., Ruprecht, R., Strohrmann, M.:* Molding Process with High Alignment Precision for the LIGA Technology. Proc. MEMS, Amsterdam, the Netherlands, (1995) S.186-190
- [Bre] *Brenner, K.-H., Kufner, M., Kufner, S., Moisel, J., Müller, A., Sinzinger, S., Testorf, M., Göttert, J., Mohr, J.:* Application of three-dimensional micro-optical components formed by lithography, electroforming, and plastic molding. Applied Optics, Vol.32 No.32 (1993) S.6464-6469
- [Buc] *Buchold, B.:* Integriert-optische Wellenlängenmultiplexer in Glas für WDM-Systeme. VDI- Fortschritt-Berichte, Reihe 10, Nr.545. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998, ISBN: 3-18-354510-1
- [Bus1] *Bushko, W.C., Stokes, V.K.:* Solidification of Thermoviscoelastic Melts. Part I: Formulation of Model Problem. Polymer Engineering and Science, Vol.35 No.4 (1995) S.351-364
- [Bus2] *Bushko, W.C., Stokes, V.K.:* Solidification of Thermoviscoelastic Melts. Part II: Effects of Processing Conditions on Shrinkage and Residual Stresses. Polymer Engineering and Science, Vol.35 No.4 (1995) S.365-383
- [Bus3] *Bushko, W.C., Stokes, V.K.:* Solidification of Thermoviscoelastic Melts. Part 3: Effects of Mold Surface Temperature Differences on Warpage and Residual Stresses. Polymer Engineering and Science, Vol.36 No.3 (1996) S.322-335
- [Bus4] *Bushko, W.C., Stokes, V.K.:* Solidification of Thermoviscoelastic Melts. Part 4: Effects of Boundary Conditions on Shrinkage and Residual Stresses. Polymer Engineering and Science, Vol.36 No.5 (1996) S.658-675
- [Car] *Cariou, J.M., Dugas, J., Martin, L., Michel, P.:* Refractive-index variations with temperature of PMMA and polycarbonate. Applied Optics, Vol.25 No.3 (1986) S.334-336
- [Cho1] *Chou, S.Y., Krauss, P.R., Renstrom, P.J.:* Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers. Applied Physics Letters, Vol.67 No.21 (1995) S.3114-3116
- [Cho2] *Chou, S.Y., Krauss, P.R., Renstrom, P.J.:* Imprint Lithography with 25-Nanometer Resolution. Science, Vol.272 (1996) S.85-87
- [Dan1] *Dannberg, P., Waldhäusl, R., Bräuer, A., Karthe W., Kley, E.-B.:* Passive Polymeric Components Fabricated by Embossing Technique. Proc. ECOC (1993) S.437-440
- [Dan2] *Dannberg, P., Bräuer, A., Karthe W., Wolter, H.:* Organically-modified-ceramics-(ORMOCER)- based monomode waveguide elements fabricated by replication technique. IOOC (1995) S.71-72

-
- [Del] *Delpy, U., Wintergerst, S.:* Spritzgießen mit variabler Werkzeugtemperatur. KUNSTSTOFFE, Bd. 62 Heft 4 (1972) S.209-211
- [Die] *Diemeer, M.B.J., Brons, J.J., Trommel, E.S.:* Polymeric Optical Waveguide Switch Using the Thermo-optic Effect. Journal of Lightwave Technology, Vol.7 No.3 (1989) S.449-453
- [Dom] *Domininghaus, H.:* Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 4. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992, ISBN: 3-18-400846-0, Kap.2.1.4: Polyacrylate, S.302-326
- [Egg] *Egger, J.R.:* Manufacturing methods for large microstructured optical components for non-imaging applications. Proc. SPIE, Vol.2600 „Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics“, Philadelphia, Pennsylvania (1995) S.28-33
- [Ehr] *Ehrfeld, W., Lehr, H., Michel, F., Wolf, A., Gruber, H.-P., Bertholds, A.:* Micro electro discharge machining as a technology in Micromachining. Proc. SPIE 2879, S.332-337
- [EldJ] *Elders, J., Jansen, H.V., Elwenspoek, M., Ehrfeld, W.:* Deemo: A new technology for the fabrication of microstructures. Proc. MEMS, Amsterdam, the Netherlands, (1995) S.238-243
- [EldH] *Elderstig, H., Larsson, O.:* Polymeric MST - high precision at low cost. J. Micromech. Microeng., Vol.7 (1997) S.89-92
- [Fah] *Fahrenberg, J., Schaller, Th., Bacher, W., El-Kholi, A., Schomburg, W.K.:* High aspect ratio multi-level mold inserts fabricated by mechanical micro machining and deep etch X-ray lithography. Microsystem Technologies, Vol.2 (1996) S.174-177
- [Fis] *Fischer, D.:* Mehrmodige integriert-optische Wellenleiterschaltungen aus Polymeren. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 10, Nr.477. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997, ISBN: 3-18-347710-6
- [Fue] *Fuest, R., Fabricius, N., Gießler, K.-H., Rauch, F.:* Packaging and reliability of IO in glass. Proc. ECIO, Delft, The Netherlands, (1995) post-deadline papers S.43-50
- [Gal] *Gale, M., Baraldi, L., Kunz, R.E.:* Replicated microstructures for integrated optics. SPIE Vol.2213 (1994) S.2-10
- [Ger] *Gerner, M., Paatzsch, T., Weber, L., Schiff, H., Smaglinski, I., Bauer, H.-D. Abraham, M., Ehrfeld, W.:* Micro-optical Components for Fiber and Integrated Optics realized by the LIGA Technique. Proc. MEMS, Amsterdam, the Netherlands, (1995) S.328-333
- [Ges1] *Gester, H.:* Entwicklung eines Windows-Programmes zur Regelung von Abformprozessen für Mikrostrukturen. Diplomarbeit am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Universität Dortmund, 1996

-
- [Ges2] *Gester, H.*: Entwicklung eines Windows-Programmes zur Regelung von Abformprozessen für Mikrostrukturen. Software-Erweiterung zur Diplomarbeit am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Universität Dortmund, 1997
- [Gin] *Gini, E., Melchior, H.*: Polarization independent InP grating spectrograph for fiber optical links. Proc. ECIO, Delft, The Netherlands, (1995) S.279-282
- [Git] *Gitkind, N., Jacobson, B., Scipione, F., Gengelbach, R., Emmons, R., Holman, R.*: Plastic optics in LCD backlighting. Proc. SPIE, Vol.2600 „Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics“, Philadelphia, Pennsylvania (1995) S.20-26
- [Göt] *Göttert, J., Müller, A., Mohr, J., Rogner, A.*: Fabrication of stepped microoptical benches for fibre and free space applications. Microsystem Technologies, Vol.2 (1996) S.40-45
- [Gro1] *n.n.*: HB-THERM Series3, Temperiergerät HB-O-250, Bedienungsanleitung und Betriebs- und Serviceanleitung. Grossenbacher Apparatebau AG, CH-9006 St. Gallen, Schweiz, Ausgabe 1995
- [Gro2] *n.n.*: USR21-Rampenfunktion. Grossenbacher Apparatebau AG, CH-9006 St. Gallen, Schweiz, Ausgabe 1996
- [Gro3] *n.n.*: Datenübertragungsprotokoll Temperatur-Regelgeräte HB-THERM[®], Script Grossenbacher Apparatebau AG, CH-9006 St. Gallen, Schweiz, 1988
- [Has] *n.n.*: Mikroprozessor-Regler Z124/.../N. Bedienungsanleitung, HASCO-Normalien, D-58513 Lüdenscheid
- [Heb] *Hebert, R.T.*: Opto-mechanical details in injection-molded assemblies. Proc. SPIE, Vol.2600 „Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics“, Philadelphia, Pennsylvania (1995) S.34-41
- [Hec1] *Heckele, M., Bacher, W., Blum, H., Müller, L., Ünal, N.*: Heißprägen von Mikrostrukturen als Fertigungsprozeß. F&M, 105 Nr.9 (1997) S.598-602
- [Hec2] *Heckele, M., Bacher, W.*: Modular hot embossing equipment for MEMS. Micromachine Devices, Vol.2 No.2 (1997) S.1-5
- [Hec3] *Heckele, M., Bacher, W., Müller, K.D.*: Hot embossing - The molding technique for plastic microstructures. Microsystem Technologies, Vol.4 (1998) S.122-124
- [Hec4] *Heckele, M., Bacher, W., Hanemann, T., Ulrich, H.*: Hot Embossing and Injection Molding for Microoptical Components. Proc. SPIE, Vol.3135 „Precision Plastic Optics for Optical Storage, Displays, Imaging, and Communications“, San Diego, California (1997) S.24-29

-
- [Hee] *Heeren, P.-H., Beuret, C., Larsson, O., Bertholds, A.*: Microstructuring of silicon by electro-discharge machining (EDM)- Part II. Proc. Eurosensors X, Leuven, Belgium (1996)
- [Heu] *Heuberger, A. (Hrsg)*: Mikromechanik. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1991, ISBN: 3-540-18721-9
- [Hik] *Hikita, M., Usui, M., Watanabe, T., Sugawara, S., Amano, M., Imamura, S.*: Low-Loss Polymeric Optical Waveguide with High Environmental Stability. IOOC (1995) S.69-70
- [HofA] *Hoff, A.M.*: Basic considerations for injection molding of plastic optics. Proc. SPIE, Vol.2600 „Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics“, Philadelphia, Pennsylvania (1995) S.2-5
- [HofM] *Hoffmann, M.*: Plasmaabgeschiedene integriert optische Wellenleiter auf Silizium für die faseroptische Kommunikationstechnik. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 10, Nr.469. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997, ISBN: 3-18-346910-3
- [Hor] *Horsthuis, W.H.G., Lytel, R., Hendriksen, B.*: Active Components for Optical Networks Using Polymer Technology. IOOC (1995) S.62-64
- [Hul] *Hultsch, H. (Hrsg)*: Optische Telekommunikationssysteme. Gelsenkirchen: Damm-Verlag KG, 1996, ISBN 3-87333-082-2
- [Ima] *Imamura, S., Yoshimura, R., Izawa, T.*: Polymer Channel Waveguides With Low Loss At 1.3 μ m. Electronics Letters, Vol.27 No.15 (1991) S.1342-1343
- [Jan] *Jansen, K.M.B., Flaman, A.A.M.*: Construction of Fast-Response Heating Elements for Injection Molding Applications. Polymer Engineering and Science, Vol.34 No.11 (1994) S.894-897
- [Jöh1] *Jöhnck, M., Neyer, A.*: 2D optical array interconnects using optical fibres. Electronics Letters, Vol.33 No.10 (1997) S.888-889
- [Jöh2] *Jöhnck, M., Wittmann, B., Neyer, A.*: 64 channel two dimensional POF based optical array inter chip interconnect. Proc. SPIE, Vol.3490 „Optics in Computing“, Brugge, Belgium (1998) S.285-288
- [Jöh3] *Jöhnck, M.*: Polyacrylate und Polylactone für Anwendungen in einmodigen, integriert optischen, passiven Wellenleitern. Dissertation, 2000, Universität Dortmund, <http://eldorado.uni-dortmund.de:8080/FB8/ag11/forschung/2000/Joehnck>
- [Kal1] *Kalveram, S., Neyer, A.*: Precision moulding techniques for optical waveguide devices. Proc. SPIE, Vol.3135 „Precision Plastic Optics for Optical Storage, Displays, Imaging, and Communications“, San Diego, California (1997) S.2-11

-
- [Kal2] *Kalveram, S., Groß, M., Neyer, A.*: Injection moulded 2x8 couplers for optical communications. Proc. ECIO, Delft, The Netherlands, (1995) S.77-80
- [Kal3] *Kalveram, S.*: Herstellung und Charakterisierung passiver adiabatischer integriert-optischer Koppler auf der Basis polymerer Werkstoffe. Diplomarbeit am Lehrstuhl Hochfrequenztechnik der Universität Dortmund, 1993
- [Kar] *Karthe, W., Müller, R.*: Integrierte Optik. 1. Auflage. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., 1991
- [Kas] *Kassing, R., Rangelow, I.W.*: Etching processes for High Aspect Ratio Micro Systems Technology (HARMST). Microsystem Technologies, Vol.3 (1996) S.20-27
- [Kei1] *Keil, N., Yao, H.H., Zawadski, C., Strebel, B.*: Space-switching at 1.55 μm using thermo-optic tunable polymer waveguide devices. EFOC & N (1994) S.102-105
- [Kei2] *Keil, N., Yao, H.H., Zawadski, C., Strebel, B.*: 4x4 polymer thermo-optic directional coupler switch at 1.55 μm . Electronics Letters, Vol.30 No.8 (1994) S.639-640
- [Kie] *Kießling, H., Damm, C., Dannberg, P., Rudolph, M.*: Prägen feinststrukturierter optischer Oberflächen. F&M, 105 Nr.3 (1997) S.174-177
- [Kim] *Kim, J.-H., Neyer, A.*: Design and Simulation of Polymeric Waveguide Devices Fabricated by Replication Technologies. Journal of Optical Communications, Vol.17 No.5 (1996) S.172-178
- [KleR] *Klein, R., Neyer, A.*: Silicon micromachining for micro-replication technologies. Electronics Letters, Vol.30 No.20 (1994) S.1672-1673
- [KleG] *Klepek, G.*: Herstellung optischer Linsen im Spritzprägeverfahren. KUNSTSTOFFE, Bd. 77 Heft 11 (1987) S.1147-1151
- [Kno1] *Knoche, T.*: Integriert-optische Komponenten in Polymeren. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 10, Nr.474. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997, ISBN: 3-18-347410-7
- [Kno2] *Knoche, T., Müller, L., Klein, R., Neyer, A.*: Low loss polymer waveguides at 1300 and 1550nm using halogenated acrylates. Electronics Letters, Vol.32 No.14 (1996) S.1284-1285
- [Koe] *Koerkamp, M.M.K., Donckers, M.C., Hams, B.H.M., Horsthuis, W.H.G.*: Design and fabrication of a pigtailed thermo-optic 1x2 switch. IPR 94 (1994) FG3, S.274-276
- [Kol] *Te Kolste, R.D., Welch, W.H.*: Injection molding of binary optical elements. Proc. SPIE, Vol.2600 „Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics“, Philadelphia, Pennsylvania (1995) S.65-67

-
- [Kra] *Kragl, H., Hohmann, R., Marheine, C., Pott, W., Pompe, G., Neyer, A., Diepold, T., Obermeier, E.:* Integrated optic polymeric components fabricated with micro-structured strip-off covers. *Electronics Letters*, Vol.34 No.14 (1998) S.1396-1398
- [Leo] *Leonberger, F.J., Merritt, S.W.:* Technology and applications of commercial LiNbO₃ integrated optic devices. *Proc. ECIO, Delft, The Netherlands*, (1995) S.475-478
- [Lia] *Liang, X., McNally, G., Spedding, P.L., Crawford, R.J.:* Correlation between impact strength and dynamic modulus for plastics. *Journal of Materials Science Letters*, 9 (1990) S.1478-1480
- [Lin] *Lin, L., Cheng, Y.T., Chiu, C.J.:* Comparative study of hot embossed micro structures fabricated by laboratory and commercial environments. *Microsystem Technologies*, Vol.4 (1998) S.113-116
- [Loe] *Loechel, B., Maciossek, A.:* Surface micro components fabricated by UV depth lithography and electroplating. *Proc. SPIE 2639* (1995) S.174-184
- [Lor] *Lorenz, H., Despont, M., Vettiger, P., Renaud, P.:* Fabrication of photoplastic high-aspect ratio microparts and micromolds using SU-8 UV resist. *Microsystem Technologies*, Vol.4 (1998) S.143-146
- [Mar] *Maruno, T.:* Properties of fluorinated polyimide optical waveguides. *Proc. SPIE, Vol.3135 „Precision Plastic Optics for Optical Storage, Displays, Imaging, and Communications“*, San Diego, California (1997) S.38-41
- [MenG] *Menges, G., Mohren, P.:* Spritzgießwerkzeuge, Anleitung zum Bau von Spritzgießwerkzeugen. 3. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1991, ISBN: 3-446-15756-5
- [MenW] *Menz, W., Mohr, J.:* Mikrosystemtechnik für Ingenieure. Zweite, erweiterte Auflage. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1997, ISBN: 3-527-29405-8, S.267-292
- [Mic1] *Michaeli, W., Rogalla, A.:* Spritzgießen von Mikrostrukturen. *F&M 104 Nr.9* (1996) S.641-643
- [Mic2] *Michaeli, W., Greif, H., Kaufmann, H., Vossebürger, F.-J.:* Technologie der Kunststoffe. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1992
- [Mic3] *Michaeli, W., Greif, H., Kretschmar, G., Kaufmann, H., Bertuleit, R.:* Technologie des Spritzgießens. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1993
- [Mic4] *Michaeli, W.:* Kunststoffverarbeitung im Jahr 2000. *KUNSTSTOFFE*, Bd. 85 Heft 10 (1995) S.1685-1696
- [MülC] *Müller, C., Neyer, A., Rogner, A.:* Polymere Komponenten für die Mikrooptik und Integrierte Optik. *Technisches Messen*, Vol.60 No.9 (1993) S.330-338

-
- [MülH] *Müller, H.-H.*: Über die Mikrostruktur und die Eigenschaften von galvanisch abgeschiedenen Nickelschichten. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 5, Nr.115. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987, ISBN: 3-18-141505-7
- [MülJ] *Müller, J., Dahms, U.-P., Mahnke, M., Wunderlich, S.*: Refractive index relaxation in PECVD- and LPCVD-SiON-waveguides on silicon substrates. Proc. ECIO, Delft, The Netherlands, (1995) S.303-308
- [MülL] *Müller, L.*: Polymere für in Abformtechnik hergestellte Integriert-Optische Lichtleiter. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 5, Nr.577. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2000, ISBN: 3-18-357705-4
- [Mün] *Müntefering, D.*: Herstellung mikrostrukturierter Polymersubstrate mit Hilfe von Spritzguß- und Heißprägeprozessen. Diplomarbeit am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Universität Dortmund, 1997
- [Ney1] *Neyer, A., Knoche, T., Müller, L., Lee, P.C., Kim, J.-H., Andrade, M.A., Carvalho, J., Figueiredo, J.L., Leite, A.P.*: Design and Fabrication of Low Loss Passive Polymeric Waveguides Based on Mass Replication Techniques. Proc. ECIO, Neuchâtel, Schweiz, (1993) S.9-10/9-11
- [Ney2] *Neyer, A., Knoche, T., Müller, L.*: Fabrication of Low Loss Polymer Waveguides Using Injection Moulding Technology. Electronics Letters, Vol.29 No.4 (1993) S.399-400
- [Ney3] *Neyer, A., Knoche, T., Müller, L., Klein, R.*: Low-loss Passive Polymer Waveguides at 1300 and 1550nm. Proc. POF, Yokohama, Japan, (1994) S.169-171
- [Ney4] *Neyer, A.*: Low-Cost Passive Polymer Devices. Proc. IPR, San Francisco, California, (1994) S.268-270
- [Nök] *Nöker, F., Keydel, L.*: Herstellen von Mikrostrukturkörpern aus Kunststoffen. KUNSTSTOFFE, Bd. 82 Heft 9 (1992) S.798-801
- [Ped] *Pedersen, J., van der Tol, J., Metaal, E.G., Oei, Y.S., Groen, F.H., Demeester, P.*: Adiabatic 3dB-coupler realized on InGaAsP/InP. Proc. ECIO, Delft, The Netherlands, (1995) S.331-334
- [Pev] *Pevec, B.*: Persönliche Mitteilungen von Dr. Bernd Pevec, Devitron GmbH, Labor für Enzymologie und Proteinchemie, Castrop-Rauxel, 1998
- [Pic] *Picard, A., Ehrfeld, W., Löwe, H., Müller, H., Schulze, J.*: Refractive microlense arrays made by contactless embossing. Proc. SPIE, Vol.3135 „Precision Plastic Optics for Optical Storage, Displays, Imaging, and Communications“, San Diego, California (1997) S.96-105

-
- [Pio] *Piotter, V., Hanemann, T., Ruprecht, R., Haußelt, J.:* Injection molding and related techniques for fabrication of microstructures. *Microsystem Technologies* (1997) Springer-Verlag, S.129-133
- [Pom1] *Pompe, G., Lehmacher, S., Rudolph, S., Kalveram, S., Jöhnck, M., Neyer, A.:* Passive fibre alignment to single mode plastic waveguides fabricated by injection moulding. *SPIE Photonic West Vol.3281 „Polymer Photonic Devices“*, San Jose, California (1998) S.37-46
- [Pom2] *Pompe, G., Lehmacher, S., Rudolph, S., Kalveram, S., Jöhnck, M., Neyer, A.:* Technology of hot embossed thermo-optic switches in plastics with passive fibre coupling. *Proc. Plastics in Telecommunications VIII*, London (1998) S.28-35
- [Pom3] *Pompe, G.:* Thermooptische Schalter in polymerer Abformtechnik. Dissertation am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Universität Dortmund. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier-Verlag, 2000, ISBN: 3-89712-787-3
- [Rob] *Robinson, S.D., Anigbo, F.C.J., Shevchuk, G.J.:* Advanced Molding Technique for Optical Tranceivers. *Proc. 46th Electronic Components and Technology Conference* (1996) S.1109-1115
- [Röh1] *n.n.:* Hochwärmeformbeständige Formmasse PLEXIMID, Vorläufige Produktinformation. Technische Kundenberatung, Marketing, Röhm GmbH Darmstadt, (1995)
- [Röh2] *n.n.:* Transmissionskurven PLEXIGLAS-Formmasse. Technische Kundenberatung, Marketing, Röhm GmbH Darmstadt, (1995)
- [Röh3] *n.n.:* Plexiglas-Formmasse Serie VQ, Produktinformation. Technische Kundenberatung, Marketing, Röhm GmbH Darmstadt
- [Röh4] *n.n.:* Plexiglas Formmasse Serie OF, Produktinformation. Technische Kundenberatung, Marketing, Röhm GmbH Darmstadt
- [Röh5] *n.n.:* Plexiglas GS, Plexiglas XT, Produktbeschreibung. Technische Information, Kenn-Nr. 212-1, Röhm GmbH Darmstadt, (1991)
- [Röh6] *Vetter, H.:* PMMI - Herstellung, Eigenschaften, Anwendungen: Pleximid - die Zauberformel für thermoplastische Methacrylate mit hoher Wärmeformbeständigkeit. Sonderdruck/Auszug aus *Spektrum* Nr. 37, Röhm GmbH Darmstadt
- [Roe] *Roetting, O., Hecke, M., Bacher, W.:* Technology for movable microstructures - Transfer of laboratory processes to industrial production. *Microsystem Technologies*, Vol.4 (1998) S.120-121

-
- [Rog] *Rogalla, A.*: Analyse des Spritzgießens mikrostrukturierter Bauteile aus Thermoplasten. 1. Auflage, Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag Aachen, 1998, ISBN: 3-89653-415-7
- [Rot] *Rothe, J.*: Sonderverfahren des Spritzgießens. KUNSTSTOFFE, Bd. 87 Heft 11 (1997) S.1564-1582
- [Rud] *Rudolph, S.*: Herstellung und Charakterisierung von anisotrop geätzten Faserführungsstrukturen und reaktiv geätzten (RIE) Wellenleiterstrukturen auf einem Silizium-Substrat. Diplomarbeit am Lehrstuhl Hochfrequenztechnik der Universität Dortmund, 1993
- [Rup1] *Ruprecht, R., Bacher, W., Haußelt, J.H., Piotter, V.*: Injection Molding of LIGA and LIGA-Similar Microstructures Using Filled and Unfilled Thermoplastics. Proc. SPIE, Vol.2639 (1995) S.146-157
- [Rup2] *Ruprecht, R., Benzler, T., Hanemann, T., Müller, K., Konys, J., Piotter, V., Schanz, G., Schmidt, L., Thies, A., Wöllmer, H., Haußelt, J.*: Various replication techniques for manufacturing three-dimensional metal microstructures. Microsystem Technologies, Vol.4 (1997) S.28-31
- [Ruz] *Ruzzu, A., Fahrenberg, J., Hecke, M., Schaller, Th.*: Multi-functional valve components fabricated by combination of LIGA processes and high precision mechanical engineering. Microsystem Technologies, Vol.4 (1998) S.128-131
- [Sar] *Sarkisov, S., Teague, Z., Taylor, A., Darwish, A., Venkateswarlu, V., Abdeldayem, H., Frazier, D., Adamovsky, G., McCain, J., Keller, G.*: Plastic integrated optical components made by molding, liquid jet delamination, and photoprocessing. Proc. SPIE, Vol.3135 „Precision Plastic Optics for Optical Storage, Displays, Imaging, and Communications“, San Diego, California (1997) S.12-23
- [SchH] *Schift, H., Söchtig, J.*: LIGA-Technology for the fabrication of positioned planar structures. Microsystem Technologies, Vol.4 (1998) S.132-134
- [SchA] *Schösser, A., Tschudi, T., Frank, W.F.*: Fiber-chip-coupling and refractive index profile of UV-generated waveguides in PMMA. Proc. SPIE, Vol.3135 „Precision Plastic Optics for Optical Storage, Displays, Imaging, and Communications“, San Diego, California (1997) S.144-151
- [SchD] *Schönfeld, D., Rösch, O., Dannberg, P., Bräuer, A., Müller-Fiedler, R., Popall, M., Buestrich, R.*: Enhanced performance of polymer waveguides by replication and uv-patterning in ORMOCER. Proc. SPIE, Vol.3135 „Precision Plastic Optics for Optical Storage, Displays, Imaging, and Communications“, San Diego, California (1997) S.53-61

-
- [Sie] *Siepe, D.*: Optimierung der Herstellung von heißgeprägten Mikrostrukturen. Studienarbeit am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Universität Dortmund, 1998
- [Tew] *Tewald, A., Jung, A.*: Dynamische Werkzeugtemperierung beim Spritzgießen. F&M 102 Nr.9 (1994) S.395-400
- [Thi] *Thies, A., Piotter, V., Hausselt, J.H., Hagen, O.F.*: A new method for mass fabrication of metallic microstructures. *Microsystem Technologies*, Vol.4 (1998) S.110-112
- [ThoH] *Thoma, H.*: Spritzgießmaschinenteknik. KUNSTSTOFFE, Bd. 87 Heft 11 (1997) S.1550-1562
- [ThoO1] *Thonemann, O.E.*: Die Herstellung optischer Linsen im „Spritz-Präge-Verfahren“ aus Polymethacrylat. *Plastverarbeiter*, Vol.18 No.9,10und11 (1967) S.619-626,707-714,819-826
- [ThoO2] *Thonemann, O.E.*: Die Herstellung von Fresnellinsen im „Spritz-Präge-Verfahren“ aus Polymethacrylat. *Plastverarbeiter*, Vol.21 No.12 (1970) S.1065-1074
- [Tra] *Trausch, G., Schleith, O.*: Spezielle Spritzgießverfahren, Thermoplastschaumgießen - Spritzprägen. KUNSTSTOFFE, Bd. 63 Heft 10 (1973) S.659-662
- [Tro] *Trommer, D.*: Photonic integration on InP. Proc. ECIO, Delft, The Netherlands, (1995) S.93-98
- [Ulr] *Ulrich, R., Weber, H.P., Chandross, E.A., Tomlinson, W.J., Franke, E.A.*: Embossed Optical Waveguides. *Applied Physics Letters*, Vol.20 No.6 (1972) S.213-215
- [WebH1] *Weber, H.P., Tomlinson W.J., Chandross E.A.*: Organic materials for integrated optics. *Optical and Quantum Electronics*, 7 (1975) S.465-473
- [WebH2] *Weber, H.P., Tomlinson, W.J., Chandross, E.A., Ulrich, R.*: Embossed Integrated Optics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE8 (1972) S.546
- [WebL] *Weber, L.*: Micromolding serves LIGA and other technologies. *Micromachine Devices*, Vol.2 No.1 (1997) S.4-7
- [Wie1] *Wiesmann, R., Müller, L., Klein, R., Neyer, A.*: Low cost polymer-optical ammonia sensor. Proc. ECIO, Delft, The Netherlands, (1995) S.453-456
- [Wie2] *Wiesmann, R., Kalveram, S., Neyer, A.*: Monomode polymer waveguides with integrated mirrors. Proc. ECOC, Oslo, Norway Vol.2 (1996) S.265-269

- [Wie3] *Wiesmann, R., Kalveram, S., Rudolph, S., Jöhnck, M., Neyer, A.:* Singlemode polymer waveguides for optical backplanes. *Electronics Letters*, Vol.32 No.25 (1996) S.2329-2330
- [Wie4] *Wiesmann, R.:* Optische Parallelverbindungen mit Polymerwellenleitern. *VDI-Fortschritt-Berichte*, Reihe 10, Nr.559. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998, ISBN: 3-18-355910-2
- [Woe] *Woebeken, W.:* Orientierungserscheinungen in Preß- und Spritzgußteilen. *KUNSTSTOFFE*, Bd.51 Heft 9 (1961) S.547-562
- [Wol] *Wolf, A., Berg, U., Ehrfeld, W., Lehr, H., Michel, F., Zimmerschitt, N., Gruber, H.:* Feine Sache - Die Mikrofunkenerosion ermöglicht beim Präzisions-spritzguß sehr filigrane Strukturen. *DER ZULIEFERMARKT* (April 1997) S.48-53
- [Zha] *Zhao, X.-M., Xia, Y., Whitesides, G.M.:* Fabrication of Three-Dimensional Micro-Structures: Microtransfer Molding. *Advanced Materials*, Vol.8 No.10 (1996) S.837-840
- [Zie] *Ziemann, O.:* Grundlagen und Anwendungen optischer Polymerfasern. *Der Fernmelde-Ingenieur*, Heft 11+12 (1996) S.1-67

Lebenslauf

Lebenslauf

Stefan Kalveram

- 3.8.1966 geboren in Dortmund-Lütgendortmund
- 1973-77 Marienborn-Grundschule in Dortmund-Lütgendortmund
- 1977-1986 Bert-Brecht-Gymnasium in Dortmund-Kirchlinde
- 1986-1993 Studium der Elektrotechnik an der Universität Dortmund
- 1993 Abschluß als Dipl.-Ing. Elektrotechnik mit einer Diplomarbeit über adiabatische Koppler in polymeren Materialien
- 1994-1998 Wissenschaftlicher Angestellter am Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Fakultät für Elektrotechnik der Universität Dortmund
- seit 1999 Forschungs- und Entwicklungsabteilung, Patient Care, Instrumentation, bei Roche Diagnostics in Mannheim