



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7058

**Werkzeugentwicklung
für das Heißprägen beidseitig
mikrostrukturierter Formteile**

H. Dittrich, M. Hecke, W.K. Schomburg
Institut für Mikrostrukturtechnik

Oktober 2004

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7058

Werkzeugentwicklung für das Heißprägen
beidseitig mikrostrukturierter Formteile

H. Dittrich *), M. Heckeke, W.K. Schomburg

Institut für Mikrostrukturtechnik

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

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2004

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-070589

Werkzeugentwicklung für das Heißprägen beidseitig mikrostrukturierter Formteile

Zur Erlangung des akademischen Grads eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der

Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Harald Dittrich

aus Dortmund

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Juli 2004

Hauptreferent: Prof. Dr. V. Saile

Korreferent: Prof. Dr. W. Schinköthe

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Werkzeug- und Verfahrenskonzept für das beidseitige Heißprägen mikrostrukturierter Formteile vorgestellt. Der Fokus der Untersuchung war dabei auf die Herstellung großflächiger beidseitig mikrostrukturierter Kunststoffsubstrate mit dünnen Restschichten gerichtet, wie sie für Anwendungen in der Mikrooptik und Mikrofluidik in Betracht kommen. Der Bedarf an Einwegkomponenten, zum Beispiel für mikrofluidische Analysechips, erforderte die Entwicklung eines kosteneffizienten Verfahrens mit kurzen Zykluszeiten.

Gegenstand des Werkzeug- und Verfahrenskonzepts war daher die Entwicklung geeigneter Mechanismen für die präzise Ausrichtung der Werkzeughälften, die defektfreie Entformung der großflächigen und in der Regel biegeweichen Formteile sowie die effiziente Temperierung der Werkzeuge zur Minimierung der Zykluszeiten.

Aufbauend auf der Untersuchung der prozesstechnologischen Anforderungen wurde ein Werkzeugaufbau entwickelt und realisiert, der aus zwei symmetrisch aufgebauten Werkzeughälften und einem Positioniertisch besteht. Die Werkzeughälften bestehen jeweils aus einem konstant temperierten Werkzeugrahmen, einem zyklisch temperierten Werkzeugeinsatz minimierter Masse sowie einem konstant temperierten Kühlblock. Der Werkzeugeinsatz wird während der Heizphase von dem Kühlblock thermisch getrennt, so dass kurze Aufheizzeiten erreicht werden. Während der Präge- und Abkühlphase wird der Werkzeugeinsatz mit dem Kühlblock thermisch gekoppelt, so dass ihm die Wärme schnell entzogen wird. Aufgrund der Zeitanteile für das Heizen und Kühlen des Werkzeugs im Prägeprozess, wird durch diese Maßnahme eine maßgebliche Verkürzung der Zykluszeit erzielt.

Die Werkzeughälften verfügen darüber hinaus über Halbzeugspannplatten, welche das Halbzeug während des Erwärmungs- und Abkühlvorganges fixieren und somit Schrumpfung und Schwindung verhindern. Mittels eines Entformantriebs können die Halbzeugspannplatten präzise und unabhängig von der Werkzeugöffnungsbewegung verfahren werden. Hierdurch kann das Halbzeug an die Formeinsätze angelegt werden bzw. zur Entformung von diesen getrennt werden. Separate Vakuum- und Druckluftanschlüsse in Ober- und Unterwerkzeug erlauben in der Kavität die unabhängige Evakuierung und getrennt regelbare Druckgasbeaufschlagung der Ober- und Unterseite des Halbzeugs, so dass eine druckluftunterstützte Entformung realisiert werden kann. Auf diese Weise können die genannten großflächigen beidseitig mikrostrukturierten Formteile entformt werden.

Der Positioniertisch verfügt über eine Luftlagerung und Biegeelenkführungen, wodurch reibungs- und führungsspielbedingte Einflüsse auf den Positioniervorgang vermieden werden. Die Piezoaktork des Tisches erlaubt in Verbindung mit einer in den Werkzeugrahmen integrierten hochauflösenden Sensorik die präzise Ausrichtung der Werkzeughälften.

Das Werkzeug und der Positioniertisch wurden in einer Versuchsanlage in Betrieb genommen. Es ist gelungen, Mikrotiterplatten als Demonstratoren für großflächige beidseitig mikrostrukturierte Formteile durch Heißprägen herzustellen. Die hierbei erzielten Zykluszeiten betragen 4 Minuten.

Tool Development for Hot Embossing of Double-sided Microstructured Molded Parts

Abstract

In the present dissertation, a tool and process concept for double-sided hot embossing of microstructured molded parts was described. Studies focused on the manufacture of plastic substrates with large surface areas and thin residual layers, which are microstructured on both sides and considered for use in microoptics and microfluidics. Development of a cost-efficient process with short cycle times was deemed necessary to meet the demand for disposable components e.g. for microfluidic analysis chips.

The tool and process concept covered the development of appropriate mechanisms for precise orientation of the tool halves, defect-free demolding of the large-area and usually flexible molded parts, and efficient temperature control of the tools to minimize cycle times.

Based on the process technology requirements determined, a tool setup of two symmetrical tool halves and a positioning table was developed and implemented. The tool halves each consist of a tool frame of constant temperature, a tool insert of minimum mass that is subjected to thermal cycling, and a cooling block kept at constant temperature. During heating, the tool insert is thermally insulated from the cooling block. In this way, short heating times are reached. During the embossing and cooling phase, the tool insert is coupled thermally to the cooling block such that heat can be removed rapidly. As a result of the short times needed for heating and cooling the tool during embossing, cycle time is reduced considerably.

The tool halves are additionally provided with plates, by means of which the semi-finished product is fixed during heating and cooling and shrinkage is avoided. By a demolding drive, the fixing plates can be moved precisely and independently of the tool opening movement. This allows to apply the semi-finished product to the mold inserts or to separate it from them for demolding. Via separate vacuum and pressurized air connections in the upper and lower tool, independent evacuation of the cavity or controlled separate pressurized gas supply to the upper or lower side of the semi-finished product is ensured. In this way, the large-area molded parts that have been microstructured on both sides can be demolded easily.

The positioning table is equipped with an air bearing and flexible joints. Consequently, positioning is not influenced by friction or play of the joints. Precise orientation of the tool halves is achieved by piezoactuators driving the table and high-resolution sensors integrated in the tool frame.

The tool and positioning table were taken into operation in a test facility. Microtiter plates were produced to demonstrate double-sided hot embossing of large-area microstructured molded parts. Cycle times of 4 minutes were reached.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Einordnung des Heißprägeverfahrens in die Gruppe der Mikroabformverfahren	3
2.2	Funktionsprinzip, Verfahrensablauf und Anlagenaufbau	6
3	Prozesstechnologische Anforderungen an das beidseitige Heißprägen	10
3.1	Temperaturverhalten thermoplastischer Kunststoffe	10
3.2	Einflüsse der Formteilgeometrie auf die Umformung	11
3.3	PVT-Verhalten thermoplastischer Kunststoffe bei der Abkühlung	13
3.4	Kraftverhältnisse bei der Entformung	15
4	Entwicklung eines Werkzeugaufbaus für das beidseitige Heißprägen	17
4.1	Werkzeugkonzept	17
4.1.1	Erwärmen	18
4.1.2	Umformen	20
4.1.3	Abkühlen	21
4.1.4	Entformen	21
4.1.5	Schlussfolgerungen für das Werkzeugkonzept	21
4.2	Verfahrenskonzept	23
4.2.1	Erwärmen	23
4.2.2	Umformen	25
4.2.3	Abkühlen	27
4.2.4	Entformen	27
5	Aufbau der Versuchsanlage	29
5.1	Aufbau und Funktion des Werkzeugs	32
5.1.1	Werkzeugtemperierung	39
5.1.2	Simulationsrechnung zur Bestimmung der Aufheizzeiten	41
5.1.3	Evakuierung und Belüftung	45
5.1.4	Spannen des Halbzeugs	45
5.1.5	Erwärmen und Strukturieren des Halbzeugs	46
5.1.6	Entformung	46
5.2	Aufbau und Funktion des Positioniertisches	49
6	Herstellung eines Demonstrators für das beidseitige Heißprägeverfahren	53
6.1	Fertigung der Werkzeugeinsätze	53
6.2	Abformung von Mikrotiterplatten	59
7	Zusammenfassung und Ausblick	64
8	Literatur	67

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 4-1	Übersicht zu den Anforderungen an die Werkzeugtechnik und den Lösungsansätzen für das beidseitige Heißprägen	18
Tab. 5-1	Materialparameter von Messing und Stahl 1.2312, wie sie in der Simulation angenommen wurden	42

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1	Einseitige Strukturierung im Heißprägeverfahren – Funktionsprinzip	6
Abb. 2-2	Schematisierter zeitlicher Ablauf des Heißprägeprozesses	7
Abb. 2-3	Zeitanteile im Prägezyklus am Beispiel eines 16-fach Fasersteckers	8
Abb. 2-4	Technische Daten der Heißpräganlage HEX03et, Jenoptik Mikrotechnik GmbH	9
Abb. 2-5	Schematischer Anlagenaufbau und Komponenten einer Heißprägemaschine zur positionierten Abformung, Typ HEX03et, Jenoptik Mikrotechnik GmbH	9
Abb. 3-1	Modell zwei paralleler Platten zur Beschreibung des Umformvorganges.	12
Abb. 3-2	Modell zur Beschreibung des Umformvorgangs beim beidseitigen Prägen	12
Abb. 3-3	Konzepte zur Dichtung der Kavität von Prägewerkzeugen: Prägewerkzeug in Form eines Abquetschwerkzeug (links) Prägewerkzeug in Form eines Füllraumwerkzeugs (rechts)	13
Abb. 3-4	Darstellung des Prozessablaufs beim Heißprägen im schematisierten PVT-Diagramm eines amorphen Thermoplasten.	14
Abb. 4-1	Erwärmungsarten für Heißprägewerkzeuge A) Reine Öltemperierung B) Elektrische Beheizung und Ölkühlung C) Elektrische Beheizung mit reduzierter thermischer Masse und Öl- oder Wasserkühlung D) wie C) mit induktiver Zusatzheizung	19
Abb. 4-2	Werkzeugkonzept für das beidseitige Heißprägen	22
Abb. 4-3	Verfahrensschritte zur Erwärmung des Halbzeugs	24
Abb. 4-4	Verfahrensschritte zum Umformen des Halbzeugs	26
Abb. 4-5	Verfahrensschritte zur Entformung beidseitig strukturierter Formteile	28
Abb. 5-1	Aufbau der Versuchsanlage, bestehend aus dem Lastrahmen einer Universalprüfmaschine, in den ein zweiteiliges Werkzeug, ein Positioniertisch und ein Entformantrieb eingebaut sind (schematische Darstellung).	29
Abb. 5-2	Aufsicht der unteren Werkzeughälfte (siehe Abb. 4-1, Schnitt A)	30
Abb. 5-3	Steuerungstechnische Verknüpfung der Anlagenkomponenten	30
Abb. 5-4	Heißprägewerkzeug für die beidseitige Mikrostrukturierung. Die Bezeichnungen gelten für beide Werkzeughälften, werden aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nur für eine Werkzeughälfte angeführt.	35
Abb. 5-5	Aufsicht der Grundebene	36
Abb. 5-6	Aufsicht der Formeinsetzträgerenebene	36
Abb. 5-7	Aufsicht der Halbzeugspannebene	37
Abb. 5-8	Einbauraum für Werkzeugeinsatz und „zweites“ Auswerferpaket	37
Abb. 5-9	Gestaltungsvariation des Werkzeugeinsatzes	38
Abb. 5-10	Variation der Auswerferpositionen	38
Abb. 5-11	Temperierung des Werkzeugs	40

Abb. 5-12	Aufbau aus Spannring und Spannringeinsatz. In den Spannringeinsatz eingefräste Nuten bilden getrennte Temperierkanäle für „heißes“ und „kaltes“ Öl. Dadurch kann der Kopfbereich des Spannringes beheizt bzw. der Spannring auf die Temperatur des Werkzeugrahmens temperiert werden. Der Spalt zwischen Spannring und Spannringeinsatz erlaubt die radiale Dehnung des Spannringes.	42
Abb. 5-13	Formeinsatzspannring (FEM-Rechnung)	43
Abb. 5-14	Temperaturverteilung nach 140 Sekunden	44
Abb. 5-15	Temperaturverteilung entlang eines radialen Strahls an der Formeinsatzoberfläche. Aufgetragen für 0 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s und 150 s nach Beginn des Aufheizvorgangs.	44
Abb. 5-16	Querschnitt der Kavität und des umliegenden Werkzeugbereichs gegen Ende der Umformphase (schematisch)	47
Abb. 5-17	Schematischer Ablauf des Entformungsvorganges	48
Abb. 5-18	Aufbau des Positioniertisches	49
Abb. 5-19	Anordnung der Abstandssensoren und der Piezoaktoren im Werkzeug und Positioniertisch	50
Abb. 5-20	Schematische Darstellung des funktionalen Aufbaus des Positioniertisches	52
Abb. 6-1	Werkzeugeinsätze zur Herstellung des Demonstrators	53
Abb. 6-2	Formeinsatz der Werkzeugunterhälfte mit CE-Struktur	54
Abb. 6-3	Formeinsatz der Werkzeuoberhälfte mit Hilfsstrukturen zur Erzeugung dünner Restschichten im Bereich der Befüllöffnungen und Ausgleichsvolumina zur Vereinheitlichung der Strukturvolumenverteilung	55
Abb. 6-4	Bestimmung der Strukturtiefe und Ebenheit der Formeinsätze	56
Abb. 6-5	Laterale Überdeckung der Formeinsatzstrukturen	57
Abb. 6-6	Ansicht der Werkzeuoberhälfte	58
Abb. 6-7	Ansicht der Werkzeugunterhälfte	58
Abb. 6-8	Formteilformate: Im Hintergrund das geprägte Halbzeug. In der rechten Bildhälfte, der aus dem Halbzeug ausgetrennte Kunststoffwafer mit einem Durchmesser von 150 mm. In der linken Bildhälfte die vereinzelt Mikrotiterplatte, eingesetzt in einen Handlingsrahmen.	60
Abb. 6-9	Ausschnittsansicht des Formteils nach der Erwärmung an der oberen Werkzeuhälfte. Mit einem Druck von 2 bar konnte die Folie faltenfrei und vollflächig an den Formeinsatz angelegt werden.	60
Abb. 6-10	Im beidseitigen Heißprägeverfahren strukturierter Kunststoffwafer mit einem strukturierbaren Durchmesser von 150 mm. Zentrisch angeordnet ist die Mikrotiterplatte, die in der nachfolgenden Bearbeitung herausgetrennt wird. Im Außenbereich sind die Hilfsstrukturen zu erkennen, welche dazu dienen eine periodische Volumenverteilung über der Formeinsatzoberfläche zu erhalten.	61
Abb. 6-11	Detailansichten der abgeformten Kreuzungsstrukturen mit einem Eckenradius von 150 μm (linke Bildhälfte) und einem Eckenradius von 50 μm (rechte Bildhälfte)	62
Abb. 6-12	Detailansicht zweier Kanalstrukturen	62
Abb. 6-13	Restschicht als Sollbruchstelle in einer Durchlochstruktur	63

1 Einleitung

Der Erfolg der Silizium-basierten Mikrotechnik beruht auf ihrer Verwandtschaft zur Mikroelektronik, die den Weg zur kostengünstigen Massenfertigung auch hochkomplexer Komponenten aufgezeigt hat. Neben Si-Mikrobauteilen werden jedoch mit hohen Zuwachsraten auch Mikrokomponenten aus Kunststoff verlangt. Dies liegt beispielsweise daran, dass Anwendungen in der Mikrofluidik und Mikrooptik von den spezifischen Materialeigenschaften der Kunststoffe wie Biokompatibilität und hohe optische Transparenz profitieren. Darüber hinaus zeichnet sich diese Werkstoffklasse durch geringe Materialkosten aus und bietet für die mikrotechnische Konstruktion einen weitreichenden Gestaltungsspielraum.

Aus dem Makrobereich ist bekannt, dass Kunststoffkomponenten durch Abformverfahren wie Spritzguss und Prägen in der automatisierten Fertigung kostengünstig hergestellt werden können. Es liegt daher nahe, diese Verfahren auf den Mikrobereich zu übertragen. Bisher ist es allerdings vor allem für das Heißprägen noch nicht gelungen, dies mit der notwendigen Kosteneffizienz umzusetzen. Schwierigkeiten liegen unter anderem darin, dass die Befüllung von mikrostrukturierten Werkzeugen eine dynamischen Temperierung der Werkzeuge erfordert, woraus unverhältnismäßig lange Zykluszeiten resultieren. Zudem stellt die defektfreie Entformung mikrostrukturierter Formteile hohe Anforderungen an die Werkzeugtechnik, um den erforderlichen spiel- und versatzfreien Bewegungsablauf sicherzustellen. Deshalb müssen neue Werkzeugkonzepte entwickelt werden, um eine schnellere Temperierung der Werkzeuge zu erreichen und die defektfreie Entformung durch entsprechende Mechanismen sicherzustellen.

Im Mikrobereich hat man für die Spritzgusstechnik bereits Konzepte für eine Reduzierung der Zykluszeiten und ein automatisiertes Formteilhandling entwickelt. Dazu gehören effiziente Temperierungstechniken [Schi03] und die Herstellung von Kunststoffkleinteilen im Verbund [Webe99]. Für das Heißprägen sind dagegen Konzepte für eine kosteneffiziente automatisierte Fertigung noch nicht ausreichend entwickelt worden. Beispiele für Mikrostrukturkomponenten, die besonders vorteilhaft im Heißprägeverfahren hergestellt werden könnten, sind kunststoffbasierte mikrofluidische Systeme für die biomedizinische Diagnostik und die pharmazeutische Analytik, die sich unter der Bezeichnung „Lab-on-a-chip“ und „Micro Total Analysis Systems (μ TAS)“ in der Entwicklung befinden. Diese Systeme bestehen aus einem dünnen großflächig strukturierten Kunststoffsubstrat, auf dem Mikrokanalstrukturen für den Transport und das Handling kleiner Probenvolumina mit elektrischen Funktionsstrukturen für die Steuerung der Flüssigkeitsströme und den Nachweis darin enthaltener Substanzen integriert sind. Da diese Substrate als sogenannte „disposables“ nur für den einmaligen Gebrauch gedacht sind, erfordert ihre Fertigung besonders niedrige Herstellungskosten.

Diese Kunststoffsubstrate werden derzeit beim Prägen vorwiegend einseitig strukturiert. Um den Funktionsumfang der mikrofluidischen Systeme zu erhöhen, ist bereits heute der Bedarf an beidseitig strukturierten Substraten abzusehen. Ziel der Arbeit ist, das Heißprägeverfahren zur Herstellung großflächiger beidseitig mikrostrukturierter Kunststoffsubstrate mit kurzen Zykluszeiten weiterzuentwickeln. Hierfür wird ein neues Werkzeugkonzept für das beidseitige Prägen erstellt und in einem dazu entwickelten Versuchswerkzeug umgesetzt. Gegenstand des Konzepts sind vor allem die Entwicklung geeigneter Mechanismen für die defektfreie

Entformung, eine optimierte Ausrichtung der Formwerkzeuge und Maßnahmen zur Erzielung kurzer Zykluszeiten für die Herstellung größerer Stückzahlen. Die Machbarkeit des Verfahrens wird am Beispiel einer Mikrotiterplatte für das Hochdurchsatz-Screening in der pharmazeutischen Industrie demonstriert.

Im Weiteren gliedert sich die Arbeit in 6 Kapitel:

Kapitel 2 stellt zunächst den Stand der Technik und die Verfahrensgrundlagen dar.

Kapitel 3 analysiert die prozesstechnologischen Anforderungen, die beim Übergang vom einseitigen auf das beidseitige Heißprägen beachtet werden müssen.

Kapitel 4 skizziert ein Verfahrenskonzept für das beidseitige Prägen, welches als Basisverfahren für die Fertigung des Demonstrators eingesetzt werden soll.

Kapitel 5 beschreibt den Aufbau der Versuchsanlage. Hierbei werden der konstruktive Aufbau sowie die Auslegung des Werkzeugs und des Positioniertisches erläutert.

Kapitel 6 stellt die Ergebnisse der Voruntersuchungen zur Funktion der Versuchsanlage und die Fertigung des Demonstrators dar.

Kapitel 7 fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf Ansätze für die weitere Entwicklung des Verfahrens.

2 Stand der Technik

Die folgende Darstellung ordnet zunächst das Heißprägeverfahren in die Gruppe der Mikroabformverfahren ein. Hieran schließt sich eine Beschreibung des Funktionsprinzips, Anlagenaufbaus und Verfahrensablaufs an.

2.1 Einordnung des Heißprägeverfahrens in die Gruppe der Mikroabformverfahren

Die Herstellung von Mikrostrukturen durch Kunststoffabformverfahren für technische Anwendungen ist seit etwa 25 Jahren bekannt [Gale78] und entspricht zum Beispiel dem Stand der Technik bei der Produktion von Compact Discs in der industriellen Anwendung [Zimm04].

Compact Discs zeichnen sich ebenso wie prismatische Strukturen für die Bildschirmhinterleuchtung oder Prägehologramme für Sicherheitsanwendungen dadurch aus, dass die Mikrostrukturen eine geringe Strukturtiefe und gleichzeitig ein Aspektverhältnis – der Quotient aus Strukturtiefe und typischer lateraler Dimension – geringer 1 aufweisen. Für derartige Komponenten stehen heute industrielle Prozesse wie das Spritzgießen und das Walzenprägeverfahren (roll embossing) [Kieß97] zur Verfügung.

Davon zu unterscheiden sind Mikrostrukturkomponenten, wie sie beispielsweise für mikrooptische Freistrahlsysteme benötigt werden, bei denen Spiegel und Reflexionsgitter monolithisch auf einem Kunststoffsubstrat abgeformt werden [Goet92]. Die Strukturen dieser Komponenten besitzen typischerweise eine Höhe von bis zu mehreren hundert Mikrometern und erreichen Aspektverhältnisse größer 10. Die Abformung derartiger Komponenten erfordert auch heute noch die Entwicklung industriell einsetzbarer Prozesse sowohl für die Herstellung der Abformwerkzeuge als auch für die Abformung selbst.

Eine Basis-Technologie für diesen Zweck ist die LIGA-Technologie [Beck86] [Men97]. Mit ihr sind Mikrostrukturen realisierbar, deren minimale laterale Abmessungen im Mikrometerbereich bei maximalen Strukturhöhen von mehreren hundert Mikrometern liegen. Das Aspektverhältnis kann dabei Werte von 200 erreichen. Hierbei werden als wesentliche Strukturierungsmethoden die Lithographie mit Synchrotronstrahlung, die Galvanoformung und die Abformung in Kunststoff genutzt.

In diesem Zusammenhang wurde am Forschungszentrum Karlsruhe Anfang der 1980er Jahre erstmals die Abformung von Mikrostrukturen mit einem Aspektverhältnis von 100 untersucht. Mit dem Ziel, Trenndüsenelemente zur Trennung gas- und dampfförmiger Gemische in großer Stückzahl herzustellen, wurde neben den Verfahren zur Herstellung metallischer Werkzeuge zunächst ein Vakuumreaktionsgießprozess entwickelt und 1982 von Becker et al. zum Patent [Beck84] angemeldet. Dieser Prozess wurde gewählt, weil die geringe Viskosität der Schmelze die problemlose Befüllung der filigranen Mikrostrukturen erlaubt [Hagm89].

Bei diesem ersten Verfahren wurden die Kunststoffmikrostrukturen zunächst formschlüssig auf einer metallischen, das heißt elektrisch leitfähigen Angussplatte hergestellt, um die

Kunststoffmikrostrukturen in dem sich anschließenden Galvanikprozess in die komplementäre Nutzstruktur aus Nickel umkopieren zu können.

In den Folgejahren wurden zu diesem Zweck weitere Verfahren entwickelt, welche mit Hilfe einer Kombination aus elektrisch leitfähigen Abformmassen bzw. elektrisch leitfähigen Metallschichten und isolierenden Abformmassen die notwendige Trennung zwischen elektrisch leitfähigem Strukturgrund und nicht leitfähigen Strukturseitenwänden in einem Kunststoffteil realisierten [Ehrf86] [Bach91]. Hierbei erwies sich das Prägen als vorteilhaft, wobei es sich in diesem Fall um das Einpressen eines mikrostrukturierten Werkzeugs in einen Schichtverbund aus elektrisch isolierender und elektrisch leitfähiger Abformmasse handelte.

Im weiteren Verlauf der Entwicklungen wurden am Forschungszentrum Karlsruhe verschiedene Varianten des Prägeverfahrens realisiert und patentiert. Neben der Herstellung galvanisierbarer flächiger Kunststoffmikrostrukturen dienen diese Verfahrensvarianten zur Herstellung von reinen Kunststoffbauteilen sehr kleiner Abmessungen [Bach93] sowie zum Herstellen von Mikrostrukturelementen auf vorstrukturierten Substraten [Mich95], wie zum Beispiel CMOS-Wafern.

Begrifflich wurden diese Verfahrensvarianten zeitweise als Vakuumpräge- und Warmumformverfahren bezeichnet, ehe seit 1998 einheitlich der Begriff Heißprägen (engl. hot embossing) gewählt wird. Basierend auf einer am Forschungszentrum Karlsruhe Mitte der 90er Jahre entwickelten Laboranlage hat die Jenoptik Mikrotechnik GmbH, Jena, die Prägemaschinenbaureihe HEX 01 bis 03et im Jahr 1999 zur Marktreife gebracht.

Seither hat das Heißprägen eine weites Anwendungsspektrum erlangt und bildet heute zusammen mit dem Spritzgießen und dem Vakuumreaktionsgießen die Gruppe der Standardverfahren der Mikroabformtechnik [Ehrf01] [Heck04]. Varianten dieser Standardverfahren, wie das UV-Prägen [Dann99] und das Spritzprägen [Fried99], kombinieren deren technologischen Vorteile. Unter der Bezeichnung Hot Embossing Lithography [Schi02] wird das Heißprägen heute außerdem als ein Verfahren der Nanoimprint-Techniken für die Nanostrukturierung von extrem dünnen Kunststoffschichten auf Siliziumsubstraten entwickelt. Die erzeugten Strukturen dienen in der Hauptsache als Ersatz für photolithographisch strukturierte Masken in nachfolgenden Ätz- und Dünnschichtprozessen.

Das Heißprägeverfahren zeichnet sich hinsichtlich seines Einsatzspektrums durch folgende Vorteile aus:

- Das Heißprägen ist eine auch bei kleinen Losgrößen und häufigem Wechsel des Kunststoffs gut beherrschbare und aufgrund des einfachen Werkzeugaufbaus kostengünstige Technologie.
- Die gegenwärtig kommerziell verfügbare Anlagengeneration erlaubt mit Werkzeugtemperaturen bis 320 °C die Verarbeitung nahezu aller thermoplastischer Kunststoffe einschließlich der Hochleistungskunststoffe, wie Polysulfon (PSU) und Polyetheretherketon (PEEK). Hierbei werden vorwiegend ungefüllte Kunststoffe verarbeitet.

- Der Formgebungsprozess zeichnet sich durch geringe Scherbeanspruchungen und eine sehr gleichmäßige Druckverteilung in der Kunststoffschmelze aus. Hieraus resultieren Formteile, die ein geringes Maß innerer Spannungen und geringe Verzüge aufweisen.
- Vor allem dünne großflächige Formteile können im Heißprägeverfahren vorteilhaft hergestellt werden, da folien- oder plattenförmige Halbzeuge verwendet werden können.

Nachteilig sind bis heute allerdings die langen Zykluszeiten zwischen 15 und 30 Minuten, weil das Verfahren zwingend die zyklische Temperierung des Werkzeugs (variotherme Prozessführung) zwischen der Entformtemperatur und Umformtemperatur des Kunststoffs erfordert.

Bereits heute besteht beispielsweise in der Mikrooptik und Mikrofluidik der Bedarf nach beidseitig strukturierten Formteilen in Form von Linsenarrays, Gehäuseteilen für mikrofluidische Pumpen und Drucksensoren sowie Mikrotiterplatten. Heißprägewerkzeuge verfügen heute allerdings noch nicht über die Entformvorrichtungen, die für das beidseitige Heißprägen erforderlich sind. Beim einseitigen Heißprägen kann für die Entformung das Anhaften des Formteils an der unstrukturierten Gegenplatte genutzt werden. Deshalb kommt es für das beidseitige Heißprägen vor allem darauf an, geeignete Entformvorrichtungen in das Heißprägewerkzeug zu integrieren. Darüber hinaus müssen die Mikrostrukturen beider Formeinsätze präzise zueinander ausgerichtet werden, um die erforderliche Überdeckung der Mikrostrukturen beider Formteilseiten zu erzielen. Bei der Entwicklung eines Werkzeug- und Verfahrenskonzepts für das beidseitige Heißprägen müssen daher geeignete Entformmechanismen und die optimierte Ausrichtung der Formwerkzeuge im Mittelpunkt der Betrachtung stehen. Darüber hinaus gilt es, die bislang im einseitigen Heißprägen herrschenden langen Zykluszeiten durch effizientere Temperierungstechniken zu verkürzen, um den Weg in die automatisierte Fertigung aufzuzeigen.

2.2 Funktionsprinzip, Verfahrensablauf und Anlagenaufbau

Das Funktionsprinzip des Heißprägeprozesses basiert auf der Umformung eines thermoplastischen Kunststoffhalbzeugs zu einem Formteil mit Hilfe eines formgebenden Werkzeugs bei Temperaturen typischerweise zwischen 50 K und 100 K oberhalb der materialspezifischen Glasübergangstemperatur. Die Erwärmung und Abkühlung des Kunststoffs erfolgen durch Wärmeleitung über den Kontakt mit dem zyklisch temperierten Formwerkzeug. Der erforderliche Druck zur Befüllung der Werkzeugstrukturen wird durch die Schließbewegung des Werkzeugs aufgebracht. Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen wird der Werkzeughohlraum vor Prozessbeginn evakuiert.

Bei der einseitigen Strukturierung im Heißprägeverfahren, siehe Abbildung 2-1, besteht der formgebende Teil des Werkzeugs aus einem mikrostrukturierten Formeinsatz (auch Stempel oder Formplatte genannt) und einer unstrukturierten Gegenplatte (auch Substrat-, Träger- oder Grundplatte genannt). Die Gegenplatte besitzt in der Regel eine physikalisch und/oder chemisch modifizierte Oberfläche, so dass der Kunststoff zu dieser während des Prozesses eine haftfeste, jedoch wiederlösbare Verbindung eingeht. Somit können die zur Trennung zwischen Formeinsatz und Kunststoff erforderlichen Entformkräfte ganzflächig auf das meist biegeeweiche Formteil übertragen werden.

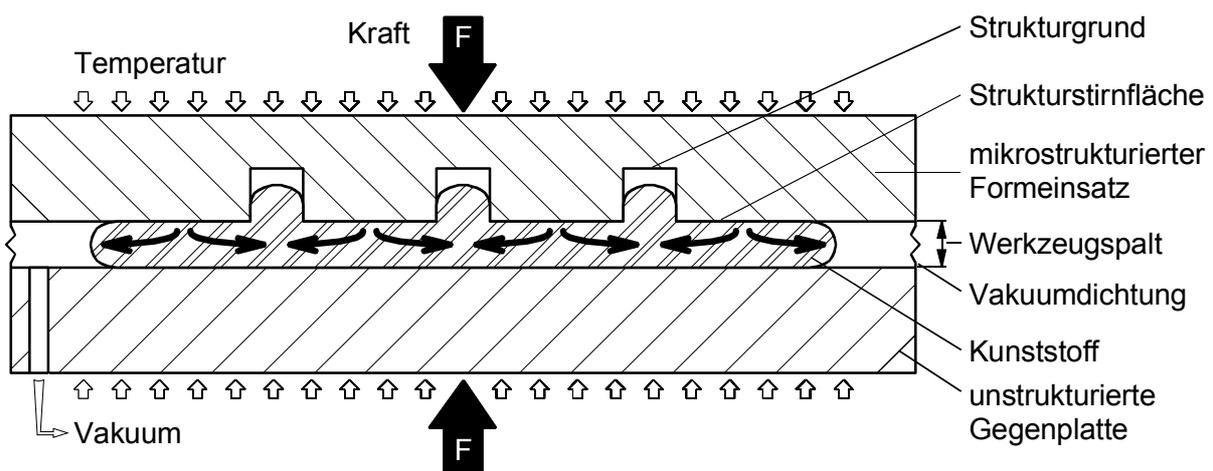


Abb. 2-1 Einseitige Strukturierung im Heißprägeverfahren – Funktionsprinzip

Die maßgeblichen Parameter des Heißprägeprozesses sind die Werkzeugtemperatur, die Schließkraft des Werkzeugs und der Werkzeugspalt als Maß für den Fortschritt des Prägeprozesses. Die zeitlichen Verläufe dieser Parameter sind in Abbildung 2-2 schematisch dargestellt.

Der Verfahrensablauf zeichnet sich durch die folgenden Verfahrensschritte aus:

- Erwärmen und Umformen

Zu Prozessbeginn wird das Werkzeug evakuiert und bis zur Umformtemperatur T_U erwärmt, so dass das Kunststoffhalbzeug den fließfähigen Zustand annimmt ($t_0 \rightarrow t_1$). Während der anschließenden Schließbewegung des Werkzeugs wird der Formeinsatz mit konstanter Prägegeschwindigkeit in das Halbzeug eingedrückt ($t_1 \rightarrow t_2$). Dabei wird der Kunststoff aus den Bereichen der erhabenen Strukturstirnflächen lateral

verdrängt und befüllt – dem Druckanstieg entsprechend – die vertieften Bereiche bis zum Strukturgrund. Mit zunehmender Ausbreitung des Kunststoffes zwischen Formeinsatz und Gegenplatte sowie der abnehmenden Werkzeugspaltweite steigt der Schließkraftbedarf stark an, so dass sich die Schließbewegung bei Erreichen der vorgegebenen Prägekraft und während der Krafthaltephase ($t_2 \rightarrow t_3$) deutlich verlangsamt.

- Abkühlen

Unter Beibehaltung der Prägekraft wird das Werkzeug auf die Entformtemperatur T_E knapp unterhalb der Glasübergangstemperatur abgekühlt ($t_3 \rightarrow t_4$). Dadurch erhält der Kunststoff eine ausreichende Festigkeit, um die zur Trennung zwischen Formeinsatz und Formteil erforderlichen Entformkräfte ohne plastische Deformation der Mikrostrukturen übertragen zu können. Der gegen Ende der Abkühlung verbliebene Restspalt zwischen Formeinsatz und Gegenplatte ist charakteristisch für den Prozess und führt zur sogenannten Restschicht an geprägten Formteilen.

- Entformung

Zur Entformung wird das Werkzeug um den Entformweg geöffnet. Dabei wird zunächst die Schließkraft abgebaut und die Entformkraft aufgebaut. Ist die Losbrechkraft – die maximale Entformkraft zur Überwindung der anfänglichen Haftkräfte – erreicht (t_5), erfolgt die Trennung zwischen Formteil und mikrostrukturiertem Formeinsatz ($t_5 \rightarrow t_6$). Anschließend wird die Werkzeugtemperatur bis zur Entnahmetemperatur abgesenkt, das Werkzeug belüftet und vollständig geöffnet ($t_6 \rightarrow t_7$). In diesem Zustand wird das Formteil manuell von der Gegenplatte gelöst. Es schließt sich der nächste Prägezyklus an.

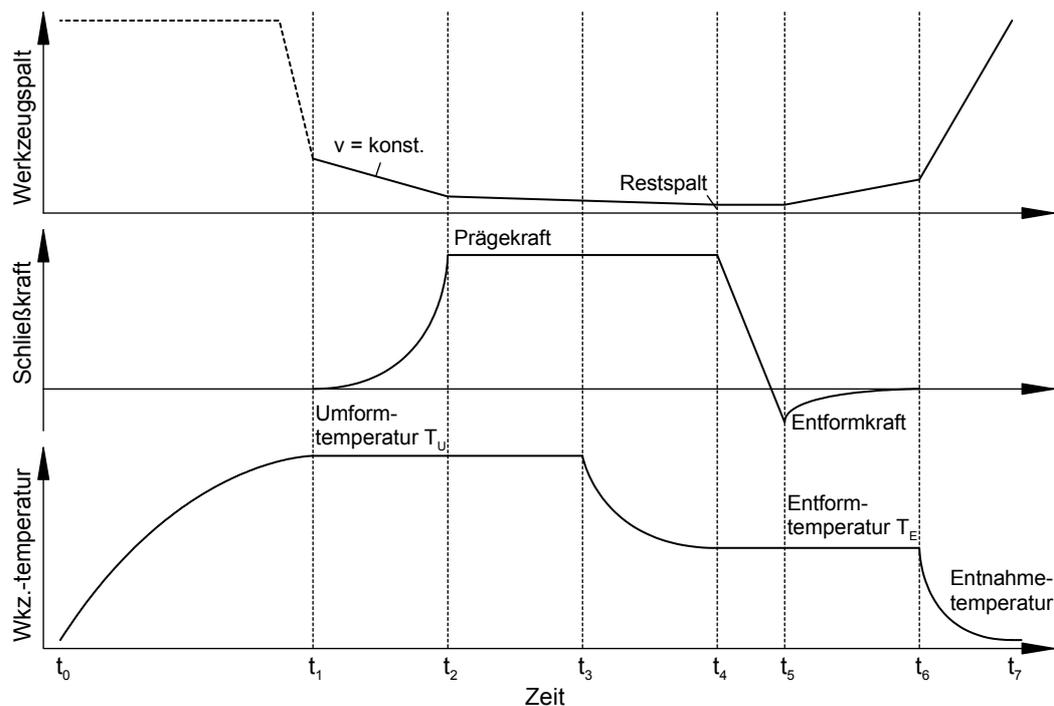


Abb. 2-2 Schematisierter zeitlicher Ablauf des Heißprägeprozesses

Die Verfahrensschritte und ihre Zeitanteile im Prägezyklus sind in Abbildung 2-5 exemplarisch für das Prägen eines Fasersteckers dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die Gesamtzykluszeit wesentlich durch die Zeitanteile zum Beheizen und Abkühlen der Heiz-/Kühlplatten und Formeinsätze bestimmt wird. Daraus folgt, dass im wesentlichen die Heiz- und Kühlzeiten reduziert werden müssen, um kurze Zykluszeiten zu erzielen.

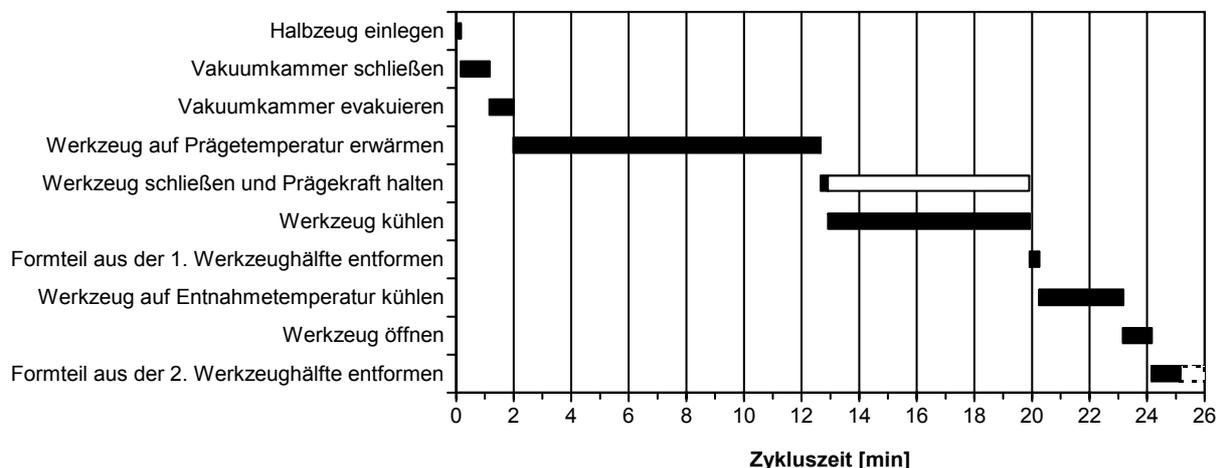


Abb. 2-3 Zeitanteile im Prägezyklus am Beispiel eines 16-fach Fasersteckers

Den Anlagenaufbau und die wichtigsten technischen Daten einer Heißpräganlage zeigen Abbildungen 2-3 und 2-4 am Beispiel der Heißpräganlage HEX03et der Jenoptik Mikrotechnik GmbH. Die Hauptbestandteile der Heißpräganlage sind eine hochgenaue Presse und zwei Heiz-/Kühlplatten, welche die Aufnahme von Formwerkzeugen mit Durchmessern bis 150 mm gestatten. Zur Evakuierung der Formeinsatzstrukturen werden die Heiz-/Kühlplatten von einer Vakuumkammer umgeben.

- Die Presse verfügt über einen steifen Lastrahmen mit vier Führungssäulen auf den die fahrbare Traverse über spielfreie Gleitführungen bewegt werden kann. Ein servoelektrischer Antrieb erlaubt ruckfreie Schließ-/Öffnungsbewegungen mit geringen Geschwindigkeiten und hoher Regelgenauigkeit. Die Schließkräfte werden dabei über eine hochauflösende Kraftmessdose erfasst. Mittels zweier Keilfehlerausgleichsvorrichtungen können die Heiz-/Kühlplatten senkrecht zu den Führungssäulen des Lastrahmens und parallel zueinander ausgerichtet werden.
- Die Beheizung und Kühlung erfolgen, für beide Heiz-/Kühlplatten getrennt, mittels elektrischer Heizpatronen bzw. über einen in die Platten integrierten Temperierölkreislauf.
- Als Sonderausstattung verfügt die Anlage über einen Positioniertisch und ein Messmikroskop. Diese erlauben, den Formeinsatz zu einem vorstrukturierten Substrat oder, wie beim beidseitigen Prägen, zwei Formeinsätze zueinander auszurichten.



Abb. 2-4 Technische Daten der Heißpräganlage HEX03et, Jenoptik Mikrotechnik GmbH

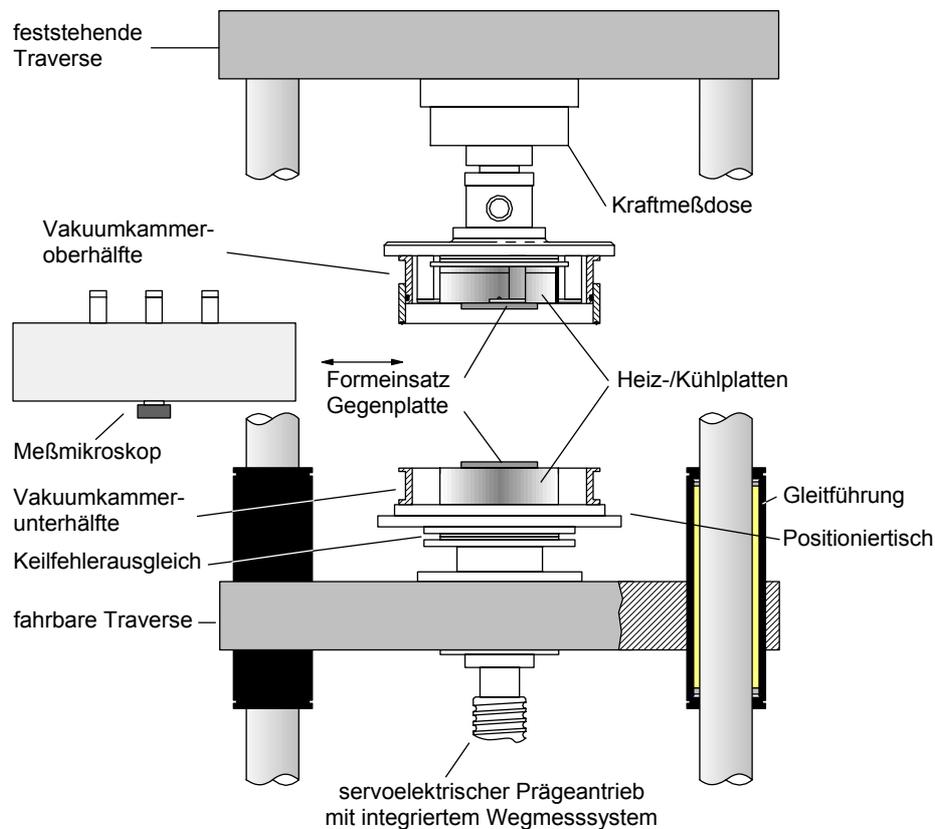


Abb. 2-5 Schematischer Anlagenaufbau und Komponenten einer Heißprägemaschine zur positionierten Abformung, Typ HEX03et, Jenoptik Mikrotechnik GmbH

3 Prozesstechnologische Anforderungen an das beidseitige Heißprägen

Im Folgenden werden die prozesstechnologischen Anforderungen aufgezeigt, die für die Umsetzung des beidseitigen Prägens zu berücksichtigen sind. Hieraus werden jeweils Schlussfolgerungen für die Konzeption des Werkzeugs und das Verfahrenskonzept für das beidseitige Prägen gezogen. Dabei richtet sich der Fokus der Untersuchung auf die Voraussetzungen zur Herstellung großflächiger Kunststoffformteile, weil diese im beidseitigen Heißprägeverfahren besonders vorteilhaft hergestellt werden können und beispielsweise im Bereich der Mikrofluidik und Mikrooptik für eine automatisierte Fertigung in Betracht kommen. Dünne Restschichten werden in diesem Zusammenhang besonders berücksichtigt, um durchgehende Öffnungen zwischen den Strukturseiten und Bruchkanten zur Vereinzelung von im Nutzen geprägten Bauteilen zu schaffen.

3.1 Temperaturverhalten thermoplastischer Kunststoffe

Thermoplastische Kunststoffe bestehen aus linearen oder verzweigten Polymeren. Sie erweichen bei Erwärmung bis zur Fließfähigkeit und verfestigen sich beim anschließenden Abkühlen. Dabei durchlaufen sie umkehrbare Zustandsänderungen, wodurch der Prozess beliebig oft wiederholbar ist. Hinsichtlich ihres molekularen Aufbaus ist zwischen zwei Gruppen, den amorphen und den teilkristallinen Thermoplasten zu unterscheiden [Domi98].

Amorphe Thermoplaste zeichnen sich durch die ungeordnete Orientierung langkettiger Kunststoffmoleküle aus und sind bei niedrigen Temperaturen sehr hart und spröde (glasähnlich). Werden sie erwärmt, fällt ihr Schubmodul mit Erreichen der charakteristischen Erweichungs- bzw. Glasübergangstemperatur T_g ab und das Material geht entlang eines breiten Temperaturbereichs in den Zustand des plastischen Fließens über. Innerhalb dieses Temperaturbereichs können sie im Heißprägeverfahren verarbeitet werden. Zu hohen Temperaturen hin wird die Verarbeitbarkeit maßgeblich erst durch den Zersetzungsbereich begrenzt. Die Kunststoffe Polymethylmethacrylat und Polycarbonat weisen diese Charakteristika auf; ihr Verarbeitungstemperaturbereich liegt zwischen etwa 30 °C und 100 °C oberhalb der Glasübergangstemperatur.

Teilkristalline Thermoplaste, wie die Kunststoffe Polyoxymethylen und Polyetheretherketon, besitzen hingegen große Bereiche mit parallel angeordneten Molekülketten. Diese kristallinen Bereiche verleihen dem Werkstoff auch bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur noch eine hohe Festigkeit. Sie ändern ihren Aggregatzustand und damit die wesentlichen mechanischen Eigenschaften in einem sehr schmalen Temperaturbereich von meist nur wenigen Grad Celsius, so dass man von einem Schmelzpunkt T_s spricht. Erst nahe dieses Schmelzpunktes lösen sich die kristallinen Bereiche auf und der Kunststoff verliert seine mechanische Festigkeit. Der einsetzende Abfall des Schubmoduls ist jedoch weitaus ausgeprägter als bei amorphen Thermoplasten, so dass bereits wenige Grad Celsius oberhalb des Schmelzpunktes die niederviskose Schmelze den Druckaufbau im Werkzeug erschwert und zu Klebeffekten führt. Hierdurch wird die Entformbarkeit der Mikrostrukturen

nachteilig beeinflusst. Die Verarbeitbarkeit im Heißprägeverfahren ist daher auf ein schmales Temperaturintervall nahe bis knapp oberhalb des Schmelzpunktes begrenzt.

Als Fazit ist festzuhalten, dass amorphe und teilkristalline Thermoplaste deutlich verschiedene Anforderungen an die Werkzeugtemperierung stellen. Amorphe Thermoplaste bieten einen weiten Spielraum, innerhalb dessen die Verarbeitungstemperatur an die jeweiligen Prozessanforderungen angepasst werden kann. Die Verwendung teilkristalliner Hochtemperaturkunststoffe hingegen stellt aufgrund des geringen zulässigen Verarbeitungstemperaturintervalls hohe Anforderungen an die dynamische Werkzeugbeheizung, um die erforderliche gleichmäßige Temperaturverteilung an der Werkzeugoberfläche zu erzielen.

3.2 Einflüsse der Formteilgeometrie auf die Umformung

Bei beidseitig mikrostrukturierten Formteilen sind durchgehende Öffnungen zur elektrischen und fluidischen Kontaktierung erforderlich. Diese durchgehenden Öffnungen sind im Heißprägeverfahren nicht herstellbar. Erzeugt man dagegen dünne Restschichten, lassen sich diese in einer Nachbearbeitung entfernen, so dass die erforderlichen durchgehenden Öffnungen entstehen. Im Folgenden werden die Zusammenhänge erläutert, die bei der Umformung großflächiger Halbzeuge zu Formteilen mit dünnen Restschichten berücksichtigt werden müssen. In einem ersten Schritt wird dazu ein einfaches Modell zur Beschreibung des Umformvorganges zwischen zwei parallelen Platten vorgestellt. In einem zweiten Schritt wird dieses Modell auf die Verhältnisse bei der Umformung im beidseitigen Heißprägeverfahren übertragen. Daraus werden Schlussfolgerungen für die Halbzeugauswahl und das Werkzeugkonzept gezogen.

Untersuchungen zur Modellbeschreibung des Umformvorgangs im Heißprägeverfahren waren bereits Gegenstand verschiedener Untersuchungen [Mich93] [Worg03], auch speziell für das Prägen sehr dünner Kunststoffschichten [Bara94] [Heyd00] [Sche01]. Als Modell zur Beschreibung des Umformvorganges wird in diesen Untersuchungen das viskose Fließen des Kunststoffs zwischen zwei parallelen Platten behandelt, die zusammengedrückt werden. Dieses Fließen des Kunststoffs wird auch als squeezing flow [Bird77] bezeichnet.

Abbildung 3-1 zeigt diese Anordnung aus zwei runden parallelen Platten zwischen denen die Kunststoffschicht verdrängt wird. Für diese Anordnung kann die Prägegeschwindigkeit $v(t)$ als Funktion des aufgetragenen Drucks p , der momentanen Schichtdicke $h(t)$ und des Radius der Platten zu

$$v(t) \approx \frac{ph(t)^3}{\eta R^2} \quad (3.1)$$

mit: η = Viskosität der Kunststoffschmelze

$h(t)$ = momentane Schichtdicke

berechnet werden.

Hierbei gelten folgende Voraussetzungen:

- die Kunststoffschmelze besitzt ein rein-viskoses Fließverhalten,
- die Kunststoffschmelze ist ein inkompressibles Newton'sches Medium und
- der Durchmesser der Prägefläche $2R$ ist deutlich größer als die momentane Schichtdicke $h(t)$.

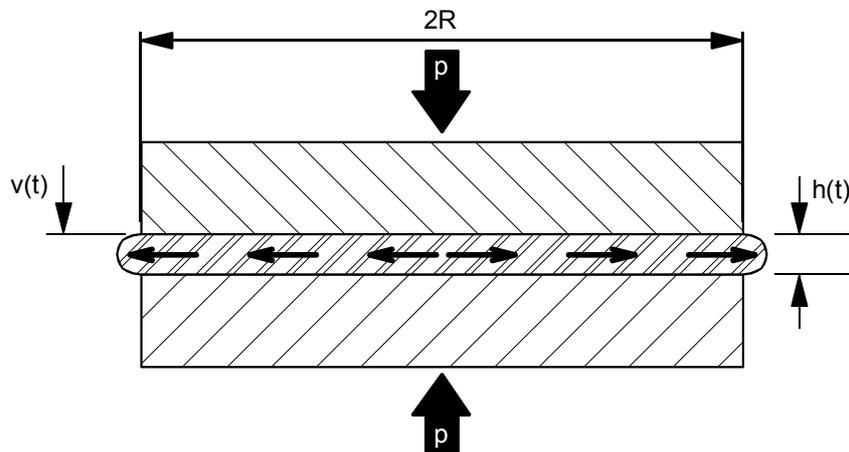


Abb. 3-1 Modell zwei paralleler Platten zur Beschreibung des Umformvorganges.

Wird dieses Modell zweier paralleler Platten auf das beidseitige Prägen mit zwei strukturierten Formeinsätzen übertragen, so ergibt sich die in Abbildung 3-2 schematisch gezeigte Anordnung. In diesem Fall bilden die Strukturstirnflächen der Formeinsätze jeweils für sich eine Anordnung zweier paralleler Platten. Für kreisförmige Strukturen gilt daher ebenfalls die in Gleichung 3.1 genannte Beziehung.

Die von außen aufgebrachte Prägekraft konzentriert sich dabei zunächst auf die Einzelstirnflächen der Strukturen, woraus ein erhöhter lokaler Druck und eine höhere Schließgeschwindigkeit resultieren. Im Falle senkrechter Strukturseitenwände und einer periodischen Verteilung des Strukturvolumens der Formeinsätze vergrößert sich die Prägefläche erst am Ende des Umformvorganges auf die Gesamtfläche des Formteils, wenn der Kunststoff die Strukturvertiefungen bis zum Strukturgrund befüllt hat.

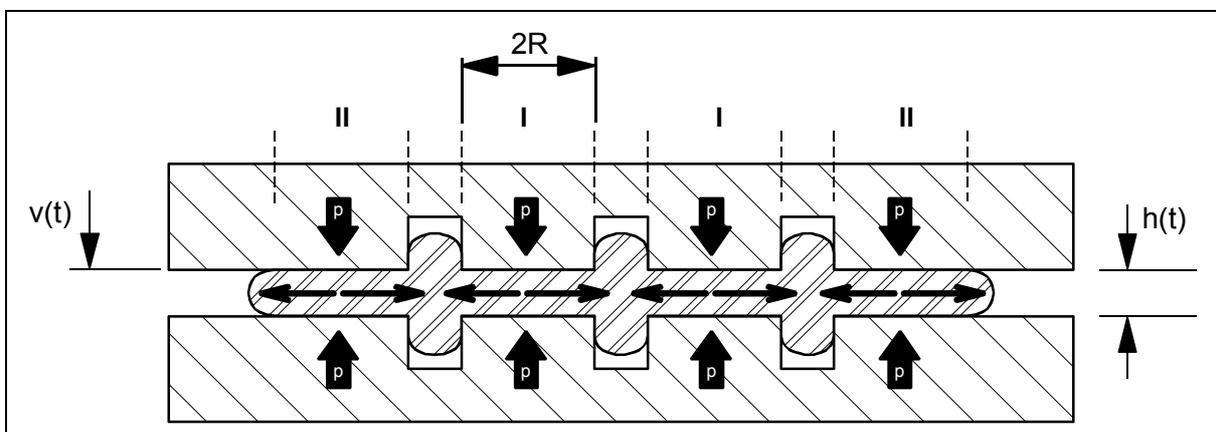


Abb. 3-2 Modell zur Beschreibung des Umformvorganges beim beidseitigen Prägen

Im Falle einer nichtperiodischen Verteilung des Strukturvolumens kommt es bereits während des Umformvorganges zum Zusammenschluss von Teilflächen, so dass die wirksame Prägefläche ansteigt und daraus – im Vergleich zur periodischen Strukturvolumenverteilung – verlängerte Prägezeiten resultieren.

Aus dieser Betrachtung werden folgende Schlussfolgerungen für das beidseitige Heißprägen zur Herstellung großflächiger Formteile mit dünnen Restschichten gezogen:

- Die Stärke der Halbzeuge muss auf das Volumen der Formeinsatzstrukturen so abgestimmt werden, dass mit der Befüllung der vertieften Strukturen auch die angestrebte Restschichtdicke erreicht ist.
- Es ist eine periodische Strukturvolumenverteilung anzustreben, da hierdurch der Werkstofffluss auf den Weg einer Periode begrenzt ist. Daher sollte im Einzelfall geprüft werden, ob die Gestaltung der Formteilstruktur das Einbringen von Hilfsstrukturen zum Volumenausgleich erlaubt.
- Die Formeinsatzstirnflächen der Formeinsätze sollten so klein wie möglich sein. Ohne auf die Formteilstruktur Einfluss zu nehmen, könnte dies durch die Realisierung eines Füllraumwerkzeugs mit einer Tauchkantendichtung, wie es aus dem Spritzprägeverfahren bekannt ist, erreicht werden. Bei diesen Werkzeugen ist der Dichtspalt in Richtung der Schließbewegung angeordnet. Es müsste daher kein Kunststoff aus dem Dichtspalt verdrängt werden (siehe Abbildung 3-3).

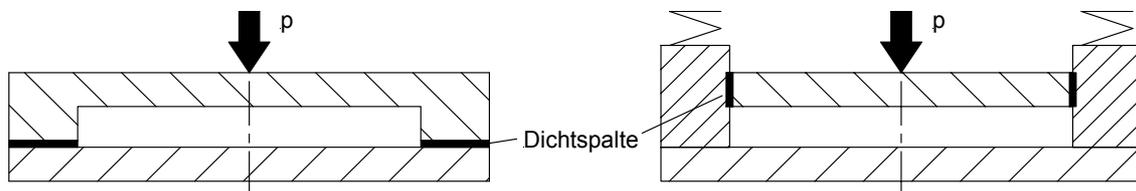


Abb. 3-3 Konzepte zur Dichtung der Kavität von Prägewerkzeugen:
 Prägewerkzeug in Form eines Abquetschwerkzeug (links)
 Prägewerkzeug in Form eines Füllraumwerkzeugs (rechts)

3.3 PVT-Verhalten thermoplastischer Kunststoffe bei der Abkühlung

Die Zustandsänderungen des Kunststoffs während der Abkühlung im Werkzeug können anhand von PVT-Diagrammen dargestellt werden. PVT-Diagramme beschreiben dazu den Zusammenhang zwischen dem Druck und dem spezifischen Volumen des Kunststoffs im Temperaturintervall zwischen der Umformtemperatur und der Raumtemperatur. Ihre Anwendung ist aus dem Spritzgießen [Giss83] und Spritzprägen [Knap84] bekannt und kann auf das Heißprägen ebenfalls übertragen werden.

Abbildung 3-5 zeigt ein schematisiertes PVT-Diagramm für einen amorphen Thermoplasten. Anhand zweier Werkstoffvolumina A und B im Kunststoff sollen die relevanten Merkmale während der Abkühlung erläutert werden. Das Werkstoffvolumen A befindet sich in einer Strukturvertiefung. An dieser Stelle besitzt das Kunststoffformteil seine maximale Dicke D.

Das Werkstoffvolumen B befindet sich in der Restschicht im Bereich der Strukturstirnfläche. Das Formteil weist an dieser Stelle die minimale Dicke d auf.

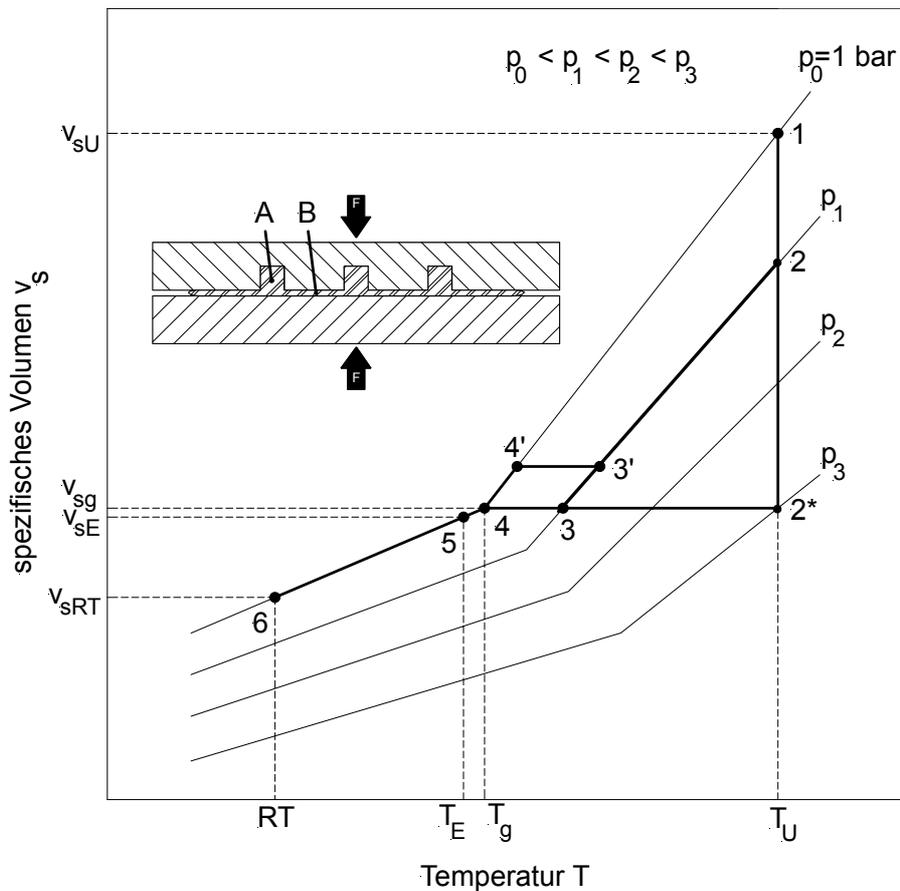


Abb. 3-4 Darstellung des Prozessablaufs beim Heißprägen im schematisierten PVT-Diagramm eines amorphen Thermoplasten.

Der Prozessablauf lässt sich wie folgt beschreiben:

Die im vorhergehenden Abschnitt erläuterte Umformung des Kunststoffes findet bei der Umformtemperatur T_U statt. Dabei wird der Kunststoff mit dem Aufbringen der Prägekräft bis zum Druck p_1 verdichtet ($1 \rightarrow 2$).

Im weiteren Verlauf wird die Prägekräft konstant gehalten und der Kunststoff mit dem Werkzeug abgekühlt. Die Volumenabnahme des Kunststoffes infolge seiner thermischen Kontraktion wird dabei durch das weitere Schließen des Werkzeugs ausgeglichen, so dass der Druck im Kunststoff erhalten bleibt.

Von großer Bedeutung ist im weiteren das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Formteildicke (D/d), da mit diesem die Absolutbeträge der temperaturbedingten Dickenabnahme in den Volumina A und B variieren:

Im Falle eines lediglich oberflächenstrukturierten Formteils mit einem Dickenverhältnis von $D/d \approx 1$ muss die Werkzeugbewegung nur der – über der gesamten Formteifläche konstanten – Dickenabnahme folgen. Da hierzu idealerweise kein Kunststoff lateral verdrängt werden

muss, sind lediglich geringe Schließkräfte zum vollständigen Ausgleich der Volumenabnahme erforderlich.

Mit einem größer werdenden Verhältnis zwischen der maximalen Formteildicke und minimaler Restschichtdicke muss zunehmend Kunststoff aus den Bereichen der Restschicht in die Strukturvertiefungen verdrängt werden, um die unterschiedliche Absolutbeträge der Dickenabnahme auszugleichen. Die hierzu erforderlichen Druckkräfte steigen dabei mit der Abnahme der Temperatur – da diese zu einer Erhöhung der Viskosität führt – und der Abnahme der Restschichtdicke an. Reicht die Prägekraft schließlich für die weitere Verdrängung nicht mehr aus, so verläuft die Abkühlung im weiteren bei konstantem Volumen des Werkzeughohlraums (3 → 4). Die Druckabnahme im Kunststoffvolumen A ist die Folge. Ist die 1 bar Isobare erreicht, beginnt sich der Kunststoff bei der weiteren Abkühlung (4 → 5) innerhalb der Strukturvertiefungen von den Strukturseitenwänden des Formeinsatzes zu lösen, wodurch der Druck und damit die Reibungskräfte zwischen Formteil und Formeinsatz idealerweise entfallen. Das Formteil wird daher knapp unterhalb der Glasübergangstemperatur entformt (5). Nach der Entformung kühlt das Formteil bis zur Raumtemperatur ab (6).

Das Grenzverhältnis zwischen maximaler Formteildicke und minimaler Restschichtdicke eines Formteils ist schließlich dann erreicht, wenn die maximale Schließkraft der Maschine nicht dazu ausreicht, die Isochore (3 → 4) zu erreichen, welche die 1 bar Isobare bei der Glasübergangstemperatur schneidet. Liegt der Schnittpunkt der Isochore mit der 1 bar-Isobare oberhalb der Glasübergangstemperatur, wie im gezeigten Fall (3' → 4'), so führt die weitere Volumenabnahme (4' → 5) zur Verformung der Formteiloberfläche – sogenannten Einfallstellen –, da der Kunststoff noch plastisch deformierbar ist.

Als Fazit lässt sich aus den dargestellten Zusammenhängen schließen, dass die Herstellung beidseitig strukturierter Formteil mit sehr dünnen Restschichten durch ein Grenzverhältnis zwischen maximaler Formteildicke und minimaler Restschichtdicke gekennzeichnet ist. Neben der Möglichkeit, Maschinen mit höheren Schließkräften einzusetzen, die es idealerweise erlauben, die schwindungsbestimmende Isochore ohne isobares Nachprägen zu erreichen, siehe 1 → 2*, kann die erzielbare minimale Restschichtdicke durch eine Reduzierung der Restschichtfläche erreicht werden. Ohne das Strukturlayout zu beeinflussen wäre dies dadurch erreichbar, dass die Fließspaltdichtung durch eine Tauchkantendichtung ersetzt wird. Damit erweist sich die Tauchkantendichtung sowohl für die Herstellung großflächiger Formteile als auch für solche mit dünnen Restschichten im beidseitigen Heißprägeverfahren als vorteilhaft.

3.4 Kraftverhältnisse bei der Entformung

Bei der einseitigen Strukturierung im Heißprägeverfahren wird das Formteil mit der Werkzeugöffnungsbewegung aus dem mikrostrukturierten Formeinsatz entformt. Die erforderlichen Entformkräfte werden dabei ganzflächig über die Gegenplatte auf das Formteil übertragen. Hierdurch können vorteilhaft auch sehr dünne biegeeweiche Formteile entformt werden. Das Lösen des Formteils von der Gegenplatte erfolgt anschließend zum Beispiel im Keilverfahren [Müll99], bei dem das Formteil durch eine Schälbewegung vom Umfang her abgehoben wird. Durch die Schälbewegung werden die notwendigen Entformkräfte zur Trennung

des Formteils von der Gegenplatte reduziert. Eine präzise geführte Bewegung im Sinne einer versatz- und spielfreien Entformung ist hierbei nicht erforderlich.

Beim beidseitigen Prägen muss das Formteil in versatz- und spielfreien Werkzeugöffnungs- und Entformbewegungen aus beiden Formeinsätzen entformt werden. Dazu müssen die Haftungsverhältnisse des Formteils zu den Formeinsätzen sich derart unterscheiden, dass die Trennung im ersten Schritt zunächst nur aus einem der beiden Formeinsätze erfolgt. Die Haftungsverhältnisse können dazu zum Beispiel durch Rückhaltestrukturen, Oberflächenschichten oder Trennmittel beeinflusst werden. Im zweiten Schritt muss das Formteil durch eine von der Werkzeugöffnungsbewegung unabhängige Entformbewegung aus dem zweiten Formeinsatz entformt werden. Hierbei sind entsprechend höhere Entformkräfte zu überwinden und zugleich ist es schwieriger, die Entformkräfte flächig und ohne Formteildeformation auf das Formteil zu übertragen.

Aus dem Spritzguss- und Spritzprägewerkzeugbau sind Entformungseinrichtungen wie Auswerferstifte, Abstreifplatten und die Druckluftentformung bekannt [Meng99], mit Hilfe derer die Entformungskräfte auf das Formteil übertragen werden können. Diese Entformungseinrichtungen werden je nach Formteilgeometrie separat oder in Kombinationen eingesetzt. Insbesondere große dünnwandige und deshalb biegeeweiche Formteile werden häufig mittels Kombinationen aus Abstreifplatten und Druckluftentformung entformt [Meng99], um die Kräfte möglichst gleichmäßig verteilt in das Formteil einzuleiten. Die Druckluftentformung bewirkt wiederum eine Schälbewegung, wodurch die Entformkräfte abnehmen.

Als Fazit ist festzuhalten, dass das beidseitig geprägte Formteil zur Entformung neben der Werkzeugöffnungsbewegung durch eine zweite, davon unabhängige und versatz- und spielfrei durchzuführende Bewegungen aus der zweiten Werkzeughälfte gelöst werden muss. Hierbei müssen die Entformkräften besonders beachtet werden, um das Formteil ohne Deformationen zunächst ganzflächig aus dem ersten Werkzeug und anschließend aus dem zweiten Werkzeug lösen zu können. Bei der Entformung des Formteils aus der zweiten Werkzeughälfte (dem zweiten Formeinsatz) müssen insbesondere die elastischen Verformungen möglichst gering gehalten werden, um Strukturdefekte am Bauteil zu verhindern. Daraus folgt, dass das Werkzeugkonzept darüber hinaus so gestaltet werden muss, dass die Durchbiegung des Formteils begrenzt wird. Wegen der vergleichbaren Anforderungen an die Entformung und der eingesetzten Formteilgeometrien erscheinen die für den Spritzguss- und Spritzprägewerkzeugbau genannten Einrichtungen auch für die Entformung großflächiger Formteile im beidseitigen Heißprägeverfahren geeignet. Deshalb sollen Abstreifplatte, Auswerferstifte und Druckluftentformung im Werkzeugkonzept berücksichtigt werden.

4 Entwicklung eines Werkzeugaufbaus für das beidseitige Heißprägen

4.1 Werkzeugkonzept

Die folgende tabellarische Übersicht ordnet den jeweiligen Verfahrensschritten – über die in Kapitel 3 dargelegten spezifischen prozesstechnologischen Anforderungen an die Herstellung großflächiger Formteile mit dünnen Restschichten hinaus – die allgemeinen Anforderungen an die Werkzeugtechnik und die dabei verfolgten Lösungsansätze zu. Diese Anforderungen an die Werkzeugtechnik und die vorgestellten Lösungsansätze werden dann im Hinblick auf die einzelnen Verfahrensschritte erläutert, um anschließend die Schlussfolgerungen für die Gestaltung des Werkzeugkonzepts zu ziehen.

Verfahrensschritte	Anforderungen an die Werkzeugtechnik	Lösungsansätze
Erwärmen	<ul style="list-style-type: none"> Werkzeugtemperaturen bis 350 °C zur Verarbeitung von Hochtemperaturkunststoffen 	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz hochwarmfester Werkzeugwerkstoffe und hochtemperaturbeständiger Materialien für Dichtungen, Sensorik und elektrische Zuleitungen Grundaufbau aus einem konstant (nieder-)temperierten und thermisch isolierten Werkzeugrahmen sowie einem zyklisch temperierten Werkzeugeinsatz Vermeidung von Oxidation der Formeinsatzoberfläche durch Evakuierung bzw. Stickstoffspülung bei geöffnetem Werkzeug
	<ul style="list-style-type: none"> hohe Temperaturhomogenität zur Verarbeitung teilkristalliner Kunststoffe 	<ul style="list-style-type: none"> Gleichmäßige Verteilung der Heizleistung
	<ul style="list-style-type: none"> kurze Heiz- und Kühlzeiten 	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierung der thermischen Masse Verkürzung der Wärmeleitungswege
	<ul style="list-style-type: none"> Flexibler Einsatz von Platten und dünnen biegeweichen Folien 	<ul style="list-style-type: none"> Spannrahmentchnik zur Vermeidung von Verzug und Aufwölben folienförmiger Halbzeuge
Umformen	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierung der Prägekräfte zur Herstellung großflächiger Formteile mit dünnen Restschichten 	<ul style="list-style-type: none"> Ersatz der fließspaltgedichteten Kavität durch eine bewegliche Tauchkantendichtung
	<ul style="list-style-type: none"> Homogenisierung des Druckprofils 	<ul style="list-style-type: none"> Feste Berandung der Kavität durch Einsatz einer beweglichen Tauchkantendichtung

Abkühlen	<ul style="list-style-type: none"> • Schwindungsbehinderung an großflächigen Formteilen zur Reduzierung der Entformkräfte und Formteildefekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Fixierung des Formteils im Spannrahmen
Entformen	<ul style="list-style-type: none"> • Realisierung mehrerer Entformungssysteme zur Anpassung an die spezifischen Formteileigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • Spannrahmen (Abstreiferplatte) • Druckluftentformung • Auswerferstifte

Tab. 4-1 Übersicht zu den Anforderungen an die Werkzeugtechnik und den Lösungsansätzen für das beidseitige Heißprägen

4.1.1 Erwärmen

Aufgrund der für die Verarbeitung von Hochtemperaturkunststoffen erforderlichen hohen Werkzeugtemperaturen werden für Formplatten und Einsätze hochwärmefeste Stähle verwendet [Meng99]. Zur Herstellung des Werkzeugrahmens eignet sich unter den hochfesten Stählen besonders der sehr gut zerspanbare vorvergütete Werkstoff 1.2312. Für Einsätze, die mit dem hochoverhitzten Kunststoff in Kontakt kommen, empfehlen sich chemisch beständige, hochglanzpolierbare Stähle wie beispielsweise der Werkstoff 1.2083. Dieser kann zudem im Diffusionsschweißprozess eingesetzt werden, so dass konturangepasste Temperierkanäle in Werkzeugplatten gefräst und mittels einer Deckelplatte verschweißt werden können. Um die zyklisch zu temperierende Masse zu minimieren und die formteilspezifischen Werkzeugkomponenten wie Formeinsatz, Auswerferstifte und Heizplatte wechseln zu können, sollte der Grundaufbau des Werkzeugs weiterhin aus einem konstant (nieder-) temperierten Werkzeugrahmen und einem zyklisch temperierten Werkzeugeinsatz bestehen. Eine thermische Isolierung des Werkzeugrahmens soll darüber hinaus vermeiden, dass die Wärme in die umliegenden Maschinenbauteile abfließt. Zur Verhinderung einer Oxidation der Formeinsatzoberfläche sollte der Werkzeugaufbau darüber hinaus so gestaltet werden, dass eine Spülung des Werkzeughohlraums bei geöffnetem Werkzeug mit Stickstoff möglich ist.

Für den automatisierten Betrieb soll der flexible Einsatz von Kunststoffplatten und dünnen biegeweichen Folien im Werkzeugaufbau berücksichtigt werden. Dazu müssen gleichermaßen geeignete Rahmenbedingungen für sämtliche Halbzeuge geschaffen werden. Zur Vermeidung von Verzug und Aufwölben folienförmiger Halbzeuge kommt vor allem ein Einsatz der Spannrahmentchnik in Betracht. Die Spannrahmentchnik ist zum Beispiel aus dem Hinterprägen von Dekorfolien [Meng99] bekannt. Beim Hinterprägen dient sie zur Einspannung der Dekorfolie in das Spritzprägewerkzeug. Sie sichert dabei die definierte Lage der Dekorfolie und erlaubt die Entformung des hinterprägten Bauteils. Darüber hinaus sind Lösungen zur Handhabungen thermoplastischer Folien- und Plattenhalbzeuge aus dem Thermoformverfahren [Illi97] [Thro99] bekannt. Die in diesem Verfahren eingesetzten Einplattenmaschinen verfügen ebenfalls über einen Spannrahmen, welcher das Halbzeug im Außenbereich fixiert.

Kurze Heiz- und Kühlzeiten lassen sich prinzipiell durch eine Erhöhung der Heiz- bzw. Kühlleistung, durch die Reduzierung der thermischen Masse des Werkzeugeinsatzes und die

Verkürzung der Wärmeleitungswege erzielen. Abbildung 4-1 zeigt mögliche Erwärmungsarten.

Zum Beheizen und Kühlen von Heißprägewerkzeugen wurden zunächst reine Öltemperierungen sowohl für den Aufheizvorgang als auch für den Abkühlvorgang eingesetzt, siehe Abbildung 4-1, A). Diese Temperierungsvariante nutzt zwei gegeneinander verschaltete Temperierkreise mit heißem bzw. kaltem Öl. Diese Systeme zeichnen sich durch eine hohe Temperiergenauigkeiten aus. Aufgrund der Temperaturbelastbarkeit der Medien und Anlagentechnik sind sie jedoch auf Temperaturen von maximal 350 °C begrenzt. Zudem erfordern hohe Werkzeugtemperaturen wegen der sinkenden Übertemperatur zwischen dem Öl und dem Werkzeug lange Heizzeiten.

Heute werden daher Kombinationen aus elektrischen Heizsystemen und Ölkühlungen bevorzugt, siehe Abbildung 4-1, B), wenn höhere Werkzeugtemperaturen erforderlich sind. Aufgrund der hohen Werkzeugtemperaturen müssen jedoch die Heiz-/Kühlplatten mit dem Formeinsatz vollständig erwärmt werden. Das Erwärmen von Teilbereichen, wie es in Werkzeugen zum Mikrospritzgießen eingesetzt wird [Roga98], ist daher nur bedingt möglich. Wasser als Temperiermedium wird wegen der notwendigen Druckanlagen selten eingesetzt und ist im Regelfall auf 140°C und in Sonderanwendungen auf 200°C begrenzt.

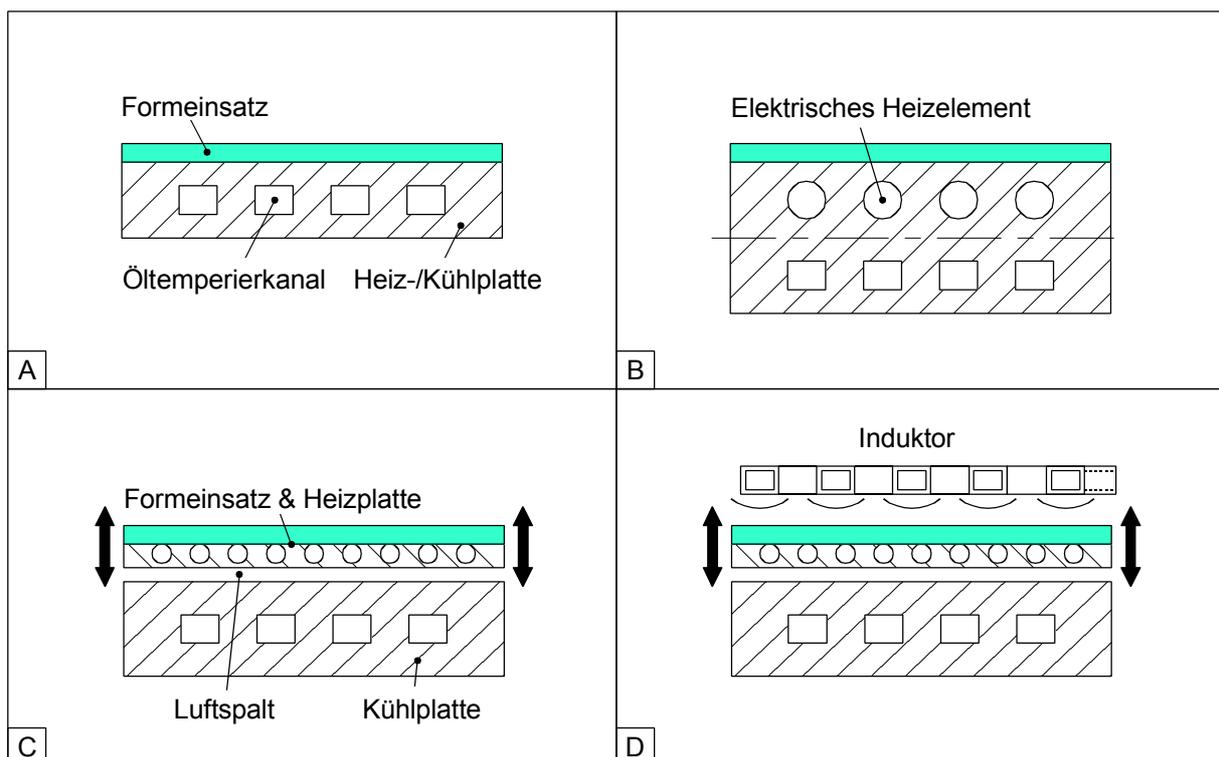


Abb. 4-1 Erwärmungsarten für Heißprägewerkzeuge

- A) Reine Öltemperierung
- B) Elektrische Beheizung und Ölkühlung
- C) Elektrische Beheizung mit reduzierter thermischer Masse und Öl- oder Wasserkühlung
- D) wie C) mit induktiver Zusatzheizung

Um die zyklisch temperierte Masse auch bei hohen Werkzeugtemperaturen reduzieren zu können, wird in dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, den Formeinsatz während der Beheizung thermisch zu isolieren. Hierzu wird der Formeinsatz mit einer Heizplatte als Werkzeugeinsatz kombiniert und dieser von einer Kühlplatte abgehoben. Der entstehende Luftspalt bewirkt die thermische Trennung. Zur Abkühlung wird der Werkzeugeinsatz wieder an die Kühlplatte angelegt, siehe Abbildung 4-1, C).

Die erforderlichen Aufheizzeiten können hierdurch proportional zur Verringerung der Masse reduziert werden. Aufgrund der Trennung zwischen Heiz- und Kühlplatte ist zudem der Einsatz von Wasser als Kühlmedium möglich.

Dieses Konzept bedingt jedoch einen erweiterten mechanischen Aufbau des Werkzeugs, da zur Trennung des Formeinsatzes von der Kühlplatte eine Zusatzbewegungseinrichtung im Werkzeug erforderlich ist. Aufgrund der zyklischen Temperierung des Formeinsatzes muss die Anbindung an die Bewegungseinrichtung eine ausreichende thermische Isolierung aufweisen.

Zusätzlich zur Reduzierung der thermischen Masse sollen die Wärmeleitungswege zwischen den elektrischen Heizelementen und der Formeinsatzoberfläche verringert werden. Um eine gleichmäßige Oberflächentemperatur zu erreichen, können dazu flexible Heizleiter eingesetzt werden. Werden diese in die Heizplatte eingelötet, sind übertragene Heizleistungen von bis zu 15 W/cm^2 erzielbar.

Die induktive Erwärmung, siehe Abbildung 4-1, D), wurde bereits zur variothermen Temperierung von Werkzeugen für das Mikrospritzgießen untersucht [Schi00]. Diese generiert die Wärme direkt in der Formeinsatzoberfläche und erlaubt darüber hinaus wesentlich höhere übertragbare Heizleistungen. Bei dieser Erwärmungsart wird eine an die zu beheizende Oberfläche angepasste Spule vor dem Formeinsatz positioniert. Die Erwärmung erfolgt innerhalb einer dünnen Oberflächenschicht des Formeinsatzes, wodurch dort eine sehr schnelle und über die Fläche gleichmäßige Erwärmung erzielt wird. Der Wärmetransport in tiefere Schichten des Formeinsatzes ist jedoch weiterhin durch die Wärmeleitfähigkeit des Formeinsatzwerkstoffs limitiert. Nach dem Entfernen der Spule fällt die Temperatur wegen des Wärmetransport in tiefere Schichten unmittelbar ab. Die hierdurch erzielte Dynamik führt im Mikrospritzgießprozess zu sehr kurzen Zykluszeiten. Die Anwendung dieser Erwärmungsart im Heißprägeverfahren scheint jedoch wegen der erforderlichen Zeiträume zur Erwärmung des Halbzeugs und der gegebenenfalls notwendigen Temperaturhaltezeiten während der Umformung nur in Verbindung mit einer in den Formeinsatz integrierten elektrischen Heizung möglich. Insoweit kann die induktive Erwärmung das in dieser Arbeit verfolgte Konzept ergänzen, aber nicht ersetzen.

4.1.2 Umformen

Zur Herstellung großflächiger Formteile mit dünnen Restschichten müssen die Formeinsatzstirnflächen so klein wie möglich sein, siehe oben Abschnitt 3.2. Dafür bietet sich die aus dem Spritzprägen bekannte Tauchkantendichtung an, welche die im Heißprägeverfahren üblicherweise verwandte fließspaltgedichtete Kavität ersetzen soll, da letztere zur Gesamtrestschichtfläche beiträgt und den Kraftbedarf erhöht. Die Tauchkantendichtung stellt eine

festen Berandung der Kavität dar und trägt auf diese Weise zu einer Homogenisierung des Druckprofils bei. Somit werden Schwindungen und Verzug minimiert, um eine hohe Formteilqualität zu erzielen.

4.1.3 Abkühlen

Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Werkzeugwerkstoff und Kunststoff kommt es während der Abkühlung unterhalb der Glasübergangstemperatur zum Aufschwinden des Formteils auf die Werkzeugstrukturen[Hove84]. Hierdurch entstehen Reibkräfte, welche die Entformung erschweren und mitunter zu Formteildefekten führen. Um ein Aufschwinden des Formteils auf die Werkzeugstrukturen zu verhindern, eignet sich wiederum besonders die bereits oben unter 4.1.1 beschriebene Spannrahmenteknik, mit der das Formteil während der Abkühlung fixiert werden kann.

4.1.4 Entformen

Damit den unterschiedlichen Anforderungen bei der Entformung beidseitig strukturierter Formteile Rechnung getragen werden kann, sollen im Werkzeug verschiedene Entformsysteme realisiert werden. Dazu sind aus dem Spritzprägen dünner großflächiger Formteile Abstreiferplatten, Druckluftentformung und Auswerferstifte bekannt. Der unter 4.1.1 und 4.1.3 vorgestellte Spannrahmen kann sogar die Funktion der Abstreiferplatte übernehmen, weil er wie die Abstreiferplatte den Formeinsatz umschließt und das Formteil zur Entformung vom Formeinsatz anheben kann. Handelt es sich um dünnflächige Formteile, sind Spannrahmen und Druckluftentformung geeignet, da sie einen flächigen Angriff der Entformkraft erlauben. Für dickwandige Formteile können Auswerferstifte eingesetzt werden, weil diese Formteile eine ausreichende Biegesteifigkeit besitzen.

4.1.5 Schlussfolgerungen für das Werkzeugkonzept

Aus den unter 4.1.1. bis 4.1.4 angeführten Prämissen für die Werkzeugtechnik lässt sich folgendes in Abbildung 4-1 dargestellte Werkzeugkonzept für das beidseitige Heißprägen ableiten, welches sich von den für das einseitige Prägen eingesetzten Werkzeugen in vier Punkten wesentlich unterscheidet:

- Das Halbzeug wird während des gesamten Prozesses zwischen zwei Spannplatten fixiert und kann mit diesen unabhängig von der Öffnungs- und Schließbewegung der Prägepresse mittels eines zweiten servo-elektrischen Antriebs bewegt werden.
- Die Halbzeugspannplatten bilden mit dem Formeinsatz eine Tauchkantendichtung, so dass auf die fließspaltgedichtete Kavität verzichtet werden kann, um die Prägekräfte bei der Herstellung großflächiger Formteile mit dünnen Restschichten zu reduzieren.
- Getrennte Vakuum- und Druckgasanschlüsse in Ober- und Unterwerkzeug erlauben in der Kavität die unabhängige Evakuierung und getrennt regelbare Druckgasbeaufschlagung der Ober- und Unterseite des Halbzeugs, damit das Halbzeug ganzflächig zur Erwärmung an die Formeinsatzoberfläche angelegt werden und die druckluftunterstützte Entformung realisiert werden kann.

- Der Formeinsatz und dessen Heizung bilden eine Einheit mit minimierter thermischer Masse, welche während der Heizphase mittels einer Formeinsatzträgerplatte von dem Kühlblock abgehoben und während der Präge- und Abkühlphase an diesen angelegt wird.
- Darüber hinaus ist für das Heißprägen beidseitig mikrostrukturierter Formteile unabdingbar, dass die Mikrostrukturen der Formeinsätze beider Werkzeughälften präzise zueinander ausgerichtet sind. Insbesondere für mikrooptische Anwendungen liegen die zulässigen Toleranzen in der lateralen Überdeckung bei wenigen Mikrometern. Aus diesem Grund umfasst das Werkzeugkonzept einen Positioniertisch, der in Verbindung mit in das Werkzeug integrierten Sensoren eine genaue Ausrichtung des Unterwerkzeugs zum Oberwerkzeug erlaubt. Im Einzelnen sollen Mechanismen zum Einsatz kommen, wie sie in Positioniereinrichtungen für die Präzisionsbearbeitung verwendet werden, wie beispielsweise Luftlagerungen, spiel- und stickstofffreie Biegeelenkführungen sowie eine Piezoaktorik in Verbindung mit einer hochauflösenden Sensorik.

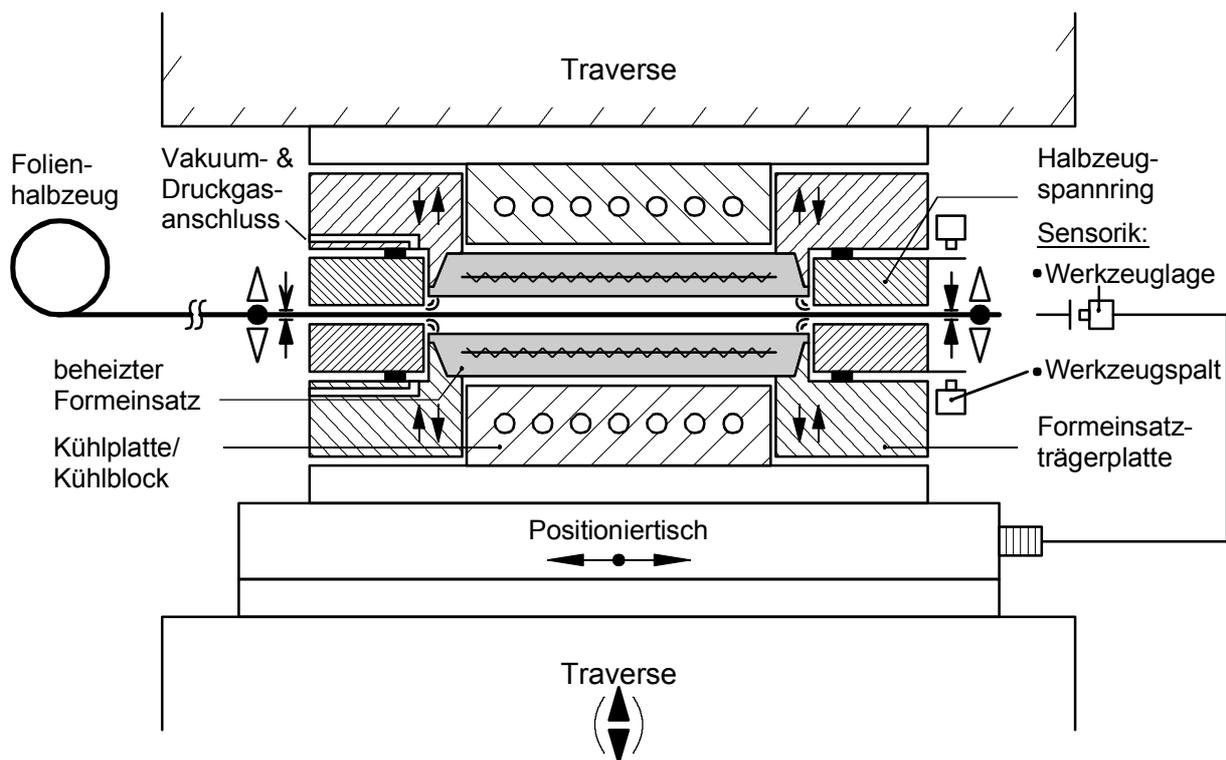


Abb. 4-2 Werkzeugkonzept für das beidseitige Heißprägen

4.2 Verfahrenskonzept

Auf der Grundlage des in Abschnitt 4.1.5 vorgestellten Werkzeugkonzepts soll ein neues Verfahrenskonzept entwickelt werden, welches besonders auf die beidseitige Mikrostrukturierung großflächiger Formteile im Heißprägeverfahren ausgelegt ist.

4.2.1 Erwärmen

Abbildung 4-3 zeigt schematisch die Verfahrensschritte zur Erwärmung des Folienhalbzeugs. Die Ausgangssituation (A) zeigt den kavitätsnahen Werkzeugbereich mit den Kühlblöcken, den Formeinsätzen, den Halbzeugspannringen und dem zugeführten Folienhalbzeug.

Die Kühlblöcke werden konstant auf eine Temperatur deutlich unterhalb der Entformtemperatur des Kunststoffhalbzeugs temperiert. Die Formeinsätze, welche von dem Kühlblock abgehoben und damit thermisch getrennt sind, werden zeitparallel zur Erwärmung des Halbzeugs auf Umformtemperatur beheizt und besitzen zu Beginn der Erwärmung des Halbzeugs eine Temperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur des Kunststoffes. Die Halbzeugspannringe werden konstant auf eine Temperatur geringfügig unterhalb der Glasübergangstemperatur temperiert. Das Folienhalbzeug besitzt Raumtemperatur, da auf eine externe Vorwärmung verzichtet wird.

- Im ersten Schritt wird das Halbzeug infolge der Schließbewegung des Werkzeugs zwischen den Halbzeugspannringen geklemmt und bis auf die Spaltweite S_{EW} an die Strukturoberfläche des oberen Formeinsatzes angenähert (Stadium 1).
- Durch Evakuieren der oberen Teilkavität und Beaufschlagung der unteren Teilkavität mit Druckgas wird das Halbzeug ausgelenkt und an die Formeinsatzstirnfläche angelegt (Stadium 2). Durch den Kontakt wird das Halbzeug erwärmt und legt sich infolge der thermischen Dehnung vollständig an die Formeinsatzoberfläche an.
- Die Erwärmung ist abgeschlossen (Stadium 3), wenn sich das Halbzeug bis in die Randbereiche des Formeinsatzes an diesen angelegt hat. Aufgrund von Dehnung und Schrumpf des Halbzeugs entsteht, in Abhängigkeit der Dehnungsbehinderung durch die Formeinsatzstrukturen, ein Werkstoffüberschuss im Randbereich, der in späteren Verfahrensschritten durch das Ausgleichsvolumen der Halbzeugspannringe aufgenommen wird.
- Sobald der Formeinsatz die Umformtemperatur erreicht hat, wird die untere Teilkavität evakuiert (Stadium 4).

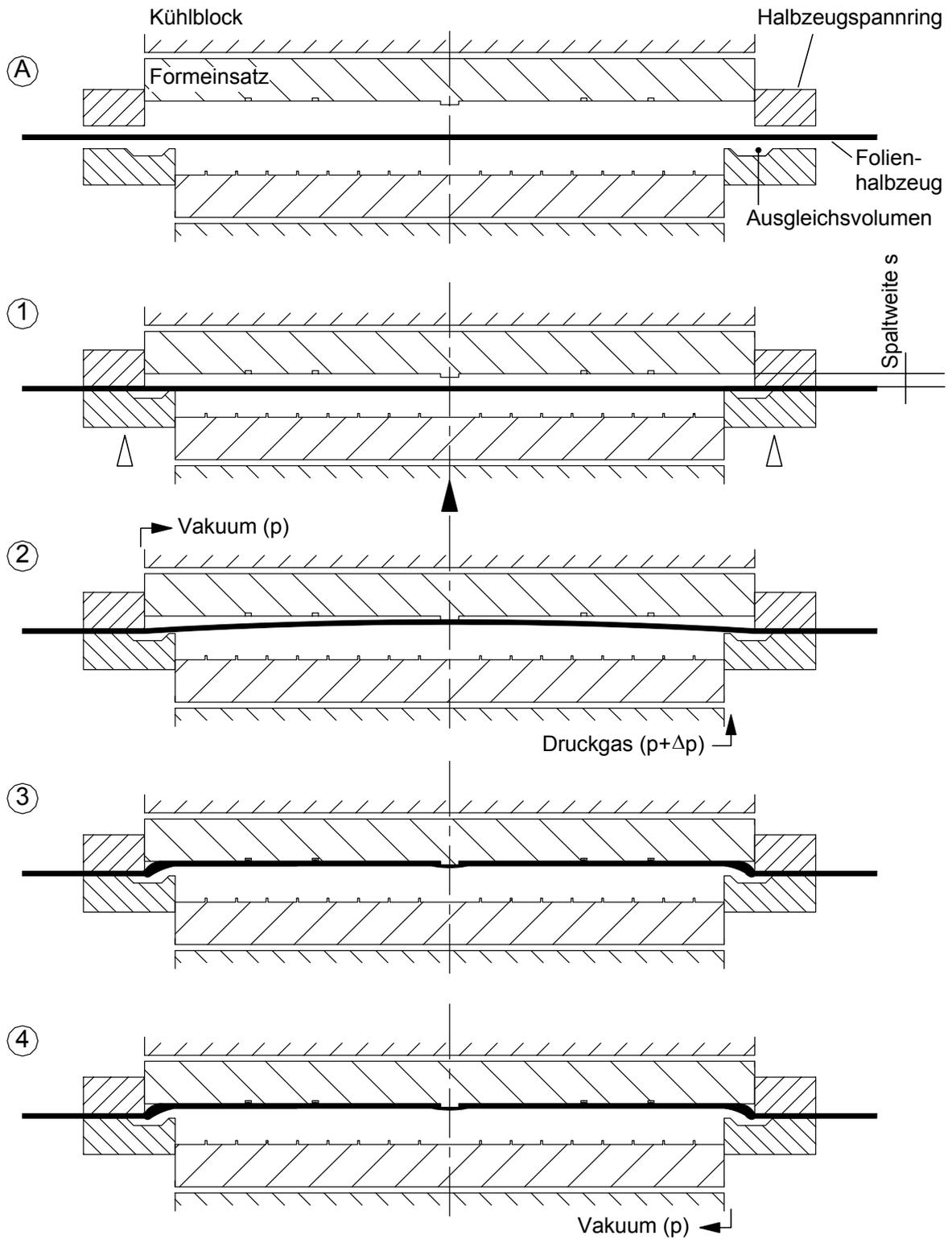


Abb. 4-3 Verfahrensschritte zur Erwärmung des Halbzeugs

4.2.2 Umformen

Abbildung 4-3 zeigt die Verfahrensschritte zur Umformung des Halbzeugs. Die Ausgangssituation (A) zeigt die Kavität mit den auf Umformtemperatur beheizten Formeinsätzen, den auf Entformtemperatur temperierten Halbzeugspannrings und dem Halbzeug, welches an die Formeinsatzstirnfläche des oberen Formeinsatzes angelegt und auf Umformtemperatur erwärmt wurde.

- Im ersten Schritt werden die Formeinsätze an die Kühlblöcke angelegt und somit die Kühlung der Formeinsätze eingeleitet (Stadium 1). Durch die Schließbewegung des Werkzeugs werden die Halbzeugspannrings synchron zum oberen Formeinsatz verfahren, wodurch eine Verstreckung des Halbzeugs im Randbereich der Kavität vermieden wird.
- Im zweiten Schritt wird das Werkzeug weiter geschlossen, wodurch zunächst die Dichtkante des unteren Halbzeugspannrings gegen die Formeinsatzstirnfläche des oberen Formeinsatzes gefahren wird und dadurch den Werkstofffluss nach außen absperrt (Stadium 2).
- Danach wird das Werkzeug soweit geschlossen, dass die Formeinsatzstrukturen in die Kunststoffformmasse eintauchen und die Formeinsatzstrukturen befüllt werden (Stadium 3)
- Abschließend wird die Schließkraft bis zur Prägekraft erhöht, so dass die Strukturkanten ausgeformt werden und die Schmelze zur Gewährleistung des Schwindungsausgleichs komprimiert wird (Stadium 4).

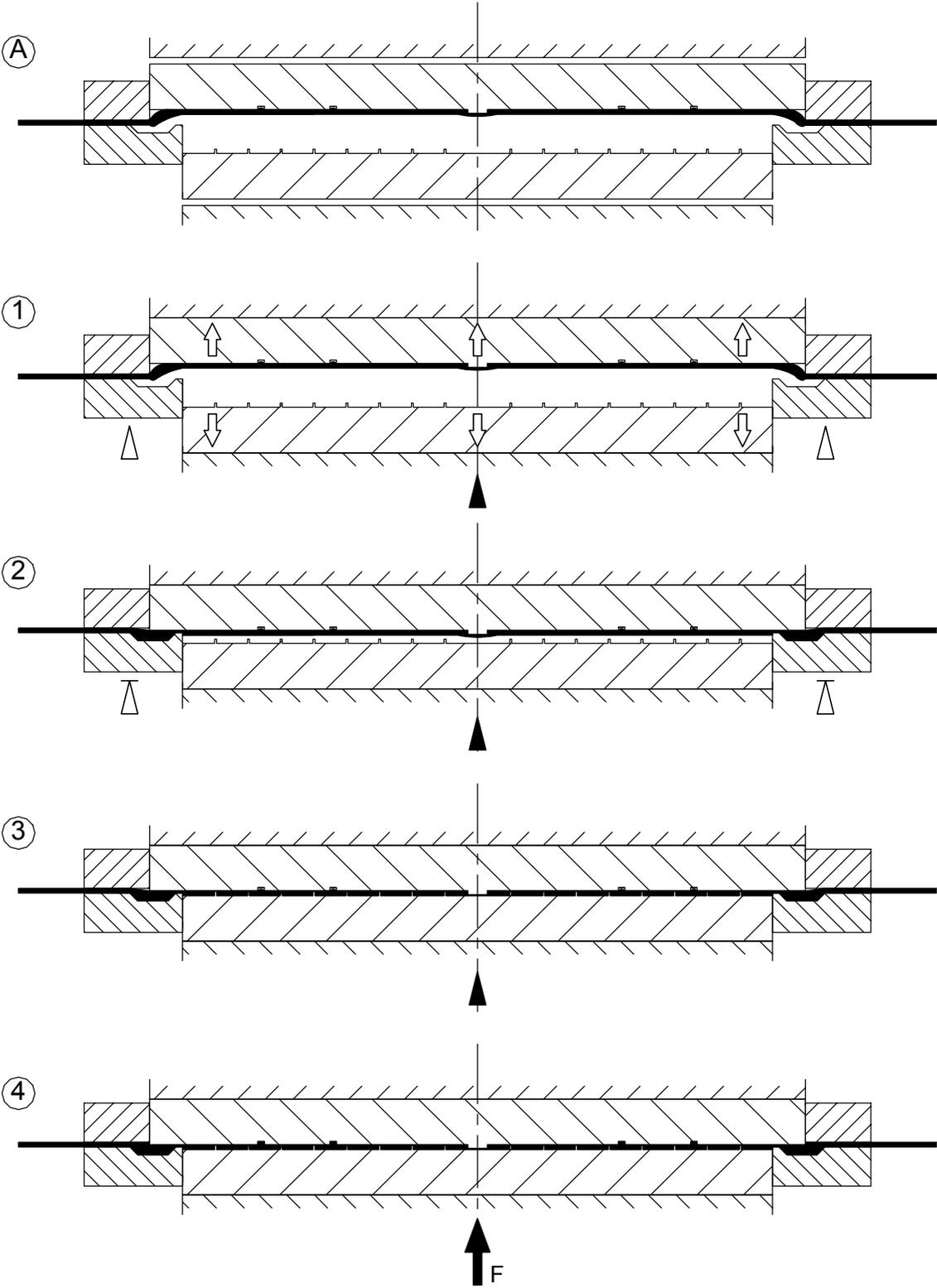


Abb. 4-4 Verfahrensschritte zum Umformen des Halbzeugs

4.2.3 Abkühlen

Zur Kompensation der Volumenkontraktion der Schmelze während der Abkühlung wird die Schließkraft bis zum Erreichen der Glasübergangstemperatur des Kunststoffes aufrechterhalten. Mit dem Unterschreiten der Glasübergangstemperatur wird die Schließkraft auf eine geringe Restkraft reduziert, da im weiteren kein Werkstofffluss mehr stattfindet. Die Schwindung des Formteils wird im folgenden durch die Formeinsatzstrukturen behindert und im Umfangsbereich durch die Einspannung des Formteils zwischen den Halbzeugspannringen verhindert, wodurch die entstehenden Normalkräfte zwischen Formteil und den Formeinsatzstrukturseitenwänden gegenüber dem Fall ohne Einspannung reduziert werden. Da die Einspannung des Formteils auch während der Entformung des Formteils aus beiden Formeinsätzen aufrechterhalten wird, ist zu erwarten, dass Formteildefekte, die prinzipiell durch das Freiwerden der energieelastischen Kräfte gegen Ende des Entformweges entstehen können, deutlich vermindert werden.

4.2.4 Entformen

Abbildung 4-4 zeigt die Verfahrensschritte zur Entformung beidseitig strukturierter Formteile. Die Ausgangssituation (A) zeigt die geschlossene Kavität nach der Umformung. Die Formeinsätze sind bis zur Entformtemperatur abgekühlt. Die Schließkraft ist bis auf eine geringe Restkraft reduziert.

- Im ersten Schritt wird das Werkzeug bis zur Spaltweite S_{Entform} geöffnet. Dabei wird, aufgrund der höheren Haftkräfte des Formteils im oberen Formeinsatz, zunächst die Losbrechkraft zwischen Formteil und unterem Formeinsatz überwunden (Stadium 1). Die Spaltweite S_{Entform} wird vorzugsweise kleiner als die Strukturhöhe des unteren Formeinsatzes gewählt, so dass sich das Formteil, welches im nachfolgenden Schritt mittels Druckgas aus dem oberen Formeinsatz gelöst wird, an den unteren Formeinsatz anlegen und somit abstützen kann. Auf diese Weise wird auch bei hohen Drücken eine plastische Verformung bzw. Ver Streckung des Formteils vermieden.
- Im zweiten Schritt werden die Halbzeugspannringe um die gleiche Wegstrecke S_{Entform} verfahren, wodurch das Halbzeug entlang des Umfangs vom oberen Formeinsatz in einer Schälbewegung abgelöst wird. Um dabei eine günstige Kraffteinleitung in das Formteil zu gewährleisten, wird die Entformkraft über den verstärkten Bereich im Ausgleichsvolumen eingeleitet. Dieser Bereich gleicht Unterschiede im Ablöseverhalten des Formteils durch Biegung aus (Stadium 2).
- Im nächsten Schritt wird der entstandene keilförmige Spalt zwischen Formteil und dem oberen Formeinsatz mit Druckgas beaufschlagt. Die sich ausbreitende Druckgasfront löst das Formteil radial vom Außenrand her vom Formeinsatz ab (Stadium 3).
- Nachdem die Losbrechkräfte des Formteils zu beiden Formeinsätzen überwunden wurden, wird das Werkzeug in den folgenden Schritten geöffnet, wobei das Formteil vollständig aus den Formeinsatzstrukturen entformt wird. Danach werden die Formeinsätze von den Kühlblöcken abgehoben und erneut beheizt (Stadien 4 und 5).

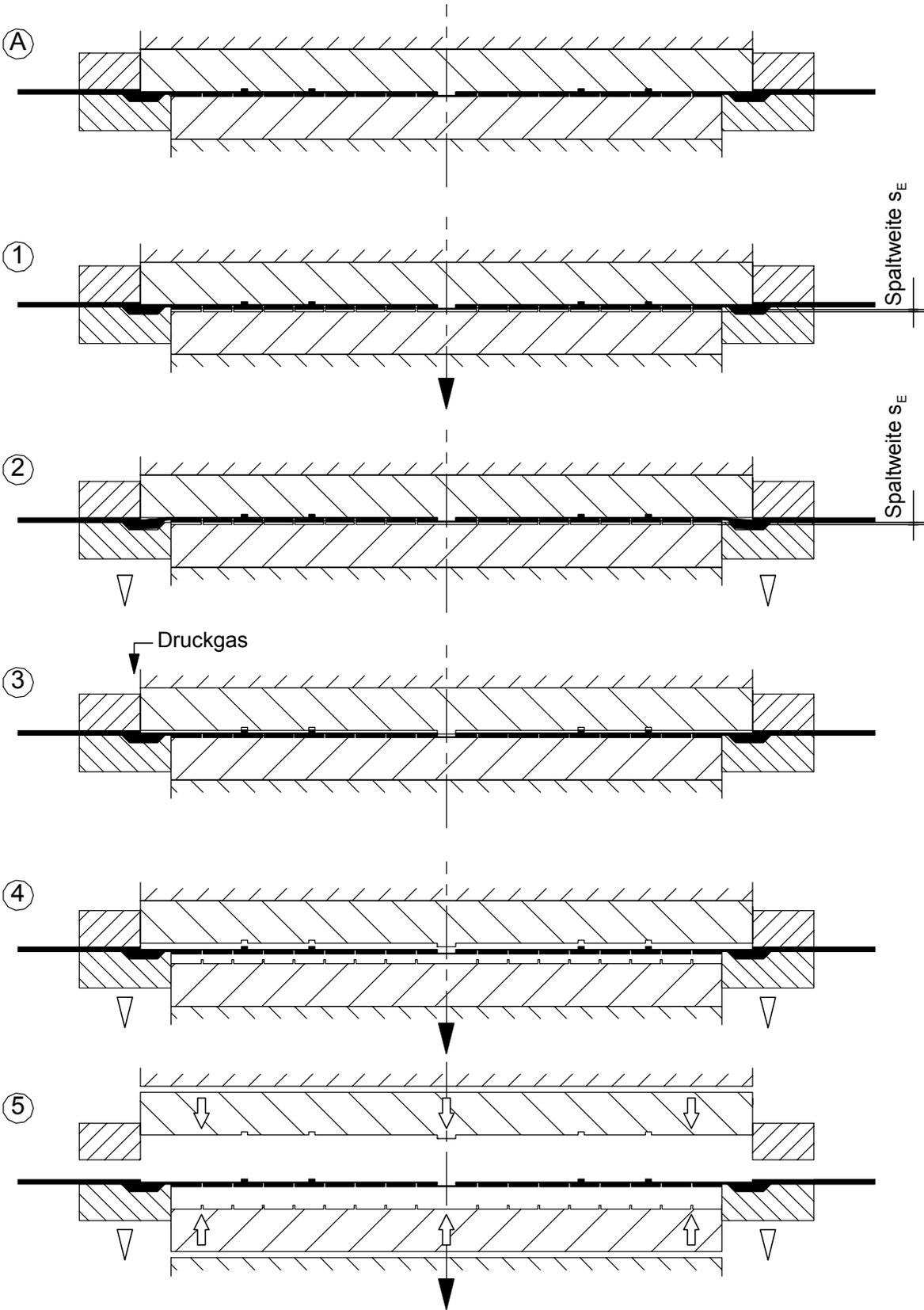


Abb. 4-5 Verfahrensschritte zur Entformung beidseitig strukturierter Formteile

5 Aufbau der Versuchsanlage

Für die Untersuchung des beidseitigen Heißprägens wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, wie sie schematisch in den Abbildungen 5-1 und 5-2 dargestellt ist. Diese Anlage besteht aus dem Lastrahmen einer Universalprüfmaschine des Herstellers Zwick, Ulm, in den ein zweiteiliges Prägewerkzeug, ein Positioniertisch für die Werkzeugausrichtung und ein Entformantrieb eingebaut sind. Hinzu kommen Anlagenkomponenten zur Messdatenerfassung und Steuerung sowie zur Medienversorgung. Die Verknüpfung dieser Anlagenkomponenten aus steuerungstechnischer Sicht ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

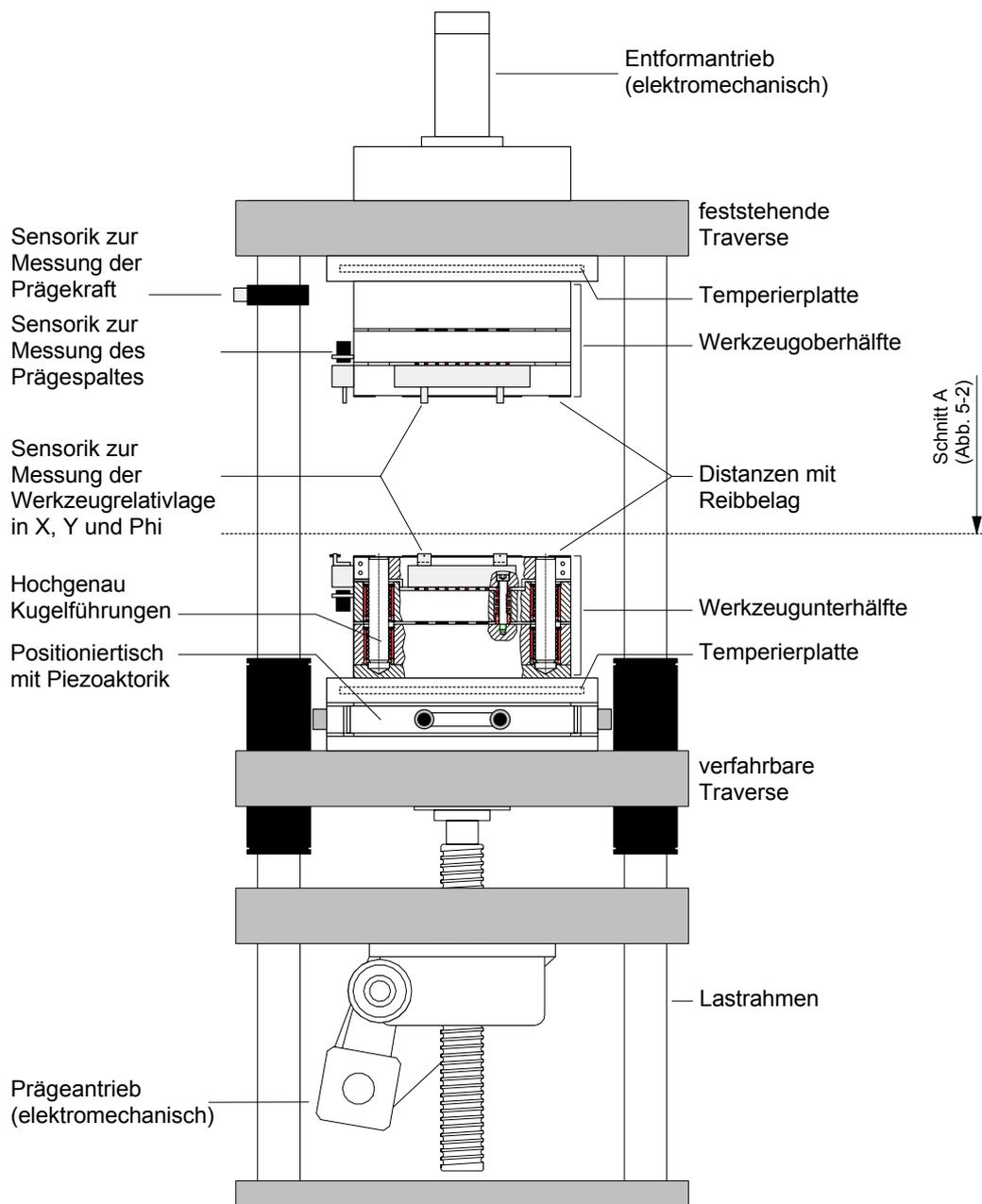


Abb. 5-1 Aufbau der Versuchsanlage, bestehend aus dem Lastrahmen einer Universalprüfmaschine, in den ein zweiteiliges Werkzeug, ein Positioniertisch und ein Entformantrieb eingebaut sind (schematische Darstellung).

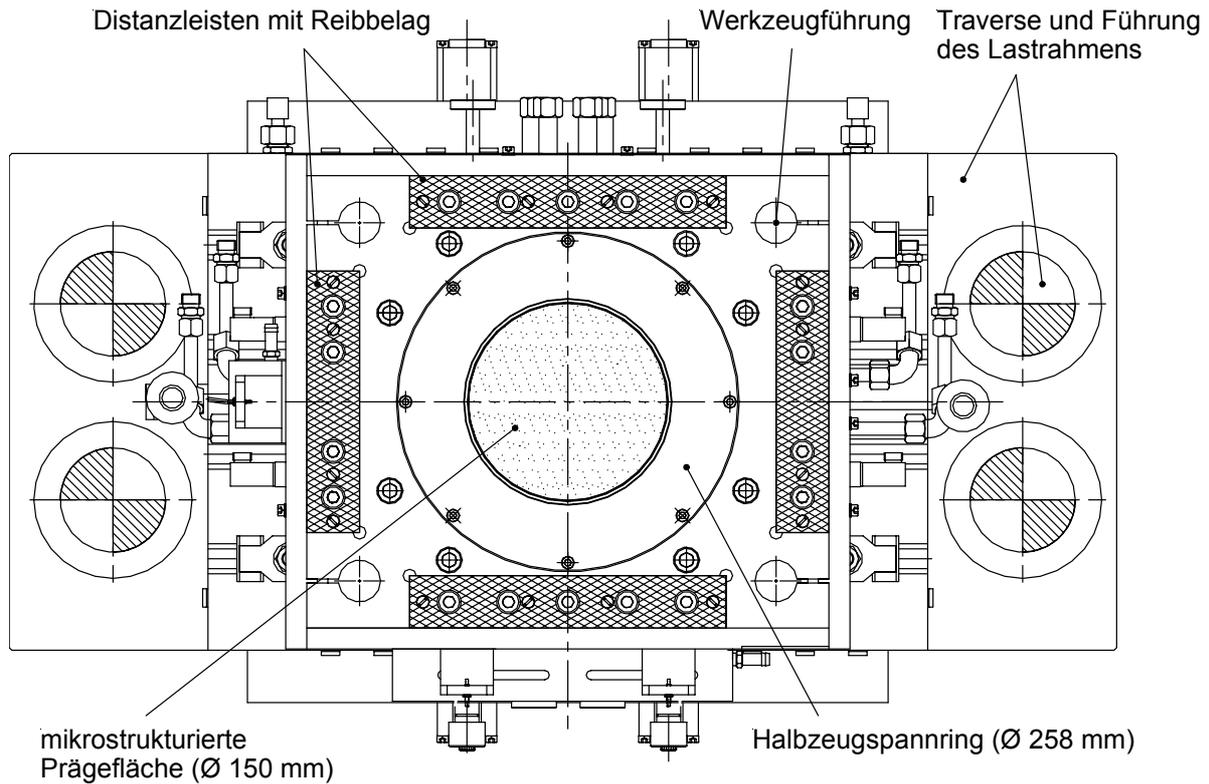


Abb. 5-2 Aufsicht der unteren Werkzeughälfte (siehe Abb. 5-1, Schnitt A)

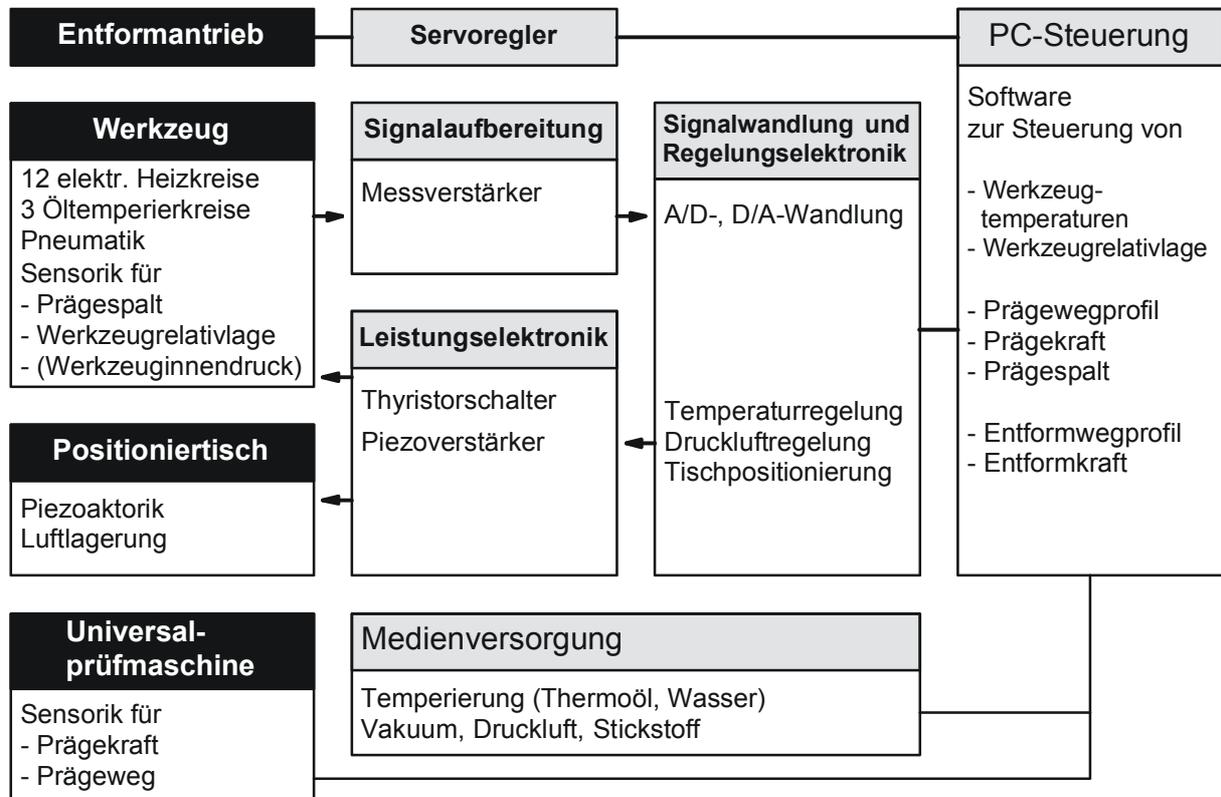


Abb. 5-3 Steuerungstechnische Verknüpfung der Anlagenkomponenten

Der Lastrahmen verfügt über vier Führungssäulen, eine feststellbare und eine bewegliche Traverse sowie über einen elektromechanischen Prägeantrieb. Vorgespannte Gleitlager mit großer Führungslänge gewährleisten eine hohe Führungsgenauigkeit und Steifigkeit der beweglichen Traverse gegenüber Verkipfung.

Die Position und die Geschwindigkeit der beweglichen Traverse werden indirekt über einen Resolver am Prägeantrieb erfasst, wobei die durch die Prägekraft hervorgerufene Dehnung des Lastrahmens in Form einer zuvor ermittelten Dehnungskennlinie berücksichtigt wird. Die Prägekraft wird mit Hilfe eines Kraftmessringes an einer der vier Führungssäulen gemessen.

Dieser Lastrahmen wurde hinsichtlich der Einhaltung der Zustellwegvorgaben, der Geradheit der Führung und der Parallelführung der Traversen untersucht [Müll94]. Dabei wurde sowohl der unbelastete Fall als auch den Fall einer axialen Belastung durch eine Prägekraft betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass

- unter Berücksichtigung der Dehnungskennlinie des Lastrahmens, vorgegebene Zustellwege mit einer Toleranz von $2\ \mu\text{m}$ eingehalten werden (die maximale Axialkraft betrug bei diesen Versuchen $50\ \text{kN}$),
- die Geradheit der Führung auf einem gemessenen Verfahrensweg von $1,5\ \text{mm}$ im Rahmen der Messgenauigkeit von $\pm 1\ \mu\text{m}$ liegt und
- die Verkipfung der Traversen ohne Prägekraft weniger als $2\ \mu\text{m}$ und unter axialer Belastung von $100\ \text{kN}$ weniger als $6\ \mu\text{m}$ beträgt; jeweils bezogen auf einen Messabstand von $150\ \text{mm}$ (dies entspricht dem Durchmesser der mikrostrukturierten Prägefläche).

Da für die Herstellung großflächiger Formteile mit Durchmessern von $150\ \text{mm}$ höhere Axialkräfte bis $200\ \text{kN}$ genutzt werden, sind diese Werte als Anhaltswerte zu verstehen.

Um Verlagerungen des Lastrahmens aufgrund von Temperaturänderungen zu minimieren, ist die Versuchsanlage in einem auf $\pm 2^\circ\text{C}$ klimatisierten Raum aufgestellt. Die beheizten Werkzeughälften sind gegenüber dem Lastrahmen bzw. gegenüber dem Positioniertisch durch konstant temperierte Platten isoliert.

Die Werkzeughälften stützen sich federbelastet über Distanzleisten mit Reibbelägen gegeneinander ab. Dadurch werden einerseits Querkräfte aus dem Prozess direkt in der Werkzeugtrennebene aufgenommen und andererseits der Lastrahmen über den gesamten Zyklus mit einer Druckkraft von $20\ \text{kN}$ vorgespannt, so dass auch während der Entformung keine Lastumkehr auftritt.

5.1 Aufbau und Funktion des Werkzeugs

Das Versuchswerkzeug ist entsprechend den in Kapitel 4.1 dargestellten Anforderungen konzipiert und weitgehend modular aus Werkzeugnormalien aufgebaut. Insbesondere die spezifisch an die Formteilanforderungen anzupassenden Komponenten sind als Werkzeugeinsatz austauschbar.

Die in Abbildung 5-4 dargestellten Werkzeughälften sind nahezu baugleich und setzen sich aus einem Werkzeugrahmen mit drei Funktionsebenen (A bis C) und dem Werkzeugeinsatz (D) zusammen:

- Die Grundebene (A) – siehe zusätzlich Abbildung 5-5 – besteht aus der Aufspannplatte (1), dem Werkzeugkern (2), dem Auswerferpaket (3) und dem Distanzrahmen (4). Eine zweischichtige Wärmedämmplatte (5) isoliert die Aufspannplatte gegenüber der Temperierplatte des Positioniertisches bzw. der Temperierplatte der feststehenden Maschinentraverse. Umlaufende Isolierleisten (6) verringern die Wärmeabgabe an die Umgebung. Zentral auf der Aufspannplatte ist der Werkzeugkern (2) angeordnet. Er setzt sich aus der Kühlplatte (7) und zwei Zwischenplatten zusammen, über welche Temperieröl, Stromleitungen und Sensorkabel zur Kühlplatte und zum Werkzeugeinsatz (D) geführt werden. Der Werkzeugkern ist gegenüber der Aufspannplatte ebenfalls durch eine zweischichtige Wärmedämmplatte (8) isoliert. Das Auswerferpaket (3) umschließt den Werkzeugkern und wird außermittig über Ausstoßbolzen betätigt. Es wird durch Kugelführungen (9) geführt und stützt sich über Federn (10) gegenüber der Formeinsatzträgerenebene (B) ab. Das Auswerferpaket enthält sechs Auswerferstifte (11) und acht Druckbolzen (12). Die Auswerferstifte wirken entweder direkt auf das Formteil oder sie werden an ein „zweites“ Auswerferpaket (13) gekoppelt, welches zwischen der Kühlplatte (7) und dem Werkzeugeinsatz (D) angeordnet ist. Dieses Auswerferpaket ist mit dem Werkzeugeinsatz austauschbar und erlaubt somit die individuelle Anpassung der Auswerferpositionen an die Formteilgeometrie. Die Druckbolzen (12) wirken über verstellbare Gewindebolzen (14) auf die Halbzeugspannebene (C), so dass diese während der Entformung simultan mit den Auswerfern bewegt werden kann.

In den Eckbereichen des Distanzrahmens (4) sind vier Hochgenau-Kugelführungen (15) angeordnet, über welche die Formeinsatzträgerenebene (B) und die Halbzeugspannebene (C) geführt werden. Tellerfederpakete (16) stützen die Formeinsatzträgerenebene – ebenso wie vorgespannte Druckfedern (17) die Halbzeugspannebene – gegenüber der Grundebene ab.

- Die Formeinsatzträgerenebene (B) – siehe auch Abbildung 5-6 – besteht aus der Trägerplatte (18), der Ringkolbenplatte (19) und dem Spannring (20), welcher den Werkzeugeinsatz aufnimmt. Im dargestellten Grundzustand des Werkzeugs ist die Formeinsatzträgerenebene durch die Tellerfederpakete (16) angehoben, so dass zwischen dem Werkzeugeinsatz und der Distanzplatte (21) des „zweiten“ Auswerferpaketes ein etwa 1 mm breiter Isolierspalt (22) besteht. Dieser Spalt wird geschlossen, indem der Ringzylinder (23), welcher durch die Ringkolbenplatte und die Halbzeugspannebene (C) gebildet wird, mit Druckluft beaufschlagt wird. Das Auswerferpaket, welches in

seiner hinteren Endstellung über die Schrauben (24) an die Trägerplatte gekoppelt ist, folgt dieser Bewegung, so dass keine Relativbewegung zwischen den Auswerferstiften und dem Werkzeugeinsatz stattfindet. Der Spannring wird mit Hilfe des Innenrings (25) über zwei Ölkreisläufe innentemperiert. Über den Ringkanal (26) wird die Kavität evakuiert und belüftet. Mit Hilfe des Abstandssensors (27) werden während der Prägephase der Prägespalt und während der Entformung der relative Entformweg zwischen Formteil und Strukturfläche gemessen.

- Die Halbzeugspannebene (C) – siehe ebenso Abbildung 5-7 – besteht aus der Trägerplatte (28), dem Halbzeugspannring (29), den Distanzleisten mit Reibbelag (30) und den Abstandssensoren (31) zur Messung der Relativlage zwischen beiden Werkzeughälften. In der Trägerplatte sind die Führungssäulen der Hochgenau-Kugelführung geklemmt. Über die Distanzleisten mit Reibbelag stützen sich beide Werkzeughälften während des Prägevorganges gegeneinander ab. Der Reibschluss sichert dabei die Werkzeughälften gegen seitliche Verschiebung. Zwischen den Halbzeugspannringen wird das Halbzeug geklemmt, so dass es während der Heizphase gehalten und zur Entformung von den Werkzeugeinsätzen (D) abgehoben werden kann. Mit einem Außendurchmesser von 258 mm können zwischen den Halbzeugspannringen Folien mit einer Bahnbreite von bis 250 mm geklemmt werden.
- Der Werkzeugeinsatz (D) wird in den in Abbildung 5-8 gezeigten Einbauraum eingesetzt und in dem Spannring der Formeinsatzträgerebene gehalten. Der Einbauraum ist dabei durch den Innendurchmesser des Halbzeugspannrings und die Oberfläche der Distanzplatte des „zweiten“ Auswerferpaketes definiert. Der Halbzeugspannring hat in der gezeigten Ausführung einen Innendurchmesser von 150,4 mm, so dass neben reinen Kunststoffhalbzeugen ebenfalls kunststoffbeschichtete Silizium- oder Keramikwafer als Halbzeug eingesetzt werden können. Die Einbauhöhe des Werkzeugeinsatzes beträgt 24 mm, so dass Formeinsatzplatten (32) und Heizplatten (33) von jeweils 12 mm Dicke eingebaut werden können. Ein Beispiel für einen Werkzeugeinsatz mit getrennter Formeinsatz- und Heizplatte ist in Abbildung 5-9 a) dargestellt. Bei Werkzeugeinsätzen mit geringerer Einbauhöhe, siehe Abbildung 5-9 b), bei denen zum Beispiel ein sehr dünner Nickelshim-Formeinsatz direkt auf die Heizplatte aufgebracht ist, wird der Einbauraum durch eine entsprechende Dicke der Distanzplatte (21) des „zweiten“ Auswerferpaketes ausgeglichen. Es kann aber auch die Kühlplatte durch den Einbau einer weiteren Zwischenplatte in den Werkzeugkern „hochgesetzt“ werden.

Der Halbzeugspannring der Werkzeugunterhälfte besitzt eine umlaufende Nut, mit der das Formteil in der Kühlphase formschlüssig gehalten wird, um das Aufschwinden auf die Formeinsatzstrukturen zu verhindern. Gleichfalls besitzt der Halbzeugspannring die Aufgabe, die Kavität zu dichten, um Schmelzeaustritt in die Werkzeugtrennebene beziehungsweise in den Evakuier- und Belüftungsspalt (34) zu verhindern.

Die Positionen der Auswerferstifte sind so gewählt, siehe Abbildung 5-10 a), dass Handlingsgreifer der Halbleiterindustrie genutzt werden können. Für diese als „Paddle“ oder „Fork“ bezeichneten Greifergeometrien sind in dem Industriestandard SEMI E22-0697 die in Abbildung 5-10 a) dargestellten „exclusion-zones“ definiert. Davon

abweichende Auswerferpositionen werden mit Hilfe des „zweiten“ Auswerferpaketes erreicht, indem zwischen die Auswerfer „Verbindungsbalen“ mit integrierten Auswerferstiften gesetzt werden (siehe Abbildung 5-10 b)).

Mit Hilfe zweier Temperaturfühler (35) werden die Temperaturen nahe der Form-einsatzoberfläche und in der Heizleiterebene erfasst, um eine kaskadierte Temperaturregelung zu ermöglichen.

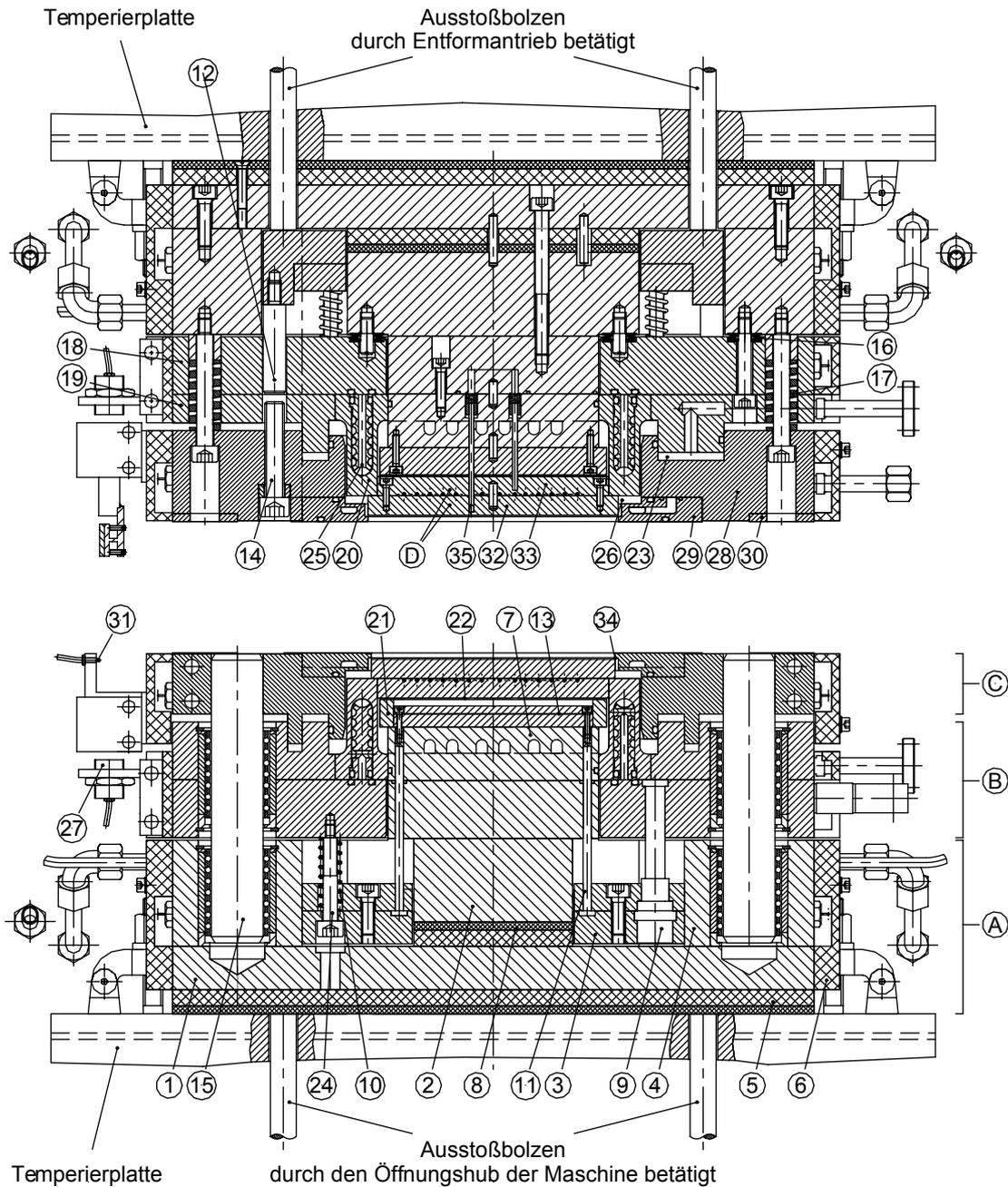


Abb. 5-4 Heißprägwerkzeug für die beidseitige Mikrostrukturierung. Die Bezeichnungen gelten für beide Werkzeughälften, werden aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nur für eine Werkzeughälfte angeführt.

- A: Grundebene; B: Formeinsatzträgerenebene; C: Halbzeugspannebene; D: Werkzeugeinsatz;
- 1: Aufspannplatte; 2: Werkzeugkern; 3: Auswerferpaket; 4: Distanzrahmen; 5: zweischichtige Wärmedämmplatte; 6: Isolierleiste; 7: Kühlplatte; 8: zweischichtige Wärmedämmplatte; 9: Kugelführung; 10: Feder; 11: Auswerferstift; 12: Druckbolzen; 13: „zweites“ Auswerferpaket; 14: Gewindebolzen; 15: Hochgenau-Kugelführung; 16: Tellerfederpaket; 17: Druckfeder; 18: Trägerplatte; 19: Ringkolbenplatte; 20: Spannring; 21: Distanzplatte; 22: Isolierspalt; 23: Ringzylinder; 24: Schraube; 25: Innenring; 26: Ringkanal; 27: Abstandssensor; 28: Trägerplatte; 29: Halbzeugspannring; 30: Distanzleiste mit Reibbelag; 31: Abstandssensor; 32: Formeinsatzplatte; 33: Heizplatte; 34: Evakuier- und Belüftungsspalt; 35: Temperaturfühler

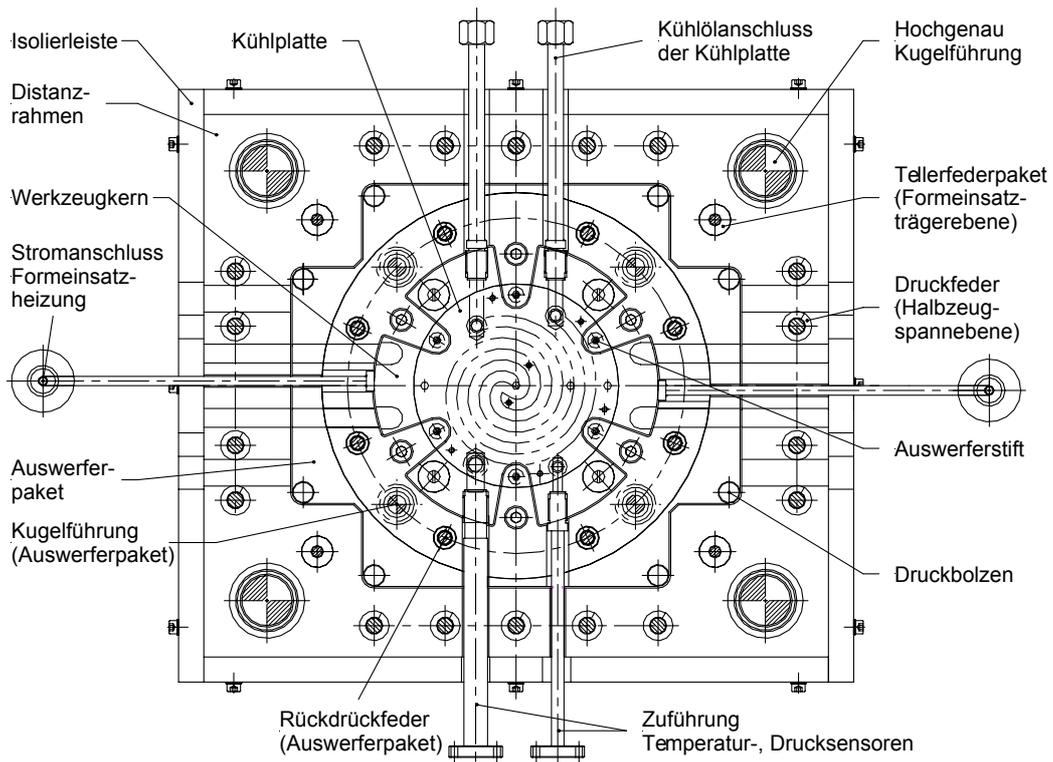


Abb. 5-5 Aufsicht der Grundebene

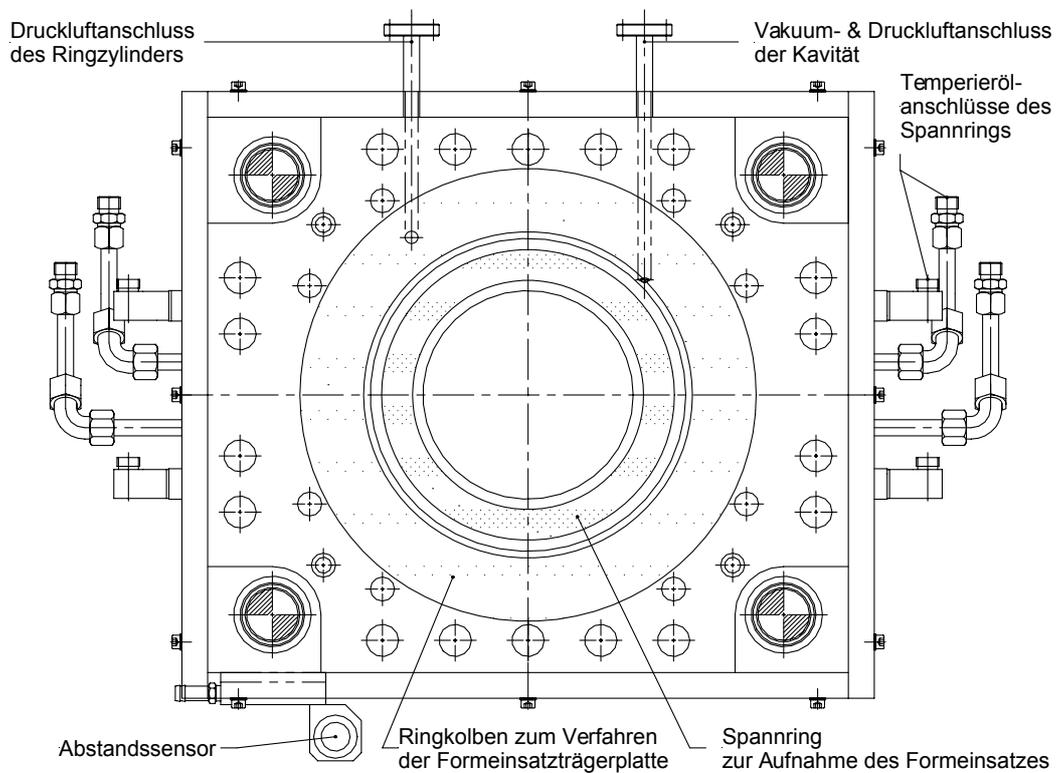


Abb. 5-6 Aufsicht der Formeinsatzträgerebene

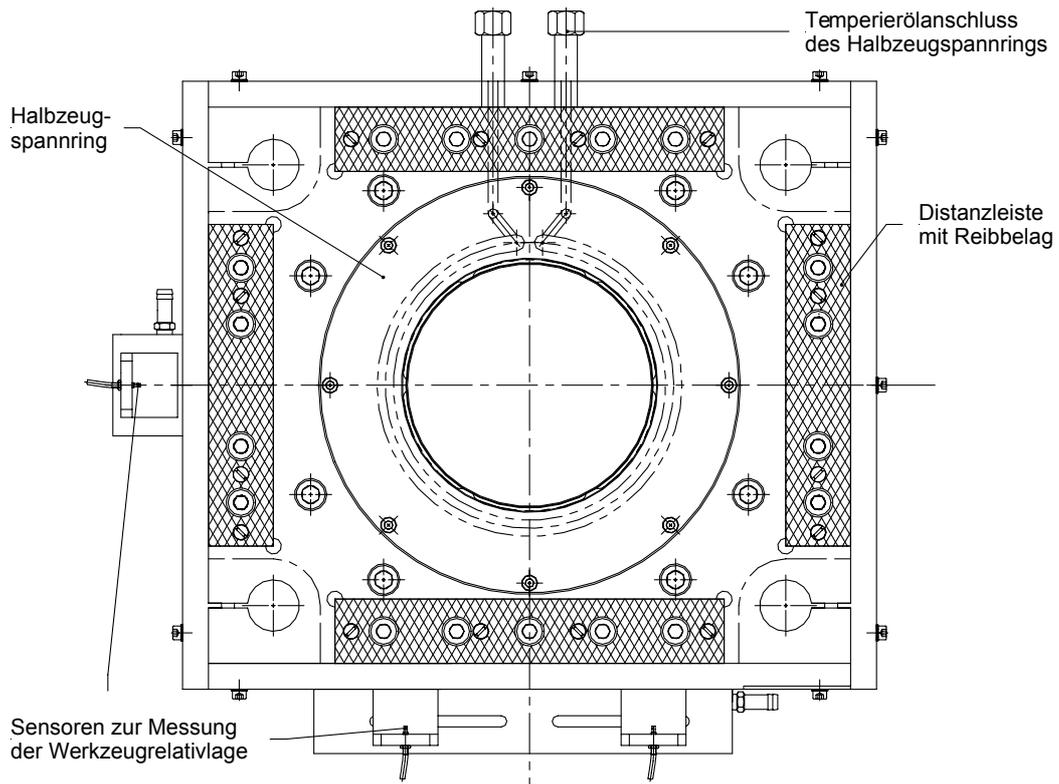


Abb. 5-7 Aufsicht der Halbzeugspannebene

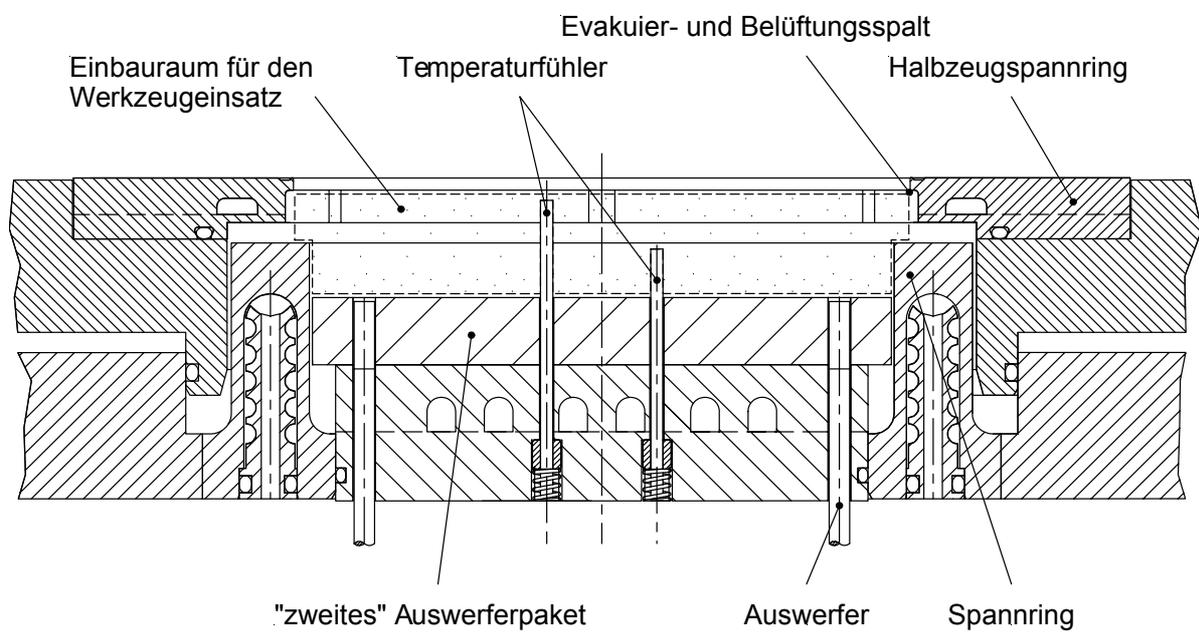
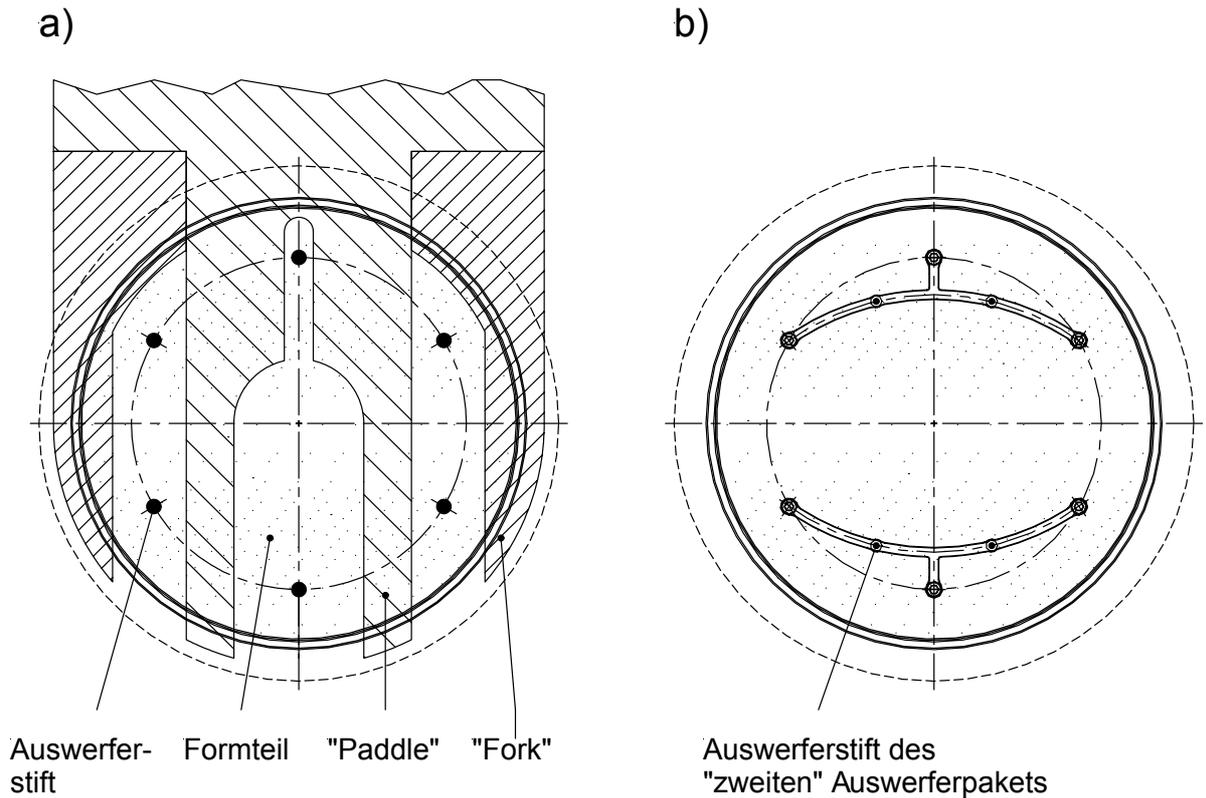


Abb. 5-8 Einbauraum für Werkzeugeinsatz und „zweites“ Auswerferpaket



Abb. 5-9 Gestaltungsvariation des Werkzeugeinsatzes
 a) Werkzeugeinsatz mit getrennter Formeinsatzplatte und Heizplatte
 b) Werkzeugeinsatz bestehend aus einer Formeinsatzplatte mit integriertem Heizleiter und Halterahmen



Auswerferstift
 Formteil
 "Paddle"
 "Fork"

Auswerferstift des
 "zweiten" Auswerferpakets

Abb. 5-10 Variation der Auswerferpositionen
 a) Auswerferpositionen der Grundebene passend zu SEMI-Standard E22-0697
 b) Beispiel für die Verbindung zwischen den Auswerferstiften der Grundebene und Auswerferstiften des „zweiten“ Auswerferpaketes

5.1.1 Werkzeugtemperierung

Hinsichtlich der Temperierung ist das Werkzeug in die drei Bereiche „Werkzeugrahmen“, „Werkzeugkern“ und „Werkzeugeinsatz“ gegliedert, wie sie in Abbildung 5-11 dargestellt sind. Der Werkzeugrahmen wird mittels Heizpatronen (1) in einer Mehrkreisregelung auf konstanter Temperatur gehalten, um Verlagerungen zwischen den Plattenebenen, respektive Funktionsebenen, und somit Spannungen in den Hochgenau-Kugelführungen zu vermeiden. Die Temperatur liegt nahe der Glasübergangstemperatur des zu verarbeitenden Kunststoffes. Der Halbzeugspannring wird zusätzlich über einen ersten Ölkreislauf (2) temperiert, um die aus der Kavität einfließende Wärme abzuführen. Die Kühlplatte und mit ihr der Werkzeugkern sowie das „zweite“ Auswerferpaket werden permanent durch einen spiralförmig verlaufenden zweiten Öl-Temperierkreislauf (3) auf geringe Temperaturen – zum Beispiel 20 °C – gekühlt. Der Werkzeugeinsatz wird mittels eines spiralförmig in der Heizplatte verlegten Heizleiters (4) beheizt.

Während der Heizphase wird die von der Kühlplatte abgehobene Heizplatte von der Entformtemperatur auf die Umformtemperatur des zu verarbeitenden Kunststoffes erwärmt. Um dabei eine hohe Genauigkeit bei gleichzeitig hoher Dynamik zu erzielen, werden die Heizleitertemperatur und die Formeinsatzoberflächentemperatur mit jeweils einem Temperaturfühler erfasst und zu einer Kaskadenregelung verschaltet. Um das Abfließen der Wärme aus dem Randbereich der Heizplatte in den Spannring zu vermeiden, wird der dritte Ölkreislauf (5) mit warmem Öl beaufschlagt. Ein vierter Ölkreislauf (6) verhindert, dass dadurch der Werkzeugrahmen erwärmt wird. Die Wärmedehnung der Heizplatte gegenüber dem konstant temperierten Werkzeugrahmen wird durch den Spannring aufgenommen. Aufgrund der symmetrischen Einspannung werden radiale Verlagerungen des Formeinsatzzentrums vermieden und eine Aufwölbung des Formeinsatzes im Vergleich zu einer starren Einspannung deutlich verringert.

Durch Druckbeaufschlagung der Ringzylinder oder durch die Prägekräfte werden die Formeinsatzträgererebenen gegen die Tellerfederkräfte verfahren, so dass die Werkzeugeinsätze auf den Kühlplatten (bzw. den Distanzplatten der „zweiten“ Auswerferpakete) aufsetzen und damit die Kühlphase eingeleitet wird. Aufgrund des großen Temperaturunterschiedes zwischen Werkzeugeinsatz und Kühlplatte wird der Heizplatte die Wärme sehr schnell entzogen. Durch die gleichzeitige Beaufschlagung des Ölkreislaufs (5) mit kaltem Öl wird der Randbereich der Heizplatte mitgekühlt. Um Spannungen in der Trennebene zwischen Heizplatte und Kühlplatte zu vermeiden, wird für beide derselbe Werkstoff gewählt. Darüber hinaus wird der Werkzeugeinsatz, nachdem sich die Grenzflächentemperaturen angeglichen haben, nochmals kurz abgehoben, um Spannungen in der Grenzfläche abzubauen. Zur Steuerung der Kühlzeit werden die Vorlauftemperaturen des Ölkreislaufes (3) in der Kühlplatte und des Kreislauf (5) im Spannring variiert. Durch das Abstimmen der Temperatur des Kreislaufs (2) im Halbzeugspannring wird verhindert, dass der Evakuierespalt während der Prägephase mit Kunststoff befüllt wird.

Sobald die Entformtemperatur an der Formeinsatzoberfläche erreicht ist, wird der Prägedruck reduziert und die Werkzeughälften um einen Weg von 2 mm aufgefahren. Durch die simultane Wegnahme des Pneumatikdruckes in den Ringzylindern werden dabei die Werkzeugeinsätze in beiden Werkzeughälften von den Kühlplatten abgehoben. Dadurch findet

keine weitere Kühlung der Werkzeugeinsätze statt und die Entformung verläuft unter isothermen Bedingungen. Nach der Entformung des Formteils beginnt für den automatisierten Betrieb und zur Erzielung kurzer Zykluszeiten unmittelbar die nächste Heizphase. Um bei geöffnetem Werkzeug die Oxidation der Formeinsatzoberflächen zu vermeiden, werden diese über die Evakuier- und Belüftungsspalte mit Stickstoff gespült.

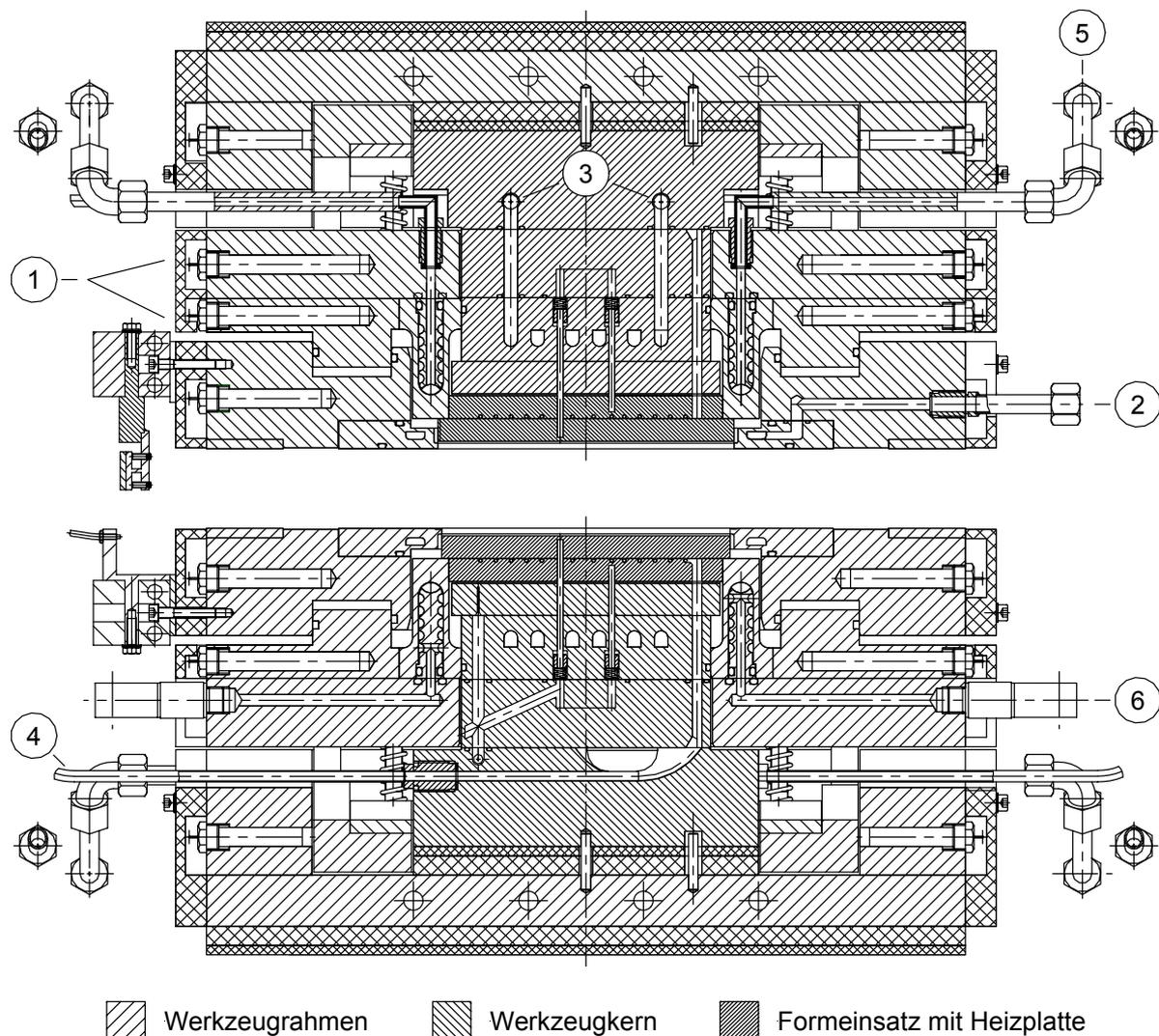


Abb. 5-11 Temperierung des Werkzeugs

1: Heizpatronen; 2: erster Ölkreislauf; 3: zweiter Ölkreislauf; 4: flexible Heizleiter; 5: dritter Ölkreislauf; 6: vierter Ölkreislauf

5.1.2 Simulationsrechnung zur Bestimmung der Aufheizzeiten

Eine erste Abschätzung der erforderlichen Aufheizzeiten basiert auf der Berechnung der Wärmemenge, die dem Formeinsatz zur Temperaturerhöhung von der Entformtemperatur auf die Umformtemperatur zugeführt werden muss. Mit der gegebenen Heizleistung des Heizleiters kann damit die Aufheizzeit zu

$$\Delta t = \frac{m \cdot c \cdot (T_U - T_E)}{P} \quad (5.1)$$

mit: Δt = Aufheizzeit

m = Masse des Formeinsatzes

c = spezifische Wärmekapazität des Formeinsatzwerkstoffs

T_U = Umformtemperatur; T_E = Entformtemperatur

P = Heizleistung

berechnet werden.

Auf dieser Grundlage soll die Aufheizzeit für den in dieser Arbeit zur Fertigung des Demonstrators einzusetzenden Formeinsatz abgeschätzt werden. Der Formeinsatz wird zur Beheizung mit einer Heizplatte kombiniert, so dass sich die zu beheizende Gesamtmasse aus der Masse des Formeinsatzes und der Heizplatte ergibt. Beide werden aus Messing gefertigt und besitzen eine Stärke von 12 mm. Die Durchmesser betragen 150 mm bzw. 142 mm. Messing besitzt eine Dichte von 8400 kg / m³ und eine spezifische Wärmekapazität von 376 J / kg K. Mit der Heizleistung des flexiblen Heizleiters von 1300 W ergibt sich daraus für eine Temperaturerhöhung von 90 K eine Aufheizzeit von 90 s.

Um den Einfluss der Wärmeleitungswege und der Wärmeverluste durch die Einspannung des Formeinsatzes bzw. der Heizplatte im Spannring zu berücksichtigen, wurde eine FEM-Simulation mit dem Programm ANSYS [Ansy02] durchgeführt.

Hierzu wurden der Formeinsatz und die Heizplatte als ein zusammenhängender Körper modelliert; die Wärmübergangswiderstände von der Heizplatte zum Formeinsatz wurden also nicht berücksichtigt. Angenommen wurde ebenfalls ein vollflächiger Kontakt zwischen dem Heizleiter und der Nut, in die der Heizleiter eingelegt ist.

Der Spannring, der in Abbildung 5-12 gezeigt ist, besitzt einen Einsatz. In diesem Einsatz verlaufen an der Innen- und Außenseite zwei spiralförmige Ölkanäle für „kaltes“ Öl und an seinem Kopf einen Kanal, bestehend aus zwei Ästen, für „heißes“ Öl. Hierdurch kann der Spannring entlang der Stege auf die Temperatur des Werkzeugrahmens temperiert werden und am Kopf beheizt werden, um den Wärmezug aus dem Formeinsatz zu begrenzen. Für die Simulation wurden der Spannring und die Öltemperierkanäle modelliert. Wegen der Symmetrie der Gesamtanordnung wurde das Modell auf ein Teilsegment mit einem Winkel von 12° begrenzt.

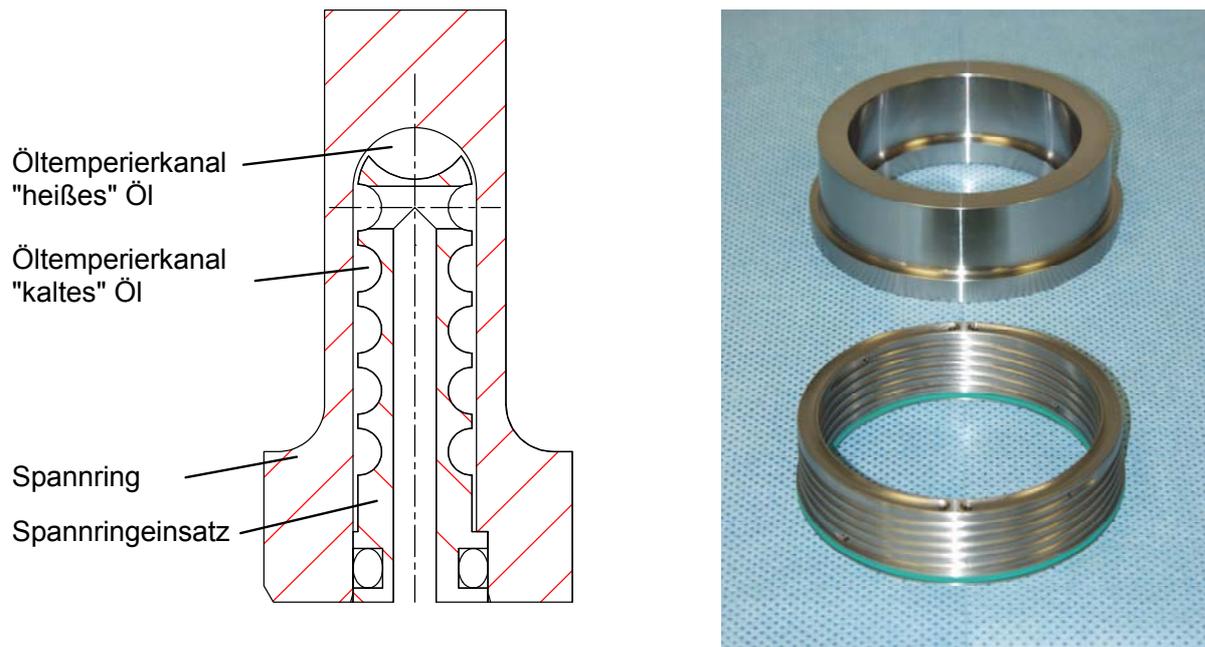


Abb. 5-12 Aufbau aus Spannring und Spannringeinsatz. In den Spannringeinsatz eingefräste Nuten bilden getrennte Temperierkanäle für „heißes“ und „kaltes“ Öl. Dadurch kann der Kopfbereich des Spannringes beheizt bzw. der Spannring auf die Temperatur des Werkzeugrahmens temperiert werden. Der Spalt zwischen Spannring und Spannringeinsatz erlaubt die radiale Dehnung des Spannringes.

Für die Simulation wurden folgende Randbedingungen angenommen (Abbildung 5-13):

Die Heizplatte ist in dem Spannring eingepresst, so dass sich ein guter Wärmekontakt ergibt. Für den Wärmeübergangskoeffizient wird daher ein Wert von $\alpha_1 = 21000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ angenommen [Mold02]. Der Formeinsatz liegt im Randbereich auf dem Spannring auf, ohne angepresst zu werden. Für diesen Fall wird ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha_2 = 2500 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ angenommen [Mold02]. Für den Wärmeübergang zwischen dem Temperieröl (Marlotherm S) und dem Spannring wird ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha_3 = 3000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ angenommen [Meng99]. Die durch den Heizleiter an die Nutwand abgegebene Oberflächenleistung betrage bei voller Heizleistung 6 W/cm^2 . Die Materialparameter wurden wie in Tabelle 5-1 angegeben gewählt.

Werkstoff	Dichte [kg/m ³]	spezifische Wärmekapazität [J/kg K]	Wärmeleitfähigkeit [W/m K]
Formeinsatz/ Heizplatte: Messing	8440	376	113
Spannring: Stahl 1.2312	7800	500	15

Tab. 5-1 Materialparameter von Messing und Stahl 1.2312, wie sie in der Simulation angenommen wurden

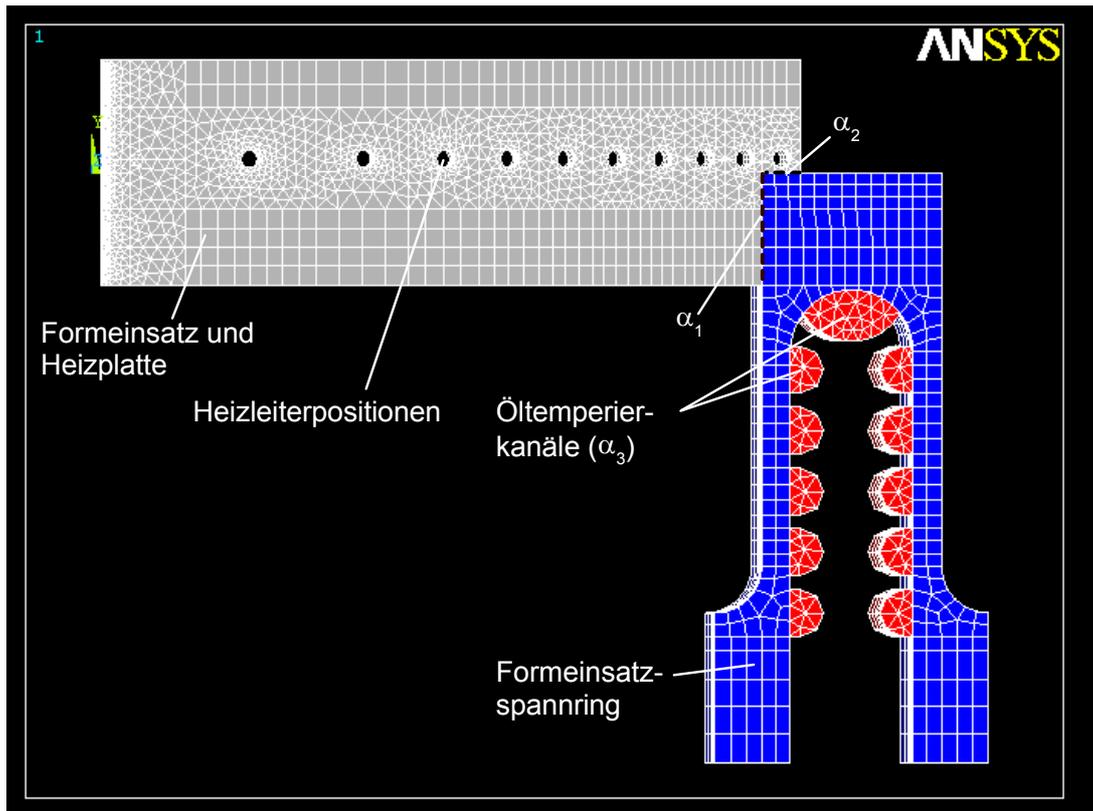


Abb. 5-13 Formeinsatzspannring (FEM-Rechnung)

Die Simulation wurde für eine konstante Heizleistung und konstante Öltemperaturen von 150°C für das heiße Öl und 90 °C für das kalte Öl durchgeführt. Dabei wurde unterstellt, dass das heiße Öl, welches im Temperiergerät auf 180°C geheizt wird, aufgrund von Wärmeverlusten in den Zuleitungen im Mittel nur mit 150 °C im Werkzeug zur Verfügung steht. Das kalte Öl zirkuliert ständig, so dass eine Temperatur von 90 °C angenommen wird. Dies entspricht gleichzeitig der Temperatur des umliegenden Werkzeugrahmens.

Abbildung 5-14 zeigt die Temperaturverteilung nach einer Heizdauer von 140 Sekunden. Darin ist zu erkennen, dass der Formeinsatz und die Heizplatte eine Temperatur zwischen 175 und 185 °C aufweisen. Der Spannring hat innerhalb dieses Zeitraums im Kopfbereich die Temperatur des Öls von 150°C angenommen. Zum Fußbereich hin wird die Temperatur durch das kalte Öl auf 90 °C abgebaut, so dass keine Erwärmung des umliegenden Werkzeugrahmens erfolgt.

Die mit Hilfe dieses Modells bestimmte Aufheizzeit von etwa 140 s liegt um 50 % über dem Wert von 90 s, der sich auf der Basis der erforderlichen Wärmemenge ergibt. Die Gründe hierfür liegen in der Hauptsache in der erforderlichen Wärmeausbreitung und in der Wärmeabgabe in den Spannring.

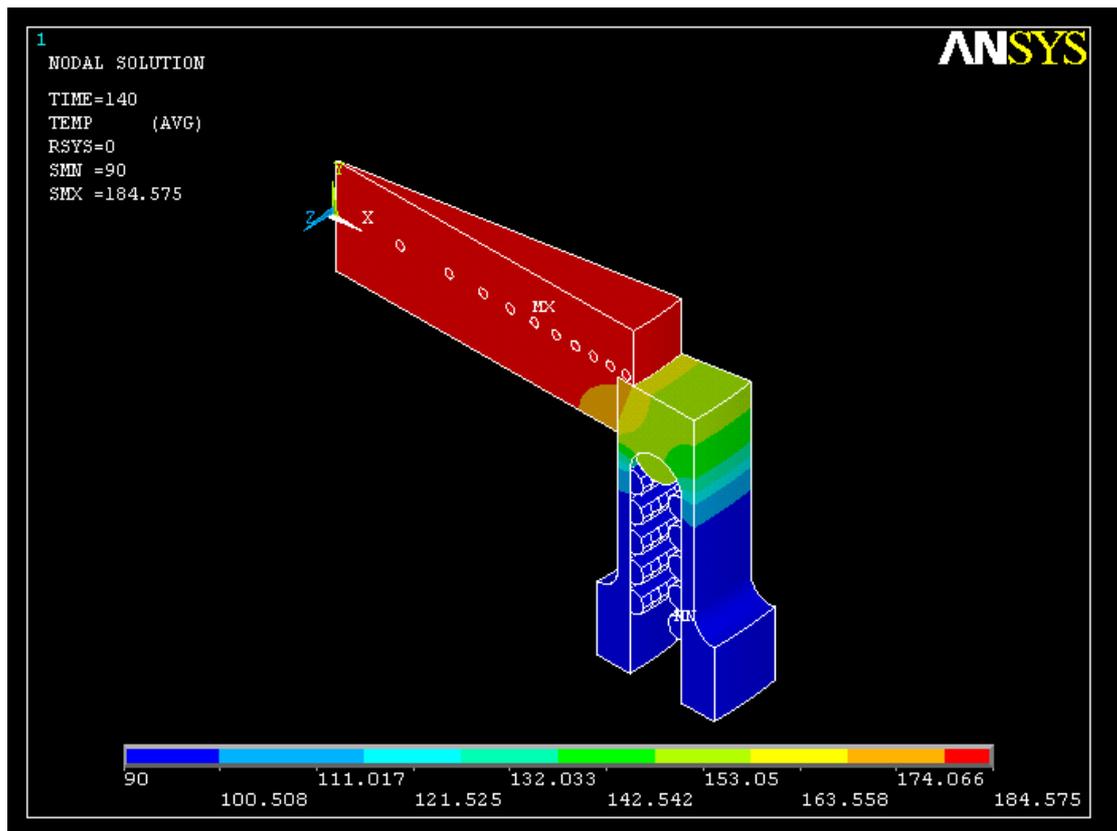


Abb. 5-14 Temperaturverteilung nach 140 Sekunden

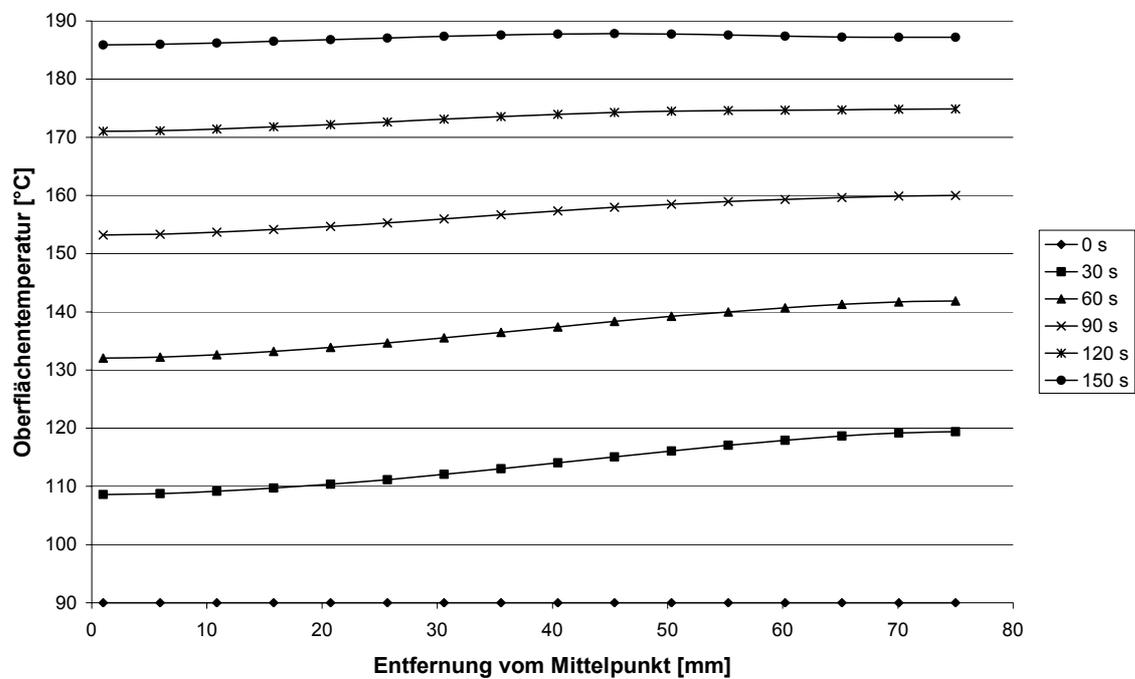


Abb. 5-15 Temperaturverteilung entlang eines radialen Strahls an der Formeinsatzoberfläche. Aufgetragen für 0 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s und 150 s nach Beginn des Aufheizvorgangs.

Aus dem Simulationsergebnis kann ebenfalls die Temperaturverteilung an der Formeinsatzoberfläche entnommen werden. Hierzu wurden die Knotentemperaturen des FEM-Modells entlang eines radialen Strahls an der Formeinsatzoberfläche zu den in Abbildung 5-15 dargestellt Zeiten aufgetragen. Darin ist zu erkennen, dass wegen der Verteilung der Heizleistung zunächst der Randbereich des Formeinsatzes schneller erwärmt wird. Mit dem Überschreiten der Öltemperatur von 150 °C kommt es jedoch zu einem Ausgleich, so dass nach 150 s die maximale Abweichung der Oberflächentemperatur auf unter ± 2 K reduziert ist.

Als Fazit ist festzuhalten, dass der gewählte Werkzeugaufbau kurze Aufheizzeiten im Bereich von 2 bis 3 Minuten und eine weitgehend homogene Oberflächentemperatur zulässt.

5.1.3 Evakuierung und Belüftung

Die Kavität wird mit Hilfe von O-Ringdichtungen zwischen den Halbzeugspannrings, zwischen Werkzeugkern und Spannrings als auch an allen Durchführungen innerhalb des Werkzeugkerns vakuumgedichtet. Die individuelle Abdichtung von Auswerferstiften im Werkzeugeinsatz kann somit entfallen. Alle Dichtungen sind trotz der hohen Umformtemperaturen bis 350 °C maximal 300 °C ausgesetzt, so dass Perfluorelastomere mit Dauereinsatztemperaturen bis 325 °C als Dichtungsmaterial eingesetzt werden können.

Die Evakuierung und Belüftung der Kavität erfolgt – für beide Werkzeughälften getrennt – über den Evakuier- und Belüftungsspalt (siehe oben Abbildung 5-8) zwischen Formeinsatz und Halbzeugspannrings. Insbesondere zur Steuerung der Entformkräfte ist der Belüftungsdruck zwischen 1 bar und 6 bar Überdruck kontinuierlich regelbar. Als Belüftungsmedium wird Stickstoff verwendet, um die Oxidation der Formeinsatzoberflächen zu vermeiden.

5.1.4 Spannen des Halbzeugs

Grundsätzlich kann mit Granulat, dicken plattenförmigen Halbzeugen und dünnen Folien gearbeitet werden. Während das Granulat als Schüttung in die Kavität eingefüllt wird, können plattenförmige Halbzeuge entweder in die Kavität eingelegt oder über einen umlaufenden Bund zwischen beiden Halbzeugspannrings geklemmt werden. Dünne Folien werden generell zwischen den Halbzeugspannrings geklemmt. Um die Kraftübertragung über die Distanzleisten mit Reibbelag sicherzustellen, werden diese mit Stahlfolien der entsprechenden Dicke unterlegt. Mittels der Klemmung des Halbzeugs zwischen den Halbzeugspannrings, werden

- empfindliche Formeinsatzstrukturen der unteren Werkzeughälfte gegenüber Beanspruchungen geschützt, welche durch die Halbzeugzuführung, das Gewicht und den Schrumpf des Halbzeugs entstehen.
- keine Strukturbereiche durch das Halbzeug verschlossen, so dass die vollständige Evakuierung der Formeinsatzstrukturen sichergestellt ist

5.1.5 Erwärmen und Strukturieren des Halbzeugs

Weil das Werkzeug über zwei mikrostrukturierte Formeinsätze verfügt, kann das Halbzeug nicht, wie bei der einseitigen Strukturierung über die unstrukturierte Gegenplatte, zunächst vollflächig und über seine gesamte Dicke erwärmt werden, ehe es in Kontakt mit den Werkzeugstrukturen kommt. Besonders bei Formeinsatzstrukturen mit hoher Querkraftempfindlichkeit ist es deshalb erforderlich, das folien- oder plattenförmige Halbzeug langsam und präzise geführt mit den Formeinsätzen in Kontakt zu bringen.

Das Halbzeug wird daher zunächst mittels des in der Zuleitung in etwa auf Entformtemperatur erwärmten Stickstoffs vorgewärmt. Anschließend wird das Halbzeug mittels Stickstoffdruck auf der einen Seite der Kavität und Evakuierung auf der anderen Seite aus der Mittellage ausgelenkt und vorgespannt, um Faltenbildung aufgrund der Wärmedehnung des Halbzeugs zu vermeiden. In diesem Zustand wird das Werkzeug weiter geschlossen und das Halbzeug an einen der beiden Formeinsätze angelegt. Aufgrund der flächigen, fein dosiert steuerbaren Belastung durch den Stickstoffdruck tauchen die Formeinsatzstrukturen langsam, entsprechend der fortschreitenden Erwärmung des Kunststoffes, in das Halbzeug ein.

Im Weiteren wird die Prägekraft bis zur maximalen Schließkraft des Lastrahmens erhöht und die Schwindung der Schmelze während der Abkühlung durch kraftgeregeltes Zustellen des Werkzeugs ausgeglichen (isobares Prägen). Sobald die Entformtemperatur bzw. die 1 bar-Isobare erreicht ist, wird die Entformung eingeleitet.

5.1.6 Entformung

Abbildung 5-16 zeigt schematisch den Querschnitt der Kavität und des umliegenden Werkzeugbereichs im geschlossenen Zustand des Werkzeugs gegen Ende der Umformphase. In dem gezeigten Fall ist ein dünnes Folienhalbzeug zwischen den Halbzeugspannrings geklemmt.

Die untere Werkzeughälfte wird zu diesem Zeitpunkt mit der Prägekraft gegen die feststehende obere Werkzeughälfte gepresst. Die Trägerplatten der Halbzeugspannebene liegen federbelastet an den Ausstoßbolzen des Entformantriebes an. Mittels der Abstandssensoren zur Messung des Prägespaltes werden in beiden Werkzeughälften die Abstände zwischen der Formeinsatzoberfläche und der Oberfläche des Halbzeugspannrings gemessen.

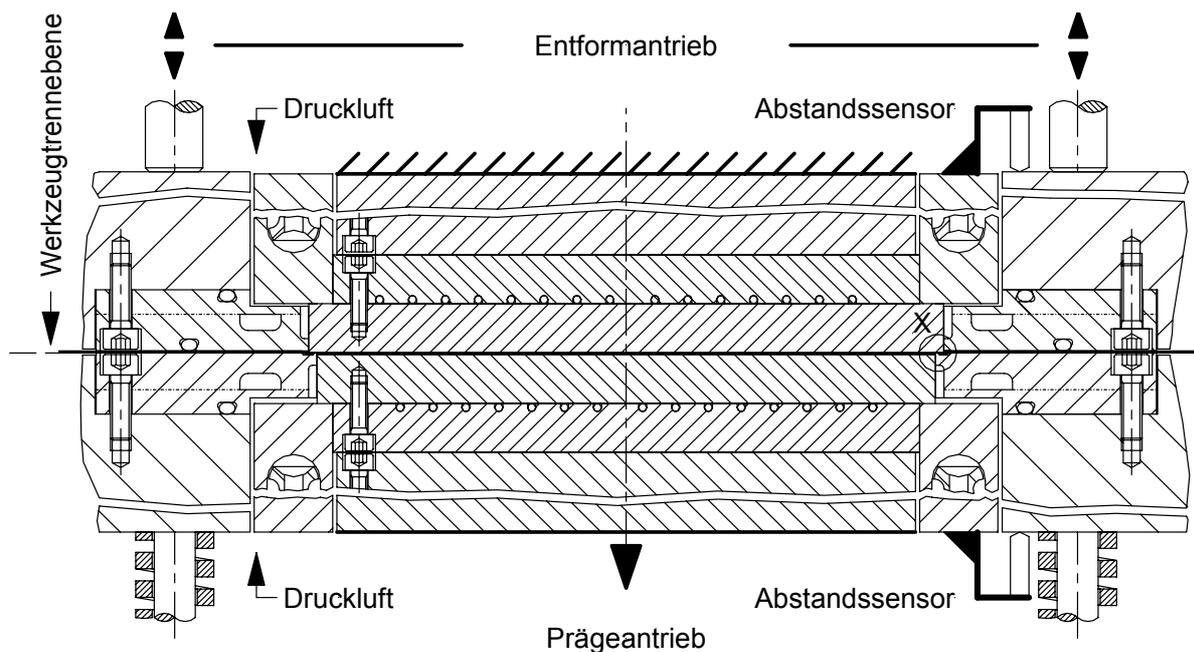


Abb. 5-16 Querschnitt der Kavität und des umliegenden Werkzeugbereichs gegen Ende der Umformphase (schematisch)

Ein schematisierter Ablauf der Entformung dünner Formteile ist in Abbildung 5-17 dargestellt. Der Ausgangszustand (A) zeigt einen Ausschnitt aus Abbildung 5-16. Dargestellt sind das Folienhalbzeug, die Formeinsätze und ein Teilquerschnitt der Halbzeugspannringe. Die weiteren Schritte (1-6) verlaufen wie folgt:

- **Überwinden der Haftkräfte im unteren Formeinsatz (1)**
 Durch den Prägeantrieb wird die untere Werkzeughälfte um einen geringen Öffnungsweg in der Größenordnung der Strukturtiefe des unteren Formeinsatzes verfahren, um die Haftkräfte des Formteils zum unteren Formeinsatz zu überwinden. Der Öffnungsweg wird mit dem Abstandssensor der Werkzeugunterhälfte gemessen. Die Halbzeugspannringe behalten währenddessen ihre Position bei, da sie über die Federn gegen die Ausstoßbolzen des Entformantriebes gedrückt werden. Dadurch ist sichergestellt, dass sich das Formteil im Außenbereich der Strukturfläche vom unteren Formeinsatz löst. Druckluft, die über den Spalt zwischen Formeinsatz und Halbzeugspannring eingeleitet wird, unterstützt die Entformung. Nachdem das Formteil gelöst ist, wird der Druck auf Umgebungsdruck reduziert.
- **Überwinden der Haftkräfte im oberen Formeinsatz (2 und 3)**
 Mit Hilfe des Entformantriebs werden die Halbzeugspannringe um den zuvor gemessenen Öffnungsweg in Richtung der unteren Werkzeughälfte verfahren, so dass das Formteil wiederum im Außenbereich der Strukturfläche vom oberen Formeinsatz gelöst und an den unteren Formeinsatz angelegt wird. Entsprechend zu Schritt 1 wird der Ringspalt zwischen dem oberen Formeinsatz und dem Halbzeugspannring mit Druckluft beaufschlagt, wodurch das Formteil in einer Schälbewegung vollständig vom oberen Formeinsatz gelöst wird. Der Formeinsatz der unteren Werkzeughälfte dient dabei als Gegenhalter, um die Überdehnung des Formteils zu verhindern. Nachdem das Formteil gelöst ist, wird der Druck auf Umgebungsdruck reduziert.

- **Entformen des Formteils aus den Formeinsatzstrukturen (4 und 5)**

Durch die synchrone Bewegung der unteren Werkzeughälfte und der Halbzeugspannringe wird das Formteil zunächst vollständig aus den Formeinsatzstrukturen der Werkzeugeoberhälfte entformt. Anschließend wird die Bewegung der Halbzeugspannringe gestoppt und das Formteil durch die weitere Werkzeugöffnungsbewegung aus den Strukturen des unteren Formeinsatzes entformt.

- **Vollständiges Öffnen des Werkzeugs (6)**

Schließlich wird das Werkzeug vollständig geöffnet. Das Formteil liegt dann auf dem unteren Halbzeugspannring auf und kann entnommen werden. Mit Hilfe von Auswerferstiften lässt sich das Formteil, zum Beispiel ein kunststoffbeschichteter Wafer, darüber hinaus vom Halbzeugspannring abheben, um es für die Entnahme an seiner Unterseite greifen zu können.

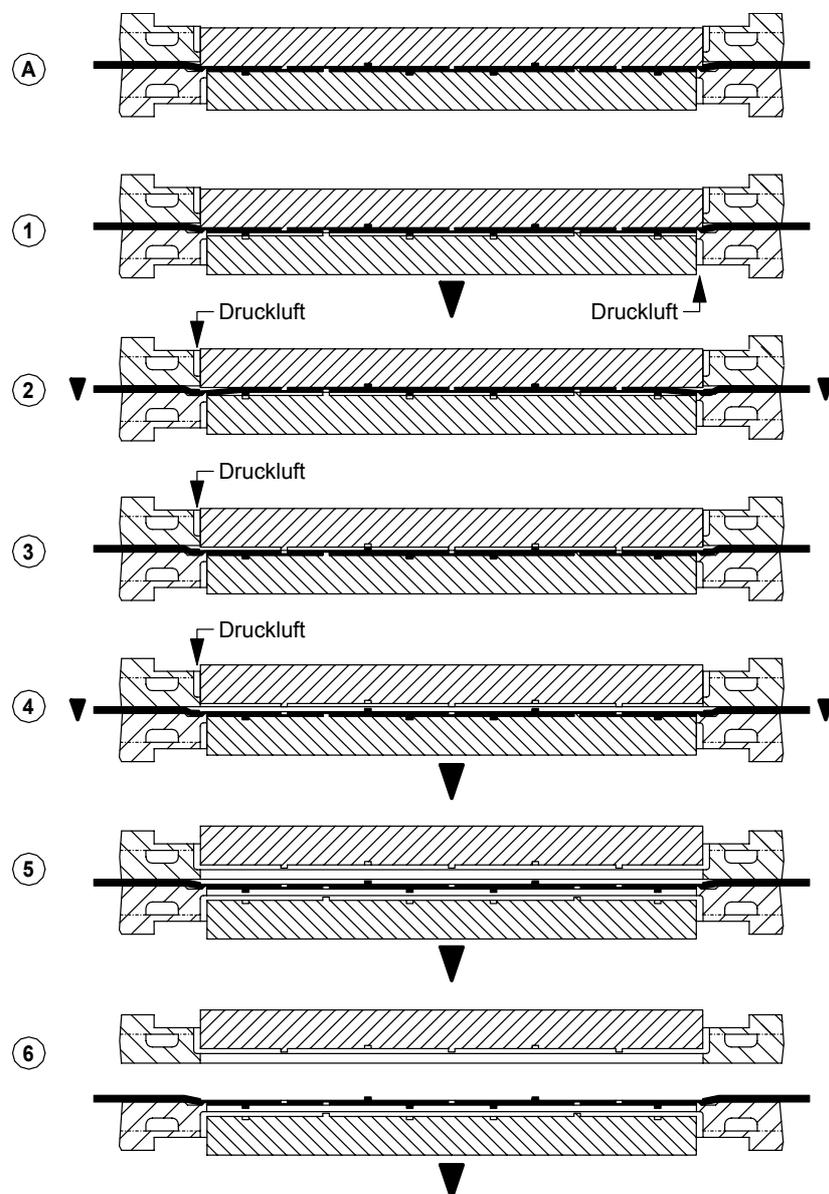


Abb. 5-17 Schematischer Ablauf des Entformungsvorganges

5.2 Aufbau und Funktion des Positioniertisches

Der in dieser Arbeit entwickelte Positioniertisch ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Er setzt sich aus einer Luftlagerplatte, einer Tischplatte, einer Temperierplatte und einer Festkörperführung zusammen.

In die Luftlagerplatte sind 16 Lagerelemente eingebracht, die jeweils über eine Düse mit Luft versorgt werden. Auf diesen Lagerelementen gleitet das Plattenpaket aus Tischplatte und Temperierplatte. Geführt wird es dabei durch die Festkörperführung. Diese ist symmetrisch zu den Hauptachsen des Tisches aufgebaut und über zwei Festlager mit der Luftlagerplatte verbunden. Zwischen den Festlagern ist der Führungsrahmen über vier Festkörpergelenke aufgehängt. Dieser wird mittels eines Piezoaktors und eines gegenüberliegenden Federstückes in der X-Achse verfahren. Über vier weitere Festkörpergelenke ist die Tischplatte an den Führungsrahmen angebunden. Mittels zweier Piezoaktoren und zweier Federstücke, die sich an dem Führungsrahmen abstützen, kann die Tischplatte – bei gleichsinniger Auslenkung der Aktoren – in der Y-Achse verfahren, bzw. – bei gegensinniger Auslenkung – um die Hochachse gedreht werden.

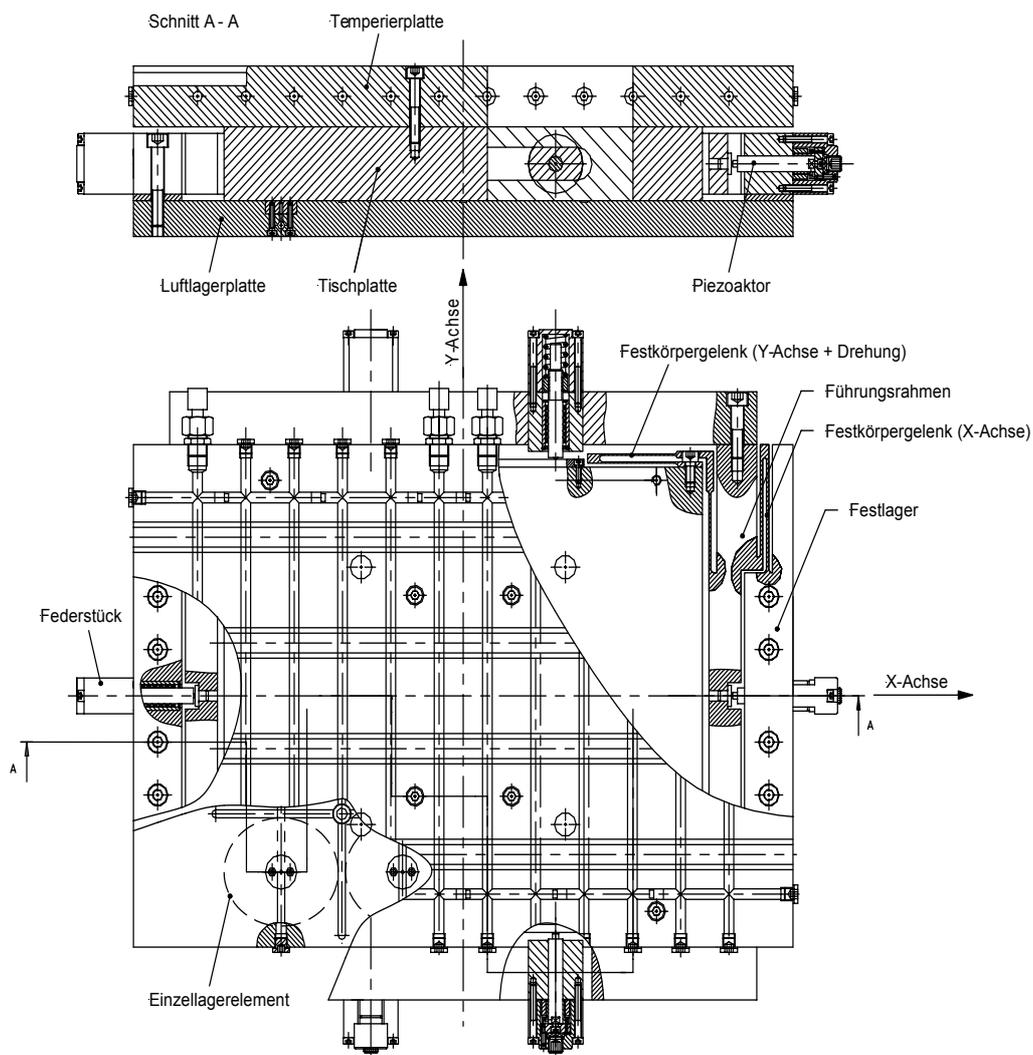


Abb. 5-18 Aufbau des Positioniertisches

Dieser Aufbau des Tisches entkoppelt mechanisch die Verschiebungen in der X-Achse von den Bewegungen in der Y-Achse. Dies ist vorteilhaft, da bei der Verschiebung des Tisches in einer Achse keine Querverschiebung zwischen dem Tisch und dem/den Aktor(en) der jeweils anderen Achse auftritt. Die mechanische Beanspruchung der Aktoren und der Kontaktflächen bei hoher Vorspannkraft der Federstücke wird dadurch gering gehalten.

Die Piezoaktoren sind mit den Sensoren zur Messung der Werkzeugrelativlage (siehe Abbildung 5-19) in drei Lageregelkreisen verschaltet. Die Sensoren sind in der Höhe der Werkzeugtrennebene angeordnet, so dass die Messachsen mit den zu messenden Abständen fluchten (Abbescher Grundsatz). Die Verstellbereiche der Piezoaktoren betragen $60\ \mu\text{m}$. Mit Hilfe zusätzlicher manueller Verstellmechanismen in den Aktoraufnahmen sind Verstellungen von $\pm 1\ \text{mm}$ möglich.

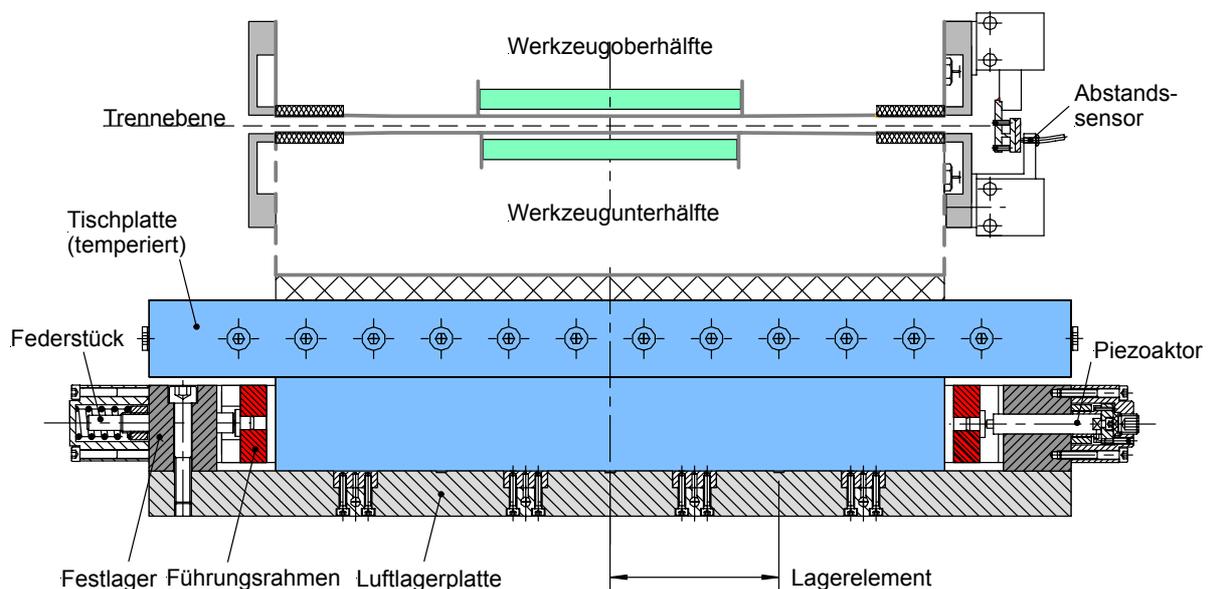


Abb. 5-19 Anordnung der Abstandssensoren und der Piezoaktoren im Werkzeug und Positioniertisch

Die Funktionsweise des Positioniertisches wird in Abbildung 5-20 schematisch dargestellt. Darin zeigt sich die Festkörperführung, die Tischplatte, die Antriebseinheiten bestehend aus den Piezoaktoren und den gegenüberliegenden Federstücken sowie die Sensoren und Messflächen des Werkzeugs. Ebenfalls eingezeichnet ist die Formeinsatzstrukturfläche mit Justiermarken.

Die Formeinsätze werden in den Werkzeughälften über die Spannringe und Passstifte bereits vorjustiert eingebaut, so dass nur ein zu korrigierender Versatz von unter $\pm 50\ \mu\text{m}$ zwischen den Formeinsatzstrukturen zu erwarten ist.

Dieser Versatz wird mittels einer ersten Testprägung und der Vermessung des Formteils in einer externen Messstation ermittelt. Dazu müssen in beiden Formeinsätzen jeweils zwei Justiermarken vorhanden sein, die durch die Prägung auf das Formteil übertragen werden. Diese Justiermarken können entweder zusätzlich zu den Funktionsstrukturen auf dem Formeinsatz hergestellt worden sein, oder sie sind selbst ein Teil der funktionstragenden Struktur.

In der externen Messstation – zum Beispiel ein Mikroskop mit Auflicht- und Durchlichteinheit oder ein Gerät zur doppelseitigen Waferinspektion – werden die Justiermarken auf der Vorder- und Rückseite bzw. der Ober- und Unterseite des Formteils simultan betrachtet und der Versatz zwischen ihnen beispielsweise mit Hilfe digitaler Bildverarbeitungstechniken ermittelt.

Nachdem während der ersten Prägung die Messwerte der Abstandssensoren als Bezugswerte gespeichert wurden, wird nun der ermittelte Versatz in Form von Korrekturwerten für die Tischposition in X- und Y-Richtung und der notwendigen Drehung um die Hochachse des Tisches in die Positioniersteuerung übertragen. Durch eine weitere Testprägung und das Vermessen des Formteils wird die Überdeckungsgenauigkeit der Strukturen überprüft und gegebenenfalls eine weitere Korrektur durchgeführt.

Für den Positioniervorgang selbst wird das Werkzeug bis auf einen Restspalt von etwa 1 mm geschlossen, so dass die Messflächen in die Messebene der Sensoren eintauchen. Der Tisch wird durch das Luftlager um die Lagerspaltweite von etwa 15 µm angehoben und die Sollposition durch die drei Lageregelkreise angefahren. Nachdem die Position erreicht ist, wird der Tisch wieder abgesetzt. Gegebenfalls wird die entstehende Lageabweichung aufgrund der Verkippung des Tisches beim Absetzen korrigiert. Dazu wird ein zweiter Positioniervorgang mit entsprechendem Vorhalt ausgeführt. Abschließend wird das Werkzeug bis zum Kontakt der Werkzeughälften geschlossen und mit dem Prägevorgang fortgefahren.

Nachdem die bestmögliche Überdeckung der Formeinsatzstrukturen erreicht ist, werden die gefundenen Sollabstandswerte der drei Sensoren vor jedem Prägezyklus automatisch kontrolliert und gegebenenfalls erneut angefahren.

Die Bestimmung des Versatzes zwischen den Formeinsatzstrukturen durch eine Testprägung und eine externe Vermessung des Formteils bietet den Vorteil, dass an dem Formteil alle Einflüsse, wie zum Beispiel Maschinenverformungen aufgrund der Prägekräfte, miterfasst und korrigiert werden. Zudem ist eine externe Messstation in der Regel bereits zu Qualitätssicherungszwecken erforderlich, so dass der Aufwand für eine in die Maschine integrierte Messeinrichtung entfallen kann.

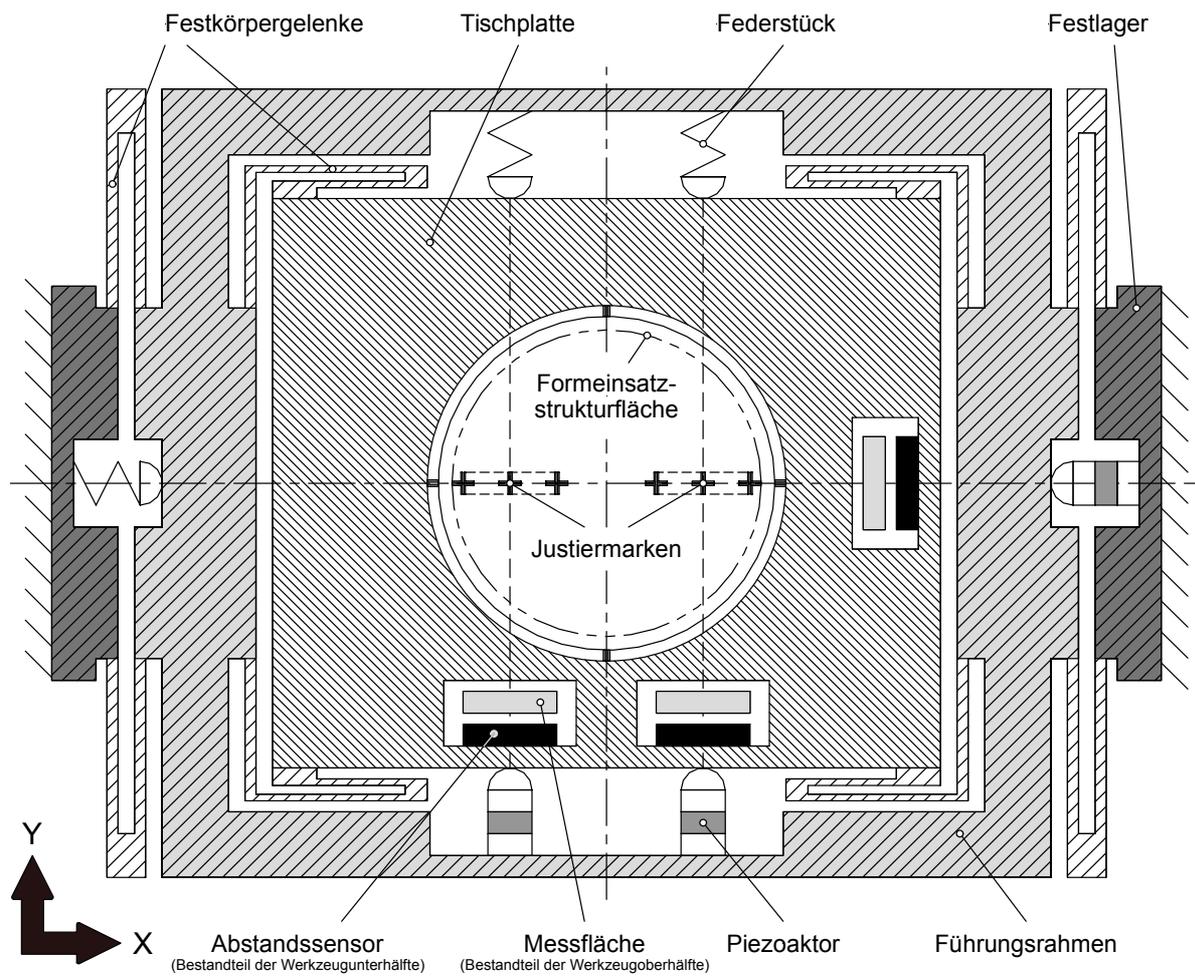


Abb. 5-20 Schematische Darstellung des funktionalen Aufbaus des Positioniertisches

6 Herstellung eines Demonstrators für das beidseitige Heißprägeverfahren

6.1 Fertigung der Werkzeugeinsätze

Die Werkzeugeinsätze zur Herstellung des Demonstrators besitzen den in Abbildung 5-9 a) dargestellten Aufbau, bei dem die Formeinsatzplatte mit einer separaten Heizplatte kombiniert ist. Das formeinsatzspezifische „zweite“ Auswerferpaket ist durch eine massive Platte ersetzt, da ausschließlich die druckluftunterstützte Entformung genutzt wird. Der Halbzeugspannung der Werkzeuoberhälfte besitzt eine plane Stirnfläche. In den Halbzeugspannung der Werkzeugunterhälfte ist eine umlaufende Ring-Nut eingebracht. Abbildung 6-1 zeigt Aufsichten der Werkzeugeinsätze beider Werkzeughälften sowie Details der Kavität im geschlossenen Zustand des Werkzeugs.

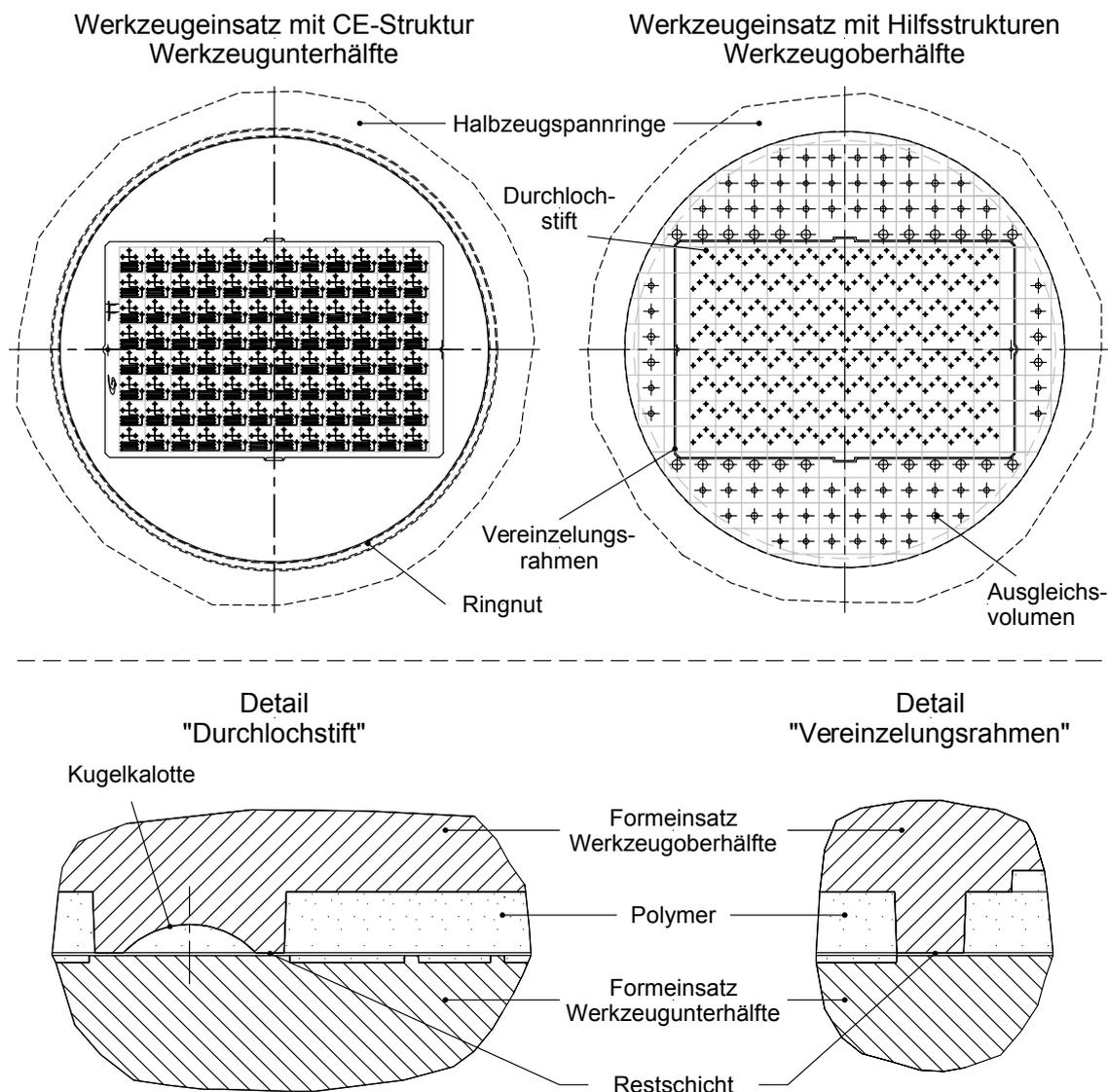
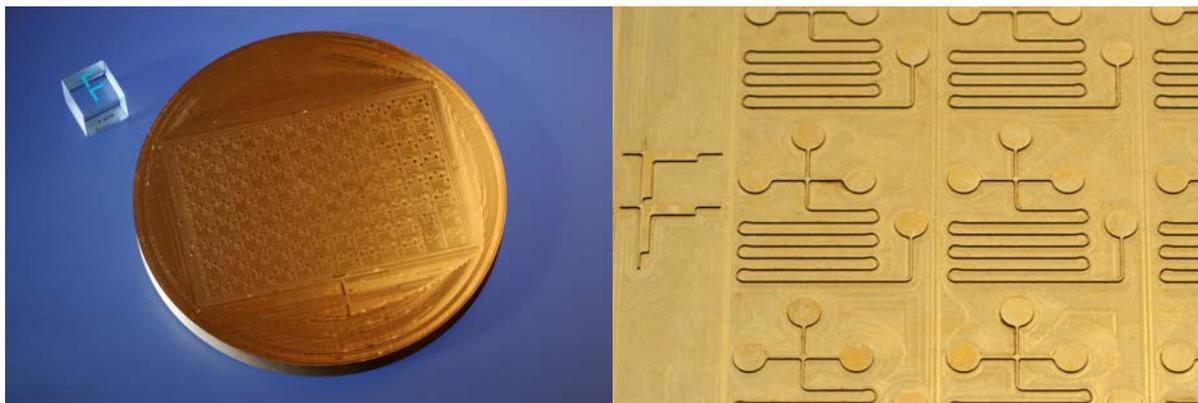


Abb. 6-1 Werkzeugeinsätze zur Herstellung des Demonstrators

In die Formeinsatzplatten sind die vorder- und rückseitige Struktur der Mikrotiterplatte mittels Mikrofräsbearbeitung eingebracht. Da die Struktur nur einen Teil der Formeinsatzfläche einnimmt, sind in den Formeinsatz der Werkzeugoberhälfte zusätzlich ein Vereinzelungsrahmen und Ausgleichsvolumina eingefräst (siehe Abbildung 6-1). Der Vereinzelungsrahmen erzeugt entlang der Außenkontur der Mikrotiterplatte eine dünne Restschicht von etwa 20 µm Dicke, so dass die Mikrotiterplatte aus dem runden Formteil ohne Zusatzwerkzeuge, wie zum Beispiel ein Stanzwerkzeug, herausgetrennt werden kann. Die Ausgleichsvolumina sind runde Vertiefungen, die im gleichen Raster wie die CE-Strukturen angeordnet sind. Über sie wird in jedem Quadrat des Rasters ein identisches Formteilmolumen erzielt, so dass die Fließwege der Kunststoffschmelze auf jeweils ein Quadrat des Rasters begrenzt werden.

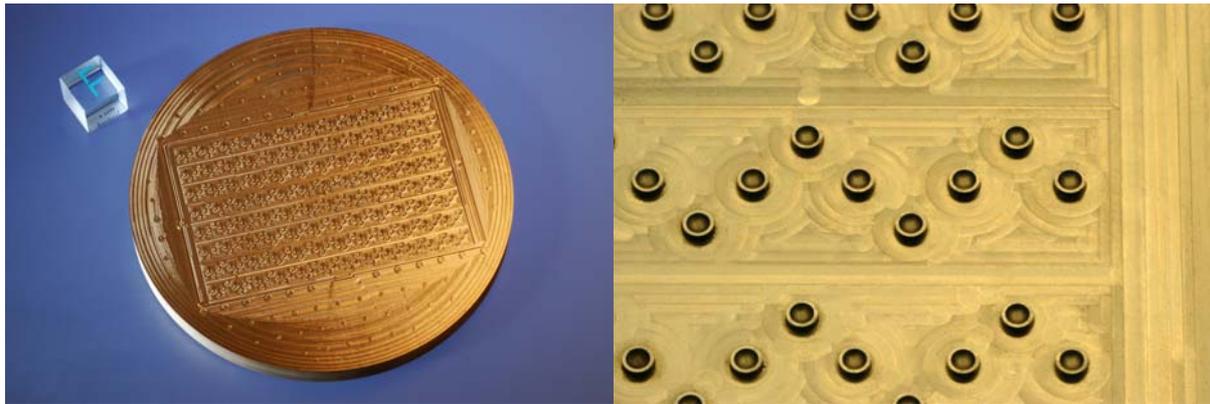
Um die Restschichtfläche im Bereich der Befüllöffnungen heraustrennen zu können und dabei sicherzustellen, dass beim Heraustrennen der Restschicht diese nahe der Umfangslinie abgetrennt wird, sind in die Durchlochstifte des Formeinsatzes Kugelkalotten eingebracht [Heck04a] (siehe Abbildung 6-1).

Die Abbildungen 6-2 und 6-3 zeigen die beiden Formeinsätze des Werkzeugeinsatzes. Die Formeinsätze haben einen Durchmesser von 150 mm bzw. 154 mm sowie eine Dicke von 12 mm. Sie sind aus Messing-Rundmaterial (DIN EN 12164 - CuZn39Pb3 - R360) gefertigt. Rückseitig wurden sie mittels Planschleifen auf 5 µm Ebenheit bearbeitet. Die Mikrostruktur wurde mittels Mikrofräsen mit Diamant-Fingerfräsern eingebracht. Die Rauheit der gefrästen Strukturflächen liegt bei $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ ($R_z \approx 1-2 \mu\text{m}$), die Seitenwandrauheit bei $R_a < 1 \mu\text{m}$ ($R_z \approx 1-2 \mu\text{m}$). Die Seitenwandneigung liegt entsprechend der Freiwinkel der eingesetzten Fräswerkzeuge bei 2° . Entstandene Grate entlang der Strukturkanten wurden nicht gezielt, etwa durch Elektropolieren, entfernt. Die Formeinsätze wurden jedoch in einer Abfolge aus Ultraschallbad, Aceton, Isopropanol und destilliertem Wasser gereinigt. Verbliebene Grate werden in wenigen Abformzyklen, dem sogenannten Reinigungsprägen, vor dem eigentlichen Produktionsbeginn entfernt.



Strukturdetail

Abb. 6-2 Formeinsatz der Werkzeugunterhälfte mit CE-Struktur



Strukturdetail

Abb. 6-3 Formeinsatz der Werkzeugoberhälfte mit Hilfsstrukturen zur Erzeugung dünner Restschichten im Bereich der Befüllöffnungen und Ausgleichsvolumina zur Vereinheitlichung der Strukturvolumenverteilung

Die Formeinsätze wurden mit einem Koordinatenmessgerät vom Typ Video-Check 400 HA des Herstellers Werth Messtechnik, Giessen, hinsichtlich der Strukturtiefe, der Ebenheit und der lateralen Überdeckung der Formeinsatzstrukturen untersucht.

Die Strukturtiefe und Ebenheit wurde anhand der in Abbildung 6-4 gezeigten Messpunkte ermittelt. Dabei wurde jeweils der Außenbereich der Formeinsatzoberfläche als Bezugsfläche gewählt. Die Diagramme zeigen für beide Formeinsätze die Strukturvertiefungsverläufe entlang der X- bzw. Y-Achse. Es ist zu sehen, dass die Formeinsätze entlang der X-Achse eine konkave Durchbiegung von etwa $10\ \mu\text{m}$ aufweisen. Entlang der Y-Achse zeigt sich diese Durchbiegung in geringerem Maße. Aus den Messwerten ergibt sich für beide Formeinsätze eine Ebenheit von unter $15\ \mu\text{m}$. Die im rechten Teil von Diagramm a) und im linken Teil von Diagramm b) sichtbare Stufe von etwa $8\ \mu\text{m}$ ist auf das Einwechseln eines Fräswerkzeuges mit abweichender Schaftlänge zurückzuführen.

Die laterale Überdeckungsgenauigkeit der Formeinsatzstrukturen wurde anhand der in Abbildung 6-5 gezeigten Strukturen in den Eckbereichen und der Mitte der Außenkanten der Mikrotiterplatte bestimmt. Dazu wurden die Positionen der Strukturen an beiden Formeinsätzen hinsichtlich der X- und Y-Achse vermessen und anschließend aufeinander projiziert. Die Messunsicherheit des Koordinatenmessgerätes beträgt bei dieser Messung $\pm 1\ \mu\text{m}$, so dass von einer bestmöglichen Überdeckung der Strukturen am Formteil von $\pm 5\ \mu\text{m}$ auszugehen ist.

Die in das Werkzeug eingebauten Formeinsätze sind in den Abbildungen 6-6 und 6-7 gezeigt.

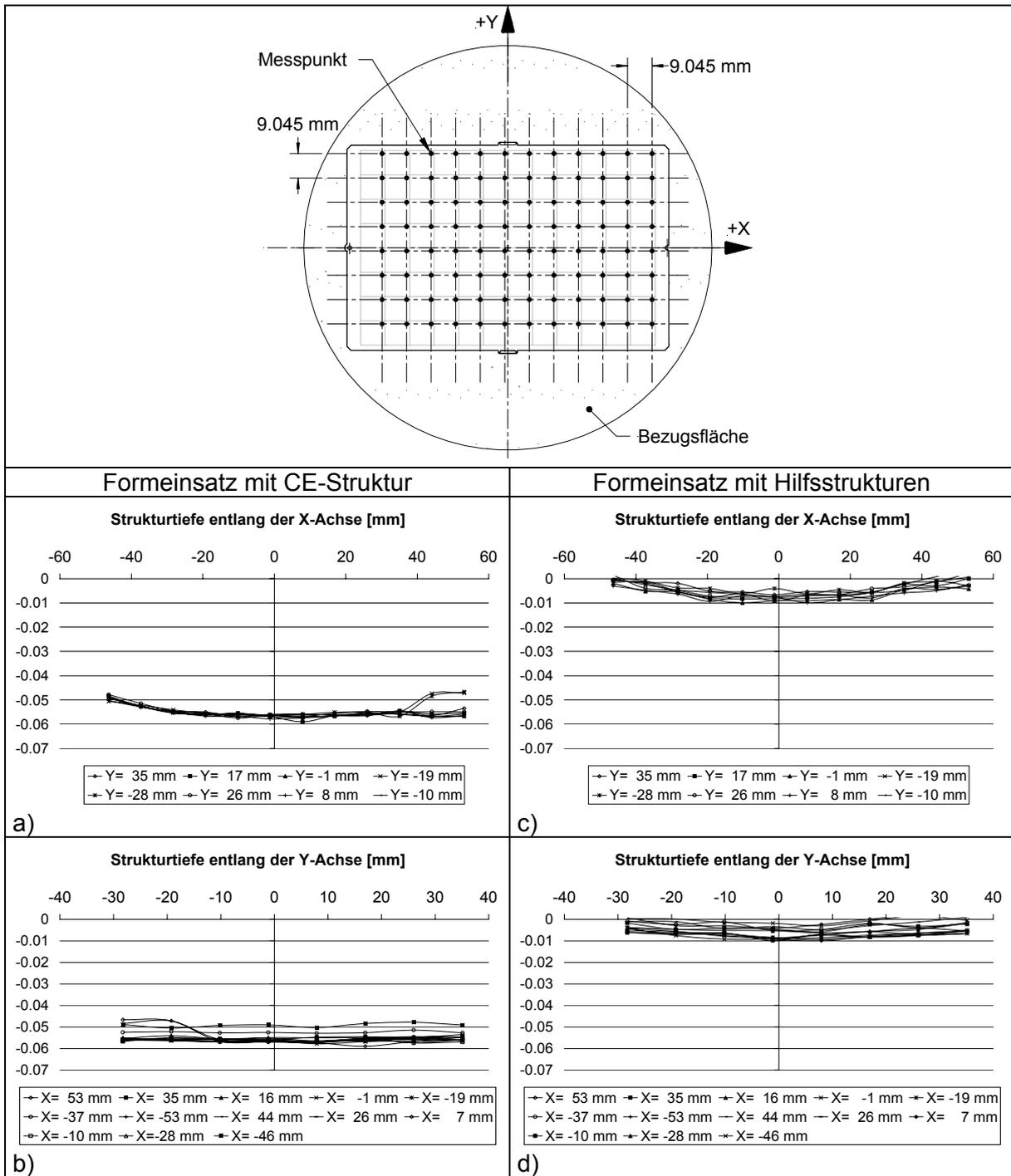


Abb. 6-4 Bestimmung der Strukturtiefe und Ebenheit der Formeinsätze

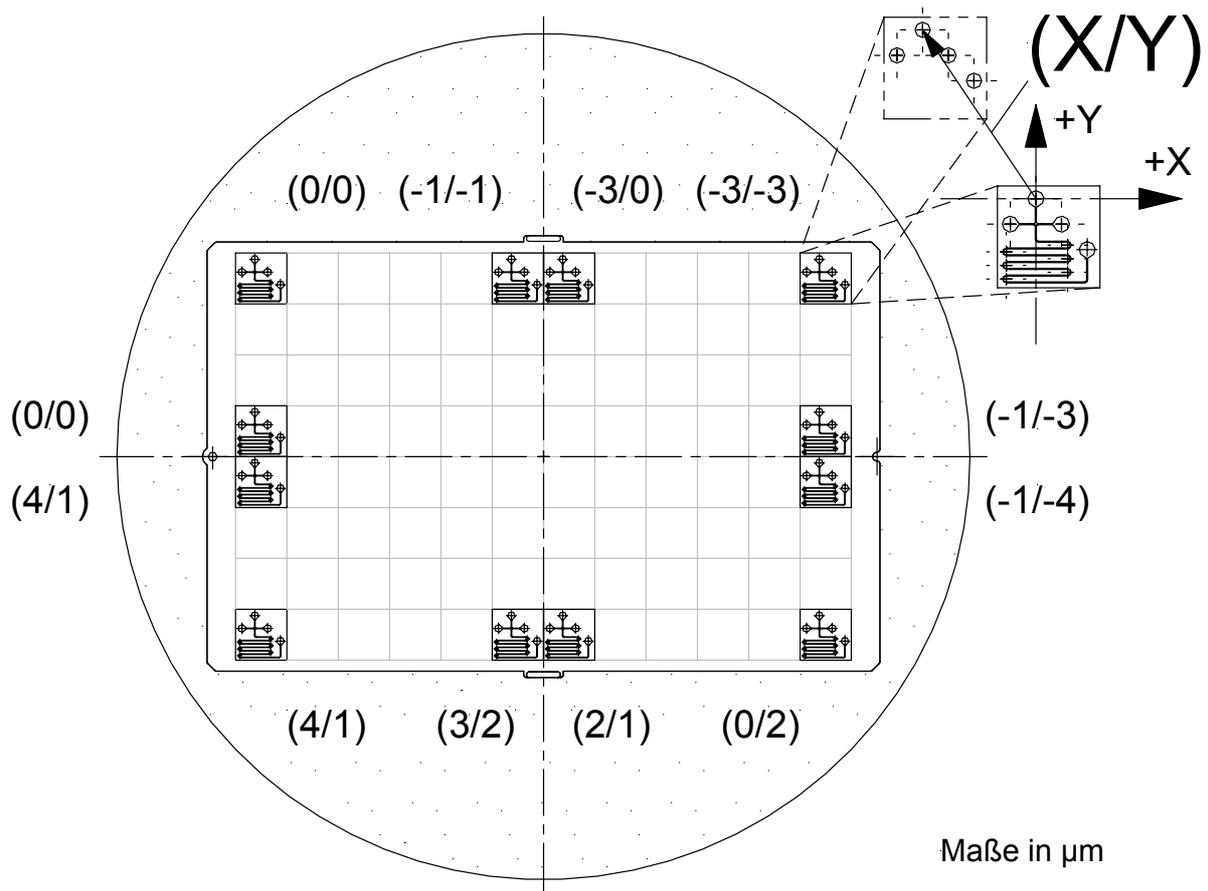


Abb. 6-5 Laterale Überdeckung der Formeinsatzstrukturen

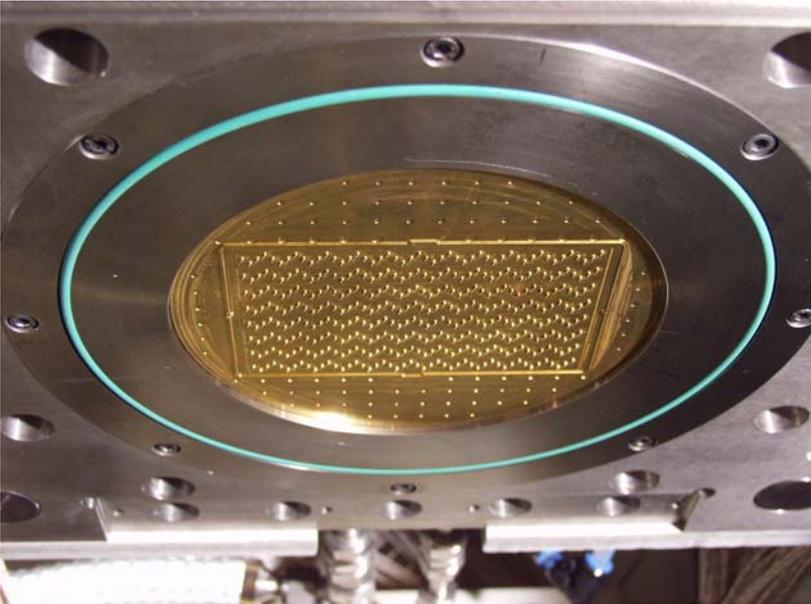


Abb. 6-6 Ansicht der Werkzeugoberhälfte

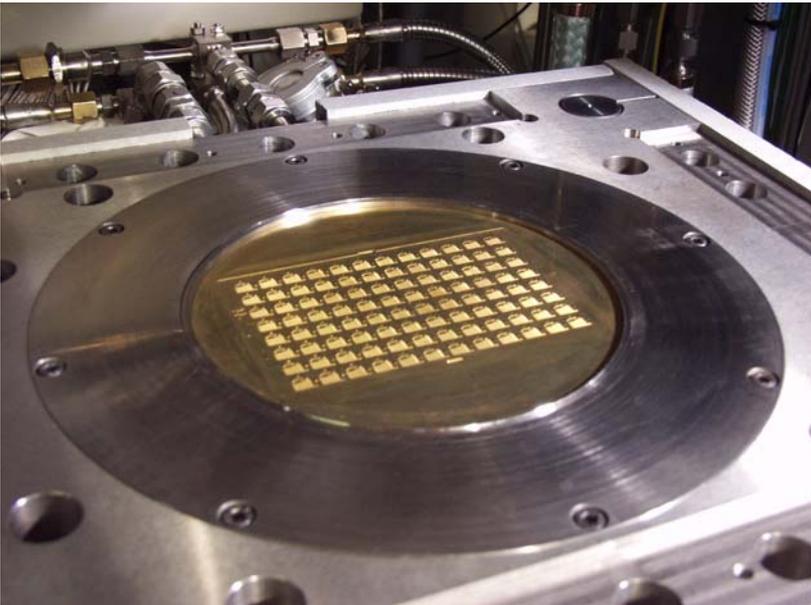


Abb. 6-7 Ansicht der Werkzeugunterhälfte

6.2 Abformung von Mikrotiterplatten

Mit dem oben unter Kapitel 5 vorgestellten Werkzeugaufbau und den oben unter Abschnitt 6.1 dargestellten Formeinsätzen ist es gelungen, Mikrotiterplatten als Demonstratoren für großflächige Formteile mit dünnen Restschichten durch beidseitiges Heißprägen herzustellen. Die Mikrotiterplatten werden üblicherweise aus PMMA oder PC abgeformt. Für die Versuche wurde Folienmaterial aus PMMA des Herstellers Röhm vom Typ 99530 eingesetzt.

Diese Folie wurde als Formatware bezogen und besitzt eine Stärke von 530 μm mit einer Toleranz von $\pm 20 \mu\text{m}$. Für die Verarbeitung wurde sie in Einzelplatten mit einer Abmessungen von $20 \times 20 \text{ cm}^2$ zugeschnitten. Die Vicat-Erweichungstemperatur der Folie beträgt 98 $^{\circ}\text{C}$. Sie wurde bei Temperaturen von 140 $^{\circ}\text{C}$ bis 160 $^{\circ}\text{C}$ im Heißprägeverfahren verarbeitet. Der Werkzeugrahmen wurde dabei konstant auf 92 $^{\circ}\text{C}$ temperiert, so dass die Folie durch die Einspannkraft zwischen beiden Halbzeugspannrings nicht deformiert wurde.

Der Prägeprozess verlief gemäß dem in Abschnitt 4.2 entwickelten Verfahrensablaufs. Dabei wurden kurze Zykluszeiten von 4 Minuten erreicht.

Abbildung 6-8 zeigt die Mikrotiterplatte nach Abschluss des Heißprägeprozesses in drei verschiedenen Stadien.

- Im Hintergrund ist das beidseitig geprägte Folienhalbzeug zu erkennen, wie es aus dem Werkzeug entnommen wird. Kennzeichnend ist, dass das Folienhalbzeug auch nach Durchlaufen des Heißprägeprozesses seine ursprünglichen Außenabmessungen beibehalten hat und Verwerfungen der Folie vollständig vermieden werden konnten. Im Zentrum ist die Strukturierung mit den CE-Strukturen, dem Vereinzelungsrahmen und der Berandung mit einem Durchmesser von 150 mm zu erkennen, die von einer dünnen Restschicht umrandet ist, so dass der durch den Formeinsatz strukturierte Teil der Folie leicht – beispielsweise durch Stanzen – herausgetrennt werden kann.
- In der rechten Bildhälfte ist der aus der Folie herausgetrennte Kunststoffwafer zu sehen. Dieser Kunststoffwafer kann bereits als fertiges Formteil eingesetzt werden oder aber der Weiterverarbeitung von im Nutzen geprägten Bauteilen dienen. Dieser Wafer enthält die angestrebten dünnen Restschichten an Vereinzelungsstrukturen und Lochstrukturen, welche der späteren Kontaktierung von vorder- und rückseitiger Struktur dienen.
- In der linken Bildhälfte ist die aus dem Kunststoffwafer herausgetrennte Mikrotiterplatte dargestellt, die ihrem späteren Einsatz entsprechend in einem Handlingstrahlen eingesetzt wurde.

Abbildung 6-9 zeigt die Folie im Prozess nach der Erwärmung. Zu erkennen ist die Struktur des Formeinsatzes in der Werkzeuoberhälfte. An diesen wurde die Folie mittels Stickstoffdruck zur Erwärmung angelegt. Dabei zeigt sich, dass keine Verwerfungen in der Folie aufgetreten sind und ein vollflächiger Kontakt mit der Werkzeuoberhälfte erreicht werden konnte.

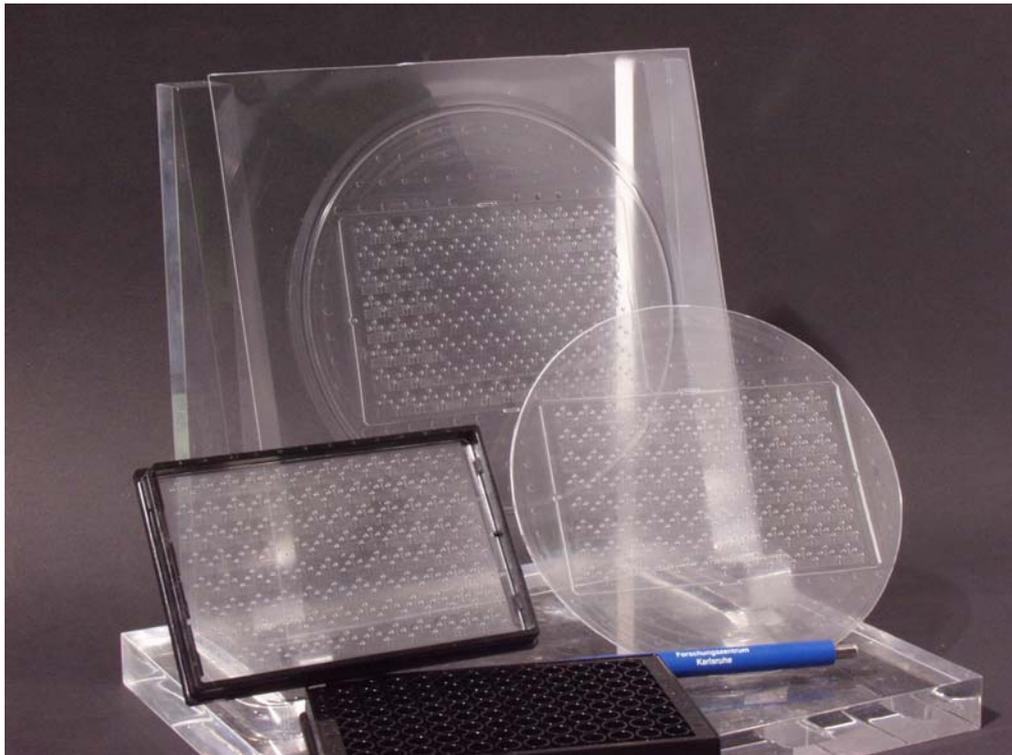


Abb. 6-8 Formteilformate: Im Hintergrund das geprägte Halbzeug. In der rechten Bildhälfte, der aus dem Halbzeug ausgetrennte Kunststoffwafer mit einem Durchmesser von 150 mm. In der linken Bildhälfte die vereinzelt Mikrotiterplatte, eingesetzt in einen Handlingsrahmen.

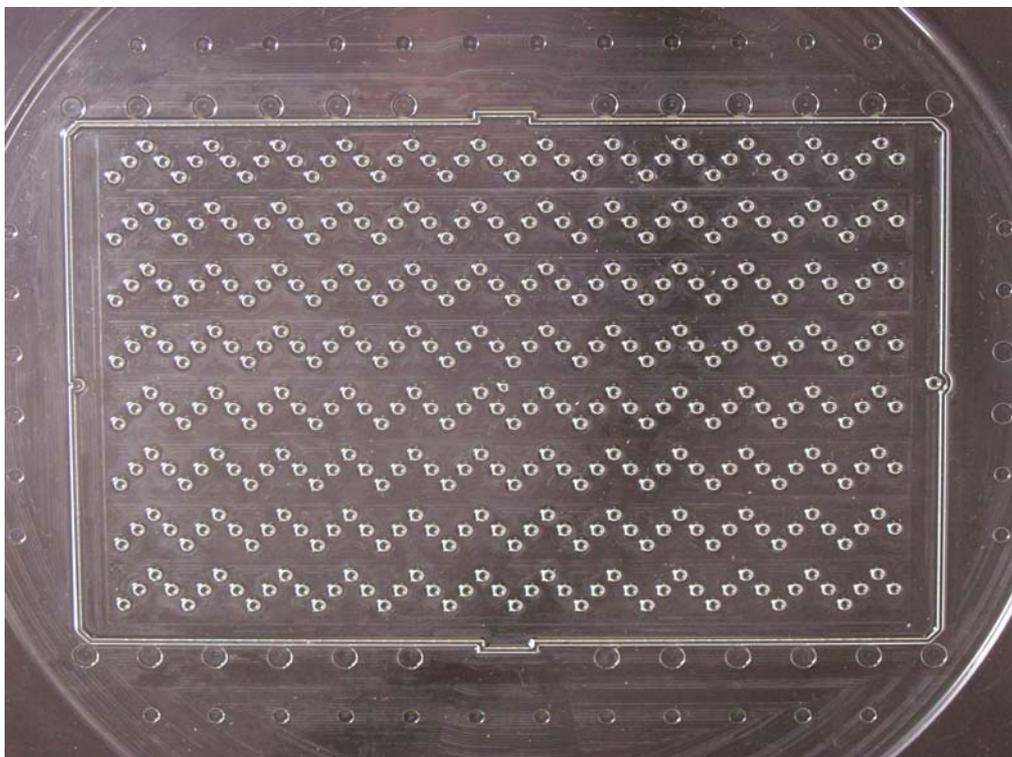


Abb. 6-9 Ausschnittsansicht des Formteils nach der Erwärmung an der oberen Werkzeughälfte. Mit einem Druck von 2 bar konnte die Folie faltenfrei und vollflächig an den Formeinsatz angelegt werden.

In Abbildung 6-10 ist der aus der Folie herausgetrennte Kunststoffwafer zu sehen. Darauf ist die Mikrotiterplatte mit den Analysestrukturen zu erkennen sowie der sie berandende Vereinzelungsrahmen. Die Mikrostrukturen selbst beinhalten sich kreuzende Kanalstrukturen und Meanderstrukturen, wie sie in den Abbildungen 6-11 und 6-12 als lichtmikroskopische Aufnahmen erkennbar sind. Um die in einer nachfolgenden Bearbeitung durchgehende Öffnungen zwischen Vorder- und Rückseite der Mikrotiterplatte herstellen zu können, wurden im Bereich der Befüllöffnungen dünne Restschichten als Sollbruchstelle erzeugt, wie in Abbildung 6-13 gezeigt.

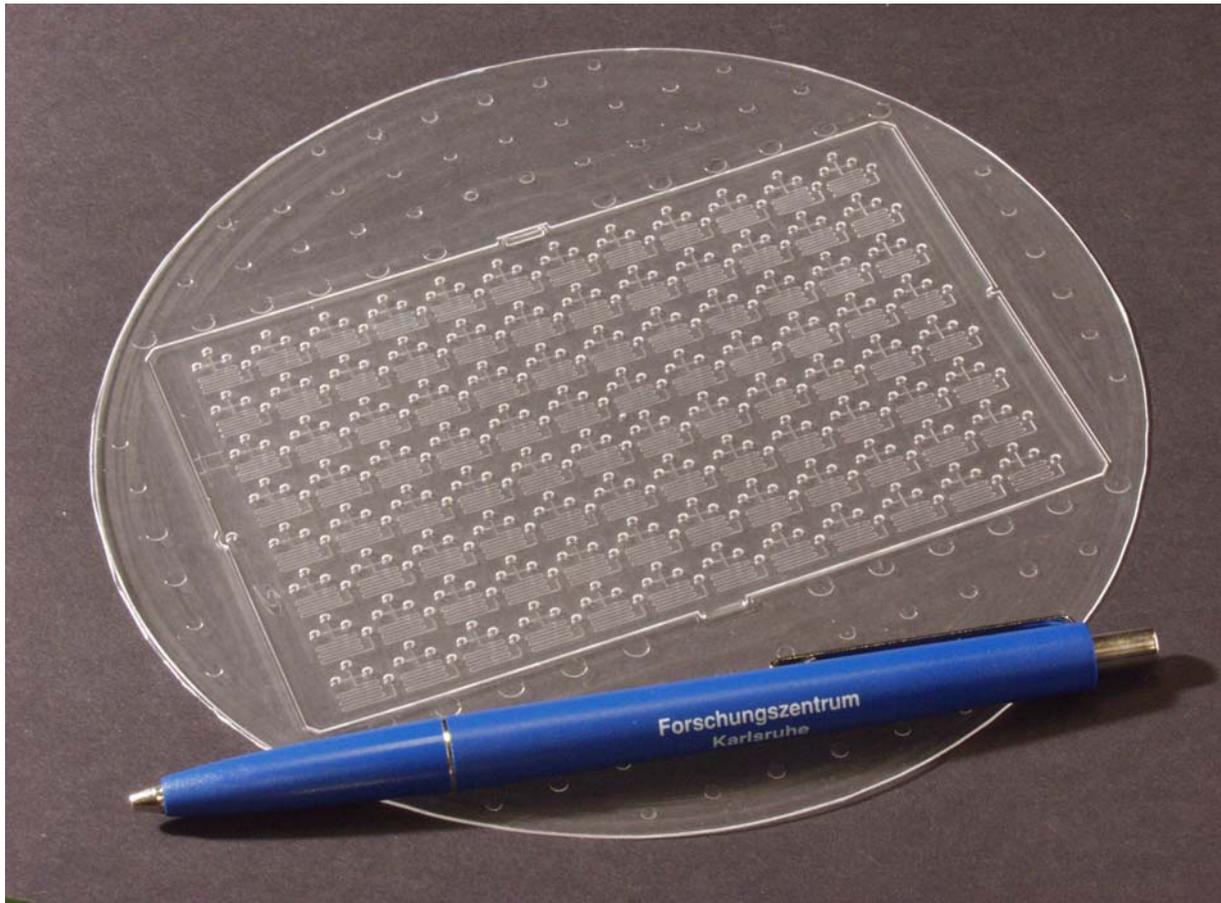


Abb. 6-10 Im beidseitigen Heißprägeverfahren strukturierter Kunststoffwafer mit einem strukturierbaren Durchmesser von 150 mm. Zentrisch angeordnet ist die Mikrotiterplatte, die in der nachfolgenden Bearbeitung herausgetrennt wird. Im Außenbereich sind die Hilfsstrukturen zu erkennen, welche dazu dienen eine periodische Volumenverteilung über der Formeinsatzoberfläche zu erhalten.

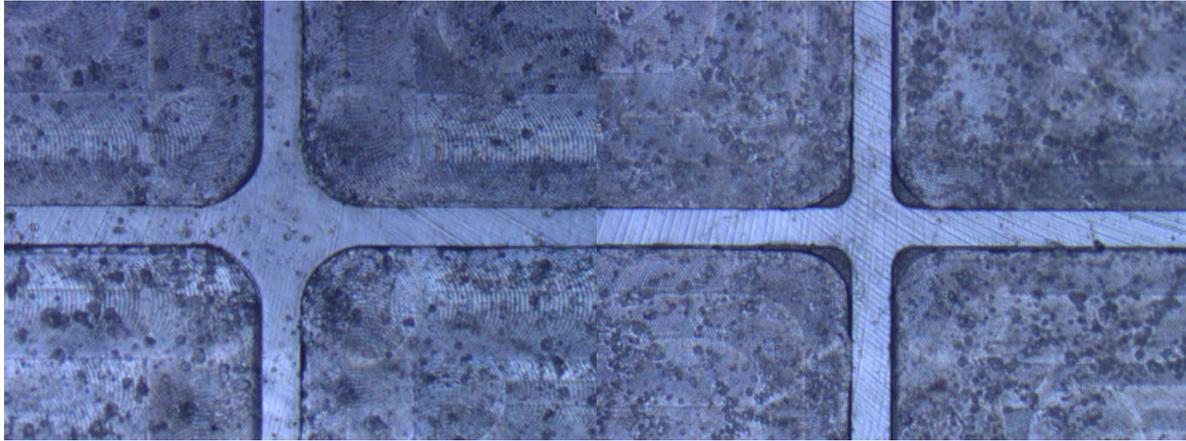


Abb. 6-11 Detailansichten der abgeformten Kreuzungsstrukturen mit einem Eckenradius von 150 μm (linke Bildhälfte) und einem Eckenradius von 50 μm (rechte Bildhälfte)

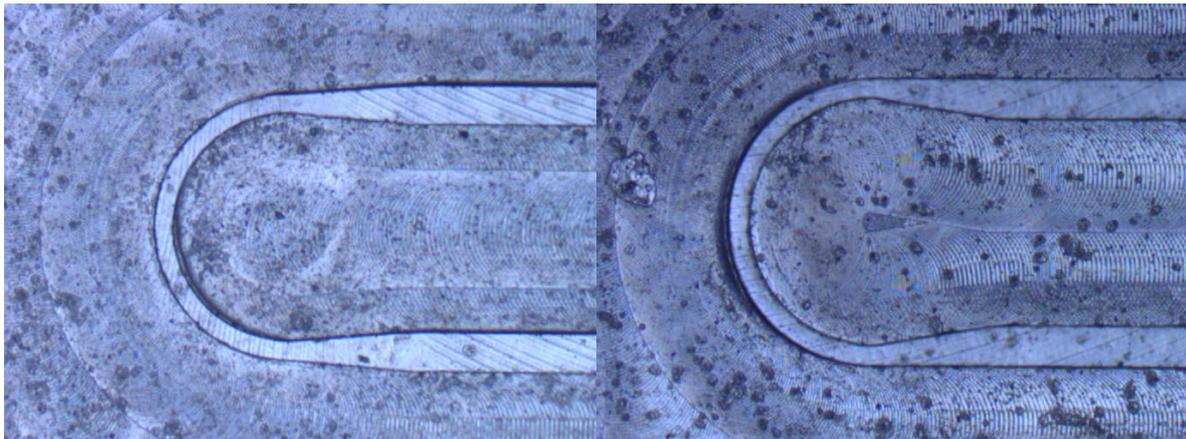


Abb. 6-12 Detailansicht zweier Kanalstrukturen

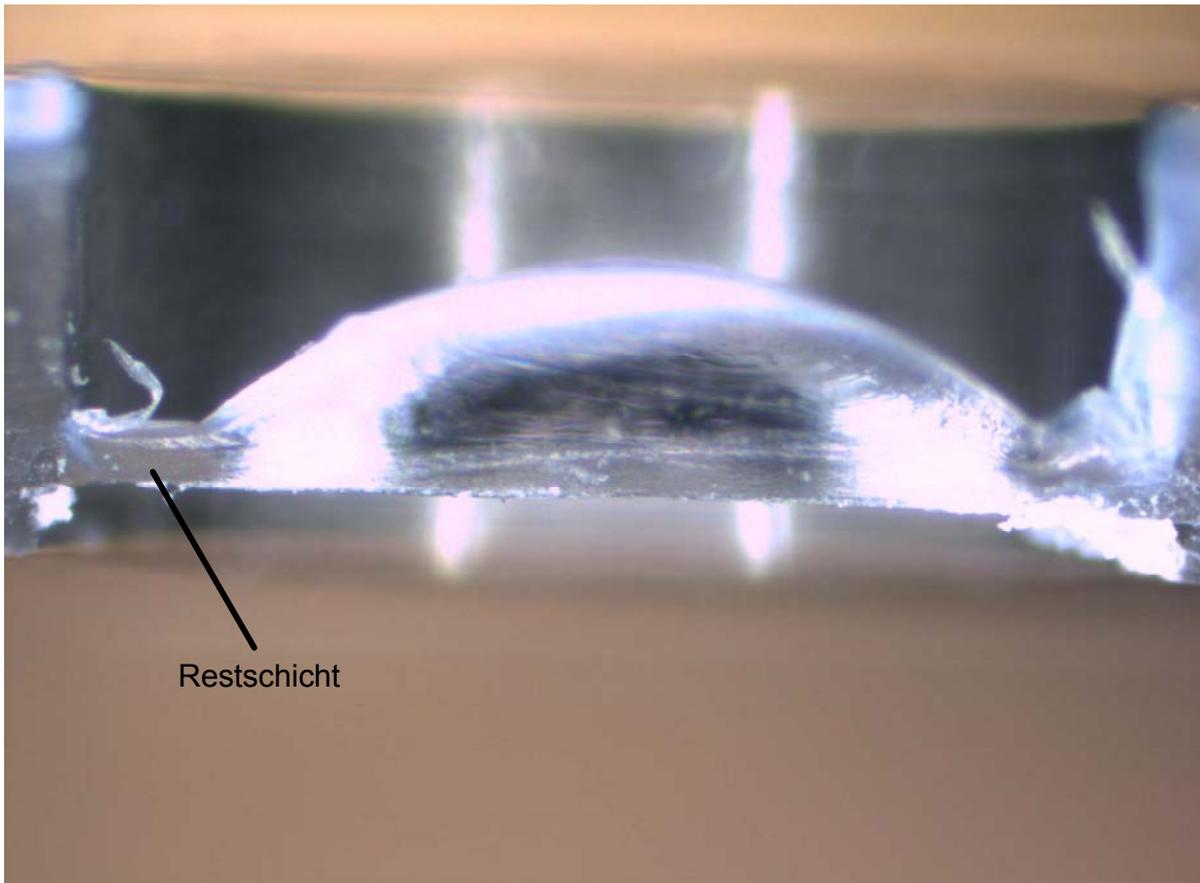


Abb. 6-13 Restschicht als Sollbruchstelle in einer Durchlochstruktur

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Werkzeug- und Verfahrenskonzept für das beidseitige Heißprägen mikrostrukturierter Formteile entwickelt. Der Fokus der Untersuchung war dabei auf großflächige beidseitig mikrostrukturierte Kunststoffsubstrate mit dünnen Restschichten gerichtet, wie sie für Anwendungen in der Mikrooptik und Mikrofluidik in Betracht kommen. Hier erfordert die Nachfrage nach sogenannten „disposables“ die Entwicklung besonders kosteneffizienter Fertigungsverfahren.

Das Heißprägeverfahren zeichnet sich als eine auch bei kleinen Losgrößen und häufigem Wechsel des Kunststoffes gut beherrschbare Technologie aus. Vor allem dünne großflächige Formteile können im Heißprägeverfahren vorteilhaft hergestellt werden, da wegen der verwendeten folien- oder plattenförmigen Halbzeuge nur geringe Fließwege entstehen. Nachteilig ist jedoch, dass die zyklische Temperierung des Werkzeugs zwischen der Umformtemperatur und der Entformtemperatur lange Zykluszeiten zwischen 15 und 30 Minuten mit sich bringt. Will man das Heißprägeverfahren für eine automatisierte Herstellung beidseitig mikrostrukturierter Formteile nutzen, ist daher eine Reduzierung der Zykluszeiten zwingend erforderlich.

Gegenstand des Werkzeug- und Verfahrenskonzepts war die Entwicklung geeigneter Mechanismen für die präzise Ausrichtung der Formwerkzeuge, die defektfreie Entformung und eine effizientere Temperierung der Werkzeuge zur Verkürzung der Zykluszeiten. Heißprägewerkzeuge verfügen heute noch nicht über die Entformvorrichtungen, die für das beidseitige Heißprägen erforderlich sind, da für die Entformung beim einseitigen Heißprägen das Anhaften des Formteils an der unstrukturierten Gegenplatte genutzt werden kann. Für das beidseitige Heißprägen mussten daher vor allem zusätzliche geeignete Entformvorrichtungen in das Heißprägewerkzeug integriert werden, welche die Entformung sowohl dickwandiger als auch dünnwandiger Formteile erlauben. Darüber hinaus müssen die Mikrostrukturen beider Formeinsätze präzise zueinander ausgerichtet werden, um die erforderliche Überdeckung der Mikrostrukturen beider Formteilseiten zu erzielen. Da der Formeinsatz im Heißprägeverfahren zyklisch zwischen der Umform- und der Entformtemperatur temperiert werden muss, war es zur Reduzierung der Zykluszeiten erforderlich, eine effizientere Temperierungstechnik zu entwickeln, um den Weg in die automatisierte Fertigung zu finden.

Die prozesstechnologischen Anforderungen orientierten sich an der Zielsetzung, großflächiger Formteile mit dünnen Restschichten im beidseitigen Heißprägeverfahren für Anwendungen in der Mikrooptik und Mikrofluidik herzustellen:

- Im Hinblick auf das Temperaturverhalten thermoplastischer Kunststoffe ist festzuhalten, dass amorphe und teilkristalline Thermoplaste deutlich verschiedene Anforderungen an die Werkzeugtemperierung stellen. Während amorphe Thermoplaste einen weiten Spielraum bieten, innerhalb dessen die Verarbeitungstemperatur an die jeweiligen Prozessanforderungen angepasst werden kann, stellt die Verwendung teilkristalliner Hochtemperaturkunststoffe hohe Anforderungen an die dynamische Werkzeugbeheizung, um die erforderliche gleichmäßige Temperaturverteilung an der Werkzeugoberfläche zu erzielen.

- Zur Erzielung dünner Restschichten und kurzer Umformzeiten müssen die Halbzeuge auf das Volumen der Formeinsatzstrukturen abgestimmt werden. Zusätzlich sollten die Formeinsätze eine periodische Strukturvolumenverteilung aufweisen und die Stirnflächen der Formeinsatzstrukturen so klein wie möglich sein.
- Die Herstellung beidseitig strukturierter Formteil mit sehr dünnen Restschichten ist durch ein Grenzverhältnis zwischen maximaler Formteildicke und minimaler Restschichtdicke gekennzeichnet.
- Zur Entformung muss das beidseitig geprägte Formteil neben der Werkzeugöffnungsbewegung durch eine zweite, davon unabhängige, versatz- und spielfrei durchzuführende Bewegung aus der zweiten Werkzeughälfte gelöst werden. Hierbei müssen die Entformkräften besonders beachtet werden, um das Formteil ohne Deformationen zunächst ganzflächig aus dem ersten Werkzeug und anschließend aus dem zweiten Werkzeug lösen zu können.

Für das beidseitige Heißprägen mikrostrukturierter Formteile wurde ein neues Werkzeugkonzept entwickelt, das sich besonders auf großflächige Formteile mit dünnen Restschichten ausrichtet. Das Werkzeugkonzept zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Der Werkzeugaufbau besteht aus einem konstant auf Entformtemperatur temperierten Werkzeugrahmen und einem formteilspezifisch auszulegenden Werkzeugeinsatz. Der Werkzeugeinsatz kann schnell gewechselt werden, so dass das Werkzeug auch bei kleinen Losgrößen flexibel eingesetzt werden kann.
- Der Formeinsatz und dessen Heizung bilden eine Einheit mit minimierter thermischer Masse. Diese Einheit wird während der Heizphase mittels einer Formeinsatzträgerplatte von dem Kühlblock abgehoben und während der Präge- und Abkühlphase an diesen angelegt. Dies erlaubt kurze Heiz- und Kühlzeiten.
- Der Werkzeugaufbau enthält zwei Halbzeugspannplatten, zwischen denen das Halbzeug während des gesamten Prozesses fixiert ist und mit denen das Halbzeug unabhängig von der Öffnungs- und Schließbewegung der Prägepresse mittels eines zweiten servo-elektrischen Antriebs zur Entformung bewegt werden kann. Hierdurch wird während der Erwärmung der Verzug und das Aufwölben folienförmiger Halbzeuge vermieden und das Aufschwinden des Formteils auf die Formeinsatzstrukturen während der Abkühlung verhindert.
- Die Halbzeugspannplatten bilden mit dem Formeinsatz eine Tauchkantendichtung, so dass auf die fließspaltgedichtete Kavität verzichtet werden kann, um die Prägekräfte bei der Herstellung großflächiger Formteile mit dünnen Restschichten zu reduzieren.
- Getrennte Vakuum- und Druckgasanschlüsse in Ober- und Unterwerkzeug erlauben in der Kavität die unabhängige Evakuierung und getrennt regelbare Druckgasbeaufschlagung der Ober- und Unterseite des Halbzeugs, damit das Halbzeug ganzflächig zur Erwärmung an die Formeinsatzoberfläche angelegt werden und die druckluftunterstützte Entformung realisiert werden kann.

- Das Werkzeugkonzept umfasst darüber hinaus einen Positioniertisch, der in Verbindung mit in das Werkzeug integrierten Sensoren eine genaue Ausrichtung des Unterwerkzeugs zum Oberwerkzeug erlaubt. Dabei kommen eine Piezoaktorik in Verbindung mit einer hochauflösenden Sensorik, eine Luftlagerung sowie spiel- und stickstofffreie Biegegelenkführungen zum Einsatz.

Auf der Grundlage dieses Werkzeugkonzepts wurde ein neu entwickeltes Verfahrenskonzept vorgestellt, welches ebenfalls auf die beidseitige Mikrostrukturierung großflächiger Formteile im Heißprägeverfahren ausgelegt ist. Das Verfahrenskonzept erlaubt insbesondere die optimierte Erwärmung der Folien durch die druckgasunterstützte Anformung des Halbzeugs an die Formeinsätze. Dadurch wird das Halbzeug schnell und gleichmäßig erwärmt, womit ein Beitrag zur Verkürzung der Zykluszeiten geleistet wird. Die defektfreie Entformung wird dadurch sichergestellt, dass das Halbzeug zwischen den Halbzeugspannplatten gespannt ist und dadurch das Aufschwinden auf die Formeinsatzstrukturen verhindert wird. Gleichzeitig kann das Halbzeug hierdurch präzise geführt werden. Die druckgasunterstützte Entformung ermöglicht die flächige Einleitung der Entformkräfte.

Zur Herstellung von Mikrotiterplatten als Demonstratoren für die Machbarkeit von Werkzeug- und Verfahrenskonzept wurden mikrostrukturierte Formeinsätze durch Mikrofräsen hergestellt. Diese Formeinsätze enthalten einerseits die Funktionsstrukturen der Mikrotiterplatte und andererseits Stift- und Hilfsstrukturen wie einen Vereinzelungsrahmen und Ausgleichsvolumina. Mit dem Versuchsaufbau ist es gelungen, Mikrotiterplatten als Demonstratoren für großflächige Formteile mit dünnen Restschichten durch beidseitiges Heißprägen herzustellen. Die hierbei erzielten Zykluszeiten betragen 4 Minuten.

Nachdem in diesem ersten Nachweis die Umsetzbarkeit des Werkzeug- und Verfahrenskonzeptes gezeigt werden konnte, müssen nachfolgend die Einflüsse der neuen Verfahrensparameter auf die Formteilqualität untersucht werden. Insbesondere für sehr dünne biegeweiche Formteile mit hohen Mikrostrukturen ist dabei die optimierte Steuerung von Werkzeugöffnungsbewegung und Gasdruck von Interesse, um die auftretende Durchbiegung des Formteils zu minimieren.

Durch den Einsatz sehr dünner Formeinsätze kann die zyklisch zu temperierende Masse nochmals reduziert werden, so dass eine weitere Reduzierung der Zykluszeit möglich ist. Ein Verfahren, welches die Integration eines Heizleiters in den Formeinsatz erlaubt, könnte hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten.

8 Literatur

- [Ansy02] N.N.
ANSYS FEM Dokumentation, ANSYS Inc., 2002
- [Bach91] Bacher, W.; Biedermann, H.; Harmening, M.
Verfahren zur Herstellung von galvanisch abformbaren Negativformen mikrostrukturierter, plattenförmiger Körper, Patentschrift DE 40 10 669 C1, 1991
- [Bach93] Bacher, W.; Biedermann, H.; Dinglreiter, H.; Kalb, H.
Verfahren zum Herstellen von mikrostrukturierten Körpern aus einem Kunststoff, Patentschrift DE 42 22 856 C1, 1993
- [Bara94] Baraldi, L.G.
Heißprägen in Polymeren für die Herstellung integriert-optischer Systemkomponenten, Dissertation, ETH Zürich, 1994
- [Beck00] Becker, H.; Heim, U.
Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures, Sensors and Actuators A, vol. 83, pp. 130-150, 2000
- [Beck84] Becker, E.; Bier, W.; Ehrfeld, W.; Münchmeyer, D.
Verfahren zur Herstellung von Trenndüsenelementen, Patentschrift DE 32 06 820 C2, 1984
- [Beck86] Becker, E. W.; Ehrfeld, W.; Hagmann, P.; Maner, A.; Münchmeyer, D.
Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming and plastic molding (LIGA process), Microelectron. Eng., vol. 4, 1986
- [Bird77] Bird, R.B.; Armstrong, R.C.; Hassager, O.
Dynamics of Polymeric Liquids, vol. 1, Fluid Mechanics, John Wiley&Sons, New York, 1977
- [Dann99] Dannberg, P.; Bierbaum, R.; Erdmann, L.; Bräuer, A.
Wafer scale integration of micro-optic and optoelectronic elements by polymer UV reaction moulding, Proc. SPIE Conference on Photonics, Packaging and Integration, San Jose, California, U.S.A., 1999
- [Domi98] Domininghaus, H.
Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, 5. Aufl., Springer, Berlin, 1998
- [Ehrf01] Ehrfeld, W.
Handbuch Mikrotechnik, Hanser, ISBN: 3-446-21506-9, 2001

- [Ehrf86] Ehrfeld, W.; Hagmann, P.; Maner, A.; Münchmeyer, D.; Becker, E.
Verfahren zum Herstellen einer Vielzahl plattenförmiger Mikrostrukturkörper aus Metall, Patentschrift DE 35 37 483 C1, 1986
- [Fried99] Friedrichs, B.; Friesenbichler, W.; Gissing, K.
Spritzprägen dünnwandiger thermoplastischer Formteile, Kunststoffe, 80. Jahrgang, Heft 5, S. 583-587, 1999
- [Gale78] Gale, M.T.; Kane, J.; Knop, K.
ZOD Images: Embossable Surface-Relief Structures for Color and Black-and-White Reproduction, Journal of Applied Photographic Engineering, vol. 4, pp. 41-47, 1978
- [Giss83] Gissing, K.; Knappe, W.
Zum optimalen Nachdruckverlauf beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe, Kunststoffe, 73. Jahrgang, Heft 5, 1983
- [Goet92] Göttert, J.; Müller, C.; Mohr, J.
Examples and Potential Applications of LIGA Components in Microoptics; in: W. Ehrfeld et al. (editors), Teubner Taschenbücher der Physik, Stuttgart: Teubner, Band 27, S. 219-247, 1993
- [Gube01] Guber, A.E.; Dittrich, H.; Hecke, M.; Herrmann, D.; Muslija, A.; Pfleging, W.; Schaller, Th.
Polymer micro needles with through-going capillaries, Proc. Micro Total Analysis Systems (μ TAS), Monterey, CA, U.S.A, Oct. 21-25, 2001; Kluwer Academic Publishers, 2001
- [Hagm89] Hagmann, P.; Ehrfeld, W.
Fabrication of Microstructures of extreme Structural Heights by Reaction Injection Molding, International Polymer Processing, 4. Jahrgang, Heft 3, S. 188-195, 1989
- [Heck04] Hecke, M.; Schomburg, W.K.
Review on micro molding of thermoplastic polymers, J. Micromech. Microeng., vol. 14, R1-R14, 2004
- [Heck04a] Hecke, M.; Herrmann, D.; Muslija, A.; Schaller, Th.
Struktur auf einem Bauteil sowie Verfahren unter Verwendung der Struktur, Patent DE 102 24 843 B3, 2004
- [Heyd00] Heyderman, L.J.; Schiff, H.; David, C.; Gobrecht, I.; Schweizer, T.
Flow behaviour of thin polymer films used for hot embossing lithography, Microelectron. Eng., vol. 54, pp. 229-245, 2000
- [Hove84] Hoven-Nivelstein, W.
Die Verarbeitungsschwindigkeit thermoplastischer Formmassen, Dissertation, RWTH Aachen, 1984

- [Illig97] Illig, A.; Schwarzmann, P.
Thermoformen in der Praxis, Hanser, München, 1997
- [Kieß97] Kießling, H.; Damm, Ch.; Dannberg, P.; Rudolph, M.
Prägen feinststrukturierter optischer Oberflächen, F&M, 105. Jahrgang, Heft 3, 1997
- [Knap84] Knappe, W.; Lampl, A.
Zum optimalen Zyklusverlauf beim Spritzprägen von Thermoplasten, Kunststoffe, 74. Jahrgang, Heft 2, 1984
- [Men97] Menz, W.; Mohr, J.
Mikrosystemtechnik für Ingenieure, 2. Auflage, VCH Verlag, Weinheim, 1997
- [Meng99] Menges, G.
Anleitung zum Bau von Spritzgießwerkzeugen, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 1999
- [Mich93] Michel, A.; Ruprecht, R.; Bacher, W.; Harmening, M.
Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafern, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993
- [Mich95] Michel, A.; Harmening, M.; Bacher, W.; Bley, P.; Ruprecht, R.; Both, A.
Verfahren zum Herstellen von Mikrostrukturelementen auf einem Substrat, welche mit integrierten Schaltkreisen elektromechanisch, optisch oder elektrisch zusammenwirken, Patentschrift DE 43 04 424 C2, 1995
- [Mold02] N.N.
Moldflow MPI Dokumentation, Moldflow Corp., 2002
- [Müll94] Müller, K. D.
Charakterisierung und Inbetriebnahme einer Anlage zum positionierten Abformen von Kunststoff-Mikrostrukturen, Diplomarbeit am Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe, 1994
- [Müll99] Müller, K. D.
Herstellung von beweglichen metallischen Mikrostrukturen auf prozessierten Siliziumwafern, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1999
- [Roga98] Rogalla, A.
Analyse des Spritzgießens mikrostrukturierter Bauteile aus Thermoplasten, Dissertation, RWTH Aachen, 1998
- [Scha01] Schaller, Th.; Dittrich, H.; Gerlach, A.; Guber, A.E.; Hecke, M.; Muslija, A.; Wallrabe, A.; Zissler, W.
Small Tolerances & Large Areas: Micromachining Meets Industrial Requirements, Proc. European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen)

- 2nd International Conference, Turin, Italy, May 27-31, 2001, Vol. 2, pp. 676-679, Bedford: euspen, 2001
- [Sche01] Scheer, H.-C.; Schulz, H.
A contribution to the flow behaviour of thin polymer films during hot embossing lithography, *Microelectron. Eng.*, vol. 56, pp.311-332, 2001
- [Schi00] Schinköthe, W.; Walter, T.
Zykluszeiten verringern - Eine alternative Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen, *Kunststoffe*, 90. Jahrgang, Heft 5, S. 62-69, 2000
- [Schi02] Schiff, H.; Heydermann, L.J.; Padeste, C.; Gobrecht, J.
Chemical nano-patterning using hot embossing lithography, *Microelectron. Eng.*, vol. 61, 1, pp 423-428, 2002
- [Schi03] Schinköthe, W.
Temperierkonzepte für das Mikrospritzgießen im Vergleich, Beitrag zum 18. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart, 19.-20. 3. 2003.
- [Thro99] Throne, J.; Beine, J.
Thermoformen: Werkstoffe, Verfahren, Anwendungen, Hanser, München, 1999
- [Wall02] Wallrabe, U.; Dittrich, H.; Friedsam, G.; Hanemann, Th.; Mohr, J.; Müller, K.; Piotter, V. Ruther, P.; Schaller, Th.; Zißler, W.
Micromolded easy-assembly multi fiber connector: RibCon, *Microsystem Technologies*, 8, S. 83-87, 2002
- [Webe99] Weber, L.; Ehrfeld, W.; Begemann, N.; Berg, U.; Michel, F.
Fabrication of Plastic Microparts on Wafer Level, Proc. SPIE Conference on Micromachining and Microfabrication, Santa Clara, California, U.S.A., 1999
- [Wech02] Wechsung, W.; El Fatatry, A; Götz, F.; Illing, M.; Laws, R. A.; Tschulena, G.; van de Weijer, F.; Wicht, H.; Zinner, H.
Market analysis for microsystems II 2000 - 2005, NEXUS, 2002
- [Worg03] Worgull, M.
Analyse des Mikro-Heißprägeverfahrens, Dissertation, Universität Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6922, 2003
- [Zimm04] Zimmermann, P.; Gabriel, M.
Spritzgusswerkzeuge für Optical Discs, Tagungsband Internationale VDI Jahrestagung, Baden-Baden, 11.-12. 2. 2004