Technische Universität Ilmenau Fachgebiet Fertigungstechnik

Name der Forschungsstelle

 $13.772 \; B \; / \; 4$

AiF-Vorhaben-Nr. /GAG

01.08.2003 bis 31.07.2005

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 01.08.2003 bis 31.07.2005 zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben Normalverfahren

Forschungsthema:

Technologie zum Herstellen von Werkzeugen zum Mikrospritzgießen durch Diffusionsschweißen

(Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht)

Ilmenau, 21.11.2005





Abschlussbericht

Antragsteller:

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. Aachener Straße 172 40223 Düsseldorf

Forschungsstelle:

Fachgebiet Fertigungstechnik Technische Universität Ilmenau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Wilden Neuhaus 1 98693 Ilmenau

Thema: Technologie zum Herstellen von Werkzeugen zum Mikrospritzgießen durch Diffusionsschweißen

AiF-Nr.: 13.772 B

Laufzeit: 01.08.2003 bis 31.07.2005

Berichtsdatum: November 2005





Zusammenfassung

Das Forschungsziel, eine Diffusionsschweißtechnologie zum Herstellen von Werkzeugen für das Mikrospritzgießen mit extrem kleinen und komplizierten Innenstrukturen sowie mit feinen Heiz- und Kühlkanälen und zur Fertigung von Bauteilen mit sehr kleinen Abmessungen zu entwickeln wurde erreicht. Aus dem Werkstoff 1.4301 (X5CrNi18.10) wurden massive Körper mit Innenstrukturen von ca. 100 x 100 µm² angefertigt. Um dieses Ergebnis zu erzielen, waren sowohl FEM-Simulationen als auch Experimente notwendig. Neben der skalierungsbedingten Schweißprozessauslegung mussten weitere Prozesselemente angepasst werden. Die Integration von Ausgleichsflächen und das Entwickeln einer Schweißstrategie führte letztendlich zu den geforderten Schweißergebnissen ohne Lamellendeformation und fehlerhafte Verbindungen.

Damit kmU die im Forschungsvorhaben untersuchte Technologie anwenden können, bedarf es Empfehlungen für die gesamte Prozesskette. Hierfür erfolgten Untersuchungen zu verschiedenen Schneidverfahren und ihrer Beeinflussung der Schnittgeometrie. Im Verlauf des Vorhabens wurden ebenso unterschiedliche Positionierkonzepte experimentell untersucht und bewertet. Im Folgenden sind einige Empfehlungen zusammengefasst:

- 1. Bei der Verwendung neuer Werkstoffe ist eine Parameterverifizierung notwendig, da Legierungsbestandteile die Diffusionskoeffizienten verändern.
- 2. Eine Druckerhöhung im Aufheizzyklus führt bei Mikrostrukturen zu Deformationen.
- 3. Beim Diffusionsschweißen kommt es zu einer Rekristallisation des kaltverfestigten Gefüges und damit zu einer Minderung der Härte.
- 4. Komplizierte Innenkonturen mit großen Flächenunterschieden lassen sich ohne Deformation und mit vollflächiger Verschweißung in mehreren Schritten fügen.
- 5. Die Deformation von Lamellen über und unter den Mikrostrukturen wird durch eine Druckanpassung und durch die Integration von Ausgleichsflächen verringert.
- 6. Die Fehlerbilder, die durch Grat an den Schnittkanten entstehen sind:
 - Unvollständige Verschweißung
 - Einarbeitung des Grates in die Schnittfuge
- Der Grat an den Schnittkanten muss, um Schweißfehler zu vermeiden, f
 ür eine ideale Schwei
 ßung unter 10
 µm liegen.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen 'Otto von Guericke' e. V. (AiF) (AiF-Nr.: 13.772 B/DVS-Nr.: 05.032) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS unterstützt. Für diese Unterstützung sei gedankt.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Univ.- Prof. Dr.-Ing. J. Wilden Verantwortlicher Projektleiter

Projektbegleitender Ausschuss

Portec GmbH

Herr Dipl.-Ing. A. Kienzl, Am Köhlersgehäu 32, 98544 Zella-Mehlis

Wahl Optoparts GmbH

Herr Dr.-Ing. A. Fischer, Herr Dipl.-Ing. M. Gromann Straße der Deutschen Einheit 6, 07819 Triptis

Grimmenthaler Präzisionstechnik GmbH

Herr Dipl.-Ing. F. Nothnagel Einhäuserstr. 5e, 98617 Obermaßfeld-Grimmenthal

LLT Applikation GmbH

Herr Dr.-Ing. S. Pause, Frau Dipl.-Wirt.-Ing. L. Pause Am Vogelherd 51, 98693 Ilmenau

FKT Formenbau und Kunststofftechnik GmbH

Herr U. Staps, Herr H. Korsinek Jahnstraße 2, 07819 Triptis

CPC — Cellular Process Chemistry Systems GmbH

Herr Sebastian Overbeck Hechtsheimer Strasse 2 / Geb. 51, 55131 Mainz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
	2.1 Motivation	3
	2.2 Zielstellung	4
3	Stand der Technik und Wissenschaft	5
	3.1 Spritzgießen	5
	3.1.1 Verfahren	5
	3.1.2 Mikrospritzgießen	5
	3.2 Diffusionsschweißen	6
	3.2.1 Verfahren	7
	3.2.2 Anwendungen	8
	3.3 Werkzeugbau	9
	3.3.1 Werkzeugherstellung für das Kunststoffspritzgießen	9
	3.3.2 Werkzeugtemperierung	12
	3.3.3 Rapid Tooling von Spritzgießwerkzeugen	16
	3.4 Zusammenfassung	21
4	Experimentelle Arbeiten	23
	4.1 Vorgehensweise	23
	4.2 Versuchsdurchführung	24
	4.2.1 Werkstoffe	24
	4.2.1.1 Probengeometrie zur Ermittlung eines sicheren Prozessfensters	25
	4.2.1.2 Prozesstechnik	28
	4.2.1.2.1 Laserschneiden	28
	4.2.1.2.2 Funkenerosives Drahtschneiden	29
	4.2.1.2.3 Diffusionsschweißen	30
	4.2.1.3 Prüfung der Einzellamellen und der Schweißung	33
	4.2.1.3.1 Messung der Rauheit und des Oberflächenprofils	33
	4.2.1.3.2 Präparation der Proben zur metallographischen Untersuchung	34
	4.2.1.3.3 Härteprüfung nach Vickers	34
	4.2.1.3.4 Verformungsmessung	35
	4.2.2 Spritzgießwerkzeuge und -rohlinge	35
	4.2.2.1 Konstruktive Auslegung und Fertigung	36
	4.2.2.1.1 Formeinsatz "Temperierwendel"	36
	4.2.2.1.2 Formeinsatz "Warmetauscherstruktur"	40
	4.2.2.1.5 Mikrowarmetauscher	40
	4.2.2.1.4 Werkzeugrohling "FKT	41 42
	42216 Fertigung des Formeinsatzes Temperierwendel"	+2
	4.2.2.2 Kenndatenermittlung	51
	4.2.2.3 Prüfung der Funktion	52
5	Ergebnisse und Diskussion	54
-	5.1 Charakterisierung der Blechlamellen	54

	5.1.1	We	rkstoffe	54
	5.1.	2.1	Geometrie	55
	5.1.	2.2	Gratbildung	55
	5	.1.2.2.1	Gratbildung beim Laserstrahlschneiden	55
5.1.2.2.2 Gratbildung beim funkenerosiven Schneiden				59
	5.1.	2.3	Abbrand	59
	5.2 0	Charakte	erisierung der Diffusionsschweißverbindung	59
	5.2.1	Pro	zessparameter bedingte fehlerhafte Anbindung	59
	5.2.2	Unt	tersuchungen zum Prozessfenster für das Diffusionsschweißen	61
	5.2.3	Vei	rformung	
	5.2.	3.1	Durchbiegen und Fließen von Material	
	5.2.	3.2	Berechnung und Simulation der Verformung	
	5.2.	3.3	Integration von Ausgleichsflächen	
	5.2.	3.4	Schweißstrategie	
	5.2.4	Vei	rbindungsqualität	80
	5.2.	4.1	Positionierung	80
	5.2.	4.2	Stufenbildung auf der Oberfläche	85
	5.2.	4.3	Härtemessung	
	5.2.	4.4	Dichtheitsuntersuchungen	
	5.2.	4.5	Grateinfluss	
	5.3 S	pritzgie	eßwerkzeug	
	5.3.1	Ter	nperierverhalten	
	5.3.	1.1	Durchflussmengen	
	5.3.	1.2	Abkühl- und Aufheizraten	103
	5.3.	1.3	Wärmeverteilung	111
	5.3.2	Spr	itzgießversuche	117
6	Schlus	ssfolger	rungen	119
	6.1 V	Vissens	chaftlich technologischer Nutzen	119
	6.2 V	Virtscha	aftlicher Nutzen, insbesondere für kmU	119
	6.3 N	leuigke	itsgehalt	119
	6.4 I	ndustrie	elle Anwendungsmöglichkeiten	120
	6.5 E	Bedeutu	ng für kmU (Wahl Optoparts GmbH, Triptis)	121
7	Zusan	nmenfa	ssung und Ausblick	126
8	Publik	ationer	1	130
	8.1 V	veröffer	ntlichungen	130
	8.2 V	⁷ orträge	2	130
	8.3 P	oster		130
	8.4 Ö	Offentlie	che Präsentation	130
	8.5 A	uszeic	hnungen	130
	8.6 D	Diploma	urbeiten	130
9	Litera	tur		131

1 Einleitung

Die Entwicklung der Technik ist heute durch eine ständig fortschreitende Miniaturisierung gekennzeichnet. Die Abmessungen und die Massen der Bauteile werden zunehmend kleiner, was insbesondere auch für Kunststoffteile gilt. In der Mikrosystemtechnik, in der Mechatronik, im medizinischen Gerätebau, in der Kraftfahrzeugindustrie und in anderen Industriezweigen besteht die Forderung nach dem Einsatz sehr kleiner und filigraner Kunststoffteile. Diese können heute noch nicht in jedem Falle zufrieden stellend oder nur mit sehr hohem Aufwand hergestellt werden. Das zum Fertigen von Kunststoffteilen eingesetzte Spritzgießen lässt sich nicht beliebig zu immer kleineren Abmessungen skalieren. Bei vielen derzeitig eingesetzten Werkzeugen besteht die Gefahr, dass der thermoplastische Kunststoff erstarrt, bevor die Form vollständig gefüllt ist. Zu geringe Kunststoffvolumina können nur eine kleine Wärmemenge speichern. Diese Wärme wird durch das Werkzeug abgeführt, ehe die Kavität vollständig mit Kunststoff gefüllt ist. Eine Lösung dieses Problems ist nur bedingt durch höhere Kunststofftemperaturen und einen höheren Druck beim Spritzgießen möglich.

Gegenwärtig werden unterschiedliche Wege beschritten. Zum einen erfolgt die Erwärmung einzelner Werkzeugbereiche gezielt durch Wirbelströme. Der Vorteil dieser Variante sind kurze Prozesszeiten. Diese Lösungsvariante hat jedoch geometrische Grenzen. Zum anderen wird die Temperierung durch flüssige Medien erzielt, die durch spezielle Temperierkanäle geleitet werden. Kommt nur ein einfaches Temperiersystem aus verbundenen Bohrungen zum Einsatz, wird die Abkühlgeschwindigkeit des Kunststoffes deutlich verringert und die wirtschaftlich erforderlichen Zyklenzeiten sind nicht immer einzuhalten. Eine auf den Kunststoff und die Form optimierte Prozessführung ist in Werkzeugen möglich, die beheizt und gekühlt werden können, wobei die Temperierung strukturabhängig erfolgen muss. Derartige Spritzgießwerkzeuge mit konturnahen Temperierkanälen sind mit den konventionellen abtragenden Bearbeitungsverfahren nicht herstellbar.

Bauteile mit feinen Innenstrukturen werden darüber hinaus in einer Vielzahl anderer Technologiebereiche wie z. B. zur Herstellung von Brennstoffzellen oder chemischen Reaktoren benötigt. Auch werden zunehmend Prägewerkzeuge in der Produktion von Mikrobauteilen eingesetzt. Um eine Gefüge- bzw. Werkstoffveränderung im Bauteil zu verhindern, ist es notwendig, dass eingesetzte Werkzeug zu temperieren. Aus den aufgeführten Anwendungen resultiert der hohe Entwicklungsbedarf für Verfahren bzw. Technologien zum prozesssicheren Herstellen von innenkonturierten Werkzeugen und Formen wie sie auch für das "Mikrospritzgießen" eingesetzt werden. Ein hohes Potential bietet hierbei der lamellare Aufbau von Werkzeugen. Es bestehen bei diesem Aufbau eine weitgehende Gestaltungsfreiheit, ein hoher Integrationsgrad und die Möglichkeit, das Temperaturfeld in dem Werkzeug lokal zu beeinflussen. Bei der Nutzung von nicht auf die Fügegeometrie optimierten Schweißprozessparametern kann eine vollflächige Verweißung der Lamellen nicht garantiert werden. Bei der Fertigung von makroskopischen Bauteilen sind die entstehenden Fehlstellen in den Verbindungsebenen nicht funktionshemmend. Werden jedoch kleine Strukturen mittels Diffusionsschweißen gefügt, so führen diese Bindefehler im Mikrobereich zu undichten Temperierkanälen und letztendlich zu einem Eindringen des fluidischen Temperiermediums in die zu füllende Kavität. Die wissenschaftlich-technische Aufgabenstellung bestand darin, das prozesssichere Herstellen von Werkzeugen und Bauteilen für die Feinwerk- und Mikrotechnik mittels Diffusionsschweißen durch eine Anpassung der Prozessbedingungen, insbesondere auch der Fügestrategie, und die konstruktive Optimierung der Einzellamellen zu erzielen. Die konstruktiven Gestaltungsrichtlinien, die mit den Prozessbedingungen korreliert wurden, erleichtern kmU die Anwendung des vorgestellten Rapid Tooling Verfahrens.

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1 Motivation

Beim Spritzgießen von Thermoplasten wird Kunststoff in den Hohlraum (Kavität) einer Form eingespritzt. Die notwendige und in Spritzgießwerkzeugen integrierte Kühlung entzieht der Kunststoffschmelze sowohl während des Einspritzens als auch danach solange Wärme, bis die Schmelze erstarrt ist und der Spritzling zerstörungsfrei entformt werden kann. Die Schmelze erstarrt dabei beginnend von der gekühlten Wand hin zur Querschnittsmitte. Im Innern bleibt eine plastische Seele erhalten, durch welche weiterhin Kunststoff nachströmen kann, um die Kavität vollständig zu füllen und um die bei Beginn der Erstarrung einsetzende Bauteilschwindung auszugleichen.

Besonders bei dem Füllen von sehr feinen Strukturen und dünnen langen Fließwegen, wie sie bei mikrotechnischen Bauteilen vorkommen, besteht die Gefahr einer unvollständigen Formfüllung. Dabei erstarrt die Schmelze zu einem frühen Zeitpunkt vollständig über den gesamten Querschnitt, was bedeutet, dass auch der Bereich der plastischen Seele auf eine Temperatur absinkt, in der der Kunststoff nicht mehr fließfähig ist (Noflow-Temperatur).

Eine Möglichkeit die vorzeitige Erstarrung zu verhindern bzw. die Erstarrung zu verlangsamen, ist die Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur. Ab einer bestimmten Werkzeugtemperatur ist die Steifigkeit des Spritzteils nicht mehr ausreichend, um eine sichere Entformung zu gewährleisten. In diesem Fall muss die Schmelze im Werkzeug nach dem vollständigen Füllen der Kavität auf die Entformungstemperatur abgekühlt werden. Diese beschriebene Kombination aus Erwärmen und Kühlen wird auch als *variotherme* Temperierung oder dynamische Werkzeugtemperierung bezeichnet (Tew97). Mittels der Lamellenaufbautechnik ist es möglich, entsprechende Kanäle für fluidische Temperierung konturnah im Spritzgießwerkzeug zu integrieren. Die variotherme Prozessführung ermöglicht es zum einen, die Produktivität beim Spritzgießen deutlich zu steigern, und zum anderen die Ausschussrate aufgrund der höheren Qualität der Bauteile zu verringern.

Durch den Einsatz von konturnahen temperierten Formen kann auch die Qualität von duroplastischen und elastomeren Kunststoffbauteilen erhöht werden. Dies wird durch eine gleichmäßige Temperatur der Formmasse, auch in der Nähe der Formwand erreicht. In diesem Bereich wird normalerweise die Wärme sehr schnell abgegeben, und die temperaturgesteuerte Vernetzung läuft nicht gleichmäßig über den gesamten Bauteilquerschnitt ab. Das Resultat des heterogen ablaufenden Prozesses sind reduzierte mechanische und optische Eigenschaften. Weiterhin kann auch wie bei der Verarbeitung von Thermoplasten die Produktivität zusätzlich positiv durch den Einsatz der Lamellenwerkzeugaufbautechnik gesteigert werden.

Aus den Erfahrungen der Werkzeugbauer und der Literatur ist bekannt, dass es immer wieder zu fehlerbehafteten Verbindungen beim Diffusionsschweißen kommt. Zum einen werden die Lamellen nicht vollständig verbunden, was zu undichten Temperierkanälen führt, zum anderen entstehen Probleme an großen Übergängen, an denen sich Lamellen beim Fügen plastisch verformen. Die bisherigen Erkenntnisse sind für eine industrielle Umsetzung ohne die Durchführung einer Vielzahl von Versuchen nicht ausreichend. Durch Grundlagenuntersuchungen und daraus abgeleiteten Konstruktions- und Fertigungsempfehlungen kann die Technologie des Rapid Toolings mittels Laserschneiden und Diffusionsschweißen von kmU ohne aufwendige Forschungs- und Entwicklungsarbeit eingesetzt werden. Die Industrieforderungen nach immer weiter reduzierten Zykluszeiten bei gleichzeitig steigender Genauigkeit können nur über den Einsatz unkonventioneller Verfahren im Werkzeug- und Formenbau erfüllt werden. KmU, die neue Technologien wie das Rapid Tooling mittels Laserschneiden und Diffusionsschweißen anbieten können, erzielen damit einen deutlichen Wettbewerbsvorteil.

2.2 Zielstellung

Das Ziel der Arbeit ist die Weiterentwicklung und Erprobung einer Rapid Tooling Technologie zum Fertigen von Werkzeugformeinsätzen für den Mikrospritzguss. Diese Einsätze sollen nach einem additiven Verfahren mittels Laserschneiden und Diffusionsschweißen aus einzelnen Blechen gefügt werden und an die Bauteilkontur angepasste Kühl- und Heizkanäle enthalten.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden die folgenden wissenschaftlich-technischen Ergebnisse angestrebt:

- 1) Prozessparameterermittlung für das vollflächige Fügen der Einzellamellen
- 2) Optimieren der Blechlamellengeometrie mittels FEM-Simulation zur Vermeidung von Durchbiegungen und anschließende Korrelation der Ergebnisse mit Experimenten
- Experimentelle Untersuchungen und Evaluierung des Einflusses der Schnittqualität auf das Diffusionsschweißen von d
 ünnen Blechen (>0,05 mm) sowie der Positioniergenauigkeit
- 4) Umsetzung der Erkenntnisse an Testwerkzeugen und Bewertung dieser Werkzeuge
- 5) Fertigungsempfehlungen mit Bezug zum Fügeprozess
- 6) Entwerfen und Fertigen von Formeinsatzrohlingen für PbA Mitglieder

Die ersten drei Punkte beziehen sich direkt auf den Diffusionsschweißprozess und bilden die Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen. Für eine industrielle Anwendung der Rapid Tooling Technologie ist es jedoch erforderlich, auch die Spritzgießeignung zu bewerten und Fertigungsempfehlungen abzuleiten (Punkt 4 und 5). Am Ende des Projektes stehen Formeinsatzrohlinge mit integrierten Temperierkanälen für PbA-Mitglieder zur Verfügung. Neben den genannten Schwerpunkten wird auch das Anfertigen der Blechlamellen, die Bearbeitungsqualität und die Lamellenvorbereitung in die Betrachtungen miteinbezogen, um eine ganzheitliche Empfehlung den Endanwendern der Technologie bereitzustellen. In dem Forschungsvorhaben wird für kmU die vorwettbewerbliche Grundlage geschaffen, innovative Lösungen vor allem aber nicht nur zum Herstellen von Mikrospritzgusswerkzeugen anbieten zu können. Es ergibt sich neben den neuen Lösungen für den Werkzeugbau und für das Mikrospritzgießen auch die Technologie für das Herstellen von Bauteilen mit einem hohen Integrationsgrad oder sehr filigranen Innenstrukturen im µm-Bereich. Nur durch die Ermittlung der notwendigen Grundlagen ist ein prozesssicherer Einsatz in der Industrie möglich.

3 Stand der Technik und Wissenschaft

3.1 Spritzgießen

Das Spritzgießen, umgangssprachlich auch als Spritzguss oder Spritzgussverfahren bezeichnet, ist das am weitesten verbreitete Kunststoffverarbeitungsverfahren (wwik). Es ist ein Massenfertigungsverfahren, mit dem Formteile in großen Stückzahlen gefertigt werden. Eine relativ junge und zukunftsträchtige Sparte ist das Mikrospritzgießen. Es gehört zum Bereich der Mikrosystemtechnik, welche sich momentan sehr schnell weiterentwickelt und in den nächsten Jahren hohen Wachstumsraten entgegenstrebt.

3.1.1 Verfahren

Ein Herstellverfahren für Kunststoffartikel ist das Spritzgießen. Dabei wird Kunststoffgranulat aufgeschmolzen, homogenisiert und anschließend unter hohem Druck (500 bis 2000 bar) in die Form des Spritzgießwerkzeuges eingespritzt. Der Übergang von einer viskosen Formmasse zum festen Bauteil erfolgt durch Abkühlen (Thermoplasten) oder durch reaktive Vernetzung (Duroplaste). Als letzter Schritt erfolgt bei ausreichender Festigkeit das Entformen des Bauteiles (Men98).

3.1.2 Mikrospritzgießen

Das Mikrospritzgießen ist einer der Schlüssel zur breiten und wirtschaftlichen Fertigung von Mittel- und Großserien mikrostrukturierter Komponenten und Mikrobauteilen, welche im Bereich der Mikrosystemtechnik in Form von Sensoren und Aktoren benötigt werden (Joh01). Durch ständige Innovationen erfolgt der Einsatz von Mikrobauteilen in immer mehr und ganz unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Die ursprünglich in der kostenintensiven Siliziumtechnik hergestellten Komponenten, werden zunehmend wesentlich wirtschaftlicher und preiswerter aus Kunststoff gefertigt.



Abbildung 1: Mikrozahnrad [warb]



Abbildung 2: Planetengetriebe [whti, wimm]

Kennwerte für Mikrospritzgussteile sind neben den kleinen Strukturabmessungen von wenigen Millimetern das Verhältnis von maximaler Höhe zu minimaler lateraler Abmessung (Aspektverhältnis) und das Verhältnis von Höhe zu Breite der Struktur (Fließweg-Wanddicken-Verhältnis) (Sch01). Die Aspektverhältnisse von Mikrostrukturen liegen deutlich über eins bis hin zu 40. Die gespritzten Formteilgewichte liegen im Bereich von wenigen Milligramm bis einigen Gramm. Die Abbildung 1 und Abbildung 2 beinhalten Mikrozahnräder und Getriebe für kleinste Motoren, wobei die Schussgewichte im Milligrammbereich liegen. Dabei kommen spezielle Spritzgießmaschinen zum Einsatz mit Schneckendurchmessern von 12 oder 14 mm und speziellen Plastifiziereinheiten, damit der Kunststoff möglichst schnell aufbereitet wird und nur kurze Zeit im Zylinder verweilt. Hochgenaue Führungen der Schließeinheit sorgen für eine spiel- und versatzfreie Werkzeugbewegung und damit für ein sicheres und zerstörungsfreies Entformen. Diese Bauteile werden zurzeit entweder nur im Labormaßstab bzw. in Kleinserien produziert.

Bei der Fertigung von Mikrobauteilen ist besonders auf die Abformbarkeit und Formfüllung zu achten. Wie erwähnt, können bei sehr feinen Strukturen Probleme hinsichtlich der Formfüllung auftreten. Die Ursachen hierfür liegen in den verwendeten Kunststoffen, im Werkzeugbau, bei der Temperierung und im Zusammenspiel dieser mit den Maschinenparametern.

Für die Dimensionen des Mikrospritzgießens sind daher entsprechend ausgelegte Werkzeuge notwendig. Das Werkzeug muss beim Einspritzen im Bereich der Kavitäten nahezu auf Schmelztemperatur des verwendeten Kunststoffes erhitzt werden, um die Kavität vollständig zu füllen und nicht zu beschädigen. Anschließend wird das Werkzeug und damit auch die Kavität auf die Entformungstemperatur des Kunststoffes abgekühlt. Dieser Verfahrensablauf wird auch häufig als "Variothermverfahren" bezeichnet (Joh01). Entscheidend für das variotherme Spritzgießen ist das Temperiersystem.

Eine Besonderheit bei Formeinsätzen für den Mikrospritzguss ist die Entlüftung der Kavität. Sie kann nur in wenigen Fällen über die Trennebene, Auswerferspalte oder bewegliche Einsätze erfolgen, da die Dimension dieser Entlüftungskanäle oft im Bereich der Mikrostrukturen oder darüber liegen. Sie würden beim Abformprozess mit gefüllt werden und verstopfen. Für eine vollständige Formfüllung und zur Vermeidung des Dieseleffektes kann deshalb eine Evakuierung der Kavität vor dem Einspritzen nötig werden (Tew97).

3.2 Diffusionsschweißen

Das Ziel schweißtechnischer Forschungen war die Entwicklung und Anwendung eines "idealen Schweißverfahrens". Die Modellvorstellung besteht darin, dass zwei zu fügende Teile bis auf die Größenordnung des Atomabstandes (10⁻⁶ bis 10⁻⁷ mm) aneinander angenähert werden, so dass die atomaren und molekularen Kräfte zwischen beiden Teilen die Verbindung herstellen. Die dafür nötigen Oberflächengüten sind mit keinem vertretbaren Aufwand erreichbar. Das von Prof. N. F. Kasakov (Kaz85) in Moskau erfundene Diffusionsschweißen kompensiert durch die Anwendung von Druck und Wärme die mangelnde Oberflächengüte und kommt der Vorstellung eines idealen Schweißverfahrens nahe.

Nach DIN 1910 Teil 2 werden die Fügepartner beim Diffusionsschweißen im Vakuum oder unter Schutzgas erwärmt und unter Anwendung stetiger Kraft geschweißt. Die Verbindung entsteht durch Anformung der Fügeflächen sowie Festkörperdiffusion der Atome über die Berührungsfläche hinweg. Im Vergleich zu Pressschweißverfahren werden die Fügestellen nur gering oder gar nicht verformt und die Werkstoffeigenschaften in der Fügezone kaum verändert. Außerdem unterscheidet sich das Diffusionsschweißen von anderen Schweiß- und Lötverfahren durch das Fehlen einer schmelzflüssigen Phase (Gün78).

3.2.1 Verfahren

Beim Diffusionsschweißen werden die Werkstoffe in einem Arbeitsmedium unter Anwendung von Druck und Wärme bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes, oder bei Mehrstoffsystemen unterhalb der Soliduslinie, in einer bestimmten Zeit verbunden. Die charakteristischen Prozessparameter beim Diffusionsschweißen sind die Schweißtemperatur, die Flächenpressung und die Schweißzeit. Anhand von Abbildung 3 werden die vier Stufen des Diffusionsschweißens vom Druckaufbau bis hin zur Volumendiffusion anhand der Veränderung der Fügezone dargestellt. Durch Aufrechterhaltung des Drucks und der Temperatur über einen längeren Zeitraum bis zu mehreren Stunden kommt es zu einer vollständigen Verbindung, ohne sichtbare Nähte und ohne Wärmeeinflusszone (Böh92).



Abbildung 3: Mechanismen beim Diffusionsschweißen

Mittels Diffusionsschweißen können verschiedenste Grundwerkstoff-Kombinationen stoffschlüssig verbunden werden. Beim Fügen gleicher Stoffe werden in der Diffusionszone die Festigkeiten des Grundwerkstoffes erreicht. Ein Vorteil des Diffusionsschweißens ist die Möglichkeit, anorganische nichtmetallische Stoffe wie Glas oder Keramik untereinander und auch mit Metallen zu verbinden (DVS91, DVS92, Dra99). Beispiele für Werkstoffkombinationen sind:

- Stahl mit Hartmetall
- Metall-Keramik-Sinterteile
- Kupfer und Keramik
- Metall mit Glas

Der Einsatz von Zwischenschichten erlaubt das Fügen von Werkstoffen, bei denen untereinander keine Diffusion stattfindet. Außerdem ermöglicht dieser Einsatz das Verbinden von Stoffen mit unterschiedlichem thermischem Verhalten, da die Zwischenschichten beim Abkühlen entstehende Spannungen aufnehmen und so eine Rissbildung oder Verformung verhindern (DVS92). Des Weiteren wurden auch Versuche zum Niedrigtemperaturdiffusionsschweißen thermisch empfindlicher Werkstoffe über Zwischenschichten durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass es mit angepasster Interlayerauswahl und entsprechenden Parametern durchaus möglich ist eine derartige Verbindung herzustellen. Die untersuchten Werkstoffe mussten hierbei an den Fügeflächen metallisiert werden. Weiterhin ist es laut (Cam99) heute möglich Werkstoffe mit einer intermetallischen Phase durch Diffusionsschweißen zu Fügen.

3.2.2 Anwendungen

Durch das Diffusionsschweißen sind Verbindungen mit höchsten Anforderungen an Festigkeit und Fehlerfreiheit realisierbar. Die Anwendungsschwerpunkte werden überall dort gesehen, wo konkurrierende Schweiß- und Lötverfahren ihre technischen Grenzen erreichen. Nach (Mad01) ist das Diffusionsschweißen dann einzusetzen, wenn klassische Fügeverfahren versagen. Es wird für Werkstücke eingesetzt, die stoffschlüssig verbunden werden müssen, und aus metallurgischen oder geometrischen Gründen auf herkömmlichen Weg nicht schweißbar sind.

Bei großflächigen Verbindungen werden die Bauteile über die gesamte Berührungsfläche verschweißt. In der ehemaligen DDR setzte man das Diffusionsschweißen im Werkzeugbau und Gerätebau ein, wobei das Fügen von Stahl und Hartmetall bedeutend war. In der Bundesrepublik Deutschland dagegen wurde das Diffusionsschweißen vorwiegend im Hightech Bereich wie in der Luft- und Raumfahrttechnik, sowie in der Kerntechnik eingesetzt (Wie03). In den Vereinigten Staaten von Amerika fand das Diffusionsschweißen zum Verbinden hoch reaktiver Werkstoffe Einsatz, wie beispielsweise dem Fügen von diversen Titanlegierungen. Anwendung fand das Verfahren aber auch im Space Shuttle. So wurden die Hauptantriebstrukturen mit einer Länge von bis zu 6,2 m diffusionsgeschweißt (Wil04). Das Diffusionsschweißen wurde und wird deshalb dann eingesetzt, wenn andere Verfahren zum Fügen von Werkstoffen fehlschlagen. Laut (Wie03) liegt der heutige Einsatz hauptsächlich in folgenden Gebieten:

- Kerntechnik
- Luft- und Raumfahrttechnik
- Werkzeugindustrie
- rttechnik
- Lösen von Sonderaufgaben
- Feinwerktechnik

Beispiele für heutige Anwendungen des Diffusionsschweißens findet man in der technischen Optik, bei der hohe Anforderungen an die Ebenheit und Rauheit der Glas-Glas, Glas-Keramik oder Metall-Keramik Verbindungen gestellt werden und in der Mikrotechnik. Durch die Verbindung des Diffusionsschweißens mit dem Laserschneiden können aufwendige 3D-Körper mit Innenkonturen hergestellt werden, wie sie auch in der Chemieindustrie zur Anwendung kommen. Hier werden miniaturisierte Wärmetauscher oder Mikromischer aus dünnen geschlitzten Folien verschweißt (wFZK). Der in der Abbildung 4 dargestellte KreuzstromMikrowärmetauscher ist ein Beispiel aus der Mikrosystemtechnik. Die konstruktive Auslegung erfordert jedoch keine vollflächige Verschweißung ohne Fehlstellen. Benachbarte Kanäle in einer Schicht müssen nicht unbedingt gegeneinander dicht sein. Die Dichtheit des Wärmetauschers ist nur nach Außen gefordert. Die Kontur des Bauteiles ist vollständig symmetrisch. Verkippungen sind damit leichter zu beherrschen. Eine gewisse Verformung der Kanäle ist zulässig. Bei Verkleinerung der Abmessungen entsprechend der angestrebten Forschungsaufgabe sind diese Fehler nicht mehr zu vernachlässigen.





Abbildung 4: Kreuzstrom-Mikrowärmetauscher (wFZK)

3.3 Werkzeugbau

3.3.1 Werkzeugherstellung für das Kunststoffspritzgießen

Aufgrund der Vielzahl und Komplexität von Werkzeugen für den Spritzguss wird ein Überblick mit dem Schwerpunkt auf Werkzeugen und deren Herstellung für den Mikrospritzguss vorangestellt.

Spritzgießwerkzeuge sind Bauteile höchster Präzision. Die Abformgenauigkeit muss den Ansprüchen genügen, welche an Maßhaltigkeit und optische Beschaffenheit gestellt werden. Die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer (Standzeit) werden maßgeblich von den verwendeten Werkstoffen bestimmt. Aber auch die Wartung und Pflege, sowie die Konstruktion des Werkzeuges, nehmen Einfluss auf die Standzeit. Die Hauptaufgabe von Spritzgießwerkzeugen ist die Formgebung. Die Werkzeuge werden häufig aus verschiedenen Grundelementen, den Normalien (siehe Abbildung 22) wie Werkzeugrahmen, Führungsbolzen, Temperierungselemente und Auswerfer zusammengesetzt. Diese Normalien bestehen aus einfachen Werkzeugstählen und können bei einer Vielzahl von Herstellern geordert werden.



Abbildung 5: Hasco-Normalien (whas)

Die größere Aufmerksamkeit beim Werkzeugbau kommt jedoch dem formbildenden Teil, der Kavität (Formhöhlung oder auch Nest genannt) zugute. Sie werden aus hochwertigen Stählen aber auch anderen Metallen gefertigt und in die Formplatten oder den Werkzeugrahmen eingesetzt. Welcher Werkstoff für den Formeinsatz verwendet wird hängt von Art, Gestalt und Einsatzgebiet des Spritzlings ab. Die genannten Kriterien geben Aufschluss darüber, welche Kunststoffe verarbeitet werden, welche Abmessungen das Werkzeug haben muss, welchen Belastungen es ausgesetzt werden kann und welche Qualitätsanforderungen an das fertige Kunststoffbauteil gestellt werden. Die geforderte Standzeit des Werkzeuges und der maximal einzusetzende Herstellungsaufwand ergeben sich aus der Nachfrage nach dem Spritzling am Markt. Aus diesen Anforderungen lassen sich die Forderungen an den Werkstoff und seine thermischen, mechanischen und metallurgischen Eigenschaften ableiten (Men98).

Zwei typische Vertreter von Spritzgießwerkzeugen sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 zu sehen. Deutlich erkennt man den Aufbau aus Normalien und die eingesetzten Formhöhlungen.



Abbildung 6: Mehrteiliges Werkzeug mit gekühlten Schiebern (wgri)



Abbildung 7: Einfaches Werkzeug mit Grundplattenkühlung

Neben den herkömmlichen Spritzgießteilen, deren Formeinsätze meist durch Zerspanen und Polieren hergestellt werden, stellen Formeinsätze für das Mikrospritzgießen einen wesentlich höheren Anspruch an die Fertigungstechnik. Hier sind eine Reihe verschiedener Fertigungsverfahren verfügbar, die sich zum Teil ergänzen, aber auch teilweise miteinander konkurrieren. Die Verfahren reichen von der Mikro- bzw. Ultrapräzisionszerspanung über das Erodieren und Laserabtragen bis hin zu verschiedenen Maskenbelichtungsverfahren in Verbindung mit anschließendem Galvanisieren (LIGA-Verfahren). Unterschiede existieren in den realisierbaren Strukturabmessungen, den Aspektverhältnissen, dem Formmaterial und den Herstellungskosten. In Tabelle 1 ist ein Überblick der Verfahren und mit den erreichbaren Geometrien gegeben.

Verfahren zur Herstellung von Mikroformen	typische Strukturdi- mensionen [µm]	typische Aspektver- hältnisse	Formeinsatzmaterial
Mikrozerspanung	10-1000	10-50	Nickel, Messing, Stahl
Funkenerosion	100-1000	10-1000	Stahl
Laserabtragen und Galvanisie-	5 500	1.10	Nickel
ren	5-500	1-10	Nickellegierungen
Elektronenstrahllithographie	0105	ca. 1	Nickel
und Galvanisieren	0,1-0,5		Nickellegierungen
UV-Lithographie und Galva-	2 500	1-10	Nickel
nisieren	2-300	1-10	Nickellegierungen
Röntgenlithographie und Gal-	0.5.1000	10,100	Nickel
vanisieren	0,5-1000	10-100	Nickellegierungen
Silizium-Mikrobearbeitung	10-100	1-2	Silizium
Ätzen von Silizium und Gal-	2 500	1 10	Nickel
vanisieren	2-300	1-10	Nickellegierungen

Tabelle 1: Verfahren zur Herstellung von Mikroformen (Ehr02, Fei01)

Bei der Herstellung sehr präziser Formeinsätze mit hohen Aspektverhältnissen und gleichzeitig freier lateraler Gestaltung werden mit den LIGA-Verfahren die besten Ergebnisse erzielt. LIGA steht für Lithographie, Galvanik und Abformung. Das genaueste LIGA-Verfahren ist momentan die Röntgenlithographie. Mit ihr können Strukturhöhen bis zu einigen Millimetern erreicht werden, bei einer Oberflächenrauheit von ca. 50 nm (R_a) (Ehr02). Die so entstehenden Nickelformeinsätze weisen jedoch eine geringere Standzeit als herkömmliche Stahlformen auf (Tew97a).

Zur Formherstellung dreidimensionaler Mikrostrukturen mit reduzierter Abbildungsgenauigkeit im Vergleich zur Röntgenstrahlung eignen sich Excimerlaser. Dabei werden zum einen mit dem Laser bestrahlte Kunststoffe galvanisch weiterverarbeitet (ähnlich dem LIGA-Verfahren) und zum anderen können Stahl- oder Keramikformen per Laser direkt strukturiert werden. Typische R_a-Werte derart erzeugter Oberflächen liegen im Bereich von wenigen 100 nm.

Durch die Weiterentwicklung in der Zerspanungstechnik und bei der Funkenerosion können zunehmend auch solche Verfahren für die Mikrostrukturierung von Formeinsätzen verwendet werden. Durch die Anwendung von Diamantwerkzeugen bei der Ultrapräzisionszerspanung können Aspektverhältnisse bis zu 100 und Oberflächenrauheiten von wenigen Nanometern (R_a) in Nickel oder Messing erzeugt werden. Auch mit der Mikrofunkenerosion lassen sich ähnliche Dimensionen erzielen, die Oberflächengüte liegt dabei aber deutlich unter den spanend erreichten. Der Vorteil beim Erodieren liegt in der Bearbeitung von Werkzeugstahl. So lassen sich auch Formeinsätze für faser- oder partikelverstärkte Kunststoffe herstellen, für die Nickel oder Messing nicht ausreichend verschleißbeständig sind (Ehr02).

3.3.2 Werkzeugtemperierung

Neben der Formgebung ist die zweite Hauptaufgabe des Spritzgießwerkzeuges, die Regelung der Temperatur der Kunststoffschmelze. Die Qualität eines Spritzgießteiles wird maßgeblich von der Auslegung der Werkzeugtemperierung beeinflusst. Diese entscheidet sowohl über die Maßhaltigkeit und Abformgenauigkeit als auch über den Verzug und das Schwindungsverhalten. Das notwendige Abkühlen der Form muss möglichst schnell, aber vor allem auch gleichmäßig erfolgen. Mit den derzeitigen Herstellungsverfahren für Spritzgusswerkzeuge ist das nicht oder nur mit hohem Aufwand erreichbar. Die Zykluszeit in der Produktion wird aber wesentlich vom Kühlverhalten einer Form bestimmt. Dadurch werden die Kosten des herzustellenden Serienteiles weitgehend determiniert. Je leistungsfähiger die Kühlung, desto kürzer ist die Zykluszeit und die Stückteilkosten sinken. Üblicherweise werden Spritzgießwerkzeuge mittels flüssigen Temperiermediums auf einer konstanten Temperatur gehalten. Praktisch sieht dies so aus, dass die Werkzeuge an einen zentralen Kühlwasserkreislauf angeschlossen sind und dadurch permanent gekühlt werden. Diese Methode nennt man "Konstante Temperaturführung" oder auch isotherme Prozessführung, wie sie bei fast allen Spritzgießprozessen angewandt wird. Bei dieser Art der Prozessführung gibt die eingespritzte heiße Schmelze, sobald sie mit der "kalten" Wand des Formeinsatzes in Berührung kommt, Wärme ab und eine Randschichterstarrung setzt ein. Im Inneren der Bauteilwandung verbleibt die so genannte plastische Seele, durch welche die Schmelze weiter nachströmen kann. Die Erstarrung schreitet kontinuierlich fort, bis auch die plastische Seele vollständig erstarrt ist. Dies ist eine Erklärung dafür, warum Mikrostrukturen auf einer kalten Werkzeugwand wie in Abbildung 8 nicht vollständig ausgefüllt werden. Die Schmelze erstarrt zu schnell über den gesamten Querschnitt der Mikrostruktur, wodurch kein Kunststoff mehr nachströmen kann. Der unvollständige Formfüllvorgang kann auch durch den Druckverlust an Querschnittsverengungen erklärt werden. Querschnittsverengung gibt es zum Beispiel dort, wo die Mikrostrukturen an der Werkzeugwand beginnen. Die Einspritzgeschwindigkeit reicht an diesen Stellen nicht aus, um den Druckverlust zu kompensieren und somit die Mikrostruktur zu füllen. Zwischen der Kunststoffschmelze und der Werkzeugwand sowie zwischen den einzelnen Strömungsschichten tritt Reibung auf, die die Fließbewegung behindert. An dieser Stelle sei auf das Gesetz von Hagen/Poisseuille verwiesen, dass eine vereinfachte Berechnung des Druckverlustes zulässt. Die Viskosität von Kunststoffen hängt stark von der Materialtemperatur ab. Je wärmer der Kunststoff ist, desto niedriger ist die Viskosität und desto leichter fließt der Kunststoff. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass der Druckverlust abhängig von der Viskosität und demzufolge auch von der Schmelzentemperatur ist. Für eine vollständige Formfüllung kann der Druckverlust also kompensiert werden, indem die Viskosität der Schmelze niedrig gehalten wird (Sch01).



Abbildung 8: Formfüllung bei isothermer und variothermer Prozessführung nach (Wal02)

Durch die Anhebung der Werkzeugwandtemperatur kann die Abkühlung des Kunststoffes verzögert und dadurch die Viskosität auf geringem Niveau gehalten werden. Praktisch umgesetzt wird diese Methode in der variothermen Prozessführung. Im einfachsten Fall wird der Kühlkanal auch zum Erwärmen genutzt. Dieser Temperierkanal wird dann abwechselnd sowohl zur Erwärmung als auch zur Kühlung eingesetzt, wobei die Abkühlgeschwindigkeit des Kunststoffes deutlich verlangsamt und die Zykluszeit verlängert wird. Das Erwärmen der Form vor dem Einspritzen ist beim dem Mikrospritzgießen zwingend notwendig, um eine vollständige Füllung der Form zu erhalten. Nur durch eine kontinuierliche Temperaturanpassung im Werkzeug kann ein vorzeitiges Erstarren der plastischen Seele und ein Deformieren des Bauteils beim Entformen verhindert werden.

Heute werden drei verschiedene Ansätze verfolgt um den Spritzgießprozess variotherm durchführen zu können. In Tabelle 2 sind die Vor- und Nachteile der drei unterschiedlichen Temperierungsmöglichkeiten, fluidische Temperierung, elektrische Temperierung und induktive Temperierung zusammengefasst. Wie bereits beschrieben, ist zur sicheren Entformung eine Abkühlung notwendig, die in allen variothermen Prozessen herkömmlich mittels Wasser funktioniert, genau wie bei der isothermen Prozessführung.

Die Erwärmungsmethoden werden in indirekte und direkte Erwärmung unterteilt. Bei der direkten Erwärmung der Form befindet sich die Wärmequelle außerhalb des Werkzeuges. Die Wärme wird direkt auf die Kavitätsoberfläche übertragen und erhitzt nur eine dünne Randschicht des Formeinsatzes. Dies kann zum einen über Strahlung geschehen, zum Beispiel auf dielektrischem Weg, über Mikrowellen oder auch durch die Wärmestrahlung eines Infrarotstrahlers. Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit der konvektiven Wärmeübertragung. Hierzu wird ein Gasgemisch in der luftdicht verschlossenen Kavität entzündet. Die Abgase müssen dabei über ein Ventil ausgestoßen werden. Die induktive Erwärmung lässt sich auch als direktes Erwärmungsverfahren anwenden. Dazu wird eine Induktorspule im Raum zwischen den geöffneten Werkzeughälften positioniert und bestromt. Zur Werkzeugkühlung werden äußere aber auch innere Kreisläufe verwendet (Wal02). Um die Nachteile von konstruktiven Veränderungen am Werkzeug zu umgehen und um eine gezieltere Erwärmung der Kavitätswand zu erreichen, werden direkte Erwärmungsmethoden angewandt, sind bisher aber nur vereinzelt im industriellen Umfeld zu finden. Ein Grund dafür sind die notwendigen Anpassungen bzw. der Neubau der Induktionsspulen.

Temperierung	Vorteile	Nachteile	
Fluidische Medien	 einfacher Werkzeugaufbau Flexibilität des Formeinsatzes bei Verwendung von Stammwerkzeugen Homogene Temperierung, da Heiz- und Kühlsystem im gleichen Abstand zum Formeinsatz liegen Verwendung standardisierter Tempe- riertechnologie Temperiertechnik und -steuerung außerhalb des Werkzeuges 	 Aufwendiger Formenbau durch geomet- rieangepassten Verlauf der Temperierboh rungen Wärmequelle bzwsenke nicht unmittel- bar an der Kavitätswand dadurch lange Zykluszeiten wegen Wär- meleitung Bereitstellung eines Heiß- und Kaltme- dienvorrats Diffusionsschweißen 	
Elektrische Wider- standsheizung	 einfacher Werkzeugaufbau Verwendung standardisierter Heiz- elemente und Steuerungskomponenten Punktförmiges Heizen kleiner Kavitä- ten möglich Hohe Flexibilität bei Bauteilgeomet- rien von einigen mm² bis cm² 	 Einpassen der Heizpatrone ohne Luftspalt Wärmequelle bzwsenke nicht unmittelbar an der Kavitätswand dadurch lange Zykluszeiten wegen Wärmeleitung und Konvektion geringe Heizleistung 	
Induktive Temperie- rung mittels externen Induktor	 direkte Wärmegenerierung in der Formteilwand hohe Heizraten homogene Erwärmung von Flächen von 10 bis 100 cm² möglich 	 Zusätzliche Gerätetechnik und Bewe- gungselemente erforderlich (Spule, Gene- rator, Handlingsystem) Anpassung der Spule bei 3D-Bauteilen Einfluss der induktiven Temperierung auf Werkstoff des Formeinsatzes unbekannt Methode noch im Forschungs- und Ent- wicklungsstadium 	

Tabelle 2: Vergleich von Temperierverfahren für den Mikrospritzguss nach (Ehr02, Sch01)

Bei der indirekten Erwärmung wird die Wärme, wie in Abbildung 9 dargestellt, von einer Wärmequelle im Werkzeug mittels Wärmeleitung zur Kavitätswand übertragen. Hierzu zählen die Erwärmung mittels eines Fluids wie Wasser oder Öl, die Erwärmung durch ein Widerstandsheizelement oder Induktion. Der Abstand von der Wärmequelle zur Form sollte so gering wie möglich ausfallen. Die Anordnung muss so gewählt werden, dass eine gleichmäßige Wärmeverteilung gewährleistet ist und somit an allen Stellen der Werkzeuginnenwand die gleiche Temperatur erreicht wird. Die Quelle sowie das Werkzeug sind nach außen hin thermisch zu isolieren, außerdem verkürzen Werkstoffe mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit die Aufheizzeit der Kavität.



Abbildung 9: Wärmetransport bei indirekter Erwärmung (Wal02)

Bei der elektrischen Variante der Erwärmung werden an Stelle des inneren Temperierkreislaufes Widerstandsheizelemente verwendet. Sie werden in Form von Heizpatronen nahe der Kavität in das Werkzeug eingesetzt. Die maximal mögliche Temperaturdifferenz, die beim Heizen erreichbar ist, liegt bei 100 K. Für beispielsweise eine Temperaturerhöhung von 50 K werden im Schnitt 2 bis 3 Minuten Heizzeit benötig. Die eingebrachte Wärme wird über den äußeren Kreislauf wieder abgeführt. Kombinationen aus einer Widerstandsheizung und innerer Kühlung sind, allerdings mit einem erhöhten Fertigungsaufwand, ebenso möglich. Größter Nachteil dieser Methode ist der Einbau der entsprechenden Patronen ohne Luftspalt, welcher isolierend wirkt und die Wärme nicht an die Form überträgt.

Das zweite aufgeführte Verfahren ist die induktive Erwärmung. Hier wird eine Induktorspule im Formeinsatz hinter der Kavität integriert, welche auf transformatorischem Weg eine sehr dünne Randschicht erwärmt. Auf diese Weise sind Aufheizraten bis 50 K/s möglich und Temperaturdifferenzen bis 400 K erreichbar. Das Abkühlen erfolgt analog zur Widerstandserwärmung. Ebenso wie bei der direkten Erwärmung ist eine aufwendige Anpassung der Spule an die Kontur notwendig.

Die Flüssigkeits-Variothermtemperierung regelt die Temperatur des Werkzeuges über zwei voneinander unabhängige Kreisläufe. Der äußere Kreis hält den Werkzeugrahmen bzw. das Stammwerkzeug auf einer konstanten Temperatur. Bei herkömmlichen Spritzgießmaschinen wird hierfür die standardmäßig vorhandene Werkzeugkühlung verwendet. Die Temperierung des Formeinsatzes erfolgt über den inneren Kreis. Dieser wird häufig von einem Temperiergerät gespeist, welches ein heißes und ein kaltes Reservoir mit Flüssigkeit beinhaltet. Die Behältnisse werden über Ventile mit dem inneren Kreis verbunden, wodurch einmal heiße und einmal kalte Flüssigkeit den Formeinsatz erwärmt oder abkühlt. Mit Wasser können in geschlossenen Hochdrucksystemen Temperaturen bis 200° C erreicht werden (wgwk). Für höhere Werkzeugtemperaturen bis 350° C eignen sich nur spezielle Wärmeträgeröle. Zur Verringerung der Wärmeabgabe in den äußeren Temperierkreislauf sollte der Kavitätsbereich oder der komplette Formeinsatz vom Werkzeugrahmen thermisch isoliert sein. Der Nachteil bei herkömmlich gefertigten Temperierkanälen liegt in der mangelnden Konturanpassung an die eigentliche Bauteilform. Einfache, sich treffende Bohrungen werden um die Kontur gelegt, stellenweise verschlossen und mit Anschlüssen versehen. Der Abstand zur Kontur variiert also je nach Bauteilsymmetrie mehr oder weniger stark. Übliche Aufheizzeiten liegen mit dieser Methode in einem Bereich von 5 Minuten oder mehr. Diese Zeit ist aufgrund der schlechten Wärmeübertragungsvorgänge für eine gleichmäßige Temperaturverteilung notwendig. Um diesen Nachteil der Flüssigkeitstemperierung zu kompensieren, werden die Temperierkanäle an die Kontur angepasst. In Abbildung 10 sind die Rohlinge eines Spritzgusswerkzeuges zu sehen. Die Kühlkanäle wurden jeweils in eine Hälfte spanend eingearbeitet. Anschließend wurden die Platten diffusionsgeschweißt und so der Rohling für ein Spritzgusswerkzeug mit innen liegenden und konturangepassten Kühlkanälen gefertigt. Abschließend kann die eigentliche Kavität in den Rohling eingebracht werden. Im Vergleich zu einfachen Bohrungen wird eine Anpassung der Temperierkanäle an die Kontur zumindest in einer Ebene erzielt.



Abbildung 10: Spritzgießwerkzeug mit eingefrästen Kühlkanälen, Fügen durch Diffusionsschweißen (DVS92)

Um die Fügestellenanzahl gering zu halten, bestehen entsprechende Werkzeugrohlinge meist nur aus zwei bis vier Einzelteilen. Im Fall von massiven Einzelteilen, wie auch in Abbildung 10 abgebildet, wird auch das Vakuumlöten eingesetzt (Bro05).

Enthalten die zu fügenden Teile Mikrostrukturen mit Querschnitten von 100 x 100 μ m², so besteht die Gefahr des Verschließens durch das Lot. Ist Lot in die Strukturen gelangt, ist meist der komplette Rohlinge unbrauchbar.

3.3.3 Rapid Tooling von Spritzgießwerkzeugen

Das Rapid Tooling mittels Laserschneiden und Diffusionsschweißen bietet völlig neue Möglichkeiten für die Temperierung. Es ist ein Folgeverfahren des Rapid Prototypings. Rapid Tooling bedeutet, dass am Ende des Fertigungsprozesses kein Prototyp sondern ein einsatzfertiges Werkzeug oder Bauteil steht. Aufgrund der Forderung nach generativen Verfahren zur Herstellung gebrauchsbereiter Metallbauteile, entstanden nicht nur das Lasergenerieren und das Lasersintern, sondern auch Verfahren für die Herstellung für Ur- und Umformwerkzeuge mit besonders aufwendigen Innenkonturen. Zu nennen ist hier das CONTURA-Verfahren der Innova Engineering GmbH (Abbildung 11). Bei diesem System werden konturnahe Temperierkanäle dadurch erzeugt, dass in dicke Stahlplatten (≥ 8 mm) mit herkömmlichen Fräsund Bohrmaschinen entsprechende Konturen erzeugt werden. Die Kanäle können auf diese Weise nur gebildet werden, indem mindestens zwei Platten miteinander verschraubt oder durch Löten oder Kleben gefügt werden, wodurch glattwandige Gänge mit meist rechtwinkligem oder quadratischem Querschnitt entstehen. Diese nur in einzelnen Ebenen verlaufenden Kanäle werden erst durch zusätzliche Bohrungen miteinander verbunden (Wie01).



Abbildung 11: Formkern, hergestellt nach dem System CONTURA (winn)

Weiterhin ist das MELATO-Verfahren zu nennen, welches aus der Aufgabenstellung eines Verbundprojektes hervorging. Ziel war die Entwicklung und Qualifizierung einer Prozesskette zur schnellen Fertigung von komplex geformten Werkzeugen. Das Ergebnis sind Um- und Urformwerkzeuge zum Tiefziehen, Stanzen oder Spritzgießen, welche aus einzelnen Blechlamellen zusammengesetzt werden (siehe Abbildung 29). Die Oberflächengüten und Standfestigkeiten dieser Werkzeuge werden an die jeweilige Anwendung angepasst, sodass die einzelnen Bleche durch Löten, Kleben, Schrauben, Verstiften oder verschiedene Schmelzschweißverfahren gefügt werden. Im Vergleich zum herkömmlichen Werkzeugbau eignet sich dieses Verfahren besonders für Kleinserien, wo es auf sehr kurze Fertigungszeit des Werkzeuges ankommt und wo große Flexibilität gefragt ist (Tec04). Der Werkzeugtemperierung kommt in diesem Projekt jedoch nur eine untergeordnete Rolle zu.





Abbildung 12: Lamelliertes Spritzgießwerkzeuge nach MELATO (Tec04)

Das in dem Forschungsvorhaben zu betrachtende Fertigungsverfahren ist das **Rapid Tooling durch Laserschneiden und Diffusionsschweißen** (Wie03a). Es orientiert sich an der LOM-Technik, bei der Papierschichten ausgeschnitten und aufeinander geklebt werden. An die Stelle des Papiers rücken Bleche oder Folien aus Metall. Den Part des Klebens übernimmt das Diffusionsschweißen, da hiermit die erforderliche vollflächige, stoffschlüssige Verbindung der einzelnen Oberflächen erreicht wird. Dies ist die Grundvorrausetzung für temperaturbeständige Bauteile mit druckdichten Innenkonturen.

Zu Beginn der Prozesskette steht ein 3D-CAD-Modell. Für die Durchführung des Diffusionsschweißens werden Positionierbohrungen und Markierungen hinzugefügt. Dieses erweiterte CAD-Modell wird mittels eines Programms in Schichten zerlegt (engl.: slicen). Die Schichtdicken richten sich nach den zu verwendenden Blechdicken. Aus dem zerlegten Modell werden direkt die NC-Steuerdaten für das Laserschneiden erzeugt. Nach dem Ausschneiden der einzelnen Bleche werden diese zum Fügen vorbereitet (Bsp.: Entgraten und Reinigen) und anschließend in der Diffusionsschweißanlage verschweißt. Durch spanende oder abtragende Verfahren wie Erodieren, Fräsen, Schleifen oder Polieren wird der entstandene Rohling endbearbeitet. Es sind auch Wärmebehandlungen wie zum Beispiel Härten möglich.

Die Verfahrenskombination Laserschneiden und Diffusionsschweißen eröffnet die Möglichkeit, in mehreren Raumachsen gekrümmte Temperierkanäle herzustellen und damit einen konstanten und gleichzeitig geringen Abstand zur Kavitätswand zu erzeugen. Die Kanäle sind an die Flächen, Formen und Konturen der Kavität gut anpassbar, da beliebige Geometrien realisierbar sind. Neben kreisförmigen Querschnitten der Kanäle sind auch quadratische, rechteckige, elliptische oder mehreckige Querschnitte herstellbar. Durch das Zusammenfügen der Blechlamellen mit ihren Konturen entstehen Temperierkanäle, die im Inneren Stufen und Terrassen aufweisen. Diese führen zu einer beträchtlichen Vergrößerung der Wärmeaustauschfläche und damit zu kürzeren Zykluszeiten beim Spritzgießen. Durch die beschriebenen Methoden sind Vergrößerungen der Oberfläche um bis zu 36% möglich (Wie01). Außerdem haben die Stufen eine turbulentere Temperiermittelströmung zur Folge, was den Wärmeaustausch ebenfalls begünstigt. Durch die Konturanpassung der Kanäle kann des Weiteren bei der Abkühlung ein Bauteilverzug und Schwindungskonturen auf dem Bauteil verhindert werden. Bei variothermer Prozessführung können zusätzlich die Aufheiz- und Abkühlzeiten gesenkt werden.

Gegenüber den anderen Verfahren, bietet das Diffusionsschweißen weitere Vorteile. Im Vergleich zum Verschrauben oder Verstiften der Blechstapel werden stoffschlüssig abgedichtete Kanäle erreicht. Die Temperaturbeständigkeit der Verbindung gegenüber Löten oder Kleben ist wesentlich höher. Das zwischen den Blechen vorhandene Lot würde zum einen bei Erreichen der Lotschmelztemperatur im Werkzeug, beispielsweise beim Schmieden, zu einem Versagen der Verbindung führen. Zum anderen können Mikrokanäle schon beim Löten durch das Lot gefüllt und dadurch verschlossen werden. Die Temperaturbeständigkeit von Klebern ist noch niedriger als die der Lote. Es besteht ebenso wie beim Löten die Gefahr, dass die Mikrokanäle durch den Zusatzwerkstoff verstopft werden. Für Hochdruck- und Hochtemperaturanwendungen gibt es demzufolge keine Alternative zum Diffusionsschweißen, wenn die Lamellen Mikrostrukturen enthalten. Durch präzises Trennen (Laser- oder Wasserstrahlschneiden oder Drahterodieren bzw. Fräsen) werden entsprechende Konturen eines optimierten Kühlkanals in vergleichsweise dünne Stahlbleche gratfrei eingebracht, um diese anschließend durch Diffusionsschweißen genau zueinander ausgerichtet und fixiert zu einem Block zusammenzufügen.

Obwohl dieses Verfahren noch am Anfang steht, lassen sich auf diese Weise auch komplizierte Formen und Konturen im Werkzeug erzeugen, die sonst nur mit erheblichen Mehraufwand oder gar nicht realisierbar sind. Dieser Aspekt ist insbesondere für die Ausgestaltung von Temperierkanälen in Formwerkzeugen und Formeinsätzen von sehr großer Bedeutung. Indem Kühlkanäle im Vorhinein scheibenweise erzeugt werden, bietet der Aufbau der Form bzw. des Formkerns aus Blechlamellen gleich fünf wichtige Vorteile:

- Die Kühlkanäle können an die zu kühlenden Flächen, Formen und Konturen im Spritzgießwerkzeug gut angepasst werden.
- Spiralförmig, elliptisch, kreisförmig oder andere, zusammengesetzt verlaufende Kühlgänge sind realisierbar.
- Die Kühlkanäle können jeden gewünschten Querschnitt erhalten. Neben dem annähernd kreisförmigen sind auch quadratische, rechteckige elliptische, drei- oder mehreckige Querschnitte der Kühlgänge herstellbar.
- Durch das Zusammenfügen der Blechlamellen mit ihren Konturen entstehen Kühlkanäle, die im Kanalquerschnitt kleine Stufen und Terrassen aufweisen. Diese führen zu einer beträchtlichen Vergrößerung der inneren Oberfläche. Diese Vergrößerung der Wärmeaustauschfläche trägt wesentlich zur Verbesserung des Wärmeübergangs und damit zu kürzeren Zykluszeiten in Formwerkzeugen bzw. Formeinsätzen bei.
- Kühlgänge mit Stufen und Terrassen auf der Kanaloberfläche führen zu turbulenter Temperiermittelströmung. Die kleinen Absätze (Abbildung 13) ragen in die Strömung und führen zu einer stärkeren Verwirbelung des Kühlmittels. Damit einher geht ein besserer Wärmeaustausch zwischen Temperiermedium und den Wänden des Temperierkanals.



Abbildung 13: Resultierendes Vieleck eines kreisförmigen Temperierkanals bei der Zerlegung in Schichten.

Bei dem Fügen der in beliebige einzelne Schichten zerlegten 3D-CAD-Modelle können folgende Probleme auftreten:

• Durch die fehlende Gegenkraft unter einem Hohlraum kommt es zur lokalen Durchbiegung einzelner Bleche. Dieser Effekt wird durch die thermische Ausdehnung verstärkt (Abbildung 14). • Bei beliebigen Innenkonturen verlaufen einzelne Innenflächen schräg zur äußeren Belastungsrichtung. Eine ausreichende Flächenpressung zwischen den zu verbindenden Schichten ist nicht immer gegeben.



Abbildung 14: Durchbiegung von Lamellen



Abbildung 15: Fehlstellen in der Fügezone (Wie01)

In der Gefügeaufnahme von Abbildung 15 ist dieser Fehler deutlich zu erkennen. An einigen Stellen kommt es zu unzureichenden Verbindungen zwischen den Blechen. Für Anwendungen im Makrobereich bzw. beim Verschweißen von massiven Bauteilen, wie es beispielsweise in Abbildung 10 zu sehen ist, sind diese Schweißfehler bisher meist unkritisch, da die nachgewiesenen Spalte nur im Mikrometerbereich lagen (Breite ca. 2µm) und auf Grund der Größe der Bauteile durchgehende Spalte sehr unwahrscheinlich sind. Derartige Fehler werden verstärkt, wenn die Schweißvorrichtungen zu große Toleranzen hinsichtlich Form- (Ebenheit) und Lageabweichungen aufweisen. Dabei sind Form und Lage nicht nur im Ausgangszustand sondern insbesondere bei Schweißtemperatur zu betrachten.

Ein weiteres in der Literatur bekanntes Problem ist das Abbilden der einzelnen Lamellen auf der Außenseite des Spritzgießbauteiles. Dies ist auf eine ungenügende Verschweißung der einzelnen Lamellen zurückzuführen, Abbildung 16 beinhaltet den Querschliff eines diffusionsgeschweißten Blechstapels aus dem Material 1.2510.



Abbildung 16: Schliff des Halbzeuges einer Angussbuchse, Vergrößerung 5x, ohne Ätzung (Wie01)

In der Abbildung 17 ist das Oberflächenprofil eines gespritzten Bauteils zu sehen. Die Periode der Schwankungen entspricht der verwendeten Blechstärke. Als weitere Einflussfaktoren gel-

ten neben der schlechten Fügeverbindung auch die großen Lamellenstärken, siehe Markierungen in Abbildung 16. Die Schlussfolgerungen nach (Wie01) gehen dahin, dass diese Stufenbildung durch eine geringere Lamellenstärke, verbesserte Schweißerparameter und eine entsprechende Nacharbeit deutlich reduziert werden kann.



Abbildung 17: 3D-Oberflächenscan der Außenfläche des Spritzgießteils (Wie01)

3.4 Zusammenfassung

Zur Herstellung von Mikrospritzgießwerkzeugen mit hohen Standzeiten, erzeugt durch einen lamellaren Schichtaufbau mit einem anschließenden vollflächigen Fügeprozess, weist das Rapid Tooling mittels Laserschneiden und Diffusionsschweißen ein großes Potential auf. Mit den heute eingesetzten Verfahren zur Herstellung von Mikrospritzgießwerkzeugen können nur "weiche" Formwerkzeugwerkstoffe verarbeitet werden, beispielsweise Nickellegierungen. Ein weiterer Vorteil des Lamellenaufbaus ist die kurze Produktionszeit. Der aus Einzellamellen zusammengesetzte Formwerkzeugrohling wird "netshape" gefertigt, so dass nur noch die formgebenden Flächen spanend nachbearbeitet werden müssen. Dies bedeutet eine deutliche Reduzierung des zu entfernenden Spanvolumens. Kühl- und Temperierkanäle können nahe an der Formwand in beliebigen Geometrien integriert werden, wodurch die Zykluszeit beim Spritzgießen um bis zu 40% verringert werden kann.

Das Rapid Tooling durch Laserschneiden und Diffusionsschneiden bietet im Vergleich zum Lasersintern die Möglichkeit, nicht nur ein Prototypenwerkzeug, sondern ein serientaugliches Werkzeug zu fertigen. Durch das Lasersintern können auch feine Strukturen für die Temperierung in ein Formwerkzeug integriert werden, es sind dabei jedoch Stützstrukturen notwendig. Des Weiteren ist die Werkstoffpalette, die für das Lasersintern in Pulverform heute zur Verfügung steht, eingeschränkt, und die Werkzeuggröße kann nicht beliebig nach oben skaliert werden. Zum einen ist die Bauraumgröße der Anlagen beschränkt, zum anderen sind die Fertigungszeiten für Großwerkzeuge wirtschaftlich nicht tragbar. Mit dem Lamellenverfahren können auch entsprechende Großwerkzeuge mit 1 x 2 m Außenabmessungen gefertigt werden, wie das "Melato"-Projekt bestätigt. Da die vorgestellten Werkzeuge keine feinen Innen-

strukturen aufwiesen, konnten die Lamellen stoffschlüssig, beispielsweise durch Vakuumlöten, verbunden werden (Bor05). Weisen die Werkzeuge jedoch Mikrostrukturen auf, so werden diese aufgrund der Kapillarwirkung mit Lot teilweise bis ganz gefüllt und somit unbrauchbar. Für Hohlräume in Mikrospritzgießwerkzeugen werden komplexere Konturen mit absoluter Dichtheit zwischen Formteilkavität und Temperierkanälen gefordert. Um diese Forderung zu erfüllen, kann das Diffusionsschweißen eingesetzt werden. Die Lamellen werden dabei stoffschlüssig verbunden, ohne das ein Zusatzwerkstoff, der die Strukturen füllen kann, benutzt wird.

Da das Diffusionsschweißen bisher vor allem für massive Bauteile genutzt wurde, ist das Wissen zum Fügen von Mikrostrukturen gering. Die bisherige Optimierung der Schweißparameter erfolgte unter anderen Randbedingungen (massive Körper). Die optimalen Prozessparameter von Massivbauteilen können aber für das Fügen von Mikrostrukturen nicht gewählt werden, da die oftmals empfohlenen Flächenpressungen zum Verdrücken und Verbiegen der Strukturen führt. Das Biegewiderstandmoment ist von der Materialstärke abhängig. Für Lamellenhöhen kleiner 1,0 mm ist dies sehr gering. Geringere Blechstärken sind jedoch für Mikrokanalquerschnitte < 1 x 1 mm² notwendig. Aus diesem Grund ist es erforderlich, Untersuchungen zum Fügen von Mikrostrukturen mittels Diffusionsschweißen durchzuführen. Weitere Anwendungen neben dem Einsatz im Mikrospritzgießformenbau, sind Mikrokühler für Laseranlagen oder temperaturbelastete elektronische Miniaturbauteile.

Die heutige geringe Verbreitung des Diffusionsschweißens resultiert aus dem beschränkten Wissens und Erfahrungen. Sind jedoch die erforderlichen Grundlagen bekannt, so kann die vorgestellte Technik in allen Bereichen eingesetzt werden, wo Bauteile mit Mikrostrukturen für eine fluidische Temperierung genutzt werden.

4 Experimentelle Arbeiten

4.1 Vorgehensweise

Ziel des Forschungsvorhabens ist das Erarbeiten von Grundlagenkenntnissen und Empfehlungen für den Bau von Mikrospritzgießwerkzeugen durch Laserschneiden und Diffusionsschweißen. Die Probleme, die bei der Realisierung der angestrebten Aufgabe auftreten, sind sehr komplex. Für den Einsatz der Technologie in kmU ist es notwendig, die gesamte Prozesskette zu betrachten. Im Mittelpunkt steht die Optimierung des Fügeprozesses, d. h. eine Anpassung der Prozessparameter und der Fügeflächengeometrie. Daneben müssen auch die Anforderungen an die Ausgangsmaterialen, wie Werkstoffeigenschaften, Maße und Toleranzen miteinbezogen werden. Für das Diffusionsschweißen von mikrostrukturierten Lamellen ist auch der Schneidprozess selbst, Formungenauigkeiten des Schneidens und das eventuell notwendige Nachbearbeiten von Bedeutung. Weiterer Gegenstand der Untersuchung muss die erzielbare Positioniergenauigkeit der Einzellamellen zueinander sein.

Es ist notwendig, den Diffusionsschweißprozess so zu führen, dass es zu einer vollflächigen Anbindungen aller Lamellen kommt, um die geforderte Dichtheit der Temperierkanäle gegenüber der Form zu gewährleisten. In der Vergangenheit setzte man dafür eine hohe Flächenpressung ein, die jedoch bei den zu verschweißenden Mikrostrukturen zu einer Verformung führt. Auch wurde bisher die Durchbiegung einzelner Lamellen an großen Geometrieübergängen nicht berücksichtigt. Wichtigste Vorraussetzung zum Erreichen des Forschungszieles ist eine optimierte gleichmäßige Flächenpressung im gesamten Bauteil. Es muss eine ausreichende Anpressung bei allen zu verbindenden Flächen erreicht werden. Die auftretenden Normalspannungen dürfen dabei aber auf keinen Fall zu einem Verformen feiner Strukturen aufgrund von Durchbiegung oder Ausknicken führen.

Das Ziel kann mit der bisher verfolgten empirischen Vorgehensweise nicht sicher erreicht werden. Zur Optimierung der technischen Lösung sind Simulationen notwendig. Für die Berechnungen werden FEM-Modelle der Mikrostrukturen erstellt, um die Verformung der Mikrostrukturen ohne aufwendige Experimente zu minimieren.

Um das Toleranzfeld für die Flächenpressung und die Schweißtemperatur zu ermitteln, werden zunächst Teststrukturen erstellt und untersucht. Dazu dienen sowohl kompakte Probegeometrien, als auch "kritische" Geometrien. Für diese Strukturen werden FEM-Modelle erzeugt, um die prinzipielle Eignung der Modelle im praktischen Versuch nachzuweisen. Entscheidend für den Erfolg der Finite-Element-Methode ist auch die richtige Dimensionierung der Randbedingungen. Im konkreten Anwendungsfall ist der äußere Druckaufbau nicht vollständig bekannt. Toleranzen in der Schweißvorrichtung verstärken die Fehlermöglichkeiten. Störeinflüsse können sich auch aus unsymmetrischer Belastung infolge nichtparalleler Druckplatten ergeben. Nach einer Optimierung der FEM-Modelle und einer Abschätzung der Verfahrensgrenzen werden erste Musterwerkzeuge konstruiert. Ausgehend von den Voruntersuchungen werden an Teststrukturen die FEM-Berechnungen verifiziert. Für ausgewählte Werkstoffe werden zunächst geeignete Schweißparameter ermittelt. Dabei sollen die Prozessgrenzen unter Berücksichtigung von Verformung und Qualität der Fügestelle ermittelt werden. Die Schweißproben werden hinsichtlich ihrer Qualität durch metallographische Untersuchungen bewertet. Weitere Bewertungskriterien sind Verformungsmessungen und Dichtheitsprüfungen. Diese Untersuchungen dienen der Bestimmung der grundlegenden konstruktiven Varianten und Prozessparameter. Entsprechend den Berechnungen werden im Weiteren die Teststrukturen unter Beachtung minimaler Verformung und ausreichenden Fügequalität geschweißt. Aus den Ergebnissen dieser Versuche werden die Schweißparameter (Druck- und Temperaturverlauf) sowie die Gestaltung der Schweißvorrichtungen für ausgewählte Werkzeuge bzw. Rohlinge endgültig festgelegt. Zum Abschluss der praktischen Arbeiten werden diese dann angefertigt. Die Konstruktion dieser Bauteile richtet sich wesentlich nach den im Projekt erarbeiteten Erkenntnissen.

Das Laserschneiden dünner Metallfolien ist heute Stand der Technik. Der an den Schnitträndern entstehende Grat wirkt sich jedoch auch auf den anschließenden Fügeprozess aus. Um diesen Einfluss zu evaluieren, werden Folien mit verschieden Verfahren und Prozessbedingungen geschnitten und anschließend mittels Diffusionsschweißen gefügt. Anhand der metallographischen Auswertung der Schweißversuche wird der Prozesseinfluss des Folienschneidens einer wissenschaftlichen Betrachtung unterzogen.

Basierend auf den Untersuchungen werden die Ergebnisse zu Schweiß- und Konstruktionsempfehlungen Datenblättern aufbereitet. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Schweißparameter und konstruktiver Gestaltung einerseits und der Festigkeit der Verbindung und Genauigkeit des Bauteiles andererseits dargestellt. Die konstruktiven Empfehlungen enthalten auch Richtlinien zur Gestaltung der Schweißvorrichtungen. Dazu gehören auch Vorschriften zur Oberflächenvorbehandlung und zu Anforderungen an den Ausgangswerkstoff. Damit wird es kmU ermöglicht, die Technologie prozesssicher zu beherrschen und anzuwenden.

4.2 Versuchsdurchführung

4.2.1 Werkstoffe

Der Werkzeugwerkstoff musste folgende Auswahlkriterien, die in Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses ausgearbeitet wurden, erfüllen:

- \circ lieferbar als Blech oder Folie mit Stärken von 50 μm bis 1 mm
- o laserschneidbar und diffusionsschweißbar
- o spanabhebende und elektroerosive Bearbeitung sollte möglich sein
- o korrosionsbeständig
- o gute Wärmeleitfähigkeit
- o Temperaturbeständigkeit bis mind. 200° C
- o Verfügbarkeit auch in kleinen Mengen
- o kein Sonderwerkstoff

Die genannten Anforderungen erfüllt der Werkstoff X5CrNi18-10. Dabei handelt es sich um einen korrosionsbeständigen austenitischen Stahl. Da überwiegend Wasser als Kühlmedium in der Spritzgießindustrie eingesetzt wird, ist die hohe Korrosionsbeständigkeit des Werkzeugwerkstoffs zwingend erforderlich. Um dies zu erreichen ist für austenitische Stähle ein Chromgehalt von mindestens 12% notwendig. Chrom ist jedoch ein Ferritbildner. Um das

austenitisches Gefüge zu erhalten müssen austenitstabilisierende Elemente, oder auch Austenitbildner (Ni, Co, C, Mn, N) in ausreichender Menge und geeigneter Art zugesetzt sein. Hier empfiehlt sich laugen- und säurenbeständiges Nickel, welches zum Erzeugen eines rein austenitischen Stahls mit einem Chromgehalt von 13% etwa zu 9% benötigt wird (bei einem Kohlenstoffgehalt von 0,2%).

Kennzeichen von austenitischen Stählen ist die hervorragende Schweißeignung. Sie sind unmagnetisch und im festen Zustand umwandlungsfrei. Eine geringe Streckgrenze von $R_{p0,2} = 200 \text{ N/mm}^2$ sowie eine hohe Zugfestigkeit im Bereich von 500 N/mm² bis 950 N/mm² sind ebenso Eigenschaften für austenitische Stähle, wie die hohe Zähigkeit und die gute Verformbarkeit (Bar99).

Beim Schweißen und Schneiden bei hohen Temperaturen kommt es zu einem Abbau von Versetzungen, da im Bereich der Wärmeeinflusszone die Rekristallisationstemperatur örtlich überschritten werden kann, beim Diffusionsschweißen würde dies also das gesamte Bauteil betreffen.

Die Zusammensetzung sowie die mechanischen Eigenschaften des 1.4301 sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Mat	Kurzname	Analyse (Gewichtsprozente [%])									
Nr.	DIN	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	Ni	V	Sonstiges
1.4301	X5CrNi1810	≤0,07	1,00	2,00	0,045	0,015	17-	-	8,00-	-	N≤0,11
							19,5		10,5		

Tabelle 3: Legierungsbestandteile (Cas01)

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur [Cas01]

Härte	0,2%- Streck-	1%- Dehn-	Zugfestig-	Bruch-	Einschnü-	Kerbschlag-
HB30	grenze	grenze	keit	dehnung	rung	arbeit
[HRC]	$[N/mm^2]$	[N/mm ²]	$[N/mm^2]$	[%]	[%]	[J]
215	190	225	500-700	45/35	60	100/60

Weiterhin wurden Schweißversuche mit 1.2344 (X40CrMoV5-1) durchgeführt, um die Wirkung von Ausgleichflächen an einem anderen Werkstoff zu verifizieren. Der spritzseitige Formeinsatz der Formwerkzeuge wurde aus SJRG 235 ("ST37") gefertigt. Aufgrund der Verwendung als Kleinserienwerkzeug konnte dieser Werkstoff trotz geringer Verschleißbeständigkeit gewählt werden.

4.2.1.1 Probengeometrie zur Ermittlung eines sicheren Prozessfensters

Für die durchgeführten Schweißversuche wurden verschiedene Bauteilgeometrien konstruiert. Aufgrund der einfachen Schnittkontur kam die Geometrie A für die Bewertung der verschiedenen Schneidverfahren zum Einsatz. Geometrie B wurde gewählt, um die Verformung von Mikrostrukturen zu bestimmen. Im Vergleich zu Geometrie A sind in verschiedenen Lagen die Mikroschlitze seitlich zueinander versetzt. Die Probengeometrien C bis E beinhalten die gleiche Innenkontur. Diese wurde entworfen um zum einen die Wirkung von Ausgleichsflächen zu bestimmen, zu anderen um verschiedene Positioniermöglichkeiten zu untersuchen. In der Tabelle 5 sind die Abbildungen und Beschreibungen der einzelnen Geometrien zusammengefasst.

Tabelle 5: Probengeometrien für die Prozessparameteruntersuchungen



Abbildung 18: Probe A



Abbildung 19: Probe B



Abbildung 20: Probe C



Abbildung 21: Probe D

Probengeometrie A

Die Mikrostrukturen befinden sich bei dieser Geometrie auf der mittleren Lage und werden durch Lamellen, welche ungeschlitzt sind, umschlossen. Um die erforderliche Mindestdicke zu erlangen, welche benötigt wird um den Temperaturfühler an die Probe heranzuführen, schließen 0,5 mm starke Außenlagen die Schweißproben ab.

Probengeometrie B

Bei der Probengeometrie B wird die mikrostrukturierte Mittellage wiederum durch die weitere Lagen geschlossen. Diese Lamellen sind ebenso mit Mikrostrukturen versehen, welche zwischen den Kanälen der Mittellage liegen.

Probengeometrie C

Bei der Geometrie C wurde in der Probenmitte eine 0,5 mm Lamelle eingesetzt. Die dünnen Metallfolien die über und unter dieser Mittellage zu sehen sind (rote Markierung) sind in der Mitte mikrostrukturiert. Wie bei den ersten beiden Geometrien auch, werden die einzelnen Lamellen über zwei Bohrungen zueinander ausgerichtet.

Probengeometrie D

Im Vergleich zu der Geometrie C sind an den Seiten der Probengeometrie D zusätzlich Laschen angebracht. Diese Laschen besitzen eine kleine V – Nut, die gut in der Abbildung links zu sehen sind. Diese V-Nuten sind eine zusätzliche Möglichkeit zur Positionierung der Einzellamellen.



Probengeometrie E

Diese Probengeometrie ist ähnlich der Probengeometrie D. Die Nuten befinden sich hierbei an der Außenseite der Probengeometrie.

Abbildung 22: Probe E

Die Grundabmaße von zwei verschiedenen Einzellamellen sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt.





Abbildung 23:Abmaße der Mittellage von Pro-
be A und B (Maße in mm)Abbildung 24:Grundlegende Abmaße einer Blech-
lamelle von Probe C (Maße in mm)

Die Mikrostrukturbreiten sollten in den jeweiligen Versuchen so gering wie möglich sein. Diese liegen in der Regel im Bereich von ca. 100 μ m (= Schnittspaltbreite) für das Laserschneiden. Die Dicken der Folien für die jeweiligen Probengeometrien sind in Tabelle 12 gegeben.

	Probe A in [µm]	Probe B in [µm]	Probe C in [µm]	Probe E/D in [µm]
Mittellage	100	100	500	500
Mittellage +1	100	100	100	100
Mittellage +2	-	-	100	100
Außenlagen	500	500	500	500
Gesamtdicke	800	800	1900	1900
der Proben				

Tabelle	6:	Probendicken
Labenc	•••	1 1 00 chaichen

4.2.1.2 Prozesstechnik

In der heutigen Industrie gilt das Laserstrahlschneiden als eingeführtes thermisches Schneidverfahren (DIN 2310). Es ermöglicht auch dünne Bleche mit hoher Qualität zu bearbeiten, welche durch autogenes Brennschneiden oder Plasmaschneiden nicht zufrieden stellend zu fertigen sind. Das Laserstrahlschneiden ist ein Präzisionsschneidverfahren. Da die Schnittflächengüte unter anderem durch eine geringe Rauheit der Schnittflanken gekennzeichnet ist, ist es im Dünnblechbereich häufig im Einsatz. Des Weiteren tritt beim Laserstrahlschneiden nur ein geringer Wärmeverzug auf und Nacharbeit ist in der Regel nicht notwendig (Erh93, Fri01, Her93, Raz95, Vdi93). Im Dünnblechbereich werden zunehmend auch Festkörperlaser eingesetzt. Dies bringt die Vorteile einer hohen Pulsleistung und kürzeren Wellenlänge mit sich, welche eine bessere Energieeinkopplung ermöglichen.

4.2.1.2.1 Laserschneiden

Die Schneidversuche für das Laserschneiden wurden auf einer 50 W Feinschneidlaseranlage durchgeführt.



Abbildung 25: Laseranlage zum Feinschneiden



Abbildung 26: Steuerung der Fa. Heidenhain

Bei der Laseranlage handelt es sich um eine LAY 50-2 der Fa. Haas (heute Trumpf). Die Anlage ist mit einem gepulsten Nd:YAG – Laser ausgestattet, welcher auf einen Durchmesser von 50 bis 100 µm fokussiert werden kann.



Abbildung 27: Einspannung und Düse der Anlage





Das Schneidgas wird beim Schneiden koaxial zum Laserstrahl zugeführt. Die Steuerung des Schneidsystems erfolgt durch eine 3-Achsen-CNC-Bahnsteuerung der Fa. Heidenhain TNC 355 (Abbildung 25 und Abbildung 26).

Zur Durchführung der einzelnen Schnittversuchen, wurde das Spannmittel aus Abbildung 27 verwendet. In Abbildung 28 wird die Einspannung beispielhaft dargestellt.

4.2.1.2.2 Funkenerosives Drahtschneiden

Das funkenerosive Schneiden mittels Draht gehört ebenso wie das Trennen durch Gas (Brennschneiden) oder Strahl (Laserstrahlschneiden) zu den thermischen Trennverfahren (Fri04). Parallel zum Laserschneiden wurden Proben auf einer Drahterodiermaschine angefertigt. Hierfür wurden zunächst Rohlinge auf der Laserschneidanlage gefertigt, welche die Kontur und die Fixierbohrungen enthielten. Die Innenkontur wurde durch Drahterodieren auf einer Robofil 240cc der Fa. Charmilles geschnitten (Abbildung 29 und Tabelle 7). Der minimale Funkenspalt beträgt bei der Anlage ca. 120 μ m wenn mit einem Drahtdurchmesser von 100 μ m geschnitten wird. Auf speziellen Maschinen für die Mikro-Drahterosion werden minimale Drahtdurchmesser von 30 μ m gefahren, woraus ein minimaler Funkenspalt von ca. 40 μ m resultiert.

Arbeitsraum	Einheit	Größe
Maximale Werkstückabmessungen	mm	1000 x 550 x 220
Maximales Werkstückgewicht	kg	750
Abmessungen des Tisches	mm	680 x 450
Abstand Boden/Tisch	mm	1000
Dielektrikum-Gesamtvolumen	1	760
X-,Y-,Z- und U-,V-Achsen		
X, Y, Z Verfahrwege	mm	350 x 220 x 220
U V Verfahrwege	mm	350 x 220

Tabelle 7: Kennwerte Robofil 240 [wcha]





Abbildung 29: Drahterodieranlage (wcha)

Abbildung 30: Spannmittel beim Drahtschneiden

Moderne Schneidanlagen weisen eine Positioniergenauigkeit von unter einem Mikrometer und Umrisstoleranzen von $\pm 3 \ \mu m$ auf. Schnittgeschwindigkeiten von über 300 mm²/min er-

möglichen ebenso einen Einsatz in der Serienfertigung (Sch98). Die Oberfläche der erodierten Werkstücke besitzen auf Grund des Verfahrensprinzips einzelne Entladekrater. Dadurch erscheint sie narbig und es sind keine gerichteten Bearbeitungsspuren zu erkennen. Die Oberflächenrauheiten werden durch die Entladekrater und damit durch die Entladeenergie bestimmt. Als Spannmittel wurde eine Einspannung entsprechend Abbildung 30 verwendet. Da es beim Schneiden einer einzelnen Folie zu starken Schwingungen kommen kann, wurden mehrere Folien auf einmal geschnitten. Diese Folien wurden zwischen zwei 0,5 mm starken Abschlussblechen eingespannt.

4.2.1.2.3 Diffusionsschweißen

Für die Schweißversuche zum Diffusionsschweißen wurden die Diffusionsschweißanlagen DSA 78 und DSA 88 (Abbildung 31 und Abbildung 33) der Technischen Universität Ilmenau verwendet.



Abbildung 31: DSA 78



Abbildung 32: Arbeitskammer der DSA 78 mit beschädigtem Heizer

Die Erzeugung des Vakuums erfolgt zweistufig über verschiedene zwei Pumpen. Das Vorvakuum wird durch eine Sperrschieberpumpe erzeugt. Wenn das Vorvakuum erreicht ist, wird eine Öl-Diffusionspumpe zugeschaltet, welche das Hochvakuum erzeugt. Zur Messung des Vakuums sind Vakuummessgeräte in den Anlagen installiert (Pirani– und Vakuummeter). Der Arbeitsbereich der Vakuumtechnik der DSA78 reicht vom Fein- bis zum Hochvakuum. Das minimal erreichbare und haltbare Vakuum der Anlagen liegt im Bereich unter 0,0133 Pa (ca. 10⁻⁴ Torr). Bei einer Temperaturerhöhung kommt es teilweise zum Abdampfen von Material, so dass dadurch kein konstantes Vakuum gehalten werden kann.

Die maximale Kraft, welche auf die Schweißprobe ausgeübt werden kann liegt bei der DAS 78 im Bereich von 10 kN und bei der DAS 88 im Bereich von 45 kN. Die wirksame Flächenpressung muss über die Probenfläche berechnet werden.

Die maximal erreichbare Temperatur wird durch das Heizermaterial und die Konturanpassung des Heizers bestimmt. Als Heizermaterial wurde Tantal eingesetzt ($T_s > 2900$ °C). Denkbar wäre aber auch Wolfram ($T_s = 3410$ °C), Graphit ($T_s = 3800$ °C) oder Molybdän ($T_s = 2617$ °C). Besonders beim Schweißen mit hohen Temperaturen unterliegt der Tantalheizer einem hohen Verschleiß (Abbildung 32). Deshalb musste bei den Schweißversuchen der
Heizer der DAS 78 einmal gewechselt. Um den Verschleiß am Heizer zu verringern wurde danach die Schweißtemperatur gesenkt und zum Ausgleich die Schweißzeit angepasst. Auf Abbildung 33 und Abbildung 34 ist die Diffusionsschweißanlage DSA 88 und die Anordnung der Bleche in der Arbeitskammer zu sehen.



Abbildung 33: Diffusionsschweißanlage 88 Abbildung 34: Arbeitskammer der DSA 88

Als Schweißprobenaufnahme wurde Graphit verwendet (Abbildung 35 und Abbildung 36). Bei der Verwendung von Stahl müssen jedoch die Schweißprobe und Graphitaufnahme voneinander getrennt werden, um eine Verbinden von Aufnahme und Werkstück zu vermeiden. Zum Trennen der Graphitprobenaufnahme und der Schweißprobe wurde Bornitrid – Spray verwendet.





Abbildung 35:Skizze des zusammengesetzten Spannmit- Abbildung 36:
tels beim DiffusionsschweißenVerschlissene Schweißpro-
benaufnahme

Des Weiteren wurden auch Zwischenschichten aus Glimmer genutzt. Glimmer wurde in den einzelnen Schweißversuchen eingesetzt um die Abstandsböcke aus Stahl vom Druckzylinder, welcher ebenso aus Stahl gefertigt wurde, zu trennen. Bei Glimmer wird unterschieden zwischen Muskovit, ein Kalium-Aluminium-Hydrosilikat, und Phlegopit, ein Kalium-Magnesium-Aluminium-Hydrosilikat. Sie lassen sich durch ihre Farbe unterscheiden. Muskovit hat ein helles und Phlegopit ein dunkles Aussehen. Bei den Schweißversuchen wurde Muskovit eingesetzt.

Durch die starken Belastungen bei entsprechend hohen Temperaturen kommt es zu einem Abdruck der Probengeometrie in der Aufnahme. Deshalb muss die Probenaufnahme aus Graphit in regelmäßigen Abständen abgedreht oder abgefräst werden, um den anhand von Abdruckmarken zu erkennenden Verschleiß zu entfernen und die erforderliche Ebenheit zu gewährleisten (Abbildung 37).



Abbildung 37: Abgenutzte Schweißprobenaufnahme mit Probenabdruck

Bei massiven Beiteilen wirkt sich diese Abnutzung vernachlässigbar auf das Fügeergebnis aus, da eine Erhöhung der Flächenpressung unterhalb der Schweißtemperatur zu einer vollflächigen Anformung der Fügeflächen führt. Im Vergleich dazu bewirkt bei Mikrostrukturen schon eine Abnutzung von 0,003 µm Fehlstellen in der Schweißung in Form einer nicht vollflächigen Verbindung.

Die Messung der Temperatur erfolgt jeweils direkt an der Schweißprobe. Hierfür wurde in die Aufnahme zwei Fugen eingearbeitet um die Zugänglichkeit der Temperatursensoren zu ermöglichen.

Die Oberflächenvorbereitung wirkt sich neben den Schweißprozessparametern auch maßgeblich auf die Güte der Verbindung aus. Die Fügeflächen sollten spanend auf die erforderliche Oberflächenrauheit bearbeitet werden. Ab einem Mittenrauwert kleiner 20 µm können vollständig angebundene Fügeflächen bei makroskopischen Teilen erzielt werden. Die spanende Bearbeitung wird auch durchgeführt, um ebene Flächen zu erhalten und damit den Kontakt aller Flächenelemente der Fügezone zu gewährleisten. Nach dem Spanen wurden deshalb bei allen Schweißproben Bearbeitungsrückstände und andere Verunreinigungen wie Fette durch Ultraschallreinigen in Aceton entfernt, da Oberflächenschichten aus festen, flüssigen oder gasförmigen organischen oder anorganischem Material diffusionshemmend wirken.

Für die Ermittlung eines sicheren Prozessfensters wurde das in Tabelle 8 zusammengestellte Parameterfeld genutzt.

|--|

Größenfeld
900°C bis 1200 °C
6 N/mm ² bis 10 N/mm ²
60 min bis 90 min
Vakuum
> 0,133 Pa (minimale Schwankung bei Tem-
peraturänderung)
Keine
Anlieferzustand, Reinigung durch Aceton

Aus diesem Parameterfeld wurden Einstellungen für das prozesssichere Verschweißen von Mikrostrukturen ermittelt, die auch für das Fügen der Formeinsätze und der Werkzeugrohlinge benutzt wurden:

Tabelle 9: Optimierte Diffusionsschweißprozessparameter

- o Schweißzeit: 90 min (nach Erreichen der Schweißtemperatur)
- o Schweißtemperatur: ca. 1000° C
- o Schweißdruck: 6 N/mm²
- Vakuum: 0,133 Pa (10⁻³ Torr)

Da der Formeinsatz "Temperierwendel" keine Mikrostrukturen enthält, wurde dieser mit einem Schweißdruck, abweichend von den ermittelten optimalen Parametern, von ca. 8 N/mm² gefügt.

4.2.1.3 Prüfung der Einzellamellen und der Schweißung

Um Empfehlungen aussprechen zu können, ist es notwendig die einzelnen Prozessschritte qualitativ zu Prüfen und zu Bewerten. Im Folgenden sind die eingesetzten Verfahren und Prüfmittel zur Charakterisierung der Einzellamellen und der Diffusionsschweißungen zusammengestellt.

4.2.1.3.1 Messung der Rauheit und des Oberflächenprofils

Die Messung des Oberflächenprofils, bzw. der Rauheit erfolgt mit dem optischen Längenmeßsystem Microfocus der Firma UBM, mit welchem sich Längen im Bereich zwischen $0,1 \mu m$ und 1 mm berührungslos messen lassen. Die Messung erfolgt über einen stark fokussierten Laserstrahl, wobei die Messergebnisse unhabhängig vom Material des Objektes und dessen Reflexionseigenschaften sind.

Von ausgewählten lasergeschnittenen Proben wurde der Grat an der Unterseite der Probe bestimmt. Durch die starke Oxidation an der Unterseite der Probe kam es vermutlich zu Fehlmessungen der Gratprofilhöhe. Da sich die Messung der Grathöhe durch optische Verfahren als problematisch herausstellte, fand die Messung des Gratprofils auf dem Tastschnittgerät ME10 der Fa. Carl Zeiss Jena statt. Dieses wurde auch für die Ermittlung der Oberflächenrauheitskennwerte der Fügeflächen genutzt. In der Abbildung 38 ist der Ständer mit Messkopf und justierbaren Objekttisch dargestellt.



Abbildung 38: Ständer mit Messkopf und justierbaren Objekttisch



4.2.1.3.2 Präparation der Proben zur metallographischen Untersuchung

Um eine Aussage über die Schnittqualität und die Schweißverbindung, dem bestehenden Gefüge und dem Einfluss diverser Prozessgrößen machen zu können, wurde jede Probe einem mehrteiligen Präparationsprozess unterzogen. Die Proben wurden nach dem Schneiden der Kontur und dem Schweißen entsprechend getrennt und heiß oder kalt eingebettet. Das Kalteinbetten erfolgte mittels des Zweikomponenten-Harzes Varidur 10 der Fa. Bühler. Das Heißeinbetten wurde mit einem Druck von ca. 240 bar, einer Temperatur von 180 °C in 6 min durchgeführt. Nach dem Einbetten der Schweißproben wurden diese geschliffen und poliert. Das Schleifen der Proben fand auf einer automatischen Poliermaschine Phoenix 4000 der Fa. Bühler statt. Für das Polieren wurden die Proben zunächst auf einer Scheibe mit 3 µm Diamantpaste bearbeitet und danach mit einer Aluminiumoxid-Suspension hochglanzpoliert. Anschließend folgte das Ätzen mit V2A-Beize um das Gefüge und die Kanten der Probe deutlicher hervor zu heben. Das dadurch sichtbar gewordene Gefüge wurde mit einem Auflichtmikroskop der Firma Carl Zeiss untersucht und über eine Digitalkamera, die mit einem PC verbunden ist, als Bild gespeichert.

4.2.1.3.3 Härteprüfung nach Vickers

Da das Diffusionsschweißen oberhalb der Rekristallisationstemperatur abläuft, kann es zu Veränderung im Werkstoffgefüge kommen. Um den Einfluss der hohen Temperaturen auf den Werkstoff zu bestimmen, wurden Härtemessungen durchgeführt. Diese erfolgten an ausgewählten Schweißverbindungen mittels dem Kleinlasthärteprüfverfahren nach Vickers (HV 0,2) unter Verwendung des Härtemessgeräts HMF2000 der Firma Shimadzu.

4.2.1.3.4 Verformungsmessung

Um die Simulationsergebnisse bezüglich der Verformung der Mikrostrukturen zu verifizieren, wurden die Mikrostrukturen nach der Präpäration mittels Lichtmikroskop und Digitalkamera aufgenommen und anschließend die Geometrieabweichungen mittels der Carl Zeiss Software AxioVision bestimmt.



Abbildung 40:Untersuchte Längenmaße an der
FugengeometrieAbbildung 41:Untersuchte Winkelmaße an der Fu-
gengeometrie

In Abbildung 40 und Abbildung 41 sind die verschiedenen Parameter zur Untersuchung der Mikrogeometrie der geschweißten Proben dargestellt. Die einzelnen Parameter der Geometrie sind hierbei die Höhe h, die Breite b, die Verformung des oberen und unteren Materials d₁ und d₂, sowie die Winkelmaße der Schnittflanken α_1 und α_2 . Diese Bezeichnungen sind auch in Tabelle 10 zusammengefasst.

Längemaße			Winkel	lmaße		
	h	b	d ₁	d ₂	α 1	α 2
Erklä	Schnitt	Schnitt	Höhe der	Höhe der Durch-	Winkel zwischen Hori-	Winkel zwischen
rung	fugen-	fugen-	Durchbiegung	biegung an	zontalen und linker	Horizontalen und
	höhe	breite	an Schnittfu-	Schnittfugenun-	Schnittfugenseite	rechter Schnittfugen-
			genoberseite	terseite		seite

Tabelle 10: Definition der Längen- und Winkelmaße

4.2.2 Spritzgießwerkzeuge und -rohlinge

Neben der Realisierung und Erprobung von kompletten Werkzeugen zur Demonstration der neuen Möglichkeiten des Verfahrens zur Herstellung konturangepasster Temperierkanäle wurden verschiedene Formeinsatzrohlinge aus aktuellen Konstruktionen der Projektpartner in die Versuchsplanung einbezogen und realisiert. An diesen Bauteilen wurden mit den Projektpartnern unterschiedliche Varianten diskutiert und verschiedene Temperierkanalgeometrien realisiert.

4.2.2.1 Konstruktive Auslegung und Fertigung

Im Formenwerkzeugbau wird von der Geometrie des zu spritzenden Bauteils ausgegangen. Dadurch ist die Geometrie der Kavität festgelegt. Das Werkzeug selbst muss mit weiteren Elementen für das Spritzgießen versehen werden wie Angusssystem und Formteilungsebene(n). Aufgrund von Funktionsflächen können diese Formteilungsebenen nicht beliebig ins Werkzeug gelegt werden. Weiterhin muss auch die Lage des Angusses berücksichtigt werden. Zum einen sollte dieser nicht auf einer später sichtbaren Fläche liegen, zum anderen muss auch eine vollständige und gleichmäßige Füllung der Form gewährleistet werden. Dieser Konstruktionsprozess wird heute von den marktüblichen CAD-Programmen erleichtert. Ausgehend von einem CAD – Modell wird nach Festlegung der Randbedingungen die Geometrie der Form automatisch erzeugt und teilweise direkt in CNC-Abläufe für die Fertigung umgesetzt. Da die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses verschiedene CAD-Systeme nutzen, mussten die zur Verfügung gestellten Modelle für das Slicen in ein Autodesk-Format konvertiert werden. Nach dem Slicen wurden die Geometrien mittels Finest für das Laserschneiden aufbereitet. Für die parallel zur Konstruktion durchgeführten FEM-Simulationen zur Bestimmung der Lamellenverformung wurde das Softwarepaket Ansys genutzt. Der Fertigungsablauf eines kompletten Einsatzes von der Konstruktion bis zum Spritzversuch wird im Folgenden exemplarisch für den Formeinsatz "Temperierwendel" vorgestellt.

4.2.2.1.1 Formeinsatz "Temperierwendel"

Im Werkzeugbau wird die Werkzeugkonstruktion von einem herzustellenden Bauteil abgeleitet. Für den Formeinsatz "Temperierwendel" sollte das zu spritzende Kunststoffteil einen Probekörper darstellen, der eine Bewertung des Spritzgießwerkzeuges gestattet. Im Laufe des Projektes ergaben sich notwendige Anpassungen bei den Formeinsätzen. In diesem Kapitel des Schlussbereichtes wird auf die Anfangskonstruktion sowie einige Änderungen eingegangen.

Formeinsatz schließseitig

Der schließseitige Formeinsatz sollte durch Laserschneiden und Diffusionsschweißen hergestellt werden und Temperierkanäle enthalten. Für das Laserschneiden war ein 3D-CAD-Modell nötig. Es beinhaltete die Temperierkanäle und die Grobform des Formeinsatzes. Die äußere Passung für das Einfügen in das Stammwerkzeug, sowie die Mikroform waren nicht in das Modell integriert, da die Endbearbeitung durch spanabhebende und elektroerosive Verfahren nach dem Diffusionsschweißen erfolgen sollte. Aus diesem Grund wurde das Modell in den Außenabmessungen mit Aufmass konstruiert.

Die Positionierung der Temperierkanäle relativ zum Werkstück wurde in verschiedenen Varianten diskutiert. In Abbildung 42 und Abbildung 43 ist der Formeinsatz "Temperierwendel" sowie die gewählten Kühl- und Heizwendel zu sehen.



Abbildung 42: Prototyp des Formeinsatzes

Abbildung 43: Zueinander verdrehte Temperierwendel

Abbildung 44 stellt die doppelt wendelförmige Anordnung im Werkzeug dar. An den Farben rot und blau ist zu erkennen, dass eine Wendel für die Kühlung und eine Wendel für die Heizung vorgesehen ist.



Abbildung 44: Schnittdarstellung Formeinsatz "Temperierwendel"

Von einer einzelnen Wendel zum Heizen und Kühlen wurde abgesehen, da in diesem Fall außerhalb des Werkzeuges eine zusätzliche Umschaltung zwischen kaltem und heißem Temperierkreislauf notwendig ist. Die Wendel besitzen dieselbe Zentrumsachse, sind aber um 180° zueinander verdreht, so dass sich die Eine in den Zwischenräumen der Anderen befindet. Um Überschneidungen zu verhindern muss die Rotationsrichtung und Steigung bei beiden Wendel identisch sein. Strömungsdurchmesser und Wendeldurchmesser wurden ebenfalls gleich gesetzt, um gleiche Wärmeübertragungsoberflächen zu gewährleisten. Die Anschlüsse der Wendel mussten im unteren Bereich des Formeinsatzes angeordnet werden, da andernfalls größere Nacharbeiten am Stammwerkzeug notwendig geworden wären (in Abbildung 42 und Abbildung 44 noch nicht vorgesehen). Die Höhe des Formeinsatzes wurde auf 80 mm festgelegt. Dies ist die maximale Größe die in der Diffusionsschweißanlage DSA 88 gefügt werden kann.



Abbildung 45: 3D-Modell des schließseitigen Formeinsatzes, Grundlage zum Slicen

Zuletzt erfolgte die Konstruktion der Außenkonturen und es wurden Elemente in das 3D-Modell eingebunden, die für das Diffusionsschweißen nötig waren. Zu diesen Elementen zählt auch die Positionier-Nut, die es nach dem Laserschneiden ermöglicht, die einzelnen Bleche eindeutig zuzuordnen. Die Nut verläuft auf der Mantelfläche des Formeinsatzes in Form einer Schraubenlinie vom oberen bis zum unteren Rand. Des Weiteren waren senkrechte Durchgangslöcher einzufügen, in die vor dem Schweißen Passstifte zu Blechfixierung eingesetzt werden. Der Durchmesser der Durchgangslöcher wurde 0,1 mm größer gewählt, als der der Passstifte. Da es bei einem beheizten Formeinsatz auch darauf ankommt, wenig Wärme an das Stammwerkzeug abzugeben, wurden die Kontaktflächen zwischen dem Stammwerkzeug und dem Formeinsatz minimiert. Der Kontakt zum Stammwerkzeug wird mittels vier 30°-Stegen realisiert, welche die Kontaktfläche auf 1/3 reduzieren. Zusätzlich wurden zwei Sacklöcher auf der Stirnfläche angebracht, in denen eine Mitnehmerplatte für die Drehnachbearbeitung fixiert werden konnte. Das fertige 3D-Modell ist in Abbildung 45 und Abbildung 46 dargestellt. Aus diesem wurden die Schichten für das Laserschneiden mittels eines Slicers erzeugt. Auf die Positionier-Nut, die Durchgangslöcher, die an den unteren Rand verschobenen Kanalanschlüssen, sowie die 30°-Stege sei hier besonders hingewiesen.

Heiz- und Kühlwendel:

 Umdrehungen 	4,5
• Steigung	12,22
• Höhe	55 mm
 Durchmesser 	30 mm
 Strömungsquerschnitt 	3 mm
(Startwinkel um 180° verd	reht)



Abbildung 46: Drahtmodell des schließseitigen Formeinsatzes

Formeinsatz spritzseitig

Die Funktion des spritzseitigen Formeinsatzes (Abbildung 47) spielt in diesem Forschungsvorhaben eine untergeordnete Rolle, ist aber für den Spritzvorgang, die Formgebung sowie Kühlung des Probekörpers unentbehrlich. Beim Öffnen des Werkzeuges nach dem Spritzvorgang bleibt der Spritzling im schließseitigen Stammwerkzeug zurück und muss folglich aus diesem ausgeworfen oder manuell entformt werden. Da keine Auswerferstifte vorgesehen waren, musste der Probekörper leicht von Hand zu entformen sein. Dies ist nur möglich wenn eine greifbare Geometrie aus der Formteilungsebene herausragt. Aus diesem Grund wurde ein formgebender Formeinsatz im spritzseitigen Stammwerkzeug notwendig.



Abbildung 47: Modell des spritzseitigen Formeinsatzes

Die wesentlich einfachere Variante, die Aussparung im spritzseitigen Stammwerkzeug bündig mit der Formteilungsebene zu verschließen, konnte deshalb nicht genutzt werden. Der Probekörper hätte nach der Werkzeugöffnung mit der Formteilungsebene abgeschlossen und wäre nicht zu entformen gewesen. Beim Fertigen der formgebenden Kontur war zu beachten, dass sie im eingebauten Zustand mit der Kontur im schließseitigen Formeinsatz fluchtet und so keine Stufen im Probekörper abbildet. In Abbildung 47 ist ein Modell zu sehen, was den spritzseitigen Formeinsatz noch ohne Anguss darstellt.

4.2.2.1.2 Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur"

Der Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" wurde für das Spritzen von flachen Mikrokunststoffteilen konstruiert. Im Vergleich zum Formeinsatz "Temperierwendel" wurde der wirksame Strömungsquerschnitt erhöht, indem der Strömungsdurchmesser von 3 mm auf 8 mm vergrößert wurde.

Außerdem ist der Wärmetauscher nur 1-kanalig ausgelegt. Durch die Veränderungen wird die Durchflussrate erhöht und somit eine Temperaturänderung beschleunigt. Um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu ermöglichen, wurden Wärmetauschstrukturen integriert (Abbildung 48). Die Abbildung 49 beinhaltet den anschlussfertigen Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur". Deutlich sind die zwei Anschlüsse für die Temperierung zu erkennen. Die Aufnahmen zur Beurteilung der örtlichen und zeitlichen Wärmeverteilung wurden wie in Abbildung 49 dargestellt ohne eingearbeitete Formkavität gemacht.



Abbildung 48: Drahtgittermodel Formeinsatz Abbildung 49: Formeinsatz "Wärmetauscher-"Wärmetauscherstruktur" struktur" ohne Mikrokavität

4.2.2.1.3 Mikrowärmetauscher

Das dritte diffusionsgeschweißte Bauteil ist ein Mikrowärmetauscher, wie er in der chemischen Produktentwicklung häufig eingesetzt wird. Um den Aufwand für Reinigung und Versuchmedien gering zu halten, haben sich in diesem Arbeitsfeld Mikroreaktoren und "tabletop"-Anlagen durchgesetzt (Sch04).



Abbildung 50: Mikrowärmetauscher

Abbildung 51: Mikrowärmetauscher aufgeschnitten

Die einzelnen Lamellen, aus denen der Wärmetauscher geschweißt wurde, sind in Abbildung 50 zu sehen. Von diesem Probekörper wurden mehrere angefertigt, um sie für diverse Untersuchungen einzusetzen, wie beispielsweise Durchflussmengenermittlung oder Korrosionsverhalten der Mikrokanäle im Dauertest. Für die Überprüfung der Verbindungsqualität wurden Schnitte in mehreren Ebenen mittels Drahterosion durchgeführt (Abbildung 51).

4.2.2.1.4 Werkzeugrohling "FKT"

In den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses wurden zwei Geometrien der Mitglieder gewählt, um eine industrielle Umsetzung der Ergebnisse für kmU zu ermöglichen.



Abbildung 52: Zeichnung Formteilrohling "FKT"

Das erste Bauteil ist ein Einsatz eines mehrteiligen Werkzeuges der Firma FKT Triptis. Um eine werkstoffgerechte Temperierung in der Kavität zu gewährleisten, ist eine konturangepasste Kanalführung notwendig. Die Zeichnungsableitung des 3D-Model für das Slicen des Formrohlings ist in Abbildung 52 dargestellt. Der Temperierkanal konnte aufgrund der Geometrieverhältnisse nur einkanalig integriert werden, ähnlich wie in Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur". Um die Druckverluste im Temperiermedium gering zu halten, wurde der Kanal bis nahe an die Formwand mit einer Querschnittsfläche von 12,57 mm² herangeführt. In der Nähe der Kontur verengt sich der Kanal dann auf einen Querschnitt von ca. 2 mm². In Abbildung 53 ist dies ebenfalls zu erkennen, sowie das Stapeln der Einzellamellen und der geschweißte Rohling. Dieser wurde beim projektbegleitenden Arbeitskreismitglied mit der Formgeometrie und den Einsetzpassungen versehen.



Abbildung 53: Fertigungsablauf Fertigung Formrohling "FKT"

4.2.2.1.5 Werkzeugrohling "Wahl Optoparts"

Die zweite Bauteilgeometrie ist ein Temperierelement für das Spritzgießen von optischen Mikrolinsen. In dem sehr schnell wachsenden Markt für derartige Bauelemente mit Durchmessern kleiner 2 mm erwirtschaftet die Firma Wahl Optoparts Triptis einen Jahresumsatz von mehreren Millionen Euro.

Um die Zykluszeit bei der Produktion der Mikrolinsen zu reduzieren, ist eine effektive Temperierung notwendig. Ein zeitbestimmendes Bauteil im Formwerkzeug ist das Temperierelement. Durch eine Kombination zweier Werkstoffe soll der Wärmeübergang zwischen Formwand und Temperiermedium gefördert werden. Erste Schweißversuche wurden unter der Berücksichtigung der bisher erzielten Ergebnisse durchgeführt. In Abbildung 54 sind zwei verschiedene Stahl-Kupfer-Schweißungen dargestellt.



Abbildung 54: Gefüge von Stahl - Kupfermischverbindugen

Da beim Spritzgießen von optisch wirksamen Komponenten der Temperaturgradient in der Formwand $1 - 2^{\circ}$ C nicht überschreiten darf, werden weitergehende Untersuchungen durchgeführt. Ein Entwurf für das optimierte Temperierelement ist in der Abbildung 55 und Abbildung 56 zu sehen.



Abbildung 55: Untere Formhälfte Entwurf 4



Abbildung 56: Oberer Formhälfte Entwurf 4

4.2.2.1.6 Fertigung des Formeinsatzes "Temperierwendel"

Die Fertigung eines kompletten Werkzeugeinsatzes mittels Laserschneiden und Diffusionsschweißen wird im Folgenden exemplarisch für den Formeinsatz "Temperierwendel" dargestellt.

Für das Laserschneiden wurde das 3D-Modell des schließseitigen Formeinsatzes (Abbildung 57 und Abbildung 58) mittels einer Software in Schichten zerlegt (slicen). Die Schichten waren 1 mm dick, da das Blech des Werkstoffes 1.4301 eine Sollstärke von 1 mm aufwies. Aufgrund der Modellhöhe von 80 mm entstanden 80 Lamellen, wie im Ausschnitt auf Abbildung 57 zu sehen ist.

Das Laserstrahlschneiden erfolgte im Fachgebiet Fertigungstechnik auf einem Nd:YAG-Laser mit einer mittleren gepulsten Leistung von 500 Watt (siehe Abbildung 58).



Abbildung 57: In Schichten zerlegtes 3D-Modell



Abbildung 58: Laserschneiden

Alle entstandenen Bleche wiesen gemäß der DIN ISO 13715 einen minimalen Grat auf. Nach dieser Norm ist ein Grat "ein Materialüberhang außerhalb der ideal-geometrischen Form einer Außenkante, die nach der mechanischen Bearbeitung oder einem Formgebungsprozess zurückbleibt". Besonders groß fielen die Materialüberhänge im Bereich der Anschnitte aus.

Durch Fixierungsstifte war eine stabile Positionierung der Einzellamellen für das Diffusionsschweißen möglich, doch hätte der Schweißdruck nicht ausgereicht, um den Grat einzuebnen und die Bleche genügend aneinander anzunähern.

Der Grat wurde deshalb durch eine Nachbearbeitung entfernt. Zusätzlich wurden die Durchgangslöcher auf den vorgesehenen Durchmesser von 3,1 mm aufgerieben und selbige sowie die senkrechten Temperierkanalrückführungen gesenkt.

Die unteren 5 Bleche wurden mit einer zentralen Bohrung versehen, um beim späteren Bearbeiten auf der Drehmaschine das Ansetzen einer Zentrierspitze zu ermöglichen. Bevor die Bleche für das Diffusionsschweißen gestapelt werden konnten, wurden sie in einem Aceton-Bad mittels Ultraschall gereinigt. Zur Aufnahme der Blechstapel dienten Graphitplatten, in die die Passstifte für das Stapeln eingesetzt wurden. In Abbildung 59 ist das Stapeln zu sehen. Dabei musste auf besondere Sauberkeit geachtet werden, da Schweiß- oder Fettrückstände durch Hautkontakt den Diffusionsvorgang negativ beeinflussen. Mit den in Vorversuchen optimierten Parametern konnten gute Schweißverbindungen hergestellt werden (Tabelle 9). Der Formeinsatz wurde deshalb mit nahezu identischen Parametern diffusionsgeschweißt. In Abbildung 34 ist die Anordnung der Bleche in der Arbeitskammer zu sehen.



Abbildung 59: Stapeln der Bleche

Nach dem Schweißen folgte die Einpassung des schließseitigen Formeinsatzes in das Stammwerkzeug.



Abbildung 60: Formeinsatz während der Bearbeitung

Auf einer Drehmaschine erfolgte das Einstellen der Außendurchmesser und die Ausarbeitung der zylindrischen Kavität für den Grundkörper des Spritzlings. Des Weiteren wurden der Anguss sowie die Nut für eine Passfeder eingefräst. Der Bearbeitungsstand ohne Fließweg und ohne Anschlüsse für die Temperierung ist auf den Bildern von Abbildung 60 zu sehen.

Die DIN 16766 Teil 1 definiert Anschlussnippel für Temperiersysteme im Betriebsbereich von maximal $5x \ 10^5$ Pa und 80° C. Um am Stammwerkzeug keine gravierenden Änderungen vornehmen zu müssen, war es wegen ihrer Größe nicht möglich, entsprechende Normteile zu verbauen. Deshalb kam eine Eigenentwicklung zum Einsatz, kleinere, schraubbare Schlaucholiven (siehe Abbildung 61).



Abbildung 61: 3D-Modell der verbauten Schlaucholive

Im weiteren Verlauf wurden die Kanäle für die Fließwegbeurteilung an einer Startloch-Erodiermaschine eingebracht (Abbildung 62). Entgegen der ursprünglichen Konstruktion wurde in das Formwerkzeug "Temperierwendel" noch ein zweiter Fließweg integriert.



Abbildung 62: Erodieren auf Startlochbohrmaschine

Ein Fließweg befindet sich zentrisch in der Mitte des Formteils, der andere auf einem Durchmesser von 10 mm, also 5 mm vom Zentrum entfernt. Ziel war hierbei, auch Aussagen über den Einfluss des Fließwegabstandes zur Temperierwendel ableiten zu können. Um das konstruierte Fließ-Wanddicken-Verhältnis zu ermöglichen, wurde eine Elektrode mit 0,5 mm Durchmesser benutzt. Das Nachschneiden erfolgte auf der Drahterodiermaschine. Beim mittleren Konus wurde ein Winkel von 1,55° und ein Startdurchmesser von 4,9 mm erreicht und beim außen gelegenen Konus 1,17° und 3,9 mm. Die Fließweg-Wanddicken-Verhältnisse sind ca. 17 beim Konus im Zentrum des Formeinsatzes und ca. 27 bei dem anderen Konus. Außerdem wurden sieben Schlichtschritte pro Konus durchgeführt, um eine bessere Oberflächengüte zu erzielen.

Neben dem diffusionsgeschweißten Formeinsatz musste auch der spritzseitige Einsatz gefertigt werden. Dieser wurde aus vollem Rundmaterial gedreht und in das spritzseitige Stammwerkzeug eingepasst. Da in diesem Formeinsatz keine Mikrostrukturen integriert waren, ist die Temperierung über das Stammwerkzeug ausreichend. Wie auch beim schließseitigen Einsatz wurden der Anguss und die Passfeder-Nut eingefräst. Die formgebende Kontur stellte einen einfachen Zylinder dar, der wie auch auf der Schließseite einen Durchmesser von 30 mm einnimmt und in der Tiefe 10 mm misst. Um die Entlüftung der spritzseitigen Kavität zu gewährleisten, wurde ein Formkern in den Einsatz eingepasst. Das hierfür nötige Durchgangsloch betrug im Durchmesser 30 mm. Der Formkern besitzt Ringnuten und eine Entlüftungsnut. Die sich am Boden der Kavität aufstauende Luft kann durch die Spielpassung hindurch verdrängt und abgeführt werden. In Abbildung 63 ist der spritzseitige Formeinsatz mit Formkern zu sehen.



Abbildung 63: Spritzseitiger Formeinsatz mit Kern zur Entlüftung

Parallel zur Entwicklung der Formeinsätze und der Temperierung wurden auch die Stammwerkzeuge für die Aufnahme der Formeinsätze vorbereitet. Durch die Normalien-Bauweise bot sich die Möglichkeit, mit den vorhandenen Platten und Bolzen einen einfachen Werkzeugrahmen zusammenzusetzen, der die Deckplatte für die Aufnahme der schließseitigen Formeinsätze trägt (siehe Abbildung 64). Spritzseitig waren keine Änderungen am Stammwerkzeug nötig, wie es in Abbildung 65 zu sehen ist. Hier brauchten nur die eingebauten Formeinsätze entfernt werden, um Platz für den neuen Einsatz zu schaffen. Der spritz- bzw. schließseitige Formeinsatz wurde so hergestellt, dass die Außenform eine Passung zu den Trägerplatten ergab. Durch diese Anpassung konnte auf eine spanende Nachbearbeitung der Platten des Stammwerkzeuges verzichtet werden. Lediglich eine Zwischenplatte wurde im Verlauf der Arbeit verändert. Wegen der asymmetrischen Nutzung des Stammwerkzeuges wurde eine Seite des Angusskanals verschlossen, so dass kein Kunststoff beim Spritzen in die ungenutzte zweite Seite gelangen kann. Dies geschah über das Setzen und Überfräsen von Schweißpunkten in den Kanalhälften, wie es in den Abbildung 66 und Abbildung 67 zu erkennen ist.



Abbildung 64: Trägerplatte schließseitig



Abbildung 65: Trägerplatte spritzseitig



Abbildung 66: Schweißpunkt schließseitig



Abbildung 67: Schweißpunkt spritzseitig

Spritzseitig wurde der einfache Formeinsatz von der Rückseite in das Stammwerkzeug eingesetzt und anschließend die Aufspannplatte mit den Grundplatten verschraubt.

Um ausreichend Bauraum für die am diffusionsgeschweißten Formeinsatz befindlichen Temperieranschlüsse zu schaffen, wurde in die Rückseite der schließseitigen Rahmenplatte eine Vertiefung gefräst. Da der Durchgang durch diese Platte zu schmal für den Formeinsatz war, musste auch dieser vergrößert werden. Der Durchmesser wurde so groß gewählt, dass zur besseren thermischen Isolation kein Kontakt mit der Passung des Formeinsatzes auftrat. Zum Verständnis dienen die Beschreibungen in Abbildung 68.



Abbildung 68: Sicht auf hintere Rahmenplatte des schließseitigen Stammwerkzeuges

Der Formeinsatz mit angeschlossenen Schläuchen wurde von der Rückseite in das Stammwerkzeug eingesetzt.





Abbildung 69: Abstützblock

Abbildung 70: Abstützplatte des Auswerferbolzens

Der Abstützblock (Abbildung 69) muss die Kräfte, die beim Einspritzen auf den Formeinsatz wirken, aufnehmen und an die rückwärtige Aufspannplatte des Stammwerkzeuges weiterleiten. Ohne diese Abstützung wird der Formeinsatz in den hohlen Werkzeugrahmen geschoben. Der Auswerferbolzen blieb zur Verschließung seines Führungsloches im Werkzeug, musste aber nach hinten durch eine zusätzliche Platte abgestützt werden (Abbildung 70). In Abbildung 71 ist das zusammengesetzte schließseitige Stammwerkzeug zu sehen.



Abbildung 71: Seitenansicht des schließseitigen Stammwerkzeuges

Abschließend sind die eingebauten Stammwerkzeughälften in Abbildung 72 und Abbildung 73 dargestellt.



Abbildung 72: Schließseitiges Stammwerkzeug



Abbildung 73: Spritzseitiges Stammwerkzeug

4.2.2.2 Kenndatenermittlung

Von entscheidender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit eines Werkzeuges und die Abformqualität sind die Temperierraten sowie die örtliche und zeitliche Wärmeverteilung. Zur Ermittlung der Temperaturen der Form und der Temperiermedien diente das Messgerät THERM 2281-8 und vier angeschlossene NiCr - NiCr – Mantelthermoelemente (Abbildung 74).



Abbildung 74: THERM 2281-8 mit angeschlossenen Thermoelementen

Neben den Temperaturmessungen mittels Thermoelementen wurden auch Untersuchungen mit einer Thermokamera durchgeführt. Damit war es möglich, die örtliche und zeitliche Temperaturverteilung zu protokollieren. Der Versuchsaufbau mit dem Thermografiesystem Zeiss VARIOSCAN ist in Abbildung 75 dargestellt. Zum Aufbau gehören die Kamera, ein VGA-Monitor, sowie eine Tastatur und ein Controller. Das verwendete System 1010 ist stickstoffgekühlt. Die Siliziumoptik eignet sich zur Visualisierung von Temperaturen zwischen - 10° C und 800° C. Der optimale Einsatzbereich liegt zwischen - 10° C und 40° C. Die Wärmebilder werden fortlaufend auf dem Monitor dargestellt und können zusätzlich exportiert werden. Enthalten sind in den Dateien die Temperaturinformationen der einzelnen Pixel, welche mit dem Programm SidView ausgewertet werden können. Mit der Software VARSCAN werden die SID-Dateien in übliche Bilddateien umgewandelt. Ein Editor ermöglicht dabei die Beschriftung der Wärmebilder und das Einfügen der Farb-Temperatur-Zuordnung.



Abbildung 75: Versuchsaufbau zur Betrachtung mit Thermokamera

Das zur Kühlung verwendete Medium wird meist von einer Zentralanlage zur Verfügung gestellt und weißt deshalb eine nahezu konstante Temperatur auf. Für die Erwärmung werden aus Kostengründen Heißwassergeräte eingesetzt, die eine maximale Medientemperatur von 95° C bereitstellen. Nur wenn eine Vorwärmung der Formwand auf Temperaturen größer 90° C notwendig ist, werden Öltemperiergeräte genutzt (Reg01). Die zeitliche Temperaturänderung bei der Nutzung von fluidischen Temperiermedien wird aus den genannten Gründen vornehmlich von der realisierten Durchflussmenge bestimmt. Auch dieser Kennwert wurde in die Untersuchungen miteinbezogen.

4.2.2.3 Prüfung der Funktion

Bei der verwendeten Spritzgussmaschine handelt es sich um eine Klöckner FERROMATIK FM60 (Abbildung 76) mit einem Säulenabstand von 320 x 320 mm² und einer maximalen Schließkraft von 600 kN. Die Schließkraft wird direkt über einen Hydraulikzylinder aufgebaut und auf die Werkzeugplatten übertragen. Des Weiteren ist ein pneumatisches Handlingsystem an der Maschine vorhanden. Für das Spritzen von geringen Schussgewichten wurde eine Plastifizierschnecke mit einem Durchmesser von 20 mm verbaut.



Abbildung 76: Spritzgussmaschine Klöckner FERROMATIK FM60

Das für die Abformung verwendete Kunststoffgranulat war aus dem Werkstoff Polypropylen (PP). Für diesen Werkstoff wurden die Zonentemperaturen am Plastifizierzylinders wie folgt eingestellt:

- Zone 0: 80° C (Einzugszone, wird gekühlt)
- Zone 1: 220° C
- Zone 2: 220° C
- Zone 3: 238° C
- Zone 4: 235° C

Für das Plastifizieren und Einspritzen wurden mit Unterstützung der Reich GmbH folgende Werte einprogrammiert:

Bereich 2:

- Staudruck $p_2 = 0$ bar
- Schneckendrehzahl $n_2 = 100 \text{ U/min}$

Bereich 1:

- o Umschaltpunkt bei $s_1 = 1 \text{ mm}$
- Staudruck $p_1 = 2$ bar $(2 \times 10^5 \text{ Pa})$
- o Schneckendrehzahl $n_1 = 151$ U/min

Der Plastifizierweg für den Bereich 2 wird bei dieser Maschine vor dem Bereich 1 durchfahren. In den ersten Versuchen wurde die Dauer des Einspritzvorganges (Einspritzzeit) von Hand geregelt. Die Einspritzung erfolgte so lange, wie der dafür nötige Schalter betätigt wurde. Um dafür genügend Kunststoff im Plastifizierzylinder (Abbildung 77) bereitzustellen, wurde der Plastifizierweg auf 50 mm eingestellt.

Die Parameter der Schließeinheit wurden wie folgt eingegeben:

- Werkzeugeinbauhöhe = 226 mm
- o Öffnungsweg = 200 mm
- o Schließgeschwindigkeit $v_1 = 100 \text{ mm/s}$
- \circ Umschaltpunkt = 50 mm
- o Schließgeschwindigkeit $v_2 = 10 \text{ mm/s}$
- o Schließkraft F = 500 kN
- o Öffnungsweg $s_1 = 10 \text{ mm}$
- o Öffnungsgeschwindigkeit $v_1 = 10 \text{ mm/s}$
- o Öffnungsweg $s_2 = 100 \text{ mm}$
- o Öffnungsgeschwindigkeit $v_2 = 10 \text{ mm/s}$
- o Öffnungsweg $s_3 = 200 \text{ mm}$
- o Öffnungsgeschwindigkeit $v_3 = 150 \text{ mm/s}$



Abbildung 77: Extruderschnecke (nach Mic00)

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Charakterisierung der Blechlamellen

Im Rahmen des Projektes wurden Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss von Maßtoleranzen und Gestaltabweichungen der Ausgangsbleche auf eine Diffusionsschweißung zu evaluieren.

5.1.1 Werkstoffe

Der Einsatz warmgewalzter Bleche für das Diffusionsschweißen ist aufgrund der ungeeigneten Blechoberfläche (Verschmutzung, Oberflächenqualität) ohne aufwendige Vorbearbeitung nicht möglich. Durch Bürsten oder Strahlen mit Glasperlen kann die Oberfläche des warmgewalzten Werkzeugstahls zwar gereinigt werden, die Oberflächenrauheit wird aber nicht verringert. Für das Diffusionsschweißen sind diese Oberflächen zu rau. Aus diesem Grund wurden kaltgewalzte Folien und präzisionsgeschliffene Bleche für die Versuche und zur Herstellung der Formeinsätze mit konturangepasster, lamellierter Temperierung eingesetzt.

Während für die Herstellung von metallischen Prototypen über das Laserschneiden und Diffusionsschweißen die große Palette der Chrom-Nickel-Stähle in verschiedenen Dicken zur Verfügung steht, ist die Materialauswahl für den Werkzeugbau sehr eingeschränkt. Nicht alle in der Fertigung von Spritzgießwerkzeugen üblichen Stahlsorten sind als präzisionsgeschliffene Platten in Dicken von 1 mm verfügbar.

Die Rautiefe der beim Diffusionsschweißen zu fügenden Oberflächen soll für Stahlbleche im Bereich von $R_t = 1 \dots 8 \mu m$ liegen. Die gemessenen Rauheitskennwerte der für die Formeinsätze verwendeten Bleche und Platten sind in (Tabelle 11) zusammengestellt. Die Messwerte sind von der Walz- bzw. Schleifrichtung abhängig. Für den Werkstoff 1.2344 sind deshalb die Kennwerte Rz und Ra exemplarisch richtungsabhängig angegeben.

Material (vor dem Fügen)	Messwerte					
1.4301 (X5CrNi1810)	R _a	R _q	R _t	Rz		
kaltgewalzt	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]		
Messwerte	0,06 0,16	0,09 0,22	1,0 1,8	0,68 1,34		
1.2344 (X40CrMoV5-1) nassgeschliffen	Messung <i>parallel</i> zur Schleifrichtung		Messung <i>parallel</i> zur Schleifrichtung		Messung se Schleifi	<i>enkrecht</i> zur richtung
	Rz	R _a	Rz	R _a		
	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]		
Messwerte	1,1 ±0,5	$0,16 \pm 0,02$	$1,5\pm 0,1$	0,14 ±0,01		

Tabelle 11:Zusammenstellung von arithmetischen Mittenrauwerten und Rautiefen für verschiedene
eingesetzte Blechmaterialien

5.1.2 Blechlamellen und Mikrokanaleigenschaften

5.1.2.1 Geometrie

Ausgehend von den allgemein üblichen Dickentoleranzen der eingesetzten kaltgewalzten Chrom-Nickel-Stahlbleche und präzisionsgeschliffenen Werkzeugstähle ergeben sich Maßabweichungen der Blechstapel in Stapelrichtung bezogen auf die Lieferdicke der Bleche (DIN EN 10259). Auch bei Kenntnis der mittleren Dicke der verwendeten Blechtafeln ergibt sich durch die Dickenschwankungen über die Fläche einer Blechtafel Schwankungen der Dicke der einzelnen lasergeschnittenen Blechteile. Diese Schwankung der Dicke ist schwer erfassbar. Die Schwankungen gehen durch die Summierung über die Anzahl der Einzelbleche in die Genauigkeit der erzeugten Blechstapel direkt ein. In Tabelle 12 sind die Nenndicke der verwendeten Materialien, die zulässige Liefertoleranz laut Anbieter und die am eingesetzten Blech gemessenen mittleren Dicken zusammengestellt.

	Kaltgewalztes Blech		Präzisionsgeschl. Werk- zeugstahl
Nenndicke (Lieferdicke) [mm]	0,5	1,0	1,0
Zulässige Dickentoleranz [mm]	± 0,045 ± 0,060		+0,050/ -0,000
Dicke des verwend. Mat. (Messwerte) [mm]	$0,477 \pm 0,040 0,958 \pm 0,005$		1,040 ± 0,015
arithm. Mittenrauwert R _a [µm]	0,06 0,16		0,5 1,5
Rautiefe R _t [µm]	1,0 1,8		4 13

Tabelle 12: Dickentoleranzen der eingesetzten Bleche.

Obwohl die Blechtafeln mit 1 mm Sollblechstärke geliefert wurden, ergaben beispielsweise 80 Bleche á 1 mm Sollstärke für den Formeinsatz "Temperierwendel" gestapelt nur 79 mm. Der Grund für die Unterschreitung der vorgesehenen 80 mm liegt in der Blechdickenschwankung.

5.1.2.2 Gratbildung

Bei trennenden Verfahren kann eine Gratbildung nie vollständig ausgeschlossen werden. Ist die messbare Formabweichung im Mikrometerbereich, so wird häufig von gratfrei gesprochen, obwohl noch eine Abweichung der Geometrie von der Sollform vorhanden ist. Diese Formabweichung kann sich negativ auf den Diffusionsschweißprozess auswirken, wenn der Grat auf der Fügeebene liegt. Zur Überprüfung des Einflusses wurde der Grat an geschnittenen Einzellamellen vermessen.

5.1.2.2.1 Gratbildung beim Laserstrahlschneiden

Wie bereits in der Versuchsdurchführung beschrieben, wurden die Schnittversuche auf einer 50 W Laserfeinschneidanlage der Fa. Haas (heute Trumpf) durchgeführt. Beim Schneiden der Proben bildete sich eine Formabweichung im Schnittspalt, der die Mikrostruktur darstellt, aus.

Da eine Vermessung der Gratprofilhöhe bei einer bereits geschweißten Probe nicht möglich ist, wurden fünf Schweißproben mit je sechs Mikrostrukturen auf der Laserschneidanlage geschnitten. Um später den Einfluss des Grates auf die Verbindungsqualität zu beurteilen, sollten bestimmte Grathöhen gezielt eingestellt werden. Es war jedoch nicht möglich einen konstanten Grat über alle Mikrostrukturen einer Folie zu erzeugen, bzw. den Grat über eine Schnittfuge konstant zu halten.

Die Grathöhe hängt stark von der Schnittgeschwindigkeit ab (Fri01, Min96, Pet03, Pie00, Raz95). Das Toleranzband, in dem gratfreie Schnitt erzielt werden können, ist dabei sehr schmal. Eine Über- aber auch Unterschreitung der optimalen Geschwindigkeit führt sofort zu einer deutlichen Verschlechterung des Schnittes. Bei der Verwendung eines 4-fachen Aufweitungsfaktors ("Fokusdurchmesser klein") nimmt die Grathöhe kontinuierlich bis zu einer Geschwindigkeit von 500 mm/min ab. Wird die Schnittgeschwindigkeit weiter erhöht, steigt auch die Grathöhe wieder an. Für einen "großen Fokusdurchmesser" liegt das Minimum der Grathöhe im Geschwindigkeitsbereich um 800 mm/min. Daraus folgt, dass bei einem größeren Durchmesser die Geschwindigkeit höher sein kann, ohne dass es zu einer verstärkten Gratbildung zukommt. Aus diesem Grund wurde für die Grathöhenuntersuchungen der größere Fokusdurchmesser genutzt. Weiterhin wurde der Parameter Ladespannung (440 V) bei dem Schneidversuchen konstant gehalten. Bei einer Pulsdauer von 0,15 ms wurde eine Pulsfrequenz von 350 Hz und damit eine Pulsleistung von 0,95 kW sowie die geringsten Grathöhen erzielt. Eine Defokusierung bzw. eine Veränderung der Pulsleistung führte zu der gewünschten Vergrößerung der Grathöhe. Weitere Einflussfaktoren auf die Schnittqualität wie Schneidgaszusammensetzung (Druckluft) und Schneiddruck (4 x 10⁵ Pa) wurden bei den Versuchen konstant gehalten.

Bei dem entstandenen Grat handelt es sich in der Regel um Anhaftungen, welche sich örtlich an der Folienunterseite festsetzten. Exemplarisch werden einige Schnittspalte mit unterschiedlichen Grathöhenprofilen in Abbildung 78 bis Abbildung 80 dargestellt.



Abbildung 78: Mikrostruktur mit geringern Anhaftungen

Abbildung 79: Mikrostruktur mit mittleren Anhaftung

Bei Abbildung 78 bis Abbildung 80 handelt es sich um Aufnahmen der Folienunterseite im Bereich der Mitte des Schnittspaltes. In den gekennzeichneten Bereichen der Abbildungen sind die lokalen Anhaftungen zu erkennen.



Abbildung 80: Mikrostruktur mit großen Anhaftungen

Nach dem Schneiden der Folien wurden die Grathöhenprofile der einzelnen Mikrostrukturen mittels des Tastschnittgerätes ME 10 vermessen. Die Messungen wurden über die gesamte Länge durchgeführt. Entscheidend ist jedoch der Bereich der späteren Schliffebene, also der Bereich der Mikrostrukturen von 4 bis 6 mm, da die Proben in diesem Bereich geschnitten werden, um den Einfluss der Grathöhe zu bestimmen (Abbildung 81).



Abbildung 81: Bereich der untersuchten Mikrostrukturen (Schnittspalte)

Die Verteilung der Werte der maximalen Grathöhen ist im folgenden Diagramm für die dreißig ausgemessenen Schnitte dargestellt (Abbildung 82):



Abbildung 82: Verteilung der Grathöhenwerte

Im Einzelnen werden exemplarisch Schnitte mit einer geringen (< 10 μ m), mittleren (< 35 μ m) und hohen (< 65 μ m) maximalen Grathöhe ausgewählt und das Gratprofil betrachtet. Die Höhenprofile dieser Schnitte sind über die Länge s im Bereich von 4 bis 6 mm in der Abbildung 83 dargestellt.



Abbildung 83: Grathöhenprofile

Das Profil des Schnittes mit der geringsten maximalen Grathöhe ist durch eine maximale Höhe von 8 μ m und einer geringen Anzahl von Anhaftungen gekennzeichnet. Die Grathöhen der anderen zwei Schnitte sind deutlich größer, ebenso die Anzahl der einzelnen Anhaftungen. Im Vergleich zum Schnitt Grathöhe < 35 μ m, verfügt der Schnitt Grathöhe < 65 μ m über deutlich mehr und größere Anhaftungen. Die Anhaftungen verteilen sich über den betrachteten Schnitt Grathöhe < 65 μ m regelmäßig über die untersuchte Strecke.

5.1.2.2.2 Gratbildung beim funkenerosiven Schneiden

Neben den lasergeschnittenen Folien wurden auch drahterodierte Folien ohne jegliche Nachbearbeitung verschweißt. Bei diesen Proben fanden die Schnitte mit den typischen Parametern für 1.4301, bzw. "Edelstahl" auf der Drahterodieranlage Robofil 240 cc statt. Ein Grat war an den Schnittspalten dieser Schweißproben nicht messbar, jedoch lag eine minimale Formabweichung vor.

5.1.2.3 Abbrand

Neben der Bildung eines Grates trat das Problem des Abbrandes bei den lasergeschnittenen Fugen zur Verifikation des Grateinflusses auf. Dieser Kantenabfall wurde nur an den Schweißproben zur Verifikation des Grates beobachtet. Exemplarisch ist dieses Fehlerbild in den Abbildungen 71 und 72 zu sehen.



Abbildung 84: Probe 2 Mikrostruktur 2 Schliff- Abbildung 85: Probe 2 Mikrostruktur 2 Schliffebene 1 ebene 2

Der Kantenabfall ist deutlich auf den Aufnahmen zu erkennen, die ideale Schnittgeometrie ist in den Aufnahmen durch eine rote Markierung dargestellt. Die Ursache des Kantenabbrands ist die zur Graterzeugung bewusst eingestellte Defokusierung des Laserstrahls. Da eine Defokusierung beim Erzeugen einer optimalen Schweißprobe nicht auftritt wurde der Kantenabfall nicht weiter untersucht.

5.2 Charakterisierung der Diffusionsschweißverbindung

5.2.1 Prozessparameter bedingte fehlerhafte Anbindung

Ausgehend von einer Literaturrecherche nach Prozessparametern für makroskopische Bauteile wurden Schweißversuche mit den aus der Literatur bekannten Standardparametern durchgeführt (Tabelle 13).

Die Standardparameter aus dem Makrobereich sind jedoch nicht auf den Mikrobereich übertragbar. In den Gefügeaufnahmen der Abbildung 86 und Abbildung 87 ist zu erkennen, dass die Schweißung ungenügend ist. Es wurde keine vollflächige Anbindung erzeugt, wie es in den rot gekennzeichneten Bereichen zu sehen ist. Dadurch sind die einzelnen Blech- und Folienlamellen noch deutlich zu erkennen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass keine vollflächige Diffusion stattgefunden hat.

Schweißtemperatur	[°C]	1000
Schweißzeit	[min]	60
Flächenpressung	[N/mm ²]	7

 Tabelle 13: Versuchsprozessparameter der ersten Schweißungen (1.4301)





Abbildung 86: Querschliff eines Mikrokanals,
(Schweißparameter: Tabelle 13)Abbildung 87: Querschliff eines Mikrokanals,
(Schweißparameter: Tabelle 13)

Des Weiteren ist eine Deformation der Mikrokontur in beiden Abbildungen zu erkennen. Die zum Teil durch die ungenügende Schweißverbindung entstanden Spaltmaße im Bereich der Schnittfugen wurden an einigen Beispielen ausgemessen. Exemplarisch sind in der Abbildung 88 und Abbildung 89 die ausgemessenen Spaltmaße dargestellt. Dabei lagen die Spaltmaße maximal bei ca. 14 µm. Dieser Fehler im Schweißergebnis kann zu schwerwiegenden Problemen führen. Wird ein solcher Mikrokanal zum Spritzgießen eingesetzt, so wird der Kunststoff in diese Spalträume gepresst und ein Entformen verhindert. Ebenso wirkt sich dieser Fehler negativ auf den Einsatz in Wärmetauschern (Spaltkorrosion) oder chemischen tapletop-plants (Ablagerung, schlechte Reinigbarkeit) aus.



Abbildung 88: Spaltmaße der fehlerhaften Abbildung 89: Spaltmaße der fehlerhaften Anbindung Anbindung

5.2.2 Untersuchungen zum Prozessfenster für das Diffusionsschweißen

Dass bei einer Skalierung der Bauteile in den Mikrobereich die Prozessparameter des Makrobereichs nicht übertragbar sind, verdeutlichen die Abbildung 86 bis Abbildung 89. Im Mikrobereich treten Effekte in den Vordergrund, die bei makroskopischen Größen zu vernachlässigen sind. Derartige Beispiele sind auch aus der spanenden Bearbeitung bekannt. So wird mit zunehmender Abnahme des Fräserdurchmessers die Abdrängung der Schneiden größer, da der Durchmesser des Werkzeugs quadratisch in das Biegewiderstandsmoment eingeht. Ein ähnliches Phänomen tritt bei der Verschweißung von Mikrostrukturen auf: die Durchbiegung bzw. das Verformen der Lamellen über Hohlräumen.

Um die Durchbiegung und das Fließen des Materials zu verringern, wird mit verminderter Anpresskraft geschweißt und stattdessen die Schweißtemperatur und die Schweißzeit erhöht. Dadurch kann die Deformation des Materials deutlich reduziert werden.

Nach *Kazakov*, dem Erfinder des Diffusionsschweißens, sollte die Schweißtemperatur im Bereich von 53 und 88% der Schmelztemperatur des niedriger schmelzenden Fügepartners liegen. Daneben sind in der Literatur folgende Empfehlungen der Gleichung 1 und Gleichung 2 festgehalten.

$$T_{Schweißen} \le 0, 8 \cdot T_{Schweil}$$
 bzw. Gleichung 1: Schweißtemperatur
 $T_{Re\,akt} \le T_{Schweißen} \le T_{Schweil}$ Gleichung 2: Schweißtemperatur

Der Bindungsvorgang beim Diffusionsschweißen beruht auf der Festkörperdiffusion von Atomen bzw. Ionen. Festkörperdiffusion beschreibt den Vorgang des Platzwechsels im Metallgitter, an Korngrenzen und an der Metalloberfläche. Dieser Vorgang ist temperaturabhängig, je höher die Temperatur des Werkstoffes, desto häufiger sind die Platzwechsel. Die Platzwechsel erfolgen beim Diffusionsschweißen nicht nur im Metallgitter des einen Werkstoffes, sondern auch über die Kontaktflächen verschiedener amorpher oder kristalliner Festkörper hinweg. Der wichtigste und am häufigsten auftretende Mechanismus der Festkörperdiffusion ist der Platzwechsel über Leerstellen. Er erfordert nur eine geringe Aktivierungsenergie und tritt mit zunehmender Temperatur vermehrt auf, da die ohnehin schon hohe Fehlstellendichte in Metallen mit steigender Temperatur zunimmt (Bar00).

Wird ein Werkstoff einer höheren Temperatur ausgesetzt, so verringert sich seine Festigkeit, da diese auch eine Temperaturabhängigkeit aufweist. Ein hoher Schweißdruck führt in der Regel zu fehlerfreien Verbindungen, da so ein vollflächiger Kontakt der Schweißpartner und eine Einebnung des Flächenprofils gewährleistet werden. Ebenso werden bestehende Oxidations- oder Fremdschichten aufgerissen bzw. beseitigt (Ort95). Bei höheren Schweißtemperaturen kann die Flächenpressung gesenkt werden. Die Flächenpressung, bei der ein vollflächiger Kontakt zwischen den Fügestellen entsteht, ist bei höheren Temperaturen niedriger. Wird die Flächenpressung nicht gesenkt, so kommt es zu plastischen Verformungen der einzelnen Lamellen. Durch die Erhöhung der Temperatur wird die Thermodiffusion erhöht. Die Aktivierungsenergie Q ist hierbei die Energie, die erforderlich ist, damit ein Atom seinen Gitterplatz verlassen kann (Abbildung 90). Ein Zwischengitteratom benötigt weniger Energie, um sich zwischen den umgebenden Atomen zu bewegen. Daher sind die Aktivierungsenergien für Diffusion von Zwischengitteratomen kleiner als die für Leerstellendiffusion (wifu). Die Festigkeit der Schweißverbindung ist von der gewählten Schweißtemperatur abhängig (Abbildung 91). Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, das nur geringe Festigkeitsunterschiede auftreten, wenn man die Schweißzeit im Bereich der optimalen Zeit wählt. Ebenso wie die Temperatur hat auch der Druck Einfluss auf die Festigkeit der Schweißverbindung (Abbildung 92).





Abbildung 90: Schematische Darstellung der Aktivierungsenergien [wifu]

Abbildung 91: Einfluss der Schweißtemperatur auf die Zugfestigkeit [Wie78]

Beim Diffusionsschweißen werden zwei unterschiedliche Zeiten angegeben, die Zykluszeit und die Schweiß- bzw. Diffusionszeit. Die Zykluszeit ist die Dauer des gesamten Schweißprozesses. In ihr enthalten sind das Bestücken der Anlage, das Erzeugen der Atmosphäre, das Aufheizen, die eigentliche Schweißzeit und die Abkühlzeit sowie die Werkstückentnahme und das Reinigen der Anlage. Diese Zeit ist abhängig von der Bauteilmasse und den Anlagenparametern wie Evakuierungszeit und Aufheizleistung. Die Schweißzeit verhält sich zu der Zykluszeit wie folgt: $T_{Schw}: T_{Hilf} = 1:1\cdots1:3$. Die Diffusionszeit bestimmt die Dauer der

Diffusionsvorgänge, sie ist abhängig von den zu fügenden Werkstoffen und den gewählten Prozessparametern. Sie beeinflusst ebenso wie Druck und Temperatur die Festigkeit der Verbindung (Abbildung 93). Die Diffusionszeit kann durch eine entsprechende Druck-Temperatur-Kombination gesenkt werden.



Abbildung 92: Einfluss des Schweißdruckes auf die
Zugfestigkeit [Wie78]Abbildung 93: Einfluss der Schweißzeit auf die
Zugfestigkeit [Wie78]

Die Reduzierung der Flächenpressung erfolgte von 7 N/mm², dem empfohlenen Minimum für makroskopische Teile (Kaz85, Ish87, Lis82), auf 6 N/mm², um ca. 15 %. Wird die Anpresskraft verringert, so ändert sich auch die Flächenpressung zwischen den einzelnen Lamellen, gemäß Gleichung 3.

$$p = \frac{F}{A} = \frac{Anpresskraft}{Lamellenfläche}$$

Gleichung 3: Flächenpressung

Des Weiteren wurde eine schrittweise Erhöhung der Temperatur und der Zeit durchgeführt. In Tabelle 14 sind optimierte Prozessparameter angegeben, mit denen eine vollflächige Fügeverbindung erzeugt werden kann.

 Tabelle 14: Prozessparameter (1.4301)

Schweißtemperatur	[°C]	1200
Schweißzeit	[min]	75
Flächenpressung	$[N/mm^2]$	6

Wie in den Abbildung 94 und Abbildung 95 zu erkennen ist, wurde das Schweißergebnis durch diese Parameteranpassung deutlich verbessert. Es sind keine einzelnen Lamellen mehr zu sehen. Dies gilt nicht nur im Bereich der Mikrokanäle (Abbildung 94) sondern auch über den gesamten Querschnitt der Probe (Abbildung 95, die Markierung kennzeichnet einen Mikrokanal).



Abbildung 94: Mikrokanal, geschweißt mit optimierten Parametern (Tabelle 14)

Abbildung 95: Querschliff einer Schweißprobe, die mit optimierten Parametern geschweißt wurde (Tabelle 14)

Der eingesetzte Tantalheizer unterliegt einem temperaturbedingtem Verschleiß, weshalb ein Heizerwechsel zwischen den Versuchen notwendig wurde. Um den Verschleiß des Heizers niedrig zu halten wurde deshalb eine weitere Parameteranpassung durchgeführt. In Tabelle 15 sind die neuen, zusätzlich verschleißoptimierten Prozessparameter zusammengestellt.

Tabelle 15: Prozessparameter (1.4301)

Schweißtemperatur	[°C]	1100
Schweißzeit	[min]	90
Flächenpressung	$[N/mm^2]$	6

Die Schweißtemperatur wurde dabei um 100 °C gesenkt, um den Heizerverschleiß zu reduzieren, da die Belastungen am Heizer expotentiell mit einer Temperaturerhöhung steigen. Als Ausgleich dafür wurde die Schweißzeit um 15 min erhöht. Die Flächenpressung wurde beibehalten.





Abbildung 96: Mikrokanal 6, Schweißparame- Abbildung 97: ter: Tabelle 14

Mikrokanal 6, Schweißparameter: Tabelle 14

Wie in den Abbildung 96 und Abbildung 97 zu erkennen ist, erhält man durch eine Erhöhung der Schweißzeit bei gleichzeitiger Senkung der Schweißtemperatur äquivalente Ergebnisse. Weder im Bereich der Schnittfuge (Abbildung 96) noch über die Breite der Schweißprobe (Abbildung 97) gibt es Anzeichen für eine fehlerhafte Schweißverbindung.

Aus den Erkenntnissen aus den Versuchen, kann die Mindestschweißzeit in Abhängigkeit von der Schweißtemperatur angegeben werden. In Abbildung 98 ist in Diagrammform der annährend lineare Verlauf für das Verschweißen von Mikroteilen bei konstanter Flächenpressung dargestellt. Eine entsprechende Parameterwahl im Bereich oberhalb der eingezeichneten Geraden resultiert in einer vollflächigen Verbindung, wenn mit einer Flächenpressung von 6 N/mm² gefügt wird. Bei einer Änderung der Anpresskraft und damit der Flächenpressung, wird eine erneute Anpassung der Parameter notwendig, bzw. es kommt zu Fehlschweißungen.



Abbildung 98: Temperatur – Zeit – Bereich

Beim Diffusionsschweißen empfiehlt sich nach den Erfahrungen zum Schweißen von makroskopischen Bauteilen eine starke Druckerhöhung bei einer Bauteiltemperatur von ca. 800°C. Durch diese kurzzeitige starke Flächenpressung kommt es zu einem Einglätten der Rauheitsspitzen der einzelnen Lamellenoberflächen und damit zu einem besseren Schweißergebnis. Um den Einfluss dieser Druckerhöhung genauer bestimmen zu können wurden mit Form C Schweißversuche mit folgenden Parametern durchgeführt:

Schweißtemperatur	[°C]	1100
Schweißzeit	[min]	90
Flächenpressung	$[N/mm^2]$	6,0 (teilweise kurzzeitig 24,0)

Tabelle 16: Proz	essparameter (1.4301)
------------------	-----------------------

Ab der Probengeometrie C wurde das Schweißen auch in drei Schritten statt nur in einem durchgeführt. Zunächst wurden dabei die zwei Außenlagen geschweißt, danach die beiden Außenlagen mit der Mittellage verschweißt. Die eine Hälfte einer Probe wurde bei 800 °C mit einer kurzzeitig 4-ach höheren Flächenpressung beaufschlagt und die andere Hälfte ohne Druckerhöhung geschweißt.



Kraft-Zeit-Verlauf Schweißung





Abbildung 99: Kraft- Zeit- und Temperatur-Zeit-Verlauf ohne Druckerhöhung
In Abbildung 99 ist der Kraft-Zeit- sowie der Temperatur-Zeit-Verlauf der Schweißung ohne Druckerhöhung dargestellt.



Kraft-Zeit-Verlauf Schweißung





Abbildung 100: Kraft- Zeit- und Temperatur-Zeit-Verlauf mit Druckerhöhung

In den Temperatur-Zeit-Verläufen sind deutlich die drei Phasen des Schweißzyklus zu erkennen. Zunächst die Aufwärmphase, in welcher ein Aufheizen der Schweißprobe auf Schweißtemperatur erfolgt. Die Aufwärmphase betrug hierbei ca. 85 Minuten und die Probe wurde auf ca. 1100 °C erhitzt. Die Schweißzeit schließt sich an die Aufwärmphase an. Während dieser Phase wird die Temperatur konstant gehalten. Ein Großteil der Diffusionsvorgänge findet während der Schweißzeit statt, welche in diesem Fall 90 Minuten betrug. Die letzte Phase ist die Abkühlphase. Diese erstreckt sich bei diesem Fügeprozess über einen Zeitraum von ca. 125 Minuten.

Die Temperaturschwankungen in der Aufwärm- und Abkühlphase entstehen aufgrund der stufenbehafteten Regelung. Ebenso konnte die Schweißtemperatur während der Schweißzeit in Folge der diskreten Schaltstufen der Temperaturregelung nicht konstant gehalten werden, so dass Temperaturschwankungen von maximal ± 10 K auftraten.

Während der Aufwärmphase und der Schweißzeit sollte der Druck konstant gehalten werden. Da sich die Lamellenfläche der Schweißprobe während des Schweißprozesses nicht ändert, gilt dies auch für die Kraft. Wie man im Kraft-Zeit-Verlauf erkennen kann, ist dies aufgrund der Schaltstufen nur bedingt möglich. Durch die Temperatureinwirkung kommt es zu einem Ausdehnen des Materials und damit zu Kraft-, bzw. Druckspitzen. Um diese zu beseitigen, wird die Anpresskraft beim Aufheizen geregelt. In der Aufwärmphase wurden einige dieser Peaks exemplarisch durch einen Pfeil gekennzeichnet. Eine stufenlose Regulierung der Kraft und damit auch des Druckes ist bei den eingesetzten Diffusionsschweißanlagen noch nicht möglich. In der Abkühlphase wird die Kraft, bzw. der Druck nicht mehr nachgeregelt, daher kommt es zu einem Abfall der Selben.

In den Diagrammen von Abbildung 100 ist der Kraft-Zeit- und der Temperatur-Zeit-Verlauf des Schweißprozesses mit Druckerhöhung aufgetragen. Ebenso wie beim Fügeprozess der Schweißung ohne Druckerhöhung erstreckte sich die Aufwärmphase über ca. 85 Minuten, die Schweißzeit betrug 90 Minuten und die Abkühlphase hatte eine Dauer von ca. 120 Minuten.

Den Unterschied zwischen dem Fügeprozess der Schweißungen kann man in den Kraft-Zeit-Verläufen der Schweißungen erkennen, siehe Abbildung 99 und Abbildung 100. Bei einer Temperatur von 800°C, die ca. 50 Minuten nach Beginn der Aufwärmphase erreicht wurde, wird die Probe mit Druckerhöhung kurzfristig mit einer Kraft von ca. 9,2 kN beaufschlagt. In der Abbildung 101, Abbildung 103 und Abbildung 105 sind Querschliffe der Schweißung

mit Druckerhöhung zu sehen.



Abbildung 101: Schweißung mit Druckerhöhung

Abbildung 102: Schweißung, ohne Druckerhöhung



Abbildung 103: Schweißung mit Druckerhöhung

Abbildung 104: Schweißung ohne Druckerhöhung



Abbildung 105: Schweißung mit Druckerhöhung



Abbildung 106: Schweißung ohne Druckerhöhung

Abbildung 102, Abbildung 104 und Abbildung 106 beinhalten Querschliffe der Schweißungen ohne Druckerhöhung. Die Bereiche der Durchbiegung sind in den Abbildungen jeweils durch Ellipsen gekennzeichnet. Der Einfluss der Druckerhöhung ist in den Aufnahmen von Abbildung 101, Abbildung 103 und Abbildung 105 deutlich zu erkennen. Durch die starke Flächenpressung kommt es, auch wenn sie nur kurzzeitig wirkt, zu einem deutlich stärkeren Verformen des Materials wie es in Abbildung 103 zu sehen ist. Die Verformungsmaße d1 und d2 sind einer Skizze (Abbildung 40) definiert. Das Diagramm (Abbildung 107) beinhaltet die Größe der Verformung, bzw. Durchbiegung mit und ohne Druckerhöhung.

Bei der Schweißung mit Druckerhöhung variieren die Werte der Absenkung deutlich stärker als bei der ohne Druckerhöhung. Des Weiteren sind die gemessenen Absenkungswerte beim Schweißen mit Druckerhöhung um den Faktor 2 größer als beim Schweißen ohne Druckerhöhung. Neben den erhöhten Verformung, bzw. Durchbiegung ist im Bereich der Mikrostruktur der Schweißung mit Druckerhöhung auch eine schlechtere Fügeverbindung zwischen den Lamellen zu erkennen, siehe Abbildung 103. Festzuhalten bleibt, dass beim Schweißen mikrostrukturierter Bauteile mit einer geringen Lamellenanzahl und –höhe von einer Druckerhöhung bei ca. 800 °C abgeraten wird.



Verformung / Durchbiegung mit und ohne Druckerhöhung

Abbildung 107: Deformationsunterschiede der Mikrostrukturen

Für weitergehende Untersuchungen wurde ein Block von 20 unstrukturierten Lamellen mit einer Foliendicken von 0,1 mm geschweißt. Bei diesem Schweißprozess fand ebenfalls keine Druckerhöhung statt. Die Abbildung 108 beinhaltet einen Gefügequerschliff dieser Schweißprobe:



Abbildung 108: Verschweißter Foliensatz Stärke 0,1 mm

Der Bereich der Aufnahme beinhaltet ca. 15 miteinander verschweißte Folien der Stärke 0,1 mm. Es ist keine Fügezone erkennbar, nur ein einheitliches Gefüge. Damit ist bestätigt,

dass das gefundene Parameterfeld im Parameterraum – Zeit, Temperatur und Druck für das Verschweißen dünner Folien genutzt werden kann. Das Paket mit einer Lamellenzahl von 20 Stück und einer Dicke von 0,1 mm wurde auch ohne Drucküberhöhung vollflächig gefügt.

Aus den Versuchen zur Ermittlung des optimalen Prozessfensters für das Diffusionsschweißen von Mikrostrukturen ist festzuhalten, dass dieses sich in der rechten oberen Ecke der Zeit – Temperatur – Ebene im Parameterraum – Zeit, Temperatur und Druck (Abbildung 109) befindet.



Abbildung 109: Prozessfenster für das Fügen von Mikrostrukturen

Die Deformation der einzelnen Lamellen konnte durch die Reduzierung der Flächenpressung, den Verzicht auf eine Druckerhöhung und die Anpassung von Zeit und Temperatur reduziert werden. Für das Verschweißen von Mikrostrukturen ist die immer noch auftretende geringe Verformung jedoch nicht tolerierbar.

5.2.3 Verformung

5.2.3.1 Durchbiegen und Fließen von Material

Neben den Prozessparametern ist die Geometrie der Fügeflächen ein weiterer Einflussfaktor auf das Schweißergebnis. Bestehen zwischen den Flächeninhalten der einzelnen Fügeflächen große Unterschiede so kommt es aufgrund von ungünstigen Druckverläufen zu Fehlstellen in den Verbindungsebenen. Ein Probekörper wurde mit einem großen Flächenunterschied, wie in Abbildung 112 schematisch dargestellt ist, verschweißt. Die ersten 10 Bleche des Körpers waren mit einem 28 mm großen Kernloch versehen. Beim Schweißen erfolgte die Krafteinleitung der Druckstempel über zwei ebene Graphitplatten. Deshalb konnte auf die Lamellen oberhalb der Aussparung keine gleichmäßige Flächenpressung ausgeübt werden. Um die Schweißung untersuchen zu können, wurde aus der Probe der Kern mittels Drahterodierens herausgeschnitten. In Abbildung 110 ist der ausgeschnittene Kern mit einem Durchmesser von 20 mm zu sehen. Der Kraftverlauf schloss sich, wie die metallographische Untersuchung ergab, erst vollständig nach der achten Blechlamelle oberhalb der Aussparung (Abbildung 111). Die dazwischen liegenden Lamellen wurden mangelhaft verschweißt. Diese mangelhaft gefügten Bereiche werden zum unteren Ende hin schmaler. Grund dafür ist der kegelförmige Kraftverlauf, der beim Schweißen mit zunehmender Tiefe vom inneren Rand der Abstufung zur Mitte des Kerns verläuft. An den Diffusionszonen und der Anbindung kann man erkennen, dass die Bereiche der mangelhaften Verbindung (dunkle Streifen) mit zunehmendem Abstand vom Geometrieübergang kleiner werden.



Abbildung 110: Kern und eingebetteter Schliff



Abbildung 111: Diffusionszonenverlauf



Abbildung 112: Probekörper "Flächenunterschied"

Beim Diffusionsschweißen von Mikrostrukturen führen schon geringfügig unterschiedliche Flächenpressungen zwischen den einzelnen Schichten zu fehlerhaften Verbindungen. Die unterschiedlichen Flächenpressungen resultieren weiterhin in Deformationen der Lamellen, welche sich über, bzw. unter dem Mikrokanal befinden. Es kommt zu einem Durchbiegen, bzw. Fließen des Materials der umschließenden Lamellen, wie es in folgender Skizze dargestellt ist (Abbildung 113).



Abbildung 113: Deformation im Bereich des Mikrokanals

5.2.3.2 Berechnung und Simulation der Verformung

Um die Verformung zu verifizieren wurden FEM-Simulationen sowie Schweißversuche durchgeführt. Dabei wurde vor allem die Integration von Ausgleichsflächen in Betracht gezogen, um die vorhandenen Deformationen noch weiter zu verringern.

Die FEM-Simulation erfolgte mit dem FEM-Programm Ansys. Um die Rechenzeit für die FEM – Simulation im angemessenen Rahmen zu halten, wurde durch einige Vereinfachungen in der Geometrie der Zeitaufwand für die Berechnung reduziert.

Zunächst wurde das Modell nicht aus Schichten aufgebaut (Abbildung 114 und Abbildung 115), da eine Modellierung des Kontaktes zwischen den einzelnen Lamellen sowie der Rechenaufwand zu komplex ist. Des Weiteren wurden die im Laufe der Schweißversuche erlangten Erkenntnisse in die Simulation eingearbeitet. Es wurde nicht die komplette Schweißprobengeometrie modelliert, sondern nur der Bereich der Mikrostrukturen (Abbildung 114 und Abbildung 115). Durch die durchgängigen Mikrokanäle und dem Entfernen der Endlagen konnte eine gleichmäßige Vernetzung erzeugt werden.

In Abbildung 114 ist zunächst eine Schweißprobe modelliert, die über eine Mikrostruktur verfügt. Im Vergleich dazu steht Abbildung 115 mit einer modellierten Schweißprobe, in welcher noch zusätzlich Ausgleichsstrukturen eingefügt wurden.



Viewer view base

Abbildung 114: Modell mit einer Mikrostruktur

Abbildung 115: Modell mit zusätzlichen Ausgleichsflächen

Die vernetzten Proben sind in Abbildung 116 und Abbildung 117 zu sehen. Die Knotenpunkte der Ober-, bzw. Unterseite der Modelle wurden bereits mit Kräften, bzw. mit Lagern versehen. Dadurch wurden die Randbedingungen der Analyse festgelegt. Die berechneten Modelle sind in Abbildung 118 und Abbildung 119 zu dargestellt.





Abbildung 116: Vernetzte Probe mit einer Mikrostruktur sowie den Kräften zur Druckerzeugung

Abbildung 117: Vernetzte Probe mit zusätzlichen Ausgleichsflächen sowie den Kräften zur Druckerzeugung



Abbildung 118: Deformation - Probe mit einem Mikrokanal

Abbildung 119: Deformation - Probe mit zusätzlichen Ausgleichsflächen

In Abbildung 118 ist sehr gut eine starke Deformation der Mikrostruktur zu erkennen. In Abbildung 119 ist das mit Ausgleichsflächen berechnete Modell dargestellt. Bei diesem ist die Deformation der Mikrostruktur minimiert im Vergleich zur Probe ohne Ausgleichsflächen. Die geringere Deformation basiert auf der Integration von Ausgleichsflächen, da durch diese in jeder Schweißebene nahezu konstante Flächenpressungen auftreten.

5.2.3.3 Integration von Ausgleichsflächen

Um die Ergebnisse der FEM-Simulation an realen Bauteilen zu verifizieren, wurden Proben mit einer größerer Strukturbreite angefertigt, da der Fehler der Verformung bei größeren Breiten stärker auftritt. Neben den lasergeschnittenen Lamellen wurden auch Strukturen durch Drahterosion hergestellt. Diese Proben sind durch eine höhere Schnittspaltbreite gekennzeichnet. Dies kommt durch den verwendeten Schneiddraht zustande, da dieser über einen Drahtdurchmesser von 250 µm verfügt. Mit diesem Drahtdurchmesser konnten Mikrostrukturen mit der Breite des Schnittspaltes von ca. 320 µm erzeugt werden.

In mehreren Schweißversuchen wurden Mikrostrukturlamellen verschweißt, wobei die Hälfte der Versuche mit integrierten Ausgleichsflächen durchgeführt wurde. In Abbildung 120 bis Abbildung 122 sind vollflächige Fügeverbindungen zu sehen. Nur der Fehler der Durchbiegung beeinträchtigt das sonst positive Schweißergebnis. Der Mittelwerte der Durchbiegung dieser Proben liegt bei 15,6 μ m ±2,7 μ m.



Eine Verringerung der Durchbiegung, bzw. das Fließen des Materials über, bzw. unter der Schnittfuge kann durch eine konstante Flächenpressung erreicht werden. Die Flächenpressung

ist durch Gleichung 3 definiert. Mit der Fläche ändert sich der Druck der auf die einzelnen Lamellen einwirkt bei konstanter Kraft. Da eine Anpassung der Anpresskraft an die Einzellamellen nicht möglich ist, sollte die Fügefläche in jeder Ebene konstant gehalten werden. Dies erfolgt durch die Ausgleichsflächen. Die Lamellen, die im Anschluss über und unter der mit Mikrokonturen versehenen Lamelle liegen, sollten über eine identisch große Fläche verfügen. Auch bei den Schweißproben mit integrierten Ausgleichflächen wurde eine nahezu ideale Fügeverbindung erzeugt, siehe Abbildung 123 bis Abbildung 125. Der Mittelwert der Durchbiegung liegt bei 7,4 µm $\pm 1,2$ µm. Somit kann mit Hilfe der Ausgleichsflächen die Durchbiegung bzw. das Fließen des Materials um über die Hälfte reduziert werden.



Mit den Versuchen konnten die Ergebnisse aus der FEM-Simulation untermauert werden.

5.2.3.4 Schweißstrategie

Die Probengeometrie C mit sieben Lamellen wurde zuerst in nur einem Schweißprozess gefügt. Dabei kam es zu erheblicher Lamellendeformation und fehlerhaften Fügeverbindungen in der Bauteilmitte (Abbildung 126). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die einzelnen Bleche (d = 100 μ m) bei der Krafteinwirkung durchgebogen werden, da sie über ein geringes Biegwiderstandsmoment verfügen. Durch diese Deformation kommt es zu einer Verringerung der Flächepressung zwischen den Lamellen und damit zu einem schlechten Schweißergebnis. Um diese Deformationen beim Schweißen von Proben mit großen Flächenunterschieden zu verringern, wurde eine Schweißstrategie ausgehend von den theoretischen Berechnungen entwickelt.



Abbildung 126: Einstufig geschweißte Probe

Um die in den Experimenten ermittelten Deformationen wissenschaftlich bzw. den Einfluss der Materialdicke auf die Durchbiegung zu untersuchen, werden zuerst die mechanischen Grundlagen zum Problem einer gelagerten und eingespannten Platte beschrieben (Abbildung 127).



Abbildung 127: Rechteckplatte

Die maximalen Spannungen und Durchbiegungen treten bei der Randbedingung "ringsum gelenkig gelagerter Rand" in Plattenmitte auf (Abbildung 127) und können mit den folgenden Gleichungen berechnet werden.

$\sigma_x = \frac{c_1 \cdot p \cdot b^2}{h^2}$	bzw.	$\sigma_y = \frac{c_2 \cdot p \cdot b^2}{h^2}$	Gleichung 4: Spannung
	$f = \frac{c_3 \cdot p \cdot b}{E \cdot h^3}$	$\frac{b^4}{3}$	Gleichung 5: Durchbiegung

 σ_x , σ_y – (maximale) Normalspannung in Plattenmitte

p – Flächenlast,	<i>h</i> – Plattendicke,	<i>b</i> – Länge,
f – Durchbiegung in Plattenmitte	E – Elastizitätsmodul,	c_1, c_2, c_3 – Beiwert

In den Ecken ergeben sich abhebende Einzelkräfte. Bei der Randbedingung "ringsum gelenkig gelagerter Rand" werden diese in Form von Festlagern fixiert (Beiwerte siehe Tabelle 17).

$$F = c_4 \cdot p \cdot b^2$$
 Gleichung 6: Randkraft

Gelenkig gelagerte Platte			Ringsum eingespannte Platte					
a/b	с ₁	c ₂	c3	<i>c</i> ₄	<i>c</i> ₁	¢2	c_3	c5
1,0	1,15	1,15	0,71	0,26	0,53	0,53	0,225	1.24
1,5	1,20	1,95	1,35	0,34	0,48	0,88	0,394	1.82
2,0	1,11	2,44	1,77	0,37	0,31	0,94	0,431	1.92
3,0	0,97	2,85	2,14	0,37	_	-	_	-
4,0	0,92	2,96	2,24	0,38	-	-	-	-
8	0,90	3,00	2,28	0,38	0,30	1,00	0,455	2,00

Tabelle 17: Beiwerte

Neben den Spannungen und Durchbiegungen in Plattenmitte treten maximale Biegespannungen in der Mitte der längeren Seite bei der Randbedingung "ringsum eingespannter Rand" auf:

$$\sigma_y = \frac{c_5 \cdot p \cdot b^2}{h^2}$$
 bzw. $\sigma_x = 0, 3 \cdot \sigma_y$ Gleichung 7: Biegespannung

Abhebende Auflagerkräfte in den Ecken in Form von Einzelkräften treten in diesem Fall nicht auf [Dub02].

Ab der Probengeometrie C befindet sich ein Hohlraum in der Mitte der Probe. Um den Einfluss der Schweißreihenfolge und damit den Einfluss der Dicke der einzelnen Schweißlagen theoretisch zu verifizieren, wurde eine theoretische Berechnung durchgeführt.



Abbildung 128: Durchbiegung

Dabei wurde ein eingespannter Rand angenommen. Die Flächenlast betrug von 6 N/mm². Die Abmessungen waren: 10 x 10 mm² bei einer Dicke von 0,1 mm (Außenlagen noch nicht miteinander verschweißt) und 0,7 mm (Außenlagen miteinander verschweißt). Als E-Modul wurde 210000 N/mm angesetzt. Aus den Abmessungen ergibt sich ein c3 von 0,225. Die berechnete Durchbiegung beträgt bei einer Lamellenstärke von 0,1 mm mehr als das 340fache (0,64 mm) im Vergleich zu der Deformation bei einer Blechstärke von 0,7 mm (0,00187 mm). Bei konstanten Randbedingungen sinkt die theoretische Durchbiegung mit zunehmender Blechstärke, da die Blechstärke in die Durchbiegungsgleichung kubisch eingeht. Daraus ergibt sich eine deutlich geringere Durchbiegung f unter Berücksichtigung der Schweißreihenstrategie, wenn zuerst die oberen und unteren Einzellamellen, miteinander verschweißt (Abbildung 129 und Abbildung 130 -> rote Markierung) werden. Diese verbundenen Lamellenpakete weisen danach eine Stärke von ca. 0,7 mm gegenüber 0,1 mm Stärke der Einzellamellen auf.



Abbildung 129: Schweißprobengeometrie C



Abbildung 130: Schweißprobengeometrie D

Nach dem Verschweißen der Außenlamellen wurden diese mit dem Mittelteil verschweißt. Durch den Einsatz einer zusätzlichen Trennplatte aus Graphit können mit einem Schweißprozess zwei Außenteile auf einmal geschweißt werden, wodurch nur zwei statt drei Schweißprozesse benötigt werden um eine komplette Schweißprobe fertig zu stellen. Die Tabelle 15 beinhaltet die auch für diese Versuche genutzten Schweißprozessparameter.

Wie in der Abbildung 131 und Abbildung 132 zu erkennen ist, wurde das Schweißergebnis deutlich verbessert. Es sind keine Fehler der Fügeverbindung zwischen den einzelnen Lamellen zu erkennen, dies gilt sowohl für den Randbereich als auch im Bereich der Hohlraummitte, siehe Markierungen in Abbildung 131 und Abbildung 132.



Abbildung 131: Randaufnahme bei drei Schwei- Abbildung 132: Aufnahme der mittleren Mikroßungen struktur bei drei Schweißungen

Verschweißt man gemäß der Strategie zunächst die Lamellen mit ähnlichen großen Fügeflächen, dann erreichen diese Pakete eine höhere Stärke. Die Durchbiegung wird verringert, da dass Biegewiderstandmoment von der Materialstärke abhängig ist, und eine vollflächige Verbindung wird erzielt. Der Zusammenhang zwischen Verformung und Plattendicke wird durch die Gleichung 5 beschrieben.

5.2.4 Verbindungsqualität

5.2.4.1 Positionierung

Die Positionierung der Blechlamellen stellt ein weiteres Problem dar. Im Makrobereich werden die Lamellen mit einem entsprechenden Aufmass versehen, da nach dem Fügen eine spanende Nachbearbeitung durchgeführt wird. Beim Fügen von Mikrostrukturen ist eine spanende Nachbearbeitung in den meisten Fällen nicht mehr möglich, sodass die einzelnen Lamellen mit einer ausreichenden Genauigkeit zueinander positioniert werden müssen. Durch eine ungenügend genaue Positionierung der einzelnen Blechlamellen kann es zu einem Versatz der Schnittfugen zueinander kommen. Der Fehler in der Kontur, welcher durch den Versatz a einzelner Lamellen hervorgerufen wird, kann wie folgt aussehen:



Abbildung 133: Versatz der einzelnen Lamellen

Um die Positionierung der einzelnen Blechlamellen zu verbessern, wurden verschiedene Strategien der Positionierung untersucht. Zunächst wurde die Positionierung mittels Präzisionspassstiften untersucht. Hierbei wurden in jede Lamelle der Schweißprobe beim Laserschneiden zwei Löcher in jede Folien geschnitten und diese anschließend aufgerieben. Darüber findet die Positionierung mittels Passstiften statt. Der Versatz wurde mittels digitaler Bildverarbeitung an Mikroskopaufnahmen (Abbildung 134 bis Abbildung 136) gemessen.



Abbildung 134: Messung 1, Positionierung über Zylinderstifte (Versatz: 49,14 μm)



Abbildung 135: Messung 2, Positionierung über Zylinderstifte (Versatz: 63,88 μm)

Abbildung 136: Messung 3, Positionierung über Zylinderstifte (Versatz: 31,94 μm)

Bei der Positionierung mit Hilfe von Präzisionspassstiften kam es zu einem minimalen Fehler von 23 μ m und zu einem maximalen Fehler von 64 μ m. Die mittlere Positioniergenauigkeit beträgt 37,5 ±16,5 μ m.

Neben der Positionierung über Zylinderstifte wurde eine Positionierung und Fixierung der einzelnen Lamellen über Laschen, die nach dem Diffusionsschweißen abgetrennt werden, erprobt. Zum einen soll durch das Positionieren über die Außengeometrie Fläche, die für die Positionierlöcher notwendig ist, eingespart sowie die Passstifte mehrmaliges verwendet werden. Bei der zuerst vorgestellten Variante werden die Passstifte mit dem Bauteil verschweißt. Es wurden es zwei Variationen der Laschenpositionierung untersucht: Positionierungsnuten in x – und in y – Richtung. Über die Laschen an der Probengeometrie D (Abbildung 140, Positionierungsnuten in y - Richtung) findet die Feinpositionierung statt.



Abbildung 137: Lage des Koordinatensystems, Maße in mm

Die Positionierung mittels Laschen erfolgt mit dieser Vorgehensweise:

- Zunächst wird die Probe grob positioniert.
- Danach wird die Probe unter dem Mikroskop über Passstifte fein positioniert, • Abbildung 138 und Abbildung 139.
- Anschließend folgt das Verspannen der Proben in der entsprechenden Aufnahme. •
- Eine weitere Kontrolle schließt sich unter dem Mikroskop an, da es beim Verspannen • der Probe zu einem Verschieben der einzelnen Lamellen kommen kann.
- Wenn die Probe positioniert und verspannt ist, werden die einzelnen Lamellen durch eine Laserpunktschweißung fest miteinander fixiert, so dass ein Verschieben nicht mehr möglich ist.
- Nach diesem Fixieren erfolgt der erste und zweite Fügeprozess der äußeren Lamellenpakete.
- Vor dem abschließenden Fügeprozess der äußeren Lamellenpakete mit der Mittellamelle findet erneut eine Positionierung und Fixierung der äußeren Pakete mit der mittleren Lamelle statt.



Abbildung 138: Positionierung unter dem Mikro- Abbildung 139: Nahaufnahme, Positionierung skop



über Zylinderstifte

In den folgenden Abbildungen ist das Ergebnis der Positionierung mit Laschen in y-Richtung zu sehen:





Abbildung 140: Probengeometrie D

Abbildung 141: Positioniergenauigkeit, Messung 1



Abbildung 142: Positioniergenauigkeit, Messung 2

Abbildung 143: Positioniergenauigkeit, Messung 3

Der Mittelwert des Versatzes beträgt für die Positionierung über y-Laschen 57,7 \pm 4,8 µm. Bei der Schweißprobengeometrie E wurden die Positionierungsnuten in x – Richtung in die Kontur eingebracht (Abbildung 144). Die Vorgehenswiese bei der Positionierung erfolgt in gleicher Weise wie bei der Probengeometrie D.



Abbildung 144: Probengeometrie E



Abbildung 145: Messung 1



Abbildung 146: Messung 2

Abbildung 147: Messung 3

Die Positionierung mittels Laschen in x-Richtung erbrachte das schlechteste Ergebnis der Untersuchung. Bei dieser Positionierung lag die mittlere Abweichung bei 575,9 \pm 5,6 μ m von der Solllage. Vergleicht man x- und y- Laschen-Konturen, so wirkt bei den x-Laschen ein Fehler beim Laserschneiden auf die Positioniergenauigkeit in x-Richtung aus wesentlich stärker aus(Abbildung 148).



Abbildung 148: Geometrieänderung

Es stellte sich, wie man anhand der Abbildung 141 bis Abbildung 143 und Abbildung 145 bis Abbildung 147 erkennen kann, heraus, dass sich durch diese Art der Positionierung nicht die gewünschte Verbesserung erreichen lässt. Dies liegt unter anderem daran, dass das Spannen der Lamellen nicht automatisiert erfolgt.

Es ergeben sich für die verschiedenen Positionierungsmöglichkeiten folgende mittlere Positionsabweichungen:

- Positionierung durch Zylinderstift: $37,5 \pm 16,5 \mu m$
- Positionierung durch Nut in y Richtung: $57,7 \pm 4,8 \ \mu m$
- Positionierung durch Nut in x Richtung: $575,5 \pm 5,6 \mu m$

Aufgrund der entsprechenden mittleren Abweichungen stellt sich als zuverlässigste Positionierung die über entsprechende Präzisionspassstifte heraus. Nachteilig dabei ist jedoch, dass die Passstifte verloren gehen, da sie mit dem Bauteil verschweißt werden. Wendet man die Strategie des mehrstufigen Fügens an, so sind mehr Positionierbohrungen notwendig, da jeweils zwei Stifte eingeschweißt werden.

5.2.4.2 Stufenbildung auf der Oberfläche

Sind die Blechlamellen nicht vollflächig verschweißt, so können durch die Wärmeeinwirkung beim Spritzgießen die Lamellen durch die auftretenden Spannungen sich im Mikrobereich verschieben. Die Abbildung 149 (rote Markierung) beinhaltet den Querschliff eines fehlerhaften diffusionsgeschweißten Bauteils aus dem Werkstoff 1.2510.



Abbildung 149: Schliff des Halbzeuges einer Angussbuchse, Vergrößerung 5x, ohne Ätzung (Wie029

Beim Spritzgießen mit einem unvollständig verschweißten Werkzeug wird die Lamellenstruktur auf dem gespritzten Bauteil sichtbar. Die Abbildung 150 beinhaltet das Oberflächenprofil eines Spritzgießteils. Die Periode des Rillenprofils beträgt 1 mm und entspricht damit der beim Aufbau der Formbuchse verwendeten Blechdicke.

Ein weiterer Einflussfaktor neben der schlechten Fügeverbindung ist nach (Wie02) die großen Lamellenstärken von 1 mm, siehe Pfeilmarkierungen in Abbildung 149.



Abbildung 150: 3D-Oberflächenscan der Außenfläche des Spritzgießteils [Wie02]

Durch eine geringere Lamellenstärke, verbesserte Schweißparameter, die zu einer vollflächigen Verbindung zwischen den Lamellen führen, und eine entsprechende Nacharbeit kann die Stufenbildung reduziert werden. Um den Einfluss der Lamellenstärke zu untersuchen, wurden Probekörpern aus 100 μ m und 1 mm starken Lamellen gefertigt. Zum Fügen dieser Proben wurden die erarbeiteten optimierten Parameter genutzt (Tabelle 15).



Abbildung 151: Nacharbeit der Schweißproben

Nach dem Schweißen der Proben fand ein Nacharbeiten statt. Dieses erfolgte mit unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren. Eine Hälfte der Probe wurde durch funkenerosives Drahtschneiden, die andere Hälfte der Probe wurde durch Fräsen nachgearbeitet (Abbildung 151). In der oberen Hälfte der Abbildung 151 ist die Seitenansicht der Schweißprobenhälfte zu sehen. Wie aus der Skizze zu entnehmen ist, fand die Nacharbeit durch Fräsen unter einem Winkel von 90° statt. Die Nacharbeit durch funkenerosives Drahtschneiden erfolgte unter einem Winkel von 45°, damit ein Einfluss des Winkels zwischen Nachbearbeitungsebene und Lamellenebene ausgeschlossen werden kann.

Da beim Fräsen der linke Rand durch den spanenden Abtrag verloren geht, konnten nur die Fügezonen am rechten und damit drahterodierten Rand metallographisch untersucht werden. Hierfür wurden Schliffbilder der Quer- und Längsseite hergestellt. In den Schliffbildern wurden durch Markierungen am Rand die Bereiche der Fügezonen gekennzeichnet.



Abbildung 152: 0,1 mm Lammellen quer, Rand

Abbildung 153: 1 mm Lamellen quer, Rand

In den Abbildung 152 und Abbildung 153 sind die Schliffbilder der Querseite im Randbereich zu sehen. Aufgrund der Verwendung optimierter Parameter konnte das Schweißergebnis im Vergleich zu Abbildung 149 verbessert werden. Im Bereich der Kanten ist weder bei der Schweißprobe mit 0,1 mm Lamellen noch bei der Schweißprobe mit 1 mm Lamellen eine Stufenbildung zu erkennen. Die Abbildung 154 und Abbildung 155 sind die Schliffbilder der Längsseiten der Schweißproben.



Abbildung 154: 0,1 mm Lamellen längs

Abbildung 155: 1 mm Lamellen längs

Auch hier sind die Fügeverbindungen zufrieden stellend. Nach der entsprechenden Nachbearbeitung wurden eine Rauheitsuntersuchungen an den nachbearbeiteten Schweißprobenoberflächen durchgeführt.

Die Abbildung 156 bis Abbildung 159 stellen das Oberflächenprofil der nachgearbeiteten Schweißprobenoberflächen dar. In den Schaubildern entspricht die Schweißprobenbreite, über die gemessen wurde, der x – Achse und die Dicke der Schweißprobe, über die gemessen wurde, der y – Achse.



Gefäat 0.1 mm

Abbildung 156: Oberflächenprofil drahterodierte Probe, 0,1 mm Lamellenstärke





Abbildung 158: Oberflächenprofil drahterodierteAbbildung 159: Oberflächenprofil gefräste Probe,Probe, 1,0 mm Lamellenstärke1,0 mm Lamellenstärke

An den 3D-Plots der gescannten Oberflächen ist gut zu erkennen, dass beim Drahterodieren keine Textur festzustellen ist. Die Profilhöhen der Proben liegen bei maximal 12 µm (z Achse). Bearbeitet wurde diese Fläche mittels erosivem Drahtschneiden und Fräsen. Die gefräste Probenseite mit einer Lamellenstärke von 0,1 mm zeigt einen deutlichen Kantenanstieg an den Enden der Probenseiten. Dieser Kantenanstieg ist beim Drahterodieren nicht festzustellen, da bei diesem Verfahren keine mechanischen Kräfte auf das Werkstück ausgeübt werden. Die Profilhöhe der gefrästen Probe liegt ebenfalls deutlich unter 10 µm Die Schweißprobe mit einer Lamellenstärke von 1 mm wurde beim funkenerosiven Drahtschneiden durch einen Schlichtschnitt nachgearbeitet, während die 0,1 mm Probe nur mittels Qualitätsdirektschnitt abgetrennt wurde. Das Schlichten bringt den Vorteil einer deutlich geringeren Rauheit mit sich. Die Bearbeitungszeit wird jedoch deutlich erhöht. Die Profilhöhe der geschlichteten Probe liegt bei ca. 5 µm.





Abbildung 160: Oberflächenprofil drahterodierte Abbildung 161: Oberflächenprofil gefräste Probe Probe nach erhöhter Temperatureinwirkung, 0,1 mm Lamellenstärke

nach erhöhter Temperatureinwirkung, 0,1 mm Lamellenstärke

Die gefräste Seite der 1 mm starken Schweißprobe ist wiederum durch eine niedrige mittlere Rauheit gekennzeichnet. An bestimmten Stellen sind jedoch Peaks festzustellen, die bei über 10 µm liegen. Bei keiner der Proben konnte eine Stufenbildung nachgewiesen werden. Um auszuschließen, dass diese "Stufen" sich erst beim Einsatz des Werkzeuges bei höheren Temperaturen ausbilden, wurden die Schweißproben ca. 2 Stunden einer Temperatur von 300 °C ausgesetzt. Danach wurden die Proben in Wasser abgeschreckt und ein weiteres Mal mit dem UBM untersucht. Die Profilhöhen sind in den folgenden 3D – Diagrammen dargestellt.





Abbildung 162: Oberflächenprofil drahterodierte Probe nach erhöhter Temperatureinwirkung, 1,0 mm Lamellenstärke

Abbildung 163: Oberflächenprofil gefräste Probe nach erhöhter Temperatureinwirkung, 1,0 mm Lamellenstärke

Nach dem Erhitzen und Abschrecken kam es zu keiner signifikanten Änderung des Oberflächenprofils, wie in der Abbildung 160 bis Abbildung 163 zu erkennen ist.

Es wurden, unabhängig von der Lamellenstärke, der Nachbearbeitungsart und der anschließenden Beanspruchung, keine Stufen in der Oberfläche gemessen, welche durch die einzelnen Schichten hervorgerufen wurden. Daraus lässt sich folgern, dass durch eine entsprechend angepasste Nacharbeit und die Verwendung optimierter Parameter beim Fügeprozess eine Stufenbildung auch bei Blechstärken von 1 mm verhindert wird.

5.2.4.3 Härtemessung

Die Folien, die für das Diffusionsschweißen genutzt werden, sind kaltgewalzt. Bei warmgewalzten Folien und Blechen sind Zunderreste auf der Oberfläche vorhanden, die eine Diffusionsbarriere darstellen. Nur durch eine aufwendige und kostenintensive Nachbearbeitung kann diese entfernt werden. Durch den Kaltwalzprozess wird das Gefüge des Werkstoffs kaltverfestigt. Auch die verwendeten Folien aus austenitischem Chrom – Nickel – Stahl (X5 CrNi 18-9) weisen ein solches Gefüge auf.



Abbildung 164: Unbehandelte Folie, Über- Abbildung 165: Unbehandelte Folie, Detailaufnahsichtsaufnahme me

Wie in der Detailaufnahme (Abbildung 165) sehr gut zu erkennen ist, weißt der Werkstoff nach einem entsprechenden Ätzen das typische Gefüge eines kaltverfestigten 1.4301 mit den entsprechenden Kornformen auf. Es ist ein texturiertes Gefüge. Um den Vergleich zu einem unbehandelten, bzw. rekristallisierten Gefüge ziehen zu können, wird in der Abbildung 169 ein typisches rekristallisiertes Gefüge eines 1.4301 dargestellt.

Um den Einfluss der Schweißtemperatur auf das Werkstoffgefüge zu ermitteln wurden Blechlamellen während des Schweißens mit in die Arbeitskammer gelegt und danach metallographisch untersucht. Abbildung 166 bis Abbildung 168 beinhalten Gefüge.

Wie in der Abbildung 166 und Abbildung 167 zu erkennen ist, tritt die Rekristallisation zunächst im Randbereich ein, (markierter Bereich). Dies ist durch die entsprechende Wärmezufuhr im Randbereich zu erklären. Bei ausreichender Zeit und Temperatur in der Mitte der Folie setzt auch dort Rekristallisation ein (Abbildung 168, markierter Bereich).



Abbildung 166: Beginnende Rekristallisation im Randbereich

Abbildung 167: Beginnende Rekristallisation im Randbereich



Abbildung 168: Rekristallisation



Abbildung 169: Rekristallisiertes Gefüge



Härtemessung mit Abweichung

Abbildung 170: Härtemessung Ergebnisse

Durch Rekristallisation treten Härteänderungen auf. Aus diesem Grund wurden die Proben verschiedener Versuchsreihen einer entsprechenden Härtemessung unterzogen. Das Ergebnis der Härtemessungen mit HV0,2 ist in Abbildung 170 dargestellt. Wie zu erkennen ist, liegen die einzelnen Härtewerte der unterschiedlichen Schweißproben in derselben Größenordnung. Dieser Bereich, der deutlich unter dem Wert des kaltverfestigten Stahles liegt, beginnt bei ca. 150 HV0,2, der obere Grenzwert liegt bei ca. 210 HV 0,2. Geschweißt wurden alle Proben der Härteermittlung mit den optimierten Prozessparametern. Das kaltverfestigte Gefüge dagegen weißt einen mittleren Härtewert von 465 auf. Durch Rekristallisationsvorgänge beim Diffusionsschweißen fällt die Härte reproduzierbar auf unter die Hälfte des ursprünglichen Wertes ab.

5.2.4.4 Dichtheitsuntersuchungen

Als Anbindungen an die vier Messinganschlüsse des diffusionsgeschweißten Formeinsatzes "Temperierwendel" wurden Kfz-Kraftstoffschläuche mit einem Innendurchmesser von 5,5 mm gewählt. Mit einem Berstdruck von 20 Bar bei 80° C erfüllten sie die gesetzten Anforderungen.



Abbildung 171: Druckprüfung mit Wasser



Abbildung 172: Druckprüfung mit Luft

Um die Qualität der Schweißverbindung und die Belastbarkeit der Schlauchverbindungen zu untersuchen, wurde eine Dichtheitsprüfung mit Wasser sowie mit Druckluft durchgeführt (Abbildung 171 und Abbildung 172). Bei beiden Varianten erfolgte die Prüfung der Temperierkanäle gesondert voneinander. Hierzu wurde jeweils eine Anschlussseite dicht verschraubt und die andere mit einem Luftdruck von 7 x 10^5 Pa bzw. dem Stadtwasseranschluss mit ca. 4×10^5 Pa beaufschlagt. Über einem Zeitraum von jeweils 5 Minuten konnten keinerlei Leckagen festgestellt werden.

5.2.4.5 Grateinfluss

Der durch im Schneidprozess erzeugte Grat tritt an der Unterseite des Schnittspaltes auf. Ein Grat kann mehrere Fehlerbilder erzeugen. Zum einen kann es durch den Grat zu einer fehlerhaften Schweißverbindung kommen, da er den beim Diffusionsschweißen nötigen flächigen Kontakt zwischen den Fügepartnern verhindert. Dadurch kann es zu Hinterschneidungen kommen, die beispielsweise das Entformen von eingespritztem Kunststoff unmöglich macht. Zum anderen kann es bei großen Gratprofilhöhen zu einem Verdrücken des Grates in die Mikrokontur kommen. Die Folgen sind auch hier Hinterschneidungen.

Abbildung 173: Unzureichende Schweißverbindung durch vorhandenen Grat



Abbildung 174: Eingedrückter Grat

Abbildung 175: Eingedrückter Grat (veränderte Tiefenschärfe)

Wie in den gekennzeichneten Bereichen gut zu erkennen ist, hat der Grat (Abbildung 173) einen vollflächigen Kontakt in der Schweißzone verhindert. In Abbildung 174 ist im Bereich innerhalb der Mikrokontur ein leichter Schatten zu erkennen. Verändert man nun die Betrachtungsebene des Mikroskops, so sieht man deutlich den in den Hohlraum eingedrückten Grat (Abbildung 175). Um den Grateinfluss auf das Schweißergebnis zu verifizieren, wurde eine Versuchsreihe mit fünf Schweißproben und je sechs Schnitten durchgeführt. Der Grat wurde ausgemessen und die Werte bereits im Kapitel 5.1.2.2 vorgestellt. Die Schweißung der Proben erfolgte mit den optimierten Prozessparametern (Tabelle 15). Wie in den Schnittspaltaufnahmen (Abbildung 78 bis Abbildung 80) zu erkennen ist, befindet sich an der Unterseite des Schnittspaltes ein Grat in Form von lokalen Anhaftungen. Es handelt sich dabei um unvollständig ausgetriebene Schmelze beim Laserschneidprozess. Es wurden je Schnittspalt zwei metallographische Schliffe angefertigt.

In Abbildung 176 ist das Sollprofil eingezeichnet. Die Abweichungen zum Sollprofil kommen durch die Prozessführung zur bewussten Erzeugung eines Grates zustande. Der Grat wurde beispielsweise durch eine Defokusierung des Lasers erzielt, wodurch es zu auch einem Abbrand der Kanten kam. Die Schweißung mit der Versuchsprobe < 10 μ m lässt in keiner Schliffebene einen Einfluss des Grates erkennen, die Verbindung ist nahezu optimal (Abbildung 176).



Abbildung 176: Schliffebene 1, Grathöhe < 10 µm



Abbildung 177: Schliffebene 1, Grathöhe < 35 µm



Abbildung 178: Schliffebene 2, Grathöhe < 65 µm



Abbildung 179: Schliffebene 2, Grathöhe < 35 µm

Bei einer maximalen Grathöhe von ca. 35 μ m, hat der Grat bereits einen deutlichen Einfluss auf das Schweißergebnis, wie in Abbildung 177 zu erkennen ist. Wie im Grathöhenprofil zu erkennen ist, sind an diesem Schnittspalt (Grathöhe < 65 μ m) viele Anhaftungen vorhanden, welche wiederum in den Schliffen in Abbildung 178 zu sehen sind. Daher sind in den Schliffebenen auch Grateinflüsse auf das Schweißergebnis zu erkennen.

In der folgenden Tabelle 18 werden die maximalen Grathöhen den nach dem Schweißen vorhandenen Spaltmaßen gegenübergestellt:

Maximale	Schliffebene 1		Schliffebene 2	
Grathöhe	Linke Seite	Rechte Seite	Linke Seite	Rechte Seite
$< 10 \ \mu m$	0 μm	0 µm	0 µm	0 µm
$< 35 \ \mu m$	0 µm	0 µm	0 µm	17 µm
$< 65 \ \mu m$	21 µm	19 µm	12 µm	25 µm

Tabelle 18: Gegenüberstellung Grathöhe und Spaltbreite

Neben dem Fehler der ungenügenden Schweißverbindung und den dadurch entstehenden Spalten trat noch ein zweiter Fehler auf. Das Eindrücken des Grates in den Mikrokanal, wie in folgenden Abbildungen festzustellen ist.



Abbildung 180: Schliffebene 1, Grathöhe < 40 µm Abbildung 181: Schliffebene 1, Grathöhe < 40 µm mit veränderter Tiefenschärfe

In Abbildung 180 ist der eingedrückte Grat nicht deutlich zu erkennen, daher wurde in Abbildung 181 die Tiefenschärfe und die Belichtungszeit verändert, so dass nun der in den Hohlraum eingedrückte Grat zu erkennen ist. Bei dieser Schweißprobe handelt es sich um eine Schnittprobe mit einer maximalen Grathöhe von ca. 40 µm.

Die maximale Grathöhe, bei der noch eine vollflächige Verscheißung der Lamellen erzielt wurde, lag bei 10 µm. Da es sich hierbei um den Grenzbereich für eine vollflächige Verschweißung handelt, sollte beim Laserschneiden der entstehende deutlich unter den genannten 10 µm liegen um jegliche Fehlschweißung auszuschließen.

Neben den lasergeschnittenen Proben wurden auch drahterodierte Schweißproben untersucht um den Einfluss des Grates bei normalen Standartparametern für 1.4301 der Robofil 240 cc zu verifizieren. Die Prozessparameter beim Schweißen der drahterodierten Probe sind identisch mit den Schweißparametern der lasergeschnittenen Proben (Tabelle 15). Das Ergebnis wird exemplarisch an einem Schnittspalt durch ein Schliffbild in Abbildung 182 dargestellt. Die abgebildete Schweißprobe wurde nicht mit der vorgestellten Schweißstrategie gefügt, weshalb eine Verformung zu erkennen ist.



Abbildung 182: Schnittspalt drahterodierte Schweißprobe

Wie in der Aufnahme zu erkennen ist, handelt es sich um eine ideale Schweißung trotz vorhandener Formabweichung (Grat). Der Grateinfluss auf die Schweißung kann deshalb bei drahterodierten Proben unter Verwendung der Standartparameter vernachlässigt werden.

5.3 Spritzgießwerkzeug

Mit den gefertigten Formeinsätzen wurden verschiedene Tests durchgeführt. Zum einen ist das Temperierverhalten der Einsätze von großem industriellem Interesse, zum anderen wurden Praxistests in einer Spritzgießmaschine durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Experimente flossen in die Konstruktion der Werkzeugrohlinge für PbA-Mitglieder mit ein.

5.3.1 Temperierverhalten

Unter wirtschaftlichen Gesichtpunkten sind bei der thermischen Auslegung eines variothermen Spritzgießwerkzeuges vor allem hohe Aufheiz- und Abkühlraten das Ziel einer Prozessoptimierung. Dadurch kann die Zykluszeit verkürzt und die Produktivität gesteigert werden. Hohe Durchflussraten der Temperiermedien begünstigen eine schnelle Temperaturänderung in der Form. In der Abbildung 183 und Abbildung 184 sind zeitliche Verläufe der Werkzeugtemperatur dargestellt. Aufgrund der größeren Temperaturdifferenzen bei einer variothermen Prozessführung, wird die Zykluszeit t_z vergrößert. Beim Mikrospritzguss ist in den meisten Fällen diese zeitaufwendigere Prozessführung jedoch notwendig. Durch eine Konturanpassung der Temperierstrukturen kann wiederum eine Verkürzung der Zykluszeit erreicht werden.

Für Mikrobauteile und Bauteile mit hohen Genauigkeitsanforderungen ist jedoch die Temperaturverteilung die Größe, welche im Mittelpunkt der Optimierung steht. Die optischen Eigenschaften einer spritzgegossenen Mikrolinse hängen sehr stark von der Temperaturverteilung und dem Temperaturgradienten innerhalb des Bauteils beim Abkühlen ab. Aus diesem Grund ist die Geometrie der Temperierkanäle von großer Bedeutung.



5.3.1.1 Durchflussmengen

Zur Temperierung von Formeinsätzen sind zahlreiche Geräte auf dem Markt erhältlich. Für die durchgeführten Versuche war es ausreichend, das Temperiermedium mittels einer Pumpe durch die Kreisläufe zu befördern. Die Nennleistung der verwendeten Pumpe beträgt 1300 l/h und der maximale Förderdruck $1,5 \times 10^5$ Pa.

Die Versuche der Durchflussmessung dienten zur Bestimmung der erreichbaren Volumenströme bei verschiedenen Temperierstrategien und -variationen.

Neben dem Einfluss der Strömungslängen auf die Strömungsgeschwindigkeit, beeinflusst auch der Strömungsquerschnitt die Strömungsgeschwindigkeit bzw. den Volumenstrom. Dies geht aus Gleichung 8 hervor, bei der v die Strömungsgeschwindigkeit und A den Strömungsquerschnitt darstellt.

•
$$V = v \cdot A$$
 Gleichung 8: Volumenstrom

Es wurden unterschiedliche Versuchsanordnungen betrachtet, wobei sich die Formeinsätze bzw. der Mikrowärmetauscher in allen Fällen im ausgebauten Zustand befanden. Dies war notwendig, um auch die örtliche Temperaturverteilung mittels Thermokamera erfassen zu können.

Mit dem zweikanaligen Versuchseinsatz wurden zwei Versuchsanordnungen untersucht. Bei der einen Anordnung wurde das kalte bzw. heiße Temperiermedium in verschiedenen geschlossenen Kreisläufen gefördert. In der anderen Versuchsanordnung wurde der Zulauf des Kühlkreises direkt mit dem Stadtwasseranschluss verbunden und nur der Heizkreislauf mit der Pumpe betrieben.

Versuchsanordnung: Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel"

Diese Anordnung findet Verwendung, wenn die Temperierung vollständig mit Hilfe von Temperiergeräten betrieben wird. Dabei wird wahlweise warmes oder kaltes Wasser durch den Formeinsatz gepumpt, wofür beide Temperierwendeln in Serie geschaltet sind.

Die Pumpe saugt über einen ¹/₂-Zoll-Schlauch Wasser an und pumpt es über einen identischen Schlauch zum Anschlussschlauch des Formeinsatzes. Die Temperierwendeln des Formeinsatzes wurden dabei in Reihe geschaltet, wodurch sich die Fließstrecke des Temperiermediums verlängert. Die Länge der Temperierwendel berechnet sich anhand der Gleichung 9. Die Grundlage der Berechnung ist die Abwicklung der Schraubenlinie, welche eine geneigte Ebene ergibt.

$$P = \pi \cdot d \cdot \tan \alpha$$
 Gleichung 9: Steigung einer Schraubenlinienabwicklung

Gleichung 10 gibt die Windungslänge einer Wendelumdrehung an.

$$x = \sqrt{P^2 + (\pi^2 \cdot d^2)}$$
 Gleichung 10: Windungslänge einer Windung

Bei einer bekannten Steigung von P = 12.22, einem Windungsdurchmesser von d = 30 mm und 4,5 Windungen ergibt sich folgende Länge für eine Wendel:

Die geradlinig verlaufenden Temperierkanäle im Formeinsatz ergeben aufaddiert folgende Länge:

Bei in Reihe geschalteten Temperierwendeln ergibt sich somit eine Strömungslänge im Formeinsatz von:

Strömungslänge im
$$FE = 1073,34$$
 mm

Die Gesamtströmungslänge setzt sich aus den ½-Zoll-Schläuchen, der Strömungslänge im Formeinsatz sowie aus den Anschlussschläuchen am Formeinsatz zusammen. Die Längen der Schlaucholiven werden hierbei vernachlässigt. In Tabelle 19 werden die Strömungslängen zur Gesamtlänge aufsummiert.

Gegenstand	Länge [mm]	Durchmesser [mm]	Funktion
1/2-Zoll-Schlauch	680	13,5	Ansaugschlauch
1/2-Zoll-Schlauch	1700	13,5	Druckschlauch der Pumpe
Anaschlussschlauch	2000	5,5	Zu- und Ablauf am FE, Schaltung der Wendeln in Reihe
Kanallänge im FE "Temperierwendel"	1073,34	3	
Gesamtlänge	5453,34		

Tabelle 19: Strömungslängen für Versuchsanordnung Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel"

Während eines ersten Versuchs wurde die reine Pumpenleistung mit den zwei ½-Zoll-Schläuchen ermittelt. Gemittelt ergaben sich 1089 l/h als maximale Förderleistung, was 83% der Nennleistung entspricht.

In einem zweiten Versuch wurde der mit der Versuchsanordnung Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel" erreichbare Volumenstrom ermittelt. Die Durchflussmenge lag bei 43 l/h.

Pumpenmaximalleistung mit 1/2-Zoll-Schläuchen: 1089 l/h

Durchflussmenge für Versuchsanordnung Reihenschaltung Formeinsatz "Temperierwendel": 43 l/h

Versuchsanordnung: Parallelbetrieb Formeinsatz "Temperierwendel"

In einer weiteren Versuchsanordnung wurden die beiden Temperierkreisläufe getrennt voneinander betrieben. Zum Kühlen wurde eine Wendel mit dem Stadtwasseranschluss, welcher den in der Industrie üblichen Zentralkühlkreislauf nachbildet, verbunden und zum Heizen wird der zweite Kreislauf mit der Pumpe betrieben. Das heiße Wasser wurde wie bereits in der ersten Versuchsanordnung aus einem Vorratsbehälter angesaugt. Durch die, im Unterschied zur Anordnung Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel", nicht gemeinsam genutzten Wendeln reduziert sich die jeweilige Gesamtströmungslänge der Kreisläufe. Die Schlauch- bzw. Strömungslängen werden in Tabelle 20 und Tabelle 21 aufaddiert.

Gegenstand	Länge [mm]	Durchmesser]mm]	Funktion
1/2-Zoll-Schlauch	680	13,5	Ansaugschlauch
1/2-Zoll-Schlauch	1700	13,5	Druckschlauch der Pumpe
Anschlussschlauch	1000	5,5	Zu- und Ablauf am FE
Kanallänge im FE "Temperierwendel"	536,67	3	
Gesamtlänge	3916,67		

Tabelle 20: Strömungslängen für Parallelbetrieb Formeinsatz "Temperierwendel" - Heizen

Tabelle 21: Strömungslängen	für Parallelbetrieb	Formeinsatz "7	Femperierwendel"	- Kühlen
-----------------------------	---------------------	----------------	-------------------------	----------

Gegenstand	Länge]mm]	Durchmesser]mm]	Funktion
1/2-Zoll-Schlauch	1000	13,5	Ansaugschlauch
1/2-Zoll-Schlauch	1500	13,5	Druckschlauch der Pumpe
Anschlussschlauch	1000	5,5	Zu- und Ablauf am FE
Kanallänge im FE			
"Temperierwendel"	536,67	3	
Gesamtlänge	4036,67		

Durch die verminderten Strömungsverluste aufgrund kürzerer Strömungslängen wurde beim Heizkreislauf ein Volumenstrom von 67,5 l/h gemessen. Die Durchflussmenge verbesserte sich im Vergleich zu Versuchsanordnung Serienschaltung.

Eine wesentlich höhere Durchflussmenge war im Kühlkanal zu erwarten, da der Stadtwasseranschluss ca. 2,5 m³/h im Leerlauf liefert. Mit 109 l/h fällt die am Kühlkanal ermittelte Durchflussmenge etwas höher aus.

Durchflussmenge für Versuchsanordnung Parallelbetrieb Formeinsatz "Temperierwendel" (Heizen): 67,5 l/h

Durchflussmenge für Versuchsanordnung Parallelbetrieb Formeinsatz "Temperierwendel" (Kühlen): 109 l/h

Das Strömungsverhalten und damit der Durchfluss wird neben dem Strömungsquerschnitt hauptsächlich von der Strömungslänge beeinflusst. Je länger das zu durchströmende System ist, umso größer sind die Druckverluste im System. Die typischen Betriebsdrücke liegen zwischen $6,0-8,0 \ge 10^5$ Pa. Beträgt der Druckverlust aufgrund der Temperierlänge bis zu $6,0 \ge 10^5$ Pa, so ist der Durchfluss minimal. Aus diesem Grund ist die Versuchsanordnung Parallelbetrieb Formeinsatz "Temperierwendel" für eine schnelle Temperierung günstiger. Durch eine Verringerung der Schlauchlängen könnte die Durchflussmenge weiter gesteigert werden. Die Temperierlängen wurden jedoch im Bereich von 2,0-6,0 m gewählt. Dieser Längenbereich deckt weitgehend die realen Längen, die in der Industrie eingesetzt werden, ab.

Neben der Verringerung der Fließlänge führt auch eine Vergrößerung der Querschnittsfläche zu einer Erhöhung der Durchflussmenge. Dies wurde beim Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" in der Konstruktion berücksichtigt. Aufgrund des begrenzten Bauraums konnte in diesem Fall nur eine einkanalige Lösung integriert werden.

Versuchsanordnung: Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur"



400cm 9 400cm 9 400cm 9 10cm 10 cm 10 cm

Abbildung 185: Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur"

Abbildung 186: Versuchsanordnung für die Durchflussmengenermittlung Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur"

Aufgrund der geringen Durchflussmengen des Formeinsatzes "Temperierwendel" wurden beim Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" 30 parallel geschaltete Mikrokanäle integriert (Abbildung 48), wodurch der effektive Gesamtströmungsquerschnitt erhöht wird. Durch die gewählte Anordnung weist das Werkzeug die erforderliche Festigkeit auf, welche beim Einbau von nur ein oder zwei Temperierstrukturen nicht gewährleistet ist. Der Anschluss des Formeinsatzes an die Medienversorgung sowie die Leitungslängen sind in Abbildung 185 und Abbildung 186 dargestellt

Insgesamt geben die verwendeten Leitungslängen den industrietypischen Bereich von 4 bis 6 m wieder. Der Durchmesser der Zu- und Ableitung beträgt ½ ". Der ermittelte Durchfluss für das Aufheizen ist 350 l/h, für das Abkühlen 600 l/h. Die Differenz ist auf die unterschiedliche Drücke im Heiz- bzw. Kühlkreislauf zurückzuführen.

Versuchsanordnung: Mikrowärmetauscher

Die Durchflussmenge wurde auch für den Mikrowärmetauscher bestimmt. Dazu wurde in die vorhandenen Bohrungen eine Hohlschraube aus einem nicht korrosionsbeständigen Werkstoff eingebaut und daran die Zuflussleitung befestigt.



Abbildung 187: Durchflussmengen Mikrowärmetauscher.

Um eine Aussage über das Ablagerungsverhalten in den Mikrokanälen treffen zu können, wurde ein 96 Stunden Test durchgeführt. Die dabei ermittelten Durchflussmengen sind in Abbildung 187 in Diagrammform dargestellt. Zusätzlich ist auch der maximale Durchfluss ohne Mikrowärmetauscher angegeben. Während des Dauerversuches kam es nicht zu einer Verringerung der Durchflussmenge. Die im Diagramm dargestellten Werte sind die Mittelwerte der Messungen sowie die Standardabweichung.

Nach dem Dauerversuch wurde der Mikrowärmetauscher aufgeschnitten und auf Ablagerungen hin untersucht. Im Bereich der Anschlussschrauben, die aus nicht korrosionsbeständigem Material waren, kam es zu Ablagerungen und Oxidation. In den Kanälen selbst wurden keine Ablagerungen gefunden.

In der Tabelle 22 sind die Durchflussmengen des Formeinsatzes "Temperierwendel" und "Wärmetauscherstruktur" sowie des Mikrowärmetauschers gegenübergestellt. Gegenüber dem Formeinsatz "Temperierwendel" wurde durch die Vergrößerung des Anschlussdurchmessers

und die Parallelschaltung von Mikrokanälen beim Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" die Durchflussmenge im Schnitt auf das 6-fache erhöht. Für den Mikrowärmetauscher kann die Durchflussmenge noch gesteigert werden, wenn auch die Anschlüsse in der Strömungsrichtung der Mikrokanäle liegen. Durch die Umlenkung wird dem Temperiermedium ein großer Strömungswiderstand entgegengestellt.



Abbildung 188: Aufgeschnittener Mikrowärmetauscher nach 96 Stunden Durchflusstest

Tabelle 22: Durchflussmenge der verschiedenen Bauformer

Formeinsatz "Temperierwendel"	Mikrowärmetauscher	Formeinsatz "Wärmetau-
		scherstruktur"
	Zufluss Abfluss	
Anschluss-Ø: 3 mm	Anschluss-Ø: 2 mm	Anschluss-Ø: 6 mm
Stadtwasser 109 l/h (Kühlen)	Durchfluss: 14 l/h	Stadtwasser 600 l/h (Kühlen)
Pumpenbetrieb 68 l/h (Heizen)		Pumpenbetrieb 350 l/h (Heizen)
Bei der Konstruktion des Formeinsatzes "FKT" wurde versucht, zum einen die Fließlänge so kurz wie möglich zu halten und zum anderen den Querschnitt zu vergrößern. Nur im Bereich der Werkzeugwand kommt ein kleiner Querschnitt von ca. 1 x 2 mm² zum Einsatz, da der Bauraum einen größeren Querschnitt nicht zulässt.

5.3.1.2 Abkühl- und Aufheizraten

Die Temperaturmessung an den Formeinsätzen erfolgte an beiden Versuchsanordnungen für den Formeinsatz "Temperierwendel" und am Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur". Die Betrachtung des Formeinsatzes "Temperierwendel" mit der Thermokamera wurde nur an der Versuchsanordnung Parallelbetrieb durchgeführt.

Das Antriebspotential von Wärmeübertragungsvorgängen ist das Temperaturgefälle. Dies kann aus Gleichung 11 abgeleitet werden. Je größer das Temperaturgefälle zwischen Formeinsatz und Temperiermedium ist, desto größer ist auch der Wärmestrom. Dieser wird als Maß für die Wärmeübertragung gewertet.

$$\dot{Q} = c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt}$$
 $\dot{Q} = \left[\frac{J}{s}\right] = [W]$ Gleichung 11: Wärmestrom

Bei fluidischer Werkzeugtemperierung befinden sich im Werkzeug Kanäle, die an ein Kreislaufsystem angeschlossen sind. Die Wärmeübertragung erfolgt dabei zum einen durch Konvektion zwischen Fluid und Kanalwand und zum anderen durch Wärmeleitung im Werkzeug zur Kavitätswand. Anhand der Abbildung 189 werden die Wärmeübertragungsvorgänge erläutert.



Abbildung 189: Wärmeübertragung im Werkzeug (Sch01)

Der heißeste Ort liegt im Zentrum des Temperierkanals. Je größer der Abstand von der Kanalmitte wird, desto niedriger wird die Temperatur. Der konvektive Wärmeübergang wird durch den Wärmeübergangskoeffizienten α zwischen dem Metall des Werkzeuges und der Flüssigkeit bestimmt. Für die Wärmeleitung ist die Wärmeleitfähigkeit λ des Werkzeugmaterials und die Länge der Wärmeleitung ausschlaggebend. Der Abkühlvorgang bei variothermer Prozessführung läuft entgegengesetzt von der Kavitätswand zum Fluid ab, wobei das Zentrum des Temperierkanals eine Wärmesenke darstellt.

Der konvektive Wärmeübergang berechnet sich mit Gleichung 12 und der Wärmeübergang durch Leitung mit Gleichung 13.

$$q_{Konv} = \alpha \cdot \Delta \mathcal{G}_2$$
 Gleichung 12: Konvektion
 $\dot{q}_{WL} = \frac{\lambda}{l} \cdot \Delta \mathcal{G}_1$ Gleichung 13: Wärmeleitung

Zur Betrachtung der Wärmeströme des Werkzeuges in seiner Umgebung dient die dargestellte Grafik in Abbildung 190.



Abbildung 190: Wärmeströme an einem Spritzgusswerkzeug (Wal02)

Im quasistationären Betrieb ergibt sich für die Wärmebilanz folgende Gleichung 14:

$$\dot{Q}_{Pol} + \dot{Q}_{Zus} + \dot{Q}_{Konv} + \dot{Q}_{Stra} + \dot{Q}_{Leit} + \dot{Q}_{Flu} = 0$$
 Gleichung 14: Wärmestrombilanz

Die Wärmemenge der Schmelze \dot{Q}_{Pol} und die zusätzlich eingebrachte Wärme \dot{Q}_{Zus} , wie zum Beispiel durch ein Heißkanalsystem, werden dem Werkzeug zugeführt und sind positiv zu zählen. Aufgrund der Wärmeabgabe an die Umgebung durch Konvektion und Strahlung, und der Wärmeleitung in die Aufspannplatten und das Maschinebett sind \dot{Q}_{Konv} , \dot{Q}_{Stra} und \dot{Q}_{Leit} negativ. Bei reiner Flüssigkeitstemperierung wird, je nach dem ob es sich um die Kühloder Heizphase handelt, durch \dot{Q}_{Flu} Wärme ab- oder zugeführt. Bei anderen Heizmethoden wird die eingebrachte Wärme mit unter \dot{Q}_{Zus} zusammengefasst und \dot{Q}_{Flu} bezeichnet nur die abgeführte Wärmemenge durch die Flüssigkeitskühlung. Zur Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung muss der Wärmeinhalt der Polymerschmelze bekannt sein. \dot{Q}_{Pol} lässt sich aus der massebezogenen Enthalpiedifferenz Δh_E zwischen der eingespritzten Kunststoffschmelze und dem später erstarrten Spritzling berechnen (Gleichung 15). Zusätzlich benötigt werden die Zykluszeit und die Masse der Schmelze.

$$\dot{Q}_{Pol} = \frac{\Delta h_E \cdot \rho_{Pol} \cdot V}{t_Z}$$
 Gleichung 15: Wärmeinhalt der Kunststoffschmelze (Wal02)

Außerdem ist zur Bestimmung der Kühlleistung die abzuführende Wärme aus dem Formeinsatz nötigt. Diese berechnet sich, unter Einbeziehung der Masse des Formeinsatzes, der spezifischen Wärmekapazität c_p des Werkstoffes und der Temperaturdifferenz die überwunden werden soll, nach Gleichung 16.

$$Q_{WZ} = V \cdot \rho_{WZ} \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta$$
 Gleichung 16: Abzuführende Wärme aus Formeinsatz

Aus dieser Wärmemenge kann mit Gleichung 17 die nötige Kühlleistung P_{kiihl} für den Formeinsatz bestimmt werden.

$$P_{k\ddot{u}hl} = \frac{Q_{WZ}}{t_{k\ddot{u}hl} \cdot \eta} \qquad \eta \dots \text{ Wirkungsgrad} \qquad \text{Gleichung 17: K\"uhlleistung}$$

Die Gesamtkühlleistung, die benötigt wird, um die dem Formeinsatz zugeführte Wärmemenge zu entziehen und ihn auf Entformungstemperatur abzukühlen berechnet sich anhand von Gleichung 18.

$$P_{kilhl_{ges}} = \frac{Q_{Pol} + Q_{WZ}}{t_{kilhl} \cdot \eta}$$
 Gleichung 18: Gesamtkühlleistung

Analog zu Gleichung 14 und 15 wird auch die Heizleistung berechnet, welche benötigt wird, um den Formeinsatz in einer bestimmten Zeit auf die für das Einspritzen notwendige Temperatur zu bringen.

Kühlzeitberechnung

Die Kühlzeit beim Spritzgießen beginnt mit dem Einspritzen und endet mit dem Öffnen des Werkzeuges. Sobald die heiße Schmelze die Werkzeugwand berührt, gibt sie an der Kontaktstelle Wärme ab. Wenn das Werkzeug geöffnet wird, verliert der Spritzling den Kontakt zum Werkzeug und die Kühlung wird damit beendet.

Zur näherungsweisen Berechnung der Kühlzeit eignet sich die vereinfachte und idealisierte Kühlzeitgleichung (Gleichung 19).

$$t_{k\bar{u}hl} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\mathcal{G}_M - \overline{\mathcal{G}}_W}{\hat{\mathcal{G}}_E - \overline{\mathcal{G}}_W} \right)$$

Gleichung 19: Kühlzeitgleichung (wbay)

- a_{eff} ... effektive Temperaturleitfähigkeit (Stoffwert der Formmasse, der abhängig von der Werkzeugwandtemperatur aus Tabellen entnommen wird)
- *s* ... Dicke des Formteils
- \mathcal{G}_{M} ... Massetemperatur nach Ende der Füllphase
- $\overline{\mathcal{G}}_{W}$... mittlere Werkzeugwandtemperatur
- $\hat{\mathcal{G}}_{E}$... Entformungstemperatur in der Formteilmitte

Es wurden zu beiden Versuchsanordnungen des Formeinsatzes "Temperierwendel" mehrere Temperierversuche durchgeführt. Die Darstellung der dabei aufgenommenen Werte erfolgte anhand von Temperatur-Zeit-Diagrammen.

Die Temperaturen des Temperiermediums unterschieden sich bei den Versuchen. Sie sind deshalb dem jeweiligen Diagramm zu entnehmen.

Versuchsanordnung: Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel"

Im ersten Experiment zur Versuchsanordnung Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel" wurden die Temperierkanäle entlüftet. Hierfür wurde durch den auf Raumtemperatur befindlichen Formeinsatz Wasser gepumpt.



Abbildung 191: Versuchsanordnung Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel" – Kühlen

Das Temperaturdiagramm hierzu ist in Abbildung 191 dargestellt. Der Temperaturabfall der Kurve M5 gibt an, wann erstmals Wasser aus dem Kreislauf austritt und die im System vorhandene Luft verdrängt wurde.

Im nächsten Schritt wurde der Formeinsatz über die Kanäle beheizt. Das Diagramm in Abbildung 192 zeigt den Verlauf der Aufheizkurve. Das Medium im Heizkreislauf verliert an Wärme infolge Konvektion und Wärmeleitung, und gibt einen Teil dieser Wärme an den Formeinsatz sowie das Kreislaufsystem ab. Ca. 20 s nach dem Starten der Messung wird heißes Wasser durch den Formeinsatz gefördert und die Erwärmung beginnt.



Abbildung 192: Versuchsanordnung Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel" – Erwärmen

Auffällig bei den Aufheizkurven ist, dass die im Zentrum gelegene Kavität im Vergleich zur äußeren Kavität eine verzögerte Erwärmung erfährt. Grund dafür ist der um 5 mm größere Abstand zu den Temperierwendeln. Die Kurve M3 zeigt die Differenz der Messstellen 1 (mittlerer Konus) und 2 (äußerer Konus). Hieraus wird deutlich, dass sich bei Annäherung der Konustemperatur an die Fluidtemperatur der Unterschied zwischen M1 und M2 wieder verringert. Eine Folge der Wärmeleitung im Formeinsatz ist, dass sich nach einer bestimmten Zeit eine homogene Temperaturverteilung einstellt. Dies ist auch an der asymptotischen Annäherung der Temperaturkurven von M1 und M2 an Kurve M4 zu erkennen.

Ein kompletter Aufheiz- und Abkühlzyklus ist in Abbildung 193 dargestellt. Nach der Aufheizphase muss bei dem Versuchsaufbau manuell zwischen den Behältern, aus denen die Pumpe ansaugt, umgeschaltet werden. Während dessen wurde auch das Thermoelement von Messstelle 4 im Behälter mit dem kalten Reservoir positioniert. Dieser Temperatursprung ist im Diagramm am Temperaturabfall von M4 zu erkennen. Beim Umschalten der Behälter wurde die Pumpe gestoppt, um zu verhindern dass Luft angesaugt wird. Dies hatte zur Folge, dass die Temperatur im Formeinsatz wieder sank. Zu sehen ist dies am Temperaturverlauf von M1 und M2 nach ca. 140 s. Der Zeitpunkt des erneuten Einschaltens der Pumpe wird am lokalen

Minimum von M5 bei ca. 160 s deutlich. Das sich noch im Schlauch befindliche heiße Wasser hatte einen nochmaligen Temperaturanstieg zur Folge. Der eigentliche Abkühlvorgang beginnt erst ca. 20 s nach dem erneuten Einschalten der Pumpe. In der Praxis wird deshalb schon während des Einspritzens auf Kühlbetrieb umgeschaltet, um kürzere Zykluszeiten zu erlangen. Dies bedeutet, dass dem Kreislauf zu einem früheren Zeitpunkt bereits kaltes Wasser zugeführt wird, aber mit dem noch im Kreislauf vorhandenen heißen Medium der Form weiter Wärme zugeführt wird.



Abbildung 193: Versuchsanordnung Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel" – Heizen und Kühlen

Der Kurvenverlauf beim Abkühlen ähnelt dem beim Heizen. Die Temperaturkurven M1 und M2 nähern sich asymptotisch der Temperatur des Wasserreservoirs an. Die Temperaturschwankungen von M4 sind auf Vermischungsvorgänge des kalten mit dem zugeführten heißen Wassers aus dem Schlauch zurückzuführen. Der Temperaturanstieg des kalten Wassers im Reservoir verläuft relativ flach. Je höher das Wasservolumen, desto geringer ist die Temperaturerhöhung bei gleicher zugeführter Wärmemenge.

Versuchsanordnung: Parallelschaltung Formeinsatz "Temperierwendel"

Für die Versuchsanordnung Parallelschaltung Formeinsatz "Temperierwendel" ist ein Temperatur-Zeit-Diagramm in Abbildung 194 dargestellt. Der Hauptunterschied zur Versuchsanordnung Serienschaltung Formeinsatz "Temperierwendel" bestand darin, dass jeweils nur einer der beiden Temperierkanäle zum Kühlen bzw. zum Heizen genutzt wird.

Die Messstelle M4 gibt die Temperatur des heißen Mediums, die Messstelle M5 die Rücklauftemperatur im Heizkanal an. Im Vergleich zu der Versuchsanordnung "Serienschaltung" wird bei der 2-kanaligen Lösung eine wesentlich schnellere Temperierung erzielt, da aus dem Kanal kein warmes bzw. kaltes Medium verdrängt werden muss.



Abbildung 194: Versuchsanordnung Parallelschaltung Formeinsatz "Temperierwendel" – Heizen und Kühlen

Versuchsanordnung: Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur"

Um die Aufheiz- und Abkühlraten an der Werkzeugwand des Formeinsatzes "Wärmetauscherstruktur" zu messen, wurden Thermoelemente drauf fixiert. Da in der Werkzeugwand keine Bohrungen wie im Formeinsatz "Temperierwendel" vorhanden waren, wurden die Elemente aufgeklebt, wodurch der Wärmeübergang Werkzeugwand-Thermoelement beeinträchtigt werden kann.



Abbildung 195: Aufheizkurve Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur"

In Abbildung 195 ist der zeitliche Temperaturverlauf für das Aufheizen des Formeinsatzes "Wärmetauscherstruktur" dargestellt. Im Vergleich zum Formeinsatz "Temperierwendel" werden wesentlich höhere Heizraten erzielt, wodurch kurze Zeiten zustande kommen.

Wie bei den Heizraten, sind auch die Kühlraten für den Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" wesentlich höher. Der zeitliche Temperaturverlauf des Kühlens ist im Diagramm von Abbildung 196 zu sehen.



Abbildung 196: Abkühlkurve Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur"

In Tabelle 23 ist eine Übersicht über die ermittelten die Aufheiz- bzw. Abkühlraten der zwei bewerteten Formeinsätze zusammengestellt.

Aufheiz- und Abkühlraten an der Formwand				
Formeinsatz "Temperierwendel"		Formeinsatz "Wärmetau- scherstruktur"		
Heizen				
Serie	Parallel	$2 0 V/_{\odot}$		
0,4 K/s	0,5 K/s	3,0 K/S		
	Kühlen	·		
Serie	Parallel	25 K/s		
0,3 K/s	0,4 K/s	2,5 K/5		

Tabelle 23: Aufheiz- und Abkühlraten für die Formeinsätze "Temperierwendel" und "Wärmetauscherstruktur"

Die Aufheiz- und Abkühlraten sind neben den Eigenschaften des Formeinsatzes abhängig von der Temperatur des Mediums im Reservoir, sowie von der Durchflussmenge durch den Kreis-

lauf. Je größer der Temperaturunterschied zwischen Formeinsatztemperatur und Temperiermedium ist, desto schneller laufen die Wärmeausgleichsvorgänge ab. Des Weiteren werden die Raten durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten begünstigt. Die gemittelten Raten sind bei der parallelen Versuchsanordnung beim Formeinsatz "Temperierwendel" immer höher als bei der Serienschaltung. Während des Aufheizens ist dies auf die größere Durchflussmenge aufgrund der geringeren Druckverluste zurückzuführen. Beim Abkühlen spielt zusätzlich noch die hohe Temperaturstabilität des Kühlmediums eine Rolle.

Anhand der Temperatur von Messstelle M1 und M2, welche in den beiden Koniken vom Formeinsatz "Temperierwendel" positioniert waren, kann der Einfluss des Abstandes zwischen Kavität und Temperierwendel aufgezeigt werden. Die Temperaturkurven der beiden Messstellen waren sowohl beim Heizen als auch beim Kühlen nicht deckungsgleich. Der äußere Konus liegt näher an den Temperierkanälen und wurde deshalb wegen der geringeren Wärmeleitungsstrecke früher als der zentrale Konus erwärmt bzw. abgekühlt. Erst als sich eine gleichmäßige Temperaturverteilung am Ende des Aufheiz- bzw. Abkühlvorgangs einstellte, glichen sich die Temperaturen in den Koniken an. Für das Mikrospritzgießen ist der Temperaturgradient vertretbar, es sei denn, es werden Präzisionsmikroteile wie beispielsweise Mikrolinsen gefertigt. In diesem Fall ist der Temperaturgradient weiter zu verringern.

Die höheren Aufheiz- und Abkühlraten beim Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" gegenüber dem Formeinsatz "Temperierwendel" sind vor allem auf die höheren Durchflussmengen zurückzuführen.

5.3.1.3 Wärmeverteilung

Neben den Temperaturmessungen mittels Thermoelementen wurden für den Formeinsatz "Temperierwendel" in der Versuchanordnung Parallelschaltung und den Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" auch Untersuchungen mit einer Thermokamera durchgeführt. Der Versuchsaufbau mit dem Thermografiesystem VARIOSCAN ist in Abbildung 197 abgebildet.



Abbildung 197: Versuchsaufbau zur Betrachtung mit Thermokamera

Zum Aufbau gehörten die Wärmebildkamera, ein Kontroll-Monitor, sowie eine Tastatur und ein Controller. Das verwendete System 1010 ist stickstoffgekühlt. Die Siliziumoptik eignet sich zur Visualisierung von Temperaturen zwischen - 10° C und 800° C.

Im Folgenden sind vom Formeinsatz "Temperierwendel" beim Heizen und Kühlen aufgenommene Wärmebilder zu fünf verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Jeweils eine Aufnahme beinhaltet den Einsatz von der Seite (Abbildung 198) und eine Aufnahme von der Stirnfläche (Abbildung 199). Während des Versuches wurde mehrmals ein kompletter Aufheizund Abkühlzyklus durchlaufen, um zu gleichen Zykluszeitpunkten je eine Aufnahme von der Seite und eine Aufnahme von der Stirnfläche des Formeinsatzes zu erhalten.



Abbildung 198: Seitenansicht



Abbildung 199: Ansicht der Stirnfläche

Die ersten beiden Bilder entstanden nach einer Kühlphase des Formeinsatzes (Abbildung 200 und Abbildung 201). Das darauf folgende Bilderpaar von Abbildung 202 und Abbildung 203 entstand kurz nach dem Einschalten des Heizkreislaufes. Am Ende der Heizphase entstanden die Wärmebilder unter Abbildung 204 und Abbildung 205. Während der Kühlphase wurde ebenso verfahren. Es entstand ein Wärmebildpaar zu Beginn des Abkühlvorgangs (Abbildung 209).

Zu beachten sind bei den Wärmebildern die eingestellten Parameter. Bei einigen Aufnahmen mussten die Parameter der Wärmebildkamera aufgrund zu geringer Temperaturunterschiede angepasst werden. Nur die letzten drei Bildpaare konnten mit den gleichen Parametern für Level bzw. Range aufgenommen werden.

In Abbildung 200 und Abbildung 201 sind die Wärmebilder des Formeinsatzes nach einer fünfminütigen Kühlphase zu sehen. Hervorgehoben sei, dass der zu betrachtende Temperaturbereich auf 21° C bis 29° C eingestellt war. Bei einem größeren Messbereich wäre die Visualisierung der Temperatur, wegen der geringen Unterschiede, für eine Bewertung nicht ausreichend gewesen. Der Kühlmittelzu- und Ablauf auf der linken Seite in Abbildung 200 deutlich zu sehen. Des Weiteren erkennt man in der linken Abbildung, dass der Bereich im Zentrum des Formeinsatzes wesentlich kälter ist als der der Mantelflächen, ein Zeichen der stetigen Wärmeaufnahme aus der Umgebung. In der Seitenansicht wird eine asymmetrische Temperaturverteilung auf der Formeinsatzaußenseite deutlich. Auf der Anschlussseite (links) herrscht annähernd die gleiche Temperatur über die gesamte Formeinsatzhöhe, rechts hingegen ist der Bereich um die hervorstehenden Anschlüsse des Heizkreislaufes kühler als der Rest. Ursache hierfür ist der Verlauf der Temperierkanäle. Das kalte Wasser wird durch den linken oberen Anschluss zugeführt und fließt durch den linken unteren Anschluss wieder aus dem Formeinsatz. Das kalte Wasser fließt dabei durch die Wendel im Formeinsatz nach oben und dann über einen Kanal senkrecht nach unten zum Ablauf. Dieser senkrechte Verbindungskanal ist der Grund dafür, dass sich die linke Seite über die gesamte Höhe annähernd gleichmäßig abkühlt. Der wärmere Streifen in der Formeinsatzmitte stellt einen der vier 30°-Stege dar. Durch seinen größeren Durchmesser ist er weiter entfernt von den Temperierwendeln. Die aufgenommene Wärme aus der Umgebung kann deshalb nur in geringerem Maße abgeführt werden, was im stationären Zustand, von dem nach 5 Minuten Kühlung auszugehen ist, das abgebildete Bild ergibt.





Abbildung 200: PCX1 liegend

Abbildung 201: PCX1 stehend

Nachdem der Heizkreislauf in Betrieb genommen wurde entstanden die folgenden beiden Bilder. In Abbildung 202 sieht man deutlich die vier Anschlüsse mit Schläuchen. Der Zulauf erfolgte durch die rechte untere Schlaucholive, was an der höchsten Temperatur im Bildausschnitt zu erkennen ist. Der wesentlich kühlere Abfluss verdeutlicht, dass eine erhebliche Wärmemenge ins Werkzeug abgegeben wird. Der in der Bildmitte zu sehende wärmere Bereich stellt die Vertiefung der Kavität dar. Der Boden ist an dieser Stelle ca. 10 mm näher an den Temperierwendeln, was den starken Kontrast erklärt. Die Abbildung 203 entstand zu einem minimal späteren Zykluszeitpunkt, was an der bereits höheren Temperatur der Schlauchhülle zu erkennen ist. Die Wärmebilder von Abbildung 204 und Abbildung 205 wurden zu einem späteren Zeitpunkt des Heizvorganges aufgenommen. Trotz eines um 5° C höher eingestellten Temperaturlevels zeigen die Heizanschlüsse sowie der mittlere Bereich der Draufsicht eine wesentlich wärmere Farbe, was eine höhere Temperatur bedeutet. Zu erkennen ist auch, dass sich die Wärme auf den Kühlkreislauf überträgt und das Temperiermedium die höhere Temperatur an einen geringen Bereich des Schlauchanschlusses überträgt (Abbildung 205, unten links). Im Gegensatz zum stationären Zustand nach langer Kühlphase, ist die Wärmeverteilung am Ende einer langen Heizphase gleichmäßiger. Die 30°-Stege sind nicht zu erkennen. Nur im Bereich um die Schlaucholiven bilden sich wärmere Bereiche aufgrund der Querschnittverengung beim Übergang.

Beginn des Heizvorganges (L = 30° C R = 15 K)



Abbildung 202: PCX2 liegend







Abbildung 204: PCX3 liegend

Abbildung 205: PCX3 stehend

Der Zeitpunkt unmittelbar nach Einschalten des Kühlkreislaufes und Abschalten des Heizkreislaufes ist zu erkennen, dass der hohe Temperaturgradient wie in Abbildung 204 und Abbildung 205 nicht mehr vorhanden ist. Die Position der Anschlüsse und Schläuche ist kaum zu auszumachen, da der Gradient, aufgrund der Parameterwahl (L = 35° C und R = 15 K), für die Temperaturdifferenz zur Umgebung zu gering ist. Der in Abbildung 206 zu erkennende kreisförmige Temperaturverlauf begründet sich zum einen durch die starke Wärmeabgabe an die Umgebung infolge Konvektion und zum anderen durch die beginnende Kühlung von innen heraus. In der Seitenansicht (Abbildung 207) ist eine gleichmäßige Abkühlung der Oberfläche zu sehen. Beginn des Kühlvorgangs (L = 35° C R = 15 K)



Abbildung 206: PCX4 liegend



Das Ende der Kühlphase ist bei gleichen Einstellungen von Level und Range in Abbildung 208 und Abbildung 209 zu erkennen. Die Kavität und die Koniken wurden vollständig abgekühlt. Der Abstand der ringförmigen Isothermen ist in der Draufsicht deutlich größer, die 4 30°-Stege sind jedoch aufgrund des Temperaturgradienten zu erkennen.



Ende der Kühlphase (L = 35° C R = 15 K)

Abbildung 208: PCX5 liegend

Abbildung 209: PCX5 stehend

Aus der Seitenansicht geht die fast vollständige Angleichung der Oberflächentemperatur an die Umgebung hervor. Nur ein geringer Teil des Einsatzes an den Anschlüssen des Wärmekreislaufes sowie die zwischen diesen Anschlüssen senkrecht verlaufende Rippe besitzen noch eine höhere Temperatur. Ursache hierfür ist die Wärmeleitung aus den wärmeren Schläuchen und Anschlüssen des Heizkreislaufes. Da bei der Parallelschaltung der nicht genutzte Kreislauf nur unterbrochen wird, ist im zweiten Kreislauf noch die Temperatur des Fluids vorhanden. In dem dargestellten Fall ist heißes Fluid im zweiten Kreislauf und verliert nur durch Wärmeabgabe an die Umgebung langsam an Temperatur.

Die Betrachtungen des Formeinsatzes "Temperierwendel" mit der Thermokamera dienten zur qualitativen Bewertung der Temperierkanalanordnung und des Temperierverlaufes. Es wurde festgestellt, dass die gewählte Anordnung der Temperierwendel es ermöglicht, den Bereich im Zentrum des Formeinsatzes gleichmäßig zu kühlen und zu heizen. Des Weiteren war eine ungleichmäßige Temperaturverteilung auf der Oberfläche zu erkennen und bei erhitztem Formeinsatz eine starke Wärmeabgabe an die Umgebung, infolge hoher Oberflächentemperaturen. Um dies zu verhindern und um eine gleichmäßige Wärmeverteilung zu begünstigen ist eine Isolation des Formeinsatzes durch eine Hülle nötig. Über die Wärmeverteilung während des Betriebes im Stammwerkzeug kann anhand dieser Untersuchungen keine Aussage getroffen werden.

Bei dem Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" liegt die Temperierstruktur direkt unter der formgebenden Werkzeugwand. Die aufgenommene Oberfläche entspricht der formgebenden Kontur. Da diese Oberfläche des Werkzeuges nach dem Planschleifen stark reflektierte, wurde für die Wärmebildaufnahmen der Formeinsatz mittels Trennmittel (Bornitrid) bespritzt.

Wieder ist in den Abbildungen im Bereich des Übergangs Schlauch – Formeinsatz ein hoher Temperaturgradient erkennbar. Zum einen ist in diesem Bereich eine Querschnittsveränderung vorhanden, zum anderen weist der Schlauch eine höhere Wärmeabstrahlung im Vergleich zum Formeinsatz auf, was zu unterschiedlich stark ausgeprägten Wärmestrahlungen führt. Im Bereich der Temperierstruktur ergibt sich eine nahezu gleichmäßige Temperaturverteilung. Am Rand der Struktur entsteht jedoch ein großer Temperaturgradient. Folglich sollte die formgebende Struktur innerhalb des Bereichs der Temperierstruktur liegen.



Abbildung 210: Temperaturverteilung Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur"

Beim Abkühlen stellt sich ebenfalls im Randbereich der Struktur ein größerer Temperaturgradient ein. Für Anforderungen des Mikrospritzgusses ist die Temperaturverteilung innerhalb der Temperierstruktur ausreichend, für optische Bauelemente jedoch nicht. Für diesen Fall darf die Werkzeugformwand keine ungleichmäßige Verteilung aufweisen. Im Formeinsatz "Wärmetauscher" ergibt sich die geringe Abweichung aufgrund der Fließrichtung. Ein Anströmen aus zwei Richtungen würde die Temperaturverteilung innerhalb der Temperierstruktur nochmals verbessern. Aufgrund des Lamellenaufbaus des Einsatzes ist dies auch ohne große konstruktive Änderung zu realisieren. Festzuhalten ist, dass mit der Konstruktion von Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" eine schnellere Temperierung möglich ist und dabei eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung auf der Werkzeugwandoberfläche erzielt wird. Im Falle von rotationssymmetrischen Bauteilen, bei denen die Formteilungsebene senkrecht auf der Symmetrieachse steht, können durch einen gezielt einstellbaren Temperaturgradienten in der Kavität die optischen Eigenschaften verbessert werden. Dieser überlagert sich mit dem verfahrensbedingten Gradienten beim Abkühlen, wodurch somit eine gleichmäßige Abkühlung und Erstarrung über den gesamten Bauteilquerschnitt erzielt werden kann.

5.3.2 Spritzgießversuche

Neben den während der Anpassung der Formeinsätze vorgenommenen Spritzversuche, wurde zum Abschluss des Projektes eine Versuchsreihe durchgeführt. Zuerst wurde der für eine vollständige Formfüllung benötigte Plastifizierweg bestimmt. Dazu wurde das Werkzeug in der Parallelschaltung an den Kühlkreislauf angeschlossen und gekühlt. Die Anpassung des Plastifizierweges erfolgte schrittweise, bis eine vollständige Formfüllung gewährleistet war. Mit einem Plastifizierweg von 22 mm entstand der auf Abbildung 211 und Abbildung 212 zu sehen ist.



Abbildung 211: Probekörper 6, Koniken



Abbildung 212: Probekörper 6, Boden

Durch weitere Versuche konnte der Plastifizierweg auf 24 mm festgelegt werden. Einer der dabei entstandenen Probekörper ist in Abbildung 213 und Abbildung 214 zu sehen. Das letztendlich mit dem Formeinsatz "Temperierwendel" erreichte Verhältnis von Fließweg zu Wanddicke beträgt bei der Konik im Zentrum des Probekörpers 17 und bei der auf einem Durchmesser von 10 mm angeordneten Konik 27.





Abbildung 213: Gespritzter Probekörper Abbildung 214: Gespritzter Probekörper

Die Fließwege in der Formteilungsebene anzuordnen wäre für ein Probeteil mit der abgeformten Geometrie eine Alternative. In diesem Fall sind keine Probleme bei der Entformung zu erwarten, da diese senkrecht zum kreisrunden Querschnitt der Fließzylinder erfolgen würde. Dieses Prinzip wurde bei dem Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" realisiert. Durch die Anordnung in der Formteilungsebene entstehen außerdem fertigungstechnische Vorteile. Fertigungsverfahren gemäß dem Stand der Technik können verwendet werden, um Mirkostrukturen einzuarbeiten. Durch die ebene Anordnung war die Positionierung der Temperierkanäle und somit die Verwendung des Rapid Toolings zu überdenken. Anstatt wendelförmiger Kanäle sind in diesem Fall flache Temperierstrukturen unmittelbar hinter der Kavitätswand, wie im Formeinsatz "Wärmetauscherstruktur" integriert, besser geeignet.

6 Schlussfolgerungen

6.1 Wissenschaftlich technologischer Nutzen

Durch den Einsatz der im Forschungsvorhaben untersuchten Technologie wird eine Verbesserung der Wärmeführung für Urformprozesse ermöglicht. Bei der Verwendung entsprechender Werkstoffe kann das Verfahren auch für Umformprozesse eingesetzt werden (Bsp.: Prägen). Zusätzlich können die Erkenntnisse auch für das Fertigen von metallischen Mikrostrukturen zur Kühlung von Elektronikanwendungen oder in der chemischen Verfahrenstechnik genutzt werden.

6.2 Wirtschaftlicher Nutzen, insbesondere für kmU

Die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen hängt in erster Linie von der Qualität und der Konkurrenzfähigkeit der erzeugten Produkte ab. Die Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse bringt kleinen und mittleren Unternehmen folgende Vorteile:

- Neue Möglichkeiten zur Herstellung von Mikrospritzgießwerkzeugen
- Verringerung der Herstellungskosten für Ur- und Umformwerkzeuge
- Verkürzung der Zeit von der Entwicklung eines Werkzeuges bis zur Einführung in die Produktion
- Die neue Technologie ermöglicht das Verarbeiten von zähen Kunststoffen mit schlechter Fließfähigkeit
- Verringerung der Zykluszeit um 30 bis 40 % durch Verkürzung der Abkühlzeit
- Verbesserung der Qualität der Spritzgießteile, Erhöhung der Formgenauigkeit und Verringerung des Verzuges
- Erweiterung der konstruktiven Möglichkeiten für neue Produkte
- Erweiterung der Angebotspalette mit : temperierbaren Formwerkzeugen
 - neuen Bauteilen (Wärmetauscher)

6.3 Neuigkeitsgehalt

In dem Forschungsvorhaben wird für kmU die vorwettbewerbliche Grundlage geschaffen, innovative Lösungen zum Herstellen von Mikrospritzgießwerkzeugen anbieten zu können. Mit den im Projektverkauf erzielten Ergebnissen zum Diffusionsschweißen können kompakte Bauteile wie Mikrospritzgießformwerkzeuge mit Mikrokonturen gefertigt werden. Durch die Schweißstrategie ist das Diffusionsschweißen nun auch zum Verschweißen von Lamellen mit großen Flächenunterschieden fügbar. Dabei wird eine vollflächige Anbindung ohne Deformation der Lamellen erzielt. Es ist weiterhin festzuhalten, dass sich die neuen Lösungen nicht nur für den Werkzeugbau und für das Mikrospritzgießen insgesamt sondern auch für das Herstellen von Bauteilen mit einem hohen Integrationsgrad eingesetzt werden kann.

6.4 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Die Technologie zum Herstellen von Mikrospritzgießwerkzeugen kann von allen Unternehmen genutzt werden, die Spritzgießwerkzeuge oder Kunststoffteile herstellen. Das sind vor allem kleine und mittlere Unternehmen. Mit Hilfe der Verfahrenskombination Präzisionsschneiden (Laserstrahlschneiden / elektroerosives Schneiden) und Diffusionsschweißen können auch Umformwerkzeuge für das Prägen von optischen Bauelementen gefertigt werden. Des Weiteren sind Einsätze der vorgestellten Technik in den Bereichen Druckgusswerkzeuge und Bauteile mit feinen, komplizierten Innenstrukturen (Brennstoffzellen, Reaktoren, Katalysatoren) zu nennen. Beispielsweise können wasserdurchströmte Hochleistungskühler aus Kupfer auf elektronischen Leistungselementen eingesetzt werden, um die Funktion der Bauteile auch bei großen Umgebungstemperaturen zu gewährleisten. Da in diesen Einsatzfällen der Bauraum begrenzt ist, können nur Kühler mit Mikrokanälen eingesetzt werden. Die voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse erfolgt darüber hinaus:

•	In den Fachgebieten:	-	Werkstoffe, Materialien
	C C	-	Verfahrenstechnik
		-	Produktion
•	In den Wirtschaftszweigen:	-	Chemische Industrie
	C	-	Maschinenbau
		-	Fahrzeugbau

6.5 Bedeutung für kmU (Wahl Optoparts GmbH, Triptis)

Optische Bauteile aus Kunststoff

Kunststoffe sind ein wesentlicher Bestandteil unserer heutigen Lebenswelt. Sie dominieren die verschiedensten technischen Erzeugnisse. Ihre Entwicklung, Herstellung und Nutzung begann vor ca. 100 Jahren und hat sich insbesondere in den letzten 50 Jahren rasant fortgesetzt. Augenmerk wurde von Anfang an auch auf ihre Verwendbarkeit für optische Zwecke gelegt. Insbesondere die Entwicklung amorpher thermoplastischer Materialien wie Polystyren (PS) und Polymethylmethacrylat (PMMA) mit hervorragenden Transmissionseigenschaften verstärkte diese Bestrebungen und führte zu ersten Substitutionen klassischer Optikwerkstoffe. So wurden PMMA-Platten für Sichtscheiben und Kuppeln im Flugzeugbau bereits in den 30er Jahren genutzt, wofür nicht zuletzt ihre gegenüber Glas wesentlich höhere Elastizität und Schlagzähigkeit ausschlaggebend waren. Bis zum heutigen Tage ist ein breites Spektrum optischer Problemlösungen gerade durch den Einsatz von Kunststoffen vorzeigbar, ohne dass die Entwicklung abgeschlossen wäre oder bereits eine Sättigung erreicht hätte. Dies bedeutet nicht, dass mit den zur Verfügung stehenden Kunststoffen Materialien gefunden worden wären, die klassische Optikmaterialien einfach ersetzen können. Ganz im Gegenteil gibt es auf Grund der physikalischen und chemischen Eigenschaften beider Werkstoffgruppen oftmals klare Abgrenzungen der Einsatzfelder. Aber auch bei gleichen Aufgabenstellungen müssen unterschiedliche Wege hinsichtlich Optikdesign und Bauteilgestaltung beschritten werden, um den jeweiligen Anforderungen durch Materialeigenschaften und Fertigungsprozess gerecht zu werden.

Für Anwendungen in Transmission ist eine gute zumindest aber für die Anwendung ausreichende Lichtdurchlässigkeit in dem gewünschten Wellenlängenbereich erforderlich. Diese transparenten Kunststoffe bilden als die eigentlichen Optikwerkstoffe den Schwerpunkt der weiteren Ausführungen. Die gewünschten Anforderungen erfüllen im Wesentlichen die amorphen Kunststoffe, während teilkristalline z. T. hohe Absorptionen in bestimmten Spektralbereichen aufweisen und sich optisch sehr inhomogen verhalten.

Die meisten durchsichtigen oder transparenten Kunststoffe werden nicht vordergründig für optische Anwendungen produziert, weshalb der Hersteller auch hinsichtlich der Produktqualität und deren Überwachung andere Schwerpunkte setzen. Meist sind es Festigkeitseigenschaften, Schmelze- und Lösungsviskositäten, die einer regelmäßigen Kontrolle unterliegen, während optische Sauberkeit, Transmission und Brechzahl nicht gemessen oder überwacht werden. Diese Umstände schränken die Anzahl der für optische Anwendungen mit höheren Anforderungen verfügbaren Kunststoffe stark ein. Der Verarbeiter von Kunststoffen für optische Einsätze ist selbst gezwungen, notwendige Erfahrungen zur Eignung bestimmter Kunststoffe zu sammeln und die Ermittlung bestimmter Stoffkennwerte vorzunehmen.

Eine Gegenüberstellung wichtiger Eigenschaften von Kunststoffen und Glas verdeutlicht am besten die jeweiligen Einsatzmöglichkeiten:

- Herstellung optischer Flächen und komplexer Geometrien im Urformverfahren möglich
- Abformbarkeit von Mikrostrukturen

- geringes spezifisches Gewicht
- gute Schlagzähigkeit
- gute Einfärbbarkeit
- geringe Wärmeleitfähigkeit
- relativ geringe Temperaturbeständigkeit
- hohe lineare Wärmeausdehnung
- Unbeständigkeit gegenüber bestimmten Lösungsmitteln und Chemikalien
- geringere Steifigkeit und Formstabilität

Spritzgießen von Kunststoffoptiken

Die größte Bedeutung unter den Verarbeitungsverfahren für optische Kunststoffbauteile besitzt das Spritzgießen von Bauteilen sowohl in seiner Standardform als auch in speziellen an das Produkt angepassten Varianten. Weiterhin ist es hauptsächlich das Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe der den Schwerpunkt der Fertigungsaktivitäten bildet.

Die Spritzgießmasse entspricht dem granulierten Kunststoff, der als Thermoplast durch die Verarbeitung keine chemische Veränderung erfahren sollte. D.h. die Verarbeitung muss so angelegt sein, dass lediglich physikalische Prozesse ablaufen. Das granulierte Ausgangsmaterial besitzt somit alle stofflichen Eigenschaften des Endproduktes.

Die gesamte Prozessführung ist darauf gerichtet, die geforderten Produktmerkmale des Formteils mit minimalem Zeit-, Energie-, Material- und Verfahrensaufwand zu realisieren. Die Qualitätsvorgaben für das Produkt, in unserem Fall insbesondere die optischen Anforderungen, entscheiden über den zu wählenden Prozessablauf und die erforderliche Maschinen-, Anlagen- und Werkzeugtechnik. Hieraus resultiert beispielsweise, dass die Herstellung dickwandiger Optikteile Spritzgießmaschinen mit modifizierten Einspritzregelungen und ausreichende Angussquerschnitte im Werkzeug voraussetzt, während die Abformung optischer Mikrostrukturen eine dem Spritzgießzyklus angepasste **dynamische Werkzeugtemperierung** erfordert. Der Spritzgießprozess stellt heute eine Möglichkeit dar, mit hoher Effizienz sehr komplexe optische Bauteile zu fertigen.

Der verbreiteten Meinung, dass optische Bauteile aus Kunststoff nur als preiswerte Massenoptik mit geringen Ansprüchen an Qualität bzw. Präzision eingesetzt werden können, kann aus heutiger Sicht nicht mehr zugestimmt werden.



Mikrolinsen mit Anguss



Mikrolinsen

Durch eine stetige Weiterentwicklung technologischer und werkzeugtechnischer Verfahren sind Abformungen optischer Funktionsflächen in sehr hoher und vor allem reproduzierbarer Genauigkeit möglich. Eine pauschale Bewertung realisierbarer Toleranzen und Konturgenauigkeiten ist dennoch nicht möglich. Welche Präzision letztendlich am konkreten Bauteil erzielt werden kann wird von verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt:

(1) Werkstoff
(2) Spritzgießwerkzeug
(3) Prozess und Maschine



Formeinsätze



Formeinsätze

So spielt hierbei als wichtigster werkstoffabhängiger Faktor das Schwindungsverhalten bzw. die Schwindungsschwankung des eingesetzten Kunststoffes die wesentlichste Rolle. Dieser Einfluss verstärkt sich mit Zunahme der Bauteil– bzw. Flächengröße, der Komplexität und durch ungünstig gewählte Wanddickenverhältnisse. Eine verfahrensgerechte Bauteilgestaltung ist damit die erste Voraussetzung zur Erzielung hoher Abformgenauigkeiten.

Ein zweiter entscheidender Gesichtspunkt ist die Herstellung hochpräziser Werkzeuge bzw. Werkzeugeinsätze speziell für die optisch relevanten Funktionsflächen.

Durch Einsatz modernster Fertigungsverfahren wie die Ultrapräzisionsdrehtechnologie (Diamantdrehverfahren) können Profilformgenauigkeiten von unter 1 µm und Rauhigkeit der Oberfläche von Ra < 10 nm erreicht werden. Diese Technologie ist besonders für die Herstellung hochgenauer rotationssymmetrischer asphärischer Konturen geeignet. Entsprechende Erfahrungen hinsichtlich technisch-technologischer Zusammenhänge bei der Prozessführung und Kenntnisse bei den Wechselwirkungen zwischen Prozess, Spritzgießmaschine und Werkzeug sind ebenfalls notwendige Voraussetzungen für die Fertigung spritzgegossener Optikkomponenten in gleich bleibend hoher Qualität. Bei sehr klein dimensionierten Bauteilen (Durchmesserbereich 1 mm bis 5 mm) und konstruktiv optimaler Gestaltung sind Profilformgenauigkeiten bzw. Passen von deutlich weniger als 1 µm möglich. Damit sind Anwendungsfelder im Bereich der abbildenden Optiksysteme erschließbar.

Bei einem Durchmesserbereich von 10 mm bis 20 mm können Konturgenauigkeiten von 3µm bis 10µm erreicht werden. Damit liegt hierbei die Hauptanwendung im Bereich der Optoelektronik beispielsweise in Form von Sender-Empfängerlinsensystemen. Anhand eines ausgewählten Beispieles sollen Möglichkeiten und Grenzen verdeutlicht werden. Es handelt sich hierbei um eine spritzgegossene sphärische Konkavkonvexlinse aus PMMA. Hinsichtlich der Gestaltung wurden verfahrensgerechte Grundsätze berücksichtigt. Bezüglich der Wanddickenunterschiede liegen hier bezogen auf Randdicke und Mittendicke optimale Verhältnisse vor. Am Rand kann ein ausreichend dimensionierter Angussquerschnitt vorgesehen werden. Die Linse selbst wird optisch nicht bis zum Randbereich genutzt. Die freie Öffnung beträgt ca. d = 3 mm. Der Durchmesser der optischen Flächen beträgt 6 mm. Durch die Gestaltung des Randbereiches ist eine die Funktion nicht beeinflussende Abtrennung des Angussrestes unproblematisch möglich.

Die Darstellung beschränkt sich auf Besonderheiten der im Spritzgießprozess hergestellten Optikteile, da dieses Verfahren, wie schon beschrieben, den Schwerpunkt darstellt. Der Spritzgießprozess bietet einerseits Möglichkeiten, stellt jedoch gleichzeitig auch Anforderungen an die Formteilgestaltung. Deshalb müssen bei der Konstruktion optischer Kunststoffteile in gleicher Weise, wie dies bei anderen Spritzgießteilen der Fall ist, verfahrens-technische Gesichtspunkte beachtet werden. Diese sind:

- (1) Angusslage und Größe entsprechend Wanddicke vorsehen; Anguss muss in der Regel spanend entfernt werden, so dass auch die günstige Bearbeitbarkeit gesichert sein muss.
- (2) Entformung der Teile muss gesichert sein, d.h. Platzierung von Auswerfern berücksichtigen.
- (3) Entformungsschrägen von ca. 2° (je nach eingesetztem Material) sind an allen parallel zur Entformungsrichtung des Teiles liegenden Flächen anzubringen.
- (4) Materialschwindung ist bei Festlegung der Werkzeugmaße zu berücksichtigen.
- (5) Wanddickenunterschiede sind so gering wie möglich zu halten.
- (6) Hinterschnitte insbesondere innere Hinterschnitte sind zu vermeiden.
- (7) Maßtoleranzen sind unter Beachtung von DIN 16 901 festzulegen.





Spritzgießwerkzeug

2-Komponenten-Werkzeug mit Temperierung

Wie aus der Darstellung des Spritzgießprozesses zu ersehen ist, findet die Formbildung des Spritzgießteils in einem geeigneten Formwerkzeug statt. Dieses Werkzeug stellt einen wesentlichen Kostenfaktor für den Prozess dar, da sowohl die für das Formteil gewünschten Genauigkeiten, als auch Stabilität unter Prozessbedingungen (z.B.: Drücke von bis zu 3000 bar; **Temperaturen bis 300°C**) durch das Werkzeug zu gewährleisten sind. Mit diesem Verfahren ist deshalb erst eine wirtschaftliche Fertigung ab 500 bis 1000 Stück möglich. Sind die genannten Voraussetzungen erfüllt und die gewünschten Toleranzen sind mit Kunststoffoptik im Spritzgießverfahren realisierbar, so sind sehr komplexe Bauteile zu sehr geringen Kosten herstellbar. Folgende Möglichkeiten werden durch den Einsatz von Kunststoff in diesem Verfahren eröffnet:

- Integration mechanischer Elemente (Anschraubösen; Distanzelemente, Fassungen usw.) in das Optikelement
- Kombination verschiedener Optikelemente (z.B.: Doppellinsen; Prismen mit Linsen; Linsen und Mikrolinsen in Zeilen- oder Matrixform usw.) in einem Bauteil
- Herstellung optischer Fein- und Mikrostrukturen (z.B.: Fresnelstrukturen; beugungsoptische Strukturen) auch in Kombination mit anderen genannten Elementen
- Einsparung von Montage und Justageprozessen durch komplexe Bauteilgestaltung
- Replikation asphärischer Flächen in hoher Qualität insbesondere bei kleinen Dimensionen möglich

Um hochgenaue optische Bauteile mit weniger als 0,5 g Gewicht und geringsten Abmessungen abzuformen haben wir in Mikrospritzgießtechnologien investiert. Dadurch ist es uns schon heute möglich, Mikrooptiken in hohen Stückzahlen, reproduzierbar und präzise herzustellen. Die Fokussierung im Prozess liegt hier auf einer hohen Abformgenauigkeit und einer präzisen Werkzeugöffnung. Des Weiteren erfordert präziser Spritzguss mit geringsten Mengen eine präzise Dosierung des Materials. Deshalb ist bei dieser Technologie die Dosier- und Einspritzgenauigkeit 8-mal höher als bei konventionellen Maschinen mit Schneckenplastifizierung und -einspritzung. Außerdem bietet diese Maschine den kompletten Fertigungsablauf im Reinraum und eine 100% Onlinekontrolle der produzierten Teile.

Die vollelektrische Microsystem 50 ist die innovative Antwort auf die wachsenden Anforderungen bei der Produktion von Mikropräzisionsbauteilen aus Kunststoff. Die Fertigungszelle ist speziell für Kleinstbauteile bis in den einstelligen Milligrammbereich konzipiert.

<u>Technische Daten (Auszug)</u> Schlieβkraft kN 50 Min. Werkzeugeinbauhöhe 100 mm Öffnungskraft 10 kN Öffnungsweg 200 mm Werkzeuggröße max. 196 x 156 mm² Max. möglicher Abstand der Aufspannplatten 300 mm Trockenlaufzyklus 1,5 s Auswerferkraft 1,2 kN Auswerferhub 30 mm



7 Zusammenfassung und Ausblick

In dem Forschungsvorhaben "Technologie zum Herstellen von Werkzeugen zum Mikrospritzgießen durch Diffusionsschweißen" wurde die Entwicklung eines entsprechenden Werkzeuges angestrebt und erreicht. Die erzielten Ergebnisse machen deutlich, dass das Herstellen diffusionsgeschweißter Mikrospritzgusswerkzeuge mit innen liegenden Temperierkanälen möglich ist. Aus den Simulationsberechnungen und den Experimenten konnten zahlreiche Erfahrungen und Erkenntnisse gewonnen werden.

Im Mittelpunkt des Vorhabens stand der Diffusionsschweißprozess. Aufgrund der Skalierung zu kleineren Strukturen war ein Anpassen des Schweißprozesses und der Vorrichtungen an die zu schweißenden Strukturgrößen, in diesem Fall Mikrostrukturen zum Erlangen eines optimalen Schweißergebnisses, notwendig. Im Gegensatz zu massiven Bauteilen können im untersuchten Anwendungsfall schon kleine Abweichungen in der Prozessführung zu Fehlern führen. Nach einer entsprechenden Optimierung der Prozessparameter, konnte ein Schweißergebnis erzielt werden, dass die gesetzten Anforderungen hinsichtlich einer vollflächigen Verbindung erfüllt. Die ermittelten optimierten Schweißparameter für den Werkstoff 1.4301 liegen in folgendem Bereich (Tabelle 24):

Tabelle 24: optimaler Parameterbereich

Schweißtemperatur	[°C]	1100 (1200)
Schweißzeit	[min]	90 (75)
Flächenpressung	[N/mm ²]	6

Vergleichende Untersuchungen mit dem Werkstoff 1.2344 und den genannten Parametern führten ebenso zu fehlerfreien Schweißungen.

Jedoch war die experimentelle Prozessparameteroptimierung nicht ausreichend. Zur weiteren Abschätzung der Einflüsse und zur Bestimmung der technischen Grenzen waren Simulationen erforderlich. Neben Lamellen mit großen Flächenunterschieden verfügten die einzelnen Schweißproben auch über Lamellen mit deutlich geringeren Flächenunterschieden. Bei diesen geringeren Flächenunterschieden trat aber ebenso das Problem der Durchbiegung im Bereich der Mikrostrukturen auf. Um die Funktion von Kompensationsflächen zu analysieren, wurden FEM Simulationen in Ansys durchgeführt. In diesen Simulationen konnte die Funktion der Kompensationsflächen nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse der FEM-Simulation wurden mit experimentellen Ergebnissen korreliert, wofür die geschweißten Schichtverbunde metallographisch ausgewertet wurden, und bestätigt.

Des Weiteren konnte eine Strategie zum Schweißen von Lamellen mit großen Flächenunterschieden entwickelt werden. Bei diesen kann auch durch den Einsatz von Kompensationsflächen ein anforderungsgerechtes Schweißergebnis erzielt werden. Bei der Strategie werden die Proben nicht in einem Schritt geschweißt, sondern in mehreren, bis zu drei Einzelschritten. Hierdurch konnten die einzelnen Teilpakete durch den Einsatz eines Zwischenstempels auf einmal geschweißt werden

Zur Positionierung der einzelnen Blechlamellen wurden zwei Methoden angewandt. Die erste zielt auf eine Positionierung über Zylinderstifte ab, die zweite auf eine Positionierung über

zwei Laschen, die anschließend durch eine Laserstrahlpunktschweißung fixiert werden. Die Positionierungsnuten der Laschen wurden hierbei einmal in x- und das andere Mal in y- Richtung in die Probenkontur eingefügt. In den Versuchen hat sich herausgestellt, dass die Positionierung über Zylinderpassstifte die genaueste ist. Jedoch sind die Passstifte verloren, da diese mit eingeschweißt werden.

Eine weitere untersuchte Fragestellung war die Stufenbildung auf der Formoberfläche. Bei dieser bildet sich die Blechstruktur der lasergeschnittenen Folien an den Flächen des Spritzgießbauteiles ab. Wie nachgewiesen, konnte dieses Problem durch eine Schweißprozessparameteroptimierung und entsprechende Nacharbeit (Fräsen oder Drahterodieren) beseitigt werden. Temperaturwechsel nach einem Fräs – oder Erodierprozess hatten keinen Einfluss auf die Stufenbildung.

Rekristallisationsvorgänge wurden für den kaltgewalzten 1.4301 an mehreren Schweißproben festgestellt und untersucht. Die Schweißtemperaturen und Schweißzeiten liegen deutlich im Bereich der Rekristallisationstemperatur und darüber des verwendeten Chrom – Nickel – Stahls. Neben den Gefügeuntersuchungen wurden an einigen ausgewählten Proben auch Härteuntersuchungen durchgeführt und verringerte Härtewerte gemessen.

Der Grateinfluss auf das Schweißergebnis beim Diffusionsschweißen wurde ebenfalls untersucht. Es wurden Proben mit einem zuvor vermessenen Grat bei den optimierten Parametern geschweißt. Die maximalen Grathöhen je Schnittfuge lagen zwischen ca. 10 bis 75 µm. In den metallographischen Auswertungen konnte man zwei Fehlerbilder ausmachen, zum einen eine fehlerhafte Schweißung und zum anderen eine Einarbeitung des Grates in die Schnittfuge, welches jedoch in geringerem Umfang auftrat. Das erste Fehlerbild, das starke Hinterschneidungen erzeugen kann, trat mit zunehmender maximaler Grathöhe immer häufiger auf. Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass die Grathöhe deutlich unter 10 µm liegen sollte, um ein optimales Schweißergebnis zu erhalten.



Abbildung 215: Blasenspur an Entlüftungsausgang

Das Diffusionsschweißen von Lamellenpaketen ermöglicht auch eine neuartige Entlüftung der Kavität. Hierzu müssen bei zwei benachbarten Lamellen auf die sich berührenden Flächen Entlüftungskanäle eingearbeitet werden. An den Stellen der eingebrachten Kanäle tritt beim Diffusionsschweißen keine Verbindung auf. Mit versuchsweise eingearbeiteten Querschnitten von ca. 20 x 30 μ m² konnten gasdurchlässige Kanäle erzielt werden. Das die bewusst erzeugte

Fehlstelle durchgängig bleibt, ist in Abbildung 215 zu sehen. Die austretenden Luftblasen sind deutlich im Wasser zu erkennen. Um ein Verstopfen dieser Kanäle zu vermeiden, muss der Querschnitt konisch von der Formwand ausgehend vergrößert werden.

Eine weitere Optimierung der thermischen Bedingungen in einem Formwerkzeug kann durch den Einsatz von Werkstoffverbunden erzielt werden. In temperaturkritischen Bereichen können Werkstoffe mit einer gegenüber dem herkömmlichen Werkzeugstahl höheren Wärmeleitung eingesetzt werden. Dies hat auch den Vorteil, dass der teure Werkstoff (Bsp.: Kupfer) nur da eingesetzt werden muss, wo er notwendig ist.

Zur Herstellung von Mikrospritzgusswerkzeugen ist die LOM – Technologie in Verbindung mit dem Diffusionsschweißen geeignet, da sich durch eine entsprechende Bearbeitung mittels Laser oder Erodier-Schneiden beliebige Innenkonturen für das Spitzgießen erzeugen lassen, welche sich auf herkömmlichem Wege nicht oder nur mit sehr großem Aufwand fertigen lassen. Diese Innenkonturen können zum einen für eine Temperierung oder Entlüftung eingesetzt werden, da es sich um eine vollflächige Verbindung handelt, welche flüssigkeits- und gasdicht ist. Zum anderen können diese Innenkonturen der Formgebung dienen. Die wenig verschleißfesten Werkzeuge aus der LIGA-Fertigung können durch diffusionsgeschweißte verschleißbeständigere ersetzt werden. Des Weiteren können mit diesem Rapid Tooling Verfahren Werkzeuge mit einem deutlich geringeren Zeitaufwand hergestellt werden.

Ein für die Industrie interessanter Punkt, ist die Automatisierung der Mikrospritzgussformherstellung nach diesem Verfahrensprinzip. Erste Konzepte liegen in der Literatur bereits vor und sollten noch weiter vorangetrieben werden (Pre05). Dabei sollten die hier vorgestellten Ergebnisse berücksichtigt werden.

Bei dem vorgestellten Rapid Tooling Verfahren, das auf einem laminierten Folienaufbau beruht, gibt es weitere Erkenntnisse, welche an dieser Stelle noch nicht genannt wurden:

- Die Möglichkeit der Zerlegung in dünne Bleche und in kompakte Teilstücke führt zu einer deutlichen Kostensenkung, da der Bedarf an präzisionsgeschliffenen Werkzeugnormalien sinkt. Auch können durch einen mehrteiligen Aufbau aus genormten Stammwerkzeug und wechselbaren Einsätzen die Baukosten eines Werkzeuges reduziert werden.
- Die Verfahrenskombination aus Laserschneiden und Diffusionsschweißen ist auch zum Herstellen größerer Werkzeuge, die Mikrostrukturen beinhalten, geeignet. Voraussetzungen sind Diffusionsschweißanlagen mit größeren Arbeitsvolumina. Entsprechende Anlagen sind auf dem Markt verfügbar.

Das Sonderschweißverfahren Diffusionsschweißen erfährt durch die vorgestellte Verfahrenstechnologie eine Erweiterung des Anwendungsfeldes. Weitere Anwendungen liegen im Bereich in der Mikromechanik. Dort Bauteile mit Strukturen im Mikrometerbereich benötigt. Bauelemente mit kontur- und funktionsangepassten Mikrostrukturen lassen sich durch schichtweisen Aufbau aus dünnen strukturierten Blechen oder Folien und anschließendem Diffusionsschweißen erzeugen. Die Strukturen im Mikrometer- und Nanometerbereich sind durch Laserstrahlschneiden, Wasserstrahlschneiden, Drahterodieren oder Aufdampfen herstellbar. Das Forschungsziel, eine Diffusionsschweißtechnologie zum Herstellen von Werkzeugen für das Mikrospritzgießen mit extrem kleinen und komplizierten Innenstrukturen sowie mit feinen Heiz- und Kühlkanälen und zur Fertigung von Bauteilen mit sehr kleinen Innenstrukturen zu entwickeln wurde erreicht. Aus dem Werkstoff 1.4301 (X5CrNi18.10) wurden massive Körper mit Innenstrukturen von ca. 100 x 100 μ m² angefertigt. Um dieses Ergebnis zu erzielen, waren sowohl FEM-Simulationen als auch Experimente notwendig. Neben der skalierungsbedingten Schweißprozessauslegung mussten weitere Prozesselemente angepasst werden. Die Integration von Ausgleichsflächen und das Entwickeln einer Schweißstrategie führte letztendlich zu den geforderten Schweißergebnissen ohne Lamellendeformation und fehlerhafte Verbindungen.

Damit kmU die im Forschungsvorhaben untersuchte Technologie anwenden können, bedarf es Empfehlungen für die gesamte Prozesskette. Hierfür erfolgten Untersuchungen zu verschiedenen Schneidverfahren und ihrer Beeinflussung der Schnittgeometrie. Im Verlauf des Vorhabens wurden ebenso unterschiedliche Positionierkonzepte experimentell untersucht und bewertet. Im Folgenden sind einige Empfehlungen zusammengefasst:

- 1. Bei der Verwendung neuer Werkstoffe ist eine Parameterverifizierung notwendig, da Legierungsbestandteile die Diffusionskoeffizienten verändern.
- 2. Eine Druckerhöhung im Aufheizzyklus führt bei Mikrostrukturen zu Deformationen.
- 3. Beim Diffusionsschweißen kommt es zu einer Rekristallisation des kaltverfestigten Gefüges und damit zu einer Minderung der Härte.
- 4. Komplizierte Innenkonturen mit großen Flächenunterschieden lassen sich ohne Deformation und mit vollflächiger Verschweißung in mehreren Schritten fügen.
- 5. Die Deformation von Lamellen über und unter den Mikrostrukturen wird durch eine Druckanpassung und durch die Integration von Ausgleichsflächen verringert.
- 6. Die Fehlerbilder, die durch Grat an den Schnittkanten entstehen sind:
 - Unvollständige Verschweißung
 - Einarbeitung des Grates in die Schnittfuge
- Der Grat an den Schnittkanten muss, um Schweißfehler zu vermeiden, f
 ür eine ideale Schwei
 ßung unter 10 μm liegen.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen 'Otto von Guericke' e. V. (AiF) (AiF-Nr.: 13.772 B/DVS-Nr.: 05.032) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS unterstützt. Für diese Unterstützung sei gedankt.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Univ.- Prof. Dr.-Ing. J. Wilden Verantwortlicher Projektleiter

8 Publikationen

8.1 Veröffentlichungen

Wilden, J.; Bergmann, J.P; Jahn, S.; Sagrauske, M.: Entwicklung und Bewertung eines diffusionsgeschweißten Werkzeuges für den Mikrospritzguss. In: Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen, 10. GMM Workshop, 2004, 271-278

Wilden, J.; Bergmann, J.P.: Niedrigtemperaturfügen durch Diffusionsschweißen, JoinTec, SLV Halle, 2005

8.2 Vorträge

Wilden, J.; Bergmann, J.P; Jahn, S.; Sagrauske, M.: Entwicklung und Bewertung eines diffusionsgeschweißten Werkzeuges für den Mikrospritzguss. 10. GMM Workshop: Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen, 2004

Wilden, J.; Bergmann, J.P.: Niedrigtemperaturfügen durch Diffusionsschweißen, JoinTec, SLV Halle, 2005

8.3 Poster

Rapid Tooling: Rapidtech 2004, Erfurt

Diffusionsschweißen: Schweißen und Schneiden 2005, Essen

8.4 Öffentliche Präsentation

Rapidtech 2004, Erfurt

Schweißen und Schneiden 2005, Essen

Internationales Wissenschaftliches Kolloquium 2005, Ilmenau

8.5 Auszeichnungen

Best Paper Auszeichnung: 10. GMM Workshop Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen, 2004

8.6 Diplomarbeiten

Sagrauske, M.: Entwicklung und Bewertung eines diffusionsgeschweißten Werkzeuges für den Mikrospritzguss

Knapp, S.: Untersuchungen der Randbedingungen für das Diffusionsschweißen von Mikrospritzgusswerkzeugen

9 Literatur

Schrifttum:

- [Bar99] Bartsch GmbH: Hochleistungswerkzeugstähle, Firmenschrift, Spießheim 1999
- [Bar00] Bargel, H. J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2000
- [Böh92] Böhme, D.; Hermann, F.-D.: Handbuch der Schweißverfahren Teil II: Autogentechnik, thermisches Schneiden, Elektronen-/Laserstrahlschweißen, Reib-, Ultraschall- und Diffusionsschweißen, Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verl., 1992
- [Bro05] Brockmann, C., S. Rupp: Spritzgießwerkzeuge thermische optimal auslegen, in: Kunststoffe 4/2005, Hanser Verlag, München, 2005
- [Cam99] Cam, G.; Bohm, K.-H.; Koçak, M.: Fachbeitrag: "Diffusionsschweißen Feingegossener Titanaluminide, Schweißen und Schneiden, Heft 8, Düsseldorf, DVS – Verlag, 1999
- [Cas01] Castolin GmbH: Stahlschlüssel Taschenbuch, Marbach/N., Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, 2001
- DIN 1910 Teil 2: Schweißen von Metall, Berlin (Beuth Verlag), 1977
- DIN 2310 DIN 2310 Teil 6: Thermisches Schneiden; Einteilung, Prozesse, Berlin (Beuth Verlag), 2003
- DIN 8580 Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung, Berlin (Beuth Verlag), 2003
- DIN EN DIN EN 10259: Kaltbreitband und Blech aus nichtrostendem Stahl, Grenzabmaße
- 10259 und Formtolerazen, 1997
- DIN ISO DIN ISO 13715: Werkstückkanten mit unbestimmter Form, Begriffe und Zeich-13715 nungsangaben, Berlin (Beuth Verlag), 2000
- DIN DIN 16766 Teil 1: Temperiersysteme für flüssige Medien, Anschlussnippel und 16766 Einbauräume werkzeugseitig, Berlin (Beuth Verlag), 2001
- [Dra99] Draugelates, U.; Schram, A.; Düwel, V.: Fachbeitrag: "Diffusionsschweißverbindungen zwischen Metall und Keramik mit veränderter Makrogeometrie der keramischen Fügefläche, Schweißen und Schneiden, Heft 4, Düsseldorf, DVS – Verlag, 1999
- [Dub02] "Dubbel interaktiv 2.0", basierend auf der 20. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 2002
- [DVS91] Katalog von Anwendungsbeispielen des Diffusionsschweißens, herausgegeben vom Arbeitskreis Diffusionsschweißen im Deutschen Verband für Schweißtechnik, Düsseldorf. 1991
- [DVS92] DVS Berichte, 3. Internationales Kolloquium Aachen Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen, Düsseldorf, DVS-Verlag, 1992
- [Erh93] Erhardt, K.-M.; Heine,A.; Pommersberg, H.: Laser in der Materialbearbeitung: Grundlagen des Lasers, Laseranlagen, Lasermaterialbearbeitung, Sicherheitsvorschriften und Arbeitsschutz, Würzburg, Vogelverlag, 1. Auflage 1993

[Ehr02]	Ehrfeld, W.: Handbuch Mikrotechnik, München, Wien, Hanser, 2002
[Fei01]	Feiten, K.: Angewandte Mikrotechnik, LIGA - Laser - Feinwerktechnik, Mün-
	chen, Hanser, 2001
[Fri01]	Fricke, B.: Laserstrahlschneiden und Kanten bei der Blechbearbeitung kombinie- ren, Schweißen und Schneiden, Heft 7, Düsseldorf, DVS – Verlag, 2001
[Fri04]	Fritz, A. H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik, Berlin, Heidelberg, Springer – Ver- lag, 2004
[Gün78]	Günther, WD.; Mehlhorn, H.; Wiesner, P.: Diffusionsschweißen, Berlin, VEB Verlag Technik, 1978
[Her93]	Herziger, G.; Loosen, P.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung, München; Wien, Hanser, 1993
[Ish87]	Ishida, Y. (Hrsg.): Fundamentals of diffusion bonding, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1987
[Joh01]	Johannaber, F.; Michaeli, W.: Handbuch Spritzgießen, München; Wien, Hanser, 2001
[Kaz85]	Kazakov, N.F. (Hrsg.): Diffusion Bonding of Materials, Mir Publishers, Moscow, 1985
[Lis82]	Lison, R.: Untersuchung der Herstellmöglichkeit und der Eigenschaften diffusi- onsgeschweißter Übergänge von den IVa, Va und VIa Metallen auf einen austeni- tischen oder ferritischen rost- und säurebeständigen Stahl, Dissertation TU Aa- chen, Aachen, 1982
[Mad01]	Madry, C.; Basler, U.; Köhler, G.: Fachbeitrag: "Diffusionsschweißen tempera- turempfindlicher Werkstoff über Zwischenschichten", Schweißen und Schneiden, Heft 11, Düsseldorf: DVS – Verlag, 2001
[Mn98]	Menges, Mohren: Spritzgießwerkzeuge, Anleitung zum Bau von Spritzgieß- Werkzeugen, München, Hanser, 1998
[Mic00]	Micheli, W.: Technologie des Spritzgießens, Lern- und Arbeitsbuch, München Wien, Hanser, 2000
[Min96]	Xiao, M.: Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO2 – und Nd: YAG – Lasern, B.G. Teubner, Stuttgart, 1996
[Ort95]	Ortloff, S.: Diffusionsschweißen hochfester Aluminiumlegierungen, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München, 1995
[Pet03]	Petsch, T.; Höche, T.; Hänel, J.; Albert, S.: Einsatz von Kurz – und Ultrakurz- pulslasern zur Materialbearbeitung in der Mikrotechnik", Mittweida, Wissen- schaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida – Lasertechnologien, 2003
[Pie00]	Piening A.: Vortrag zu: "Stand und Entwicklung des Laserstrahlschneidens, Schweißen und Schneiden, Heft 11, Düsseldorf, DVS – Verlag, 2000
[Pre05]	Prechtl, M., A. Otto, M. Geiger: Automated Metal Foil LOM – A Novel Technology for Rapid Tooling, in Lasers in Manufacturing 2005, AT-Verlag, Stutt- gart, 2005
[Raz95]	Razny, B.: Laserschneiden, Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verl., 1995

[Sch98]	Schiebock, P.; Weckerle, D.: Erodiertechnik – Senkerodieren, Schneiderodieren,
	Soest, Soester Fachbuchverlag GmbH, 1. Auflage 1998
[Sch01]	Schaumburg, C.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung, Dis- sertation, Stuttgart, 2001
[Sch04]	Schürer, J. et al.: Die Systemintegration mikrostrukturierter Apparate in konven-
	tionelle und innovative genormte chemische Anlagenumgebungen, in: Methoden
	und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen, 10. GMM Workshop,2004
[Tech04]	Techel, A.; Himmer, T.; Gnann, R.: Vortrag: "Lamellenwerkzeuge mit konturfol-
	gender Kühlung für Spritzguss- und Schäumwerkzeuge, Erfurt: Anwendertagung
	und Fachausstellung für Rapid – Technologie, Mai 2004
[Tew97]	Tewald, A.: Entwicklung und Bewertung eines schnellen Verfahrens zur vario-
	thermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung, Dissertation,
	Stuttgart, 1997
[Tew97a]	Tewald, A.: Mikrospritzgießen – Eine Übersicht, in: Festschrift 30 Jahre IKFF
	- Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart, 1997
[Vdi93]	Laser in der Materialbearbeitung. Schneiden mit CO2-Lasern. Band 1,
	Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993
[Wal99]	Walther, T.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung, Stuttgar- ter Kolloquium 1999, http://www.uni-stuttgart.de
[Wal02]	Walther, T.: Geräte und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperie- rung beim Mikrospritzgießen, Dissertation, Stuttgart, 2003
[Wie02]	Wiesner, P.; Sändig, S.; Leutbecher, T.: Rapid Tooling von Spritzgießwerkzeu-
	gen durch Laserschneiden und Diffusionsschweißen, Ilmenau, Gemeinsamer For-
	schungsbericht zum Verbundprojekt B 409-98016, Ilmenau, 2002
[Wie03]	Basler, U.; Knepper, P.; Reisgen, U.; Wiesner, P.: Fachbeitrag: "Gegenwärtiger
	Stand und Zukunftsaussichten der Sonderschweißverfahren - Teil 3: Diffusions-
	schweißen, Schweißen und Schneiden, Heft 1, Düsseldorf, DVS – Verlag, 2003
[Wie03a]	Wiesner, P., Eckstein, M., Sändig, S., Schmidt, J., Son, D.T., Vogel, H.: Rapid
	Tooling durch Diffusionsschweißen, DVS-Berichte, Band 192, Deutscher Verlag
	für Schweißtechnik GmbH
[Wil04]	Wilden, J.; Bergmann, JP.: Fachbeitrag: "Herstellen von Titan – Aluminium –
	und Titan - Stahl - Verbindungen, Schweißen und Schneiden, Heft 5, Düssel-

dorf, DVS – Verlag, 2004

Internetquellen

[wcha]	Charmilles Technologies GmbH
	http://www.charmilles.com
[wifu]	Institut für Umweltwissenschaften, Universität Zürich
	http://www.ifu.ethz.ch/
[wGWK]	GWK mbH Lieferprogramm, Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH,
	http://www.gwk-kierspe.com
[warb]	Arburg today, Online-Ausgabe 16, Frühjahr 2001,
	http://www.arburg.de
[whti]	Scholz "Hightech in Kunststoff"
	http://www.scholz-htik.de
[wgri]	Richard Griessbach Feinmechanik GmbH Luckenwalde
	http://www.griessbach.de
[wbay]	Bayer AG, Anwendungstechnische Informationen (ATI 916), Prozeßgrößen beim
	Spritzgießen
	https://plastics.bayer.de
[whas]	HASCO Hasenclever GmbH&Co.KG
	http://www.hasco.de
[wimm]	Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH
	http://www.imm-mainz.de
[winn]	Innova GmbH, Produktinformation zum System Contura
	http://www.innova.de
[wFZK]	Forschungszentrum Karlsruhe
	http://www.fzk.de