Mikropfeifen als Signalgeber im Ultraschallbereich

Micro Whistles for Signal Generation in the Range of Ultrasound

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

> vorgelegt von Felix Beckmann

Berichter: Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Werner Karl Schomburg Universitätsprofessorin Dr.-Ing. Katharina Schmitz

Tag der mündlichen Prüfung: 19.05.2020

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen (KEmikro) an der RWTH Aachen University.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Werner Karl Schomburg, der mir die Forschung an dieser Arbeit ermöglicht hat. Die intensive Betreuung und die hilfreichen fachlichen Anregungen und Hinweise haben entscheidend zu der vorliegenden Arbeit beigetragen.

Unserem Oberingenieur Dr.-Ing. Johannes Sackmann möchte ich für die konstruktiven fachlichen Diskussionen und seine eingebrachten Ideen danken.

Zudem danke ich meinen Kollegen Philipp, Sebastian, Julia, Christopher, Lukas, Andreas, Julia, Wei und Yujiang, sowie unserer Sekretärin Inge und unserem Werkstattleiter Thomas für das freundliche Miteinander und kurzweiligen Diskussionen.

Besonderer Dank gilt dabei unserem Werkstattleiter Thomas für seine technischen Anregungen, dem parallelen Werken zu nächtlichen Stunden und dem witzeln zwischendurch.

Ferner möchte ich mich bei den Studierenden Yiyang, Tianshu, Konstantin und Henrike bedanken, die durch ihre wissenschaftlichen Arbeiten einen Teil zu dieser Dissertation beigetragen haben.

Die Untersuchungen wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in einem KMU-innovativ Verbundprojekt mit der Fördernummer 16SV7530 gefördert, wofür ich mich bei dem BMBF bedanke. Zudem danke ich den Projektpartnern ambiHome GmbH, Enervision GmbH, Javox Solutions GmbH, Lebenshilfe Wohnverbund NRW gGmbH und dem Lehrstuhl für Kommunikationswissenschaft (COMM) der RWTH Aachen für die Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts.

Insbesondere danke ich meiner Familie und Freunden für die moralische Unterstützung.

Kurzfassung

Mikropfeifen emittieren bei mechanischer Betätigung eines Balgs ein frequenzkodiertes akustisches Signal im Ultraschallbereich, das Menschen nicht wahrnehmen und das sich, vor allem auf kurze Distanzen, zur Übertragung von Schaltsignalen eignet. Mikropfeifen benötigen weder elektronische Bauteile noch Batterien. Die Ultraschallsignale werden mit Mikrofonen aufgenommen.

In vorangegangenen Arbeiten wurden Mikropfeifen aus thermoplastischen Polymeren entwickelt und ihre möglichen Einsatzmöglichkeiten für Fernbedienungen aufgezeigt. Allerdings war die Herstellung der Mikropfeifen langwierig, da 15 verschiedene Prägewerkzeuge verwendet werden mussten um voneinander unterscheidbare Signale durch Frequenzkombinationen herstellen zu können. Zudem waren die Bälge und ihre Befestigung an den Mikropfeifen nicht stabil genug, um ihre Funktion über einen längeren Zeitraum sicherzustellen. Daher war ein zuverlässiger Einsatz als Signalgeber noch nicht gegeben.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden diese Probleme aufgegriffen und, auch im Hinblick auf eine Massenfertigung und einen späteren Einsatz als Teillösung in Altersgerechten Assistenzsystemen (AAL-Systemen), behoben.

Es wurde eine Multipfeife entwickelt, die sechs Mikropfeifen mit unterschiedlichen Frequenzen auf einem Polycarbonatplättchen zur Verfügung stellt und die Multipfeifen mittels Ultraschallfertigung hergestellt. Durch das Verschließen von vier der sechs Einzelpfeifen können alle 15 Frequenzkombinationen manuell eingestellt werden. Die Auslösung der Mikropfeifen geschieht durch einen aus 2-Komponenten-Silikon gefertigten Balg. Das Design des Balgs wurde so gewählt, dass die aufzubringende Kraft 7,5 N beträgt. Für die Befestigung des Balgs auf der Multipfeife wurde ein Klemmring aus PC entwickelt, der gefräst oder mittels 3D-Druck gefertigt und mittels Ultraschall aufgeschweißt wurde. Der Balg wurde anschließend in eine Nut zwischen Klemmring und Multipfeife eingesetzt. Mehrere verschiedene Bälge wurden auf einem pneumatischen Versuchsstand einem Dauertest unterzogen und ihre Betätigungen bis zum Versagen erfasst. Der für die Multipfeifen verwendete Balg versagte erst nach 5.200.000 Lastwechseln.

Damit für weitere Versuche eine Vielzahl an Multipfeifen zur Verfügung gestellt werden konnte, wurde eine automatisierte Anlage für das Ultraschallheißprägen von Polymerchips entwickelt. Die Anlage ist modular aufgebaut und an der Ultraschallschweißmaschine montiert. Durch das Verfahren von Pneumatikzylindern wurde ein Doppelchip mit den Maßen 121 × 50 × 1 mm³ aus einem Magazin auf die Folie über das Prägewerkzeug geschoben und dort durch einen Klemmrahmen fixiert. Nach dem Prägeprozess wurde das geprägte Plättchen von dem Werkzeug abgehoben, durch die Folienbahn einer Folien-Aufwickel-Einheit ausgeworfen und aufgewickelt. Mit dem vollautomatischen Betrieb des Prägeprozesses werden innerhalb von 10 Minuten 70 Multipfeifen auf einem etwa 2,5 m langen Folienabschnitt gefertigt.

Um den Einsatz von Multipfeifen als mögliche Teillösung in AAL-Systemen zu bestätigen, wurde ein mit Multipfeifen betriebener Schalter entwickelt. Der Schalter besitzt eine durch Magnetkraft hervorgerufene Kraftschwelle von 11,9 N. Diese muss bei der Betätigung überwunden werden, damit der Schalter abrupt auslöst und dabei die Multipfeife mit einem reproduzierbaren Signal betätigt. In jeweils 50 Messungen von sechs verschiedenen Pfeifenkombinationen wurden vier der Sollfrequenzpaare zu 100 % erfasst. Lediglich bei zwei Pfeifenkombinationen betrug die niedrigste Detektionsrate 98 %.

Abstract

Micro whistles emit a frequency-coded acoustic signal in the range of ultrasound when mechanically actuated by a bellows, which is outside of the audible range and suitable for the transmission of switching signals, especially for short distances. Micro whistles require neither electronic components nor batteries. The ultrasonic signals are received by microphones.

In previous works, micro whistles from thermoplastic polymers have been developed and their application for remote controls has been demonstrated. However, the production of the micro whistles was tedious, because 15 different embossing tools had to be used to produce distinguishable signals by frequency combinations. In addition, the bellows and their attachment to the micro whistles were not firm enough to ensure a working device for a long period of time. Therefore, a reliable use as a signal transmitter was not achieved.

Within the scope of the present work, these problems were addressed and resolved with regard to mass production and later use as a partial solution in Ambient Assisted Living systems (AAL).

A multi-whistle combining micro whistles with six different frequencies on a polycarbonate chip was developed and manufactured by ultrasonic manufacturing. By closing four of the six single whistles, 15 frequency combinations are set manually. The micro whistles are actuated by bellows made of 2-component silicone. The design of the bellow was selected such that the applied force is 7.5 N. To fix the bellows on the pipes, a clamping ring was developed and milled from PC or manufactured by 3Dprinting. This clamping ring was welded onto the chip by ultrasound. The bellow was then inserted into the groove between clamping ring and multi-whistle. Several different bellows were subjected to an endurance test on a pneumatic test stand and their operations until failure were recorded. The bellow used for the multi-whistle failed after 5,200,000 load cycles.

To fabricate a large number of multi-whistles for further experiments, an automated system for ultrasonic hot embossing of polymer chips was developed. The system has a modular structure and was mounted onto the ultrasonic welding machine. By the drive of pneumatic cylinders, two joined chips with the dimension $121 \times 50 \times 1 \text{ mm}^3$ were pushed from a magazine onto a polymer foil above an embossing tool and fixed there by a clamping frame. After the embossing process, the embossed chip was lifted off the tool, ejected together with the foil by a foil-winding-unit and wound up. With the fully automatic operation of the embossing process, 70 multi-whistles were produced on a 2.5 m long foil section in 10 minutes.

To verify the use of multi-whistles as a possible partial solution in AAL-systems, a multi-whistle operated switch has been developed. The switch has a force threshold of 11.9 N caused by magnetic force. This force must be overcome during actuation and, that way, the switch is actuating the multi-whistle with a reproducible pressure difference generating a reproducible signal. In 50 measurements of six different whistle combinations, four of the nominal frequency pairs were recorded by 100 %. Only two combinations of whistles showed a lowest detection rate of 98 %.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnisix					
1.	Ein	leitu	ing	.11	
2.	Sta	nd d	ler Technik	.14	
2	2.1	Her	stellungsverfahren von Mikrostrukturen aus Polymeren	.14	
	2.1	.1	Mikrospritzgießen	.14	
	2.1	.2	Heißprägen	.15	
	2.1	.3	Spritzprägen	.17	
	2.1	.4	Ultraschalltechnik als Bearbeitungsverfahren	.17	
	2	2.1.4	.1 Ultraschallschweißen	.19	
	2	2.1.4	.2 Ultraschallheißprägen	.20	
	2	2.1.4	.3 Ultraschallstanzen	.22	
2	2.2	Auto Poly	omatisierte Rolle-zu-Rolle Fertigung von Mikrostrukturen aus vmerfolien durch Ultraschallheißprägen	.23	
2	2.3	Mikı	ropfeifen	.25	
3.	Fer	tigu	ng von Multipfeifen	.28	
3	3.1	Des	sign	.28	
	3.1	.1	Konstruktion und Fertigung der Werkzeuge	.28	
3	3.2	Fert	tigung mittels Ultraschallverfahren	.30	
	3.2	.1	Ultraschallheißprägen	.31	
	3.2	.2	Ultraschallstanzen	.32	
	3.2	.3	Ultraschallschweißen	.33	
3	3.3	Aus	lösemechanismen	.34	
	3.3	.1	Polymerbälge	.35	
	3.3	.2	Silikonbälge	.37	
3	3.4	Ver	einigung von Multipfeife und Balg	.41	
	3.4	.1	Im Balg eingegossener Verschweißring	.41	
	3.4	.2	Klemmringe	.42	
4.	Exp	berin	nente zur Ermittlung der Haltbarkeit	.46	
۷	1.1	Erm der	nittlung der Versagensgrenze des Silikonbalgs bis zur Fehldetektion Frequenzen	.46	
	4.1	.1	Versuchsaufbau	.46	
	4.1	.2	Steuerung und Datenerfassung mittels LabVIEW	.47	
	4.1	.3	Ergebnisse	.48	
Z	1.2	Erm	nittlung der Versagensgrenze verschiedener Silikonbälge	.49	
	4.2	.1	Versuchsaufbau	.49	
	4.2	.2	Steuerung und Datenerfassung mittels LabVIEW	.50	

	4.2.3	Ergebnisse		52
5.	Autom	atisierte Anlage für die Chip-zu-Rolle Fertigung	von	- 4
	Mikros	strukturen		54
	5.1 Au	fbau und Funktionsablauf		54
	5.1.1			55
	5.1.2	Folien-Aufwickel-Einheit		58
	5.1.3			60
	5.1.4	Pragevorrichtung mit Klemmrahmen		62
	5.1.5			64
	5.1.6	Programmierung mittels Siemens LOGO!		65
	5.1.7	Gesamtautbau		/1
	5.2 Ch	ip-zu-Rolle Fertigung von Multipfeifen		74
	5.2.1	Materialien und Vorbereitungen		74
•	5.2.2	Experimentelle Validierung		()
6.	Entwic	cklung eines mit Multipfeifen betriebenen Schalters		81
	6.1 En	twicklungsprozess des Schalters		81
	6.2 Pro	btotypen des Schalters		82
	6.2.1	Prototyp mit einer Kraftschwelle durch Blattfedern		82
	6.2.2	Prototyp mit einer Kraftschwelle durch Federbugel		84
	6.2.3	Prototyp mit einer Kraftschwelle durch Magnetkraft		86
	6.3 Va	lidierung der Konzepte		87
	6.3.1	Uberprüfung der Kraftschwelle		88
	6.3.2	Detektierbarkeit der Ultraschallsignale		90
	6.4 Op ges	timierung des Prototyps mit einer Kraftschwelle durch Magnetkraf schlossenem Gehäuse	t und	95
7.	Fazit u	nd Ausblick		99
Li	teraturve	erzeichnis	1	01
Α.	Anhan	g	C	CV
	A.1 Da	tenblätter	C	:VI
	A.1.1	3D-Druck Filament "Formfutura ApolloX"	C	:VI
	A.1.2	3D-Druck Filament "colorFabb PLA/PHA Premium Filament"	C`	VII
	A.1.3	2-Komponenten Silikon "Wacker ELASTOSIL RT 625 A/B"	C∖	/
	A.1.4	Polycarbonatplatte "Makrolon GP clear 099", 1 mm		CX
	A.1.5	Polycarbonatfolie "Lexan FR83", 125 µm	C	XII
	A.1.6	Stabmagnet "S-03-08-N"	CX	ίV
	A.2 Lat	bVIEW Programmierung	CX	VII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung			
AAL	Altersgerechte Assistenzsysteme (engl.: Ambient Assisted Living)			
ASA	Acrylester-Styrol-Acrylnitril			
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff			
ERG	Energierichtungsgeber			
FFT	Fast Fourier Transformation			
HCL	Chlorwasserstoff			
HDPE	Ultrahochmolekulares Polyethylen (engl.: High Density Polyethylen)			
KEmikro	Lehr- und Forschungsgebiet Konstrukion und Entwicklung von Mikrosystemen			
PA	Polyamid			
PC	Polycarbonat			
PE	Polyethylen			
PEEK	Polyetheretherketon			
PET	Polyethylenterephthalat			
PLA	Polylactide			
PTFE	Polytetrafluorethylen			
PVC	Polyvinylchlorid			
TPU	Thermoplastisches Polyurethan			
US	Ultraschall			

1. Einleitung

Die Signalübertragungstechnik ist im Alltag nicht mehr wegzudenken. Besonders die Fernsteuerung von Hi-Fi- und Haushaltsgeräten oder Geräte der Gebäudeinstallation innerhalb geschlossener Räume spielen dabei eine entscheidende Rolle. Für die Signalübertragung dieser Gerätschaften werden in der Regel elektromagnetische Wellen im Funk- oder Infrarotfrequenzbereich eingesetzt. Daher werden für den Sender elektrische Bauteile und eine Energiequelle benötigt. Die Nachteile dieser Technologien liegen in der Umweltbelastung durch Batterien und der Verknappung der benötigten Rohstoffe, ebenso in einen Ausfall des Geräts bei erschöpfter Batteriekapazität und dem Aufwand des Batteriewechsels.

Der Einsatz von alternativen Signalübertragungstechniken erscheint sinnvoll, denn Anwendungsbereiche sind zu genüge vorhanden.

Dabei entwickeln sich auch neuere Anwendungsmöglichkeiten, wie als Teillösung in Altersgerechten Assistenzsystemen (AAL), denn der demografische Wandel und die damit einhergehende Zunahme des pflegebedürftigen Anteils der Bevölkerung stellt eine Herausforderung dar. Der stetig steigende Bedarf an Pflegekräften und Räumlichkeiten in Pflegeheimen für den wachsenden Anteil älterer Menschen kann durch technische Innovationen abgemildert werden. Ein Großteil der pflegebedürftigen Menschen wünscht sich so lange wie möglich in ihrer gewohnten Umgebung wohnen zu können. Dieses selbstbestimmte Leben im eigenen Heim kann durch den Einsatz Altersgerechter Assistenzsysteme und mobiler Pflegedienste erreicht werden. Kommerzielle AAL-Systeme, die flächendeckend eingesetzt werden, sind momentan nicht verfügbar. Unter anderem weil zu hohe Kosten anfallen oder die Systeme nicht in bestehende Wohnungen nachgerüstet werden können. Für den Einsatz von Bewegungsmeldern oder Kameras in der eigenen Wohnung fehlt die Akzeptanz.

Als alternative Signalübertragung, vor allem auf kurze Distanzen, eignet sich Ultraschall, der beispielsweise mit Hilfe einer Mikropfeife durch mechanische Energie erzeugt wird. Die Mikropfeifen emittieren bei mechanischer Betätigung eines Balgs ein frequenzkodiertes akustisches Signal im Ultraschallbereich [1, 2]. Durch ihre kostengünstige Bauweise aus thermoplastischem Polymer und Silikon werden keine elektronischen Bauteile oder Batterien benötigt. Zusammen mit einem Empfängermodul können die Mikropfeifen als Aktoren oder Sensoren eingesetzt werden. Die Anwendungsfelder als Aktor reichen dabei von einem nicht fest installierten Schalter für Licht oder Jalousien, bis zu alternativen Fernbedienungen und Tastaturen. Für den Einsatz als Sensor ist beispielsweise die Detektion des Öffnens oder Schließens von Fenstern und Türen z.B. für die Steuerung von Klimaanlagen denkbar.

In zwei vorangegangenen Dissertationen [1] und [2] wurden Mikropfeifen entwickelt und weiterentwickelt. Eine Mikropfeife ist wenige Millimeter lang und erzeugt bei mechanischer Betätigung eines Balgs ein, für das menschliche Gehör nicht wahrnehmbares, Ultraschallsignal im Bereich zwischen 20 und 38 kHz. Ultraschalltöne können, bspw. durch das Zuschlagen einer Tür, auch zufällig entstehen. Daher werden immer mindestens zwei Mikropfeifen simultan betrieben, damit es durch die Störgeräusche nicht zu Fehlinterpretationen kommt. Ein zufälliges Ultraschallsignal das genau zwei Frequenzen des Pfeifenpaares enthält ist nicht wahrscheinlich. Des Weiteren bleibt das Verhältnis der beiden Frequenzen annähernd konstant, auch wenn die Frequenzen streuen. Dieses Verhalten kann für eine Erkennung des Signals mit einbezogen werden. Um bei der Betätigung der Mikropfeifen ein frequenzkodiertes Signal zu erhalten, wurden diese bisher paarweise angeordnet und hergestellt. Dafür wurde für jedes Mikropfeifenpaar ein separates Herstellungswerkzeug benötigt. Die Herstellung von 15 Mikropfeifenpaaren gestaltete sich dadurch kompliziert und langwierig. Auch die Haltbarkeit der Bälge oder die Befestigung dieser waren für einen längerfristigen Einsatz nicht ausreichend.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb, die Herstellung der Mikropfeifen zu vereinfachen, ohne die Funktion zu beeinträchtigen und diese so auszulegen, dass mit geringerem Aufwand eine hohe Stückzahl hergestellt werden kann. Ebenso muss die Haltbarkeit für einen langlebigen Einsatz im häuslichen Umfeld gegeben sein. Des Weiteren sollte ein erster einsatzfähiger Prototyp eines Schalters entwickelt und erprobt werden.

Nach einem kurzen Überblick über die gängigen Herstellungsverfahren von Mikrostrukturen aus thermoplastischen Polymeren, wird auf die zur Herstellung von Mikropfeifen angewandte Verfahren eingegangen, das Ultraschallheißprägen, -schweißen und -stanzen. Anschließend werden das am KEmikro entwickelte Ultraschallheißprägen von Polymerfolien von Rolle-zu-Rolle und die Mikropfeifen vorgestellt. Aufbauend auf den zuvor erlangten Kenntnissen und festgestellten Problemen, setzen Kapitel 3 und 4 bei den Verbesserungen der Mikropfeifen an. Dazu wurde eine Multipfeife entwickelt, die alle sechs Mikropfeifen auf einem Polymerplättchen vereint, sodass diese miteinander kombiniert werden können. Dadurch vereinfacht sich auch der Herstellungsprozess, da nur noch ein Werkzeug für den Prägeprozess benötigt wird. Ebenfalls wurde ein neuer Balg hergestellt, auf seine Auslösekraft und Versagensgrenze überprüft und die Vereinigung mit der Multipfeife hergestellt.

Da eine Vielzahl von Multipfeifen als Aktoren für das Teststadium in einem AAL-System benötigt werden, wurde eine automatisierte Anlage für das Ultraschallheißprägen von Polymerchips entwickelt und getestet. Dadurch wird die Herstellung der Multipfeifen weiter vereinfacht und der zeitliche Aufwand der Herstellung verkürzt.

Abschließend wird in Kapitel 6 ein mit Mikropfeifen betriebener Schalter vorgestellt.

2. Stand der Technik

Das nachfolgende Kapitel beschreibt einige Grundlagen, die für die vorliegende Arbeit ausschlaggebend sind und an die diese anknüpft.

Zunächst werden drei etablierte Herstellungsverfahren vorgestellt, mit denen in Industrie und Forschung Mikrostrukturen in polymeren Werkstoffen erzeugt werden, ehe ein relativ junges Bearbeitungsverfahren unter Einsatz der Ultraschalltechnik erläutert wird. Anschließend wird das automatisierte Ultraschallheißprägen von Mikrosystemen in Polymerfolien beschrieben.

Ebenfalls wird der bisherige Forschungsstand der in dieser Arbeit weiterentwickelten Ultraschallpfeifen vorgestellt.

2.1 Herstellungsverfahren von Mikrostrukturen aus Polymeren

2.1.1 Mikrospritzgießen

Durch das Mikrospritzgießen können mikrostrukturierte Bauteile und Mikrosysteme in Mittel- und Großserien wirtschaftlich gefertigt werden. Dafür werden meist konventionelle Schneckenspritzgussmaschinen mit kleinsten Schneckendurchmessern von 14 mm verwendet. Für die Fertigung von Kleinstteilen mit Schussgewichten zwischen 0,1 g und 4 g werden spezielle Spritzgießaggregate (Abb. 1 (a)) eingesetzt.

Wenn die Polymerschmelze zu lange in der Schnecke verbleibt, beginnt sich das Polymer zu zersetzen. Das heißt Makromoleküle werden in kürzere Kohlenwasserstoffketten geteilt. Deshalb wird in einer kleinen Schnecke vorplastifiziert und mit einem externen Kolben eingespritzt. Durch die Schneckenvorplastifizierung wird eine gleichmäßige thermische und mechanische Aufarbeitung der Schmelze erreicht, ehe ein schmaler Kolben die Funktion des Einspritzens in das Werkzeug übernimmt. [3] Durch die genaue Dosierung lassen sich Wanddicken von unter 20 µm und Strukturdetails von 0,2 µm erreichen [4]. Die Fertigung der Bauteile geschieht durch das sogenannte Variothermverfahren mit besonderen Werkzeugen.



Abb. 1: Schematische Darstellung des Mikrospritzgießens. In Anlehnung an [5]

Das thermoplastische Polymer wird als Granulat in die Plastifiziereinheit gegeben, aufgeschmolzen und in den Einspritzkolben gefördert (Abb. 1 (b)). Das Werkzeug wird konstant auf Entformungstemperatur gehalten und der Bereich des Formnestes und des Angusses vor dem Einspritzvorgang durch eine elektrische Heizung kurzzeitig auf knapp unter Schmelztemperatur des Kunststoffes gebracht. Unter Vakuum wird anschließend das Werkzeug durch das Vorfahren des Kolbens mit der Schmelze gefüllt (Abb. 1 (c, d)). Das Werkzeug und der Kunststoff müssen nun wieder auf Entformungstemperatur abgekühlt werden, ehe das Bauteil ausgeworfen werden und der Einspritzvorgang wiederholt werden kann [3]. Aufgrund der zyklischen Temperierung lassen sich Zykluszeiten um ca. 5 min. erreichen. Ausschlaggebend ist dabei die Abkühlzeit bis zur Entformbarkeit, die mit der Wanddicke des Formteils etwa quadratisch ansteigt [4].

2.1.2 Heißprägen

Beim Spritzguss ist es nicht einfach, Mikrostrukturen auf einem dünnen Substrat herzustellen, weil der Formstoff in diesem Fall durch einen schmalen Spalt zugeführt werden muss, an dessen Ende eine Mikrokavität gefüllt werden muss. Außerdem ist die Herstellung eines Spritzgusswerkzeugs sehr aufwendig und teuer. Deshalb wird für die Herstellung dünnwandiger Teile mit Mikrostrukturen und in der Forschung gern das Heißprägen eingesetzt. Anders als beim Spritzgießen, wird für das Heißprägen eine thermoplastische Polymerfolie von 100 µm bis wenige Millimeter Dicke als Halbzeug verwendet. Dabei ist die Folie immer dicker als die Höhe der abzuprägenden Mikrostrukturen.



Abb. 2: Schematische Darstellung des Heißprägens. In Anlehnung an [6]

Eine Heißprägeanlage besteht in der Regel aus einer Vakuumkammer, die zwischen einer beweglichen Traverse eingespannt ist. In der Vakuumkammer befinden sich der mikrostrukturierte Formeinsatz und, ihm gegenüberliegend, eine Metallplatte mit rauer Oberfläche, die sogenannte Substratplatte. Auf die Substratplatte wird die Kunststofffolie platziert (Abb. 2 (a)) und die Vakuumkammer durch Fahren der Traverse verschlossen und evakuiert. Der Formeinsatz wird konstant mit einer vorab definierten Antastkraft auf die Folie gepresst, die anschließend durch das Aufheizen der Substratplatte und des Formeinsatzes homogen auf über Glasübergangstemperatur erwärmt wird (Abb. 2 (b)). Diese hohen Temperaturen sind notwendig, damit die geringe Menge an Kunststoff nicht direkt bei Kontakt mit der Form erstarrt. Nach Erreichen der Prägetemperatur verfährt die Traverse mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 mm/min bis zum Erreichen der Prägekraft und die Mikrostrukturen des Formeinsatzes füllen sich mit dem Kunststoff. Das Vakuum sorgt dafür, dass alle Kavitäten der Mikrostrukturen mit dem Polymer gefüllt werden und somit keine unvollständigen Prägungen oder Lufteinschlüsse entstehen. Durch das Nachregeln der Relativbewegung zwischen Formeinsatz und Substratplatte wird die Prägekraft konstant gehalten. Anschließend wird die Temperaturverteilung der Kunststoffschmelze homogenisiert und die für das Heißprägen typische Restschicht verkleinert. Das geschieht unter ständiger Nachregelung der Anpresskraft während der isothermen Haltezeit, sodass überschüssiges Polymer radial nach außen gepresst wird. Auch das folgende Abkühlen des Bauteils geschieht unter Beibehaltung der Anpresskraft, um beispielsweise die Schwindung zu reduzieren und ein Verklemmen des Formteils bei der Entformung zu vermeiden. Die Entformung (Abb. 2 (c)) geschieht durch die konstante Relativbewegung zwischen Substratplatte und Formeinsatz bei Temperaturen unterhalb der Erweichungstemperatur des Kunststoffes. Dabei haftet das Bauteil an der rauen Oberfläche der Substratplatte und kann nach weiterer Kühlung entnommen werden. [7, 8, 9, 10]

2.1.3 Spritzprägen

Das Spritzprägen vereint Elemente des Spritzgießens und Heißprägens. Das Verfahren wird häufig verwendet um dickwandige Formteile verzugsfrei oder dünnwandige Teile mit langen Fließwegen herzustellen. Aufgrund der Maßhaltigkeit eignet sich das Spritzprägen besonders für optische Bauteile, wie Linsen, und Speichermedien (CDs, DVDs).

Der Prozess wird in zwei Schritten durchgeführt. Eine vordefinierte Menge an Kunststoffschmelze wird in das Werkzeug eingespritzt. Das Werkzeug ist dabei um einen Prägespalt geöffnet (Abb. 3 (a)). Die Angussöffnung wird daraufhin verschlossen, um ein Rückfließen der Schmelze in den Einspritzkolben zu vermeiden und das Werkzeug schließt sich zu seiner endgültigen Form (Abb. 3 (b)). Dabei wird die Schmelze in der Eorm vorteilt und füllt die



Abb. 3: Schematische Darstellung des Spritzprägevorgangs. In Anlehnung an [11]

Schmelze in der Form verteilt und füllt diese aus. [3, 5]

2.1.4 Ultraschalltechnik als Bearbeitungsverfahren

Die Ultraschallfertigung wird in der Industrie bereits seit den sechziger Jahren zum Verschweißen von Massenartikeln wie Spielzeugen und Haushaltwaren, sowie für das Folienverschweißen in der Verpackungsindustrie oder als Verfahren zum Bearbeiten von Werkstücken eingesetzt [5, 12]. Dabei werden die Bauteile mittels Ultraschall (US) bspw. verschweißt, geprägt, vernietet oder ausgestanzt [13, 14].

Am Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen (KEmikro) wird seit einigen Jahren eine weitere Einsatzmöglichkeit der Ultraschalltechnik praktiziert, die Herstellung von Mikrosystemen. Dabei werden Mikrosysteme, wie bspw. Mikrofluidiksysteme, durch eine Kombination aus Ultraschallheißprägen, -stanzen und -schweißen gefertigt. [15, 16, 17, 18, 19]

Im Mittelpunkt der Herstellungsverfahren steht die Ultraschallschweißmaschine (Abb. 4). Diese besteht aus drei wesentlichen Komponenten, dem Generator, dem Schwinggebilde und einer (in der Regel pneumatischen) Vorschubeinheit. Sie nutzt Ultraschallschwingungen, um Reibungswärme in polymeren Werkstoffen zu generieren und diese lokal aufzuschmelzen [5, 14].



Abb. 4: Schematische Darstellung einer Ultraschallschweißmaschine. In Anlehnung an [5]

Der Generator wandelt die Netzfrequenz (50 Hz) in die Ausgangsfrequenz um, die zwischen 20 kHz und 70 kHz liegt. Ein piezoelektrischer Konverter des Schwinggebildes setzt die elektrische in eine mechanische Schwingung um und leitet diese über den Booster in die Sonotrode und anschließend in das Bauteil. Der Anpressdruck zwischen Sonotrode, Werkstück und Amboss wird durch die Vorschubeinheit aufgebracht [12]. Eine Regelung stellt sicher, dass die Amplitude der Ultraschallschwingung unabhängig von der Anpresskraft konstant gehalten wird.

Allgemein betrachtet gleicht sich der Funktionsablauf beim Ultraschallheißprägen, -schweißen und -stanzen und unterscheidet sich lediglich in den einzustellenden Parametern wie Amplitude, Schweiß- und Abkühlzeit, oder dem eingesetzten Werkzeug.

Durch das Ultraschallheißprägen werden Mikrostrukturen innerhalb weniger Sekunden aus thermoplastischen Werkstoffen hergestellt. Durch Ultraschallschweißen werden anschließend verschiedene Bauteile miteinander verbunden, sodass innerhalb weniger Sekunden einsatzfähige Mikrosysteme entstehen. Materialänderungen werden innerhalb von Minuten und Designanpassungen innerhalb weniger Stunden durchgeführt. Deshalb und aufgrund der niedrigen Investitionskosten von wenigen 10.000 € eignet sich die Ultraschallfertigung vor allem für das Versuchsstadium in der Forschung oder für Kleinstserien. Memering und Maurer haben das Ultraschallheißprägen in [20] und [21] automatisiert und gezeigt, dass sich das Verfahren auch für eine Rolle-zu-Rolle-Serienfertigung eignet (vgl. Kapitel 2.2).

2.1.4.1 Ultraschallschweißen

Das Ultraschallschweißen gehört, neben dem Reibschweißen, zu dem "Schweißen durch Bewegung" [4, 12]. Bei der Herstellung von Mikrosystemen wird das Ultraschallschweißen z.B. verwendet, um zuvor hergestellte Mikrokanäle mit einer Deckelfolie zu verschließen. Die beiden Fügepartner werden zwischen Sonotrode und Amboss platziert (Abb. 5 a). Die Sonotrode wird bis zum Erreichen einer definierten Kraft auf die Polymerteile abgesenkt und der Ultraschall eingeleitet. Auf Grund der inneren Reibung, der Grenzflächenreibung in der Fügefläche und der daraus resultierenden Wärme verschmelzen die beiden Fügepartner miteinander (Abb. 5 b). Nach Abschalten des Ultraschalls, kühlen die Bauteile ab, erstarren im Schmelzbereich und bilden dort eine stoffschlüssige Verbindung (Abb. 5 c).



Abb. 5: Schematische Darstellung des Ultraschallschweißens für die Deckelung von ultraschallheißgeprägten Mikrosystemen. In Anlehnung an [13, 22]

Bei diesem Verfahren sind erhabene Strukturen notwendig. Durch diese sogenannten Energierichtungsgeber (ERG) wird die Ultraschallenergie auf eine kleinere Fläche konzentriert, sodass ein geringerer Energieeintrag benötigt wird und der Prozess kontrollierter ablaufen kann. Durch diese ERG wird festgelegt, an welchen Stellen eine Verschweißung stattfinden soll [4, 5, 12, 14].

2.1.4.2 Ultraschallheißprägen

Durch das Ultraschallheißprägen werden Mikrostrukturen wie z.B. Mikrokanäle in thermoplastischen Polymerfolien oder -platten hergestellt. Dabei werden Strukturen mittels Ultraschall und einem Werkzeug ins Rohmaterial abgeformt. Als Rohmaterial werden thermoplastische Polymere in Form von Folien ($15 \mu m - 500 \mu m$ dick) oder Platten ($500 \mu m - 4000 \mu m$ dick) verwendet. Das thermoplastische Halbzeug sollte dabei aus einem Stapel von mindestens zwei Folien, Platten oder einer Kombination aus beidem bestehen, da dies die Reibungswärme und somit auch die Generierung von Schmelze fördert. Die Anzahl variiert je nach benötigtem Schmelzvolumen der Struktur und der Dicke des Halbzeugs [14].

Das Prägewerkzeug ist die Negativform der gewünschten Strukturen. Die Herstellung des Prägewerkzeugs kann durch verschiedene Verfahren, wie bspw. Lithographie, erfolgen [23]. Das meist eingesetzte Verfahren ist allerdings die Herstellung aus Aluminiumhalbzeugen mittels einer Hochpräzisionsfräse und Mikro-Fräsern.



In Abb. 6 ist der Ablauf des Ultraschallheißprägeprozesses für Folien und Platten dargestellt.

Abb. 6: Schematische Darstellung des Ultraschallheißprägens in einen Folienstapel (links) und einer Platte (rechts). In Anlehnung an [13, 22]

Zunächst wird das thermoplastische Halbzeug unter der Sonotrode auf dem Werkzeug platziert (Abb. 6 a). Der Polymer-Stapel wird anschließend von der Sonotrode auf das Werkzeug gepresst und der Ultraschall eingeleitet. Durch die vom Ultraschall induzierte Reibung zwischen Werkzeug und Kunststoff und auch zwischen den Polymerlagen wird dieser an den abzuformenden Strukturen lokal aufgeschmolzen und passt sich deren Form an (Abb. 6 b). Anschließend wird der Ultraschall abgeschaltet und die entstandene Reibungswärme wird in die Sonotrode und das Werkzeug abgeleitet, sodass das Polymer in der durch das Werkzeug vorgegebenen Form erstarrt. Nach Hochfahren der Sonotrode kann das Bauteil von dem Werkzeug entformt und entnommen werden (Abb. 6 c). [24]

Da das Werkzeug bei diesem Verfahren unverändert bleibt, kann es erneut verwen-

det werden. Memering nutzte diesen Vorteil, um Mikrostrukturen in einem Rolle-zu-Rolle Verfahren kontinuierlich in Folien zu prägen (vgl. Kap. 2.2) [20].

2.1.4.3 Ultraschallstanzen

Der Ablauf des Ultraschallstanzens ähnelt dem des Ultraschallheißprägens. Allerdings gibt das Stanzwerkzeug eine Schnittkante vor, mit der Material aus einer Polymerfolie herausgetrennt wird (Abb. 7). Durch die Schwingungen in der Sonotrode wird zudem Reibungswärme an der Schnittkante erzeugt, die diese plastifiziert und versiegelt. Auf Grund des Ultraschalls wird für den Trennprozess eine geringe Anpresskraft benötigt und somit der Verschleiß des Werkzeugs reduziert [14]. Da die Polymerfolie bei diesem Verfahren durchstochen wird, ist der Einsatz einer Pufferfolie sinnvoll. Diese befindet sich zwischen Sonotrode und zu bearbeitender Polymerfolie. Die Pufferfolie sorgt für einen ausreichenden Abstand zwischen Stanzwerkzeug und Sonotrode, sodass keine Beschädigungen durch ein Aufeinandertreffen entstehen. Mit dem Ultraschallstanzen lassen sich bspw. Deckelfolien mit Öffnungen versehen.



Abb. 7: Schematische Darstellung des Ultraschallstanzens für die Deckelung von ultraschallheißgeprägten Mikrosystemen. In Anlehnung an [13]

2.2 Automatisierte Rolle-zu-Rolle Fertigung von Mikrostrukturen aus Polymerfolien durch Ultraschallheißprägen

Memering hat in seiner Dissertation [20] an der Problematik der händischen Positionierung und dem damit einhergehenden zeitlichem Faktor angesetzt und das Ultraschallheißprägen von Polymerfolien automatisiert. Durch die Rolle-zu-Rolle Fertigung von Mikrostrukturen in thermoplastische Polymerfolien durch Ultraschallheißprägen kann die Zykluszeit reduziert und die händischen Positionierung des Rohmaterials unter der Sonotrode eliminiert werden.

Neben der Ultraschallschweißmaschine besteht die automatisierte Anlage (Abb. 8), aus drei Hauptkomponenten; der Abwickeleinheit, der Positionier- und Fixiereinheit und der Aufwickel- und Fördereinheit.

Auf einem rotierenden Spannkörper der Abwickeleinheit lassen sich einzelne Folienrollen einspannen. Dabei können bis zu sechs Folienrollen auf drei Spannkörpern befestigt werden. Die einzelnen Folien werden durch einen Spannhebel und Umlenkrollen unter Spannung gehalten und vor der Positionier-/ Fixiereinheit zusammengeführt. Anschließend wird der Folienstapel durch den Spannrahmen zu der Aufwickel- und Fördereinheit geführt. Die Positionier- und Fixiereinheit ist auf einer Montageplatte befestigt und kann als Ganzes auf der Ambossplatte der Ultraschallschweißanlage unter der Sonotrode montiert werden. Dadurch wird eine konstante Position des Werkzeugs erreicht, und die Maschine kann schnell und einfach vom automatischen in den händischen Betrieb zurückgebaut werden. Die Positionier- und Fixiereinheit (Abb. 9) besteht aus einer temperierten Werkzeugaufnahme und einem, durch Pneumatikzylinder betriebenen, Spannrahmen.



Abb. 8: Anlage für das automatisierte Ultraschallheißprägen von Polymerfolien von Rolle-zu-Rolle [20]

Die einzelnen Folien gelangen als Folienstapel in den Spannrahmen über das strukturierte Werkzeug. Durch das pneumatische Absenken des Spannrahmens wird der Folienstapel auf dem Werkzeug positioniert und fixiert. Nach dem Ultraschallheißprägen wird der Spannrahmen angehoben und der Folienstapel mit den abgeprägten Strukturen durch Entformbleche vom Werkzeug gelöst. Anschließend werden die Mikrostrukturen durch eine motorbetriebene Förder- und Andruckrolle hindurch auf eine Aufwickelrolle gewickelt. Dabei werden Förderweg und -geschwindigkeit an einem Steuergerät eingestellt.

Die experimentelle Validierung erfolgte durch die Herstellung verschiedener Mikrosysteme, wie einem T-Mischer oder einem mäanderförmigen Mikrokanalsystem aus ultrahochmolekularem Polyethylen (HDPE). Mit dem automatisierten Ablauf konnten so für einfache Strukturen Zykluszeiten von 3 s erreicht werden. Bei größeren Strukturen lag diese zwischen 4 – 6 s. Somit konnte im Vergleich zu der händischen Herstellung eine Zeitersparnis von bis zu 85 % erreicht werden. [20, 21]



Abb. 9: Positionier- und Fixiereinheit [25]

Da das Prägeergebnis temperaturabhängig ist und sich das Werkzeug und die Sonotrode erwärmen, hat dies auch einen Einfluss auf die Zykluszeiten. Daher wurde der Temperaturverlauf während der automatischen Prägungen mittels Thermoelementen gemessen. Dabei fällt auf, dass sich die Temperatur erst nach einer Einschwingphase asymptotisch einem konstanten Temperaturverlauf annähert. Zu hohe Temperaturen führen zu einer Verformung der geprägten Strukturen oder Rissbildung im Polymer, weshalb eine ausreichend lange Abkühlphase zwischen den Prägungen eingehalten werden muss.

Bei der Verwendung der Fördereinheit kam es teilweise zu Komplikationen im Ablauf. Zum einen wurden Doppelprägungen festgestellt, die daraus resultierten, dass die geprägten Mikrostrukturen aufgrund der geringen Radien von Antriebs- und Anpressrolle verklemmten und damit eine kontinuierliche Förderung behinderten. Eine weitere Problematik war das nicht Erreichen des eingestellten Förderweges und der damit einhergehenden Varianz in den Abständen zwischen den Prägungen. [20, 21]

2.3 Mikropfeifen

Am KEmikro wurde untersucht, wie Ultraschall ohne Einsatz elektronischer Bauteile erzeugt werden kann, und im Zuge dessen Mikropfeifen entwickelt [1, 2]. Diese können preiswert durch Ultraschallfertigung (vgl. Kap. 2.1) aus thermoplastischen Kunststoffen hergestellt werden.

Das Design einer Mikropfeife orientiert sich an oben verschlossenen Orgelpfeifen. Sie ist wenige Millimeter lang, 1,5 mm breit, 0,7 mm hoch (0,25 mm an der Verjüngung). und besteht aus einer Einlassöffnung, einem Resonanzraum und dem Labium (Abb. 10 a). Über der Einlassöffnung befindet sich ein Balg als Luftreservoir.



Abb. 10: Schematisch dargestellter Querschnitt einer Mikropfeife im Ausganszustand (a) und bei Betätigung des Balgs (b) [26]

Wird dieser mechanisch betätigt, strömt die Luft durch die Einlassöffnung in den Resonanzraum und durch das Labium und emittiert ein ca. 5 ms langes Signal im Bereich einer Oktave zwischen 20 und 38 kHz (Abb. 10 b). Die jeweilige Frequenz der Ultraschallwelle ist dabei von der Geometrie und Länge des Resonanzraums abhängig. Da die für Menschen hörbaren Frequenzen bis ca. 18 kHz niedriger sind, wird dieses Frequenzspektrum vom

menschlichen Gehör nicht mehr wahrgenommen [26]. Ultraschalltöne werden in der natürlichen Umgebung auch zufällig, wie z.B. durch das Zuschlagen einer Tür oder das Fallenlassen eines Schlüsselbundes auf den Boden, erzeugt.



Abb. 11: Frequenzspektrum einer Kombination von zwei Mikropfeifen [2]

Daher werden mindestens zwei Mikropfeifen simultan ausgelöst, die erzeugten Signale von einem Mikrofon erfasst und über ihre charakteristischen Frequenzspektren unterschieden. Dies geschieht durch die Auswertung des Signals anhand einer Fast Fourier Transformation (FFT) und der anschließenden Zuordnung der detektierten Frequenzen und deren Verhältnis zueinander zu einem Mikropfeifenpaar. Das charakteristische Frequenzspek-

trum des Mikropfeifenpaares (Abb. 11) kann so auch von zufällig erzeugten Ultraschalltönen differenziert werden. Dadurch, dass das akustische Signal rein mechanisch durch den Druck auf einen Balg erzeugt wird, werden weder Batterien noch elektronische Bauteile benötigt. Ibargüen beschreibt in [2] die Möglichkeit, Mikropfeifen durch den Einsatz mehrerer im Abstand zueinander stehender Mikrofone und der Erfassung der Laufzeitunterschiede der Signale zu orten. Die Herstellung der Mikropfeifen geschieht in vier Schritten mittels Ultraschallfertigung. Die Pfeifenkanäle werden mittels Ultraschallheißprägen in eine Kunststoffplatte abgeformt und die Deckelfolie durch Ultraschallstanzen mit Öffnungen versehen. Anschließend wird die Deckelfolie durch Ultraschallschweißen stoffschlüssig mit den Pfeifenkanälen vereint. In einem anschließenden Schritt wird der Balg über den Einlassöffnungen fixiert.

In Kapitel 3 werden das Design und die Herstellung der Mikropfeifen intensiver behandelt.

3. Fertigung von Multipfeifen

In der vorangegangenen Arbeit von Ibargüen [2] wurden die Mikropfeifen paarweise angeordnet und gefertigt, um bei Auslösung ein kodiertes Frequenzspektrum zu erhalten und das Signal eindeutig erkennen zu können.

Allerdings mussten so bei sechs verfügbaren Mikropfeifen, insgesamt 15 verschiedene Werkzeuge hergestellt werden, um alle möglichen Pfeifenkombinationen abzudecken. Um das Herstellungsverfahren zu erleichtern und das ständige Austauschen des Werkzeugs zu vermeiden, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Multipfeife entwickelt. Die Multipfeife vereint alle sechs Mikropfeifen auf einem Polymerplättchen, sodass für die Herstellung nur noch ein Werkzeug benötigt wird.

3.1 Design

Das Design der Mikropfeifen orientiert sich an den Maßen der von Ibargüen hergestellten Pfeifenkörpern. Eine Mikropfeife ist 1,5 mm breit und 0,7 mm hoch (0,25 mm an der Verjüngung). Die Länge der Verjüngung beträgt 3 mm. Dabei unterscheiden sich die Mikropfeifen lediglich in der Länge des Resonanzraums, die ausschlaggebend für die Frequenz ist. Die Länge der sechs Resonanzräume nimmt von 2,25 mm jeweils in 0,25 mm Schritten bis zu 3,5 mm zu. Da sichergestellt werden muss, dass alle sechs Mikropfeifen untereinander kombiniert werden können, beträgt die Länge der Einlassöffnung 13 mm.

3.1.1 Konstruktion und Fertigung der Werkzeuge

Die für die Fertigung der Multipfeife hergestellten Aluminiumwerkzeuge wurden mit der 3D-CAD-Software "PTC Creo Parametric 3.0" konstruiert und anschließend mit der Fräsmaschine "M7HP" der Firma Datron gefertigt.

Für das Prägewerkzeug (Abb. 12) wurden die Negativstrukturen der sechs Mikropfeifen in Abständen von jeweils 1,8 mm parallel zueinander auf einem Volumenkörper positioniert. Um bei dem späteren Ultraschallprägevorgang eine homogenere Energieverteilung zu erreichen, wurden die Mikropfeifen so angeordnet, dass die Länge ihres Resonanzraums zur Mitte hin abnimmt. Die Einlassöffnungen befinden sich dabei alle auf einer Geraden. Um die Pfeifenkörper herum wurden



Abb. 12: CAD-Modell des Prägewerkzeugs in der Aufsicht

im Abstand von 0,3 mm weitere Strukturen vorgesehen, die Negativformen von Gräben und Energierichtungsgebern (ERG). Die ERG werden beim Verschweißen von der Deckelfolie benötigt und die Gräben dienen als Auffangbecken für die überschüssige Schmelze, damit diese nicht in die Pfeifenkanäle gelangt.

Für das konstruierte Modell wurde anschließend eine Fräsdatei erstellt, in der der Fräsweg, die Reihenfolge, in der das Material entfernt werden soll, und die jeweils dazu verwendeten Fräser festgelegt wurden. Als Halbzeug wurde ein Aluminiumblock in den Fräsraum eingespannt, anschließend die Datei auf die Fräsmaschine übertragen und der Fräsvorgang automatisch ausgeführt.

Für das **Stanz-** und **Schweißwerkzeug** wurde das gleiche oben beschriebene Verfahren zur Herstellung verwendet. Die Werkzeuge unterscheiden sich jedoch in Ihrem Design. Auf dem Stanzwerkzeug (Abb. 13 (a)) befinden sich 1 mm hohe und auf ihrer Oberseite 150 µm breite Strukturen, deren Seitenwände mit einem Winkel von 60° zur Senkrechten stehen. Das Schweißwerkzeug (Abb. 13 (b)) besteht aus einem 500 µm hohen, 22,5 mm breiten und 24 mm langen Plateau.

Die Werkzeuge wurden für die händische Herstellung einzelner Multipfeifen verwendet, um diese auf Funktion und Haltbarkeit zu überprüfen. Der Herstellungsprozess der einzelnen Multipfeifen ist in Kapitel 3.2 beschrieben. Für das automatisierte Prägen der Multipfeifen (vgl. Kap. 5) wurden die Werkzeuge teilweise überarbeitet.



Abb. 13: CAD-Modelle des Stanzwerkzeugs (a) und Schweißwerkzeugs (b) in der Aufsicht

3.2 Fertigung mittels Ultraschallverfahren

Die Multipfeifen wurden mittels Ultraschallheißprägen, -stanzen und -schweißen auf der Ultraschallschweißmaschine 2000IW+ von Fa. Branson Ultraschall hergestellt. Die Auflagefläche der verwendete Sonotrode betrug 40 × 60 mm². Als Halbzeug zur Herstellung der Multipfeifen wurde Polycarbonat (PC) gewählt, da es in vorangegangenen Versuchen fehlerfreie Prägungen ermöglichte und einfach zu beschaffen ist. Grundsätzlich ist eine Fertigung aus allen thermoplastischen Kunststoffen wie beispielsweise Polyvinylchlorid (PVC) möglich. PVC besitzt eine amorphe Struktur und ein viskoelastisches Verhalten. Dadurch und durch seine Glasübergangstemperatur von ca. 80 °C eignet es sich für Prägungen bei geringer Temperatur. Allerdings wurden in Prägungen der Vorversuche dunkle Stellen festgestellt, die die Eigenschaften des Polymers beeinträchtigen können und eine Säure abgeben. Diese Stellen entstehen durch einen Zersetzungsprozess, der Dehydrochlorierung unter Abspaltung von Chlorwasserstoff (HCI) [2].

Die Multipfeifen wurden durch drei separate Arbeitsschritte mit den oben genannten Werkzeugen hergestellt. Die an der Ultraschallmaschine eingestellten Herstellungsparameter für die jeweiligen Arbeitsschritte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

	Prägen	Stanzen	Schweißen
Triggerkraft [N]	393	67	67
Druckkraft [N]	2280	1368	684
Ultraschalldauer [s]	0,8	0,09	0,36
Ultraschallamplitude [µm]	25,6	32	32
Abkühlzeit [s]	4	1,5	1,5

Tab. 1: Herstellungsparameter der Ultraschallfertigung von Multipfeifen [24]

3.2.1 Ultraschallheißprägen

Durch das Ultraschallheißprägen wurden die fluidischen Strukturen der Multipfeife erzeugt. Dazu wurde das Werkzeug unter der Sonotrode montiert. Auf dem Werkzeug wurden anschließend eine 125 µm dicke PC-Folie und eine 1 mm dicke PC-Platte unter der Sonotrode befestigt (Abb. 14 (a)). Das Werkzeug wurde mittels Temperaturregler "1800P-DRR0IV-3621" der Firma Horst-Gefran und einem Heizelement auf 100 °C erhitzt, sodass die zur Erhitzung des Polymers bis zur Glasübergangstemperatur von PC (148 °C) durch Ultraschall aufzubringende Energie reduziert wurde.



Abb. 14: Prinzipdarstellung des Ultraschallheißprägens (a) und Modell des gefertigten Polymerplättchens mit abgeprägten Mikropfeifen (b, oben) und Energierichtungsgebern mit Gräben (b, unten)

Anschließend wurde der Folien-Platten-Stapel von der Sonotrode auf das Werkzeug gepresst und der Ultraschall eingeleitet. Zwischen den beiden Polymerlagen und zwischen Werkzeug und Kunststoff wird vom Ultraschall Reibung induziert. Durch die daraus resultierende Reibungswärme wird das Polymer lokal an den abzuformenden Strukturen aufgeschmolzen und passt sich deren Form an. Nach 0,8 s wird der Ultraschall abgeschaltet, die Wärme wird über die Sonotrode und das Werkzeug durch Wärmeleitung abgeleitet und das Polymer erstarrt in den Strukturen des Werkzeugs. Nach der Abkühlzeit von 4 s werden die Plättchen mit den abgeprägten Mikrostrukturen (Abb. 14 (b)) vom Werkzeug entfernt. Insgesamt dauert der Ultraschallheißprägeprozess somit nur etwa 5 s. [24]

3.2.2 Ultraschallstanzen

Die Deckelfolie der Multipfeifen wurde mittels Ultraschallstanzen vorbereitet. Dazu wurden die Einlassöffnungen und das Labium mit Hilfe des Stanzwerkzeugs in eine 125 µm dicke PC-Folie gestanzt. Um die Sonotrode vor Beschädigungen zu schützen und dem Verschleiß des Werkzeuges entgegenzuwirken, wurde eine 150 µm dicke Folie aus PEEK (Polyetheretherketon) zwischen PC-Folie und Sonotrode gelegt (Abb. 15 (a)). Der Ultraschall wird bei dem Stanzen nicht dafür verwendet, das Polymer aufzuschmelzen und in Form zu bringen, sondern lediglich, um durch die Reibung und die aufgebrachte Kraft die Folie auszustanzen. Jedoch sorgt die Reibungswärme an der Schnittkante dafür, die diese plastifiziert und versiegelt wird. Die mit Öffnungen versehene Deckelfolie (Abb. 15 (b)) kann nun für den nachfolgenden Herstellungsschritt verwendet werden. [24]



Abb. 15: Prinzipdarstellung des Ultraschallstanzvorgangs (a) und Modell der gefertigten Folie mit ausgestanzten Öffnungen (b)

3.2.3 Ultraschallschweißen

Im dritten Arbeitsschritt wurden die geprägten Mikrostrukturen durch Ultraschallschweißen mit der gestanzten Deckelfolie vereint. Dazu wurden beide Komponenten übereinander positioniert und auf das Verschweißwerkzeug gelegt (Abb. 16 (a)). Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Öffnung des Labiums mittig über der oberen Kante der Verjüngung positioniert wird. Durch den Ultraschall werden die ERG lokal aufgeschmolzen und durch die aufgebrachte Kraft der Sonotrode zusammengepresst. Das geschmolzene Polymer der ERG sorgt dafür, dass die Deckelfolie stoffschlüssig mit dem geprägten Polymerplättchen verbunden wird. Die überschüssige Schmelze wird in den eingeprägten Gräben aufgefangen, sodass die mikrofluidischen Kanäle der Mikropfeifen nicht verstopfen (Abb. 17). Nach der Abkühlzeit kann die Multipfeife (Abb. 16 (b)) entnommen werden. [24]



Abb. 16: Prinzipdarstellung des Ultraschallschweißvorgangs (a) und Modell der gefertigten Multipfeife (b)



Abb. 17: Energierichtungsgeber mit seitlich anliegenden Gräben für überflüssige Schmelze (a) und das verschweißte System (b) [14]

3.3 Auslösemechanismen

Die Mikropfeifen emittieren ihr Signal durch das Durchströmen von Luft. Als Luftzufuhr eignen sich beispielsweise Kolben oder eine kontinuierliche Versorgung durch eine Luftdruckquelle. Eine alternative Quelle für die autarke Luftversorgung bei kleinem Bauraum bietet der Einsatz eines Balgs, der über den Einlassöffnungen der Multipfeife platziert und mechanisch betätigt wird. Der Balg kann alternativ räumlich von der Multipfeife entkoppelt und über einen Schlauch verbunden werden [24]. Das innere Volumen des Balgs begrenzt dabei die Luftzufuhr, sodass bei jeder Betätigung dieselbe Luftmenge durch die Multipfeife gefördert wird.
Die Frequenzen der Mikropfeifen werden unter anderem durch den Volumenstrom und Druckabfall über den Pfeifen beeinflusst. Daher wurde das Design der Bälge in vorangegangenen Arbeiten so konzipiert, dass sie reproduzierbar beim Überschreiten einer definierten Druckkraft plötzlich nachgeben und dadurch bei jeder Auslösung immer fast dieselbe Luftmenge beim selben Druck fördern [17].

3.3.1 Polymerbälge

Aufbauend auf den Forschungsergebnissen von Ibargüen [2] wurden verschiedene Polymerbälge als Auslösemechanismen für die Multipfeife hergestellt.

Thermogeformter PVC Balg

Der Polymerbalg (Abb. 18) besitzt eine halbkugelförmige Form und wurde durch Thermoformen aus Polymerfolien hergestellt. Als Ausgangsmaterial dienten unter anderem PVC oder Polyethylenterephthalat (PET) in verschiedenen Dicken. Die Folie wurde dazu in eine Druckkammer eingeklemmt und durch einen Deckel mit kreisförmiger Öffnung verschlossen. Durch das Anlegen eines Überdrucks und das gleichzeitige Erhitzen der Folie wölbt diese sich aus der kreisförmigen Öffnung und bildet dauerhaft die gewünschte Form. Die aus den verschiedenen Materialien und Dicken gefertigten Bälge wurden anschließend auf ihre Auslösekraft untersucht. Der Balg, der aus einer 300 µm dicken PET-Folie gefertigt wurde, entsprach mit seiner Auslösekraft von etwa 7,5 N der Kraft, die beim Betätigen eines Schalters aufgebracht werden muss.

Der Balg hat ein errechnetes Luftvolumen von etwa 2490 mm³. Wird er beim Überschreiten der Auslösekraft von 7,5 N eingedrückt, strömen ca. 42 % (1047 mm³) des inneren Volumens durch die Mikropfeifen, wie eine Berechnung zeigt. Die Herstellung der Bälge ist kostengünstig und nimmt bei der händischen Herstellung nur etwa 4



Abb. 18: Durch Thermoformen hergestellter Polymerbalg [24]

Minuten in Anspruch. Allerdings haben Dauerversuche gezeigt, dass die Bälge für eine längere Anwendung nicht geeignet sind (vgl. Kap. 4.2). Der langlebigste Polymerbalg aus einer 300 µm dicken PET-Folie versagte in einem pneumatischen Dauerversuch nach etwa 80.000 Betätigungen.

Dabei verblieb der Balg in seinem eingedrückten Zustand, sodass er nicht mehr weiterverwendet werden konnte. [2, 17, 24]

Kohlenstofffaserverstärkter Polymerbalg

Um dem frühzeitigen Versagen der Polymerbälge entgegenzuwirken, wurde von Kappe in [27] versucht, den Balg aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) herzustellen (Abb. 19). Dabei diente ein Geflecht aus Kohlenstofffasern als Verstärkung bei mechanischen Belastungen. Die Herstellung des Balgs erfolgte mittels Ultraschallschweißen mit Hilfe eines zweiteiligen Schweißwerkzeugs. Dazu wurde ein Stapel aus Polyamid (PA) Folien und dem Geflecht zwischen den auf 100 °C vorgeheizten Schweißwerkzeugen unter der Sonotrode platziert und der Ultraschallschweißvorgang ausgeführt. Die Herstellung der Bälge war auf Grund des zweiteiligen Werkzeugs und der damit einhergehenden Positionierungsarbeit sehr zeitaufwändig. Oft mussten mehrere Schweißvorgänge nacheinander durchgeführt werden, um ein akzeptables Schweißergebnis zu erreichen.



Abb. 19: Durch Ultraschallschweißen hergestellter kohlenstofffaserverstärkter Polymerbalg [27]

Die so gefertigten Bälge waren durch das Geflecht aus Kohlenstofffasern so versteift, dass eine Anwendung als Auslösebalg für die Multipfeife nicht sinnvoll gewesen wäre. Druckversuche mit einer Material-Prüfmaschine der Firma ZwickRoell ergaben eine Auslösekraft von 37,7 N. [27]

Balg aus TPU und Schaumstoff

Ein weiterer Versuch, die Versagensgrenze eines Polymerbalgs zu erhöhen, wurde durch die Verwendung von thermoplastischem Polyurethan (TPU) vorgenommen. TPU gehört zu der Gruppe der thermoplastischen Elastomere. In ihren Molekülketten alternieren weiche, elastische mit harten, thermoplastischen Blocksegmenten. [28] Daher vereint TPU die gummielastischen Materialeigenschaften von Elastomeren mit den Verarbeitungsmöglichkeiten von Thermoplasten. Die mechanischen Eigenschaften, wie eine hohe Reißfestigkeit, ein günstiges Verschleißverhalten und eine geringe Gasdurchlässigkeit, sind eine gute Grundlage für die Verwendung als Balg. Für die Herstellung des Balgs



Abb. 20: In TPU eingeschweißter Schaumstoffquader

(Abb. 20) wurde ein Schaumstoffquader zwischen zwei 100 µm dicke TPU-Folien gelegt und diese an ihren Rändern, bis auf eine Öffnung, miteinander verschweißt. Die TPU-Folien bilden somit ein Luftkissen mit den Maßen 28 × 28 × 10 mm³. Bei Betätigung des Balgs kann Luft aus der Öffnung entweichen und über einen Schlauch zu der Multipfeife geleitet werden. Der eingelassene Schaumstoff sorgt dafür, dass sich das Luftkissen nach der Betätigung wieder in seine Ausgangsform zurückformt, solange dieser seine Eigenschaften beibehält. Äußere Einflüsse und die Altersbeständigkeit des Schaumstoffs wurden hier nicht weiter untersucht.

3.3.2 Silikonbälge

Ibargüen zeigte in seiner Dissertation [2], dass Silikonbälge für die Auslösung der Multipfeifen geeignet sind. Allerdings war die Auslösekraft des gefertigten Balgs mit 2,3 N bis 4,5 N so gering, dass die detektierten Frequenzen stark schwankten. [2] Die in dieser Arbeit weiterentwickelte Silikonbälge (Abb. 21) orientieren sich an der Form der von Ibargüen hergestellten Bälge. Neben der Verwendung eines geeigneteren Silikons, wurde auch der Durchmesser des Balgs angepasst, um alle Einlassöffnungen der Mikropfeifen mit Luft versorgen zu können.



Abb. 21: Durch 3D-Druck hergestellte Balgform für vier Bälge (a) und entformte Bälge (b)

Als Material wurde der Zwei-Komponenten Silikonkautschuk "ELASTOSIL® RT 625 A/B" der Firma Wacker Chemie AG [29] gewählt, da es mit einer Reißfestigkeit von 6,5 N/mm² und einer Reißdehnung von 600 % für die Herstellung von technischen Formteilen geeignet ist und daher den häufigen Lastwechseln bei Betätigung des Balgs standhält. Die Herstellung erfolgte durch das Anrühren des Silikons im Verhältnis von 9 : 1 und dem darauf folgenden Evakuieren, um Luftblasen in dem Gemisch zu vermeiden. Anschließend wurde das Silikon in eine zweiteilige Negativform für vier Bälge (Abb. 21 (a)) gegossen, in der es innerhalb von 24 Stunden bei 23 °C aushärtet. Wird die Form mit dem Silikon im Ofen bei 80 °C erhitzt, wird eine Aushärtung nach 50 Minuten erreicht. Die Bälge (Abb. 21 (b)) wurden anschließend entformt und der Überschuss entfernt. Als Gussform wurde eine durch 3D-Druck hergestellte zweiteilige Negativform aus ApolloXTM der Firma Formfutura VOF verwendet. ApolloXTM basiert auf einem modifizierten Acrylester-Styrol-AcryInitril (ASA) und zeichnet sich durch eine sehr hohe Druckpräzision und eine hohe Festig und Hitzebeständigkeit aus [30]. Es wurden verschiedene Balgdesigns gefertigt, die sich in ihrer Höhe h, der Wandstärke w oder dem Winkel β unterscheiden (vgl. Abb. 22 und Tab. 2) und anschließend auf ihre Auslösekraft untersucht. Idealerweise sollte der Balg beim Überschreiten einer Kraft von 7,5 N nachgeben. Diese Kraft entspricht in etwa der bei Betätigung eines Lichtschalters. Durch seine elastische Kraft bewegt sich der Balg bei



Abb. 22: Technische Zeichnung des Silikonbalgs mit den wichtigsten Maßen

Entlastung wieder in seine Ausgangsform zurück. Um die Auslösekraft zu ermitteln, wurden die gefertigten Multipfeifen mit den verschiedenen Bälgen unter der Material-Prüfmaschine platziert und ihr Kraft-Weg-Diagramm (Abb. 23) aufgenommen.

	Balgdesign				
	1	1*	2	3	
Durchmesser D _A [mm]	34	34	34	34	
Durchmesser D ₀ [mm]	22,8	22,8	22,8	22,8	
Höhe h [mm]	18	18	15,6	14,23	
Wandstärke w [mm]	2	2	2	2	
Wandstärke w _o [mm]	3,63	3,63	3,6	2,23	
Winkel ß [°]	145	145	135	120	
Verstärkungsrippen	-	3 (120°)	-	-	
Auslösekraft [N]	11	15	7,5	3,7	

Tab. 2: Maße der vier unterschiedlichen Balgdesigns

Die unterschiedlichen Balgversionen wurden auf die Multipfeifen geklemmt und Druckversuchen unterzogen, um die aufzubringende Auslösekraft der jeweiligen Bälge zu ermitteln (Abb. 23). In dem Graphen wird der Zusammenhang zwischen der aufgebrachten Kraft auf den Balg und dem dafür zurückgelegten Weg deutlich. Zu erkennen ist, wie sich der Winkel β (vgl. Abb. 22) auf die aufzubringende Kraft auswirkt. Je größer der Winkel, desto größer die Auslösekraft des Balgs. Die drei zusätzlichen Rippen von Balg 1* erhöhen die Kraft im Vergleich zu Balg 1 um 35 %. Balg 3 besitzt mit 3,7 N eine zu geringe Kraft. Da sein Kurvenverlauf beinahe dem eines Plateaus entspricht, besitzt er kein ausreichendes Auslöseverhalten. Von den vier geprüften Balgdesigns erfüllt Balg 2 mit seinem Winkel β von 135 °, die gewünschte Anforderung einer Auslösekraft von 7,5 N. Zu erkennen ist, dass Balg 2 seine Maximalkraft bei ca. 2,2 mm erreicht und danach wieder abnimmt. Bis zum erneuten Erreichen der Auslösekraft, bei dem der Balg vollständig eingedrückt ist, findet die gesamte Auslösung statt (siehe "Auslösung" am Beispiel von Balg 1* in Abb. 23). Von der Gesamthöhe des Balgs von 15,6 mm werden laut manueller Messung etwa 7 mm für die Auslösung eingedrückt. Durch die gegebenen Maße des Balgs wurde ein inneres Luftvolumen von 6661 mm³ berechnet. Auf Grund seiner Elastizität und des Einknickverhaltens wird während der Auslösung die gesamte im Inneren enthaltene Luft durch die Mikropfeifen befördert.



Auslösekraft der Bälge

Abb. 23: Kraft-Weg-Diagramm für die vier verschiedene Bälge

Um die Dauerfestigkeit der gefertigten Bälge im Betrieb zu ermitteln, wurden Langzeitversuche durchgeführt, in denen die Bälge durch Pneumatikzylinder ausgelöst und die Betätigungen automatisch gezählt wurden. Eine Beschreibung der Versuche ist in Kap. 4 zu finden.

3.4 Vereinigung von Multipfeife und Balg

Auf Grund der verschiedenen Materialien von Multipfeife (PC) und Balg (Silikon), lassen sich diese beiden Bauteile nicht durch Ultraschall miteinander verschweißen. Eine Klebeverbindung der beiden Komponenten zeigte in vorangegangenen Arbeiten keine ausreichend stabile Verbindung für den längerfristigen Einsatz. Um den Balg mit der Multipfeife zu vereinigen, wurden daher zwei Ansätze verfolgt: Ein in das Silikon integrierter Verschweißring und Klemmringe.

3.4.1 Im Balg eingegossener Verschweißring

Der erste Ansatz zum Befestigen des Balgs auf der Multipfeife war ein Verschweißring. Dieser wurde aus PC 3D-gedruckt und bei der Herstellung des Balgs in das Silikon integriert, sodass er beim Aushärten im Falz des Balgs verbleibt (Abb. 24 (a)). Anschließend wurde der Balg mittels Ultraschall auf der Multipfeife verschweißt (Abb. 24 (b)).



Abb. 24: Silikonbalg mit eingegossenem Verschweißring (a) und Multipfeife mit aufgeschweißtem Balg (b)

Beim Verschweißen wurde der Balg allerdings auf Grund seiner Elastizität mechanisch angeregt und verformt. Durch die Verformung des Balgs wurde das Auslöseverhalten beeinflusst und teilweise die Labien der Mikropfeifen verschlossen. Außerdem konnte der Ring nicht vollständig verschweißt werden, sodass kein dichtes System hergestellt werden konnte. Ebenfalls ist aufgefallen, dass der Verschweißring keinen festen Halt in dem Silikon hatte, diesen einschnitt und die Gefahr des Herauslösens bestand.

3.4.2 Klemmringe

Um den Balg fest mit der Multipfeife zu verbinden, wurde ein Klemmring aus 4 mm dickem PC entwickelt. Die Herstellung erfolgte entweder durch das Fräsen aus Plattenmaterial, oder durch das 3D-Drucken mit PC-Filament.

Der Klemmring hat einen Außendurchmesser von 48 mm und eine 3 mm dicke Außenwand, auf deren Unterseite sich ERG befinden. Der Teil des Klemmrings, der sich über den Pfeifenkörpern befindet, besitzt eine 24 mm breite Aussparung, an der weder Außenwand, noch ERG vorhanden sind. Dadurch wird sichergestellt, dass die Deckelfolie der Multipfeife an dieser Stelle nicht beschädigt wird. Die 34,5 mm große, kreisförmige, mittlere Durchgangsöffnung dient als Balgführung.

Durch das Verschweißen von Ring und Multipfeife, wird der Falz des Balgs auf den Polymerchip gepresst. Erste Versuche, den Balg zusammen mit dem Klemmring zu verschweißen (Abb. 25 (a)) scheiterten an dem sogenannten Membraneffekt und dem damit einhergehenden Reißen der Deckelfolie (Abb. 25 (b), roter Kreis). Dadurch, dass der Silikonbalg direkt auf der Deckelfolie lag, wurden die Ultraschallschwingungen weitergeleitet und sorgten für ein Aufschwingen der Folie bis zur Zerstörung. Die Multipfeifen konnten so nicht weiter verwendet werden.



Abb. 25: Erster Versuch den Balg mit Klemmring auf die Multipfeife aufzuschweißen (a) und die durch den Membraneffekt gerissene Deckelfolie (roter Kreis) (b)

Daher wurden die Klemmringe einzeln aufgeschweißt und die Bälge anschließend von Hand in den Klemmring eingebracht (Abb. 26). Die Multipfeifen werden auf den Amboss unter eine Klemmringhalterung gelegt. In die Klemmringhalterung wird der Klemmring eingelegt, sodass dieser genau über der Multipfeife positioniert wird und gegen das Verrutschen gesichert ist. Anschließend fährt die Sonotrode auf den Klemmring und der Ultraschall wird eingeleitet.

Da die Deckelfolie nur an den Mikropfeifen mit dem Chip verschweißt ist, befindet sich auf dem umliegenden Plättchen lockere Folie. Wird der Klemmring auf diese Folie geschweißt, besteht die Gefahr, dass die Folie sich mit dem Klemmring vom Plättchen abhebt und sich die Schweißverbindung löst. Daher wurde die überschüssige Folie vor dem Schweißvorgang mit einem Cutter Messer abgeschnitten, sodass der Klemmring direkt mit dem Plättchen verschweißt wird.



Abb. 26: Anordnung zum Verschweißen des Klemmrings

Triggerkraft	Druckkraft	Ultraschalldauer	Ultraschallamplitude	Abkühlzeit
[N]	[N]	[s]	[µm]	[s]
150	500	0,2	30,6	0,1

Tab. 3: Herstellungsparameter für das Aufschweißen des Klemmrings

Die Schweißparameter (Tab. 3) konnten für die gefrästen Klemmringe (Abb. 28 (a, b)) und die durch 3D-Druck hergestellten Klemmringe (Abb. 28 (c, d)) verwendet werden. Beide Klemmringarten wiesen eine haltbare, dichte Verbindung auf, allerdings unterscheiden sich die Schweißergebnisse deutlich voneinander. Die gefrästen Klemmringe weisen eine gleichmäßige Verschweißung mit einer homogenen Verteilung der Schmelze auf, während die 3D-gedruckten Klemmringe eine inhomogene Verteilung der Schmelze aufzeigen. Ebenfalls wird ein Überschuss an Schmelze außer- und innerhalb des Klemmringes gedrückt, was das Einlegen des Balgs behindern kann und das äußere Erscheinungsbild der Multipfeife beeinträchtigt.

Nachdem die Klemmringe aufgeschweißt wurden, wurden die Silikonbälge in die so entstandene Nut zwischen Klemmring und Multipfeife eingesetzt. Wegen der großen Elastizität der Bälge passten sie sich den festen Oberflächen an und es entstand eine luftdichte Verbindung (Abb. 27).



Abb. 27: Schnittdarstellung einer Multipfeife mit Balg und aufgeschweißtem Klemmring



(a)



Abb. 28: Vorder- und Rückseite der aufgeschweißten Klemmringe aus gefrästem Po-lycarbonat (a, b) und 3D-gedrucktem Polycarbonat (c, d) nach dem Einsetzen der Silikonbälge

4. Experimente zur Ermittlung der Haltbarkeit

4.1 Ermittlung der Versagensgrenze des Silikonbalgs bis zur Fehldetektion der Frequenzen

Um die Dauerfestigkeit des Balgs zu ermitteln und sein Verhalten bei Rissen zu beobachten, wurde für eine Voruntersuchung ein Langzeitversuch aufgebaut, bei dem ein Pneumatikzylinder den Balg der Multipfeife bei einer Frequenz von 1 Hz und einer Kraft von ca. 25 N betätigt. Gleichzeitig wurden die Lastzyklen und die Frequenzen der Mikropfeifen erfasst.

4.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau (Abb. 29) bestand aus Bauteilen der Firma Festo. Ein einfachwirkender pneumatischer Rundzylinder (ESNU-20-10-P-A) mit einem Hub von 10 mm, wurde über ein Druckregelventil (LRP-1/4-10) und ein Magnetventil (MHE3-MS1H-3/2G-QS-6-K) an einen Funktionsgenerator angeschlossen. Die emittierten Frequenzen der Mikropfeifen wurden über ein SMD Ultraschallmikrofon (SPU 0410LR5H) der Firma Knowles Acoustics erfasst und anschließend verstärkt. Die Komponenten wurden über die A/D-Wandler Box (NI USB-6251) der Firma National Instruments an einen Computer angeschlossen und die Steuerung und Datenerfassung mit Hilfe von LabVIEW durchgeführt. Um die Kraft, mit der der Balg betätigt werden soll, über das Druckregelventil einstellen zu können, wurde die Formel (1) zur Ermittlung der Kolbenkraft (F) nach dem Betriebsdruck (p) umgeformt (2). Der Druck ist also abhängig von der effektiven Kolbenkraft (F), dem Kolbendurchmesser (d) und der Reibung (R), die von der Firma Festo mit etwa 10 % der Kolbenkraft angegeben ist.

$$F = p \times \frac{d^2 \pi}{4} - R \tag{1}$$

$$p = \frac{4F + 4R}{d^2 \pi} \tag{2}$$

Nach Einsetzen der Kolbenkraft von 25 N und dem Kolbendurchmesser von 0,02 m kommt man auf einen Druck von ca. 88 kPa. Da das Druckregelventil eine so genaue Einstellung nicht erlaubt, wird angenommen, dass der eingestellte Druck bis zu 100 kPa betragen kann. 100 kPa entsprechen einer Kraft von 28,3 N unter der Annahme von 10°% Reibung.

Somit liegt die prozentuale Abweichung der Kraft bei ca. 13,2 %. Nach Betätigung des Balgs wurde der Kolben durch eine intern verbaute Feder wieder in seine Ausgangsposition gedrückt.



Abb. 29: Aufbau des Dauertests mit Erfassung der Frequenz

4.1.2 Steuerung und Datenerfassung mittels LabVIEW

Die Steuerung und Datenerfassung geschieht mittels LabVIEW 2014 der Firma National Instruments. Das Programm besitzt ein Frontpanel in dem Bedienelemente oder Daten und Diagramme angezeigt werden können (siehe Abb. 29), und ein Blockdiagramm in dem sich die grafische Programmierung befindet (vgl. Abb. A1). Die grafische Programmierung geschieht durch das Zusammensetzen und Verbinden von verschiedenen Funktionsblöcken (Virtuelle Instrumente; "VI") und Strukturen wie bspw. Schleifen.

Nach dem Drücken der "Run-Taste" des LabVIEW-Programms starten die im Blockdiagramm programmierten Mechanismen. Eine "While Schleife" (Endlosschleife) wird kontinuierlich abgespielt, bis ein Impuls zum Beenden der Schleife gegeben wird. Dieser Impuls wird durch das Betätigen der Stopp-Taste im Frontpanel ausgelöst. In der While Schleife befindet sich eine "Flache Sequenz" mit drei Ereignisfeldern (Abb. A2 – A4), die nacheinander ablaufen und die gesammelten Daten jeweils in die nächste Sequenz übergeben. Mit dem DAQ Assistenten werden die elektrischen Signale der A/D-Wandler Box erfasst und für die Weiterverarbeitung digitalisiert. Das Signal des Mikrofons wird in einer Endlosschleife daraufhin untersucht, ob eine vorgegebene Amplitude überschritten wird. Wenn das der Fall ist, wird aus einem 3 ms langen Teil des Signals durch eine FFT das Frequenzspektrum berechnet. Dabei werden Frequenzen unter 15 kHz herausgefiltert, um den Einfluss von hörbaren Störgeräuschen zu eliminieren. Gleichzeitig wird mit einem Zähler die Auslösung des Balgs gezählt.

Anschließend werden die Peak-Maxima aus der FFT bestimmt und aus ihnen die numerischen Werte der Frequenzen errechnet. Zusammen mit Datum- und Zeitangaben und der Anzahl der Auslösungen werden die obere und untere Frequenz und das Verhältnis der Frequenzen (Ratio) in einem Puffer gespeichert. Nach Beenden des Programms werden die Werte als 2D-Array in eine Tabelle geschrieben und anschließend in eine Excel-Vorlage übertragen und gespeichert.

4.1.3 Ergebnisse

Nach etwa 2.000.000 Lastwechseln konnte noch kein Versagen des Balgs festgestellt werden. Die Überprüfung erfolgte durch die Durchsicht der aufgenommenen Frequenzen und Untersuchung des Balgs auf Risse. Auch nach 2.500.000 Lastwechseln konnte keine Beeinträchtigung der aufgenommenen Frequenzen festgestellt werden. Allerdings wies der Balg deutliche Risse auf.

Bei der Beobachtung der Risse im Silikon fällt auf, dass diese primär an den Stellen mit Luftblasen aufgetreten sind. Vor allem an der Kante zwischen dem oberen Plateau und der Schräge wurde ein großer Riss festgestellt (Abb. 30). Diese Stelle des Balgs ist besonders anfällig für die Rissbildung, da dort die Balgwand beim Umknicken am meisten belastet wird.



Abb. 30: Balg mit Riss

Daher wurde bei der weiteren Herstellung der Bälge darauf geachtet, die Anzahl der Luftblasen durch das Evakuieren des angerührten Silikons, weitestgehend zu minimieren.

4.2 Ermittlung der Versagensgrenze verschiedener Silikonbälge

Da in den Voruntersuchungen festgestellt wurde, dass die Multipfeife selbst nach dem Feststellen von Rissen im Silikonbalg keine Änderungen in den emittierten Frequenzen aufweist, wurde der Langzeitversuch ausgeweitet.

Dazu wurden die verschiedenen Bälge aus Tab. 2 in Kap. 3.3.2 auf insgesamt sechs Stationen geprüft. Auf die Aufzeichnung der Frequenzen wurde verzichtet und die Bälge per Sichtkontrolle in regelmäßigen Abständen auf Risse untersucht. Die Frequenzen der Multipfeifen wurden in unregelmäßigen Abständen durch eine manuelle Betätigung des Balgs überprüft.

4.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau des Langzeitversuchs für sechs Bälge ähnelt dem aus Kap. 4.1.1. Allerdings wurden doppeltwirkende pneumatische Rundzylinder (DSNU-20-10-P-A) verwendet, sodass eine Druckluftversorgung für den Druck und Zug des Zylinderkolbens verbaut wurde. Die Druckkraft wurde durch das Regeln des Druck-regelventils auf 56,5 N (200 kPa) erhöht, um die Haltbarkeit bei einer stärkeren Belastung des Balgs zu untersuchen. Die Zugkraft für das Rückstellen des Kolbens wurde mit 113 N (400 kPa) auf die doppelte Kraft eingestellt, um der verbleibenden Luft im Kolben entgegenzuwirken. Für die Berechnung der Drücke wurde Formel (2) aus Kapitel 4.1.1 angewandt.

Die drei Pneumatikzylinder wurden an ein Gerüst aus Aluminiumprofilen auf einer Grundplatte befestigt (Abb. 31). An die drei Kolben wurde jeweils eine Platte mit zwei Drückern verbaut und diese mit Brücken untereinander verbunden, um sie gegen Verdrehen zu schützen. Unter den Drückern wurden die sechs Multipfeifen mit den Bälgen auf der Grundplatte befestigt.

Die Pneumatikzylinder wurden parallel an die Druckluftquelle angeschlossen und die Ventile zur Steuerung des Drucks und Zugs alternierend betrieben. Dadurch wurde ein synchrones Drücken der Bälge (Abb. 31 (b)) und Rückfahren der Kolben in die Ausgangsposition (Abb. 31 (a)) sichergestellt. Durch den synchronen Betrieb der Pneumatikzylinder wurde ebenfalls nur ein Funktionsgenerator benötigt und die Programmierung der Steuerung und die Datenerfassung erleichtert.



Abb. 31: Aufbau des Dauertests zur Ermittlung der Versagensgrenzen unterschiedlicher Balgversionen im Ausgangszustand (a) und im eingedrücktem Zustand (b)

4.2.2 Steuerung und Datenerfassung mittels LabVIEW

Auch für diesen Dauertest wurde LabVIEW als Steuerungssoftware verwendet. Das Frontpanel mit seinen Bedienelementen und Anzeigen ist in Abbildung 32 zu sehen. Im linken Teil der Benutzeroberfläche befindet sich eine grafische Anzeige, die das digitale Ausgangssignal des Funktionsgenerators darstellt. Darunter befinden sich ein Schalter zum Starten der Speicherung und einer zum Beenden des Programms, Datum und Zeitangaben sowie der Tageszähler, der die Betätigungen seit dem Start des Programms anzeigt. Im rechten Teil der Benutzeroberfläche befinden sich sechs numerischen Einstellelemente und Anzeigeelemente für die Anzahl der Betätigungen des jeweiligen Balgs. Mit dem numerischen Einstellelement kann, nach einem Beenden des Programms, die vorherige Zahl der Auslösungen vor dem erneuten Programmstart wieder eingestellt werden. Dies wird vor allem nach dem Überprüfen der Bälge auf Risse oder nach einem Wechsel eines einzelnen Balgs benötigt.



Abb. 32: Frontpanel des LabVIEW-Programms zur Erfassung der Balgbetätigungen

Da für das LabVIEW-Programm keine Erfassung der Frequenzen benötigt wird, befindet sich im Blockdiagramm (Abb. A6) lediglich der Zähler in einer Endlosschleife. Auch hier werden die Daten in einem Puffer gesammelt und nach Beenden des Programms in einer Excel-Tabelle gespeichert.

4.2.3 Ergebnisse



Balgbetätigungen bis zum Versagen

Abb. 33: Auswertung der unterschiedlichen Balgversionen

In dem Diagramm (Abb. 33) ist die Anzahl der Balgbetätigungen für die unterschiedlichen Balgdesigns dargestellt.

Die Balgdesigns 1* (145° mit Rippen) und 1 (145°) versagten bereits nach 160.000 bzw. 330.000 Auslösungen. Allerdings wurden für die Tests Bälge mit Luftblaseneinschlüssen verwendet. Da die Auslösekraft dieser Bälge die geforderte Kraft von 7,5 N überschreitet, wurden diese Bälge nicht weiter getestet.

Der Einfluss der Luftblasen auf die Dauerfestigkeit des Balgs wird am Balg 2 (135°) deutlich. Der Balg mit Lufteinschlüssen zeigte nach 546.000 Lastzyklen erste Risse und versagte nach etwa 938.000 Betätigungen. Der Lufteinschlussfreie Balg versagte hingegen nach 5.200.000 \pm 230.000 Lastzyklen. Das entspricht einer Zunahme an Auslösungen um etwa 450 % \pm 25 %. Daher ist bei der Herstellung der Bälge unbedingt darauf zu achten, dass Luftblasen durch das Evakuieren minimiert werden.

Balgdesign 3 (120°) wies eine Versagensgrenze von 10.600.000 ± 6.000 Auslösungen auf. Also in etwa das zweifache von Balg 2. Da seine Auslösekraft jedoch mit 3,7 N zu gering war (vgl. Abb. 23), wurde Balg 2 für die Produktion der Multipfeifen verwendet. Insgesamt wurden fünf luftblasenfreie Bälge der Balgversionen 2 und drei der Balgversion 3 dem Dauertest unterzogen. Die Versagenskontrolle erfolgte durch eine Sichtkontrolle und Überprüfung des Balges auf Risse. Dabei wurden die gravierenden Risse nach der angegebenen Versagensgrenze festgestellt und die Bälge anschließend ausgewechselt. Eine Charakterisierung der Größe der Risse erfolgte nicht.

Wenn ein Schalter hundertmal pro Tag betätigt wird, kann Balg 2 für 140 Jahre funktionieren, wenn keine anderen Versagensursachen auftreten, die hier nicht untersucht wurden, wie z.B. die Alterung durch Temperaturwechsel oder chemische Vorgänge, die das Material verspröden oder zersetzen.

5. Automatisierte Anlage für die Chip-zu-Rolle Fertigung von Mikrostrukturen

Da der manuelle Herstellungsprozess von Multipfeifen aufwändig ist und für den Test in einem AAL- System eine Vielzahl an Aktoren benötigt werden, wurde eine automatisierte Anlage entwickelt, die den Ultraschallheißprägevorgang der Polymerchips vereinfacht und den zeitlichen Aufwand reduziert.

In folgendem Kapitel werden zunächst die einzelnen Komponenten vorgestellt, ihr Zusammenarbeiten erläutert und die Programmierung erklärt. Anschließend wird die gesamte Anlage mitsamt der experimentellen Validierung aufgezeigt.

5.1 Aufbau und Funktionsablauf

Der Aufbau der Anlage orientiert sich an der in Kap. 2.2 beschriebenen Rolle-zu-Rolle Fertigung. Allerdings wurden wesentliche Bauteile der Anlage verändert, um Polymerchips prägen zu können. [31]

Die gesamte Maschine besteht aus drei wesentlichen Einheiten (Abb. 34). Die Folien-Aufwickel-Einheit, die Chipzuführung und der Prägevorrichtung mit Klemmrahmen. Die Folien-Aufwickel-Einheit wurde seitlich an der US-Maschine befestigt. Die Chipzuführung und der Klemmrahmen wurden gemeinsam auf einer Grundplatte montiert, die mit vier Schrauben mittig auf der Ambossplatte der US-Maschine verbaut wurde.



Prägevorrichtung mit Klemmrahmen

Abb. 34: Automatisierte Anlage mit den drei wesentlichen Einheiten

Um den Ablauf des Ultraschall-Heißprägeprozesses und die voneinander abhängigen Komponenten besser zuordnen zu können, wurde ein Ablaufplan erstellt. Dieser wurde ebenfalls für die Erstellung der Programmierung zu Hilfe genommen.

5.1.1 Anforderungen und Konzeptentwicklung

Bei der Entwicklung der automatisierten Anlage gilt es einige Anforderungen hinsichtlich der Mechanik und der Bedienbarkeit zu beachten. Daher wurde in Tabelle 4 eine ungewichtete Anforderungsliste erstellt, die Fest- (F) und Wunschanforderungen (W) auflistet.

Element	Anforderung	F/W
1	Simultane Fertigung zweier Multipfeifen	F
2	Vollständige Prägung der Mikrostrukturen	F
3	Beheizen des Werkzeugs	F
4	Einfacher Wechsel des Werkzeugs	W
5	Fixierung des Plättchen während des Prägevorgangs	F
6	Konstanter Abstand der Plättchen	W
7	Ausreichende Kapazität im Magazin	W
8	Automatischer Ablauf der Anlage	F
9	Gleichmäßige lineare Bewegung	F
10	Geringe Reibung beim Bereitstellen des Plättchens	F
11	Wartungsfreiheit	W
12	Einfache Montage/Demontage	W
13	Fertigung mit vorhandenen Mitteln (Fräsen/3D-Druck)	W

Tab. 4: Anforderungsliste: Festanforderung (F), Wunschanforderung (W)

Als übergeordnetes Ziel ist die simultane Fertigung zweier Multipfeifen (1) zu nennen, die für die weitere Verarbeitung eine vollständige Prägung der Mikrostrukturen (2) benötigen. Eine beheizte Werkzeugaufnahme (3) sorgt dafür, die Prägezeit und somit auch die Zykluszeit zu verkürzen. Um Designänderungen schnell vornehmen zu können, sollte das Werkzeug auswechselbar sein (4), ohne dabei das Heizelement zu entfernen.

Das Prägen der Plättchen soll nach Betätigen eines Tasters vollautomatisch durchgeführt werden (8). Dafür müssen ausreichend Plättchen in einem Magazin bereitgestellt werden (7). Während des Prägevorgangs müssen die Plättchen fixiert werden, damit ein bestmögliches Ergebnis gleichbleibender Qualität erzielt wird (5). Um die geprägten Plättchen auf der Folie für ein mögliches automatisiertes Aufschweißen einer Deckelfolie vorzubereiten, ist es wünschenswert, dass ein konstanter Abstand zwischen den Prägungen besteht (6). Das Bereitstellen der Plättchen sollte zudem durch eine gleichmäßige lineare Bewegung (9) geschehen und möglichst reibungsarm (10) ablaufen, um eine genaue Positionierung auf dem Werkzeug zu ermöglichen.

Um die zusätzliche Arbeitsbelastung möglichst gering zu halten, sollte die Anlage mit den verwendeten Komponenten wartungsfrei sein (11). Da die Ultraschallmaschine auch für anderweitige Einsätze verwendet wird, sollte sich der Aufbau schnell und einfach montieren und demontieren lassen (12).

Die Fertigung der Einzelbauteile sollte, wenn möglich, mit den am Institut verfügbaren Mitteln durchgeführt werden (13).

Für die Konzeptentwicklung sind die oben genannten Anforderungen ausschlaggebend. Für die Entwicklung, Konstruktion und Komponentenauswahl der Anlage mussten zusätzlich Möglichkeiten aufgezeigt und abgewogen werden. Die bereits vorhandenen Komponenten, also die Ultraschallschweißmaschine und die Folien-Aufwickel-Einheit mit Schrittmotor, mussten in das Gesamtsystem integriert werden.

Für die translatorische Bewegung des Plättchens und das Absenken des Klemmrahmens stehen verschiedene Aktoren zur Auswahl, die grob nach ihren Wirkprinzipien (elektrisch, pneumatisch, hydraulisch) klassifiziert werden können.

Hydraulische Aktoren wurden aufgrund ihres zusätzlich benötigten Hydrauliksystems ausgeschlossen. Elektrische Linearmagnete oder Piezoaktoren sind aufgrund des geringen Hubs nicht für den Anwendungszweck geeignet. Elektrische Linearmotoren oder Schrittmotoren mit Linearachse benötigen einen zu großen Bauraum und bedürfen wegen ihrer Reibkomponenten eine regelmäßige Wartung.

Da für die Ultraschallschweißmaschine bereits eine Druckluftversorgung vorhanden ist, wurden pneumatische Zylinder für die translatorischen Bewegungen gewählt.

Bei der Auswahl der Materialien wurde auf die mechanische Beanspruchung, Fertigung und Kosten geachtet.

Für die Gleitkomponenten wurde PTFE gewählt, da es ohne zusätzliche Schmiermittel ausreichende Gleiteigenschaften aufweist und mit einer Fräse bearbeitet werden kann. Anbauteile, die keine großen mechanischen Belastungen erfahren und keiner Wärme ausgesetzt sind, wurden aus Kunststoffen gefertigt. Dafür wurde Plattenmaterial aus PVC bearbeitet oder Bauteile mittels 3D-Druck aus PLA extrudiert. Die tragenden und Wärme ausgesetzten Bauteile wurden entweder aus zugekauften Aluminiumprofilen oder aus Aluminiumplatten verschiedener Dicken gefertigt. Aluminium eignet sich wegen seines Verhältnisses von Festigkeit zu Dichte für beständige Konstruktionen mit geringem Gewicht. Nach Betrachtung der Reißfestigkeiten von Aluminium (600 MPa) und Edelstahl (2000 MPa) lässt sich durch die Verwendung von Aluminium eine Gewichtsersparnis von etwa 70 % erzielen. Auch die Verarbeitung von Aluminium ist einfacherer und damit kostengünstiger als beispielsweise die von Edelstahl. Ein weiterer Vorteil von Aluminium ist die Korrosionsbeständigkeit durch die Ausbildung einer Passivschicht an der Oberfläche.

Nach Auswahl der Komponenten und Materialien wurde ein hierarchischer Funktionsbaum (Abb. 35) angefertigt, um einen schnellen Überblick der zusammengehörigen Funktionen zu erhalten. Gegliedert ist der Funktionsbaum in die Gesamtfunktion (Anlage) und den unterschiedlichen Ebenen der Teilfunktionen. Die grau unterlegten Teilfunktionen der Abbildung entsprechen den bereits vorhandenen Komponenten, die in das Gesamtsystem integriert wurden.



Abb. 35: Funktionsbaum für die automatisierte Anlage

Der Funktionsbaum zeigt auch die vereinfachten logischen Zusammenhänge auf, die für die Regelungstechnik (vgl. Kap 5.1.6.) herangezogen wurden.

5.1.2 Folien-Aufwickel-Einheit

Die Folien-Aufwickel-Einheit der Rolle-zu-Rolle Anlage ist in Abb. 8 aus Kap. 2.2 dargestellt. Verbaut wurde das "Folientaktgerät FTG Compact VE120BGMZ-200VM" der Firma Horst Sitte Heißprägetechnik. Die Anlage besteht aus drei Rollen, die für die Umlenkung oder das Aufwickeln der Folie zuständig sind. Die beiden unteren kleinen Rollen (Andruck- und Förderrolle) sind für die Folienspannung, die Umlenkung und Förderung der Folie verantwortlich. Dabei ist die Förderrolle über einen Riemen mit der Welle des Motors verbunden. Die Aufwicklung ist, ebenfalls durch einen Riemen, mit der Förderrolle verbunden und sorgt für ein Umlenken und Aufwickeln der Folie. Die Andruckrolle kann zum Einspannen der Folie seitlich geschwenkt werden oder komplett demontiert werden. Die Vorschublänge ist vom Drehwinkel und dem Durchmesser der Förderrolle abhängig. Allerdings entspricht die geförderte Länge nur dann der voreingestellten Länge, wenn die Folien mit der Förderrolle synchronisiert sind. Um ein Verrutschen der Folie an der Förderrolle zu vermeiden, ist es sinnvoll, den Druck auf die Folie durch Einsatz der Andruckrolle zu erhöhen.

Zu erkennen ist, dass die S-förmige Folienführung durch die beiden Förder- und Andruckrollen keine Förderung von dickerem Material zulässt (Abb. 36 rechts). Daher wurde die Aufwickeleinheit angepasst, um die geprägten Polymerchips (121 x 50 x 1 mm³; vgl. Kap. 5.2.1.) umlenken und aufwickeln zu können.



Abb. 36: Folienlaufschema der Abwicklung (links) und Aufwicklung (rechts) [32]

Die Aufwickeleinheit wurde so verändert, dass die ursprünglichen Funktionen auch mit den geprägten Polymerplättchen weiterhin nutzbar sind. Die vorhandene Förderrolle, die auch für das Umlenken der Folie verantwortlich ist, besitzt mit 22 mm einen zu geringen Durchmesser, um die Folien mit aufgeprägten Plättchen um 90° zur Aufwicklung umzulenken. Daher wurde für die Umlenkung eine Rolle mit größerem Durchmesser benötigt.

Eine Umlenkrolle mit einem Durchmesser von 30 mm wurde mittels 3D-Druck hergestellt und auf die bestehende Förderrolle aufgesetzt und befestigt (Abb. 37). Dieser Durchmesser reicht aus, um eine Beschädigung der Plättchen während der Umlenkung zu vermeiden. Die neue Umlenkrolle behindert den Riemenantrieb des Systems nicht, sodass die Folie mit den aufgeprägten Chips auf der Aufwickelrolle aufgespult werden kann. Allerdings musste die Andruckrolle entfernt werden, um die größere Umlenkrolle zu montieren. Die Synchronisierung von Folie und Förderrolle ist nicht mehr akkurat, da sie sich durch den vergrößerten Durchmesser und die veränderte Winkelgeschwindigkeit der Umlenkrolle verändert hat.



Abb. 37: Folien-Aufwickel-Einheit

Um die Vorschublänge zu steuern, wurde ein zusätzlicher Taster in das System integriert und in der Programmierung berücksichtigt. Die Steuerungseinheit erkennt den Durchlauf eines Plättchens, wenn der Taster durch dieses betätigt wird. Die Folie wird also nach dem Prägevorgang so lange vorgeschoben, bis das nächste Plättchen den Taster auslöst. Um eine Fehldetektion der Plättchen zu vermeiden und die Folienspannung zu erhöhen, wurde ein Plateau vor die Umlenkrolle montiert (Abb. 37). Dieser Vorbau beinhaltet eine zusätzliche, durch Federn gespannte, Andruckrolle und den Taster. Durch die Andruckrolle werden die Plättchen auf das Plateau gedrückt, sodass der sich dort befindliche Taster bei jedem Durchlauf ausgelöst wird. Mit einer durch die Plättchen vorgegebenen Startfrequenz, wird der Abstand zwischen zwei Chips festgelegt und bleibt im Laufe des Programmablaufs konstant. Die Programmierung des Systems wird in Kap. 5.1.6 beschrieben.

5.1.3 Chipzuführung

Die Chipzuführung übernimmt im Gesamtsystem die Aufgabe Polymerplättchen für das Ultraschallheißprägen bereitzustellen. Dafür wird pro Ablauf ein Polymerplättchen aus einem Magazin unter die Sonotrode auf den Klemmrahmen über das Werkzeug geschoben. Die wesentlichen Bauteile des Systems sind das Magazin als Speicherplatz der Polymerplättchen und der Schieber zum Bewegen der Plättchen (Abb. 38).



Abb. 38: Explosionszeichnung der Beladungseinheit und zusammengebaute Beladungseinheit (unten rechts) [31]

Das Magazin befindet sich auf der Führungsbahn, die die Chips auf den Klemmrahmen leitet und hat eine Kapazität von etwa 50 Polymerchips. Dadurch, dass das Magazin durch eine Steckverbindung mit der Basis des Magazins befestigt ist, kann es einfach durch ein größeres ersetzt werden. Die Führungsbahn und der Schieber bestehen aus Polytetrafluorethylen (PTFE), um den Einfluss der Reibung auf den Schiebemechanismus zu reduzieren und auf zusätzliche Schmiermittel zu verzichten. Der Schieber besteht aus einem oberen und unteren Teil und läuft mit seiner Nut in der zweiteiligen Führungsbahn. Der Schieber ist durch ein Verbindungselement mit der Kolbenstange eines Pneumatikzylinders verbunden und wird durch diesen bewegt. Der obere Teil des Schiebers hat mit 1 mm die gleiche Dicke wie ein Polymerplättchen, damit auch immer nur ein Plättchen mit dem Schieber gefördert wird.

Das Magazin hat Öffnungen von 1,5 mm damit auch hier immer nur ein Chip austreten kann und nicht ausversehen zwei Plättchen unter die Sonotrode befördert werden. In der Schnittdarstellung der Chipzuführung (Abb. 39) wird das Funktionsprinzip deutlich. Der Schieber wird durch den Pneumatikzylinder betätigt und schiebt auf der Führungsbahn einen Chip aus dem Magazin heraus auf den Klemmrahmen. Die Länge des Schiebers wurde so gewählt, dass er die restlichen Chips im Magazin blockiert, damit diese nicht frühzeitig auf die Führungsbahn herunterfallen und den Schieber beim Zurückfahren behindern.

Wenn der Schieber wieder in seine Ausgangsposition gefahren ist, fällt durch die Schwerkraft ein Plättchen herab und der Prozess kann erneut beginnen. Bei der Montage muss darauf geachtet werden, dass sich die Führungsbahn auf gleicher Ebene mit dem Klemmrahmen in seiner Auswerffunktion befindet.



Abb. 39: Schnittansicht der Beladungseinheit [31]

5.1.4 Prägevorrichtung mit Klemmrahmen

Die Prägevorrichtung besteht aus dem beheiztem Prägewerkzeug und einem Auswerfrahmen mit Klemmvorrichtung (Abb. 40).



Abb. 40: Explosionszeichnung der Prägevorrichtung (links) und Prägevorrichtung im Klemmzustand (rechts) [31]

Durch den Beladungsprozess der Chipzuführungs-Einheit wird ein Plättchen auf den Auswerfrahmen geschoben. Die Folie, die zwischen den beiden Rollen der Folien-Aufwickel-Einheit gespannt ist, liegt jetzt zwischen dem Auswerfrahmen und dem Polymerchip. Der Auswerfrahmen befindet sich dabei in seiner Auswerfposition. Anschließend wird der Auswerfrahmen mit der Klemmvorrichtung, durch die Betätigung von vier Pneumatikzylindern, bis auf das Prägewerkzeug abgesenkt. Die Oberfläche des Auswerfrahmens ist jetzt niedriger als die des Werkzeugs, damit das Polymerplättchen direkt auf den Mikrostrukturen des Werkzeugs liegt. Dabei wird das Plättchen durch die beiden Klemmen auf dem Werkzeug fixiert. Nach dem Ultraschallheißprägen wird der Auswerfrahmen wieder hochgefahren und die Klemmen gelöst, sodass der auf der Folie festgeprägte Chip aus dem Auswerfrahmen gezogen und auf die Aufwickelrolle gerollt werden kann.

Insgesamt wurden zwei Auswerfrahmen gefertigt und getestet. Die Schwachstellen des ersten Rahmens wurden dabei für die Verbesserung des zweiten Rahmens genutzt (Abb. 41). Die bei den Vorversuchen festgestellten Probleme waren folgende:

- Die Folie liegt auf dem Auswerfrahmen in einer Ebene mit dem Chip. Daher kam es teilweise zu Situationen, in denen der Chip unter die Folie geschoben wurde. Dadurch kommt es zu einer Fehlprägung und einer losen Befestigung des Chips auf der Folie.
- Durch das Aufschmelzen des Polymers und der damit einhergehenden Ausdehnung des Materials, verklemmte der Chip an den Mikrostrukturen des Werkzeugs. Der Auswerfrahmen konnte nicht die benötigte Kraft aufbringen, um die Mikrostrukturen zu entformen, sondern verbog die Plättchen nur an Ihrem seitlichen Rand.
- Um eine schiefe Prägung des Chips zu vermeiden, wurde seine Querbewegung durch seitliche Ränder eingegrenzt. Allerdings behinderte der rechte Rand eine Förderung der Folie, sodass der Chip nicht aus dem Auswerfrahmen transportiert werden konnte.

Die vorgenommenen Veränderungen können in der Gegenüberstellung der beiden Auswerfrahmen (Abb. 41) gesehen werden.



Abb. 41: Gegenüberstellung des neuen (links) und alten Rahmens: [31]

Die Ebene, auf der die Folie aufliegt (Abb. 41, links, blau) wurde um 0,8 mm abgesenkt. Dadurch wird der Chip von der Startebene (rot) direkt auf die Folie geschoben. Auch wenn der Chip so in der Ausgangsposition schief liegt, gibt es keine negativen Folgen, da der Chip nach Absenken des Rahmens direkt auf dem Werkzeug aufliegt. An den Orten des Chips, an denen sich keine Mikrostrukturen befinden, wurden im Auswerfrahmen zwei zusätzliche Brücken (Abb. 41, a) und Vorsprünge (Abb. 41, b) vorgesehen. Dadurch hat der Auswerfrahmen genügend Angriffsfläche um den Chip vom Werkzeug zu entformen.



Abb. 42: Klemmvorrichtung mit rechtsseitigem Rand [31]

Um das Auswerfen des Chips mit der Folie zu ermöglichen, wurde der rechte, in Förderrichtung der Folie weisende Rand entfernt. Mit nur dem linken Rand besteht die Gefahr, dass der Chip beim Einladen verrutscht. Daher wurde der Auswerfrahmen mit einer Neigung von $5^{\circ} - 10^{\circ}$ montiert. Damit der Chip auch während der Prägung und den damit einhergehenden Vibrationen gegen Verrutschen geschützt ist, wurde an den beiden Klemmen ein rechtseitiger Rand vorgesehen (Abb. 42).

Das Prägewerkzeug wurde entsprechend der Änderungen im Auswerfrahmen angepasst.

5.1.5 Pneumatikkomponenten

Die Zuführung und das Auswerfen, bzw. Festklemmen des Chips geschieht durch Pneumatikzylinder. Daher wurde ein Pneumatiksystem aus Komponenten der Firma Festo entwickelt und an die Anlage angeschlossen (Abb. 43). Ein Druckregelventil (LRP-1/4-10; Abb. 43 c) begrenzt den Druck des Hausanschlusses auf 600 kPa. Der Auswerf- /Klemmmechanismus der Chips wird über ein 5/2-Wege Ventil (VUVG-L10-M52-RT-M5-1P3; Abb. 43 b) und vier Hubzylinder (ADN-20-140-I-P-A; Abb. 43 a) gesteuert. Die Chipzuführung geschieht über ein 5/2-Wege Ventil (VUVG-L14-B52-T-G18-1P3; Abb. 43 f) und einen Pneumatikzylinder (AEN-16-15-I-P-A-Z-S6; Abb. 43 d). Dabei wird ein Druckregelventil (LRP-1/4-10; Abb. 43 e) vorgeschaltet um den Druck auf 100 kPa zu begrenzen. Ein zu hoher Druck und die damit einhergehende Geschwindigkeit des Zylinders könnte dazu führen, dass der Chip aus der Führung des Auswerfrahmens springt.



Abb. 43: Pneumatischer Schaltplan der automatisierten Anlage [31]

5.1.6 Programmierung mittels Siemens LOGO!

Die Steuerung der gesamten Anlage (Folien-Aufwickel-Einheit, Pneumatikventile) und der Ultraschall-Maschine geschieht mittels einer Steuereinheit "programmable logic controler (PLC) – Model LOGO!" der Firma Siemens AG. Verbaut wurde eine LOGO!-Steuerungseinheit, die aus einem Transformator (LOGO!Power), einem Basismodul mit Display und einem Erweiterungsmodul besteht (Abb. 44). Die Programmierung erfolgte mit der Anwendung "LOGO!Comfort_V8.1" und wurde mittels Ethernet-Kabel von dem Computer auf die LOGO!-Steuereinheit importiert.

Um die Anlage betreiben zu können, werden die verschiedenen Komponenten an die Ein- und Ausgänge der LOGO!-Steuerungseinheit angeschlossen.

Die Signale der Handbetätigung der Ultraschallmaschine wurden aus dieser herausgeleitet und an den Eingängen I1 bis I4 angeschlossen. Der Start/Stopp-Schalter wird in den Eingängen I7 und I8, und der Taster zur Bestimmung der Vorschublänge (Abb. 37) in I10 eingeleitet.

Die Ausgänge Q1 bis Q4 leiten die Signale an die Ultraschallmaschine weiter. Der Ausgang Q5 steuert den Transportmotor der Folien-Aufwickel-Einheit und die Ventile des Pneumatiksystems werden durch die Ausgänge Q6, Q7 (Ventil f; Abb. 43) und Q8 (Ventil b; Abb. 43) betätigt.



Abb. 44: LOGO!-Steuerungseinheit [31]

Für die Anlage wurden zwei Programme, ein semiautomatisches und ein vollautomatisches, geschrieben. Das vollautomatische Programm arbeitet stetig, wenn es gestartet wird. Das semiautomatische Programm läuft nur einen Zyklus lang und wird verwendet, wenn die Anlage repariert oder kalibriert werden muss. Daher wurde dort auch die Zykluszeit länger gewählt als bei dem vollautomatischen Programm.

Semiautomatisches Programm

Nachdem die LOGO!-Steuerungseinheit eingeschaltet wurde, muss das Programm im Menü gestartet werden. Mit dem Start/Stopp-Schalter kann anschließend zwischen dem semiautomatischen und manuellen Betrieb geschaltet werden. Der manuelle Modus (Stopp) wird für die Einstellung des Triggerpunkts benötigt. Wird der Taster "Start" betätigt, startet das semiautomatische Programm und die manuelle Bedienung der Ultraschall-Schweißmaschine ist nicht mehr möglich. Die simulierte Ausgangssituation des Programms (Abb. 45) stellt die Zustände 1/0 in roten/blauen Linien dar. Der Schieber der Chipzuführung wird in die Ausgangsposition gefahren (Q7), der Auswerfrahmen bleibt in der Auswerfposition und der Transportmotor der Folien-Aufwickel-Einheit (Q5) fördert die Folie so lange, bis der Taster zur Bestimmung der Vorschublänge (I10) durch einen Chip betätigt wird.



Abb. 45: Ausgangssituation des semiautomatischen Programms [31]

Durch die Betätigung des Tasters wird Schritt 1 ausgelöst (Abb. 46). Das Ventil für den Hubzylinder der Chipzuführung wird umgeschaltet (Q6/Q7) und der Polymerchip wird auf den Auswerfrahmen gefördert.



Abb. 46: Schritt 1, Förderung des Chips auf den Auswerfrahmen [31]

Im zweiten Schritt (Abb. 47) wird der Schieber (Q6/Q7) wieder in seine Ausgangsposition gefahren, damit er bei den folgenden Schritten nicht beschädigt wird. Anschließend wird der Klemm-/Auswerfrahmen durch das Aktivieren des Ventils (Q8) über die vier Hubzylinder abgesenkt und der Chip mit den Klemmen auf dem Werkzeug fixiert. Damit es bei diesem Vorgang zu keinen Komplikationen kommt, wurde zwischen den Ausschaltverzögerungen B11 (Schieber) und B12 (Klemmrahmen) ein Zeitintervall von 2 s vorgesehen.



Abb. 47: Schritt 2, Absenken des Klemmrahmens und fixieren des Chips [31]

Der dritte Schritt (Abb. 48) umfasst den Ultraschallheißprägeprozess. Die Signale der Ausgänge Q1 bis Q4 werden von "0,1,0,1" auf "1,0,1,0" geschaltet, sodass die Sonotrode der US-Schweißmaschine auf den Chip herabfährt und den Ultraschall einleitet. Die Länge der Ultraschalldauer und das Hochfahren der Sonotrode wird nur von der Schweißmaschine vorgegeben. Daher müssen die Ausgänge Q1 bis Q4 nach dem Prägen wieder in ihren Ausgangszustand zurückgesetzt werden um bei dem nächsten Zyklus wieder einsatzfähig zu sein.

Um Beschädigungen an der Sonotrode zu vermeiden und ein gutes Prägeergebnis zu erreichen, ist es unbedingt notwendig, dass der Klemmrahmen während des Prozesses in seiner Klemmposition verbleibt. Ein Zeitintervall von 4 s zwischen den Ausschaltverzögerungen B19 (Klemmrahmen) und B20 (Sonotrode) schafft hier Abhilfe.



Abb. 48: Schritt 3, Ultraschallheißprägeprozess [31]

Im letzten Schritt des semiautomatischen Programms wird der Auswerfrahmen durch Umschalten von Q8 nach oben gefahren und entformt den geprägten Chip. An dieser Stelle endet das Programm, sodass für einen weiteren Zyklus erneut der Start-Schalter betätigt werden muss. In diesem Fall werden alle Ausschaltverzögerungen zurückgesetzt und der geprägte Chip wird mit der Folie aus dem Auswerfrahmen gezogen.

Während des gesamten Prozessablaufs kann der Stopp-Schalter jederzeit gedrückt werden, um den Prozess zu stoppen. Dabei werden alle Ausgänge und Ausschaltverzögerungen auf Ausgangszustand gesetzt. Und die manuelle Betätigung der Ultraschall-Schweißmaschine aktiviert. Bevor erneut ein Zyklus gestartet wird, muss überprüft werden, ob der Taster I10 nicht betätigt ist und sich kein Chip im Auswerfrahmen befindet.

Vollautomatisches Programm

Das vollautomatische Programm basiert auf der semiautomatischen Programmierung, da der eigentliche Ablauf gleich bleibt. Allerdings muss im vollautomatischen Prozess ein neuer Zyklus selbstständig angeregt werden. Deshalb werden die Ausgangssignale der Ausgänge Q6 (Schieber) und Q8 (Auswerfrahmen) genutzt, um dem Transportmotor der Folien-Aufwickel-Einheit ein Startsignal zu generieren. Um den vollautomatischen Betrieb realisieren zu können, wurden zwei wesentliche Bausteine (Abb. 49) in das Programm integriert. Ein flankengetriggertes Wischrelais (B42) erfasst den Signalwechsel (Q6) bei der Förderung des Chips auf den Auswerfrahmen aus Schritt 1 (vgl. Abb. 46). Das Signal (Q8) vom Hochfahren des Klemm/ Auswerfrahmens aus dem letzten Schritt wird durch ein NOT (B41) invertiert.



Abb. 49: Ausschnitt aus dem vollautomatischen Programm mit Markierung der wesentlichen Signalverläufe [31]

Die beiden aufgenommenen Signale (Abb. 49, schwarz, grau) werden in die Schaltung der Folien-Aufwickel-Einheit zurückgeleitet, damit der Transportmotor nach dem letzten Schritt erneut eingeschaltet wird. Dadurch werden alle Ausschaltverzögerungen zurückgesetzt und die Anlage in die Ausgangssituation versetzt.

Auch beim vollautomatischen Programm lässt sich der Prozess durch die Betätigung des Start-Schalters starten und jederzeit durch Drücken des Stopp-Schalters abbrechen
5.1.7 Gesamtaufbau

Die in Kapitel 5.1.2 bis 5.1.4 beschriebenen Konstruktionen wurden mittels der CAD-Software "PTC Creo Parametric 3.0" geplant und konstruiert. Dafür wurden die CAD-Dateien der zugekauften Bauteile bei den Firmen angefragt und mit den eigenen konstruierten Komponenten in Baugruppen ergänzt.

Die Folien-Aufwickel-Einheit (Abb. 50) wurde auf einer Grundplatte befestigt, die mit zwei Schrauben an der Ultraschall-Schweißmaschine befestigt werden kann. Dadurch besitzt dieser Aufbau schon von Haus aus eine Folienführung, die mittig unter der Sonotrode entlangläuft.



Abb. 50: CAD-Modell der Folien-Aufwickel-Einheit

Eine weitere Grundplatte (Abb. 51) beinhaltet die Prägevorrichtung, den Auswerfrahmen mit Klemmen, die Chipzuführung, die Pneumatikzylinder und ein Gerüst aus Aluminiumprofilen. Die Prägevorrichtung mit dem beheizten Amboss und dem Prägewerkzeug wurde erhöht auf Aluminiumstützen befestigt. Der Auswerfrahmen und die Klemmen wurden mit ihren Bohrungen auf Gewindestangen aufgesetzt, die als Erweiterung der Kolben der Hubzylinder fungieren. Unterhalb der Prägevorrichtung zwischen den Aluminiumstützen befindet sich der Pneumatikzylinder, der den Schieber der Chipzuführung bewegt. Das Magazin und die Führung der Chipzuführung wurden an dem Gerüst befestigt. Dadurch kann die Führung in zwei Richtungen verschoben werden, um das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten einzustellen. Seitlich an dem Gerüst befinden sich weitere Anbauten, die für die Folienführung ausschlaggebend sind.



Abb. 51: CAD-Modell der Grundplatte mit Chipzuführung und Prägevorrichtung mit Klemmrahmen

Die Folienführung (Abb. 52) wurde während der gesamten Konstruktion der Komponenten in einer weiteren Baugruppe überprüft. Diese Baugruppe besteht aus allen Anbaukomponenten, die für den automatisierten Ultraschallheißprägeprozess notwendig sind. Bei Konflikten, die sich während der Konstruktion ergaben, wurde iterativ bearbeitet, bis ein harmonierendes System vorhanden war.

Anschließend wurde der Anbau mit dem CAD-Modell der Ultraschallschweißmaschine vereinigt (Abb. 53) und eine finale Überprüfung durchgeführt, bevor die einzelnen Komponenten gefertigt wurden.



Abb. 52: CAD-Modell des Anbaus zur Überprüfung der Folienführung



Abb. 53: CAD-Modell des Anbaus an der Ultraschallschweißmaschine

Der Gesamtaufbau der automatisierten Anlage (Abb. 54) setzt sich aus den oben beschriebenen Bauteilen zusammen. Zusätzlich wird eine Erwährmungseinheit ("HT560" der Firma Horst-Gefran) benötigt, um das Prägewerkzeug vorzuheizen. Der Heizkörper mit Temperatursensor ist in einer Bohrung in der Basis des Werkzeugs befestigt, die in der Abbildung nicht zu sehen ist.



Abb. 54: Gesamtaufbau der automatisierten Anlage für die Fertigung von Mikrostrukturen durch Ultraschallheißprägen. a: Erwärmungseinheit; b: Beladungseinheit; c: Ultraschallschweißmaschine; d: Werkzeug mit Auswerfrahmen; e: Vorschubgerät; f: Steuerungseinheit; g: Pneumatiksystem [31]

5.2 Chip-zu-Rolle Fertigung von Multipfeifen

Bevor die automatisierte Anlage in Betrieb genommen werden kann, müssen einige Vorbereitungen getroffen werden. Dazu gehören die Vorbereitung der Materialien und die Einstellungen an der Folien-Aufwickel-Einheit und der Ultraschallschweißmaschine. Das folgende Kapitel beschreibt die Vorbereitungsmaßnahmen, um die Anlage in Betrieb zu nehmen, und stellt die Ergebnisse des vollautomatischen Betriebs dar.

5.2.1 Materialien und Vorbereitungen

Die Multipfeifen werden aus Polycarbonat (PC) gefertigt. Für das Ultraschallheißprägen der Mikrokanäle werden eine PC-Folie und ein PC-Chip benötigt, die vor der Verwendung auf die richtigen Maße zugeschnitten werden müssen.

<u> PC-Folie</u>

In der vorliegenden Arbeit wurde die PC-Folie "Lexan FR83" in einer Dicke von 0,125 mm verwendet. Diese Folie eignet sich besonders für den Ultraschallheißprägeprozess, da sie eine raue Seite besitzt und dadurch die Reibung zwischen Folie und Plättchen während des Prozesses erhöht. Die Folie wurde per Hand in einer Breite von $65^{+0.5}_{-0.5}$ mm von der Rolle abgeschnitten. Die jeweils etwa 90 mm langen Folienbahnen wurden anschließend mit doppelseitigem Klebeband miteinander verbunden und auf die Abwicklungsrolle aufgespult. Die Breite der Folie ist ausreichend um die Mikrostrukturen zweier Multipfeifen auf dem Werkzeug abzudecken. Beim Aufspulen der Folie muss darauf geachtet werden, dass die raue Seite der Folie auf dem Auswerfrahmen nach oben zeigt, damit die besseren Reibeigenschaften mit dem aufliegendem PC-Chip genutzt werden können.

PC-Chips

Als Grundmaterial für die PC-Chips wurde "Makrolon GP farblos 099" in einer Dicke von 1 mm verwendet. Die gelieferte Grundplatte von 500 × 500 mm² wurde mittig geteilt und anschließend in der Fräsmaschine auf Maß gefräst (Abb. 55 (a)).



Abb. 55: Fertigung der PC-Plättchen (a) und CAD-Modell eines Plättchens (b) [31]

Aus einer Platte lassen sich insgesamt 32 Chips mit den Maßen 121 × 50 × 1 mm³ fertigen. Da diese nach dem Herstellungsprozess mittig geteilt werden, entstehen daraus insgesamt 64 verwendbare Multipfeifen.

Die ausgefrästen Chips (Abb. 55 (b)) besitzen abgerundete Ecken mit einem Radius von 8 mm, um bei der Hantierung Verletzungen zu vermeiden. Der mittlere 1 mm breite Steg vereinfacht es, den gefertigten Chip entzwei zu teilen und dient als zusätzlicher Graben für das Auffangen überschüssiger Schmelze beim Ultraschallheißprägen.

Um ein Verklemmen der Chips in der Maschine zu vermeiden und ein verwendbares Enderzeugnis zu bekommen, müssen die Chips vor dem Einsatz von Polymerspänen befreit werden.

Einstellung des Chipabstands

Damit der Heißprägeprozess getriggert werden kann, muss der Taster (I10) durch einen Chip betätigt werden. Daher muss auf der über den Auswerfrahmen gespannten Folie rechtsseitig mindestens ein Chip befestigt werden. Allerdings wird dadurch auch die geförderte Folienlänge pro Zyklus und somit der Abstand zwischen zwei Chips bestimmt. Der Abstand zwischen zwei geprägten Chips Δ L lässt sich mit der Formel (3) und dem Abstand L zwischen dem Werkzeug und dem Taster bestimmen. Der geometrische Zusammenhang ist in Abb. 56 dargestellt.

$$\Delta L = L/(n+1) \tag{3}$$



Abb. 56: Abstandsbestimmung zwischen zwei Chips [31]

Der Chipabstand wurde bei den Versuchen auf 20 mm eingestellt.

Einstellungen an der Ultraschallschweißmaschine

Bevor der Ultraschallheißprägeprozess gestartet werden kann, muss der Triggerpunkt bestimmt werden. Der Triggerpunkt gibt dem System den Wegpunkt des Antriebs, an der die Schweißteiloberfläche beginnt. Da der Abstand zwischen Sonotrode und Werkzeug während des vollautomatischen Prägeprozesses konstant bleibt, muss der Triggerpunkt nur einmal zu Beginn ermittelt werden.

Um den Triggerpunkt ermitteln zu können, muss ein Chip auf den Auswerf-/Klemmrahmen platziert und auf dem Werkzeug festgeklemmt werden. Das geschieht durch die manuelle Betätigung des Ventils (Abb. 43, f), um einen Chip auf den Auswerfrahmen zu schieben, und der anschließenden Betätigung des Ventils (Abb. 43, b), um den Chip festzuklemmen. Anschließend muss der Stopp-Schalter betätigt werden, um die Ultraschallschweißmaschine manuell bedienen zu können. Die Triggerermittlung führt man mit dem dafür vorgesehenen Programm der Ultraschallschweißmaschine durch. Anschließend muss der Auswerfrahmen wieder hochgefahren und der Chip entfernt werden.

Auch die Prägeparameter, wie Ultraschallamplitude, Schweißzeit und -kraft, müssen über das Bedienpult der US-Schweißmaschine eingegeben werden. Die für das automatisierte Prägen experimentell ermittelten optimalen Parameter sind zusammen mit den Stanz- und Schweißparametern für die vollständige Herstellung der Multipfeife der Tab. 5 in Kap. 5.2.3 zu entnehmen.

Um die von der Ultraschallschweißmaschine aufzubringende Energie bis zur Glasübergangstemperatur von PC (148 °C) zu reduzieren, muss das Werkzeug zuvor auf 120 °C vorgeheizt werden. Dies geschieht durch die in dem Werkzeug eingelassene Heizpatrone und der Erwärmungseinheit. Durch das Vorheizen des Werkzeugs verkürzt sich die Schweißzeit, sodass die Zykluszeit des vollautomatischen Heißprägeprozesses ebenfalls verkürzt wird.

5.2.2 Experimentelle Validierung

Die Validierung der automatisierten Anlage wurde in verschiedenen Schritten durchgeführt.

Zum einen wurde die Anlage im semiautomatischen Programm betrieben, um die Ultraschallparameter für eine vollständige Prägung der Multipfeifen zu erhalten. Des Weiteren wurde die Zuverlässigkeit der Mechanik im vollautomatischen Betrieb untersucht und anschließend die Parameter für einen kontinuierlichen Prägevorgang angepasst.

Die für das semiautomatische Programm gefundenen Parameter zeigten ein akzeptables Prägeergebnis der Multipfeifen (Abb. 57). Die Polycarbonatplättchen wurden dabei für 0,95 s bei einer Schweißamplitude von 12,5 µm und einer Schweißkraft von 1900 N auf dem auf 100 °C vorgeheizten Werkzeug gefertigt.



Abb. 57: Prägeergebnis der Multipfeife beim semiautomatischen Programm [31]

Bei genauerer Betrachtung der Multipfeife fällt auf, dass das Polymer im linken Teil mehr aufgeschmolzen wird, als im rechten. Grund dafür ist eine nicht ausreichend ausgerichtete Ambossplatte. Daher steht das Werkzeug nicht parallel zur Sonotrode sodass die linken Mikrostrukturen höher hervorstehen und das Plättchen an dieser Stelle mehr Energie ausgesetzt wird. Ein schiefes Werkzeug kann im extremen Fall zu unvollständig geprägten Mikrostrukturen (Abb. 58) führen. Auf Grund der unzureichenden Energie wird das PC in den Ecken (Abb. 58 a) und an den Strukturen, an denen sich der größte Höhenunterschied befindet (Abb. 58 b) nicht vollständig aufgeschmolzen. Die so hergestellte Multipfeife kann nicht weiter verwendet werden, da die unvollständigen Mikrostrukturen die Funktion beeinflussen



Abb. 58: Unvollständig geprägte Mikrostrukturen [31]

und das System nach Aufschweißen der Deckelfolie nicht dicht ist.

Auch nach dem Ausrichten der Ambossplatte fällt auf, dass sich die Prägeergebnisse mit den zuvor verwendeten Parametern voneinander unterscheiden. Der direkte Vergleich zweier Prägungen unter dem Mikroskop zeigt die Fehlstellen einer unvollständigen Prägung auf (Abb. 59). Abbildung 59 (a) zeigt einen Ausschnitt der Multipfeife. Alle Strukturen sind vollständig vorhanden und weisen eine scharfe Abgrenzung zum restlichen Polymerchip auf. Im gleichen Ausschnitt einer weiteren Multipfeife (Abb. 59 (b)) wurden die Strukturen nicht vollständig abgebildet und weisen schwammige Kanten auf.



Abb. 59: Vergleich zweier Prägeergebnisse bei gleichen Herstellungsparametern mit (a) vollständig vorhandenen und (b) unvollständigen Mikrostrukturen [31]

Anschließend wurde die automatisierte Anlage im vollautomatischen Modus betrieben. Bei der Inbetriebnahme ließ sich mit den zuvor experimentell ermittelten Prägeparametern keine kontinuierlich gleichbleibende Prägequalität erreichen. Daher wurde das Werkzeug auf 120 °C vorgewärmt und die Parameter dementsprechend angepasst (vgl. Tab 5, Prägen (Auto)).

		Prägen (Auto)	Stanzen	Schweißen	
Triggerkraft [N]		130	130	130	
Schweißkraft [N]	F1	1500	130	300	0.075 0
	E0			500	0,075 \$
	ΓZ			500	0.225 0
	F3			400	0,225 5
Ultraschalldauer [s]		1,25	0,25	0,2	275
Ultraschallamplitude [µm]		13,3	24,5	30,6	
Abkühlzeit [s]		1	1	1,5	

Tab. 5: Herstellungsparameter der Ultraschallfertigung von Multipfeifen



Abb. 60: Von Rolle-zu-Rolle geprägte Multipfeifen

Mit den neuen Parametern konnte eine gleichbleibende Prägequalität erreicht werden. Daher wurde die Anlage anschließend mit diesen Parametern eingestellt und abgestimmt, sodass die Prägungen möglichst schnell hintereinander durchgeführt werden. Dabei konnte eine Geschwindigkeit von 17 s pro geprägte Multipfeife erreicht werden.

Die aufgewickelten Multipfeifen können nach Beenden des Programms entfernt und für die weitere Verarbeitung vorbereitet werden. In Abbildung 60 ist

ein 2,5 m langer Abschnitt mit 35 geprägten Multipfeifenpaaren zu sehen, für deren Fertigung ca. 10 Minuten gebraucht wurden.

6. Entwicklung eines mit Multipfeifen betriebenen Schalters

Um den Einsatz der Multipfeifen als Teillösung in AAL-Systemen zu testen, wurde ein Schaltergehäuse entwickelt, das ein reproduzierbares Signal der Multipfeife sicherstellt.

6.1 Entwicklungsprozess des Schalters

Vor dem Entwicklungsprozess des Schalters wurde eine ungewichtete Anforderungsliste mit Fest- (F) und Wunschanforderungen (W) erstellt (Tab. 6).

Element	Anforderung	F/W		
1	 Erzeugt ein reproduzierbares, detektierbares Signal Konstanter Tastenhub Balghub entspricht 9 mm Möglichst konstante Auslösegeschwindigkeit 	F		
2	Möglichst störungsarme Schallableitung aus dem Gehäuse	F		
3	Keine elektrischen Bauteile	F		
4	Auslösekraft des Balgs größer als 10 N			
5	Optische Anlehnung an existierende Lichtschalter			
6	Geringer Bauraum			
7	Einfache und kostengünstige Lösung			
8	Einfache Montage/ Demontage			
9	Geringe hörbare Anwendungsgeräusche	W		

Tab. 6: Anforderungsliste: Festanforderung (F), Wunschanforderung (W) [33]

Die Hauptanforderung, die an den Schalter gestellt wird, ist die Erzeugung eines reproduzierbaren und detektierbaren Signals (1). Dabei sollte der Schall möglichst störungsarm aus dem Gehäuse geleitet werden (2) und die Auslösekraft größer als 10 N sein, um sicher zu gehen, dass die Auslösekraft des Balgs überschritten wird (4). Dabei sollte die Kraft-Weg-Kennlinie nach dem Überschreiten der Auslösekraft abrupt abnehmen. Das Design des Schalters soll sich optisch an das eines Lichtschalters anlehnen (5) und seine Funktion ohne elektrische Bauteile ausführen (3).

6.2 Prototypen des Schalters

Um mit dem Schalter ein reproduzierbares Signal emittieren zu können, sollte dieser eine annähernd konstante Auslösegeschwindigkeit aufweisen. Daher wurde sich an dem Prinzip einer Kraftschwelle orientiert, bei der der Schalter bei einer festgelegten Kraft von > 10 N ausgelöst wird. Auf Grund der Kraftschwelle wird der Balg bei jeder Auslösung mit annähernd gleichbleibendem Druck belastet und die Auslösegeschwindigkeit reguliert. [33]

Insgesamt wurden drei Konzepte entwickelt, die das Prinzip der Kraftschwelle entweder durch Federkraft oder Magnetkraft lösen. Von diesen drei Konzepten konnten zwei Prototypen gefertigt und validiert werden.

6.2.1 Prototyp mit einer Kraftschwelle durch Blattfedern

Ziel des Prototypen war es, eine Blattfeder mit angewinkelter Form über eine schiefe Ebene auszulenken und dadurch die Kraftschwelle zu erzeugen. Bei fortschreitender Auslenkung des Tasters wird die Feder aus dem Weg gedrückt, bis nur noch die Reibungskraft wirkt. Da die Reibungskraft geringer ist als die Federkraft, nimmt die Betätigungskraft abrupt ab.

Damit eine korrekte Funktionsweise des Schalters gegeben ist, muss er unabhängig von der Art der Betätigung die gleiche Auslenkung des Multipfeifenbalgs hervorrufen. Um ein Verkippen des Tasters und damit der Auflagefläche auf dem Balg zu vermeiden, wurden vier 3 mm dicke Stifte aus Rundstahl in den Gehäuseboden verklebt (Abb. 61). Der Taster weist entsprechende 3,4 mm Bohrungen als Gleitführungen auf. Zusätzlich wurden, die Führungsstifte umgebend, Senkungen vorgesehen, um die Rückstellung des Tasters in seine Ausgangsposition durch Schraubenfedern zu realisieren, sollte der elastische Balg für eine Rückstellung nicht ausreichen. Mit Hilfe der zusätzlichen Federn lässt sich ggf. auch die Kraft-Weg-Kennlinie des Tasters beeinflussen.

Damit der Einfluss verschiedener Ausgangsöffnungen auf das Signal untersucht werden konnte, wurde der Gehäuseboden mit einer Öffnung versehen, in die unterschiedliche Einsätze montiert werden können. In Abbildung 61 sind die beiden gefertigten Einsätze mit glatter (a) und verschlossener Ausgangsöffnung (b) zu sehen.



Abb. 61: Gehäuseboden mit eingeklebten Führungsstiften mit (a) glatter und (b) verschlossener Ausgangsöffnung [33]

Bei der Konstruktion des Schalters wurden Anfangs- und Endanschläge für den Taster vorgesehen, um sicherzustellen, dass unabhängig von der Betätigung des Schalters immer das gleiche Luftvolumen durch die Multipfeife strömt. Vorausgesetzt, dass er bis zum Endanschlag gedrückt wird.

Um dieses Funktionsprinzip zu realisieren, wurden im Inneren des Gehäuserahmens Taschen und Klebeflächen für die Blattfedern vorgesehen (Abb. 62 (a)). An den entsprechenden Seitenwänden des Tasters wurden Taschen mit einer 45° Fase vorgesehen (Abb. 62 (b)).



Abb. 62: Innenansicht des Gehäuserahmens (a) und Seitenansicht des Tasters (b) [33]

Alle Gehäuseteile und der Taster wurden mittels 3D-Druck aus PLA der Firma colorFabb gefertigt und nach Bedarf manuell nachbearbeitet.



Abb. 63: Intakte und gebrochene Blattfedern [33]

Die Blattfedern (Abb. 63) wurden aus einer 0,1 mm dicken 18Cr9Ni Stahlfolie herausgeschnitten und mit einer Zange in die nötige Form gebogen. Anschließend wurden die Federn in die vorgesehenen Taschen des Gehäuserahmens mittels des Klebstoffs "Loctite" der Firma Henkel eingeklebt und der Schalter zusammengebaut. Allerdings reichte die Klebeverbindung

nicht aus, um den Belastungen Stand zu halten. Ein Einschmelzen der Blattfedern in das Gehäuse war ebenfalls nicht zielführend, da das 3D-gedruckte Gehäuse im Inneren zum größten Teil hohl ist. Die Bauteile mit 100 % Füllung wiesen einen so großen Bauteilverzug auf, dass sie nicht montiert werden konnten. Bei einem weiteren Versuch, die Blattfedern zu befestigen, wurden diese mit einem Widerhaken versehen, in einem Winkel eingeschmolzen, anschließend mit viel Kleber versehen und verdreht. Die Federn konnten so jedoch nicht exakt positioniert werden. Des Weiteren brachen die Federn bereits nach wenigen Auslenkungen an den Knickstellen, sodass diese Konstruktion verworfen werden musste, da der Prototyp mit den verfügbaren Mitteln nicht zielführend gefertigt werden konnte.

6.2.2 Prototyp mit einer Kraftschwelle durch Federbügel



Abb. 64: Schnittdarstellung einer konventionellen Lichtschalterwippe [33]

Als zweiter Ansatz erfolgte der Einbau der Wippe mit integrierter Federbügelkonstruktion aus einem konventionellen Lichtschalter (Abb. 64) in ein Gehäuse mit Multipfeife. Wird der konventionelle Schalter betätigt, wird ein gefederter Stift über die Federbügelwippe geführt. Sobald der Stift über den Drehpunkt der Wippe gelangt, wird der

Federbügel gekippt und der Schalter abrupt ausgelöst. Wird die aufgebrachte Auslö-

sekraft zurückgenommen, wird der Schalter über eine Schraubenfeder in seine Ausgangsposition zurückgestellt.



Abb. 65: Prototyp mit einer Kraftschwelle durch Federbügel. (a) Komponentenansicht, (b) geschlossener Prototyp [33]

An der Wippe wurde ein Auslenkarm mit drehbar gelagerter Druckplatte aus PMMA befestigt und in dem Gehäuseboden montiert (Abb. 65 (a)). Die Länge des Auslenkarms wurde so gewählt, dass der Hub am Balg konstant 9 mm beträgt. Anschließend wurde der Gehäusedeckel mit dem -boden verschraubt und der weiße Betätigungsschalter auf die Wippe geklemmt (Abb. 65 (b)). Auch bei diesem Prototyp wurde am Gehäuseboden eine Ausgangsöffnung vorgesehen, in die einer der beiden verschiedenen Einsätze verbaut werden kann (vgl. Abb. 61).

6.2.3 Prototyp mit einer Kraftschwelle durch Magnetkraft

Bei diesem Prototyp wurde die Kraftschwelle durch den Einsatz von Magneten um-



Abb. 66: Kraft-Abstand-Kennlinie der verwendeten zylindrischen Permanentmagneten [33], in Anlehnung an [34]

gesetzt. Auf Grund ihrer degressiven Kraft-Weg-Kennlinie ist die Kraft der sich anziehenden Magnete auf den ersten Millimetern maximal und nimmt bei größer werdenden Abstand rapide ab (vgl. Abb. 66). Die Magnetauswahl erfolgte unter Rücksichtnahme darauf, dass sie sich in das Gehäuse integrieren lassen und eine ausreichende Kraft aufweisen, um die Auslösekraft des Tasters von > 10 N zu erreichen. Da sich Bohrungen gut fertigen lassen, wurde sich für zylindrische Magnete

entschieden. Durch die Betrachtung der Kraft-Abstand-Kennlinie (Abb. 66) wurden 8 mm lange zylindrische Neodym Magnete mit einem Durchmesser von 3 mm der Firma Supermagnete ausgewählt.



Abb. 67: Innenansicht des Gehäuserahmens (a) und Unterseite des Tasters (b) mit eingeklebten Magneten [33]

Damit die gewünschte Auslösekraft erzielt wird, wurden die Magnete paarweise gegenpolig verwendet und in Bohrungen des 3D-gedruckten Gehäuserahmens (Abb. 67 (a)) und Tasters (Abb. 67 (b)) eingeklebt. So wurden jeweils vier Magnete in dem Taster und dem Gehäuserahmen verbaut. Eine Verwendung von weichmagnetischem Material, wie beispielsweise Stahlfolie, als Gegenstück hätte keine ausreichenden magnetischen Kräfte hervorgerufen. Um bei der Anwendung des Tasters ein direktes Aufeinandertreffen der Magnete und die dadurch verursachten Störgeräusche zu vermeiden, wurde ein Schaumstoffpuffer am Gehäuserahmen verklebt. Als Gehäuseboden wurde der in Kapitel 6.2.1 Beschriebene unverändert übernommen (vgl. Abb. 61).

Für die Montage der Einzelteilkomponenten (Abb. 68 (b)) wird die Multipfeife in das Gehäuse gesetzt und die Ausgangsöffnung eingesetzt, bevor der Taster auf die Führungsstäbe aufgesetzt wird. Anschließend wird der Gehäuserahmen mit dem -boden verschraubt.



Abb. 68: Schalter mit Kraftschwelle durch Magnetkraft. (a) funktionsfähige Prototypen und (b) sämtliche Einzelkomponenten [33]

6.3 Validierung der Konzepte

Um die Funktionen der beiden gefertigten Prototypen zu prüfen, wurden diese auf ihre Kraftschwelle bei Betätigung des Tasters und die Detektierbarkeit der Ultraschallsignale überprüft.

6.3.1 Überprüfung der Kraftschwelle

Die gefertigten Prototypen wurden für die Überprüfung ihrer Kraftschwelle einzelnen Druckmessungen in der Kraftprüfmaschine "Zwick Roel Z 5.0" unterzogen. Dazu wurden die zusammengebauten Schalter in die unteren Spannbacken der Prüfmaschine eingespannt. In die obere Spannbacke wurde ein Stab eingespannt, der die Funktion des Drückens auf den Taster übernahm. Der Start- und Endpunkt der Druckmessung wurde durch die Soft- und Hard-Ends der Maschine eingestellt und eine Maximaldruckkraft von 50 N festgelegt, um eine mögliche Beschädigung des Schalters zu vermeiden. Mit Hilfe des automatischen Programmablaufs wurde die Kraft-Weg-Kennlinie der Prototypen aufgenommen.

Die Druckprüfungen wurden an den beiden gefertigten Prototypen durchgeführt (Abb. 69). In einem dritten Versuch wurde der Prototyp mit Kraftschwelle durch Magnetkraft zusätzlich mit vier Schraubenfedern (Federkonstante C = 0,256 N/mm) an den Führungsstiften ausgestattet (Abb. 70).



Abb. 69: Kraft-Weg-Kennlinie des Prototyps mit Kraftschwelle durch (a) Federbügel und (b) Magnetkraft [33]

In der Kraft-Weg-Kennlinie des Prototyps mit Kraftschwelle durch Federbügel (Abb. 69 (a)) ist zu erkennen, dass eine Druckkraft mit einem Maximalwert von 13,7 N erreicht wurde. Damit liegt der gemessene Wert 3,7 N (37 %) über der gewünschten Mindestauslösekraft von 10 N. Des Weiteren ist in dem Graphen ein Hub

von 8,7 mm für die gesamte Auslösung ersichtlich, der lediglich um 0,3 mm (3,3 %) vom gewünschten Sollwert von 9 mm abweicht. Nach dem Maximalpeak sinkt die Kraft innerhalb der ersten 1,5 mm auf 9 N ab, bleibt dann allerdings für den Rest der Auslösung annähernd konstant in einem Bereich zwischen 9 N und 8 N mit einer minimalen Kraft von 8,2 N. Ist die Abnahme der Auslösekraft mit dem Weg nicht ausreichend genug, besteht die Möglichkeit, dass der Balg nicht mit einem reproduzierbaren Druck über den gesamten Weg zusammengedrückt wird. Dann kommt es zu Schwankungen der Frequenzen und eine reproduzierbare Zuordnung des Schalters ist nicht mehr möglich. Daher entspricht er nicht der geforderten Voraussetzung.

Bei dem Prototyp mit Kraftschwelle durch Magnetkraft (Abb. 69 (b)) erreicht die Druckkraft einen Maximalwert von 11,9 N. Anschließend sinkt der Verlauf der Kennlinie innerhalb eines Weges von 0,5 mm auf 9 N ab, ehe sie beinahe linear abnimmt. Damit sind alle geforderten Voraussetzungen an die Kraft-Weg-Kennlinie erfüllt.

Bei Betrachtung der Kennlinie fällt allerdings auf, dass insgesamt drei lokale Maxima vorhanden sind. Vermutet wird, dass die vier Magnetpaare nicht simultan nachgeben. Das lässt sich beispielsweise durch eine exzentrische Betätigung des Schalters oder durch die nicht exakte Positionierung der Magnete erklären. Daher sollte in Zukunft bei der Herstellung auf eine genauere Positionierung der Magnete und Führungsstäbe geachtet werden.

Die Kraft-Weg-Kennlinie des durch vier Schraubenfedern erweiterten Prototyps mit Kraftschwelle durch Magnetkraft (Abb. 70) erreichte erst nach einem Weg von etwa 2,6 mm seine Kraftschwelle bei 25,2 N. Damit übersteigt die Maximalkraft die gewünschte Kraft um den Faktor 2,5. Auch der beinahe lineare Anstieg bis zum Maximalwert erfolgt nicht abrupt, wie es für den Anwendungsfall eines Schalters benötigt wird. Dieser Verlauf der Kennlinie ist maßgeblich auf die Schraubenfedern zurückzuführen. Der plötzliche



Abb. 70: Kraft-Weg-Kennlinie des Prototyps mit Kraftschwelle durch Magnetkraft mit Erweiterung um vier Schraubenfedern [33]

Kraftabfall bei 0,8 mm Auslenkung ist, wie bei diesem Prototypen ohne zusätzliche Federn bereits festgestellt, auf eine Abnahme der Magnetkraft zurückzuführen. Aufgrund der erwähnten zu hohen Kraftschwelle nach einem größeren Weg, eignet sich dieser Prototyp nicht für die gewünschte Anwendung.

6.3.2 Detektierbarkeit der Ultraschallsignale

Für die Messungen und Auswertungen zur Detektierbarkeit der Ultraschallsignale wurde eine Messeinrichtung errichtet (Abb. 71). Der Messaufbau besteht aus einem Mikrofon, dass über einen A/D Wandler mit LabVIEW auf einem Computer angeschlossen wird. Die Spannungsversorgung von 20 V des Mikrofons geschieht über das Netzteil. Es wurden dieselben Komponenten wie aus Kapitel 4.1 verwendet und auch das LabVIEW-Programm für die Signalerkennung ähnelt dem verwendeten.



Abb. 71: Versuchsaufbau für die Messung der Ultraschallsignale [33]





Die beiden Prototypen mit Kraftschwelle durch Federbügel und mit Kraftschwelle durch Magneten wurden jeweils mit geöffnetem und geschlossenem Gehäuse bei verschiedenen Pfeifenkombinationen getestet. Pro Pfeifenpaar wurden jeweils 25 Messungen von zwei verschiedenen Personen durchgeführt. Das Mikrofon hatte dabei

einen konstanten Abstand von 1,7 m zum Schalter. Damit ein aufgenommenes Signal als detektierbar gilt, dürfen beide Signale nicht mehr als 1 kHz vom jeweiligen Sollwert abweichen. Somit ergibt sich ein 2 kHz breites Fenster in dem die Signale liegen müssen. Da nur die Messung eines Pfeifenpaares gewollt war, wurden vier Resonanzräume der Multipfeife mit einem Klebestreifen verschlossen. Übersichtlichkeitshalber wurden die Pfeifen entsprechend Abbildung 72 nummeriert. Die Ergebnisse der Versuchsreihen wurden ausgewertet und tabellarisch dargestellt (Tab. 7 - 9). Insgesamt wurden sechs verschiedene Pfeifenkombinationen pro Prototyp exemplarisch ausgewählt und getestet. Da ein Signal aus zwei Frequenzen besteht, kann es nur als detektierbar gelten, wenn beide Frequenzen dem Sollwert entsprechen. Daher ist für die detektierten Frequenzen angegeben, in wie viel Prozent der Versuche sie vom Messsystem detektiert wurden, und der jeweils niedrigere Wert ist durch einen Unterstrich markiert, da er ein Maß für die Detektierbarkeit des Pfeifenpaares ist.

Die Versuchsreihe mit dem Prototyp mit Kraftschwelle durch Federbügel mit der geschlossenen Gehäuseausgangsöffnung erbrachte keine verwertbaren Ergebnisse. Die Amplitude des Signals war im Verhältnis zu Umgebungsgeräuschen zu gering, um detektiert werden zu können. Dementsprechend ist dieser Prototyp für spätere Anwendungen nicht funktionsfähig.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe mit dem Prototyp mit Kraftschwelle durch Federbügel und dem offenen Gehäuse sind in Tabelle 7 dargestellt. Während der Versuchsreihe begann der Prototyp Störgeräusche im Ultraschallbereich zu emittieren, weshalb die Messungen von Versuch 1 und 2 nicht aufgenommen werden konnten. Die Messergebnisse der Versuche 3 bis 6 zeigen, dass die Frequenzen im besten Fall zu 96 % detektierbar waren (Versuch 3). Allerdings konnten in Versuch 5 nur 46 % des Frequenzpaares erkannt werden. Daher, und aufgrund der Kurzlebigkeit dieses Prototyps erscheint eine weitere Nachverfolgung des Konzepts nicht sinnvoll.

Tab. 7: Die obere und untere Sollfrequenz der verwendeten Multipfeifen, sowie der Prozentsatz der detektierbaren Messungen für den Prototyp mit Kraftschwelle durch Federbügel mit geöffnetem Gehäuse [33]

Versuch Pfeifen	Dfaifan	Sollfreque	nzen [kHz]	Detektierte Frequenzen [%]	
	untere	obere	untere	obere	
1	1 2	_	-	-	-
2	1 4	-	-	-	-
3	1 6	24,50	26,00	100	<u>96</u>
4	3 4	31,50	34,50	<u>72</u>	92
5	3 6	16,60	29,75	<u>46</u>	94
6	5 6	23,60	26,60	<u>80</u>	88

Aus den Ergebnissen der Tabelle 8 ist ersichtlich, dass die Detektierbarkeit der Signale des Prototyps mit Kraftschwelle durch Magneten und geöffnetem Gehäuse stark schwankt. Bei Versuch 6 konnten 98 % und bei Versuch 5 94 % der Signale erfasst werden. Die Detektion der Frequenzpaare in den Versuchen 1, 3 und 4 lag zwischen 46 % und 68 %. Mit 28 % erreichte Versuch 2 das schlechteste Ergebnis. Somit ist dieser Prototyp ebenfalls für eine Anwendung ungeeignet.

Tab. 8: Die obere und untere Sollfrequenz der verwendeten Multipfeifen, sowie der Prozentsatz der detektierbaren Messungen für den Prototyp mit Kraftschwelle durch Magnetkraft mit geöffnetem Gehäuse [33]

Versuch	Pfeifen	Sollfrequenzen [kHz]		Detektierte Frequenzen [%]	
		untere	obere	untere	obere
1	1 2	22,25	26,00	84	<u>68</u>
2	1 4	21,75	28,70	<u>28</u>	52
3	1 6	20,70	22,00	68	<u>66</u>
4	3 4	28,70	30,00	98	<u>46</u>
5	3 6	21,80	30,50	98	<u>94</u>
6	5 6	21,60	25,40	<u>98</u>	100

Der Prototyp mit Kraftschwelle durch Magnetkraft und geschlossenem Gehäuse erreichte in insgesamt drei Versuchen (1, 5, 6) eine 100 %ige Detektion der Frequenzpaare (Tab. 9). Zwei der Messreihen (3, 4) wiesen jeweils ein abweichendes Frequenzpaar auf und erreichten folglich eine Detektionsrate von 98 %. Lediglich bei Versuch 2 lagen die Frequenzen nur zu 88 % im Sollbereich. Allerdings zeigte der Prototyp bei einer beabsichtigt sehr langsamen Betätigung, wie auch bei den anderen Prototypen beobachtet, keine Schalldetektion. Jedoch scheint dieser Prototyp anfälliger für dieses Phänomen, was vermutlich auf die starke Dämpfung der Signale durch das verschlossene Gehäuse zurückzuführen ist. Außerdem erzeugt der Schalter bei der Rückstellung des Tasters ein Geräusch im hörbaren Bereich.

Vergleicht man die Bedienung des Schalters mit handelsüblichen Schaltern, so sollten die angesprochenen negativen Aspekte keine Minderung der Funktionalität darstellen. Denn auch Schalter emittieren Geräusche im hörbaren Bereich und können bei falscher Bedienung nicht richtig funktionieren.

Tab. 9: Die obere und untere Sollfrequenz der verwendeten Multipfeifen, sowie der Prozentsatz der detektierbaren Messungen für den Prototyp mit Kraftschwelle durch Magnetkraft mit geschlossenem Gehäuse [33]

Versuch	Pfeifen	Sollfreque	nzen [kHz]	Detektierte Frequenzen [%]	
		untere	obere	untere	obere
1	1 2	22,25	25,40	<u>100</u>	<u>100</u>
2	1 4	21,75	28,30	<u>88</u>	98
3	1 6	21,20	22,10	100	<u>98</u>
4	3 4	28,70	29,80	<u>98</u>	<u>98</u>
5	3 6	21,00	30,70	<u>100</u>	<u>100</u>
6	5 6	21,00	24,60	<u>100</u>	<u>100</u>

Folglich lässt sich sagen, dass der Prototyp mit Kraftschwelle durch Magnete und geschlossenem Gehäuse für spätere Anwendungen eine zielführende Lösung darstellen kann. Die besseren Ergebnisse im Vergleich zum Prototyp mit geöffnetem Gehäuse könnten auf Interferenz- oder Resonanzphänomene innerhalb des Schalters zurückzuführen sein. Zudem werden Störgeräusche durch das geschlossene Gehäuse besser herausgefiltert und die Messungen dadurch weniger stark negativ beeinflusst (Abb. 73).



Abb. 73: Amplitude über Frequenz aufgetragen für ein Beispielsignal des Prototyps mit Kraftschwelle durch Magnetkraft und geschlossener Ausgangsöffnung (a) und geöffneter Ausgangsöffnung (b) [33]

In Abbildung 73 ist der typische Verlauf der Signale eines Pfeifenpaares bei geschlossenem (a) und geöffnetem (b) Gehäuse dargestellt. In beiden Versuchen betrug die Entfernung zwischen Pfeifen und Mikrofon 1,7 m und das Signal wurde durch den Druck auf den Schalter erzeugt. Bei dem geschlossenem Gehäuse liegt die maximale Amplitude bei 0,7 V und der zweite Peak bei 0,2 V kann eindeutig zugeordnet werden (Abb. 73 (a)). Im Vergleich dazu ist die maximale Amplitude bei geöffnetem Gehäuse mit 0,9 V höher. Der zweite Frequenzpeak ist allerdings nicht eindeutig abgebildet, wodurch es zu Fehldetektionen kommen kann (Abb. 73 (b)).

6.4 Optimierung des Prototyps mit einer Kraftschwelle durch Magnetkraft und geschlossenem Gehäuse

Aufgrund der in Kapitel 6.3 erlangten Kenntnisse wurde der Prototyp mit einer Kraftschwelle durch Magnetkraft und geschlossenem Gehäuse unter den Aspekten der

Haptik, Optik, Größe und Fertigung optimiert (Abb. 74). Dazu wurde die gesamte Höhe des 80 x 80 mm² breiten Schalters von 61 mm auf 49 mm gesenkt, ohne den Hub des Tasters zu beeinflussen. Außerdem wurden die Kanten mit Rundungen versehen um eine ansprechendere Optik und Haptik zu erlangen. Die optimierten Einzelbauteile des Schalters sind in Abbildung 75 (a) dargestellt. Der Gehäuseboden wurde von überflüssigem Material befreit und so gefertigt, dass die



Abb. 74: Verbesserter Prototyp

Multipfeife in ihrer gefertigten Größe von 60 x 50 mm² eingelegt werden kann (Abb. 75 (b)). Der mit 9 mm Höhe um 18 mm niedrigere Gehäuserahmen beinhaltet neben den Magneten auch die vier Schrauben zum Zusammenbau des Gehäuses.

Durch diese Optimierungsmaßnahmen wurde eine schnellere, resourcensparende Fertigung, erreicht. Durch die Materialeinsparungen wurde das Gewicht des Schalters verringert und durch die neue Aufteilung der Gehäuseteile ein einfachere Montage erreicht.



Abb. 75: (a) Einzelkomponenten des verbesserten Prototyps und (b) eingelegte Multipfeife in den Gehäuseboden

Von dem verbesserten Schalter wurden vier Exemplare gefertigt und die Frequenzen mit vier Multipfeifen entsprechend Kapitel 6.3.2 überprüft (Tab. 10). Pro Versuch wurde ein Schalter mit einer Multipfeife 50-mal betätigt. Die Messergebnisse bestätigen die Funktionalität des Schalters. Von den sechs Versuchen konnten insgesamt vier Frequenzpaare zu 100 % erfasst werden. Lediglich bei zwei der Versuche betrug die niedrigste Detektionsrate 98 %.

Versuch	Pfeifen	Sollfreque	nzen [kHz]	Detektierte Frequenzen [%]	
		untere	obere	untere	obere
1	1 2	20,50	24,00	<u>100</u>	<u>100</u>
2	1 4	22,00	30,75	<u>100</u>	<u>100</u>
3	1 6	22,00	23,50	<u>100</u>	<u>100</u>
4	2 5	24,00	25,00	<u>100</u>	<u>100</u>
5	3 4	28,00	30,75	<u>98</u>	<u>98</u>
6	4 5	25,00	30,75	<u>98</u>	100

Tab. 10: Die obere und untere Sollfrequenz der verwendeten Multipfeifen, sowie der Prozentsatz der detektierbaren Messungen für den überarbeiteten Prototyp mit Kraftschwelle durch Magnetkraft mit geschlossenem Gehäuse

In Abbildung 76 sind der Frequenzverlauf und das Verhältnis der beiden Frequenzen zueinander von Versuch 3 graphisch dargestellt. Zu erkennen ist, dass auch wenn die Frequenzen teilweise streuen, das Verhältnis der Frequenzen zueinander (Ratio; grün) einen annähernd konstanten Verlauf aufweist. Dieses Verhalten kann zusätzlich für die Differenzierung unterschiedlicher Pfeifenpaare und die eindeutige Zuordnung eines Pfeifenpaares genutzt werden, auch wenn die Frequenzen ebendieses streuen.



Abb. 76: (a) Graphische Darstellung des Frequenzverlaufs von Versuch 3. Rot: obere Frequenz, blau: untere Frequenz, grün: Verhältnis der beiden Frequenzen

Mehrere der entwickelten Multipfeifen und Schalter wurden in einem Testraum des Lehrstuhls für Kommunikationswissenschaft (COMM) der RWTH Aachen University in ein AAL-System eingebunden und in Real-Life Szenarios getestet (Abb. 77). Über die Programmierung der Software können den Frequenzpaaren bestimmte Operationen zugewiesen werden. So werden Lampen gesteuert, ein Fernseher an- bzw. ausgeschaltet und Rollos auf- und abgefahren.



Abb. 77: Testraum des Lehrstuhls für Kommunikationswissenschaft (COMM) mit in ein AAL-System eingebundenen Multipfeifen-betriebenen Schaltern (blau) und zugehörigen Funktionen (rot) [35]

7. Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die in vorherigen Arbeiten festgestellten Schwachstellen der Mikropfeifen und ihrer Fertigung aufgegriffen und behoben.

Dazu wurde ein Werkzeug entwickelt, mit dem sechs Mikropfeifen in einem Prägevorgang auf einem Polymerplättchen eingeprägt werden. Nach dem Aufschweißen einer Deckelfolie können anschließen vier der Mikropfeifen verschlossen werden, sodass bei einer Betätigung nur zwei Frequenzen emittiert werden. Die so gefertigte Multipfeife erlaubt somit die Herstellung aller 15 Frequenzkombinationen in einem Prägevorgang auf einem standardisierten PC-Plättchen.

Als Auslösemechanismus für die Multipfeife wurden verschiedene Bälge entwickelt und auf ihre Einsetzbarkeit untersucht. Thermogeformte Polymerbälge erzielten bei Dauertests eine Versagensgrenze von etwa 80.000 Betätigungen und genügten deshalb den Anforderungen nicht. Ein mit Kohlenstofffasern verstärkter Polymerbalg überschritt mit 37,7 N die gewünschte Auslösekraft. Daher wurden mehrere Bälge mit unterschiedlichen Geometrien aus Silikon gegossen und ihre Auslösekraft experimentell ermittelt. Ein so gefertigter Balg erreichte die gewünschte Auslösekraft von 7,5 N. Der Silikonbalg konnte anschließend mit einem gefrästen oder 3D-gedruckten Klemmring auf der Multipfeife verschweißt werden. Ein in das Silikon mit eingegossener Polymerring brachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Die Versagensgrenze der Silikonbälge wurde in einem Dauertest mit Pneumatikzylindern ermittelt. Diese betrug bei dem Silikonbalg mit einer Auslösekraft von 7,5 N $5.200.000 \pm 230.000$ Auslösungen. Bälge mit anderen Geometrien erreichten 330.000 oder $10.600.000 \pm 6.000$ Betätigungen bis zum Versagen, eigneten sich allerdings aufgrund ihrer Auslösekraft von 11 N bzw. 3,7 N nicht als Anwendung für die Multipfeife. Bei der Herstellung der Silikonbälge muss darauf geachtet werden, dass keine Lufteinschlüsse geschehen, da diese die Haltbarkeit drastisch reduzieren. So erreichte der luftblasenfreie Balg mit einer Auslösekraft von 7,5 N eine Zunahme an Auslösungen um circa 450 % \pm 25 % gegenüber einem Balg mit Lufteinschlüssen im gleichen Design.

Damit für weitere Versuche eine Vielzahl an Multipfeifen zur Verfügung stehen, wurde eine automatisierte Anlage für die Chip-zu-Rolle Fertigung entwickelt, gefertigt und validiert. Diese besteht aus zwei Baugruppen, die Folien-Aufwickel-Einheit, und die Prägevorrichtung mit Klemmrahmen und Chipzuführung, die nach Bedarf an die Ultraschallheißprägemaschine montiert werden kann. Mit dem Anbau läuft der Heißprägeprozess der Multipfeifen vollautomatisch ab, sodass in ca. 10 Minuten ein 2,5 m langer Abschnitt mit 70 geprägten Multipfeifen gefertigt wurde. Pro Prägeprozess werden jeweils zwei Multipfeifen auf einem Doppel-Chip abgeprägt, der nach Aufschweißen der Deckelfolie mittig getrennt werden muss.

Das Stanzen und Verschweißen der Deckelfolie erfolgt allerdings weiterhin händisch. Eine Automatisierung dieser Prozessschritte ließe sich zukünftig durch einen Umbau der Anlage auch automatisieren.

Um die Einsatzmöglichkeit der Multipfeifen als Teillösung eines AAL-Systems aufzuzeigen, wurde ein mit Multipfeifen betriebener Schalter entwickelt. Um eine konstante Erkennung der Signale zu erreichen, wurden verschiedene Prototypen gefertigt und auf ihre Auslösekraft und Detektionsrate der Frequenzen untersucht.

Ein mit Magneten ausgestattetes Schaltergehäuse wies eine zufriedenstellende Kraftschwelle und eine ausreichende Detektionsrate der Frequenzen auf. Die Magnete wurden in dem Schalter dabei eingesetzt, um eine Auslösekraft von 11,9 N zu erreichen. Wird dieser Wert überschritten, löst der Schalter abrupt aus und die Multipfeife wird reproduzierbar ausgelöst.

Mit diesem Schalterkonzept wurde in 50 Messpunkten nur bei einem Frequenzpaar eine Detektionsrate von 88 % erreicht. Die übrigen 5 gemessenen Frequenzpaare lagen bei einer Detektionsrate von 98 % (2) und 100 % (3).

Nach der Optimierung des Schaltergehäuses wurden vier der Frequenzpaare zu 100 % detektiert. Lediglich bei zwei Pfeifenkombinationen betrug die niedrigste Detektionsrate 98 %.

In weiterführenden Versuchen in den Testräumen des Lehrstuhls für Kommunikationswissenschaft (COMM) der RWTH Aachen University werden die Schalter in ein AAL-System eingebunden und getestet. Dabei werden auch die Bedienbarkeit und Akzeptanz mit untersucht.

Das Auslöseprinzip des Schalters kann zukünftig auf andere Einsatzzwecke adaptiert werden. Durch eine Anpassung der Mechanik könnten so bspw. Sensoren für das Öffnen und Schließen von Türen oder Fenstern gefertigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Gerhardy, "Ultraschallerzeugende Mikrostrukturen für batterielose Fernbedienungen", Dissertation an der RWTH Aachen, KEmikro, Aachen, 2009.
- [2] J. M. Ibargüen Albentosa, "Remote control and position detection by micro whistles", Dissertation an der RWTH Aachen, KEmikro, Aachen, 2016.
- [3] F. Johannaber und W. Michaeli, Handbuch Spritzgießen, 2. Aufl. Hrsg., München: Hanser, 2014, ISBN: 3-446-22966-3.
- [4] H. Saechtling, Kunststoff-Taschenbuch, 29. Ausg Hrsg., München: Hanser, 2004, ISBN: 3-446-22670-2.
- [5] W. Michaeli, Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 6. Aufl. Hrsg., München: Hanser, 2010, ISBN: 978-3-446-42488-3.
- [6] W. K. Schomburg, "Heißprägen", Skript zur Vorlesung "Einführung in die Mikrosystemtechnik", KEmikro, RWTH Aachen, Aachen, 2019.
- [7] M. Heckele und W. K. Schomburg, "Review on micro molding of thermoplastic polymers", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Bd. 14, Nr. 3, pp. R1-R14, 2004, DOI: 10.1088/0960-1317/14/3/R01.
- [8] M. Worgull, Hot embossing, 1. ed. Hrsg., Bd. 7, Oxford: William Andrew, 2009, ISBN: 978-0-8155-1579-1.
- [9] Y. Qin, Hrsg., Micromanufacturing engineering and technology, 2. ed. Hrsg., Oxford, UK; Amsterdam: William Andrew an imprint of Elsevier; Elsevier, 2015, ISBN: 978-0-323-31267-7.
- [10] A. Kolew, Heißprägen von Verbundfolien f
 ür mikrofluidische Anwendungen, Hannover; Karlsruhe: Dissertation am KIT; KIT Scientific Publishing, 2012, ISBN: 978-3-86644-888-9.
- [11] V. Goodship, Practical guide to injection moulding, [Online-ausg.] Hrsg., Shawbury: Rapra Technology, 2004, ISBN: 1-85957-444-0.

- [12] H. Potente, Fügen von Kunststoffen, München: Hanser, 2004, ISBN: 978-3-446-22755-2.
- [13] J. Sackmann, K. Burlage, C. Gerhardy, B. Memering, S. Liao und W. K. Schomburg, "Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices", *Ultra-sonics*, Bd. 56, p. 189–200, 2015, DOI: 10.1016/j.ultras.2014.08.007.
- [14] J. Sackmann, "Ultraschallfertigung zur Herstellung mikrofluidischer Systeme", Dissertation an der RWTH Aachen, KEmikro, Aachen, 2016.
- [15] S. Liao, J. Sackmann, A. Tollkötter, M. Pasterny, N. Kockmann und W. K. Schomburg, "Ultrasonic fabrication of micro nozzles from a stack of PVDF foils for generating and characterizing microfluidic dispersions", *Microsystem Technologies*, Bd. 23, Nr. 3, p. 695–702, 2017, DOI: 10.1007/s00542-015-2708-z.
- [16] P. Maurer, S. Gräber, W. Jahnen-Dechent und W. K. Schomburg, "Polymer Micro Chips for the Analyses of Calcification Risk", *Procedia Engineering*, Bd. 168, p. 1386–1389, 2016, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.386.
- [17] J. M. Ibargüen, R. Lewandowski, C. Gerhardy und W. K. Schomburg, "Position detection and remote controls powered by micro whistles", *Sensors and Actuators A: Physical*, Bd. 212, p. 143–150, 2014, DOI: 10.1016/j.sna.2014.02.031.
- [18] T. Runge, J. Sackmann, W. K. Schomburg und L. M. Blank, "Ultrasonically manufactured microfluidic device for yeast analysis", *Microsystem Technologies*, Bd. 23, Nr. 6, p. 2139–2144, 2017, DOI: 10.1007/s00542-016-3007-z.
- [19] W. K. Schomburg, K. Burlage und C. Gerhardy, "Ultrasonic Hot Embossing", *Micromachines*, Bd. 2, Nr. 2, p. 157–166, 2011, DOI: 10.3390/mi2020157.
- [20] B. Memering, "Rolle-zu-Rolle Fertigung von Mikrostrukturen durch Ultraschallheißprägen", Dissertation an der RWTH Aachen, KEmikro, Aachen, 2014.
- [21] P. Maurer, "Automatisierung eines Ultraschallheißprägeprozesses", Diplomarbeit an der RWTH Aachen, KEmikro, Aachen, 2013.

- [22] J. Kosloh, J. Sackmann und W. K. Schomburg, "Ultrasonic fabrication of micro fluidic channels from polyether ether ketone (PEEK)", *Microsystem Technologies*, Bd. 23, Nr. 12, p. 5505–5513, 2017, DOI: 10.1007/s00542-017-3284-1.
- [23] S. Liao, C. Gerhardy, J. Sackmann und W. K. Schomburg, "Tools for ultrasonic hot embossing", *Microsystem Technologies*, Bd. 21, Nr. 7, p. 1533–1541, 2015, DOI: 10.1007/s00542-014-2232-6.
- [24] F. Beckmann, J. Sackmann und W. K. Schomburg, "Mikropfeifen für selbständiges Wohnen im Alter", *MikrosyStemTechnik Kongress 2017, Proceedings*, p. 503–506, München, 2017, ISBN: 978-3-8007-4491-6.
- [25] B. Memering, C. Gerhardy und W. K. Schomburg, "Rolle-zu-Rolle-Produktion von Mikrosystemen aus Kunststofffolien mittels Ultraschallheißprägen", *Mikro-SystemTechnik Kongress 2013, Proceedings,* pp. 313 - 316, Aachen, 2013, ISBN: 978-3-8007-3555-6.
- [26] C. Gerhardy, K. Burlage und W. K. Schomburg, "Coded ultrasonic remote control without batteries", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Bd. 19, Nr. 7, p. 074002, 2009, DOI: 10.1088/0960-1317/19/7/074002.
- [27] K. Kappe, "Herstellung eines kohlenstofffaserverstärkten Bauteils mittels Ultraschall", Bachelorarbeit an der RWTH Aachen, KEmikro, Aachen, 2017.
- [28] P. Eyerer, G. Twardon, J. Schneider, F. Leibrandt und V. Gettwert, Eigenschaften von Kunststoffen in Bauteilen. In: Polymer Engineering. VDI-Buch, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, DOI: 10.1007/978-3-540-72419-3_3.
- [29] Wacker Chemie AG, "ELASTOSIL®RT 625 A/B", 2014. [Online]. Available: https://www.wacker.com/cms/de/products/product/product.jsp?product=13307. [Zugriff am 30.05.2019].
- [30] Formfutura VOF, "Technical Data Sheet", 2016. [Online]. Available: https://www.formfutura.com/web/content/4571. [Zugriff am 30.5.2019].
- [31] T. Wang, "Entwicklung der automatischen Fertigung von Ultraschallpfeifen", Bachelorarbeit an der RWTH Aachen, KEmikro, Aachen, 2018.

- [32] Horst Sitte Heißprägetechnik, "Bedienung-VE120-450B", 2017. [Online]. Available: https://sittehorst.de/images/pdf/Bedienung-VE120-450B.pdf. [Zugriff am 25.06.2019].
- [33] H. Oberlack und K. Müller, "Entwicklung eines Lichtschalters ohne elektrische Bauteile", Projektarbeit an der RWTH Aachen, KEmikro, Aachen, 2018.
- [34] Webcraft GmbH, "Haftkraftberechnung", [Online]. Available: https://www.supermagnete.de/adhesive-force-calculation/result?paramset=m/S-03-08-N. [Zugriff am 24.09.2019].
- [35] S. Himmel, J. van Heek, "Labor des Lehrstuhls für Kommunikationswissenschaft", unveröffentlichtes Bild, Lehrstuhl für Kommunikationswissenschaft (COMM) der RWTH Aachen, Aachen, 2019.

A. Anhang

A.1 Datenblätter

A.1.1 3D-Druck Filament "Formfutura ApolloX"

Technical Data Sheet



Product name: ApolloX[™]

v3

Version:

ApolloX is a professional high-performance engineering filament, which is based on an uniquely industrial-grade modified ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate) compound. ApolloX has been modified to have great thermal stability, improved filament flowing behavior, zero-warping and flawless first- and interlayer adhesion allowing you to 3D print objects with an almost injection-molded precision. ApolloX is UV and weather resistant and by that ensuring great color stability – combined with high strength and heat resistant properties – which makes ApolloX a perfect engineering filament for outdoor and automotive applications.

Properties	Typical value	Test Method	Test condition
Physical			
Specific gravity	1.11 g/cc	ISO 1183	-
Melt flow rate	45 g/10min	ISO 1133	260° C/5Kg
Water absorption	-	-	-
Moisture absorption	-	-	-
Mechanical			
Impact strength	18 KJ/m²	ISO 179	Charpy Notched @23° C (73° F)
Tensile strength	47.5 Mpa	ISO 527	@Yield 50mm/min (2 inch/min)
Tensile modulus	2020 Mpa	ISO 527	1mm/min
Elongation at break	15%	ISO 527	@ Break 50mm/min (2 inch/min)
Flexural strength	-	-	-
Flexural modulus	-	_	_
Hardness	-	-	-
Thermal			
Print temperature	± 235 - 255° C	-	-
Melting termperature	\pm 230 \pm 10° C	ISO 294	-
Viscat softening temp.	± 98° C	ISO 306	VST/A/50 (50° C/h, 10N)
Optical			
Haze	-	-	-
Transmittance	-	-	-
Gloss	-	-	-

Product details, c	ertifications and co	mpliance	Diameter	Tolerance	Roundness
HS Code	39169090		1.75mm	± 0.05mm	≥ 95%
REACH compliant	Yes		2.85mm	± 0.10mm	≥ 95%
RoHS certified	Yes				
Formfutura BV	Co	C: 69099502		Tel:	+31 (0)85 002 0881
Groenestraat 215	VA	r: NL85773370	09B01	Email:	info@formfutura.com
6531 HH Nijmegen	EO	RI: NL85773370	09	Website:	www.formfutura.com
The Netherlands					

All information supplied by or on behalf of Formitutura in relation to its products, whether in the nature of data, recommendations or otherwise, is supported by research and, in good faith, believed reliable, but Formfutura assumes no liability and makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, those of title, merchantability, fitness for a particular purpose or non-infringement or any warranty arising from a course of dealing, usage, or trade practice whatsoever in respect of application, processing or use made of the forementioned information or product. The user assumes all responsibility for the use of all information provided and shall verify quality and other properties or any consequence from the use of all such information. Typical values are indicative only and are not to be construed as being binding specifications.
A.1.2 3D-Druck Filament "colorFabb PLA/PHA Premium Filament"

				LUC
Technical data sheet				plastics - made by nature!®
Product name: Date of issue:	Bio-Flex [®] V 135001 28 July 2014	(trial grade)		Version: 4.0
Designation of product, preparation a	nd manufacturer			
Trade name:	Bio-Flex [®] V 135001 (trial gra	de)		
Use of product:	Polymer blend based on po	y lactid acid,	suitable for the product	ion of 3D printing filaments.
Manufacturer:	FKuR Kunststoff GmbH Siemensring 79 D - 47 877 Willich Phone: + 49 (0) 2154 / 92 5 Fax: + 49 (0) 2154 / 92 51-5 Mail: info@fkur.com Web: www.fkur.com	1-0 i1		
Mechanical properties				
Modulus of elasticity Tensile strength Tensile strain at tensile strength Tensile stras at break Tensile strain at break		2,960 61.5 5.3 38 10.5	[MPa] [MPa] [%] [MPa] [%]	ISO 527 ISO 527 ISO 527 ISO 527 ISO 527 ISO 527
Flexural modulus Flexural strain at break Flexural stress at 3.5 % strain		3,295 no break 88.8	[MPa] [%] [MPa]	ISO 178 ISO 178 ISO 178
Notched impact strength (Charpy), RT Impact Strength (Charpy), RT Shore D hardness		2.8 30.8 n/a	[kJ/m²] [kJ/m²] [-]	ISO 179-1/1 eA ISO 179-1/1 eU DIN 53505
Density Bulk density		1.24 n/a	[g/cm³] [kg/m³]	ISO 1183 ISO 60
The values listed have been established on stand	lardized test specimens (DIN EN IS	O 3167, type A)	at standard temperature an	d humidity conditions.
Thermal properties				
Melting temperature Vicat A softening temperature Heat distortion temperature HDT B		> 155 n/a n/a	[°C] [°C] [°C]	ISO 3146-C ISO 306 ISO 75
Melt volume rate (190 °C/2.16 kg) Melt flow rate (190 °C/2.16 kg)		n/a 3.0 - 5.0	[cm³/10 min] [g/10 min]	ISO 1133 ISO 1133
Legal notice				
The figures should be regarded as guide	values only. Under certain co	nditions the p	roperties can be influen	ced to a significant extent by

The figures should be regarded as guide values only. Under certain conditions the properties can be influenced to a significant extent by the processing conditions.

Neither FKuR Kunststoff GmbH nor its marketing affiliates shall be responsible for the use of this information or of any product, method or equipment mentioned. Customers must undertake their own determination of this product's suitability and completeness for their own use, for the protection of the environment, for the health and safety of their employees and purchasers of their products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product, and nothing herein waives any of the seller's conditions of sale. The current version of General Conditions of Sale of FKuR Kunststoff GmbH is valid.

The brands "FKuR – Plastics made by nature" and "BIO-FLEX" are registered trademarks of FKuR Kunststoff GmbH, according to the international 'Nice-Classifications' (NCL9), no. 01, 02 and 17.

plastics - made by nature!®

A.1.3 2-Komponenten Silikon "Wacker ELASTOSIL RT 625 A/B"

WACKER

ELASTOSIL®

ELASTOSIL® RT 625 A/B

Product description

Pourable, addition-curing, two-component silicone rubber that vulcanizes at room temperature.

Special features

- easy to process because of low viscosity
- fast and non-shrink cure at room temperature which can be accelerated considerably by the application
- of heat
- cures in closed systems
- low Shore A hardness (approx. 25)
- high elongation, outstanding tensile strength
- excellent tear strength
- cured rubber is translucent and colorless

- can be pigmented with 1-4 % ELASTOSIL[®] Pigment Pastes FL

Application

- encapsulation of electrical and electronic
- components
- coatings
- manufacture of technical mouldings by casting
- mold making

Processing

Important

The platinum catalyst is contained in component B.

Caution

Only components A and B that have the same lot number may be processed together!

To ensure optimum flow of the material, the components must be stirred thoroughly before they are removed or processed in their containers.

We recommend running preliminary tests to optimize conditions for the particular application. Comprehensive processing instructions are given in our leaflet "Wacker RTV-2 Silicone Rubber - Processing".

Detailed information on other mold-making compounds is contained in our brochure "ELASTOSIL[®] M. Mold-Making Compounds For Maximum Precision".

Pigmentation

If so desired, 1-4 wt % ELASTOSIL[®] Pigment Pastes FL can be added, preferably to Component A.

For more detailes, please refer to our leaflet "ELASTOSIL [®]Pigment Pastes FL".

Storage

The 'Best use before end' date of each batch is shown on the product label.

Storage beyond the date specified on the label does not necessarily mean that the product is no longer usable. In this case however, the properties required for the intended use must be checked for quality assurance reasons.

Additional information

Please visit our website www.wacker.com.

Safety notes

Components A and B of the addition-curing grade ELASTOSIL® RT 625 A/B contain only constituents that over many years have proved to be neither toxic nor aggressive. Special handling precautions are therefore not required, i.e., only the general industrial hygiene regulations apply.

Comprehensive instructions are given in the corresponding Material Safety Data Sheets. They are available on request from WACKER subsidiaries or may be printed via WACKER web site http://www.wacker.com.

Technical data sheet for ELASTOSIL® RT 625 A/B / Version: 1.3 / Date of last alteration: 10.11.2014

WACKER



Inspection Method	Value
	translucent
	1,10 g/cm ³
ISO 3219	25000 mPa s
	colorless
	0,98 g/cm ³
ISO 3219	900 mPa s
A : B	9:1
ISO 3219	12000 mPa s
	60 min
	12 h
	translucent
ISO 2781	1,10 g/cm ³
ISO 868	25
ISO 37	6,50 N/mm ²
ISO 37	600 %
ASTM D 624 B	30 N/mm
	< 0,1 %
	Inspection Method ISO 3219 ISO 37 ISO 37 ISO 37 ASTM D 624 B

Compression moulded 10 min at 100 °C.

These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications.

The data presented in this medium are in accordance with the present state of our knowledge but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this medium should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The information provided by us does not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infingement of third paties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the product for a particular purpose. The management system has been certified according to DIN EN ISO 9001 and DIN EN ISO 14001

WACKER® is a trademark of Wacker Chemie AG. ELASTOSIL® is a trademark of Wacker Chemie AG. For technical, quality, or product safety questions, please contact:

Wacker Chemie AG Hanns-Seidel-Platz 4 81737 München, Germany info.silicones@wacker.com

www.wacker.com

Technical data sheet for ELASTOSIL® RT 625 A/B / Version: 1.3 / Date of last alteration: 10.11.2014

2/2

A.1.4 Polycarbonatplatte "Makrolon GP clear 099", 1 mm

covestro

Produktdatenblatt, September 2015

Makrolon[®] GP

Massivplatten aus Polycarbonat



Ihre Vorteile:

- extreme Schlagzähigkeit
- breiter Temperaturbeständigkeitsbereich
- gute Brandschutzklassifizierung

Makrolon® GP sind klare, polierte, UV-stabilisierte Polycarbonatplatten. Sie bieten extreme Schlagfestigkeit, die über die physikalischen Eigenschaften ihrer Klasse hinausgehen. Die Makrolon® Massivplatten sind in einem Bereich von –100 °C bis +120 °C temperaturbeständig, optisch sehr klar und haben eine gute Brandschutzklassifizierung.

Makrolon® GP clear 099 ist eine klare transparente Platte mit hoher Lichtdurchlässigkeit.

Makrolon® NR clear 099 ist eine transparente Platte mit einer matten Antireflex-Beschichtung sowie einseitig verbessertem UV-Schutz.

Makrolon® GP white 130 und **white 150** sind weiße transluzente Platten mit guter Lichtstreuung.

Makrolon® GP umbra 775 sind bräunlich durchscheinende Platten.

Makrolon[®] FR clear 099 ist eine farblose transparente Platte mit einer verbesserten Brandschutzklassifizierung, geprüft nach UL94.

Makrolon[®] FG clear 099 ist eine farblose transparente Platte für den Einsatz im Lebensmittelbereich und medizinischen Bereich.

Anwendungen:

Makrolon[®] GP Platten eignen sich hervorragend für Maschinenschutz, Leuchtenabdeckungen, Schilder und Plakattafeln sowie Wandtrennelemente und Türverglasungen.

Die Platten sind extrem schlagzäh und bieten einen hervorragenden Schutz vor mutwilliger Zerstörung. **Makrolon® GP** Platten sind warm umformbar, können kalt eingebogen werden und sind leicht zu verarbeiten.

	Prüfbedingungen	Richtwerte ⁽¹⁾	Einheit	Testmethode
PHYSIKALISCH Dichte Feuchtigkeitsaufnahme (Sättigungswert) Feuchtigkeitsaufnahme (Gleichgewichtswert) Brechungsindex	Wasser bei 23 °C 23 °C, 50% relative Feuchtigkeit Verfahren A	1200 0,30 0,12 1,587	kg/m ³ % ~	ISO 1183-1 ISO 62 ISO 62 ISO 489
MECHANISCH Zug-Modul Streckspannung Streckkahnung Biege-Modul Biegefestijkeit Charpy-Schlagzähigkeit Charpy-Schlagzähigkeit Izod-Schlagzähigkeit	1 mm/min 50 mm/min 50 mm/min 2 mm/min 2 mm/min 23 mc, ohne Kerbe 23 °C, 3,2 mm, gekerbt 23 °C, 3,2 mm, gekerbt	2350 60 6 50 2350 90 90 90 90 90 90 90 90 90 9	MPa MPa % MPa MPa kJ/m ² kJ/m ²	ISO 527-1,-2 ISO 527-1,-2 ISO 527-1,-2 ISO 527-1,-2 ISO 178 ISO 178 ISO 179-1eU ISO 179-1eA ISO 180-A
THERMISCH Vicat-Erweichungstemperatur Warmeleitfaligkeit Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient Formbeständigkeitstemperatur Formbeständigkeitstemperatur	50 N, 50°C/h 23°C 23 bis 55°C 1,80 Mpa 0,45 Mpa 0,45 Mpa	148 0,20 0,65 128 140	°C W/mK 10⁴/K °C °C	ISO 306 ISO 8302 ISO 11359-1,-2 ISO 75-1,-2 ISO 75-1,-2
ELEKTRISCH Spannungsfestigkeit Spezifischer Durchgangswiderstand Spezifischer Oberflächerwiderstand Relative Dielektrizitäszahl Dielektrischer Verlustfaktor Dielektrischer Verlustfaktor	1 mm 100 Hz 1 MHz 100 Hz 1 MHz	34 1E14 1E16 3,1 3,0 5 95	kV/mm Ohm.m Ohm - 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁴	IEC 60243-1 IEC 60093 IEC 60293 IEC 60250 IEC 60250 IEC 60250 IEC 60250

(1) Diese Werte wurden an Spritzgussmustern ermittelt und können nicht als Basis für eine Kundenspezifikation herangezogen werden.



MF 0107 d

Produktdatenblatt, September 2015

Makrolon® GP Massivplatten aus Polycarbonat



Covestro S-Line, die Standard-Produktlinie, ist ein Sortiment aus zertifizierten Qualitätsprodukten, die bewährte Lösungen bei vielen Anwendungen bietet.

Lichtdurchlässigkeit: Testmethode nach DIN 5036 - Die angegebenen Dicken sind nicht alle standardmäßig erhältlich. Bitte fragen Sie für nähere Informationen an. Die angegebenen Werte sind Richtwerte.

Lichtdurchlässigkeit in %	0,75	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	15
Makrolon® GP clear 099	90	90	89	89	88	87	87	86	85	83	82	80
Makrolon® NR clear 099		83	83	82	82	80						
Makrolon® GP white 130				40	30	23	18	13				
Makrolon® GP white 150				60	50	40	33	28	20			
Makrolon® GP umbra 775						75	69	65	62	53		
Makrolon® FR clear 099					88	86	85	84				

Verfügbare Abmessungen: Makrolon® ist in den Dicken 0,75 – 15 mm und in den folgenden Maßen erhältlich, andere Maße, Farben und Plattenstärken sind anzufragen.

Farben:

Makrolon® GP clear 099 Makrolon® GP white 130 Makrolon® GP white 150 Makrolon® GP umbra 775 Makrolon® NR clear 099 Makrolon® FR clear 099 Makrolon® FG clear 099 Formate (Standard): 2.050 x 1.250 mm

3.050 x 2.050 mm

Dauergebrauchstemperatur: Die Dauergebrauchstemperatur liegt bei ca. 120 °C.

Brandschutzklassifizierung (*): Sauerstoffindex (LOI) ISO 4589-2, Methode A: 28% für Makrolon® GP, 43% für Makrolon® FR

Land	Standard	Klassifizierung	Dicke	Farbe
Deutschland	DIN 4102	B1 (Innenbereich) brennend abtropfend	1 – 6 mm 2 – 3 mm	GP clear 099 GP white 150
		B2	≥ 0,75 mm	GP alle Farben
	DIN 5510-2	S3 SR2 ST1 S4 SR2 ST2	2 – 8 mm 5 mm	GP clear 099 FR clear 099
Frankreich	NFP 92-501&505	M2	1 – 15 mm	GP clear 099
	NF F 16-101&102	F2	0,75 – 15 mm	GP clear 099
Europa	EN 13501-1	B s1 d0 B s2 d0	1 – 3 mm 1 – 6 mm	GP clear 099 GP alle Farben außer 150
USA	UL94	V2 HB V0	0,75 – 1,4 mm ≥ 1,5 mm ≥ 10 mm	GP alle Farben GP alle Farben GP clear 099
		VO	≥ 2 mm	FR alle Farben

Glühdrahttest, IEC 60695-2-12, in °C (*):

0,75	1	1,5	2	3	4	5	6	12
850	850	800	800	850	960		960	960
			900	960	960			
			960	960				
	0,75 850	0,75 1 850 850	0,75 1 1,5 850 850 800	0,75 1 1,5 2 850 850 800 800 900 900 960	0,75 1 1,5 2 3 850 850 800 800 850	0,75 1 1,5 2 3 4 850 850 800 800 850 960 9 9 9 960 960 960 9 9 9 960 960 960	0,75 1 1,5 2 3 4 5 850 850 800 800 850 960 - 900 960 960 960 960 - -	0,75 1 1,5 2 3 4 5 6 850 850 800 800 850 960 960 960 1 900 960 960 960 960 960

⁴/⁹ Brandzertifikate sind produktspezifisch und teilweise zeitlich begrenzt gültig, bitte überprüfen Sie in dem betreffenden Zertifikat immer die Gültigkeitsdauer und -umfang. Das Brandverhalten von Pölycarbonat-Piatten kann durch Alterung und Bewitterung beeinflusst werden. Die Brandklassifizierung wurde entsprechend den Vorgaben der jeweils angegebenen Brandschutznormen an neuen, unbewitterten Pölycarbonat-Piatten getestet.



Covestro Deutschland AG Business Unit Polycarbonates 51365 Leverkusen Deutschland



www.sheets.covestro.com sales.sheetsEMEA@covestro.com

Makrolon® ist eine eingetragene Marke der Covestro AG

A.1.5 Polycarbonatfolie "Lexan FR83", 125 µm

SABIC Innovative Plastics™



Lexan* FR83 Film

Description

Lexan* FR83 flame-retardant film is a matt/polished, thin-gauge polycarbonate film with a UL94 VTM-0 listing to meet the stringent requirements in a wide range of electrical, electronic and transportation applications. Lexan FR83 film offers ease of thermoforming, hydroforming, embossing, die-cutting, folding, and bending and is very suitable for applications such as printed circuit board insulation, backlit aircraft in-flight panels and displays, business equipment insulation, computer rack partitions, TV and monitor insulation, PC Board insulation, and can be foil laminated for insulation and shielding.

Typical property Values*

Property	ASTM Test Method	Units (USCS)	Value	ISO Test Method	Units (SI	() Value
Mechanical						
Tensile Strength						
@ Yield	ASTM D882	psi	10000	ISO 527	MPa	70
Ultimate	ASTM D882	psi	8700	ISO 527	MPa	60
Tensile Modulus	ASTM D882	psi	319000	ISO 527	MPa	2200
Tensile Elongation at Break	ASTM D882	%	100-160	ISO 527	%	100-155
Gardner Impact Strength at 0.03 in. (0	0.75 mm) ASTM D3029	ft-lb	21	ISO 6603-1	J	28
Tear Strength						
Initiation	ASTM D1004	lb/mil	1.4 - 1.8		kN/m	298
Propogation	ASTM D1922	g/mil	30 - 55		kN/m	6
Puncture Resistance (Dynatup)	ASTM D3763	ft-lb	9		J	12
Thermal						
Coefficient of Thermal Conductivity	ASTM D5470	Btu/hr/ft ² /°F/in	1.35		W/m°K	0.2
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	(x10 ⁻⁵ /°F)	3.2	ISO 11359		5.8
Specific Heat @ 40 °F (4 °C)	ASTM E1269	Btu/lb/°F	0.3		KJ/Kg-°C	1.25
Glass Transition Temperature	ASTM D3417/D3418	°F	307	ISO 11357	(v10-5/0C)	153
Vicat Softening Temperature, B	ASTM 1525-00 Modified	°F	347		(x10°/°C)	175
Heat Deflection Temp. by TMA at 1.8 M	Ipa	°F	290	ISO 75 Modified	°C	145
Shrinkage at 302°F (150°C)	ASTM D1204	%	0.02%		%	0.02%
Brittleness Temperature	ASTM D746	°F	-211		°C	-135

UL Flammability Rating / Performance Levels

Manufacturing Specifications

Thickness	Rating	HWI	HAI
>= 0.002" (0.050mm) and < 0.010" (0.250mm)	UL94VTM-0	-	
CTI: 3			
File Number	E103380		

Nominal Gauge	Min./Max Limit
Ranges	of Nominal
.002 - 0.007" (0.050 - 0.175mm)	-/+ 10%

 These are typical properties and are not intended for specification purposes. If minimum certifiable properties are required, please contact your local SABIC Innovative Plastics' representative or the Quality Services Department. Reported Values are Based on 0.010" (0.250 mm) Thickness unless otherwise noted.

Lexan*

SABIC Innovative Plastics™



Product Datasheet

Lexan* FR83 Film

Property	ASTM Test Metho	d Units	Value	ISO Test Method	Units	Value
Physical						
Density	ASTM D792	slua/ft3	2.6	ISO 1183	kg/m ³	1330
Water Absorption, 24 hrs.	ASTM D570	% change	e 0.28	ISO 62	% change	0.28
Surface Energy (1st surface / 2nd surface)	ASTM D5946-01	-	34/36			
Surface Tension (1st surface / 2nd surface)	Dyne Pens	Dyne	>44 / 38-40			
Optical						
Refractive Index @77°F (25° C)	ASTM D542A	-	1.6			
Light Transmission	ASTM D1003	%	88			
Yellowness Index	ASTM D1925	%	1.1			
Haze	ASTM D1003	%	88			
Gloss over Flat Black min/max @ 60°	ASTM D523-60	-	10	ISO 2813	-	10
Electrical						
Dielectric Strength in oil, short time						
@ 72° F (23°C), 10 mils (0.25 mm)	ASTM D149-97a Meth	od A kV/mil	1.5	IEC 60243	kV/mm	59
Dielectric Constant	ionn or no or a nea		1.0	120 002 10	,	00
@ 60 Hz	ASTM D150	-	2.9	IEC 60250	-	2.9
@1,000,000 Hz	ASTM D150	-	2.8	IEC 60250	-	2.8
Dissipation Factor				00000000000		
@ 60 Hz	ASTM D150	_	0.0026	IEC 60250	-	0.0026
@ 1,000,000 Hz	ASTM D150	-	0.0117	IEC 60250	-	0.0117
Volume Resistivity	ASTM D257	Ωcm	1.00E+17	IEC 60093	Ω cm	1.00E+17
Surface Resistivity	ASTM D257	Ω /square	1.00E+16	IEC 60093	Ω/square	1.00E+16
Arc Resistance, Tungsten Electrodes	ASTM D495	S	64			



* Trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV

Americas: SABIC Innovative Plastics Specialty Film & Sheet One Plastics Avenue Pittsfield, MA 01201, USA Tel. (1) (413) 448 5400 Fax. (1) (413) 448 7506 Toll free: 1-800 451 3147

Europe: SABIC Innovative Plastics Specialty Film & Sheet Plasticslaan 1 NL - 4612 PX Bergen op Zoom The Netherlands Tel. (31) (164) 292911 Fax. (31) (164) 293272

Pacific SABIC Innovative Plastics Specialty Film & Sheet 1468 Nanjin Road (W) 26th Floor, United Plaza 200040 Shanghai, China Tel. (86) 21 3222 4500 Fax. (86) 21 6289 8998

Toll tree: 1-800 451 3147 Fax. (31) (164) 293272 Fax. (86) 21 6289 8998 THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SABIC INNOVATIVE PLASTICS HOLDING BV, ITS SUBSIDIARIES AND AFFLILATES ("SELLER"), ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH CAN BE FOUND AT http://www.sabic-ip.com AND ARE AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION OR RECOMMENDATION CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, SELLER MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, (1) THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDORE RAD-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SELLER'S PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS. EXCEPT AS PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULITING FROM ANY USE OF ITS PRODUCTS OR SERVICES DESCRIBED HEREIN. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's grouted, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. No statement by Seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller's Standard Conditions is a trademark of Sabit Fudding Europe BV

SABIC Innovative Plastics is a trademark of Sabic Holding Europe BV

* Trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV www.sabic-ip.com

Latest update Sabic (10/07)

A.1.6 Stabmagnet "S-03-08-N"



Telefon: +49 7731 939 839 1

Datenblatt Artikel S-03-08-N

Technische Daten und Anwendungssicherheit

Webcraft GmbH Industriepark 206 78244 Gottmadingen, Deutschland www.supermagnete.de support@supermagnete.de

1. Technische Angaben

Artikel-ID	S-03-08-N
EAN	7640155436991
Werkstoff	NdFeB
Form	Stab
Durchmesser	3 mm
Höhe	8 mm
Toleranz	+/- 0,1 mm
Magnetisierungsrichtung	axial (parallel zu Höhe)
Beschichtung	vernickelt (Ni-Cu-Ni)
Herstellungsart	gesintert
Magnetisierung	N48
Haftkraft	ca. 410 g (ca. 4,02 N)
max. Einsatztemperatur	80°C
Gewicht	0,4298 g
Curie-Temperatur	310 ℃
Remanenz Br	13700-14200 G, 1.37-1.42 T
Koerzitivfeldstärke bHc	10.8-12.5 kOe, 860-995 kA/m
Koerzitivfeldstärke iHc	≥12 kOe, ≥955 kA/m
Energieprodukt (BxH)max	45-48 MGOe, 358-382 kJ/m ³



Schadstofffrei gemäß RoHS-Richtlinie 2011/65/EU.

2. Warnhinweise

Gefahr	Verschlucken
	Kinder können kleine Magnete verschlucken. Wenn mehrere Magnete verschluckt werden, können diese sich im Darm festsetzen und lebensgefährliche Komplikationen verursachen.
0-14	Magnete sind kein Spielzeug! Stellen Sie sicher, dass die Magnete nicht in die Hände von Kindern gelangen.
Cafaba	
Geranr	l Elektroleitfähigkeit
Gefanr	Elektroleitfähigkeit Magnete sind aus Metall und leiten elektrischen Strom. Kinder können versuchen, Magnete in eine Steckdose zu stecken und dabei einen Stromschlag erleiden.

Datenblatt Artikel S-03-08-N

www.supermagnete.de

Seite 1 von 3

Warnung Metall-Splitter



Neodym-Magnete sind spröde. Wenn zwei Magnete kollidieren, können sie zersplittern. Scharfkantige Splitter können meterweit weg geschleudert werden und Ihre Augen verletzen.

Vermeiden Sie Kollisionen von Magneten.
Tragen Sie bei der Handhabung von größeren Magneten eine Schutzbrille.
Achten Sie darauf, dass umstehende Personen ebenfalls geschützt sind oder Abstand halten.

3. Handhabung und Lagerung

Vorsicht	Magnetisches Feld
	Magnete erzeugen ein weit reichendes, starkes Magnetfeld. Sie können unter anderem Fernseher und Laptops, Computer-Festplatten, Kreditkarten und EC-Karten, Datenträger, mechanische Uhren, Hörgeräte und Lautsprecher beschädigen.
	Halten Sie Magnete von allen Geräten und Gegenständen fern, die durch starke Magnetfelder beschädigt werden können. Perstense Tehelle mit energieblenen Abständen werden können.
	Beachten sie unsere labelle mit empronienen Abstanden: www.supermagnete.de/rad/distance
Vorsicht	Entflammbarkeit
	Beim mechanischen Bearbeiten von Neodym-Magneten kann sich der Bohrstaub leicht entzünden.
	Verzichten Sie auf das Bearbeiten von Magneten oder verwenden Sie geeignetes Werkzeug und genügend Kühlwasser.
Vorsicht	Nickel-Alleraie
	Die meisten unserer Magnete enthalten Nickel, auch jene ohne Nickel-Beschichtung. • Manche Menschen reagieren allergisch auf den Kontakt mit Nickel. • Nickel-Allergien können sich bei dauerndem Kontakt mit Gegenständen entwickeln, die Nickel enthalten.
	 Vermeiden Sie dauerhaften Hautkontakt mit Magneten. Verzichten Sie auf den Umgang mit Magneten, wenn Sie bereits eine Nickelallergie haben.
Hinweis	Wirkung auf Menschen
	Magnetfelder von Dauermagneten haben nach gegenwärtigem Wissensstand keine messbare positive oder negative Auswirkung auf den Menschen. Eine gesundheitliche Gefährdung durch das Magnetfeld eines Dauermagneten ist unwahrscheinlich, kann aber nicht vollkommen ausgeschlossen werden.
U	 Vermeiden Sie zu Ihrer Sicherheit einen dauernden Kontakt mit den Magneten. Bewahren Sie große Magnete mindestens einen Meter von Ihrem Körper entfernt auf.
Hinweis	Absplittern der Beschichtung
	Die meisten unserer Neodym-Magnete weisen zum Schutz vor Korrosion eine dünne Nickel-Kupfer-Nickel- Beschichtung auf. Diese Beschichtung kann durch Kollisionen oder großen Druck absplittern oder Risse erhalten. Dadurch werden die Magnete empfindlicher gegenüber Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit und können oxidieren.
	 Trennen Sie große Magnete, insbesondere Kugeln, mit einem Stück Pappe voneinander. Vermeiden Sie generell Kollisionen zwischen Magneten sowie wiederholte mechanische Belastungen (z.B. Schläge).
Hinweis	Oxidation, Korrosion, Rost
	Unbehandelte Neodym-Magnete oxidieren sehr schnell und zerfallen dabei.
	Die meisten unserer Magnete weisen zum Schutz vor Korrosion eine dünne Nickel-Kupfer-Nickel-Beschichtung auf. Diese Beschichtung bietet einen gewissen Schutz gegen Korrosion, ist aber nicht widerstandsfähig genug für den dauernden Außeneinsatz.
	• Satzan Sia dia Magnata nur im trackanan Innanbaraich ain adar schützan Sia dia Magnata var

Datenblatt Artikel S-03-08-N

www.supermagnete.de

Seite 2 von 3

Hinweis	Temperaturbeständigkeit
	Neodym-Magnete haben eine maximale Einsatztemperatur von 80 bis 200 °C. Die meisten Neodym-Magnete verlieren bei Temperaturen ab 80 °C dauerhaft einen Teil ihrer Haftkraft.
	 Verwenden Sie die Magnete nicht an Orten, wo sie großer Hitze ausgesetzt sind. Wenn Sie einen Kleber verwenden, härten Sie diesen nicht mittels Heißluft.
Hinweis	Mechanische Bearbeitung
	Neodym-Magnete sind spröde, hitzeempfindlich und oxidieren leicht. • Beim Bohren oder Sägen eines Magneten mit ungeeignetem Werkzeug kann der Magnet zerbrechen. • Durch die entstehende Wärme kann der Magnet entmagnetisiert werden. • Wegen der beschädigten Beschichtung wird der Magnet oxidieren und zerfallen.
	Verzichten Sie auf das mechanische Bearbeiten von Magneten, wenn Sie nicht über die notwendigen Maschinen und Erfahrung verfügen.

4. Hinweise zum Transport

Vorsicht	Luftfracht	
	Magnetfelder von nicht sachgemäß verpackten Magneten können die Navigationsgeräte von Flugzeugen beeinflussen. Im schlimmsten Fall kann dies zu einem Unfall führen.	
	 Versenden Sie Magnete nur in Verpackungen mit genügender magnetischer Abschirmung per Luftfracht. Beachten Sie die einschlägigen Vorschriften: www.supermagnete.de/faq/airfreight 	
Vorsicht	Postversand	
Λ	Magnetfelder von nicht sachgemäß verpackten Magneten können Störungen an Sortiergeräten verursachen und empfindliche Güter in anderen Paketen beschädigen.	
	Beachten Sie unsere Tipps für den Versand: www.supermagnete.de/faq/shipping Verwenden Sie eine großzügig bemessene Schachtel und platzieren Sie die Magnete mit Hilfe von Füllmaterial in der Mitte des Paketes. Ordens Sie die Magnette in sieme Daket es ein dass sich die Magnetfelder gegenseitig neutralisieren	
	 Ordnen sie die Magnete in einem Paket so an, dass sich die Magnetieder gegenseitig neutralisieren. Verwenden Sie wenn nötig Eisenbleche, um das Magnetfeld abzuschirmen. Für den Versand per Luftfracht gelten strengere Regeln: Beachten Sie den Warnhinweis "Luftfracht". 	

5. Hinweise zur Entsorgung

Kleine Mengen von ausgedienten Neodym-Magneten können der gewöhnlichen Kehrichtabfuhr mitgegeben werden. Größere Mengen von Magneten müssen in die Altmetallsammlung gebracht werden.

6. Rechtsvorschriften

Neodym-Magnete sind nicht für den Vertrieb/Export in die USA, nach Kanada und Japan bestimmt. Es ist Ihnen deshalb ausdrücklich untersagt, die von uns gelieferten Neodym-Magnete oder Ihre aus diesen Magneten hergestellten Endprodukte direkt oder indirekt in die oben genannten Länder zu exportieren.

TARIC-Code: 8505 1100 99 0

Ursprung: China

Für weitere Informationen zu Magneten konsultieren Sie bitte die Seite **www.supermagnete.de/faq.php**

Stand der Daten: 23.11.2011

Datenblatt Artikel S-03-08-N

www.supermagnete.de

Seite 3 von 3

A.2 LabVIEW Programmierung



Abb. A1: Blockdiagramm des gesamten LabVIEW-Programms zur Ermittlung der Versagensgrenze des Silikonbalgs bis zur Fehldetektion der Frequenzen



Abb. A2: Sequenz 1: Signalerfassung, Filtern des Signals und Auslösung des Triggers



Abb. A3: Sequenz 2: FFT des aufgenommenen Signals und Zählen der Auslösung



Abb. A4: Sequenz 3: Errechnen der oberen und unteren Frequenz und Sammeln der Daten



Abb. A5: Speicherung der gesammelten aufgenommenen Daten



Abb. A6: Blockdiagramm des LabVIEW-Programms zur Erfassung der Balgbetätigungen