



Sebastian Reif, BSc

**Entwicklung und Optimierung des Fertigungsprozesses einer  
Sensorkassette zur Blutparametermessung mittels  
Dickschichttechnologie in der Point of Care Diagnostic**

**Diplomarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Individuelles Masterstudium

Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., Franz Haas

Institut für Fertigungstechnik

## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit/Diplomarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

# Danksagung

Danken möchte ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas, Institutsvorstand des Fertigungstechnik-Instituts an der TU Graz, für die Begutachtung meiner Masterarbeit.

Ebenfalls Danken will ich meinen Betreuer zu Beginn der Arbeit, Dipl.-Ing. Dr.techn. Mattias Steffan und Dipl.-Ing. Philipp Eisele, welcher die vorliegende Arbeit korrigiert hat, und die Betreuung gegen Ende übernommen hat.

Herrn Dipl.-Ing. Dietmar Werk von ERBA Technologies Austria und seinen Mitarbeitern, vor allem Ing. Martin Hackl, möchte ich für die gute Zusammenarbeit und die Einführung in die Thematik der Blutparametermessung danken.

Herrn Dipl.-Ing. Arne Sieber danke ich besonders für die Vermittlung der Arbeit und für die sehr positive und inspirierende Zusammenarbeit unter seiner Leitung bei Seabear von 2012 bis 2017.

Ein großer Dank gilt meiner Familie, welche mich während meiner gesamten Studienzeit ideell und materiell unterstützt hat.

Mein abschließender Dank gilt meiner zukünftigen Ehefrau Theresa Pribil, welche mich während meines gesamten Studiums in jedem Belangen voll unterstütz hat und mir auch bei der Korrektur dieser Arbeit zur Seite stand.

Graz 11.12.2018, Sebastian Reif

# Kurzfassung

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird die Weiterentwicklung der Fertigungsprozesse eines Sensorcartridges zur Blutparametermessung auf Dickschichtbasis beschrieben. Das Gerät wurde für den Point-of-Care Bereich zusammen mit der Firma ERBA Technologies Austria entwickelt. Mit dem Sensorcartridge können mittels Messung von 4 Ionen im Blut oder Urin bis zu 6000 unabhängige Messungen durchgeführt werden bevor das Bauteil ausgetauscht werden muss.

Die Grundlage der Arbeit bestand aus einem Grundkonzept für das Sensorcartridge sowie einer ersten Prototypen Spritzgussform für das benötigte 2-Komponenten Spritzgussteil.

Im Zuge der Arbeit sollte das bestehende Spritzgussteil optimiert werden um einen stabilen Spritzgussprozess zu gewährleisten. Ein weiterer Teil der Aufgabe bestand darin, eine Aufnahmevorrichtung für das austauschbare Sensorcartridge zu entwerfen, aufzubauen und zu entwickeln. Die Vorrichtung sollte dabei das Sensorcartridge elektrisch und fluidisch kontaktieren und dabei eine möglichst einfache Austauschbarkeit des Sensorcartridges gewährleisten.

Am kritischsten zu bewerten ist hierbei die fluidische Kontaktierung, da es hier zu keinen Leckagen zwischen Aufnahmemodul und Sensorcartridge kommen darf. Mit diesen Aufnahmevorrichtungen sollen in weiterer Folge die Charakterisierung des Sensors (Weiterentwicklung der Sensorchemie, Auswertung der Messergebnisse, Messwertrechnung, etc.) durchgeführt werden.

# Abstract

Within this thesis, the further development of the manufacturing process of a sensor cartridge for blood parameter measurement on thick-layer basis, for the Point-of-Care diagnostic, together with the company ERBA Technologies Austria will be described. With the sensor cartridge up to 6000 independent measurements can be carried out, whereby 4 ions in the blood or urine are measured, before the component needs to be replaced.

The basis of the work consisted of a basic concept for the sensor cartridge and a first prototype injection mold for the required 2-component injection molded part.

Within the work, the existing injection molded part was to be optimized to ensure a stable injection molding process. Another task was to design, build and develop a cartridge connector for the replaceable sensor cartridge. The device should thereby contact the sensor cartridge electrically and fluidically and ensure the simplest possible interchangeability of the sensor cartridge.

The most critical aspect to assess was the fluidic contacting, since there may be no leakage between the cartridge connector and the sensor cartridge. With these cartridge connector, the characterization of the sensor (further development of the sensor chemistry, evaluation of the measurement results, measured value calculation, etc.) will be carried out.

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Zielsetzung .....	1
2.	Messung von Blut Elektrolyten .....	3
2.1.	Natrium .....	4
2.2.	Kalium.....	4
2.3.	Calcium .....	5
2.4.	Chlorid .....	5
2.5.	Funktionsweise Ionensensitiver Sensoren .....	6
2.5.1.	Elektroden mit Innenelektrolyten .....	7
2.5.2.	Elektroden mit Solid-Elektrolyten .....	8
2.6.	Referenzelektrode .....	9
2.7.	Kalibrierung der Sensoren .....	11
3.	Statistik.....	12
3.1.	Normalverteilung .....	12
3.2.	Addition Verteilungsfunktion .....	13
4.	Kunststoffe .....	14
4.1.1.	Kunststoffarten.....	14
4.1.2.	Eigenschaften .....	16
4.1.3.	Mechanisches Verhalten .....	16
4.2.	Elastollan .....	17
4.3.	Prototyping mit Kunststoffen .....	18
4.3.1.	3D Printing.....	19
4.3.2.	Fused Deposition Modeling.....	20
4.3.3.	Stereolithographie (SL).....	21
4.3.4.	Selektives Lasersintern (SLS) .....	22
4.3.5.	Vakuumgießen.....	23

---

4.4.	Spanende Bearbeitung von Kunststoff.....	24
4.5.	Spritzguss.....	25
4.5.1.	Ablauf Spritzguss .....	26
4.5.2.	Spritzgusswerkzeug .....	27
4.5.3.	2-Komponenten Spritzguss .....	28
4.5.4.	Spritzgussgerechtes Konstruieren .....	29
5.	Sensorcartridge Erba Technologies Austria.....	36
5.1.	Sensorsubstratplatte .....	37
5.1.1.	Substratplatte mit KCl Referenz .....	39
5.1.2.	Substratplatte mit SolidRef .....	40
5.2.	2K Cartridge Oberteil.....	42
5.3.	Funktionsbeschreibung Sensorcartridge Liquid Ref.....	43
5.4.	Funktionsbeschreibung Sensorcartridge Solid-Ref. ....	44
5.5.	Änderungen am 2K Oberteil.....	45
5.5.1.	Probleme Spritzguss Sensorcartridge.....	46
5.5.2.	Änderungen Hartkomponente .....	48
5.5.3.	Änderungen Weichkomponente .....	49
5.5.4.	Resultat Änderungen.....	51
5.6.	Neuer Formeinsatz .....	55
5.6.1.	Ergebnisse Bemusterung ELT .....	57
5.7.	Vermessung Sensorcartridge Oberteil .....	58
5.8.	Langzeit Dichtheits-Test Cartridge .....	59
5.8.1.	Aufbau .....	59
6.	Aufnahmemodul Sensorcartridge .....	61
6.1.	Cartridge Connector .....	62
6.1.1.	Fluidische Kontaktierung.....	63
6.1.2.	Elektrische Kontaktierung .....	68

6.1.3.	Fixierung und Positionierung des Cartridges.....	69
6.1.4.	Ergebnis .....	70
6.2.	Spritzgussfähiges Modul.....	73
6.2.1.	Entwurf Modul .....	74
6.2.2.	Entwurf Deckel .....	75
6.2.4.	Aufbau Modul/Deckel .....	77
6.3.	Sensor Substrate Testbed (SST).....	78
6.3.1.	Anforderungen .....	78
6.3.2.	Funktionsbeschreibung .....	79
6.3.3.	Erste Ergebnisse .....	84
7.	Resultate und Ausblick .....	86
8.	Literaturverzeichnis.....	88
9.	Abbildungsverzeichnis.....	90

# 1. Einleitung und Zielsetzung

In den folgenden Absätzen soll ein Überblick über die zu bearbeitenden Themengebiete und deren Hintergründe geschaffen werden.

Die Arbeit wurde gemeinsam mit der Firma *ERBA Technologies Austria* durchgeführt. *ERBA Technologies Austria* gehört zum Konzern ERBA Mannheim, einen Indischen Medizinkonzern. *ERBA Mannheim* hat den Standort in Graz mit April 2018 von der Firma Payer übernommen. Die Firma *Payer International Technologies GmbH* führte den Standort in Graz seit 2015, wobei unter *Payer* die Produktion der Sensoren für *Roche Diagnostics* mit Sitz in der Schweiz weitergeführt wurde. Von 2000 bis 2015 war der Standort unter der Leitung von *Roche Diagnostics*, wobei in dieser Zeit die Blutgas und Blutelektrolyten Analyse auf Dickschichtbasis weiterentwickelt wurden. *Roche* selbst übernahm den Standort 2000 von der AVL Abspaltung *AVL Medizintechnik*. *AVL Medizintechnik* startete 1970 mit der Entwicklung der Blutgasanalyse in Graz und gilt als einer der Pioniere in diesem Bereich.

Aktuell sind unter *ERBA Technologies Austria* unter der Leitung von DI Dietmar Werkl zehn Ingenieure am Standort in Graz beschäftigt. *ERBA Mannheim* führt in Europa vier weitere Entwicklungsstandorte.

Bereits unter der Leitung von Payer wurde mit der Entwicklung eines ISE Sensors begonnen. Aufgrund dieses Projektes wurde die Entwicklungsgruppe von *Payer* mit Sitz in Graz von *ERBA Mannheim* übernommen. Ziel der Entwicklung in Graz ist es im Moment ein möglichst kostengünstiges ISE Point-of-Care Gerät zu entwickeln und dieses gemeinsam mit *ERBA Mannheim* auf den Indischen Markt zu bringen. Das Gerät soll bezüglich Messgenauigkeit mit den am Markt befindlichen High-End Geräten etablierter Hersteller vergleichbar sein. Hierbei soll neben der Sensorentwicklung und der Sensorproduktion auch die Projektleitung für das Gesamtgerät in Graz erfolgen.

Ausgangslage dieser Arbeit war der bestehende Sensor, welcher jedoch von mechanischer Seite noch einige Probleme aufwies. Mit dem Sensor können die vier Ionen, Natrium, Kalium, Calcium und Chlorid, im Blut oder Urin gemessen werden. Der Sensor besteht aus einem 2-Komponenten Spritzgussteil und einer Siebgedruckten Substratplatte und es handelt sich um ein Consumable, welches sich bis zu max. 12 Wochen im Gesamtgerät befindet. In dieser Zeit können bis zu 6000 voneinander unabhängige Messungen durchgeführt werden. Das Grundkonzept des Sensors war bereits fixiert und sollte so weiter übernommen werden. Größere Problem gab es mit den für den Sensor eingesetzten 2-Komponenten Spritzgussteil. Die bestehenden Probleme und die Lösungsansätze zur Beseitigung dieser werden im Laufe der Arbeit erläutert. Ziel ist ein stabiler

Spritzgussprozess, mit welchem ein seriennahes funktionsfähiges Sensorcartridges produzieren werden kann.

Um eine weitere Charakterisierung und Entwicklung des Sensors und der Sensorchemie zu ermöglichen, sollen Teststände entworfen, entwickelt und aufgebaut werden. In diese Teststände soll es möglich sein das Sensorcartridge in eine Aufnahmeeinheit einzulegen und elektronisch als auch fluidisch zu kontaktieren. Die Aufnahmeeinheit soll sich möglichst kostengünstig herstellen lassen. Um eine Charakterisierung des Sensors ohne das 2-Komponenten Spritzgussteil zu ermöglichen, muss eine weitere Aufnahmeeinheit entworfen werden, mit welcher nur mit der Sensor-Substratplatte Messungen durchgeführt werden können.

Des Weiteren wird ein Konzept für ein Spritzgussfähiges Modul, welches den Sensor in der Arbeitsposition fixiert, gefordert. Das Modul soll den Sensor in dieser Position elektrisch und fluidisch kontaktieren und es ermöglichen diesen einfach und mit wenigen Handgriffen austauschen zu können. Dabei ist auf die Vorteile und Einschränkungen, welche durch den Spritzgussprozess gegeben sind, einzugehen.

## 2. Messung von Blut Elektrolyten

Christoph Ritter beschreibt die grundsätzlichen Ansätze zur Messung von Elektrolyten im Blut welche in den fünf folgenden Absätzen zusammengefasst sind:<sup>1</sup>

Die Notwendigkeit der Messung von positiven und negativen Elektrolyten im menschlichen Blut ergibt sich vorwiegend aus medizinisch diagnostischen Gründen. Die positiv geladenen Elektrolyten werden in der Diagnostik als Kationen bezeichnet. Zu den Kationen zählen unter anderen Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Kalium ( $\text{K}^+$ ), Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) und Lithium ( $\text{Li}^+$ ). Anionen hingegen sind negativ geladen und zu den in der Diagnostik wichtigsten zählen Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ) und Bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ).

Die Konzentration der Elektrolyte unterscheidet sich in den unterschiedlichen Flüssigkeiten im Körper. Die Konzentration der Kaliumionen im Plasma ist zum Beispiel um vieles niedriger als die Konzentration in den roten Blutzellen. Die Flüssigkeit in den Zellen wird als intrazelluläre Flüssigkeit die Flüssigkeit außerhalb der Zellen wird als extrazellulär bezeichnet. Die Flüssigkeiten werden durch Zellmembranen getrennt, welche grundsätzlich für Ionen undurchlässig sind. Wasser hingegen kann diese semipermeable Membran ungehindert passieren.

Durch die unterschiedliche Ionenkonzentration auf beiden Seiten der Zellwand entsteht eine elektrische Spannung. Dies ist vor allem für zwei Zelltypen entscheidend: Die Nervenzellen und die Muskelzellen. Eine der größten Ansammlungen an Nervenzellen ist das Gehirn, der wichtigste Muskel im Körper ist das Herz. Kommt es zu einer Störung des Elektrolytgleichgewichtes, können sich die elektrischen Spannungen in den Zellen nicht richtig aufbauen und es kann zu einer Erkrankung des Menschen führen.

Bei diesen Elektrolyten handelt es sich um die zurzeit meist benötigten Parameter in der Point-of-Care-Diagnostic. Als Point-of-Care-Diagnostic (Patientennahe Untersuchungen) werden medizinische Untersuchungen bezeichnet, welche im Gegensatz zu Laboranalysen direkt im Krankenhaus in unmittelbarer Nähe zum Patienten durchgeführt werden.

Des Weiteren gibt es die Möglichkeit mit ähnlichen Sensoren den pH-Wert, Blutgase (unter anderem Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  und Sauerstoff  $\text{O}_2$ ) und Metabolite (Glukose, Laktat und Harnstoffe) im Blut zu bestimmen.

---

<sup>1</sup> vgl. Christoph Ritter (2014). S.11 – 17.

In dem von der Firma Erba Technologies Austria entwickelten Sensor können die Elektrolyte Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Kalium ( $\text{K}^+$ ), Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) und Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ) gemessen werden.

## 2.1. Natrium

Natrium regelt den Wassergehalt im menschlichen Körper wobei die Funktion primär darin besteht, die Osmolalität der extrazellulären Flüssigkeit konstant zu halten, indem es das Volumen des Extrazellulärraumes bestimmt. Vom durchschnittlichem Natriumgehalt eines Erwachsenen von 3500 – 4000 mmol steht, bis auf den an kristalline Strukturen des Knochens gebundene Teil, als dynamischer  $\text{Na}^+$  Speicher zur Verfügung. Auch bei nicht konstanter Zufuhr durch Nahrung wird die  $\text{Na}^+$  Konzentration durch das Steroidhormon Aldosteron reguliert, welche die Menge des im Urin ausgeschiedenen  $\text{Na}^+$  reguliert. Ein normaler Serum-Natriumspiegel erlaubt keine Aussage über die Menge des Kations im Organismus, es kann trotzdem eine ausgeprägte Hypo- oder Hyperhydratation der Gewebe vorliegen. Erhöhte Werte können aus verminderter Flüssigkeitszufuhr oder erhöhtem Wasserverlust resultieren, umgekehrt vermag ein verminderter Wert aus Ungleichgewicht von Flüssigkeitszufuhr und Natriumaufnahme resultieren. Beim Erwachsenen Menschen liegt der durchschnittliche Wert von Natrium bei ca. 136 – 145 mmol/L (im Vollblut).<sup>3 4</sup>

## 2.2. Kalium

Kalium steuert ebenfalls den Flüssigkeitshaushalt im Körper und darüber hinaus auch die Reizleitung zu den Nerven. Die intrazelluläre Kaliumkonzentration ist mit etwa 150 mmol/L um einen Faktor von fast 40 höher als die extrazelluläre, wobei bei Ungleichgewicht  $\text{K}^+$ -Bewegungen zwischen Intra- und Extrazellulärraum auftreten können. Als Kontrollorgan reguliert die Niere die  $\text{K}^+$ -Ausscheidung, das Kalium wird in den Nieren glomerulär gefiltert und rückresorbiert. Die Wiederaufnahme und Ausscheidung wird vorrangig vom Aldosteron und dem pH-Wert des Blutes beeinflusst. Aus der hohen intrazellulären Kaliumkonzentration resultiert die Notwendigkeit eines Säure-Basen-Status sowie eines klinischen Bildes um die Daten interpretieren zu können. Durchschnittliche Werte beim erwachsenen Menschen liegen bei etwa 3,5 – 5,1 mmol/L (im Vollblut).<sup>5 6</sup>

<sup>3</sup> vgl. Arne Sieber (2002). S.5.

<sup>4</sup> vgl. Andrew St John, Andrew Francis, and Noel Walmsley (2001). S.74.

<sup>5</sup> vgl. Arne Sieber (2002). S.7.

<sup>6</sup> vgl. Andrew St John, Andrew Francis, and Noel Walmsley (2001). S.64.

## 2.3. Calcium

Durch das Calcium im Körper werden Nervenimpuls in Muskeltätigkeiten umgesetzt. Der Calciumgehalt eines durchschnittlichen Erwachsenen beträgt zwischen 25 und 35 mol wovon sich circa 99% im Knochen befinden. Etwa 0,5% lagern sich in Weichteilen an und <0,1% sind in der extrazellulären Flüssigkeit vorhanden. Durch die Nahrung werden am Tag zwischen 10 und 25 mmol aufgenommen, davon werden um die 40% vom Darm sowohl aktiv als auch passiv absorbiert. Die Regulation des Calciumgehaltes erfolgt durch ein Metabolit vom Vitamin D. Um die 250 mmol werden vom Glomerulus täglich gefiltert, wobei der Großteil von den Nierentubuli resorbiert wird. Somit gelangen um die 3-8 mmol in den Urin. Bei Erwachsenen liegen die Werte für Calcium bei ca. 1,16-1,32mmol/l im Vollblut.<sup>8</sup>

## 2.4. Chlorid

Clorid dient der Wasserverteilung in den Körperräumen und ist überwiegend im Extrazellularraum vorhanden. Die Konzentration wird im Serum eines gesunden Körpers in engen Grenzen in Waage gehalten. Die Glomerulärfiltration und die tubuläre Rückresorption erfolgt in der Niere und folgt passiv dem Natrium. Die Aufrechterhaltung des Säure-Basen-Haushalts ist unter anderem dem Chlorid-Haushalt des Körpers geschuldet, indem Chlorid- gegen Bicarbonat-Ionen bei einer Störung ausgetauscht werden können. Resultierend daraus verlaufen Veränderungen der Chlorid- und Natriumkonzentrationen im Serum vorwiegend parallel. Die Primärfunktion ist jedoch die Aufrechterhaltung der Isotonie im Extrazellularraum. Ausnahmen zeigen sich bei Störungen des Säure-Basen-Gleichgewichts durch den schon beschriebenen Austausch von Chlorid- gegen Bicarbonationen sowie bei massivem Chloridverlust mit dem Magensaft bei länger anhaltendem Erbrechen (hypochlorämische Alkalose).<sup>9</sup>

Bei Erwachsenen liegen die Werte von Chlorid bei ca. 98 – 106 mmol/L im Vollblut.<sup>11</sup>

---

<sup>8</sup> vgl. Andrew St John, Andrew Francis, and Noel Walmsley (2001). S.96.

<sup>9</sup> vgl. Arne Sieber (2002). S.8.

<sup>11</sup> vgl. Andrew St John, Andrew Francis, and Noel Walmsley (2001). S.6.

## 2.5. Funktionsweise Ionensensitiver Sensoren

Bühlmann und Chen schreiben zur Funktionsweise ionensensitiver Sensoren:<sup>12</sup>

Ionen werden meist mittels Ionensensitiver Potentiometrie gemessen. Unter Potentiometrie versteht man ein elektroanalytisches Verfahren zur quantitativen Bestimmung einer Konzentration unter Vermeidung eines Stromflusses. Der Aufbau einer potentiometrischen Messung besteht im Wesentlichen aus einer Messelektrode und einer Bezugslektrode welche in die zu vermessende leitende Flüssigkeit (Probenlösung) getaucht werden. Zwischen diesen beiden Elektroden wird über ein Voltmeter das elektrochemische Potential gemessen über welches auf die Konzentration der Ionen in der Flüssigkeit rückgerechnet werden kann (vgl. Abbildung 1).

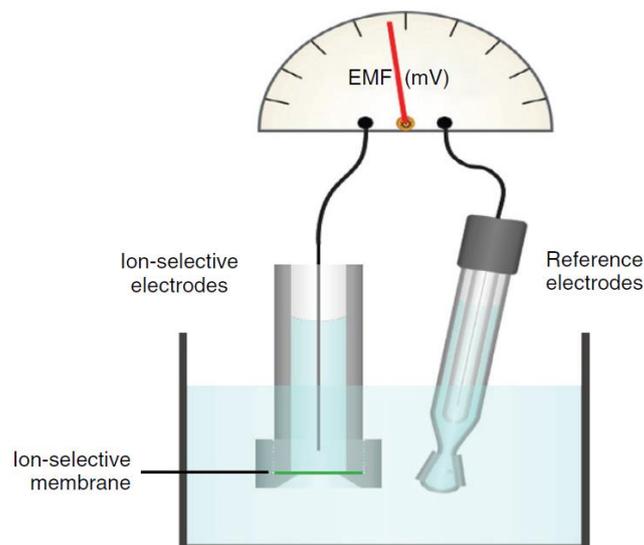


Abbildung 1: Potentiometrische Messung<sup>15</sup>

Da sich in der zu vermessenden Probenflüssigkeit verschiedenste Ionen befinden, müssen die Ionen vorab „gefiltert“ werden. Aus diesem Grund befindet sich vor der Messelektrode, an der Elektrolytmessung eine Ionensensitive Membran welche nur das Durchdringen eines bestimmten Ions zulässt (z.B.:  $\text{Na}^+$  oder  $\text{K}^+$ ). Diese ionensensitive Membran (vgl. Abbildung 1) ist für jedes zu vermessende Ion in ihrer Zusammensetzung unterschiedlich.

<sup>12</sup> vgl. Philippe Bühlmann and Li D. Chen (2012). S.2540

<sup>15</sup> vgl. Philippe Bühlmann and Li D. Chen (2012). S.2540.

### 2.5.1. Elektroden mit Innenelektrolyten

Sowohl bei konventionellen Messelektroden mit Innenelektrolyten als auch bei Messelektroden mit Feststoffkontakt muss von einer Ionenleitung in eine Elektrodenleitung übergegangen werden. Bei konventionellen ISE Messelektroden wird dies mit einem Innenelektrolyten bewerkstelligt. Die Elektroden besitzen eine Ableitung aus einem Silber (Ag) Draht welcher mit AgCl beschichtet ist. Diese AgCl Schicht ist mit dem Innenelektrolyten, welcher aus  $\text{Cl}^-$  mit einer vorgegebenen Konzentration besteht, in Kontakt (vgl. Abbildung 2). Dadurch entsteht ein bestimmtes konstantes Potential zwischen der AgCl Schicht und dem Innenelektrolyten. Ebenso stellt sich ein weiteres konstantes Potential Innenelektrolyten und Membran ein. Das Potential zwischen Probenflüssigkeit und Membran stellt sich abhängig von der Konzentration der zu vermessenden Flüssigkeit ein.<sup>16</sup>

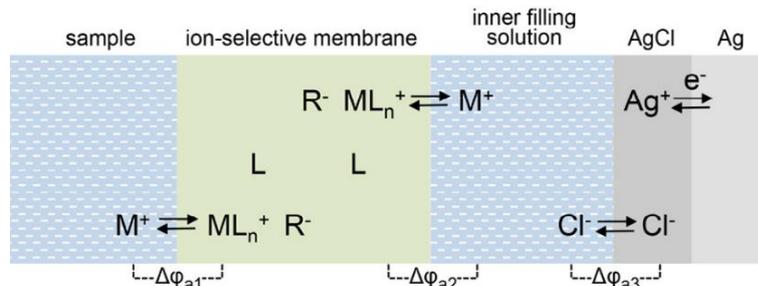


Abbildung 2: Messelektrode mit Innenelektrolyten<sup>17</sup>

Messelektroden mit Innenelektrolyten besitzen einen verhältnismäßig komplizierten mechanischen Aufbau. Abbildung 3 zeigt zwei Elektroden mit Innenelektrolyten.



Abbildung 3: Messelektroden mit Innenelektrolyten, Quelle: Eigene Darstellung

<sup>16</sup> vgl. Jinbo Hu, Andreas Stein, and Philippe Bühlmann (2016). S.104

<sup>17</sup> vgl. Jinbo Hu, Andreas Stein, and Philippe Bühlmann (2016). S.104.

## 2.5.2. Elektroden mit Solid-Elektrolyten

Im Gegensatz zu Messelektroden mit Innenelektrolyten besitzen diese einen Feststoffkontakt welcher aus einem Carbon Material besteht. Bei den von der Firma Erba Technologies Austria verwendeten Sensoren handelt es sich um Sensoren mit Solid-Elektrolyten. Dieser Feststoff (vgl. Abbildung 4, A) steht wieder beidseitig in Kontakt mit der mit AgCl (vgl. Abbildung 4, B) ummantelten Ableitung und der für bestimmte Ionen durchlässigen Membran (vgl. Abbildung 4, C). Zwischen Membran und Probenflüssigkeit (vgl. Abbildung 4, D) stellt sich wieder das zu bestimmende elektrische Potential ein.<sup>18</sup>

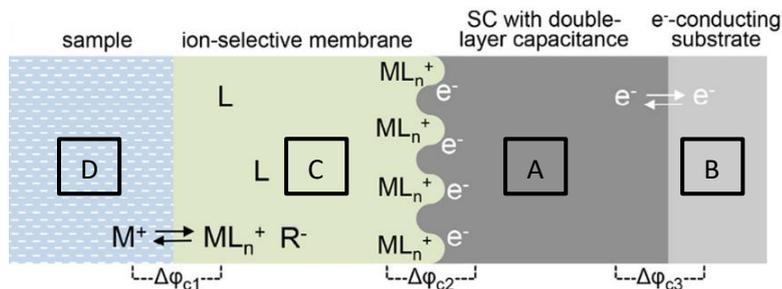


Abbildung 4: Aufbau SolidRef Elektrode<sup>19</sup>

Dieser Elektrodenaufbau kann beispielsweise über einen Siebdruckschritt auf ein Trägermaterial aufgebracht werden (vgl. Abbildung 5).

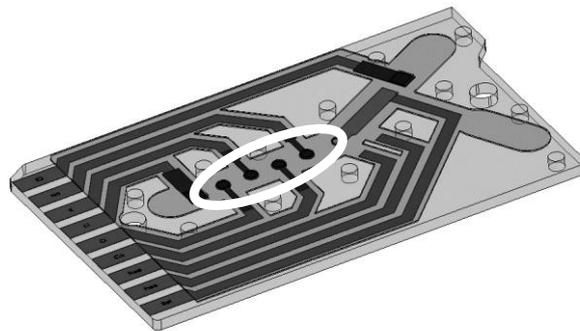


Abbildung 5: Ionensensitiver Sensor, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5 zeigt einen Ionensensitiven Sensor mit Feststoffkontakt der Firma Erba Technologies Austria. Die vier markierten schwarzen Punkte sind die Sensoren für Natrium, Kalium, Calcium und Chlorid. Die weitere Funktion der Sensoren und die Herstellung dieser ist in Kapitel 5.1 beschrieben.

<sup>18</sup> vgl. Jinbo Hu, Andreas Stein, and Philippe Bühlmann (2016). S.104.

<sup>19</sup> vgl. Jinbo Hu, Andreas Stein, and Philippe Bühlmann (2016). S.104.

## 2.6. Referenzelektrode

Um ein konzentrationsabhängiges Potential messen zu können muss die Spannung zwischen Membran und Probenflüssigkeit auf ein bekanntest Potential bezogen werden. Dieses konstante Potential wird über eine Referenzelektrode erzeugt. Diese Bezugselektrode soll stets eine konstante Spannung liefern und sich nicht mit den unterschiedlichen Probenlösungen ändern. Hierbei gibt es wieder die Möglichkeit die Elektrode mit einem Feststoffkontakt oder mit einem Innenelektrolyten auszuführen.<sup>20</sup>

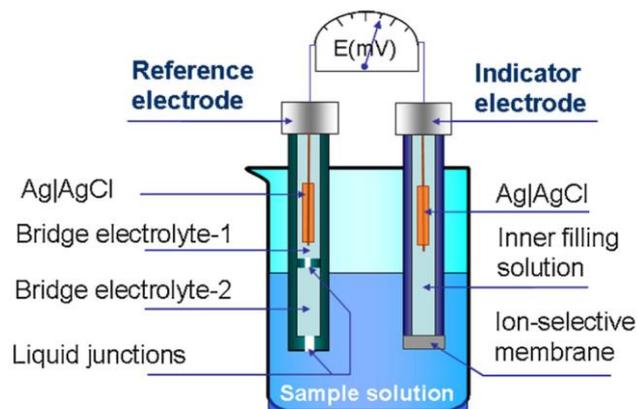


Abbildung 6: Ionensensitive Messung<sup>21</sup>

Abbildung 6 zeigt den Aufbau einer Ionensensitiven Messung unter der Verwendung einer Messelektrode mit zwei Innenelektrolyten.

Referenzelektroden können ebenfalls über einen Innenelektrolyten oder über einen Feststoffkontakt realisiert werden, vgl. Abbildung 7. Im Vergleich zur Abbildung 6 ist hier weder bei der Arbeitselektrode, noch bei der Referenzelektrode ein Innenelektrolyt notwendig.

<sup>20</sup> vgl. Erno Lindner and Bradford D. Pendley (2013). S.1.

<sup>21</sup> vgl. Erno Lindner and Bradford D. Pendley (2013). S.104.

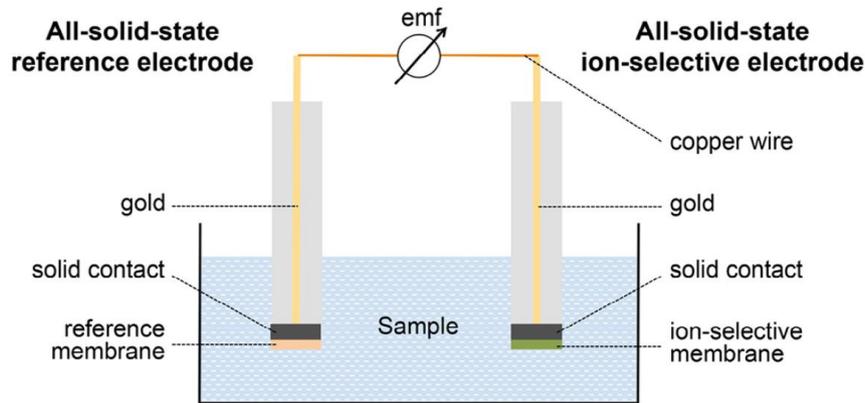


Abbildung 7: Ionensensitive Messung mit Solid-State Elektroden<sup>22</sup>

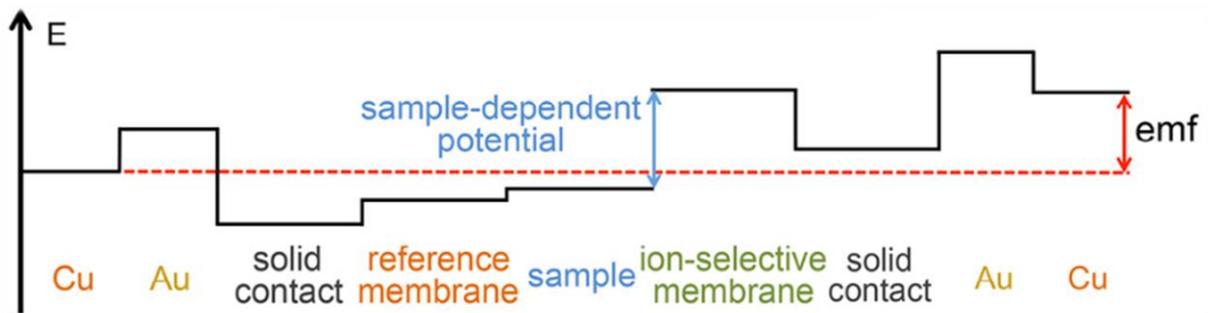


Abbildung 8: Potentialsprünge SolidRef<sup>23</sup>

Zwischen den unterschiedlichen Schichten des Messaufbaus wie Referenzmembran, Feststoffschicht und der elektrischen Ableitung (vgl. Abbildung 7) finden Potentialsprünge statt. Diese Sprünge sind in Abbildung 8 ersichtlich. Das Potential „sample-dependent potential“ (vgl. Abbildung 8) ist dabei abhängig von der in der Probenflüssigkeit auftretenden Konzentration der zu messenden Ionen. Das Potential „emf“ wird gemessen und erlaubt den Rückschluss auf die Konzentration der Ionen in der Probenflüssigkeit<sup>24</sup>

<sup>22</sup> vgl. Jinbo Hu, Andreas Stein, and Philippe Bühlmann (2016). S.104.

<sup>23</sup> vgl. Jinbo Hu, Andreas Stein, and Philippe Bühlmann (2016). S.104.

<sup>24</sup> vgl. Jinbo Hu, Andreas Stein, and Philippe Bühlmann (2016). S.104.

## 2.7. Kalibrierung der Sensoren

Die Sensoren werden über eine 1- und eine 2-Punkt Kalibration kalibriert. Dazu werden sogenannte Reagenzflüssigkeiten benötigt. Die Reagenzflüssigkeit (als Cal1 bezeichnet) wird für die 1-Punkt Kalibration und für das Spülen des Sensors verwendet. Aus diesem Grund wird diese Flüssigkeit auch als Standby Lösung bezeichnet. Die Reagenzflüssigkeit 2 (als Cal2 bezeichnet) wird für die 2-Punkt-Kalibration benötigt. Die 1-Punkt-Kalibration wird nach jeder Messung ausgeführt. Um Kalibrationsflüssigkeit zu sparen, wird die 2-Punkt-Kalibration, abhängig vom Anwender, nur circa alle 24 Stunden durchgeführt.

Die beiden Reagenzien besitzen eine bekannte Konzentration der zu messenden Ionen. Dadurch ergibt sich ein Erwartungswert des Ausgangssignals welcher sich nach Positionierung der Kalibrationsflüssigkeit am Sensor einstellen sollte. Weicht dieses ab, wird der Sensor nachkalibriert.

Bei der 1-Punkt Kalibration wird nur die Verschiebung der Messkurve auf der y-Achse korrigiert (siehe Abbildung 9, links).

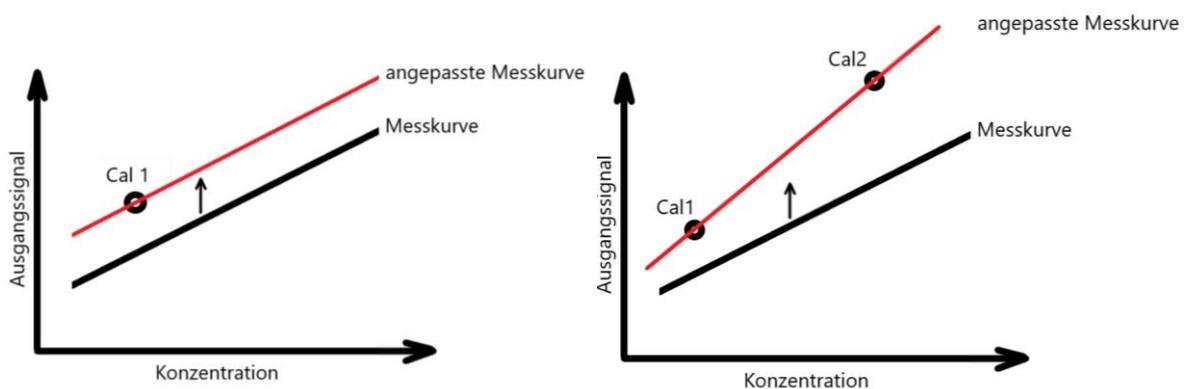


Abbildung 9: 1-Punkt und 2-Punkt Kalibration, Quelle: Eigene Darstellung

Bei der 2-Punkt Kalibration wird zusätzlich die Steigung der Kurve korrigiert. Dazu ist die zweite Kalibrationslösung notwendig (siehe Abbildung 9, rechts).

## 3. Statistik

Im Laufe der Arbeit wurden einige Spritzgussbauteile vermessen, die dabei angewendeten statistischen Grundlagen werden hier kurz dargestellt.

### 3.1. Normalverteilung

Wappis und Jung beschreiben die wesentlichen Ansätze der Statistik:

Die Normalverteilung ist über zwei Parameter definiert:

- **Arithmetischen Mittelwert  $\mu$**  welcher die Lage der Glockenkurve bestimmt. An dieser Stelle tritt die größte Dichte des Messwertes auf und daher auch als Erwartungswert bezeichnet. Das arithmetische Mittel errechnet sich mit nachfolgender Formel: <sup>25</sup>

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \begin{array}{l} n = \text{Anzahl der Messwerte} \\ x_i = \text{Messwert } i \end{array}$$

- Die **Standardabweichung  $\sigma$**  ist die Streubreite der Glockenkurve. Sie beschreibt den Abstand des Wendepunktes zum Mittelwert  $\mu$  an der Glockenkurve. Die Standardabweichung errechnet sich aus der **Varianz  $s$** : <sup>26</sup>

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad \sigma = \sqrt{s^2}$$

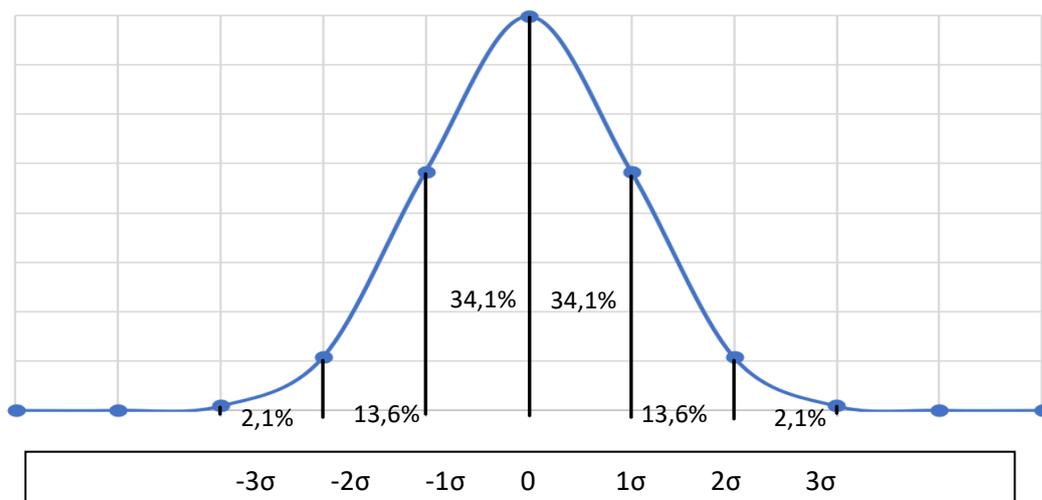


Abbildung 10: Normalverteilung, Quelle: Eigene Darstellung

<sup>25</sup> vgl. Johann Wappis and Berndt Jung. S.50.

<sup>26</sup> vgl. Johann Wappis and Berndt Jung. S.51.

Die beiden Parameter Mittelwert und Standardabweichung können über das Vermessen der Bauteile ermittelt werden. Bei normalverteilten Bauteilen ergibt sich nach Einteilung der Bauteile in Bauteilklassen die Dichtefunktion. Diese ist eine symmetrische Funktion um den Mittelwert und fällt nach beiden Seiten Glockenförmig ab. Die Funktion nähert sich asymptotisch der Abszissenachse an. Die Wahrscheinlichkeit kann als Fläche unter der Kurve abgelesen werden.

Die Fläche unter der Kurve ist genau 1. Es können unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsbereiche definiert werden. Diese Bereiche geben an zu welcher Wahrscheinlichkeit sich ein Bauteil innerhalb dieses Bereiches befindet. Beispielsweise liegen bei einem Toleranzbereich von  $\pm 3\sigma$  ein Bauteil zu 99,73% innerhalb. Bei einem Toleranzbereich von  $\pm 6\sigma$  liegt die Anzahl der fehlerhaften Bauteile bei 0,002 Stück pro Million.<sup>27</sup>

### 3.2. Addition Verteilungsfunktion

Wappis und Jung beschreiben wie zwei Verteilungsfunktionen addiert werden können:<sup>30</sup>

Um die resultierende Streuung des Gesamtsystems zu erhalten werden die einzelnen Varianzen addiert. Sollen zwei Bauteile welche in deren Länge jeweils einer Normalverteilung unterliegen aufeinander montiert werden ist oft die Streuung des Gesamtsystems von Interesse. Der Mittelwert der Einzelbauteile lässt sich addieren wodurch der Mittelwert des Gesamtsystems ermittelt werden kann.

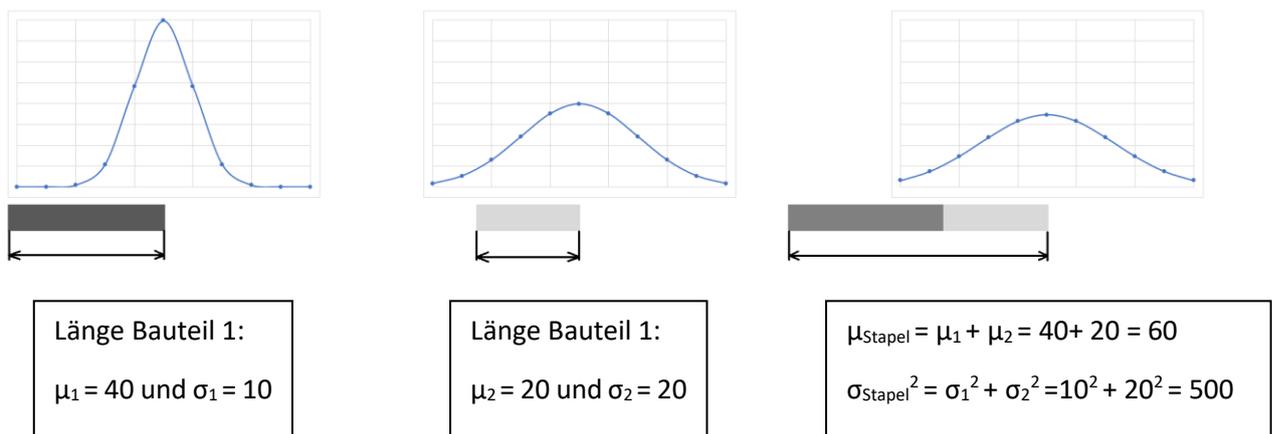


Abbildung 11: Addition von Verteilungsfunktionen, Quelle: Eigene Darstellung

<sup>27</sup> vgl. Johann Wappis and Berndt Jung. S.39.

<sup>30</sup> vgl. Johann Wappis and Berndt Jung. S.39.

## 4. Kunststoffe

Bei Kunststoffen handelt es sich um hoch molekulare organische Verbindungen, welche über unterschiedlichste chemische Reaktionen entweder durch chemische Aneinanderlagerung niedermolekularer Grundbausteine (Monomere) oder durch Abwandlung hochmolekularer Naturstoffe entstehen. Dadurch entstehen aufgrund der hohen Auswahl an monomerer Bausteinen und den verschiedensten Arten der Aneinanderlagerung zum endgültigen Werkstoff eine Vielfalt an unterschiedlichster Kunststoffen.<sup>32</sup>

### 4.1.1. Kunststoffarten

Dominghaus beschreibt die Einteilung der Kunststoffe, welche sich auf Grund der Bindungsmechanismen der Makromolkühle und der Struktur grob in drei Gruppen unterschieden:<sup>33</sup>

- Thermoplaste
- Duroplaste
- Elastomere

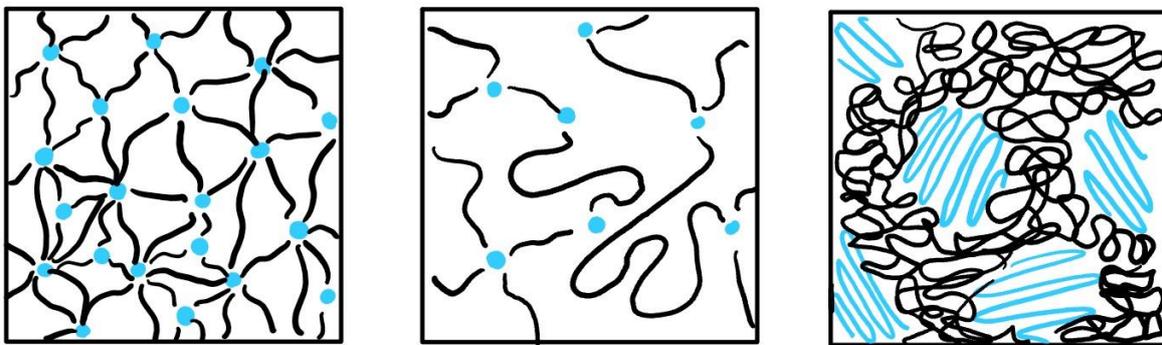


Abbildung 12: Kunststoffarten, Quelle: Eigene Darstellung

<sup>32</sup> vgl. Hans Dominghaus and others (2004). S.1.

<sup>33</sup> vgl. Hans Dominghaus and others (2004). S.7.

**Thermoplaste:** Als Thermoplaste (Abbildung 12, Links) werden Kunststoffe bezeichnet welche aus linearen oder verzweigten, jedoch nicht untereinander vernetzten Kettenmolekülen bestehen. Der Kunststoff kann kristalline (blau) und nicht kristalline Bereiche enthalten. Gibt es in der Struktur des Kunststoffes keine kristallinen Strukturen werden diese als amorph bezeichnet. Unter bestimmten Voraussetzungen können sich die Makromoleküle aneinander lagern wodurch kristalline Bereiche entstehen können. Thermoplaste mit kristallinen Strukturen werden als teilkristalline Kunststoffe bezeichnet.<sup>34</sup>

Für die Verarbeitung ist vor allem die Möglichkeit des wiederholten Aufschmelzens der Thermoplaste von großer Bedeutung. Nach dem Überschreiten der kritischen Temperatur können die Makromoleküle leicht voneinander abgleiten und in diesem Zustand verformt werden. Nach dem Unterschreiten der kritischen Temperatur verschlaufen sich die Makromoleküle untereinander und erstarren dadurch. Dieses Verhalten wird sich vor allem bei den Verarbeitungsmethoden Spritzgießen oder Extrudieren zu Nutzen gemacht. Amorphe Kunststoffe verhalten sich bei Raumtemperatur spröde, teilkristalline Thermoplaste verhalten sich zähelastisch.<sup>35</sup>

Als **Elastomere** oder **Duroplaste** werden Kunststoffe bezeichnet bei welchen die einzelnen Makromoleküle untereinander mit Querbrücken verbunden sind. Diese Querbrücken werden als Vernetzungsstellen bezeichnet. Dies bedeutet, dass die Makromoleküle nicht untereinander abgleiten können, wodurch sich die Eigenschaften des Werkstoffes im Vergleich zum Thermoplast wesentlich verändern. Elastomere und Duroplaste werden im unvernetzten Zustand verarbeitet, der chemische Vernetzungsvorgang setzt dabei während des Härtungsvorgangs ein.<sup>36</sup>

**Elastomere:** Die Vernetzung der Makromoleküle ist sehr weitmaschig, worauf die Beweglichkeit des Werkstoffes zurückzuführen ist (Abbildung 12, Mitte). Der Werkstoff kann bei Raumtemperatur stark reversibel verformt werden.<sup>37</sup>

Eine Sonderform der Elastomere sind die **thermoplastischen Elastomere**. Diese besitzen bei Raumtemperatur ähnliche Eigenschaften wie Elastomere, lassen sich im Unterschied zum klassischen Elastomer jedoch unter Wärmezufuhr plastisch verformen. Sie können daher thermoplastisch urgeformt werden (Spritzguss).<sup>38</sup>

<sup>34</sup> vgl. Hans Dominghaus and others (2004). S.9.

<sup>35</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.17 – 18.

<sup>36</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.20.

<sup>37</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.20.

<sup>38</sup> vgl. Hans Dominghaus and others (2004). S.6.

**Duroplaste:** Diese besitzen eine engmaschigere Vernetzung als Elastomere. Aufgrund dieser engen Vernetzung der Makromoleküle sind Duroplaste spröder, steifer und härter als Elastomere. Bei Erhöhung der Temperatur über eine kritische Temperatur zersetzen sich Duroplaste.<sup>39</sup>

### 4.1.2. Eigenschaften

Aufgrund der Vielfalt der Monomere und der unterschiedlichsten Möglichkeit der Aneinanderreihung dieser ergibt sich eine Vielzahl an Eigenschaften. Daraus ergeben sich vor allem im Vergleich zu Metall folgende Eigenschaften:<sup>40</sup>

- Kunststoffe besitzen eine niedrigere Verarbeitungstemperatur wodurch sie sich oft leichter und wirtschaftlicher Verarbeiten lassen
- aufgrund der Wirtschaftlichkeit der Verarbeitung ergibt sich eine gute Eignung zur Massenproduktion von Kunststoffbauteilen
- die mechanischen Eigenschaften lassen sich weitgehend einstellen wodurch Kunststoffe hart und steif, als auch weich und dehnbar sein können
- meist sind Kunststoffe mit einer Dichte von ca.  $0,8 \text{ g/cm}^3$  bis  $2,2 \text{ g/cm}^3$  bedeutend leichter als Metalle
- Kunststoffe besitzen gute thermische und elektrische Isolationseigenschaften
- einige Kunststoffe besitzen eine hohe chemische Beständigkeit

### 4.1.3. Mechanisches Verhalten

Im Gegensatz zu vielen anderen Werkstoffen liegt die Gebrauchstemperatur von Kunststoffen nahe an der Erweichungstemperatur. Daher besitzen Kunststoffe in erstarrter Form eine Mischform aus elastischen und viskosem Verhalten. Des Weiteren neigen Kunststoffe zum Kriechen und Relaxieren. Beim Relaxieren nimmt die Deformation unter konstanter Last zu. Es kommt zu einer Abnahme der Spannungen unter konstanter Verformung. Beide Vorgänge sind auch eine Funktion der Temperatur, sie laufen bei erhöhter Temperatur beschleunigt ab und können durch Absenken der Temperatur nahezu vollständig unterdrückt werden. Zurückzuführen ist diese Verhalten auf molekulare Umlagerungsvorgänge, welche bei erhöhter Temperatur beschleunigt ablaufen. Aufgrund dieser zeitlichen Abhängigkeit der Spannungen und der Verformungen werden Kunststoffe als viskoelastische Werkstoffe bezeichnet.<sup>41</sup>

<sup>39</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.21.

<sup>40</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S. 2.

<sup>41</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S. 63.

## 4.2. Elastollan

Da das Material Elastollan bei dem verwendete Sensorcartridge zum Einsatz kommt, wird dieses kurz beschrieben: Elastollan ist ein thermoplastisches Polyurethan (Abk.: TPU) der Firma BASF. Das Material kann extrudiert werden, jedoch auch im Blasform- und Spritzgussverfahren verarbeitet werden und findet Anwendung in Schläuchen, Kabelummantelungen, Riemen, Folien oder Profilen. Das Material wird in verschiedensten Ausführungen angeboten und zeichnet sich durch hohe Verschleiß- und Abriebfestigkeit, hohe Zugfestigkeit, gutes Dämpfungsverhalten, gute Kälteflexibilität, einen hohen Weiterreißwiderstand und hohe Beständigkeit gegen Öle, Fette, Sauerstoffe und Ozon aus.<sup>42</sup>

Im Bauteil wurde das Material Elastollan C60 A 15 HPM verwendet welches eine gute Spritzgusseignung besitzt. Diese spezielle Konfiguration des Elastollan zählt zu den weicheren Materialien der Gruppe. Es besitzt eine Härte von 60 Shore-A. Bei dieser Härtemessung wird ein federbelasteter Stift auf das Probenstück aufgesetzt und nach einer Verweilzeit von 15 Sekunden die Eindringtiefe ermittelt.<sup>43</sup>

Das Material besitzt einen Dehnungsabhängigen E-Modul welcher in Abbildung 13 ersichtlich ist.<sup>44</sup>

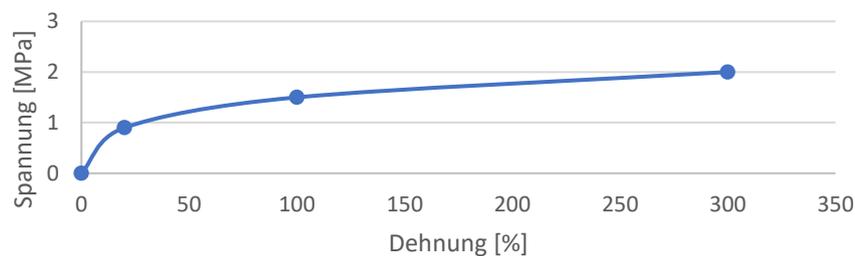


Abbildung 13: Zusammenhang Spannung Dehnung Elastollan, Quelle: Eigene Darstellung

Elastollan besitzt, wie die meisten Materialien, kein rein elastisches Materialverhalten. Dieses Verhalten ist von der Temperatur und von der Zeit abhängig und ist bei Dauerbelastung bereits bei Raumtemperatur zu beobachten.<sup>45</sup>

Bei Verwendung als Dichtung ist vor allem der Druckverformungsrest von Bedeutung da das Material unter ständiger Druckbelastung steht. In der Praxis sollte daher bei weichen Elastollan eine Stauchung von 10% nicht überschritten werden.<sup>46</sup>

<sup>42</sup> vgl. BASF (2017). S.2.

<sup>43</sup> vgl. Walter Hellerich, Günther Harsch, and Erwin Baur (2010). S.330.

<sup>44</sup> vgl. BASF (2016). S.27.

<sup>45</sup> vgl. BASF (2017). S.20.

<sup>46</sup> vgl. BASF (2017). S.22.

### 4.3. Prototyping mit Kunststoffen

Als Prototypen werden Modelle bezeichnet, welche während des Entwicklungsprozesses Verwendung finden und als Vorbereitung für das endgültige Produkt erstellt werden. Sie dienen dazu den aktuellen Entwicklungsstand darzustellen, wodurch eventuelle Schwachstellen und Problembereiche am Produkt frühzeitig erkannt werden können. Je nach Detaillierung dieser Prototypen lassen sich diese einteilen in: Designprototypen, geometrische Prototypen, Funktionsprototypen und technische Prototypen:<sup>47</sup>

- **Designprototypen** dienen zur Beurteilung ästhetischer und ergonomischer Merkmale
- **Geometrische Prototypen** sind maßgenaue Modelle und werden für erste Gebrauchsversuche erstellt
- **Funktionsprototypen** besitzen bereits die gleichen funktionellen Eigenschaften des späteren Bauteils
- **Technische Prototypen** sind besitzen weitestgehend die gleichen funktionellen als auch ergonomischen Merkmale des finalen Serienbauteils

Prototypen aus Kunststoff können konventionell, mittels spanabhebenden Fertigungsmethoden, oder über additive Verfahren, wie das Rapid Prototyping erstellt werden. In weiterer Folge wird auf die wichtigsten Rapid Prototyping Methoden eingegangen.

Bei der additiven Fertigung wird ausgehend von einem 3D-Modell durch das schichtweise Ablagern von Material das Bauteil aufgebaut. Das Ausgangsmaterial kann dabei formlos oder formneutral vorliegen und wird über unterschiedlichste Aushärte- oder Fügeprozesse in die endgültige geometrische Form gebracht.<sup>48</sup>

Der Kostenvorteil dieser Verfahren besteht darin, dass zur Fertigung der Bauteile keine Werkzeuge, Formen oder produktspezifische Vorrichtungen notwendig sind. Aus diesem Grund können auch kleine Stückzahlen wirtschaftlich gefertigt werden. Das mittels CAD Systemen erstellte 3D-Modell des Bauteils dient gleichzeitig als Produktmodell und Fertigungsvorlage. Ein weiterer Vorteil der additiven Fertigung ist das Wegfallen vieler Konstruktionsrichtlinien: Komplizierte Geometrien können direkt aus einem Stück gefertigt werden, Hinterschneidungen können problemlos realisiert werden, es kann auf

---

<sup>47</sup> vgl. Elvira Moeller (2014). S.108

<sup>48</sup> vgl. VDI (2009). S6.

Formschrägen oder gleichbleibende Wandstärken verzichtet werden, Bohrungen und Durchbrüche können eingebracht werden die mit konventionellen Bearbeitungsmethoden nicht fertigbar wären.<sup>49</sup>

### 4.3.1. 3D Printing

Beim 3D-Printing wird pulverförmiges Ausgangsmaterial, über punktweises Aufbringen eines Binders über einen Druckkopf selektiv verklebt. Anschließend wird die Bauplattform abgesenkt und mit einem Wischer eine weitere Schicht Pulver aufgebracht. Über zusätzliche Druckköpfe kann das Bauteils eingefärbt werden. Um ein mechanisch widerstandsfähiges Bauteil zu erhalten kann das Bauteil nach dem Druck mit Epoxidharz infiltriert werden. Mit diesem Verfahren können Kunststoffpulver sowie auch Metall- oder Keramikpulver verarbeitet werden.<sup>50</sup>

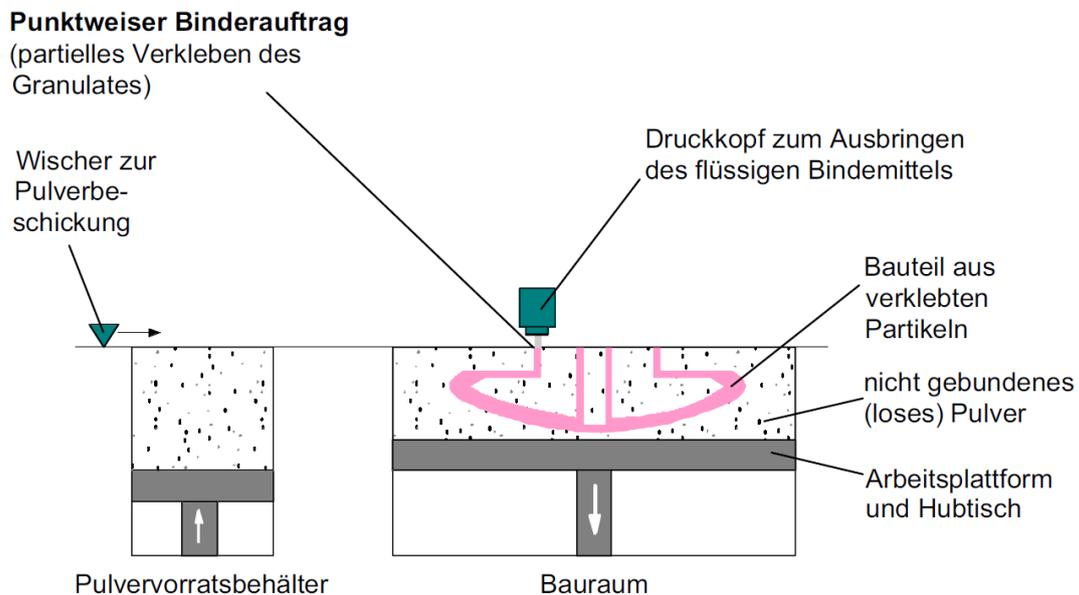


Abbildung 14: 3D Printing<sup>51</sup>

<sup>49</sup> vgl. Hans Albert Richard and Thomas Zipsner Hrsg (2017). S.21.

<sup>50</sup> vgl. Jannis Breuninger and others (2013). S.29.

<sup>51</sup> vgl. VDI (2009). S.20.

### 4.3.2. Fused Deposition Modeling

Beim Fused Deposition Modeling wird das feste Material durch eine heiße Düse gedrückt und dabei aufgeschmolzen. Aus der Düse tritt das Material als dünne, weiche Materialschlange aus. Damit wird mit dem beweglichen Druckkopf Schicht für Schicht das Bauteil geformt. Das Rohmaterial wird als Filament bezeichnet. Zur Unterstützung der noch nicht vollständig ausgehärteten Strukturen des Bauteils können gleichzeitig Stützkonstruktionen gedruckt werden welche anschließend entfernt werden müssen. Nachteil dieses Verfahren ist, dass dabei kein homogenes Materialgefüge entsteht welches eine niedrigere Festigkeit normal zur Strangrichtung aufweist.<sup>52</sup>

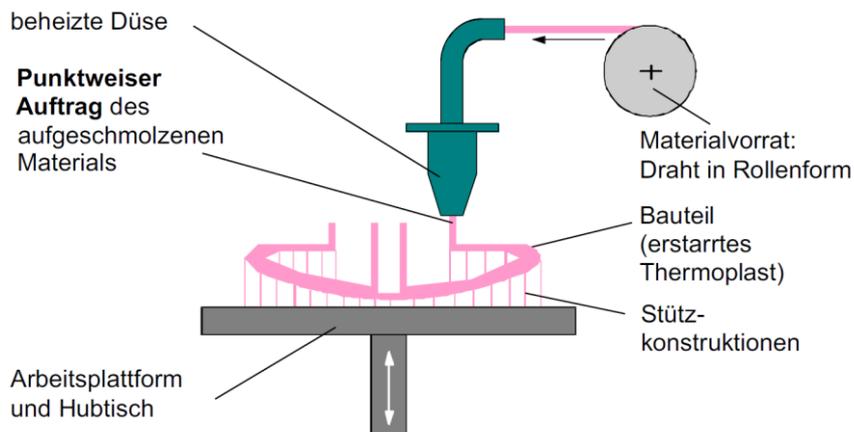


Abbildung 15: Fused Deposition Modeling<sup>53</sup>

<sup>52</sup> vgl. Jannis Breuninger and others (2013). S.33.

<sup>53</sup> vgl. VDI (2009). S.18.

### 4.3.3. Stereolithographie (SL)

Bei der Stereolithographie wird von einem flüssigen Rohmaterial (z.B. Epoxid) ausgegangen welches sich mit einem Laser aushärten lässt. Die gängigen Schichtdicken liegen hierbei bei 0,05 bis 0,25mm, wobei mit Mikrostereolithographie auch Schichtdicken im Mikrometerbereich realisiert werden können. Das flüssig Ausgangsmaterial wird beim Stereolithographie Verfahren in ein Bad gefüllt. Der fest verbaute Laser fährt über einen beweglichen gesteuerten Spiegel die erste Schicht des Bauteils ab und härtet das Material aus. Nach jedem Fertigungsschritt wird das Flüssigkeitsbad weiter abgesenkt und Flüssigkeit wird mit einem Wischer gleichmäßig verteilt. Bei größeren Bauteilen können Stützkonstruktionen notwendig werden.<sup>54</sup>

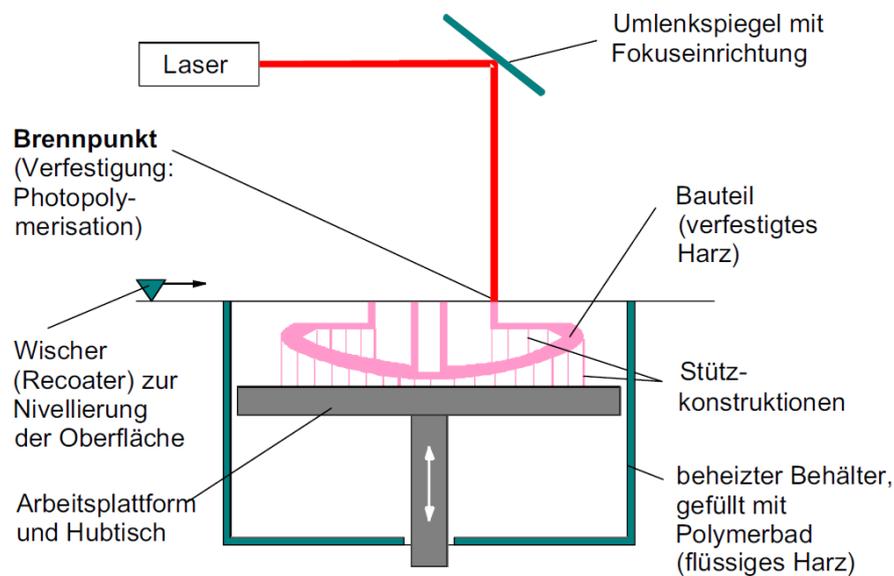


Abbildung 16: Stereolithographie<sup>55</sup>

<sup>54</sup> vgl. Jannis Breuninger and others (2013). S.27.

<sup>55</sup> vgl. VDI (2009). S.15.

#### 4.3.4. Selektives Lasersintern (SLS)

Im Unterschied zur Stereolithographie wird das Becken nicht mit flüssigen lichterhärtenden Harz gefüllt, sondern pulverförmiger Kunststoff. Der Laser schmilzt über einen gesteuerten Spiegel das Pulver lokal auf wodurch eine Verbindung des Pulvers erzielt wird. Nach dem Abfahren des gesamten Bauteils wird die Bauplattform abgesenkt und mit einem Wischer neues Pulver aufgebracht. Mit diesem Verfahren können auch Metallpulver mit oder ohne Binder verarbeitet werden. Das nicht verschmolzene Pulver dient gleichzeitig als Satzmaterial und kann für weitere Drucke recycelt werden.<sup>56</sup>

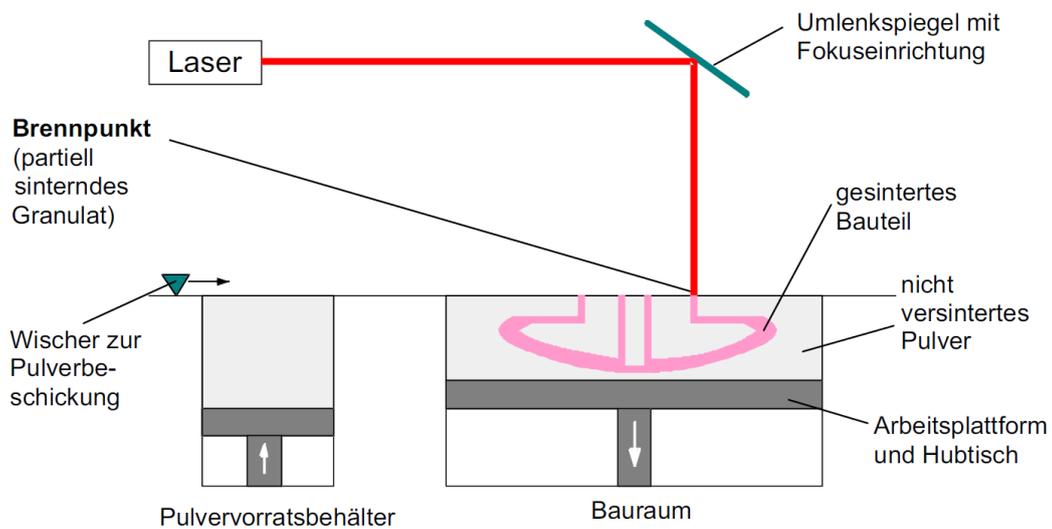


Abbildung 17: Selektives Lasersintern <sup>57</sup>

<sup>56</sup> vgl. Harmut Rother (2017). S.30.

<sup>57</sup> vgl. VDI (2009). S.16.

### 4.3.5. Vakuumgießen

Der Vakuumguss kann als Nachfolgeverfahren der generativen Fertigungsverfahren eingesetzt werden und ist eine Abformtechnik mit welcher serienidentente Prototypen hergestellt werden können. Für die Fertigung von Kunststoffprototypen kommt oft das Vakuumgießen zum Einsatz.<sup>58</sup>

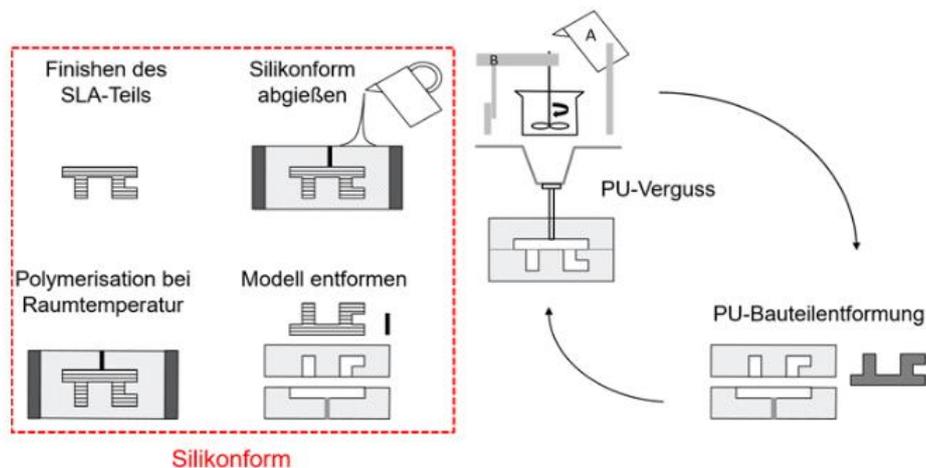


Abbildung 18: Vakuumguss<sup>59</sup>

In den folgenden beiden Absätzen wird der Vorgang und die Vorteile und Nachteile des Vakuumgusses beschrieben.<sup>60</sup>

Ausgangspunkt für den Vakuumguss ist ein fertig bearbeitetes Positivmodell des Bauteils welches zum Beispiel mit einem der unterschiedlichen Rapid Prototyping Verfahren hergestellt wurde. Dieses Positivmodell wird mit einem Silikonkautschuk umhüllt um eine Negativform zu erhalten. Nach dem Vernetzen des Silikons wird die Gussform aufgeschnitten und das eingebettete Urmodell entfernt. Anschließend werden Einfüll- und Entlüftungskanäle in die Form eingebracht. Nach dem Schließen der Form wird unter Vakuum die Silikonform ausgegossen. Dabei können unterschiedlichste Materialien wie Polyurethan oder auch Epoxidharze zum Einsatz kommen. Nach dem Entformen des Bauteils kann die Form für weitere Prototypen wiederverwendet werden.

Der Vorteil des Vakuumgusses liegt in der raschen und kostengünstigen Erstellung der Form und die hohe Maßgenauigkeit der Bauteile. Durch die elastische Silikonform können Hinterschnitte über eine Zwangsentformung realisiert werden. Der Verschleiß der Silikonform welcher die Anzahl der Abgüsse

<sup>58</sup> vgl. Birgit Awiszus and others (2016). S.329.

<sup>59</sup> vgl. Cirp GmbH, Onlinequelle [10.12.2018].

<sup>60</sup> vgl. Birgit Awiszus and others (2016). S.336.

auf etwa 30 Stück limitiert ist als Nachteil aufzuführen. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren vor allem bei Prototypen und Kleinserien eingesetzt.

#### 4.4. Spanende Bearbeitung von Kunststoff

Hopmann und Michaeli beschreiben die mechanische Bearbeitung von Kunststoffen wie folgende dargestellt.<sup>61</sup>

Kunststoffe könne mit ähnlichen Verfahren wie Metalle spanabhebend bearbeitet werden. Kunststoffe können gebohrt, gefräst, gedreht als auch geschliffen und poliert werden. Es können mittels mechanischen Bearbeitungen gesamte Bauteile als auch Nacharbeiten an Kunststoffbauteile durchgeführt werden. Auf Grund der Wirtschaftlichkeit werden gesamte Bauteile meist bei Einzelanfertigungen, Prototypen oder Kleinserien mittels spanenden Fertigungsverfahren angefertigt. Bei diesen Losgrößen ist eine Herstellung einer Spritzgussform meist nicht wirtschaftlich.

Spanende Bearbeitungen an Kunststoffbauteilen werden oft bei Nacharbeiten an diesen angewendet. Beispielsweise können bei Formteile Hinterschnitte bei Kleinserien durch Nacharbeit kostengünstiger hergestellt werden als durch einen zusätzlichen Schieber am Spritzgusswerkzeug, welche quer zur Entformungsrichtung eingebaut werden.<sup>62</sup>

Auch können Passungen, welche nicht über den Spritzguss hergestellt werden, können nachgearbeitet werden.

Besondere Bedeutung kommt bei der mechanischen Bearbeitung den thermischen Eigenschaften des Kunststoffes zu: Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit müssen die Bearbeitungsparameter Schnittgeschwindigkeit und Vorschub als auch die Schneidengeometrie angepasst werden. Die entstehende Wärme sollte möglichst mit dem Span abgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass Thermoplaste nicht über 60°C, Duroplaste nicht über 150°C erwärmt werden.<sup>63</sup>

Bei der Auswahl der Kühlmittel muss die Beständigkeit der Kunststoff gegenüber dieser berücksichtigt werden. Das Kühlmittel darf bei der Bearbeitung den Werkstoff weder anlösen noch anquellen.

---

<sup>61</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.281 – 290.

<sup>62</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.39.

<sup>63</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.282.

## 4.5. Spritzguss

Spritzgießen ist eine Umformtechnik, bei welcher Formteile mit komplexer Geometrie vollautomatisch hergestellt werden können. Aus dem Festzustand des Ausgangsstoffes können Thermoplaste, Duroplaste oder Elastomere in Spritzgussmaschinen verarbeitet werden. Dazu wird der Ausgangswerkstoff aufgeschmolzen und in den formgebenden Hohlraum des Werkzeuges eingespritzt. Dieser wird dort verdichtet und abgekühlt und anschließend als fertiges Formteil ausgeworfen. Es können Formteile im mg-Bereich bis hin zum dreistelligen Kilogramm-Bereich hergestellt werden.<sup>64</sup>

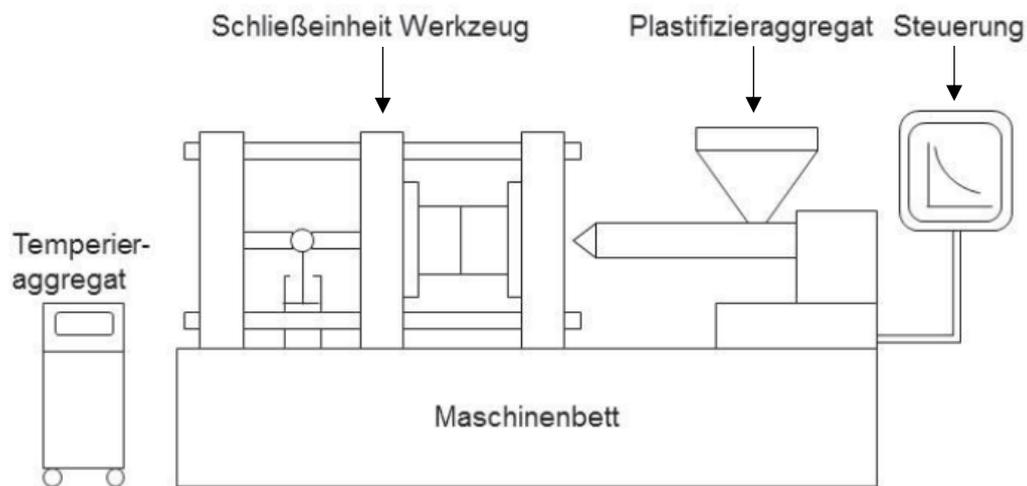


Abbildung 19: Aufbau einer Spritzgießmaschine<sup>65</sup>

Eine Spritzgussmaschine besteht im Wesentlichen aus einem, wie in Abbildung 19 schematisch dargestellt, Maschinenbett welches die Schließeinheit, das Werkzeug und das Plastifizierungsaggregat aufnimmt. Zusätzlich ist eine Steuerungseinheit, welche den Ablauf steuert und ein Temperierungsaggregat, das die Temperatur des Werkzeugs regelt notwendig. Über die Schließeinheit werden die beiden formgebenden Hälften während des Spritzprozesse geöffnet und geschlossen. Die Schließeinheit und der Antrieb des Plastifizierungsaggregates erfolgt meist hydraulisch. Die Plastifizierungseinheit hat die Aufgabe das Material zu plastifizieren, zu fördern, zu homogenisieren, zu dosieren zu speichern und einzuspritzen. Dabei kommt eine Förderschnecke zum Einsatz.<sup>66</sup>

<sup>64</sup> vgl. Erich Wintermantel and Ha Suk-Woo (2009). S.557.

<sup>65</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.147.

<sup>66</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.146.

### 4.5.1. Ablauf Spritzguss

Der Spritzgussprozess ist in Abbildung 20 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben. Das Werkzeug wird geschlossen (Schritt 1) und durch einen axialen Vorschub in der Schnecke wird der Werkstoff, welcher meist in Granulat oder Pulverform vorliegt plastifiziert und in die Kavität eingespritzt (Schritt 2). Als Kavität wird der Hohlraum in der Mitte des Werkzeuges bezeichnet über welche das zu erzeugende Bauteil definiert wird. Das Werkzeug ist bei thermoplastischen Materialien gekühlt, was zu einem Abkühlen der Schmelze im Werkzeug führt. Durch dieses Abkühlen tritt eine Volumenschwindung des Werkstückes ein, was durch die Nachdruckphase bestmöglich kompensiert werden soll (Schritt 3). Nach dieser Phase wird das Aggregat zurückgefahren und es wird während der Abkühlphase des Werkstücks Schmelze für den nächsten Spritzvorgang vorbereitet (Schritt 4 und 5). Im letzten Schritt wird das Werkzeug geöffnet und das Bauteil über die Auswerfer ausgeworfen. Werden Duroplaste oder Elastomere verarbeitet muss das Werkzeug im Schritt 3 erhitzt werden um den Vernetzungsvorgang zu initiieren.<sup>67</sup>

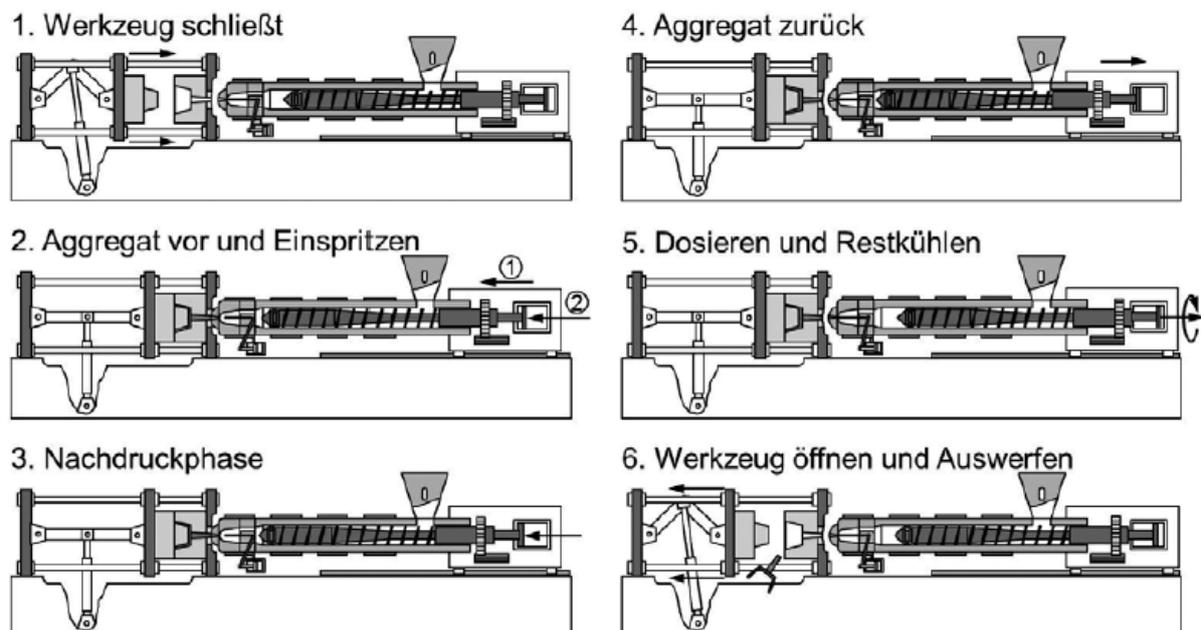


Abbildung 20: Ablauf Spritzguss<sup>68</sup>

Da die Abkühlzeit einen erheblichen Teil der Zykluszeit ( $t_k$ ) einnimmt, ist diese auch wesentlich für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Die Zykluszeit geht proportional zum Quadrat der

<sup>67</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.145.

<sup>68</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.145.

Bauteilwanddicke ( $s$ ) ein ( $t_k \sim s^2$ ), was bedeutet, dass der Wanddicke eine große Bedeutung bei der Konstruktion von Spritzgussbauteilen zukommt.<sup>69</sup>

#### 4.5.2. Spritzgusswerkzeug

Das Werkzeug ist das wesentliche Teil des Spritzgussprozesses und hat dabei folgende Aufgaben:<sup>70</sup>

- Aufnahme und Verteilung der Schmelze
- Formen der Schmelze in die Artikelgestalt
- Abkühlung bzw. Zuführung von Temperatur an das zu verarbeitende Medium
- Entformung
- Kraftaufnahme und Bewegungsübertragung

Das Werkzeug besteht aus zwei Werkzeughälften, wobei eine der Hälften beweglich und die andere Hälfte unbeweglich ist.

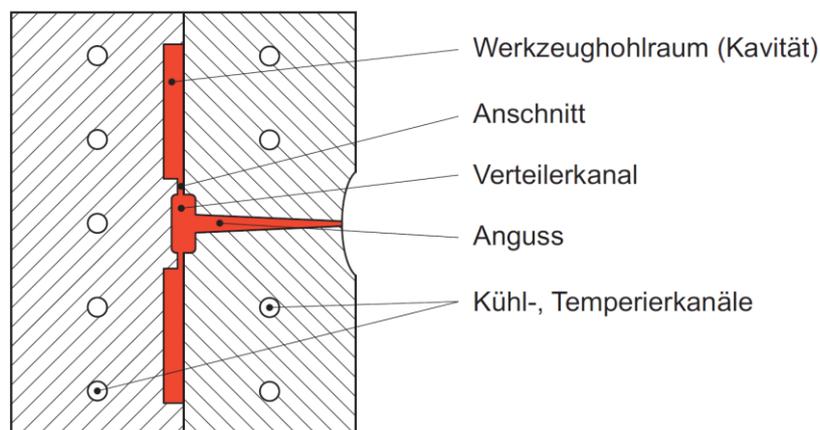


Abbildung 21: Aufbau Spritzgusswerkzeug<sup>71</sup>

Abbildung 20 zeigt den Aufbau eines Werkzeuges. In die Kavität wird der flüssige Kunststoff eingedrückt. Über den Anguss und den Verteilerkanal wird das plastifizierte Material zur Kavität geleitet. Über den Anschnitt wird das Material in die Kavität geleitet. Über eine Öffnungsbewegung wird das Bauteil freigegeben und über das im Werkzeug angebrachte Auswerferpaket ausgeworfen. Über Kühl- und Temperierkanäle wird das Werkzeug während des Vorgangs im gewünschten Temperaturfenster gehalten.<sup>72</sup>

<sup>69</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.146.

<sup>70</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.160.

<sup>71</sup> vgl. Wolfgang Kaiser (2011). S.160.

<sup>72</sup> vgl. Christian Hopmann and Walter Michaeli (2017). S.161.

Für das Werkzeug können unterschiedlichste Materialien verwendet werden. Neben dem zu verarbeitenden Material hängt diese Entscheidung auch von wirtschaftlichen Überlegungen ab, da dies einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten des Werkzeuges hat. Das verwendete Werkzeugmaterial hat einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer des Werkzeugs. Für Werkzeuge mit einer hohen geforderten Ausbringungsmenge werden meist Stähle verwendet welche nach der Bearbeitung gehärtet werden. Im Prototypenstadium werden oft Aluminiumlegierungen, welche sich leichter verarbeiten lassen, herangezogen. Neben den reinen Materialkosten sind auch die Bearbeitungskosten der Materialien unterschiedlich. Neben Stählen werden Nichteisenmetalle (Kupfer, Zink, Aluminium, etc.) zur Erstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet. Spritzgusswerkzeuge können mit den unterschiedlichsten Fertigungsverfahren hergestellt werden, z.B. Fräsen oder Erodieren.<sup>73</sup>

### 4.5.3. 2-Komponenten Spritzguss

Als 2-Komponenten Spritzguss wird die Verarbeitung verschiedenartiger Werkstoffe zu einem Bauteil bezeichnet. Dies kann in einem Arbeitsgang oder in mehreren Arbeitsgängen durchgeführt werden. Dabei werden Kunststoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften oder unterschiedlicher Farben zu einem Bauteil kombiniert.<sup>74</sup>

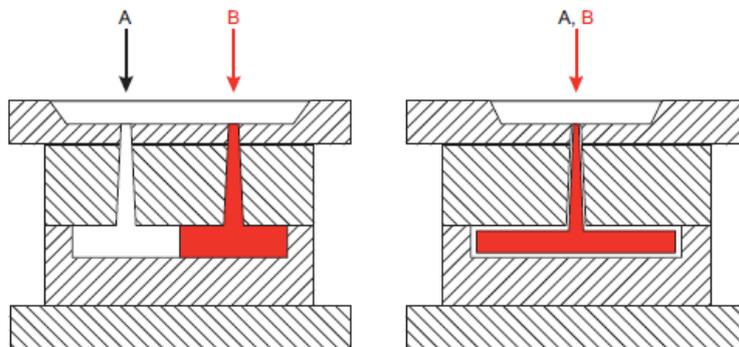


Abbildung 22: 2-K Spritzguss<sup>75</sup>

Abbildung 22 zeigt zwei Beispiele eines 2-Komponenten (2-K) Spritzgusses, „A“ und „B“ beschreiben die beiden unterschiedlichen Kunststoffe welche in die Form gespritzt werden. Durch diese Technologie besteht die Möglichkeit unterschiedlichster Bauteile mit verbesserter Haptik und Funktion zu erstellen welche sich mit konventionellen 1-Komponenten Spritzguss nicht realisieren lassen.<sup>76</sup>

<sup>73</sup> vgl. Günter Mennig and Klaus Stoeckert (2013). S.421. – 422.

<sup>74</sup> vgl. Peter Eyerer, Thomas Hirth, and Peter Elsner (2008). S.232.

<sup>75</sup> vgl. Wolfgang Kaiser (2011). S.163.

<sup>76</sup> vgl. Wolfgang Kaiser (2011). S.163.

Die Einfachste Form des 2-K Spritzgusses ist die Umsetztechnik. Dabei wird im ersten Werkzeug ein Vorspritzling erstellt, dieser wird anschließend in die Kavität des zweiten Werkzeuges eingelegt und mit der zweite Komponente umspritzt. Dies kann manuell per Hand geschehen, sowie auch vollautomatisiert mittels eines Roboters. Eine weitere Möglichkeit ist die Drehtechnik, bei der das Werkzeug nach dem Spritzvorgang gedreht und der Vorspritzling dadurch zur zweite Düse geführt und über- oder umspritzt wird.<sup>77</sup>

#### 4.5.4. Spritzgussgerechtes Konstruieren

Aufgrund des Spritzgussprozesses ergeben sich spezielle Anforderungen an das Spritzgussbauteile welche während des Konstruktionsprozesses berücksichtigt werden müssen. Diese Regel haben Einfluss auf die Funktion, Qualität, Wirtschaftlichkeit des Bauteils.

**Wandstärke:** Unterschiedliche Wandstärken sollten nach Möglichkeit vermieden werden. Hauptproblem variierender Wandstärken ist deren unterschiedliche Abkühlrate. Dicke Wandstärken benötigen länger als dünne Wandstärken zum Abkühlen. Nach dem Auswerfen können diese Temperaturdifferenzen zum Verzug am Bauteil führen.<sup>78</sup>

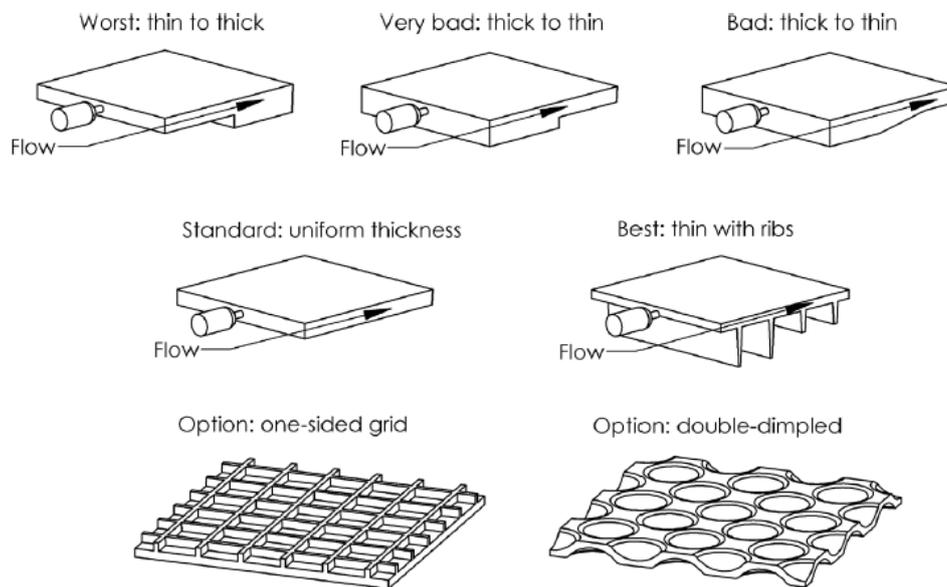


Abbildung 23: Design Spritzguss<sup>79</sup>

Abbildung 23 zeigt einige grundlegende Regeln und Beispiele zur Konstruktion von Bauteile was die Wandstärke dieser betrifft. Der schlechteste Fall in Bezug auf Spritzguss ist der oben links gezeigt Fall

<sup>77</sup> vgl. Günter Mennig and Klaus Stoeckert (2013). S.45 – S.46.

<sup>78</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.31

<sup>79</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.32

in welchem die Bauteilstärke abrupt zunimmt. Dies führt zu einem ungleichmäßigen Fluss der Schmelze welcher sich wiederum einen schlechten Einfluss auf die Oberflächenqualität des Bauteils hat. Weiters kann es zu einem vorzeitigen Erstarren des dünnen Bereiches kommen. Besser ist der Übergang von einem dicken Bereich in eine dünne Wandstärke. Dies kann z.B. über ein Verlegen des Anspritzpunktes vom dünnen in den dicken Bereich realisiert werden. Eine weitere Verbesserung wäre ein kontinuierlicher Übergang zwischen dünner und dicker Bauteilstärke. Die beste Lösung ist ein Bauteil mit möglichst konstanter Wandstärke. Eine Möglichkeit ist die Erhöhung der gesamten Wandstärke, dies führt jedoch zu höherem Materialverbrauch und höheren Auskühlzeiten/Standzeiten in der Spritzgussmaschine und dadurch zur Unwirtschaftlichkeit des Bauteils. Eine weitere Möglichkeit ist die Reduktion der Wandstärke, kann dies aufgrund hoher Anforderungen an die Festigkeit jedoch nicht realisiert werden kann das Bauteil mit Rippen versehen werden. Die Höhe und Anzahl der Rippen kann entsprechend der geforderten Steifigkeit im Verlauf des Bauteils variiert werden.<sup>80</sup>

---

<sup>80</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.32.

**Rippen:** Abbildung 24 zeigt einen Vorschlag zur Realisierung von Bauteilrippen. Die Rippenstärke sollte bei etwa 70% der Bauteilwandstärke liegen. Die Höhe sollte bei 4-mal der Wandstärke liegen. Der Abstand zwischen den Rippen sollte etwa 10-mal der Wandstärke entsprechen. Bei dieser Anordnung der Rippen liegt die Festigkeit des Bauteils bei der eines Bauteils mit 30% höherer Wandstärke. Bei dem 30% dickeren Bauteil wäre jedoch 15% mehr Material und eine um 70% längere Abkühlzeit notwendig als bei dem Bauteil mit den entsprechend ausgeführten Rippen.<sup>81</sup>



Abbildung 24: Rippendesign<sup>82</sup>

Eine größere Dicke der Rippen würde zwar die Festigkeit des Bauteils erhöhen, könnte jedoch während des Abkühlprozesses zu Einfallstellen und Sinkmarken auf der gegenüberliegenden Seite der Rippe führen.<sup>83</sup>

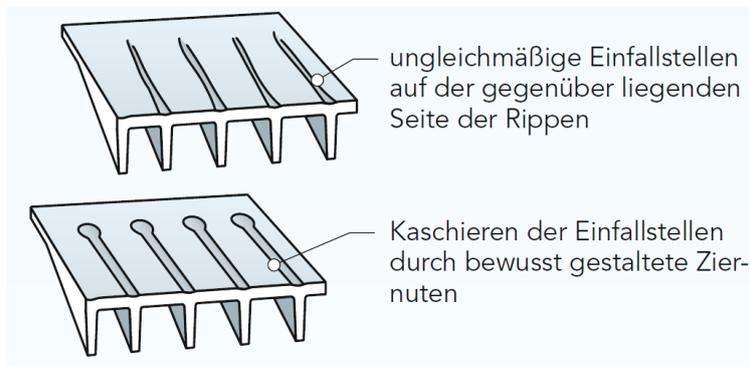


Abbildung 25: Einfallstellen<sup>84</sup>

Diese Einfallstellen können, wenn nicht anders möglich, z.B. über bewusstes Einbringen von Kaschiergeometrien abgeschwächt werden (vgl. Abbildung 25).<sup>85</sup>

<sup>81</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.33.

<sup>82</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.33.

<sup>83</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.33.

<sup>84</sup> vgl. Andreas Kalweit and others (2012). S.89.

<sup>85</sup> vgl. Andreas Kalweit and others (2012). S.89.

**Ecken und Kanten:** Scharfe Kanten werden im Produktdesign oft benötigt um Bauteile mit möglichst großen Innenraum zu realisieren. Diese sollten jedoch vermieden werden und beeinflussen die Bauteil Performance, das Spritzgussform Design und den Spritzgussprozess selbst:<sup>86</sup>

- Scharfe Kanten führen zu Spannungsspitzen wären der Belastung des Bauteils was zu Versagen des Abteils unter Belastung führen kann.
- Es ist oft schwierig scharfe Kanten in der Spritzgussform zu fertigen das die Formen oft gefräst werden und der Fräser Durchmesser nicht beliebig reduziert werden kann. Spritzgussformen werden in vielen Fällen erodiert, wozu jedoch auch vorab eine Grafit Elektrode gefräst werden muss.

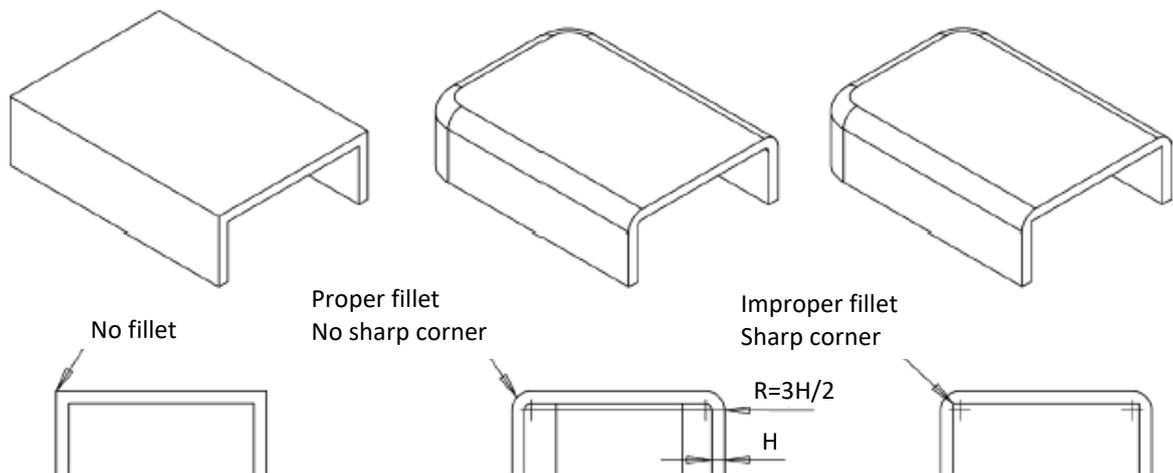


Abbildung 26: Ecken und Kanten<sup>87</sup>

Abbildung 26 zeigt eine Richtlinie zur Erstellung von Rundungen. Um gleichbleibende Wandstärke des Bauteils zu gewährleisten muss der Innenradius entsprechend des Außenradius gewählt werden.<sup>88</sup>

<sup>86</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.34 – S.35.

<sup>87</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.34.

<sup>88</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.89.

**Verwerfungen/Verzug:** Aufgrund der unterschiedlichen Abkühlzeiten und der daraus resultierenden Schwindung des Bauteils kann es zum Verzug selbigen kommen. Eine Möglichkeit zur Vermeidung von Verzug ist das bewusste Ersetzen einer ebenen bzw. flachen Geometrie durch eine 3D Geometrie welche den Verzug verringern kann.<sup>89</sup>



Abbildung 27: Vermeidung Verzug<sup>90</sup>

**Formschrägen und Oberflächenqualität:** Als Formschräge wird der Winkel zwischen horizontaler Bauteilflächen und vertikale Bauteilflächen in Formöffnungsrichtung bezeichnet. Während des Abkühlens schwindet das Bauteil und schrumpft somit auf das formgebende Spritzgusswerkzeug auf.

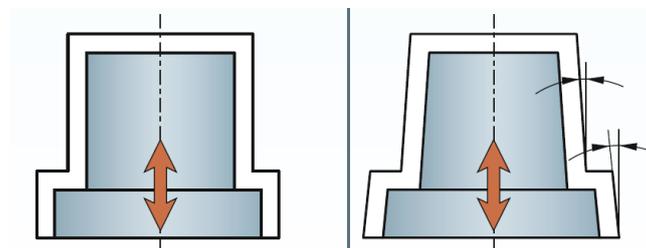


Abbildung 28: Formschrägen<sup>91</sup>

Um das Entformen zu vereinfachen müssen die Flächen in Entformungsrichtung mit einer Schräge versehen werden. Auf Grund der Bauteilfunktion werden oft kleine Winkel gefordert. Dieser Winkel ist abhängig vom verwendeten Werkstoff und der geforderten Oberflächenqualität. Je rauer bzw. je mehr Textur an der Bauteiloberfläche gewünscht ist, desto größer muss der Entformungswinkel gewählt werden.<sup>92</sup>

Die minimale Formschräge liegt bei etwa  $0,5^\circ$ , übliche Winkel sind ca.  $1-2^\circ$ .<sup>93</sup>

<sup>89</sup> vgl. Andreas Kalweit and others (2012). S.89.

<sup>90</sup> vgl. Andreas Kalweit and others (2012). S.89.

<sup>91</sup> vgl. Andreas Kalweit and others (2012). S.90.

<sup>92</sup> vgl. Andreas Kalweit and others (2012). S.90.

<sup>93</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.38.

**Bindenähte:** Diese entstehen sobald unterschiedliche Schmelzenströme im Werkzeug aufeinandertreffen und zusammenfließen. Dies geschieht vor allem an Durchbrüchen im Bauteil oder bei Formteilen mit mehreren Angüssen. Diese können jedoch auch an Bauteilen mit Wandstärkenunterschieden auftreten, bei welchen es zum partiellen Zurückbleiben bzw. Voreilen der Schmelze kommt.

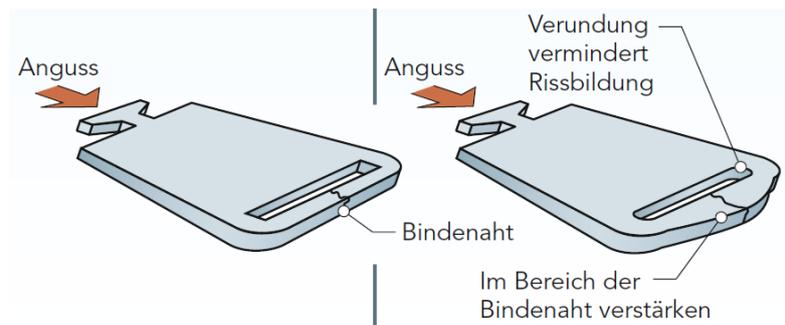


Abbildung 29: Bindenähte<sup>94</sup>

Bindenähte führen zu mechanischen und optischen Schwachstellen welche möglichst vermieden werden sollten. Mit dem Verlegen der Angussposition können diese z.B. in einen mechanisch und optisch unkritischen Bereich verlegt werden. Ist dies nicht möglich kann der Bereich z.B. über die Anpassung der Materialstärke entschärft werden. Die Festigkeit der Bindenähte lässt sich auch über das Ändern der Prozessparameter des Spritzgussprozesses, wie z.B. Schmelztemperatur, Einspritzzeiten und Nachdruck erhöht bzw. angepasst werden.<sup>95</sup>

<sup>94</sup> vgl. Andreas Kalweit and others (2012). S.90.

<sup>95</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S22.

**Hinterschnitte:** Als Hinterschnitt (vgl. Abbildung 30) wird eine Geometrie bezeichnet welche ein Auswerfen des Bauteils aus der Form verhindert. Dies ist z.B. ein Fenster in einer Seitenwand, eine horizontale Ausformung oder ein Schnapper.<sup>96</sup>

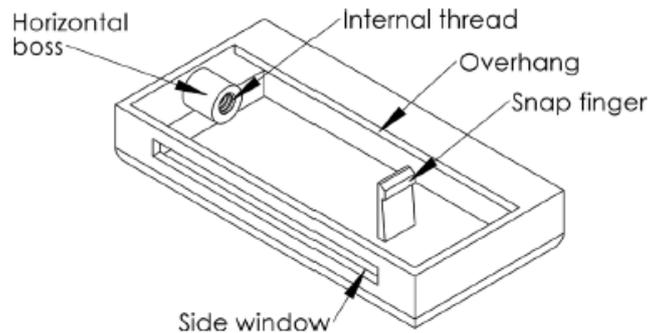


Abbildung 30: Hinterschnitte<sup>97</sup>

Hinterschnitte können mittels Schiebern realisiert werden und können in der Düsen- oder in der Auswerferseite des Werkzeuges angebracht werden. Die Schieber können zwangsgeführt oder hydraulisch betätigt werden. Die Anzahl an Schieber sollte jedoch möglichst gering gehalten werden da diese die Kosten der Spritzgussform erhöhen.

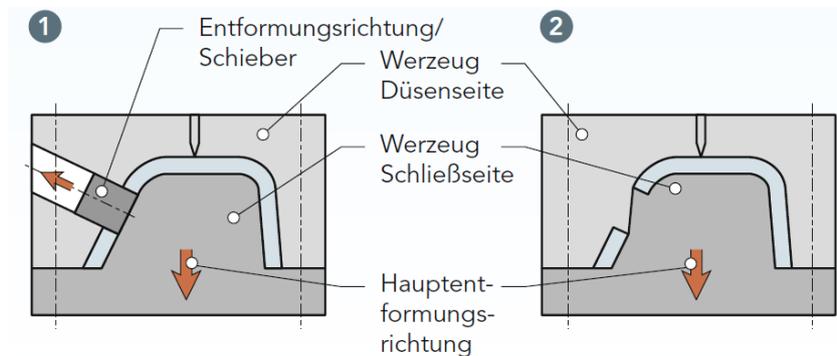


Abbildung 31: Schieber<sup>98</sup>

Abbildung 31 zeigt die Ausführung des Werkzeuges bei welcher das Fenster in der Seitenwand mit einem Schieber realisiert wurde (links). In diesem Fall besteht jedoch eine günstigere Version bei welcher der Schieber vermieden werden kann (rechts).

Es besteht die Möglichkeit Hinterschnidungen zu Zwangsentformen. Dies ist vor allem bei elastischen Materialien möglich.<sup>99</sup>

<sup>96</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.39.

<sup>97</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.39.

<sup>98</sup> vgl. Andreas Kalweit and others (2012). S.90.

<sup>99</sup> vgl. David O. Kazmer (2016). S.39.

## 5. Sensorcartridge Erba Technologies Austria

Der ursprünglich von der Firma Erba entwickelte ionensensitive Sensor besitzt vier Messelektroden (Natrium, Kalium, Calcium und Chlorid), mit Feststoffkontakt und eine Referenzelektrode mit Flüssigkontakt. Im Zuge der Arbeit wurde das Konzept des Sensors eine optimiert, dabei wurde auch die Referenzelektrode in eine Feststoffelektrode umgeändert.

Der Sensor ermöglicht Messungen von wässrigen Lösungen, dazu zählen Vollblut, Plasma, Serum und Urin. Bei Vollblut handelt es sich um Blut mit all seinen Bestandteilen, zu denen Wasser, die roten und weißen Blutkörperchen, Blutplättchen, Eiweiß, Fett, Zucker und Salze zählen. Reduziert man Vollblut um die festen Bestandteile, erhält man Plasma. Bei Serum wiederum handelt es sich um Plasma, welches um Gerinnungsfaktoren reduziert wurde.<sup>100</sup>

Das in der Entwicklung verfolgte Ziel des Sensors, in weiterer Folge auch Sensorcartridge genannt, war es stets ein möglichst kosteneffizientes Bauteil mit optimierter Messqualität zu konstruieren. Bei der Sensorcartridge handelt es sich um ein sogenanntes „Consumable“ (Verbrauchsmaterial). Der Sensor muss also nach einer bestimmten Anzahl an Messungen, beziehungsweise nach einer vorgegebenen Lebensdauer vom Anwender ausgetauscht werden um die gewünschte Messgenauigkeit zu garantieren. Limitierende Faktoren für den Sensor sind wie bereits erwähnt Verwendungszeit und die Quantität der durchgeführten Messungen. Erwartet wird derzeit eine Lebensdauer von bis zu acht Wochen oder quantitativ ausgedrückt maximal 5000 Messungen.

Der Sensorcartridge ist das Herzstück des Gesamtgerätes welches eine Anzeigeeinheit, eine Probeneingabeeinheit, das Reagenzien Paket, einen Drucker und die für die Messung notwendigen Ventile und Pumpen beinhaltet.

---

<sup>100</sup> vgl. Christoph Ritter (2014). S.11.



Abbildung 32: Blut Analyzer i-smart30<sup>101</sup>

Der Sensor besteht aus einem 2K Spritzguss-Oberteil und der Sensorsubstratplatte, auf welcher mittels Siebdruck und Dispensieren die Sensorspots (Messelektroden) aufgebracht werden. Als Dispensieren versteht man das Auftropfen der auf die zu messenden Ionen abgestimmte Lösung. Die beiden Bauteile werden formschlüssig miteinander verbunden.

## 5.1. Sensorsubstratplatte

Die Sensorsubstratplatte bestand bereits vor Beginn der Arbeit und besteht aus 1mm starken Polycarbonat. Auf einer Polycarbonatplatte mit den Abmessungen von 200mm x 150mm werden 12 Sensorsubstratplatten aufgedruckt und aufdispensiert. Nach dem Fertigungsverfahren (Siebdruck und Dispensieren) wird die Polycarbonatplatte in die einzelnen Sensorsubstratplatten vereinzelt. Im Laufe der Arbeit wurden die aufgerückten Bahnen Carbon, Silber und Isolationsschichten abgeändert.

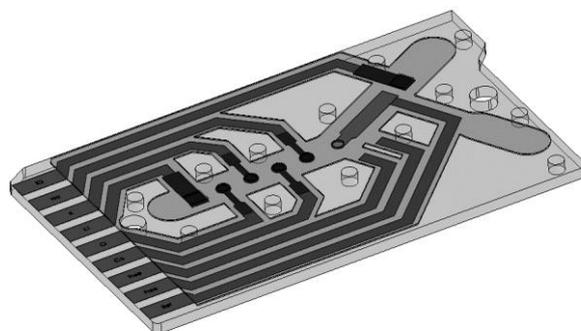


Abbildung 33: Sensorsubstratplatte mit SolidRef, Quelle: Eigene Darstellung

<sup>101</sup> vgl. Medicaexpo Onlinequelle [16.12.2018].

Die elektrischen Ableitungen aus Ag/AgCl, die Feststoffkontakte aus Carbon und die grüne Isolationsschicht werden mittels Siebdruck aufgedruckt, die eigentlichen Sensormembranen, welche aus einer Polymermatrix bestehen, werden aufdispensiert. Die siebgedruckten Leitungen bzw. Isolationsschichten haben eine Dicke im  $\mu\text{m}$  Bereich.

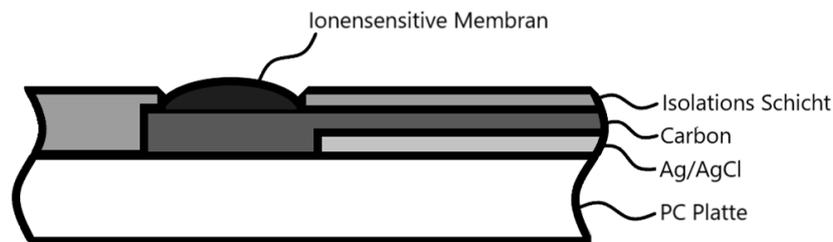


Abbildung 34: Aufbau ISE Sensorspot, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 34 zeigt den Schnitt durch einen der vier Sensorelektroden. Mittels der Ag/AgCl Schicht, welche eine Dicke von ca.  $5\mu\text{m}$  besitzt, werden gleichzeitig die elektrischen Kontakte für die potentiometrische Messung gedruckt. Der Carbon Layer wird in zwei Schritten aufgebracht, wobei die Primärschicht eine Dicke von ca.  $4\mu\text{m}$  aufweist und die Sekundärschicht eine Stärke von circa  $2\mu\text{m}$  besitzt. Die Isolationsschicht hat eine Dicke von ca.  $5\mu\text{m}$ . Nach dem Drucken werden die Schichten in einem Klimaofen gehärtet.

Nach dem Siebdruck werden die Ionensensitiven Membranen aufdispensiert. Dabei wird ein Volumen von ca. 100 Nanoliter aufdispensiert. Die Ionensensitive Membran hat einen Durchmesser von ca. 0,7mm und eine Dicke von ca.  $10\mu\text{m}$ . Die Festigkeit der Membranen ist eher ölig als fest, aus diesem Grund spricht man auch von Flüssigmembranen. Diese Membranen sind sehr lipophil wodurch es zu keiner Durchmischung mit der Probenflüssigkeit kommt.

### 5.1.1. Substratplatte mit KCl Referenz

In Abbildung 35 ist das Design der Substratplatte mit KCl Referenz Elektrode ersichtlich. Die beiden obersten Sensorspots sind zurzeit ohne Funktion und dienen als Platzhalter um später weitere Parameter mit dem Cartridge messen zu können.

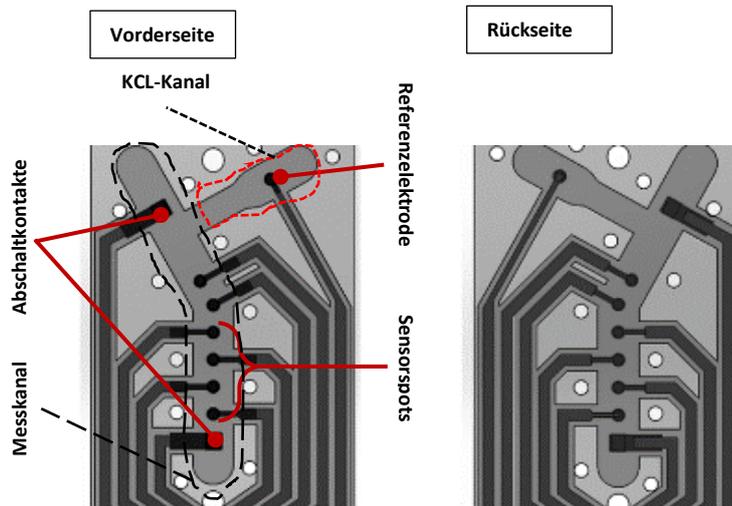


Abbildung 35: Sensorsubstratplatte mit KCl Ref, Quelle: Eigene Darstellung

An den beiden Abschaltkontakten wird eine Wechselspannung angelegt. Sobald sich das zu vermessende Flüssigkeitspaket über den beiden Kontakten befindet, kann dies über die Elektronik detektiert werden. Über diesen Vorgang wird das zu vermessende Flüssigkeitspaket mit einer Peristaltikpumpe im Sensor positioniert.

### 5.1.2. Substratplatte mit SolidRef

Die SolidRef Paste wird dabei ebenfalls mittels Siebdruck auf die Grundplatte aufgedruckt was ein zusätzliches Sieb bzw. einen zusätzlichen Druckschritt erfordert. Im Zuge der Entwicklung wurden unterschiedliche Sensorvarianten für die SolidRef entwickelt und getestet. Dabei wurden vor allem die Länge und die Position der SolidRef Elektrode und die darunter liegende Ag/AgCl Schicht variiert. Dies zeigte einen wesentlichen Einfluss auf das Anlauf-Verhalten und auf die Funktion (Standzeit, Drift des Potentials) der Referenzelektrode.

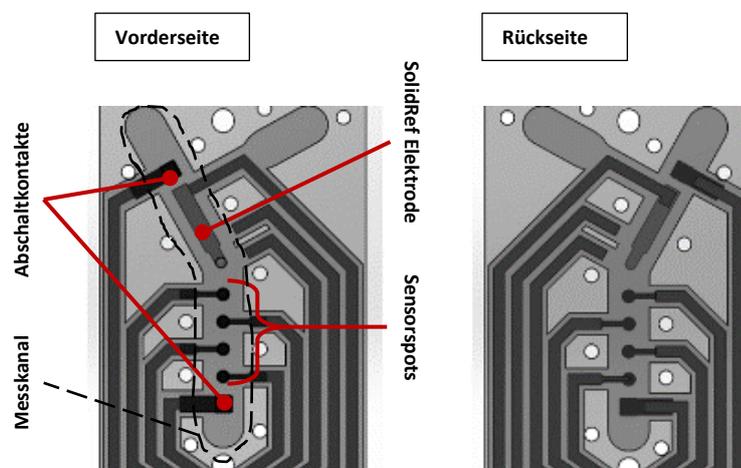


Abbildung 36: Sensorsubstratplatte mit SolidRef, Quelle: Eigene Darstellung

Insgesamt wurden Siebe für acht verschiedene Sensorvarianten ausgearbeitet und der entsprechenden Siebsatz dafür hergestellt. Ein Siebsatz besteht dabei auf den Sieben für Ag/AgCl, Carbon 1, Carbon 2, SolidRef Iso 1 und Iso 2.

Diese unterschiedlichen Sensor Varianten wurden auf der zurzeit vorgefrästen 200mm x 150mm PC-Platte positioniert (vgl. Abbildung 37). In weiterer Folge sollen Platten ohne Vorfräsung verwendet werden welche nach dem Siebdrucken und dem Dispensieren in die einzelnen Substratplatten vereinzelt werden.

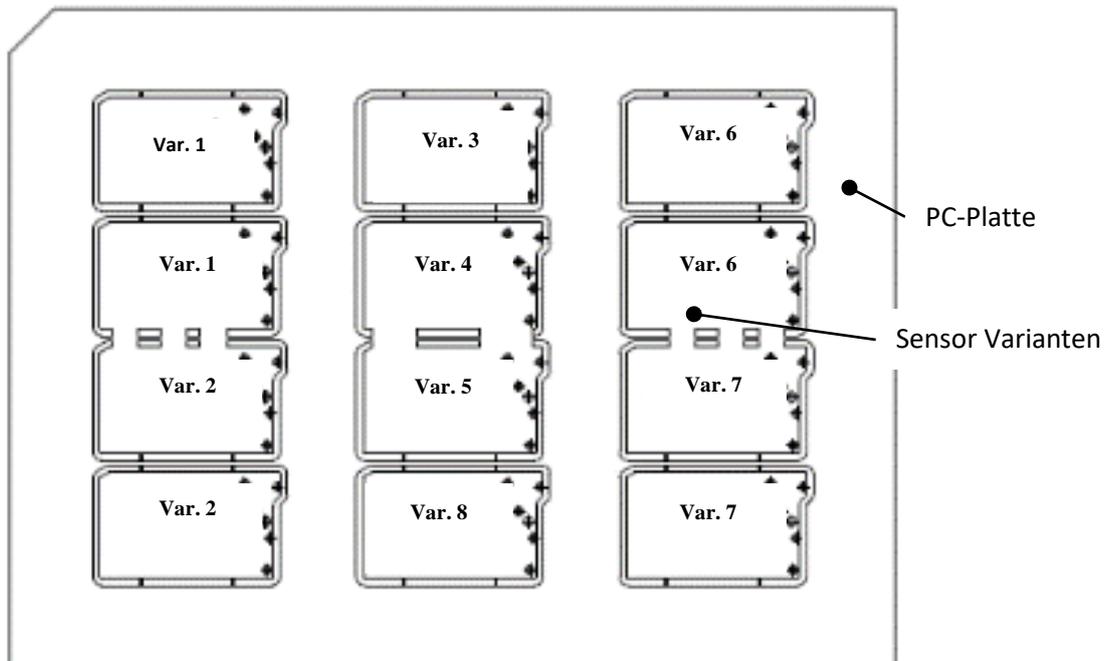


Abbildung 37: Aufteilung Sensorsubstrate, Quelle: Eigene Darstellung

## 5.2. 2K Cartridge Oberteil

Bei dem Sensorcartridge Oberteil handelt es sich um eine 2-Komponenten Spritzgussteil. Die Hartkomponente (in Abbildung 38 grau dargestellt) wird mit einer Weichkomponente (in Abbildung 38 braun dargestellt) umspritzt. Das Material für die Hartkomponente ist ein Polycarbonat mit der Bezeichnung Tarflon 1900.<sup>102</sup> Die Weichkomponente besteht aus einem thermoplastischer Elastomer (TPU) mit der Bezeichnung Elastollan C60 A15 HPM 000 von der Firma BASF.<sup>103</sup>

Das TPU für die Weichkomponente ist ein Kunststoff, der zur Gruppe der thermoplastischen Elastomere gehört. Dies sind Kunststoffe, welche sich bei Raumtemperatur wie klassische Elastomere verhalten, unter Wärmezufuhr jedoch plastisch verformt werden können (siehe Kapitel 4). Diese thermischen Eigenschaften ermöglichen die Verarbeitung mittels Spritzguss. Das Polycarbonat für die Hartkomponente ist ein thermoplastischer Kunststoff welcher eine hohe Festigkeit, Steifigkeit und Härte aufweist. Die Weichkomponente stellt die Dichtung zwischen Cartridge Oberteil und Sensorsubstratplatte und die Dichtung zur Fluidischen Ankopplung her. Die Dichtung zwischen dem Bauteil und der Substratplatte muss die Höhenunterschiede auf der Substratplatte, welche sich durch das Siebdrucken entstehen, ausgleichen können.

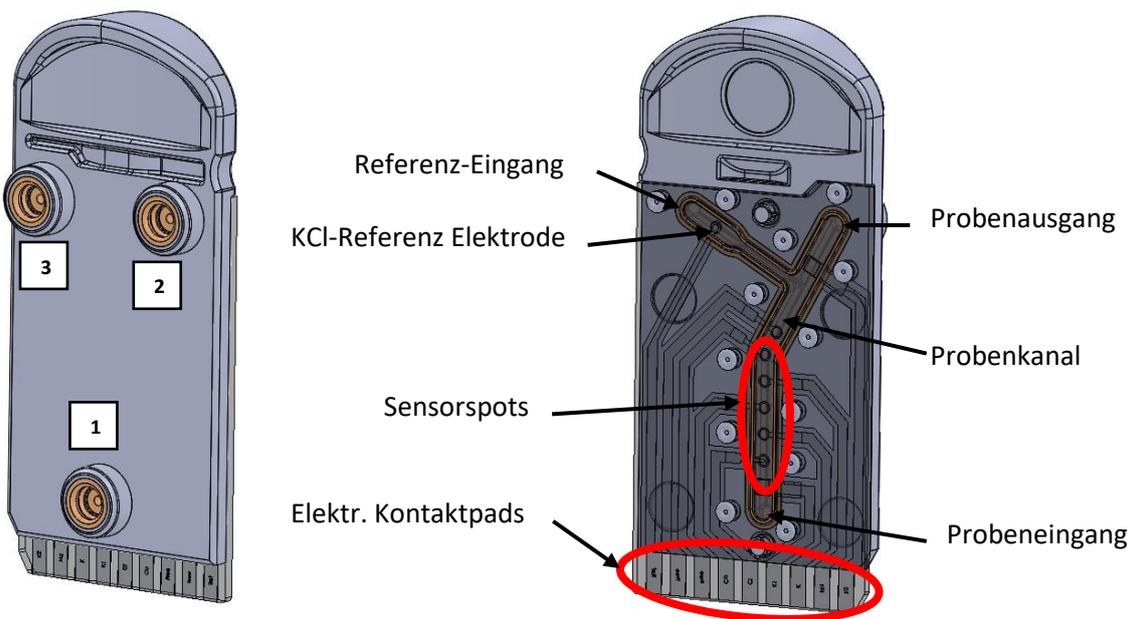


Abbildung 38: Sensorcartridge, Quelle: Eigene Darstellung

<sup>102</sup> vgl. Ltd Idemitsu Kosan Co (2008). S.1.

<sup>103</sup> vgl. BASF (2016). S.27.

### 5.3. Funktionsbeschreibung Sensorcartridge Liquid Ref.

Die beiden Bauteile Sensorsubstratplatte und Oberteil werden miteinander verpresst. Durch die Verpressung der Dichtung entsteht der Probenkanal der Sensorkassette. Ober und Unterteil werden mittels einer Vorrichtung heißverstemmt, wodurch eine formschlüssige Verbindung zwischen den beiden Bauteilen entsteht.

Das Sensorcartridge besitzt insgesamt drei Eingänge an der Oberseite. Der in Abbildung 38 mit „1“ bezeichnete Eingang ist der Proben- bzw. der Reagenzieneingang. Der mit „2“ bezeichnete Anschluss ist der Eingang für den Innenelektrolyten der Referenzelektrode. Als Innenelektrolyt wird in diesem Fall Kaliumchlorid (KCl) verwendet. Der mit „3“ bezeichnete Anschluss ist der Ausgang der beiden Flüssigkeiten.

Im Folgenden wird der Ablauf einer Messung beschrieben:

Über den Eingang „1“ wird die Probenflüssigkeit mittels einer Peristaltikpumpe angesaugt. Über die beiden Leitwertkontakte wird die Probe anschließend im Sensorcartridge positioniert. An diesen Leitwertkontakten liegt eine sinusförmige Wechselspannung. Nach der Positionierung wird das Magnetventil am Probeneingang geschlossen und es wird Kaliumchlorid über den Eingang „2“ angesaugt. Ist dieser Vorgang abgeschlossen kann die Messung gestartet werden.

Nach der Messung wird der Sensor gespült. Dabei werden in kurz getakteten Abständen Flüssigkeitspakete und Luftpakete durch den Messkanal geschickt. Das Spülen hat einen großen Einfluss auf die Messqualität des Sensors, da es durch Rückstände der vorhergegangenen Messung zu einem Übertragsverhalten zwischen den unterschiedlichen Messungen kommen kann.

## 5.4. Funktionsbeschreibung Sensorcartridge Solid-Ref.

Für die Variante des Solid-Ref Sensors wird der Referenzeingang/Referenzkanal nicht benötigt. Im derzeitigen Stand existiert jedoch allein die Spritzgussform für das Sensorcartridge mit KCl Ref. Aus diesem Grund wurde der Flüssigkeitskanal der Liquid-Ref. mit einem 2 Komponentenkleber verklebt. In diesem Fall ist der Eingang Nummer „2“ ohne Funktion.

Bei der Messung wird die Probe über den Sensor Eingang angesaugt und anschließend über den Leitwertkontakt positioniert.

Vorteil dieser Variante ist, dass ein zusätzliches Ansaugen der KCl Lösung entfällt. Dies bedeutet, dass im Gesamtgerät ein Magnetventil weniger verbaut werden muss, und zusätzlich die KCl Referenzlösung entfallen kann, was neben dem rein wirtschaftlichen Aspekt auch eine Verkürzung der Messdauer zur Folge hat.

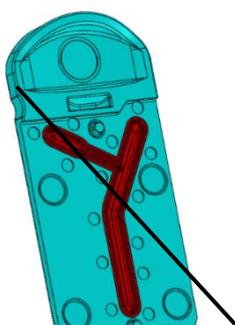
Nachteil dieser Variante ist jedoch, dass die Solid-Ref. vor der aller ersten Messung in Wasser eingeweicht werden muss.

## 5.5. Änderungen am 2K Oberteil

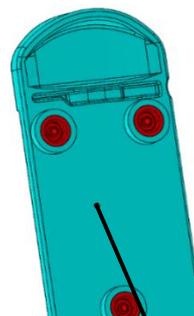
Für das Sensorcartridge Oberteil existierte bereits eine Prototypen Spritzgussform. Bei der von der Firma Payer produzierten Form handelt es sich um ein sogenanntes Mold Inserts. Mold Inserts werden verwendet um in der Prototypen-Phase Zeit und Kosten zu sparen. Diese Formeinsätze bestehen aus den zwei formgebenden Hälften, welche die Geometrie des späteren Bauteils besitzen und dem Auswerfer Paket. Diese Formeinsätze werden in eine Stammform eingesetzt und bilden zusammen das funktionsfähige Spritzgusswerkzeug.<sup>104</sup>

Für die Mold Inserts wurden Stammformen der Firma Meusburger verwendet. Die Mold Inserts sind nicht gehärtet, wodurch eine Nacharbeit noch möglich ist.

Da die Wirtschaftlichkeit in der Prototypenphase in der Erstellung einer voll funktionsfähigen 2K Spritzgusswerkzeuges nicht gegeben ist, wurden zwei Mold Inserts erstellt. Die erste Komponente aus Polycarbonat wird in der zugehörigen Mold gespritzt. Anschließend wird das gefertigte Bauteil per Hand in die Mold der Weichkomponente eingelegt und mit dem thermoplastischen Polyurethan umspritzt. Der Anspritzpunkt der Hartkomponente befindet sich seitlich am Bauteil und ist als Kaltkanal ausgeformt. Der Anspritzpunkt der Weichkomponente befindet sich an der Oberseite des Sensorcartridges Oberteils und ist als Heißkanal mit Nadelverschluss ausgeführt. Die Heißkanaldüse wird beheizt wodurch die Kunststoffschmelze darin nicht erstarrt. Bei Angussystemen mit Kaltkanal fließen Teile des Materials nicht in das Bauteil ein und müssen nach dem Spritzvorgang von diesem getrennt werden. Durch die Heißkanaldüse mit Nadelverschluss entfällt dieses überschüssige Material und es kommt daher zur Einsparung beim Rohstoff.



Anspritzpunkt Hartkomponente



Anspritzpunkt Weichkomponente

Abbildung 39: Anspritzpunkte Cartridge, Quelle: Eigene Darstellung

<sup>104</sup> vgl. Meusburger, Onlinequelle [10.12.2018].

### 5.5.1. Probleme Spritzguss Sensorcartridge

Bei den bestehenden beiden Spritzgussinserts gab es Probleme mit der Weichkomponente. Das Spritzen der Hartkomponente verlief fehlerfrei. Aufgrund der in weiterer Folge beschriebenen Probleme an der Weichkomponente kam es zu Undichtheiten direkt im Cartridge (Dichtlippe unvollständig) oder an der Ankopplung zwischen Cartridge und Aufnahmemodul.

An der Weichkomponente traten folgende Problemstellen auf:

- Dichtlippengeometrie: Ursprünglich war die Dichtlippe mit zwei scharfkantigen Geometrien ausgeformt. Diese scharfen Kanten können dazu führen, dass diese Bereiche beim Spritzguss nicht vollständig gefüllt werden, wodurch es zu Undichtigkeiten im Cartridge kommen kann. Die Dichtlippe hat eine Höhe von ca. 0,25mm.

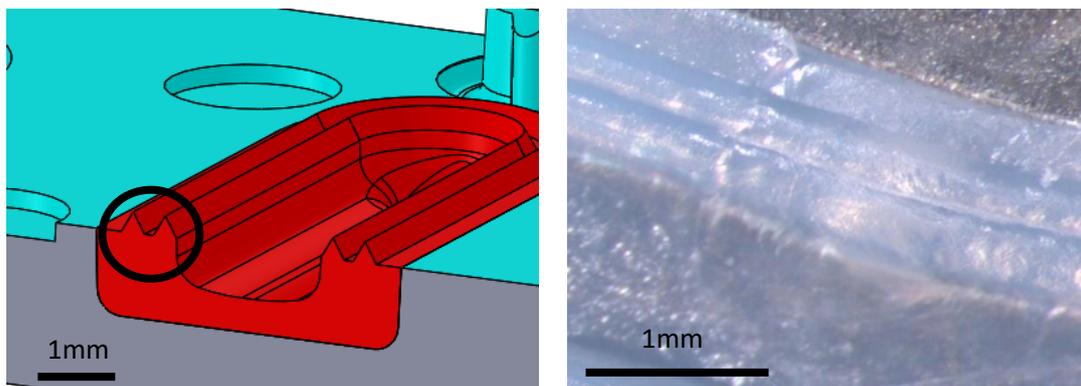


Abbildung 40: Doppeldichtlippe, Quelle: Eigene Darstellung

- Fluidische Anschlussgeometrien: Im Bereich der Fluidik Anschlüsse gab es eine zusätzliche Ringgeometrie welche die Aufgabe gehabt hätte den Kanal zwischen Sensorcartridge und dem weiterführenden Flüssigkeitskanal möglichst totvolumenfrei zu verbinden. An dieser Geometrie kam es zu Verformungen, welche wiederum zu Problemen mit der Dichtheit zwischen Cartridge und Gerät führte.

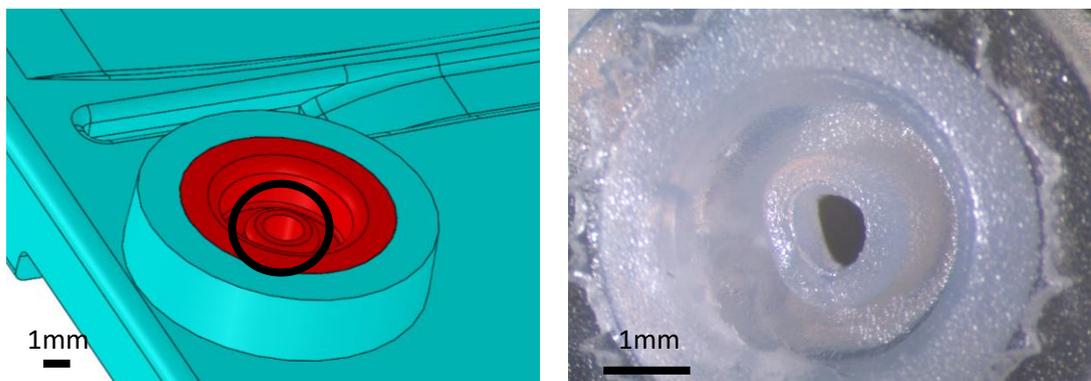


Abbildung 41: Anschlussgeometrie alt, Quelle: Eigene Darstellung

- Übergang zwischen KCl Kanal und Probenkanal: Auch dieser Kanal war ohne Rundung ausgeführt, was ebenfalls in einigen Fällen dazu führte, dass dieser Bereich nur unvollständig gefüllt wurde.

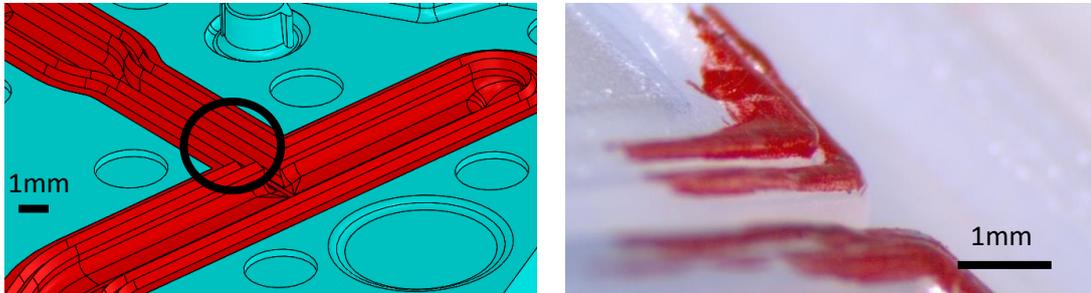


Abbildung 42: Übergang KCl-Kanal, Quelle: Eigene Darstellung

- Im Knick des Probenkanals: Dabei handelt es sich um den Bereich, welcher sich direkt auf der gegenüberliegenden Seite des Anspritzpunktes befindet. Hier kam es meist zu Materialeinfällen bzw. zum Verbrennen des Materials.

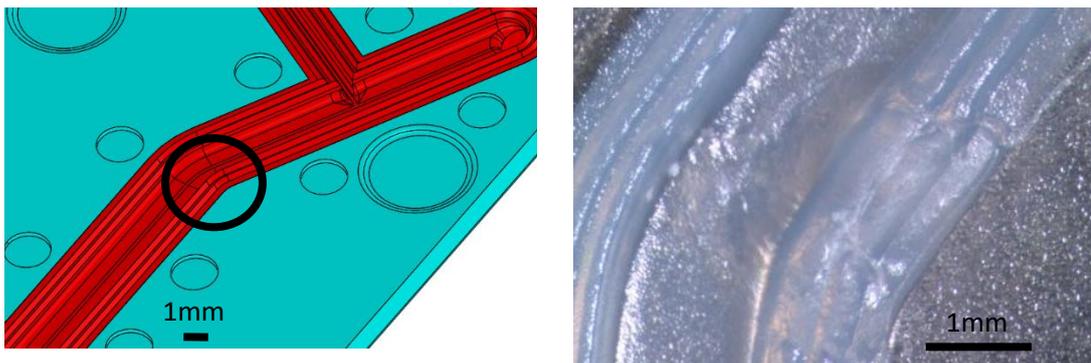


Abbildung 43: Knick Probenkanal, Quelle: Eigene Darstellung

- Eingang KCl Kanal: An dieser Stelle wurde in vielen Fällen die Geometrie nicht fehlerfrei ausgeformt und es kam zum Aufreißen des Materials. Dieser Bereich ist der letzte Bereich welcher vom Material gefüllt wird, wodurch ein Entlüftungsproblem als mögliche Ursache identifiziert wurde.

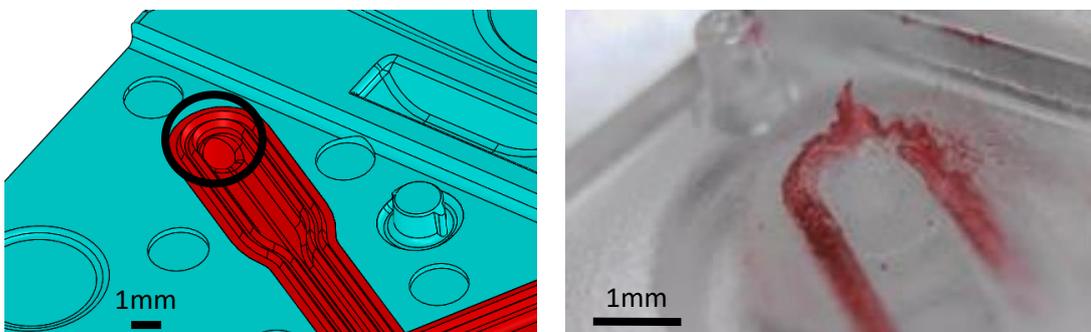


Abbildung 44: Eingang KCl Kanal, Quelle: Eigene Darstellung

Aufgrund der eben erläuterten Probleme wurden einige Änderungen am Sensorcartridge vorgenommen. Diese Änderungen wurden von der Firma Payer an den bestehenden Mold Inserts vorgenommen. Modifizierungen wurden sowohl an dem Mold Insert der Hartkomponente, als auch am Mold Insert der Weichkomponente vorgenommen.

Grundsätzlich können Änderungen am Spritzgusswerkzeug, welche zu einer Materialzugabe am fertigen Bauteil führe, mit geringen Aufwand durchgeführt werde. Dabei wird das Werkzeug nachgefräst oder nacherodiert. Bei Änderungen, welche zu einer Abnahme des Materials am fertigen Bauteil führen, muss am Spritzgusswerkzeug zuerst aufgeschweißt werden um anschließend die gewünschte Kontur nachzuarbeiten werden.

### 5.5.2. Änderungen Hartkomponente

- Erhöhung der Verstemmdome: Ursprünglich war geplant die Vernietung der Verstemmdome in einem Sackloch in der Sensorsubstratplatte zu versenken. Um jedoch die Fertigbarkeit der Sensorplatten zu vereinfachen wird auf dieses Sackloch verzichtet. Dadurch ist es z.B. möglich die Substratplatten zu stanzen oder Laser- bzw. Wasserstrahl zu schneiden. Die Verstemmdome wurden um insgesamt 0,35mm erhöht (vgl. Abbildung 45).
- Erhöhung der Anschlussgeometrien: Um den Bereich zu vergrößern in dem das Sensorcartridge Fluidische kontaktiert wird, wurden auch diese Geometrie um 0,5mm erhöht (vgl. Abbildung 45). Weiters wurde an dieser Geometrie eine Fase (0,5x45°) hinzugefügt um eine Zusammenfinder der Anschlüsse zwischen Gerät und Cartridge zu erleichtern.

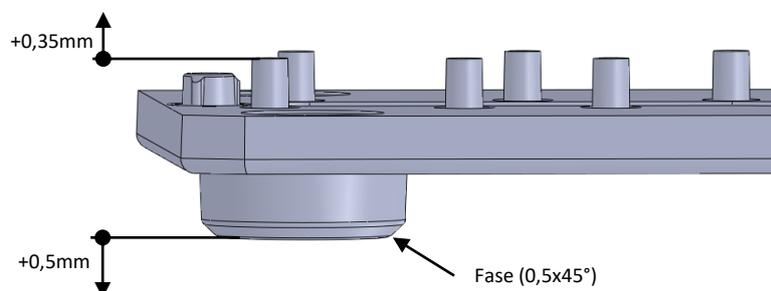


Abbildung 45: Verstemmdome, Quelle: Eigene Darstellung

### 5.5.3. Änderungen Weichkomponente

An der Weichkomponenten Mold wurde versucht, die Problemstellen welche in den vorherigen Bemusterungsdurchgängen Probleme verursachten, zu verbessern.

Folgende Änderungen wurden durchgeführt:

- Dichtlippe: Die Doppeldichtlippe wurde in eine Einfachdichtlippe abgeändert. Durch die vergrößerte Geometrie wird eine bessere Spritzbarkeit dieser erwartet. Die scharfen Kanten an der Oberseite der Dichtlippe wurden ebenfalls entfernt.

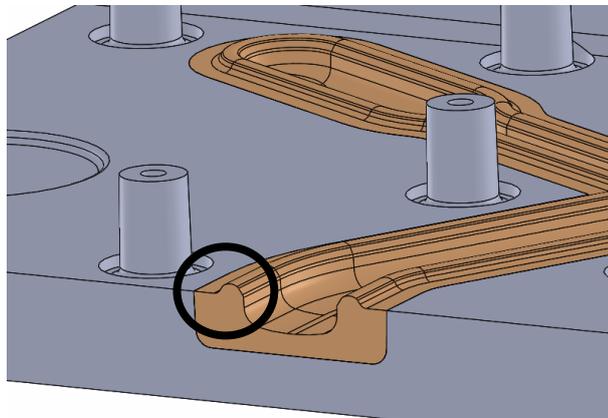


Abbildung 46: Einfachlippe, Quelle: Eigene Darstellung

- Übergang Probenkanal-KCl Kanal: Hier wurde im Kanal Radien eingefügt um die Spritzbarkeit zu verbessern.

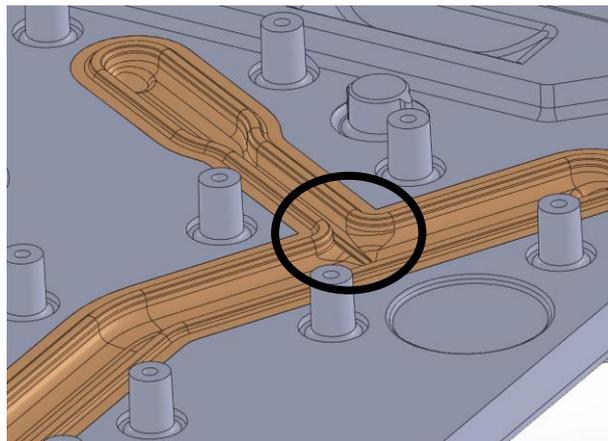


Abbildung 47: Übergang Probenkanal KCl Kanal, Quelle: Eigene Darstellung

- Fluidische Ankopplung: Das Dichtungskonzept zwischen Gerät und Sensorcartridge wurde neugestaltet. Ursprünglich war eine Kombination aus axialer und radialer Dichtung geplant. Bei diesem Dichtkonzept waren jedoch die Anschlusspunkte im Gerät fixiert, d.h. unbeweglich, welches zu einem Toleranzen Problem führte. Das Problem hierbei war das keine Längentoleranzen am Cartridge und den Anschlusspunkten im Geräte, welche aufgrund des Fertigungsprozesses auftreten, ausgeglichen werden konnten. Aus diesem Grund wurde das Dichtkonzept abgeändert, wodurch eine Änderung an der Weichkomponente notwendig wurde. Auf das Dichtkonzept zwischen Sensorcartridge und Gerät wird in den folgenden Kapiteln noch weiter eingegangen. Im Cartridge wurde eine O-Ring ähnliche Geometrie gewählt. Diese Geometrie besitzt einen Hinterschnitt von 0,2mm was ein Zwangsentformung des Bauteils erfordert. Da diese Hinterschnitt Geometrie Düsenseitig auf der Spritzgussmaschine liegt (vgl. Abbildung 48) und das Bauteil hier im Werkzeug hängen bleibt, kann auch das vorhandene Auswerferpaket welches sich auf der Düsengegenseite befindet nicht verwendet werden. Aus diesem Grund muss das Bauteil aus dem jetzigen Werkzeug manuell entnommen werden.

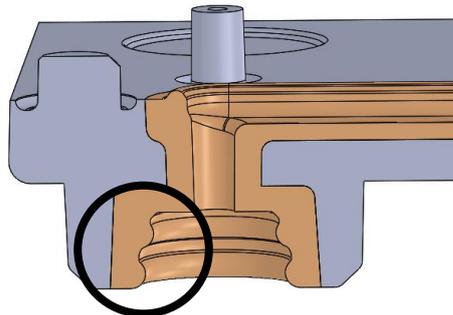


Abbildung 48: Fluidische Ankopplung Sensorcartridges, Quelle: Eigene Darstellung

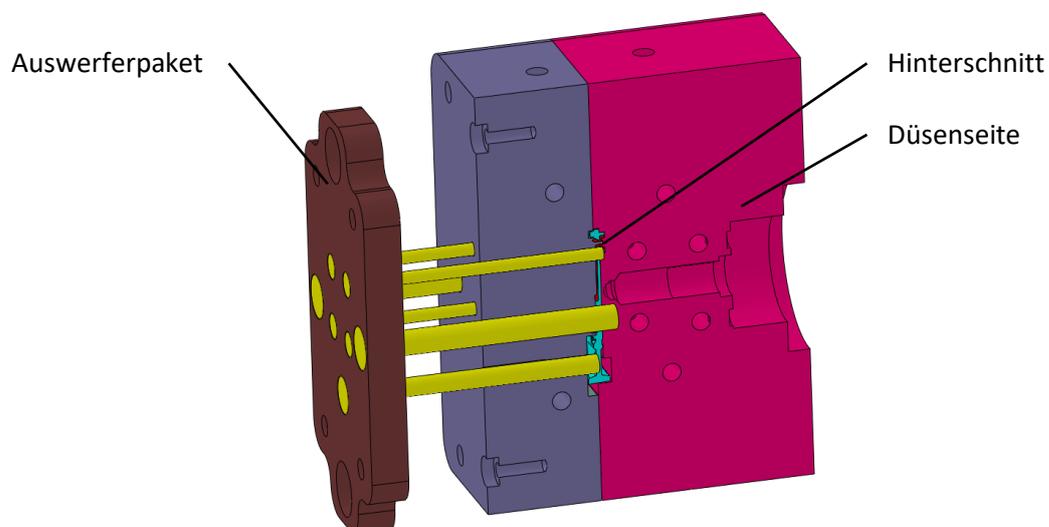


Abbildung 49: Formeinsatz alt Hinterschnitt, Quelle: Eigene Darstellung

- Verlegung des Anspritzpunktes: Ebenfalls war ein Verlegen des Anspritzpunktes geplant damit sich dieser nicht mehr direkt gegenüber der Dichtlippe befindet. Die Weichkomponente sollte hierbei über einen kurzen Angusskanal angespritzt werden. Dies hätte jedoch einen komplett neuen Mold Einsatz bedingt. Weiters wären weitere Änderungen (Aufschweißen und Nacharbeiten) an der Hartkomponenten Mold notwendig gewesen. Aufgrund der hohen Gesamtkosten dieser Änderungen wurde vorerst auf diesen Schritt verzichtet.

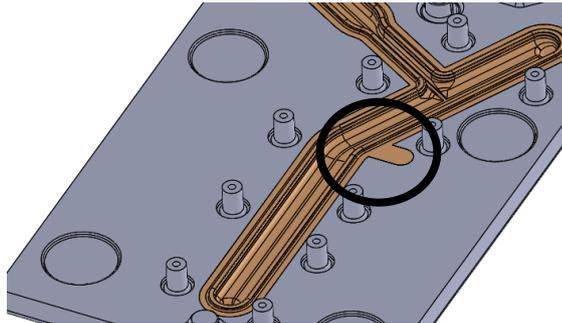


Abbildung 50: Verlegung Anspritzpunkt, Quelle: Eigene Darstellung

#### 5.5.4. Resultat Änderungen

Am 05.06.2018 wurde die erste Bemusterung der Hartkomponente der überarbeiteten Sensorcartridge Moldeinsätze bei der Firma Payer in Reitereggen durchgeführt. Dabei wurde eine 50 Tonnen Spritzgussmaschine der Firma Engel verwendet. Als Aggregat wurde eine 30mm Schnecke mit drei Zonen verwendet. Die Bemusterung der Weichkomponente wurde am 08.06.2018 durchgeführt.

Die Bemusterung der Hartkomponente verlief ohne Probleme und es wurden ca. 500 Bauteile gespritzt.

Bei der Bemusterung der Weichkomponente traten weitere Probleme auf woraufhin die Bemusterung nach ca. 50 Bauteilen abgebrochen wurde. Dabei traten an drei Stellen folgende Fehler auf:

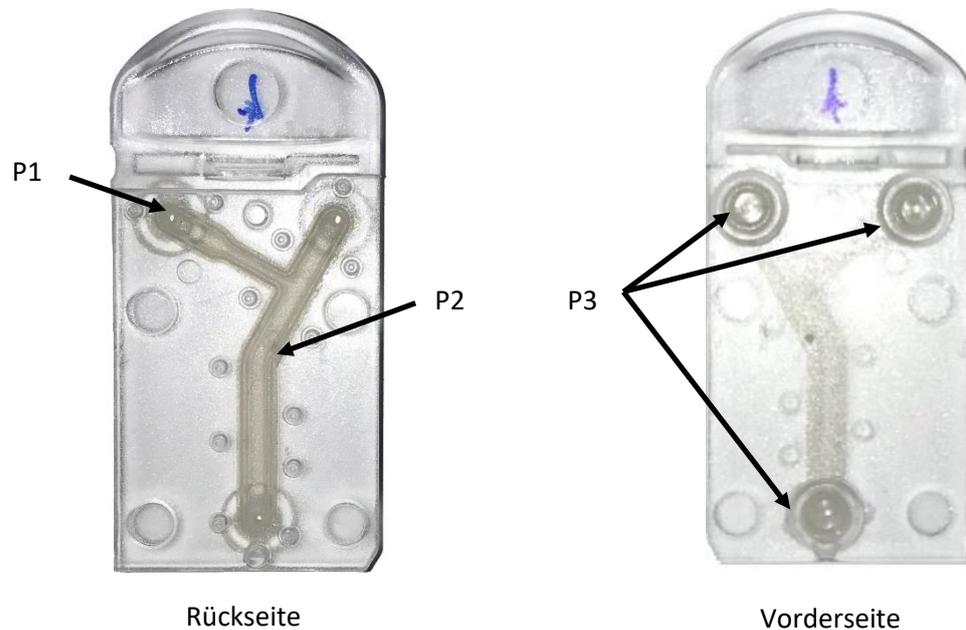


Abbildung 51: Fehler 1. Bemusterung, Quelle: Eigene Darstellung

- P1 ist der Eingang des KCl Referenzkanals. Hier kam es zum Ausreißen oder zum unvollständigen Ausfüllen der Dichtlippe. Hierbei handelt es sich um den letzten Bereich welcher während des Spritzgussprozesses mit Schmelze gefüllt wird
- P3 liegt direkt gegenüber dem Anspritzpunkt. An dieser Stelle kam es zum Einfallen oder Verbrennen des Materials
- P3 sind die drei Anschlusspunkte des Sensorcartridges. An diesen Stellen traten zum Teil Lufteinschlüsse im Material auf. Dieser Fehler ist als am unkritischsten zu betrachten.

Tabelle 1: 1. Bemusterung

Teil	Fehlerstelle	Teil	Fehlerstelle	Teil	Fehlerstelle
1a	P1	1b	P1	1c	P3
2a	<b>OK</b>	2b	P1, P3	2c	P1, P2, P3
3a	P1	3b	P3	3c	P2
4a	P2	4b	P1	4c	P3
5a	<b>OK</b>	5b	P1, P3	5c	P1, P2
6a	P1			6c	P3, P4
7a	P2, P3			7c	P1, P3
8a	P1			8c	<b>OK</b>
9a	P2			9c	P2
10a	P2			10c	P1, P2
11a	P1			11c	P1, P2
12a	P2			12c	P1, P2
15a	P1, P2, P3				
16a	P1				
18a	P1, P2				
19a	P1				
20a	S1				
21a	S1, S2				

Zwischen den Bauteilreihen a, b und c welche in Tabelle 1 aufgelistet sind, wurden die Spritzgussparameter wie Schmelzentemperatur, Einspritzdruck, Nachdruck, etc. geändert. Aus der Zusammenfassung ist ersichtlich, dass aus den 38 Bauteilen nur drei Bauteile ohne Fehlstellen gefertigt werden konnten. Die Fehler traten an den unterschiedlichen Stellen zufällig auf.

Abbildung 52 zeigt detaillierte Aufnahmen an der Fehlerstelle P1. Da es sich hier um die letzte Stelle handelt welche von der Schmelze ausgefüllt wird könnte es sich hier um ein Entlüftungsproblem handeln. Die Luft wird in der Spritzgussform vor der Schmelze geschoben und muss an der letzten Stelle die Form verlassen.

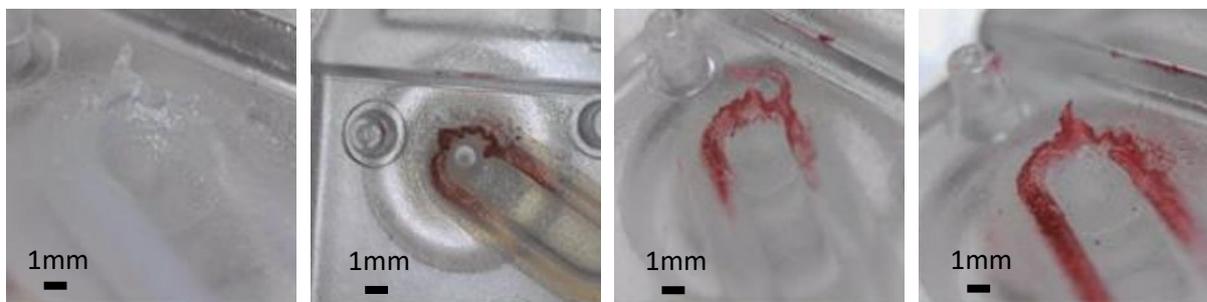


Abbildung 52: Probleme Sensorcartridge Stelle 1, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 53 zeigt die Probleme an Stelle P2 welche sich direkt gegenüber des Einspritzpunktes befindet. Dieses Problem ist vermutlich auf die Heißkanaldüse zurückzuführen. Wahrscheinlich wird

das Material nach der Heißkanaldüse verbrannt. Ein weiteres Problem könnte das Verschließen der Heißkanaldüse da dabei eine kleine Materialmenge nachgeschoben wird.

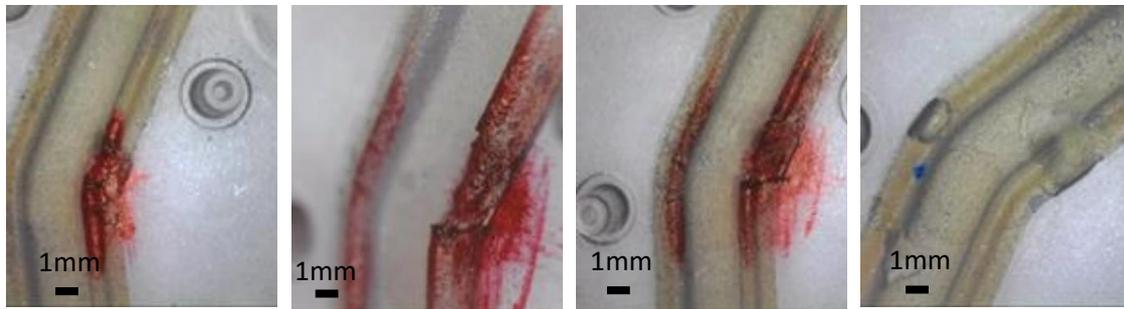


Abbildung 53: Probleme Sensorcartridge Stelle 2, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 54 zeigt die Probleme welche an Stelle P3 aufgetreten sind. Hierbei handelt es sich um Lufteinschlüsse.

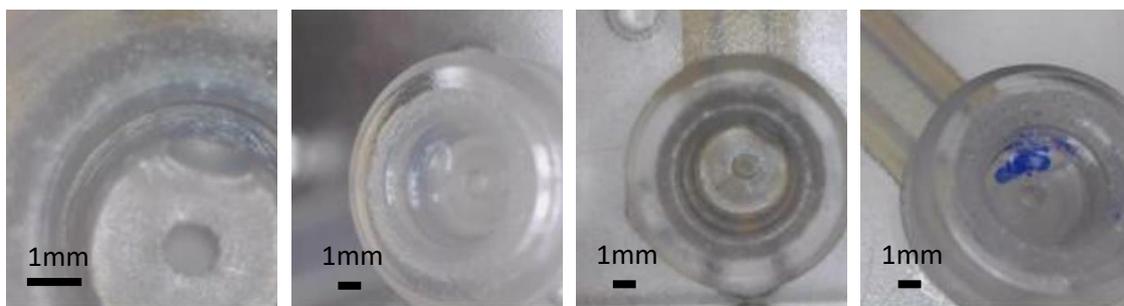


Abbildung 54: Probleme Sensorcartridge Stelle 3, Quelle: Eigene Darstellung

Ein weiteres Problem ist die Oberflächenqualität der Weichkomponente. Beim Erodieren des Moldeinsatzes wurde eine rauere Stufe gewählt, was sich in weiterer Folge auch auf das Spritzgussbauteil auswirkt. Diese erhöhte Rauigkeit mit einem Ra von ca.  $9\mu\text{m}$  kann sich auf die spätere Messgenauigkeit des Cartridges auswirken. Das Cartridge wird für bis zu 4000 Messungen verwendet, wobei dieses zwischen den Messungen mit Flüssigkeit gespült/gewaschen wird. In den Rauigkeiten des Messkanals könnten sich Verschmutzungen festsetzen, welche die darauffolgende Messung beeinflussen.

Allgemein wurde festgestellt, dass das Bauteil für die verwendete Spritzgussmaschine aufgrund folgender Punkte schlecht geeignet ist:

- Das Schussgewicht der Weichkomponente liegt bei ca. 0,25g. Dadurch kommt es zu einer sehr hohen Verweilzeit des aufgeheizten Materials in der Spritzgusschnecke.
- Die Parameter wie Spritzdruck und Nachdruck liegen am untersten Limit der Spritzgussmaschine wodurch wenig Spiel zum Variieren dieser Parameter bleibt.

Während der Bemusterung wurde entsprechend Abbildung 55 vorgegangen. Diese zeigt einen Überblick über die zu variierenden Spitzgussparameter und deren Einfluss auf das Bauteil.

Verarbeitungsfehler und mögliche Ursachen														
	Masse-temperatur	Werkzeug-temperatur	Ein-spritz-ge-schwin-digkeit	Nach-druck/-zeit	Stau-druck	Spritz-volu-men/Masse-polster	Zu-halte-kraft	Kühl-zeit	Ent-lü-tung	Feuch-tig-keits-gehalt	Fremd-mate-rial	An-schnitt-größe	Gleit-mittel	Ver-zeit
Verunreinigungen											▼			▼
Blasen/Lunker	▼		▼	▲	▲				▲	▼		▲	▼	▼
Verbrennungen	●	●	▼						▲	▼		▲		
Verzug/Schwindung	●	●	●	●				●				▲		
Fließnahtbildung	●	●	●						▲	▼		▲		
Glanz-/Mattstellen	●	●	●	●					▲	▼		▲	●	
überspritzte Teile	▼	▼	▼	●			▲			▼		▲		
ungefüllte Teile	▲	▲	▲	▲		▲			▲			▲		
Einfallstellen	●	●	●	▲		▲			▲	▼		▲		
Schlieren	▼	●	●						▲	▼		▲	▼	▼
Entformung	●	●		●				●		▼		▲	▲	
Materialabbau	▼		▼		▼					▼		▲		▼

▲ Erhöhen zur Lösung des Problems  
▼ Reduzieren zur Lösung des Problems  
● Erhöhen oder Reduzieren zur Lösung des Problems

Abbildung 55: Elastollan Verarbeitung<sup>105</sup>

Circa vier Wochen später wurde eine weitere Bemusterung gestartet, dabei konnte jedoch keine weitere Verbesserung der Bauteile erzielt werden. Daraufhin wurde ein neuer Partner für den Spritzguss gesucht. Nach Gesprächen mit unterschiedlichen Spritzgussanbietern wurde die Firma *E.L.T. Kunststofftechnik & Werkzeugbau GmbH* mit Standort in Friedberg gewählt. Der Grund für die Entscheidung für E.L.T. war deren kurze Lieferzeit und Preisgestaltung.

## 5.6. Neuer Formeinsatz

Aufgrund der vorangegangenen Probleme mit der Weichkomponenten wurde vereinbart einen neuen Moldeinsatz für die diese zu erstellen. Dabei wurden folgende Punkte berücksichtigt und verbessert:

- **Verzicht auf die Heißkanaldüse:** Durch den Kaltkanal wird das Schussgewicht erhöht und die Kosten für den Formeinsatz gesenkt. Die Materialkosten für den entstehenden überschüssigen Anguss sind im aktuellen Projektstadium noch nicht relevant.
- **Verlegung des Anspritzpunktes:** Dieser befindet sich nicht mehr direkt gegenüber der Dichtlippe, wodurch Fehlerstellen in diesem Bereich vermieden werden sollen.
- **Oberflächenqualität:** Um eine bessere Oberfläche im Messkanal zu erreichen wird der Moldeinsatz gefräst und nicht erodiert.

<sup>105</sup> vgl. BASF (2011). S.15.

Auch am Hartkomponenten Moldeinsatz wurden Änderungen vorgenommen. Um die Fertigbarkeit der Sensorsubstratplatte zu verbessern wurde die obere Kante am Spritzgussteil verschoben. Dadurch ist ein größerer Abstand zwischen den Verstemmlöchern und der Bauteilkante möglich, was das Erstellen eines Stanzwerkzeuges zum Vereinzeln ermöglicht. Um diese Formänderung realisieren zu können muss zuerst Material auf die Form aufgeschweißt werden, welches dann in die entsprechende Form erodiert wird. Um den geänderten Anspritzpunkt der Weichkomponente realisieren zu können muss dieser auch in der Form der Hartkomponente aufgeschweißt werden.

Die Änderungen an der Hartkomponente und der Weichkomponente sind in Abbildung 56 ersichtlich.

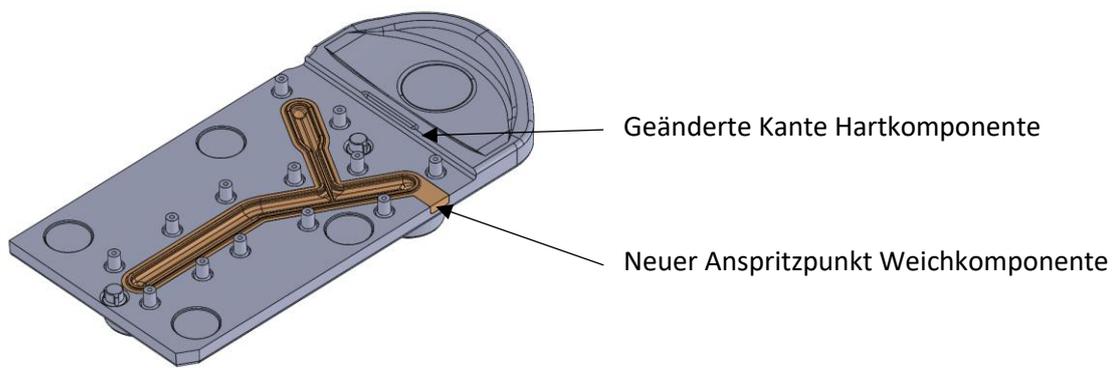


Abbildung 56: Änderungen Hart- und Weichkomponente, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 57 (links) zeigt den Formeinsatz inkl. Stammform der Firma Meusburger welcher direkt die Spritzgussmaschine eingespannt werden kann. Rechts ist nur der Formeinsatz inkl. Auswerferpaket, welcher mit Spannelementen in die Stammform gespannt wird, abgebildet. Für den Einsatz der Hartkomponente kann die gleiche Stammform verwendet werden.

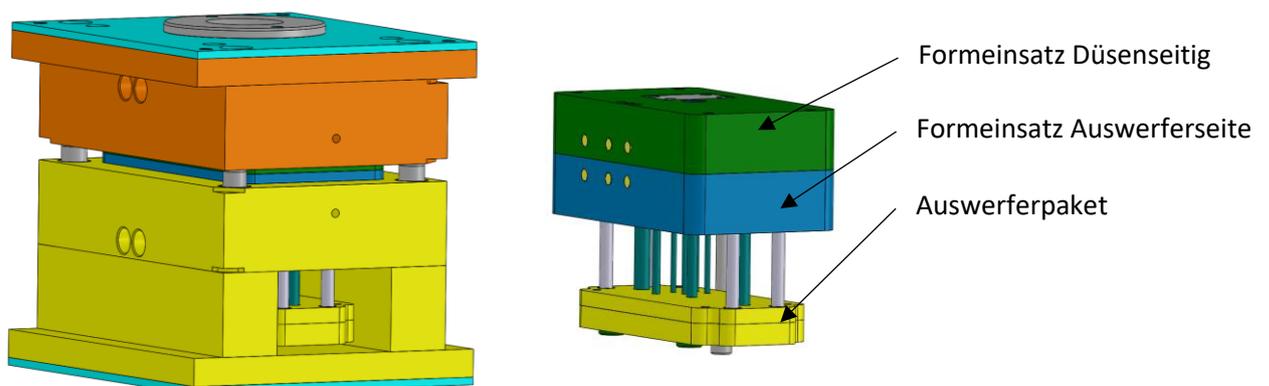


Abbildung 57: Weichkomponenteneinsatz inkl. Stammform, Quelle: Eigene Darstellung

### 5.6.1. Ergebnisse Bemusterung ELT

Der erste Bemusterungstermin bei ELT fand Mitte September statt, hierbei traten erneut Problem mit Luftblasen (vgl. Abbildung 58, links). An den drei Fluidischen Anschlusspunkten auf. Als weiteres Problem wurde eine Grat Bildung an den Anschlusspunkten festgestellt (vgl. Abbildung 58, rechts). Es handelt sich hierbei um die Trennebene der Spritzgussform.

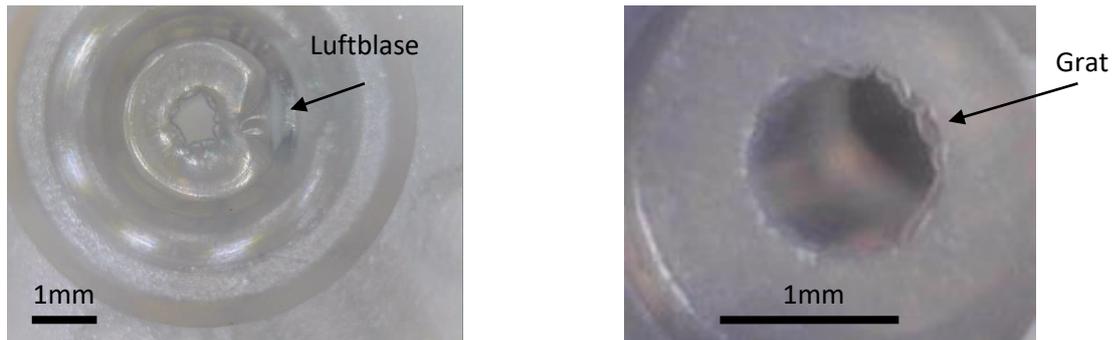


Abbildung 58: 1. Bemusterung ELT, Quelle: Eigene Darstellung

An der Oberfläche Weichkomponente konnten starke Verbesserungen gegenüber der alten Form festgestellt werden. Die Rauigkeit konnte von  $Ra=10\mu m$  auf einen  $Ra=3\mu m$  verbessert werden (vgl. Abbildung 59). Das Problem der unvollständig aus ausgespritzten Dichtlippe konnten ebenfalls eliminiert werden.

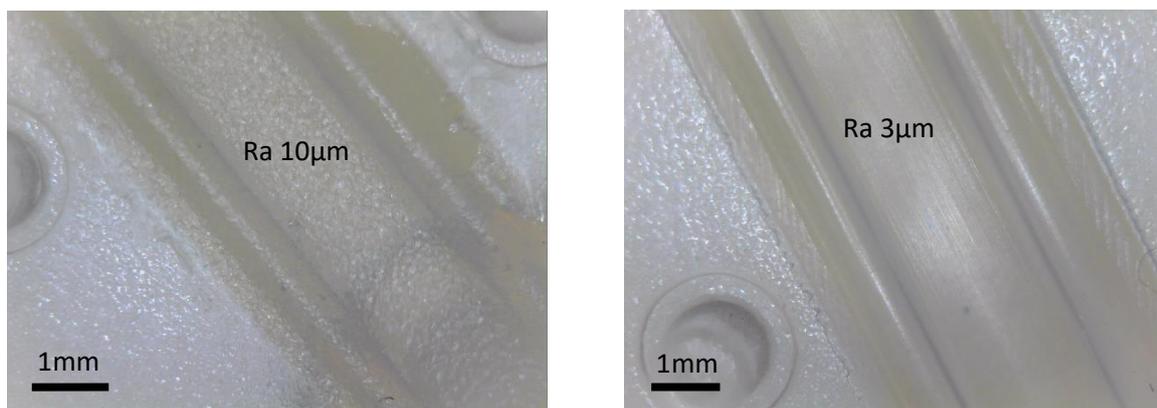


Abbildung 59: 1. Bemusterung ELT Oberfläche, Quelle: Eigene Darstellung

Nach einer weiteren Nacharbeit des Formeinsatzes wurde Mitte Oktober eine weitere Bemusterung durchgeführt. Hierbei konnten sehr gute Ergebnisse erzielt, sowohl die Blasenbildung, als auch die Gratbildung konnte verhindert werden. In weiterer Folge wurden 500 Stück des Sensorcartridges gefertigt werden, mit welchen die Sensorentwicklung weitergeführt werden kann.

## 5.7. Vermessung Sensorcartridge Oberteil

Um ein Gefühl für die Toleranzen am Spritzguss Oberteil zu erhalten wurden 20 Stück der 1. Bemusterung vermessen. Dazu wurde ein 3D Messmikroskop der Firma Alicona verwendet. Dabei wurden jeweils die Abstände zwischen den Anschlusspunkten an der Oberseite gemessen. Dieser Abstand und die darauf auftretenden Toleranzen sind in weiterer Folge für die fluidische Kontaktierung des Cartridges von großer Bedeutung.

Bei der Messung wurde das Koordinatensystem an der unteren linken Ecke auf Null gesetzt. Anschließend wurden jeweils vier Punkte und deren Koordinaten an den Außenkanten der zylindrischen Geometrie aufgenommen. Aus diesen vier Punkten lassen sich vier Kreismittelpunkte und dessen Koordinaten errechnen. Diese vier Kreismittelpunkte wurden gemittelt und daraus deren Abstand errechnet. Für die Funktion der Anschlusspunkte ist nur der direkte Abstand zwischen den Punkten relevant.

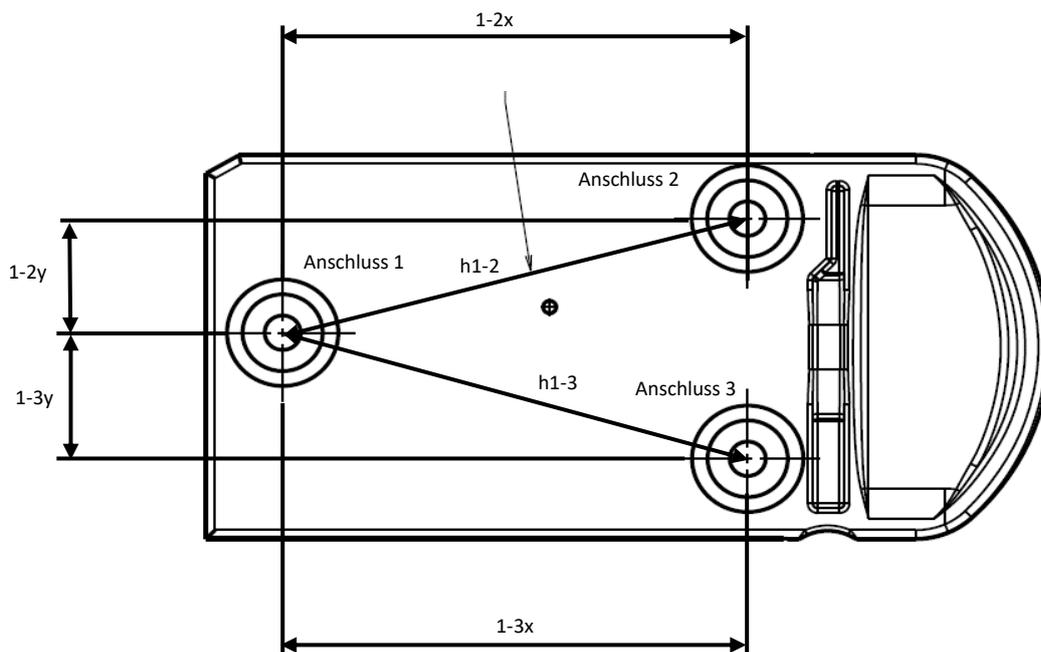


Abbildung 60: Vermessung Sensorcartridge, Quelle: Eigene Darstellung

Anschließend wurde, wie im 1. Kapitel Statistik beschrieben der Mittelwert, die Standardabweichung und der Abstand zum theoretischen Wert der Anschlusspunkte ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Allgemein liegen die Werte Standardabweichung in einem für den Spritzguss zu erwarteten Bereich und liefert so einen stabilen Prozess. Jedoch zeigt sich, dass der Mittelwert nach unten verschoben ist, was bedeutet, dass alle Bauteile ca. 0,1mm kleiner sind als erwartet.

Tabelle 2: Vermessung 2K Oberteile

	<b>h1-2</b>	<b>h1-3</b>	<b>h2-3</b>
<b>Sollwert [mm]</b>	29,321	29,548	15,340
<b>Mittelwert gemessen [mm]</b>	29,222	29,468	15,296
<b>Absolute Abweichung vom Sollwert [mm]</b>	-0,098	-0,080	-0,044
<b>Standardabweichung [mm]</b>	0,014	0,013	0,009

## 5.8. Langzeit Dichtheits-Test Cartridge

Um das Materialverhalten der Weichkomponente zu evaluieren wurde ein Dichtheitstest des Cartridges durchgeführt. Dazu wurde ein dichtes Cartridge der ersten Bemusterung verwendet. Ziel der Untersuchung war das Kriechverhalten der Weichkomponente beurteilen zu können. Durch die ständige Druckbelastung beginnt die Dichtung zu kriechen, was zu einem Spannungsabbau in dieser führt. Der Spannungsabbau wiederum führt zu einem verringern der Dichtkraft zwischen Cartridge-Oberteil und Sensorsubstratplatte. Um den Vorgang des Kriechens zu beschleunigen, soll das Cartridge bei einer erhöhten Temperatur von 50°C gelagert.

### 5.8.1. Aufbau

Um eine Aussage über die Dichtheit zu erhalten wurde eine Dichtheits-Vorrichtung gebaut. Der Aufbau des Dichtheitstests ist in Abbildung 61 beschrieben. Über den Cartridge Eingang wird mittels einer Peristaltikpumpe Luft aus diesem gesaugt, die beiden Cartridgeausgänge sind mittels eines Schlauchs kurzgeschlossen. Über einen digitalen Drucksensor wird der Druck im System gemessen. Sobald ein definierter Unterdruck erreicht wird, schließt das Magnetventil „Pinch Valve“ den Schlauch. Nun wird die Leckrate (mbar/s) gemessen. Wird eine vorab definierte Leckrate überschritten, gilt das Cartridge als undicht.

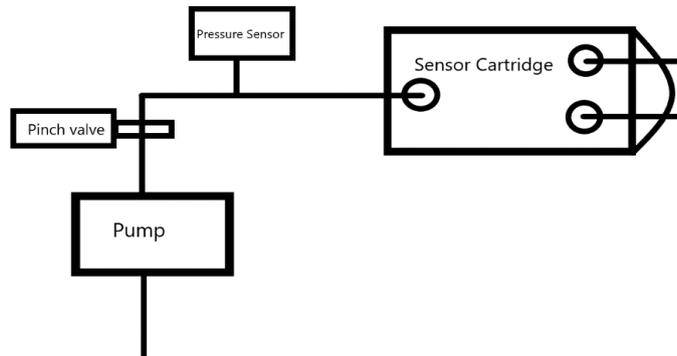


Abbildung 61: Prinzip Dichtheitstest, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 62 zeigt den fertiggestellten Aufbau des Dichtheitstests, inkl. Peristaltik Pumpe, Magnetventilen, Drucksensor und Messelektronik. Dieser wurde mit einem Cartridge Connector aufgebaut welcher in Kapitel 6.1 beschrieben wird.

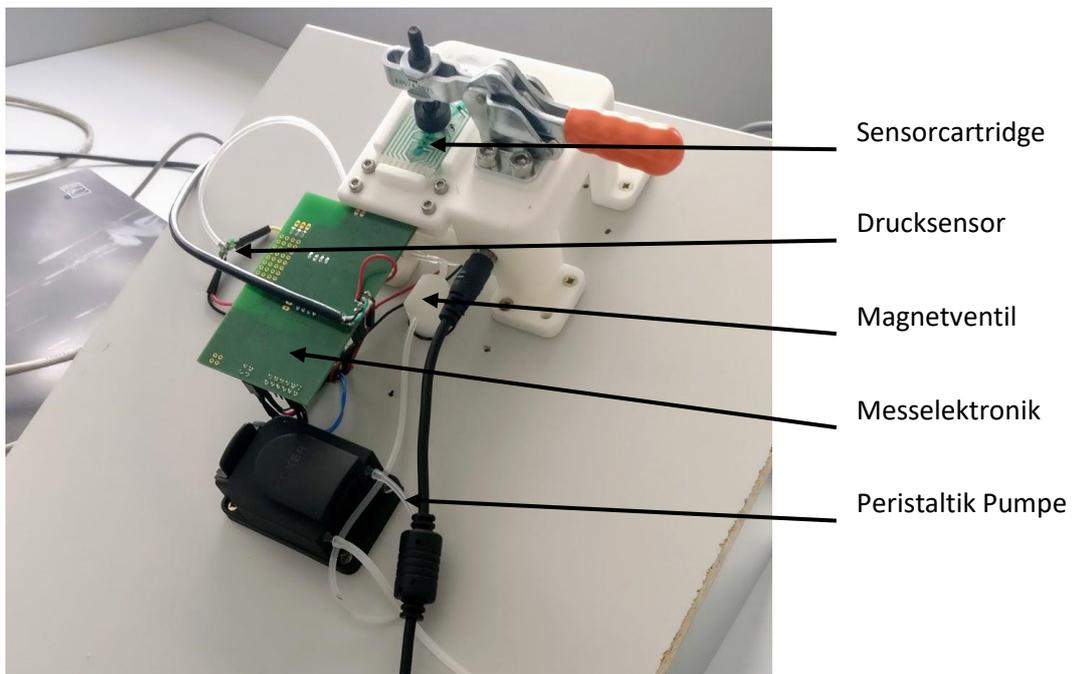


Abbildung 62: Aufbau Dichtheitstest, Quelle: Eigene Darstellung

## 6. Aufnahmemodul Sensorcartridge

Um mit dem Sensorcartridge messen zu können mussten Konzepte für eine entsprechende Vorrichtung, welche dieses aufnimmt erstellt werden. Dabei muss die Aufnahmevorrichtung folgende Funktionen erfüllen:

- **Elektrische Kontaktierung des Sensorcartridges:** Die siebgedruckten Kontaktpads an der Unterseite der Substratplatte müssen kontaktiert werden. Die gedruckte Schicht darf dabei nicht zerkratzt oder beschädigt werden. Insgesamt müssen neun Pads kontaktiert werden.
- **Fluidische Kontaktierung des Sensorcartridges:** Die drei Anschlüsse an der Oberseite des 2-Komponenten Oberteils müssen geeignet kontaktiert werden. An diesen Stellen darf es zu keinen Undichtigkeiten zwischen Aufnahmemodul und Sensorcartridge kommen. Diese Kontaktierung muss die am Cartridge und am Aufnahmemodul auftretenden Fertigungstoleranzen ausgleichen können. Die Fertigungstoleranzen auf das Spritzgussteil wurden im Kapitel 5.6.1 beschrieben.
- **Fixierung des Sensorcartridges in der Arbeitsposition:** Sobald der Sensor in das Aufnahmemodul eingesetzt wurde muss dieser in einer Arbeitsposition fixiert werden. Diese Fixierung darf sich nicht selbständig lösen.
- **Aufnahme der Messelektronikplatine:** Die Messelektronik sollte sich möglichst nahe an dem Sensorcartridge befinden um mögliche Störeinflüsse zu minimieren. Die Messelektronik sollte dabei nach Möglichkeit vor Verschmutzungen durch das Messmedium geschützt werden.

## 6.1. Cartridge Connector

Um schnell weitere Testreihen mit den Sensoren starten zu können wurde im Zuge der Arbeit ein einfaches Modul entwickelt, welches das Sensorcartridge aufnehmen kann. Dabei wurden folgende zusätzliche Anforderungen an das Modul gestellt:

- **Günstig und schnell fertigbar:** Für dieses Bauteil sollte keine eigene Spritzgussform notwendig sein
- **Robust:** Das Modul sollte möglichst robust aufgebaut sein um Fehler an diesem zu vermeiden, ästhetische Aspekte spielen für dieses Bauteil keine Rolle
- **Bedienbarkeit:** Die Bedienbarkeit des Moduls darf sich grundlegend vom finalen Endbenutzermodul unterscheiden
- **Seriennahe Funktionen:** Die Hauptfunktionen sollen ähnlich zum Serien Modul ausgeführt werden. Dazu zählen die fluidische und die elektrische Kontaktierung.

Um vor allem die erste Anforderung „günstig und schnell fertigbar“ zu erfüllen wurde das Bauteil mittels 3D Druck gefertigt. Die Bauteile wurden von der Firma *i.materialise*, mit Sitz in 3001 Leuven in Belgien, gefertigt. Dabei wurde als Grundmaterial Polyamid verwendet, welches über selektives Lasersintern verarbeitet wurde. Abbildung 63 zeigt einen gedruckten Cartridge Connector.



Abbildung 63: Cartridge Connector, Quelle: Eigene Darstellung

In weiterer Folge wird auf die Lösung der unterschiedlichen Anforderungen eingegangen.

### 6.1.1. Fluidische Kontaktierung

Die fluidische Kontaktierung stellte die größte Herausforderung, wobei folgende Funktionen und Anforderungen zu erfüllen waren:

- **Gleichzeitige Abdichtung von drei Anschlüssen:** Das Konzept des Sensorcartridges war bereits auf die Grundgeometrie festgelegt. Es gibt an der Oberseite des 2-Komponenten Cartridges drei Anschlusspunkte, welche sich in einer Ebene befinden. Die Schwierigkeit bei der Kontaktierung von drei Anschlusspunkten ist der Ausgleich der Fertigungstoleranzen (Längentoleranz).
- **Ausgleichen der Kriechneigung der Anschlusspunkte:** Die Dichtgeometrie am Sensorcartridge sollte über die bereits vorhandene Weichkomponente realisiert werden. Es sollte kein weiteres Bauteil (Beispielsweise eine O-Ring) notwendig werden.
- **Austauschbarkeit und Wartbarkeit der Anschlüsse/Dicht-Geometrien:** Bei dem Sensorcartridge handelt es sich um ein Consumable, welches in bestimmten Abständen getauscht wird. Dies bedeutet, dass diese Dichtelemente nie länger als 8 Wochen im Einsatz sind und somit regelmäßig getauscht werden. Jedoch soll auch die Möglichkeit bestehen die Dichtelemente im Modul in vorgegebenen Intervallen tauschen oder warten zu können.

Für die Abdichtung bestand die Möglichkeit eine axiale Dichtung, eine radiale Abdichtung oder eine Mischform aus beiden Abdichtungskonzepten auszuführen. Abbildung 64 zeigt die beiden Konzepte. Bei einer axialen Dichtung wird über eine äußere Kraft ein Dichtelement in axialer Richtung verspannt. Ein typisches Beispiel dafür sind zum Beispiel Flachdichtungen. Radiale Dichtungen werden vor allem bei zylindrischen Geometrien angewendet. Hierbei wird das Dichtelement normal zur Rotationsachse verspannt. Dabei das Dichtelement größer als der Dichtspalt wodurch das Dichtelement verspannt wird. Typischerweise werden für Radiale Dichtungen O-Ringe verwendet.

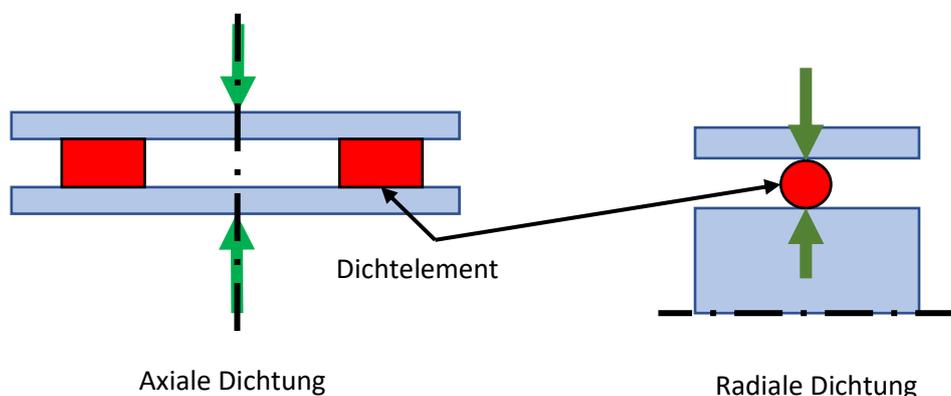


Abbildung 64: Axiale Dichtung Radiale Dichtung, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 65 (rechts) zeigt die drei Anschlusspunkte welche fluidisch kontaktiert werden müssen. Rechts ist die Dichtgeometrie im Cartridge gezeigt. Diese Besteht aus zwei O-Ring ähnlichen Geometrien zur Abdichtung des Gegenstücks.

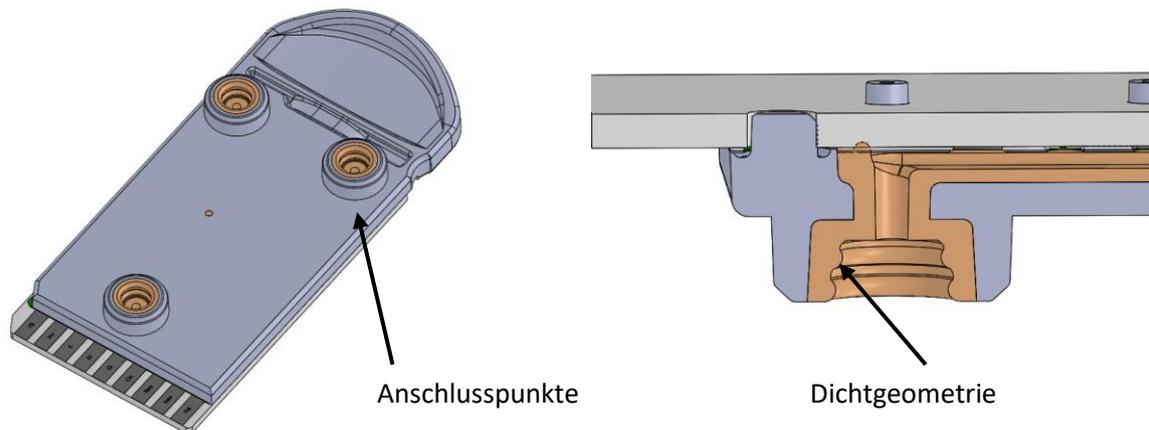


Abbildung 65: Anschlusspunkte Sensorcartridge, Quelle: Eigene Darstellung

Als Gegenstück für die Dichtung im Sensorcartridge wurde ein gedrehtes Bauteil entworfen. Abbildung 66 zeigt die Dichtkappe, rechts in den Abbildungen einen Schnitt durch das Bauteil. Die Dichtkappen werden axial auf die Dichtung im Cartridge gepresst und erstellen dadurch eine Kombination aus einer radialen und einer axialen Dichtung.

Diese wurde aus Aluminium gedreht. Die Dichtkappe besitzt einen Dichtkegel welcher zum Sensorcartridge abdichtet. Der Außenring wird benötigt um das Sensorcartridge und die Dichtkappe zueinander zu positionieren. Die Bohrung durch das Bauteil hat einen Durchmesser von 1mm, der Kegel hat an der oberen Spitze einen Durchmesser von 3,1mm und einen Öffnungswinkel von 25° (über beide Flanken). In die hintere Bohrung wird ein Anschlussstück eingeklebt über welches ein Schlauch angeschlossen wird. Die Dichtkappen werden über einen Sicherungsring in der Baugruppe fixiert.

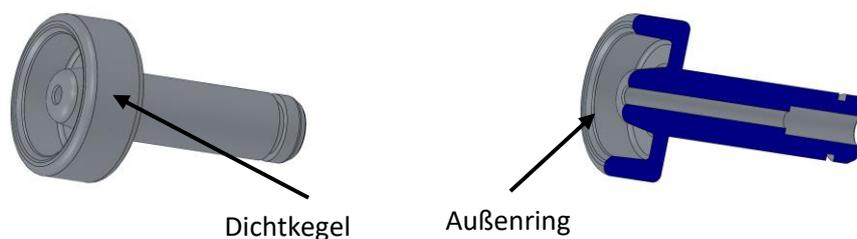


Abbildung 66: Dichtkappe, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 67 (links) zeigt wie der Dichtkegel der Anschlusskappen in die dafür vorgesehene Dichtung am Sensorcartridge eindringt. Rechts sind die gedrehten Aluminium Drehteile abgebildet

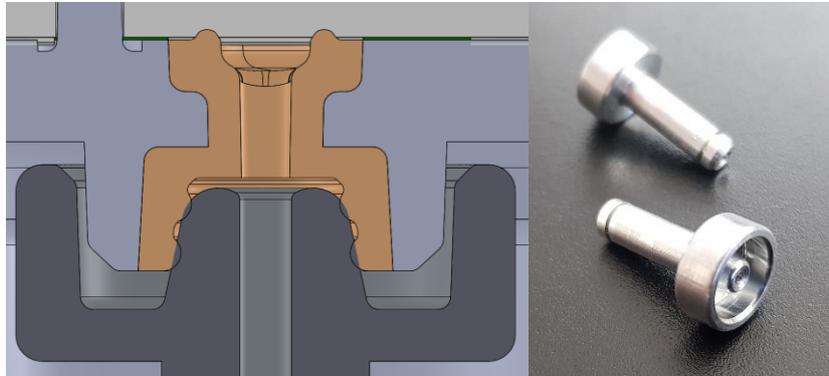
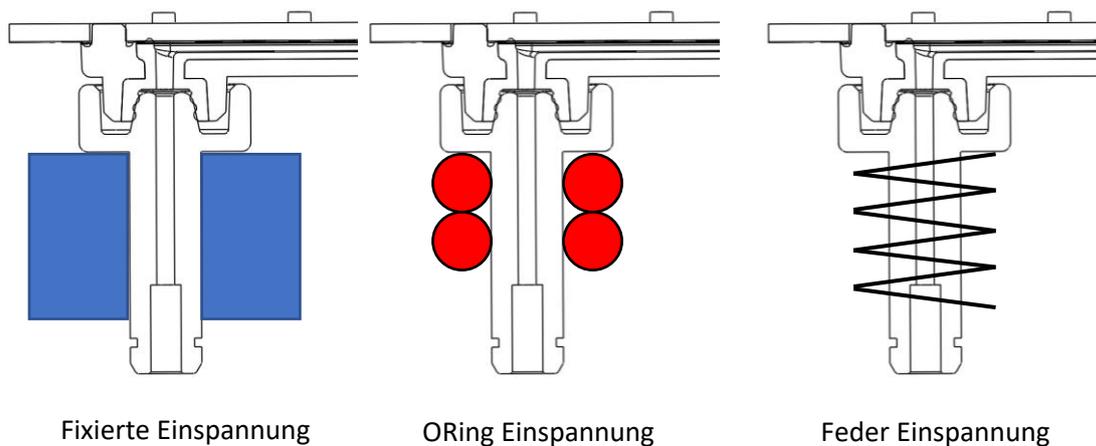


Abbildung 67: Abdichtung Dichtkegel, Quelle: Eigene Darstellung

Für das Einsetzen der Dichtkappen in das Modul wurden drei verschiedene Konzepte angedacht. Abbildung 68 zeigt unterschiedlichen Konzepte.



Fixierte Einspannung

ORing Einspannung

Feder Einspannung

Abbildung 68: Konzepte Abdichtung, Quelle: Eigene Darstellung

- **Konzept 1, fixierte Einspannung:** Das einfachste Konzept wäre die Anschlusskappen direkt im Modul zu verbauen.
  - Vorteile: Es wäre keine zusätzlichen Bauteile notwendig.
  - Nachteil: Die Anschlusskappen können keine Fertigungstoleranzen am Sensorcartridge oder am Modul ausgleichen. Der Ausgleich dieser wüsste von der Dichtung selbst aufgenommen werden. Die Überdeckung an der Dichtung müsste groß genug sein um diese ausgleichen zu können. Weiters müsste darauf geachtet werden, dass es aufgrund des Kriechens der Sensordichtung zu keinen Undichtheiten kommt.

- **Konzept 2, O-Ring Einspannung:** Dabei wird die Dichtkappe über zwei O-Ringe im Gehäuse platziert, welche dadurch leicht radial verpresst werden.
  - Vorteil: Durch Wahl möglichst, weicher O-Ringe können durch diese Fertigungstoleranzen am Sensorcartridge und am Modul ausgeglichen werden.
  - Nachteil: Es werden zwei zusätzliche Bauteile benötigt. Die O-Ringe können nur bedingt Fertigungstoleranzen ausgleichen. Auch das Kriechen der Weichkomponente ist problematisch
- **Konzept 3, Feder Einspannung:** Die Anschlusskappen werden über eine zylindrische Druckfeder vorgespannt.
  - Vorteil: Ohne eine fixe Einspannung am oberen Durchmesser können die Anschlusskappen kippen und Fertigungstoleranzen ausgleichen. Zusätzlich kann das Kriechen der Weichkomponente über die Vorspannung der Feder kompensiert werden.
  - Nachteil: Es wird ein zusätzliches Bauteil notwendig

Aufgrund der Problematik des Kriechens wurde das 3. Konzept gewählt. Aufgrund der losen Lagerung an der Oberseite können die Anschlussskappen leicht kippen (Abbildung 69, links) und dadurch die auftretenden Fertigungstoleranzen am Modul und am Sensorcartridge ausgleichen.

Über die Feder wird die Anpresskraft zwischen Modul und Sensorcartridge konstant gehalten. Beginnt die Dichtung aus der Weichkomponente zu kriechen, wird dies über die Feder wieder ausgeglichen.

Die Anschlussskappen werden über einen Sicherungsring DIN6799 (Abbildung 69, rechts) vorgespannt im Gehäuse gehalten. Die Federn besitzen einen Federweg von ca. 1,5mm und üben in der Arbeitsposition eine Kraft von ca. 80 N auf die Dichtung aus.

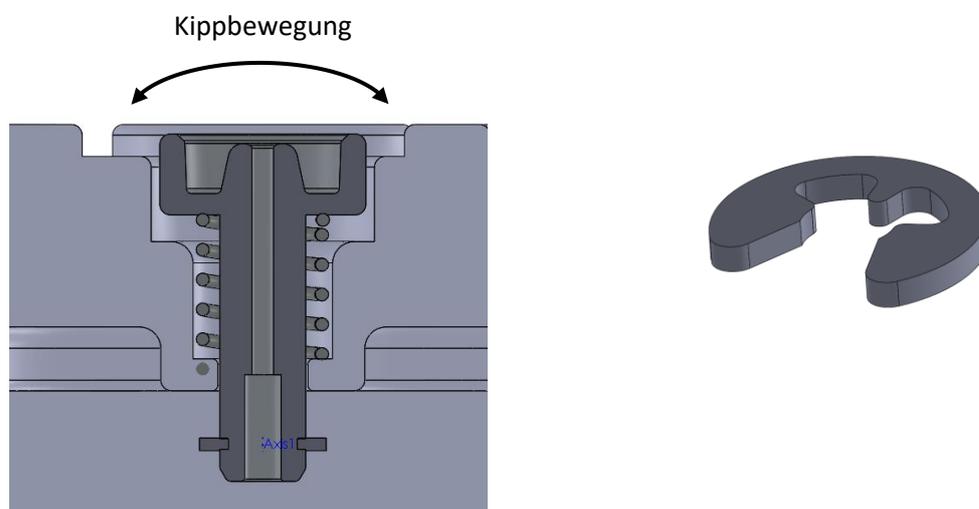


Abbildung 69: Ausgleichsbewegung Anschlussskappen, Quelle: Eigene Darstellung

Über den Außenring der Anschlusskappen und die Fase an der Außenkante werden diese während des Einlegeprozesses in die richtige Position geführt. Die Messungen am Cartridge aus Kapitel 5.6.1 ergaben eine Standardabweichung von 0,015mm (aufgerundet) auf die Längenabmessungen des Cartridges. Da es sich bei dem finalen Modul wahrscheinlich auch um ein Spritzgussteil handeln wird, wird hier eine ähnliche Toleranz angenommen. Aufgrund der Größe des Moduls wird hier von einer Standardabweichung von 0,02mm ausgegangen.

Standardabweichungen lassen sich wie in Kapitel 3.2 über die Varianz addieren. Dies ergibt eine Gesamtstandardabweichung von 0,025mm. Wird von der 6σ Methode ausgegangen muss dieser Wert noch mit 6 multipliziert werden.

Dadurch ergibt sich eine Toleranz auf den Längen Abmessungen von ±0,15mm welche von dem gefederten Anschlusskappen ausgeglichen werden muss.

$$s_{Gesamt} = \sqrt{s_{Cartridge}^2 + s_{Modul}^2} = \sqrt{0,015^2 + 0,02^2} = 0,025mm$$

Abbildung 70 zeigt den Ausgleichprozess der Anschlusskappen zum Sensorcartridge. Im linken Bild wird über die Fase an der Oberkante der Anschlusskappe diese vorzentriert bis es in weiterer Folge zu einer Zentrierung über den Dichtkegel und der Dichtgeometrie im Sensorcartridge kommt, wie im mittleren Bild dargestellt. Im Bild rechts sind die beiden zueinander zentrierten Bauteile zu sehen. Über diesen Mechanismus ist ein Versatz von bis zu 0,8mm möglich.

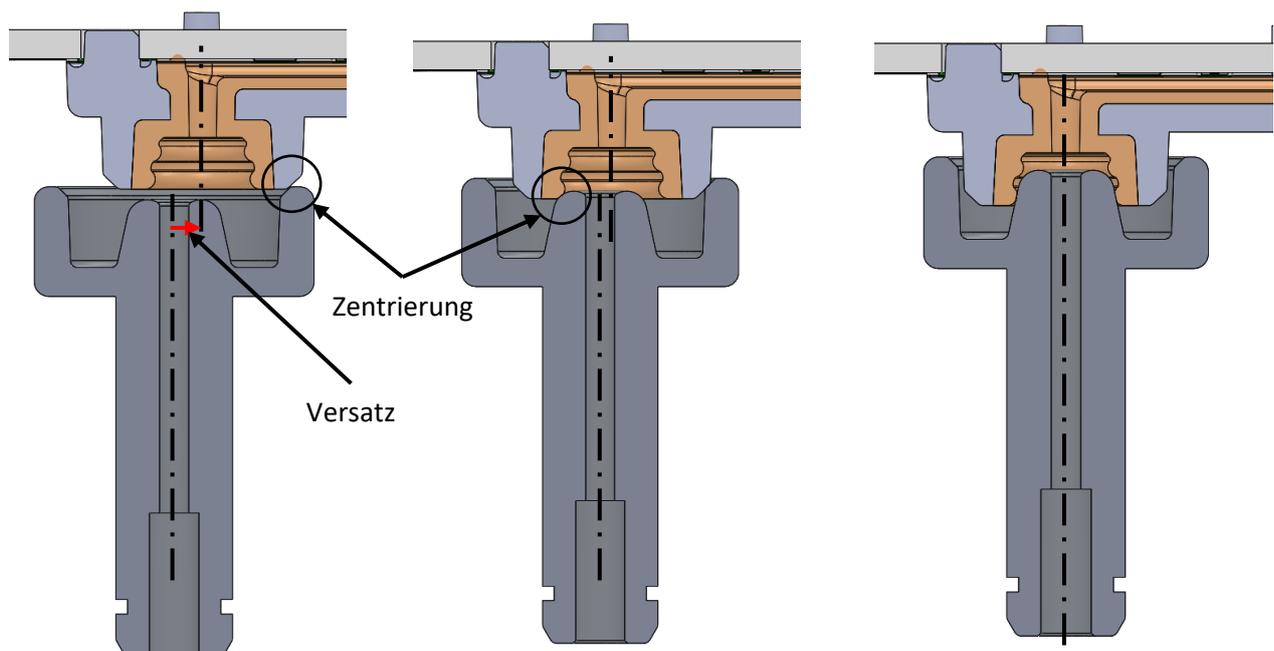


Abbildung 70: Ausgleichprozess Versatz Anschlusskappen, Quelle: Eigene Darstellung

### 6.1.2. Elektrische Kontaktierung

Um mit dem Cartridge Messen zu können muss dieses Elektrisch Kontaktiert werden. Dazu gibt es an der Unterseite neun Kontaktpads (Abbildung 71).

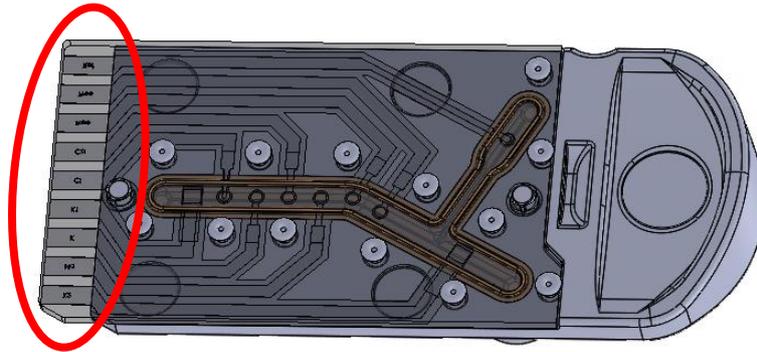


Abbildung 71: Elektrische Kontaktpads, Quelle: Eigene Darstellung

Die Kontaktpads sind auf die Polycarbonat Substratplatte nur aufgedruckt und dürfen während des Kontaktierungsvorgangs nicht beschädigt oder abgeschabt werden.

Für die Kontaktierung wurden Federpins gewählt. Die Federpins besitzen einen gefederten Kopf und werden in das Modul eingepresst. Am Umfang besitzen sie einen Wiederhacken um ein Auspressen zu verhindern. Der Kopf hat einen Federweg von 1,3mm, der Durchmesser beträgt 1,5mm.

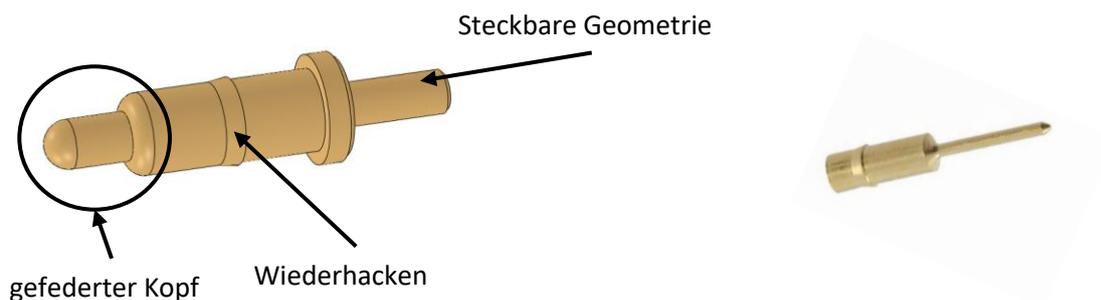


Abbildung 72: Federpin, Quelle: Eigene Darstellung

Auf der Platine selbst sind Pin Receptacles aufgelötet. Über dieses Element kann die Platine an den Cartridge Connector angesteckt werden. Zusätzlich wird die Platine über vier Schrauben mechanisch am Modul befestigt.

Abbildung 73 zeigt einen Schnitt des Aufbaus der Kontaktierung inkl. Federpin und Pin Receptacle.

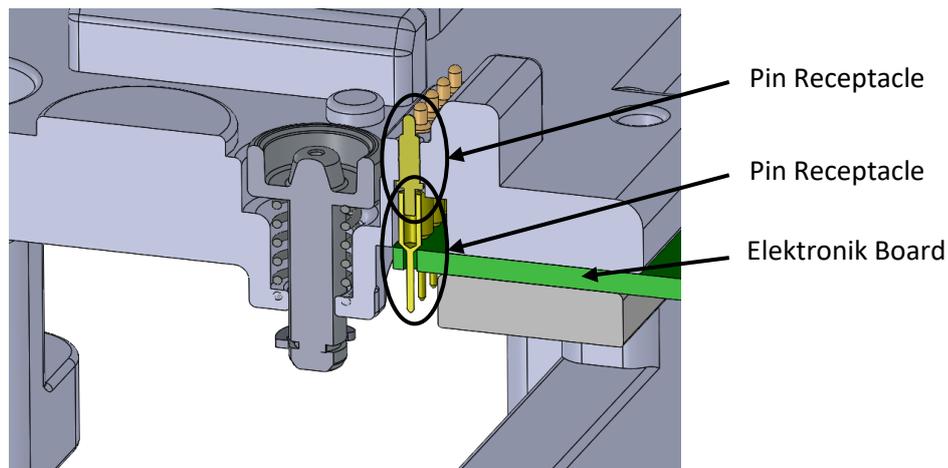


Abbildung 73: Einbau Elektrische Kontaktierung, Quelle: Eigene Darstellung

### 6.1.3. Fixierung und Positionierung des Cartridges

Zur Fixierung des Cartridges wurden Kniehebelspanner der Firma Kipp (Abbildung 74, links), mit Sitz in Thalheim bei Wels, verwendet. Diese wurden auf das Modul geschraubt.

Der Kniehebelspanner liefert eine Kraft von etwa 750N. Das Cartridge geht mit den Cartridge Connector auf axial auf Anschlag. Die Dichtkappen bleiben frei beweglich und gehen nicht auf Anschlag mit dem Cartridge Connector.

Zur Positionierung wurden Geometrien eingefügt über welche das Cartridge in die richtige Position gebracht wird.

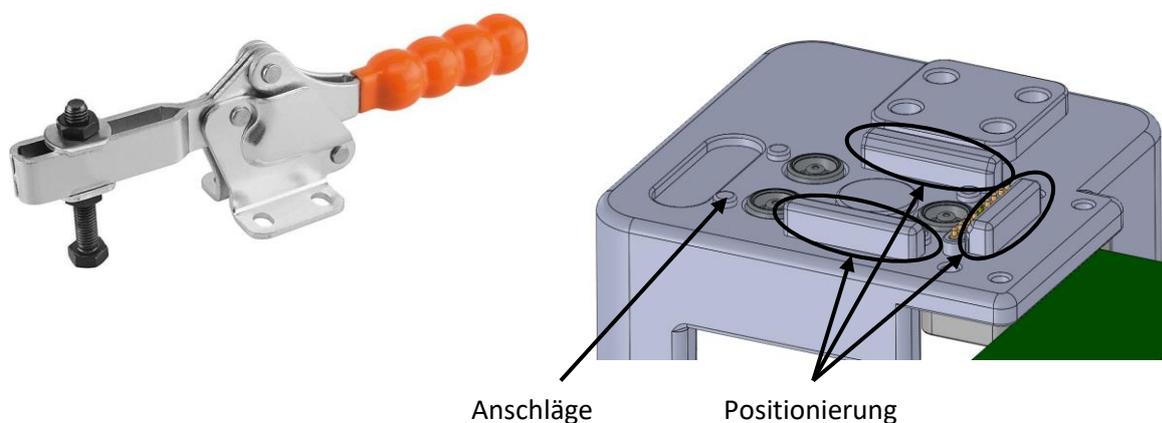


Abbildung 74: Kniehebelspanner und Positionierung, Quelle: Eigene Darstellung

### 6.1.4. Ergebnis

Abbildung 75 (links) zeigt den Zusammengebauten Cartridge Connector. Rechts ist das 3D geruckte Grundbauteil ersichtlich. Über diesen Connector lassen sich die Hauptfunktionen, welche an das finale Aufnahmemodule für das Cartridge gestellt werden, testen. Die elektrische und fluidische Kontaktierung des Cartridges sind bereits ähnlich zum finalen Modul Bauteil.

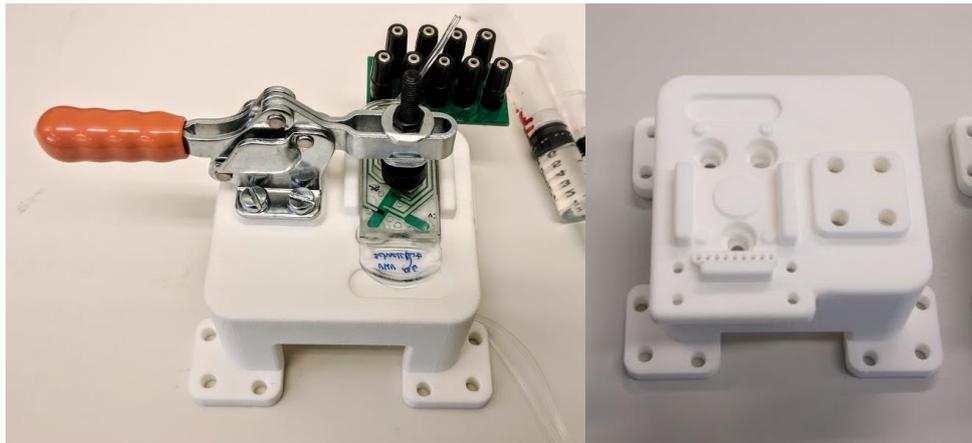


Abbildung 75: Cartridge Connector, Quelle: Eigene Darstellung

Mit diesen Cartridge Connectoren wurden bis zum jetzigen Zeitpunkt vier Gesamtteststände aufgebaut und in Betrieb genommen.

Abbildung 76 zeigt den Aufbau von zwei Gesamttestständen inkl. Fluidik und Elektronikaufbau.

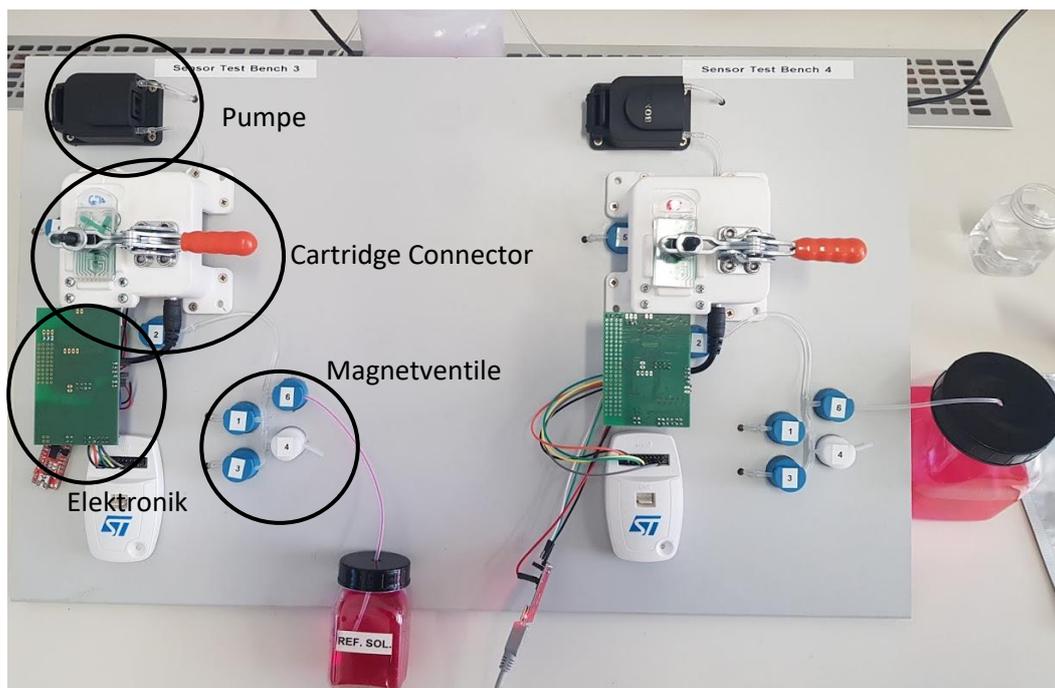


Abbildung 76: Teststände Cartridge Connector, Quelle: Eigene Darstellung

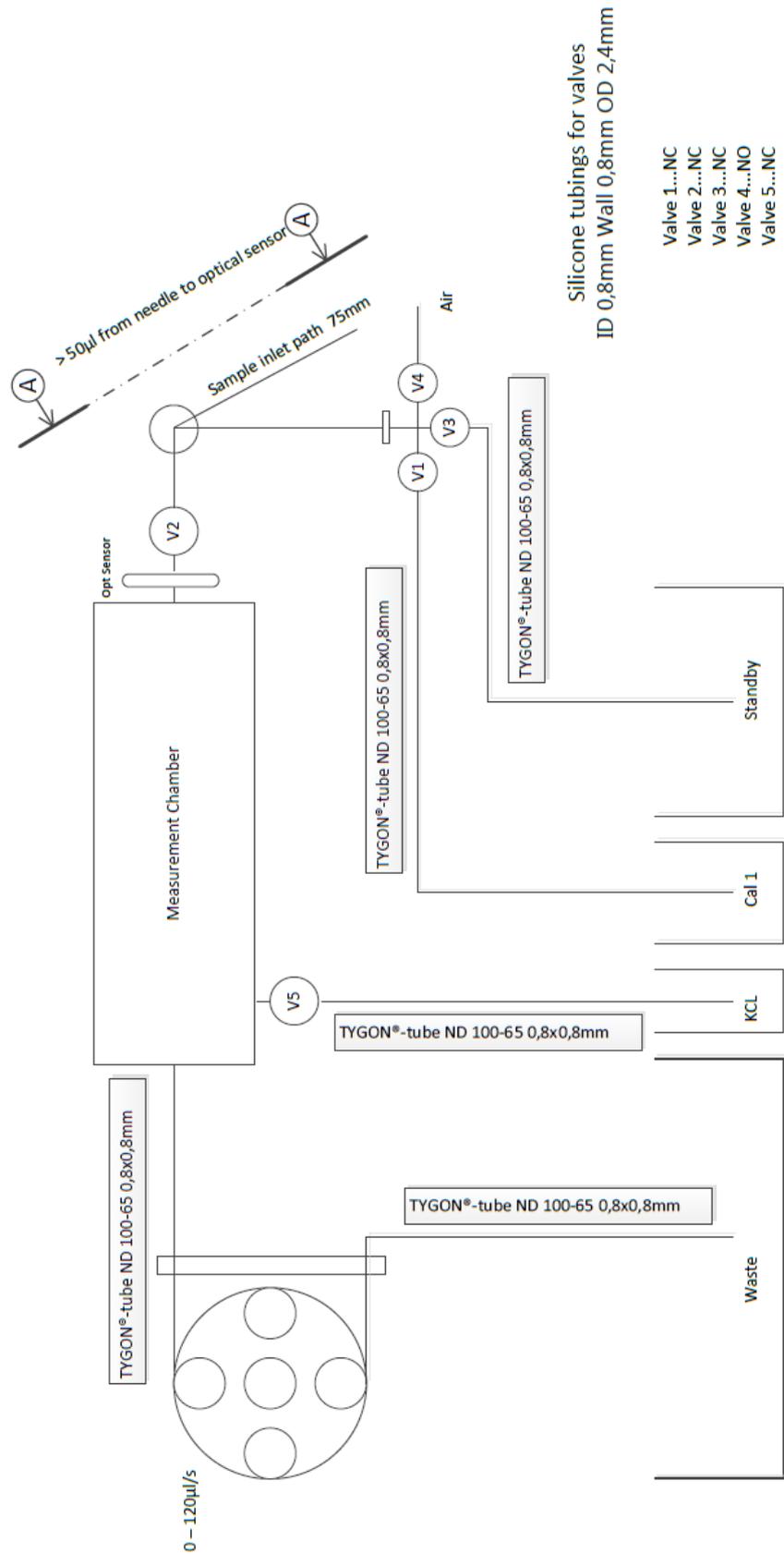


Abbildung 77: Verschachungsplan Cartridge Connector, Quelle: ERBA

Abbildung 77 zeigt den Aufbau des Gesamtteststandes. Die Funktionalität entspricht bereits der des Gesamtgeräts. Insgesamt verfügt der Teststand über fünf Magnetventile und eine Pumpe. Über die Pumpe werden die unterschiedlichen Reagenzien angesaugt. Die Magnetventile haben folgende Aufgaben:

- **V1:** Öffnet die Schlauchleitung zur Cal1 Flüssigkeit
- **V2:** Schließt die Schlauchleitung direkt vor dem Sensorcartridge
- **V3:** Öffnet die Schlauchleitung zur Standby Flüssigkeit
- **V4:** Über das Ventil 4 kann Luft durch das Sensorcartridge gezogen werden. Diese werden benötigt um das Cartridge spülen/reinigen zu können
- **V5:** Über dieses Ventil wird die Schlauchleitung zur KCl Reagenzienbag geöffnet. Im Falle des Solid-Ref Sensors kann dieses Ventil weggelassen werden.

Zusätzlich verfügt der Teststandaufbau über ein sechstes Ventil über welches eine weitere Flüssigkeit (z.B. zusätzliche Probenlösung) durch den Sensor gepumpt werden kann.

Bei der Pumpe handelt es sich um eine Peristaltikpumpe welche direkt in das Waste (Abwasser) pumpt. Für den Aufbau wurden Tygon Schläuche mit einer Wandstärke von 0,8mm und einem Innendurchmesser von 0,8mm verwendet.

## 6.2. Spritzgussfähiges Modul

Im Laufe der Arbeit sollte ein mögliches Konzept für ein spritzgussfähiges Aufnahmemodul erstellt werden. Bei der Konstruktion des Spritzguss-Moduls sollten möglichst die gleichen Lösungsansätze wie am Cartridge Connector verwendet werden. Zusätzlich zu den allgemeinen Anforderungen, wie fluidische und elektrische Kontaktierung, sollten auf folgende Problemstellungen Rücksicht genommen werden:

- **Spritzgussgerechte Konstruktion:** Die Konstruktionsrichtlinien, welche in Kapitel 4.5.4 beschrieben wurden, sollen bestmöglich berücksichtigt werden.
- **Einfache Konstruktion und Kostenreduktion:** Das gesamte Modul sollte möglichst einfach gehalten werden. Funktionen und Bauteile sollten möglichst zusammengefasst oder reduziert werden. Weitere Bauteile benötigen weitere Spritzgussformen, wodurch zusätzliche Kosten entstehen.
- **Möglichst wenig Schieber:** Um die Kosten der Spritzgussform niedrig zu halten sollten die Anzahl an Schiebern möglichst geringgehalten werden. Ziel ist mit den beiden Hauptentformungsrichtungen und maximal zwei Schiebern auszukommen.
- **Kompakte Form:** Das Modul sollte möglichst kompakt gehalten werden um später im Gesamtgerät möglichst wenig Platz zu benötigen. Zusätzlich sollte ein möglichst ästhetisches Bauteil entworfen werden.
- **Austauschbarkeit und Wartbarkeit:** Das Modul sollte möglichst einfach im Gesamtgerät montierbar sein und im Zuge einer Wartung einfach zu tauschen sein.
- **Bedienbarkeit und Fehler-Unanfällig:** Das Modul sollte von ungeübten Bediener ohne längere Einschulung fehlerfrei bedient werden können. Es soll nicht möglich sein das Cartridge falsch in das Modul einzulegen. Bzw. sollte ein Bedienfehler sofort ersichtlich sein und von ungeschulten Benutzenden erkannt werden.
- **Elektrische Schirmung:** Um Störeinflüsse auf das Sensorcartridge zu vermindern sollte die Möglichkeit bestehen das Modul zu Schirmen.
- **Auffangbehälter:** Das Modul sollte eine Art Auffangbehälter besitzen, welches im Fall eines Defekts der Abdichtung die austretenden Flüssigkeiten aufnimmt, bzw. die Flüssigkeit sammelt und entsprechend weiterleitet.
- **Ergonomisches Fixierung in der Arbeitsposition:** Das Sensorcartridge sollte sich möglichst ergonomisch und intuitiv in der Arbeitsposition fixieren und auch wieder lösen lassen.

### 6.2.1. Entwurf Modul

Es wurde ein Modul entworfen welches sich mit den beiden Hauptentformungsrichtungen und zwei Schiebern entformen lässt (vgl. Abbildung 86). Das Bauteil besitzt eine durchgängige Wandstärke von 2mm.

Das Modul (vgl. Abbildung 78) besitzt drei Aufnahmen über welche die federgelagerten Fluidik Konnektoren welche in Kapitel 6.1.1 beschrieben wurden montiert werden können. Über neun Löcher können die Federpins welche das Sensorcartridge elektrisch kontaktieren verpresst werden (vgl. Kapitel 6.1.2). An der Unterseite besitzt das Modul vier Montage Löcher über welche dieses im Gesamtgerät montiert werden kann. Mittels zwei Schnappern kann der Deckel (Kapitel 6.2.2) welcher das Sensorcartridge aufnimmt fixiert werden. Der Deckel wird über zwei Scharnier Löcher im Modul fixiert.

Das Modul ist Wannenförmig ausgeführt um im Fehlerfall aus dem Cartridge austretende Flüssigkeiten aufzusammeln zu können. Zur Elektrischen Schirmung kann das Modul mit einem leitfähigen Lack beschichtet werden.

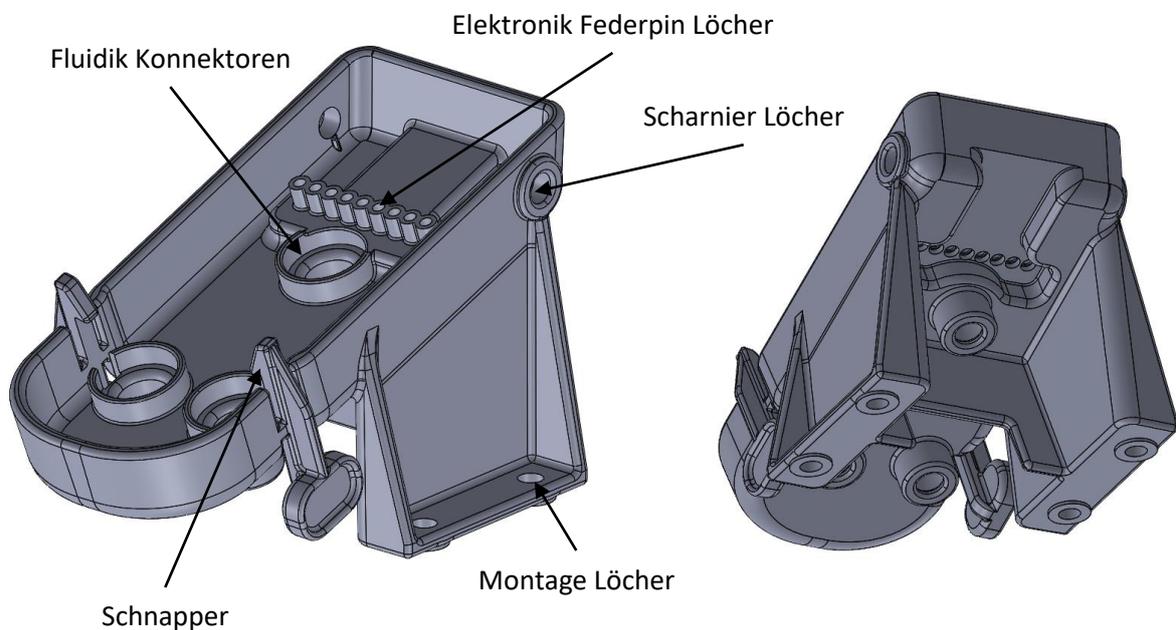


Abbildung 78: Spritzgussgerechter Entwurf Modul, Quelle: Eigene Darstellung

In der Hauptentformungsrichtung werden die Geometrien für die fluidische Kontaktierung ausgeformt (vgl. Abbildung 79, links). Mit den zwei Schiebern werden die Geometrien ausgeformt welche zu ein Hinterschnitten führen würden (vgl. Abbildung 87, rechts).

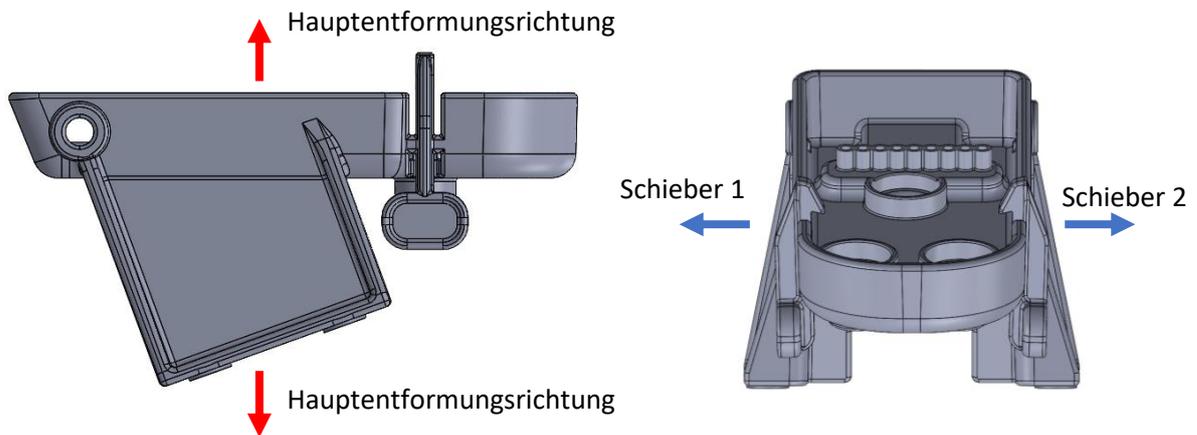


Abbildung 79: Haupt- und Nebentformungsrichtung, Quelle: Eigene Darstellung

### 6.2.2. Entwurf Deckel

Der Deckel (vgl. Abbildung 80) nimmt das Sensorcartridge auf und führt dieses in die Arbeitsposition. Der Deckel kann über die beiden Hauptentformungsrichtungen und ohne Schieber entformt werden. Über zwei Scharniere wird der Deckel im Modul montiert. Über einen Einschub an der Vorderseite wird das Cartridge im Deckel positioniert. Mittels 2 flexible Fixierungen wird das Cartridge in Position gehalten.

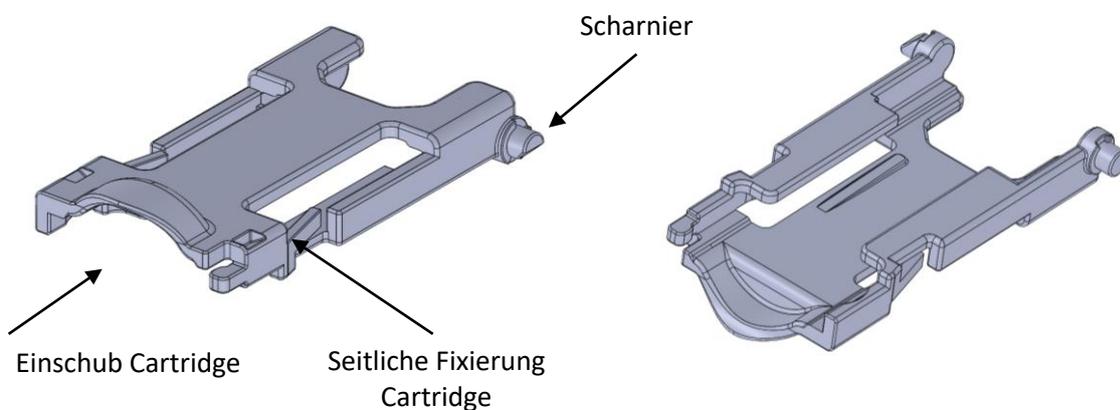


Abbildung 80: Spritzgussfähiger Deckel, Quelle: Eigene Darstellung

Um einen Schieber zu vermeiden ist der Deckel an der Oberseite geöffnet, womit die Stege auf welchen das Cartridge liegt von der Oberseite ausgeformt werden können (vgl. Abbildung 85).

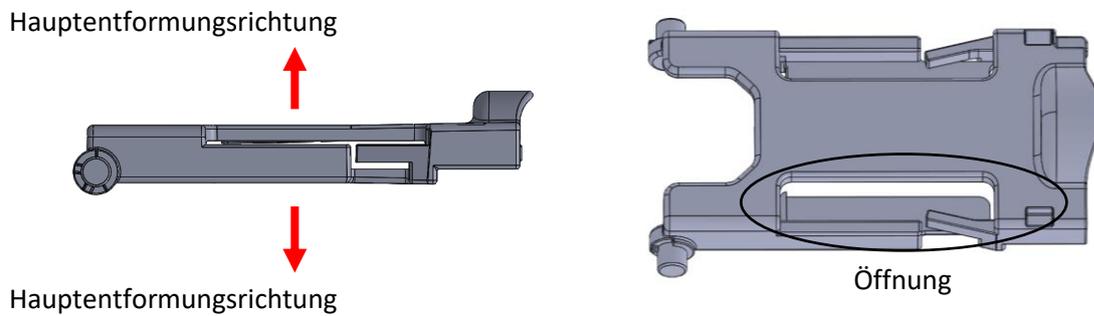


Abbildung 81: Entformungsrichtung Deckel, Quelle: Eigene Darstellung

Für den Zusammenbau muss der Deckel im Bereich des Scharniers zusammengedrückt und leicht verformt werden (vgl. Abbildung 86, links). Im Bereich des Scharniers besitzt der Deckel Rastmarken über welche der Deckel selbständig in der offenen Position verweilt (vgl. Abbildung 82, rechts).

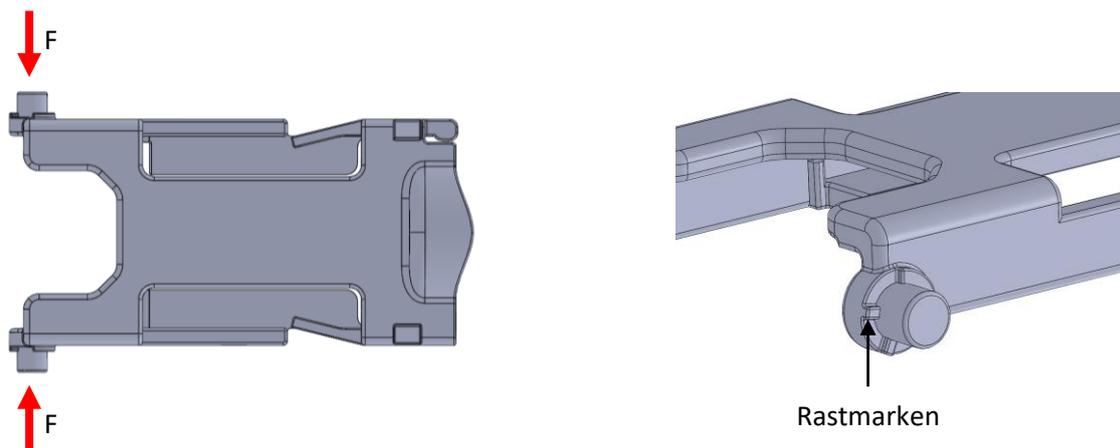


Abbildung 82: Montage Deckel, Quelle: Eigene Darstellung

#### 6.2.4. Aufbau Modul/Deckel

Nach dem Zusammenbau des Moduls kann das Cartridge in den Deckel eingelegt werden (vgl. Abbildung 83, links). Anschließend kann der Deckel geschlossen werden (vgl. Abbildung 83, links). In der Arbeitsposition wird der Deckel inkl. Cartridge in der Arbeitsposition über die Schnapper fixiert ((vgl. Abbildung 83, rechts).

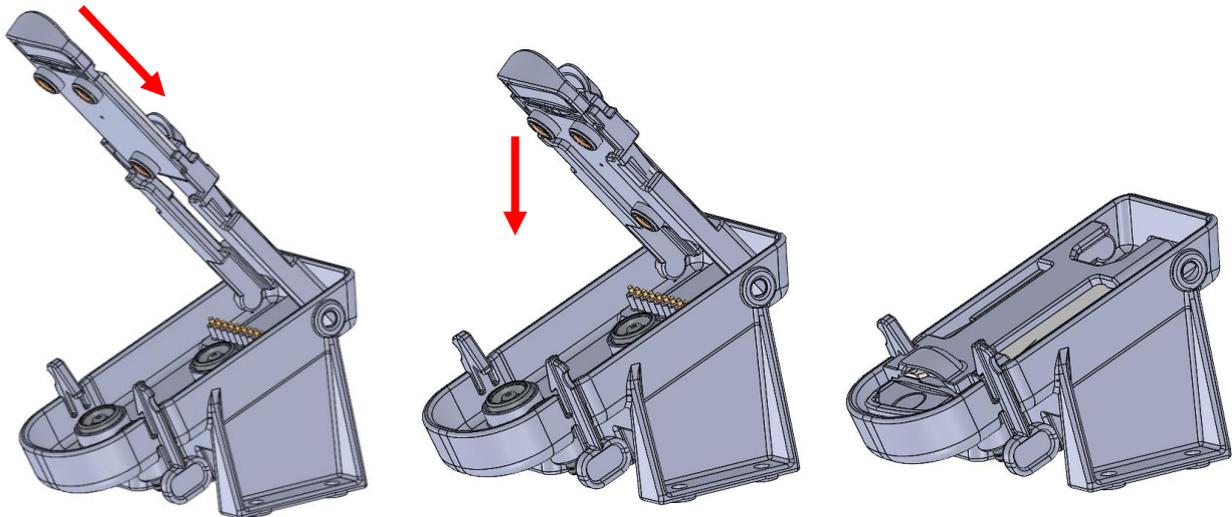


Abbildung 83: Einlegen Cartridge Modul, Quelle: Eigene Darstellung

Von Modul und Deckel wurden erste Prototypen gedruckt. Diese wurden mittels des SLS Verfahrens aus Polyamid hergestellt und erste Tests durchgeführt (vgl. Abbildung 84).

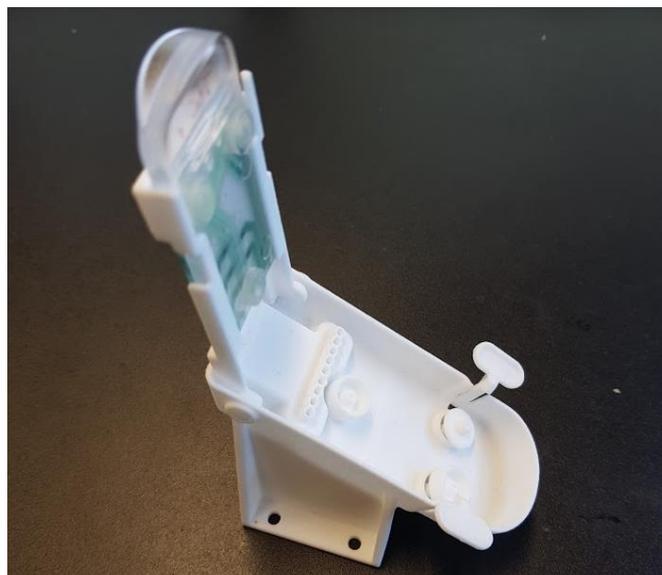


Abbildung 84: Modul 3D Druck, Quelle: Eigene Darstellung

## 6.3. Sensor Substrate Testbed (SST)

### 6.3.1. Anforderungen

Im Laufe des Projekts kam es zu Problemen mit dem 2-Komponenten Oberteil. Um jedoch die chemische und elektrische Entwicklung des Sensors nicht zu verzögern, wurde eine Lösung ausgearbeitet mit welcher nur mit der Sensorsubstratplatte, wie in Abbildung 85 dargestellt, Messungen durchgeführt werden können. Dazu wurde eine Testbench welche aus einem gefrästen PMMA Block besteht entwickelt.

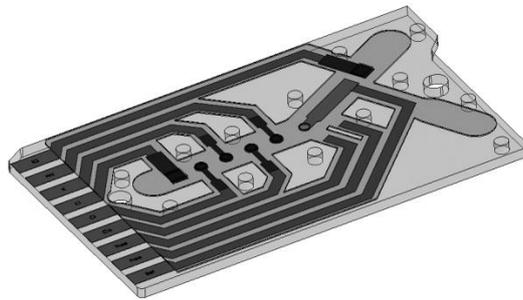


Abbildung 85: Sensorsubstratplatte, Quelle: Eigene Darstellung

Der PMMA Block musste dabei folgende Anforderungen erfüllen:

- Ausformen und Abdichten des Messkanals: Dieser wird normalerweise vom Sensor Oberteil erstellt. Der Messkanal soll eine möglichst ähnliche geometrische Form wie der Kanal im 2-Komponenten Oberteil besitzen.
- Positionierung der Substratplatte: Es muss sichergestellt werden, dass die Substratplatte in der vorgesehenen Position auf den Messkanal aufgelegt wird.
- Fixierung und Sicherstellung der Dichtung der Substratplatte in der Arbeitsposition: Die Substratplatte muss mit einer Vorrichtung auf dem Teststand fixiert werden.
- Möglichkeit zum Anschluss von Schläuchen: Zum Betrieb des Messstandes ist eine Pumpe notwendig, welche die Flüssigkeit in den Messkanal bringt. Es wird ein fluidischer Eingang und ein fluidischer Ausgang benötigt.
- Elektrische Kontaktierung der Substratplatte. Die Kontaktpads im unteren Bereich der Substratplatte müssen elektrisch kontaktiert werden.
- Aufnahme der Messelektronikplatine: Die Messplatine, welche sich möglichst nahe am Sensor befinden muss, muss aufgenommen und am Teststand fixiert werden können.

- Aufnahme und Abdichtung einer externen Referenzelektrode: Da dieser Testbench vor allem zur Entwicklung der Solid-Ref verwendet werden soll, muss der Testbench eine externe Referenz Elektrode aufnehmen können. Mit dieser externen Referenzelektrode (Zukaufteil) kann die Funktion der in der Entwicklung befindlichen Solid-Ref validiert werden. Um den Einfluss von elektrischen Störeinflüssen zu vermindern sollte der Abstand zwischen den beiden Referenzelektroden möglichst klein sein. Die Spitze der Referenzelektrode, an welcher die Messmembran sitzt, muss im Kontakt mit der zu vermessenden Flüssigkeit sein. Abbildung 86 zeigt eine externe Glas Referenzelektrode (B3420+, siehe Abbildung 86) der Firma SI Analytics, mit Sitz in 55122 Mainz verwende. Links an der Spitze sitzt die Messmembran, am rechten Ende wird ein Kabel angesteckt



Abbildung 86: Externe Glas Referenzelektrode<sup>106</sup>

### 6.3.2. Funktionsbeschreibung

Abbildung 87 zeigt den komplett aufgebauten 4-fach Teststand inklusive Elektronikplatine, Sensorsubstratplatte, Kniehebelspanner und externen Referenzelektroden.

<sup>106</sup> vgl. Analytics SI (2017). S.72.

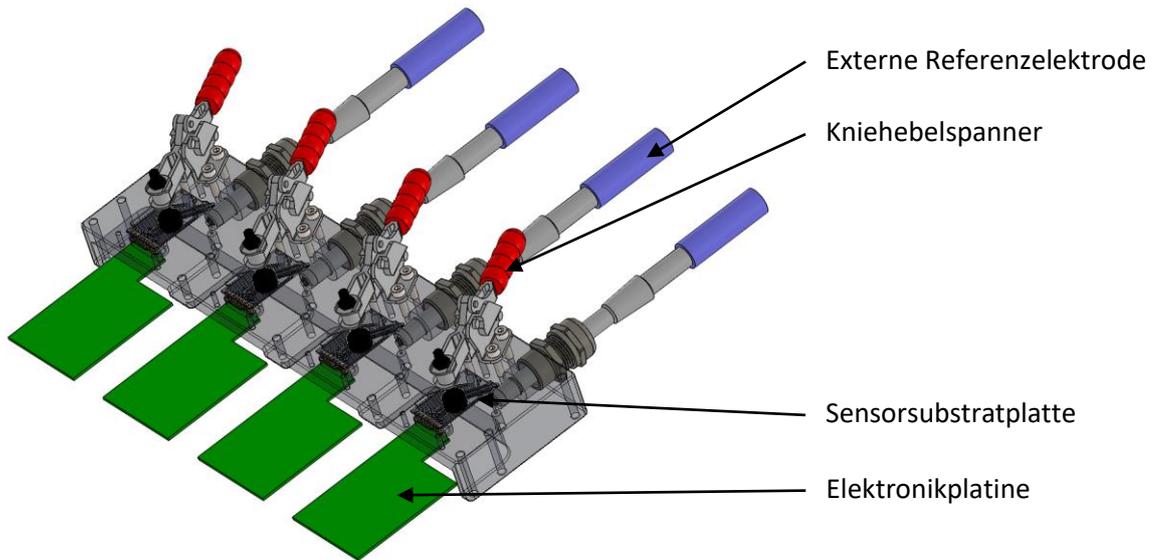


Abbildung 87: SST aufgebaut, Quelle: Eigene Darstellung

**PMMA Block:** In Abbildung 88 dargestellt ist der PMMA Block des Messstandes. Der Block hat Abmessungen von 320mm x 84mm x 29mm. Der Block wurde von der Firma Zeg-Med mit Sitz in Polen gefertigt, insgesamt wurden 4 Stück gefertigt.

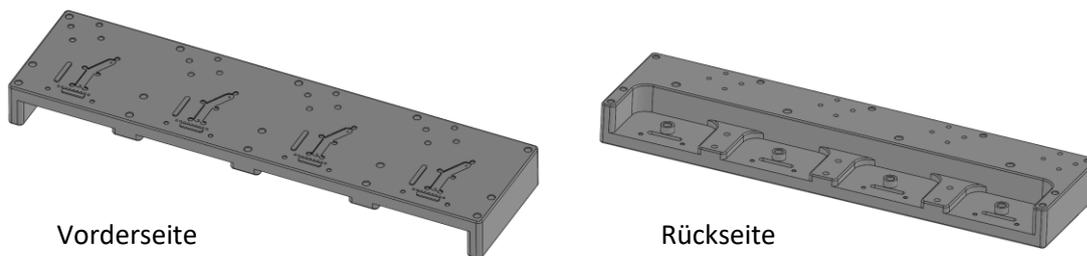


Abbildung 88: PMMA Block, Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 89 (blau) zeigt den eigentlichen Messkanal des Messstandes. Die beiden Löcher im Messkanal sind der Eingang (unten) und der Ausgang (oben). In diese Ausfräsung wird die im nächsten Abschnitt beschriebene Dichtung eingelegt. Die beiden Geometrien unterhalb und links der Messkanalausfräsung dienen zur Positionierung der Sensorsubstratplatte in x und y Richtung. In den neun Bohrungen unterhalb der Ausfräsung werden die selben Federpins zur Kontaktierung der Substratplatte, wie in den beiden zuvor beschriebenen Aufbauten, eingepresst. Die restlichen

Bohrungen werden verwendet um die Platine zu fixieren, den Fixierhebel für die Substratplatte zu verschrauben und den PMMA Block auf einer Aufstellvorrichtung zu verschrauben.

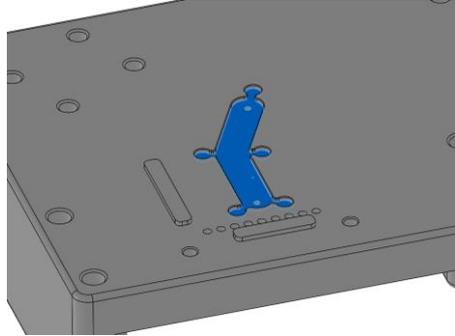


Abbildung 89: Messkanal, Quelle: Eigene Darstellung

**Abdichtung der Substratplatte:** Abbildung 90 (links) zeigt die Abdichtung der Substratplatte. Die Flachdichtung besteht aus transparenten Silikon mit einer Härte von 50 Shore-A. Die Dichtung wurde mittels Pressformen von der Firma *Technische Produktion Gertrude Gotthard e.U.*, mit Sitz in 8504 Preding, hergestellt.

Beim Pressformen ist ein diskontinuierlicher Vorgang bei welchem eine Negativform für das Bauteil erstellt wird. Das Ausgangsmaterial wird in den Hohlraum der Form gefüllt und diese anschließend geschlossen. Das Bauteil wird unter Druck und Wärme ausgehärtet. Anschließend wird das Bauteil entnommen.<sup>107</sup>

Die Dichtung hat eine Dicke von 1,05mm und wird in die dafür vorgesehene Ausfräsung am PMMA Block (rot markiert, Abbildung 88) gelegt. Die seitlichen „Ohren“ der Dichtung stellen einen sicheren Sitz dieser im PMMA Block sicher. Sie besitzt an der Oberseite eine zusätzliche Kontur um ein Dichten direkt am Messkanal sicherzustellen. Die Dichtung wird durch die Substratplatte 25% verpresst. Abbildung 90 (rechts) zeigt den PMMA Block inkl. verbauter Dichtung.

<sup>107</sup> vgl. Andreas Kalweit and others (2012). S.83.

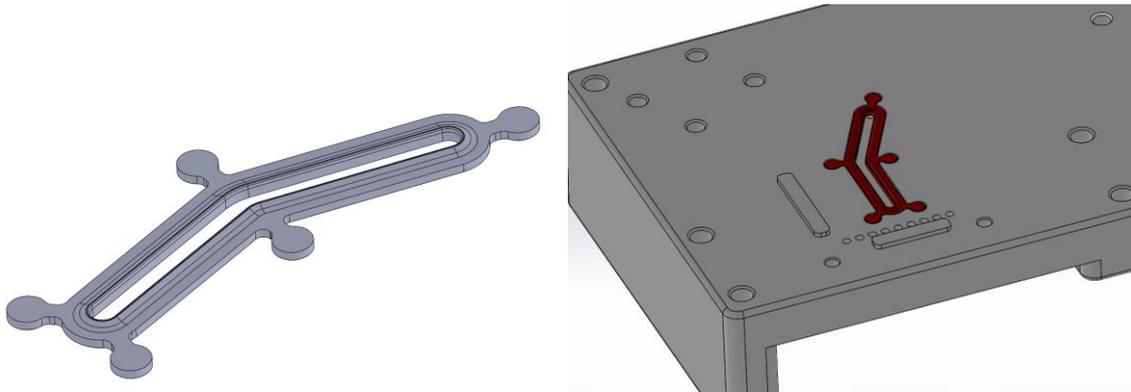


Abbildung 90: Flachdichtung Silikon, Quelle: Eigene Darstellung

**Fixierung der Substratplatte:** Zur Fixierung wurden Kniehebelspanner (Abbildung 91) der Firma Kipp verwendet. Diese pressen die Substratplatte axial auf die Dichtung und erzeugen dadurch den abgedichteten Messkanal. Der Kniehebelspanner wird mit 4 M5 DIN 912 Zylinderkopfschrauben am PMMA Block verschraubt. Um eine konstante Verteilung der Anpresskräfte zu erreichen, wurde eine 3mm PMMA Platte zwischen Substratplatte und Kniehebelspanner gelegt. Der Anpressspindel ist variabel verstellbar und erreicht in verwendeten Position eine Niederhaltekraft von in etwa 750N.

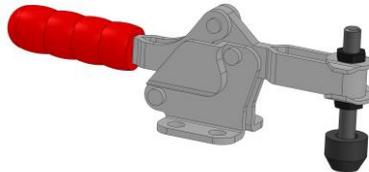


Abbildung 91: Kniehebelspanner, Quelle: Eigene Darstellung

**Externe Referenzelektrode:** Abbildung 92 zeigt die Anordnung der Referenzelektrode im Teststand. Da die Elektrode selbst keine Schulter besitzt, über welche diese gespannt werden kann, wurde eine M16 Kabelverschraubung verwendet um diese zu fixieren. Die Elektrode wird in die Kabelverschraubung gesteckt welche anschließend verspannt wird. Beim Einbau wird die Baugruppe aus den beiden Bauteilen in den PMMA Block geschraubt und axial auf einen O-Ring gepresst.

Der O-Ring hatte einen Innendurchmesser von 3mm, eine Schnurstärke von 1mm (3x1), eine Härte von 70 Shore-A und besteht aus Nitrilkautschuk (NBR).

Der Durchfluss ist mit den roten Pfeilen markiert. Die Probenflüssigkeit durchfließt zuerst die Messkammer der Substratplatte und fließt anschließend an der Membran der Referenzelektrode vorbei.

Zusätzlich wurden Blindstopfen aus POM gedreht um den Teststand auch ohne externe Referenzelektroden betreiben zu können. Diese besitzen die gleichen Abmessungen wie die Elektrode und werden gleich eingebaut.

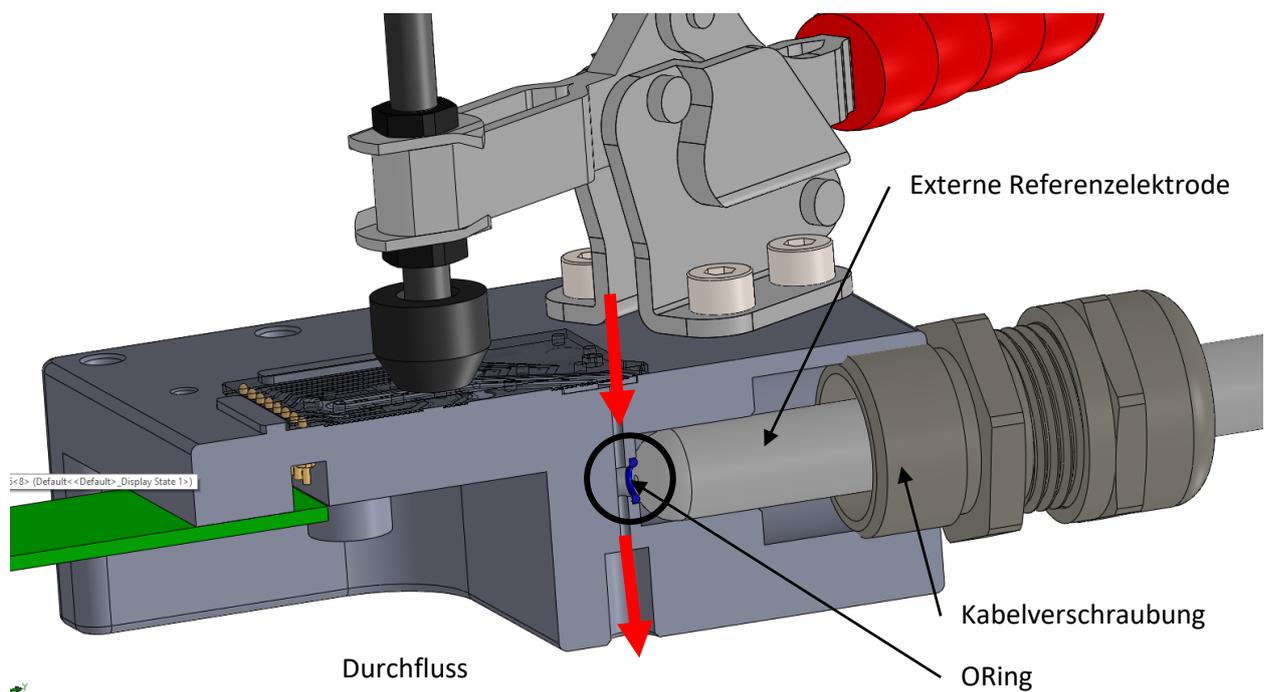


Abbildung 92: Einbau Externe Referenzelektrode, Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 93 (links) blau dargestellt sind die M6 Verschraubungen der Schlauchanschlüsse. Die Schläuche werden mit M6 Schlauchanschlüssen der Firma IDEX verschraubt. Diese bestehen aus der Flat-Bottom Verschraubung selbst und einer Ferrule. Die Ferrule wird über den Schlauch geschoben welche über den Dichtkegel an der Verschraubung axial und radial dichtet.

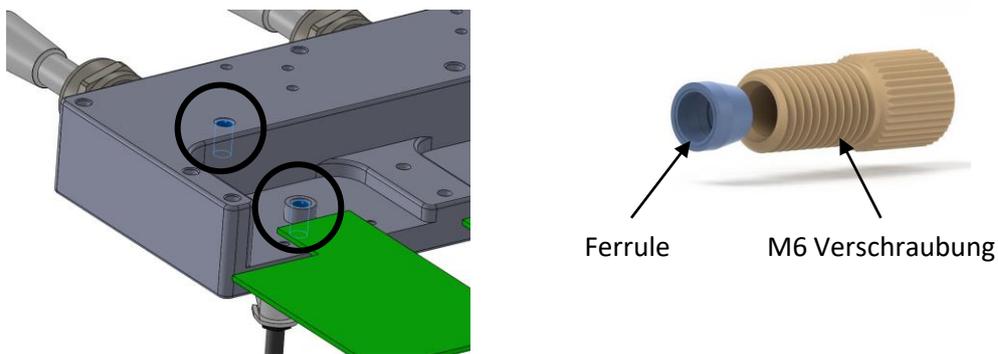


Abbildung 93: Schlauchverschraubungen, Quelle: Eigene Darstellung

### 6.3.3. Erste Ergebnisse

Mitte Juni wurden der PMMA Block nach ca. sieben Wochen Lieferzeit geliefert und mit den restlichen Komponenten aufgebaut. Der Teststand wird mit einer Peristaltik Pumpe betrieben, ausgelesen werden die Substratplatten über ein Potentiostatisches Messgerät (PalmSens).

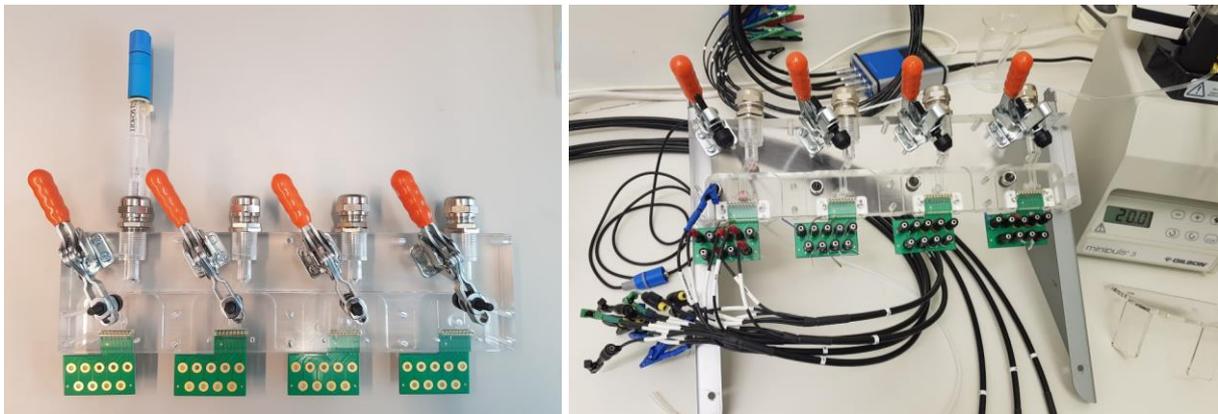


Abbildung 94: SST aufgebaut, Quelle: Eigene Darstellung

Der Aufbau der Vorrichtung verlief ohne Problem. Sowohl die Dichtungen der externen Referenzelektrode als auch die Dichtung des Substratplättchens selbst funktionierte wie vorgesehen.

Als Problem stellte sich jedoch der Übergang zwischen der Ausgangsbohrung der Messkammer und der Bohrung für die externe Referenzelektrode dar. Hier kam es zu Ansammlungen von Luftblasen (Abbildung 95), welche die Funktion der Referenzelektrode beeinträchtigten. Aufgrund der geringen Durchflüsse und der kleinen geometrischen Abmessungen der Vorrichtungen könnte dies auch durch den Einsatz von Benetzungsmitteln nicht verbessert werden. Sobald sich an dieser Stelle eine Luftblase festgesetzt hat, ließ sich diese nicht mehr entfernen. Aus diesem Grund wurde der PMMA Block nachgearbeitet.

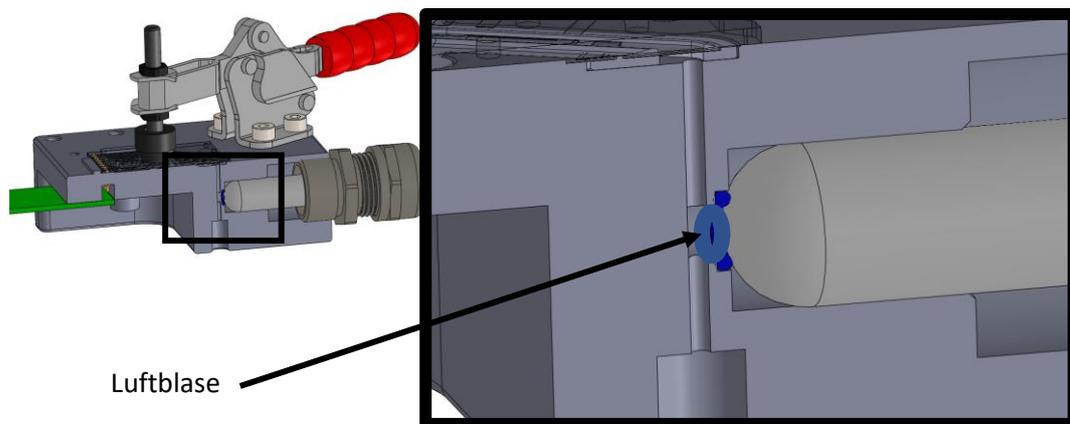


Abbildung 95: SST Problem Luftblasen, Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Nacharbeit wurde ein zusätzlicher O-Ringsitz und ein zusätzlicher Schlauchanschluss eingefügt. Der Schlauchanschluss an der Unterseite wurde mit einem Blindstopfen verschlossen (vgl. Abbildung 96). Der Schlauchanschluss der Absaugung befindet sich an der Oberseite der Kammer wodurch eingeschlossene Luftblasen besser abgesaugt werden können. Die Nacharbeit ergab ein zufriedenstellendes Ergebnis und es konnten Messreihen mit dem Testaufbau gefahren werden.

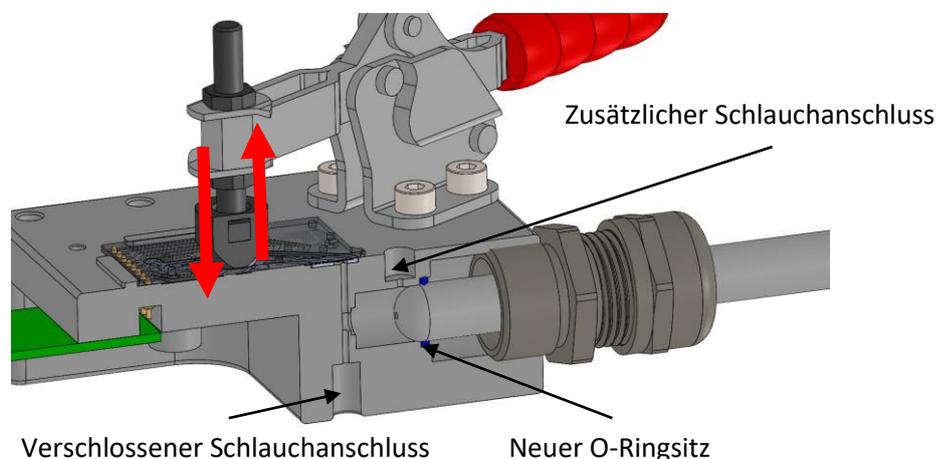


Abbildung 96: SST Nacharbeit, Quelle: Eigene Darstellung

## 7. Resultate und Ausblick

Im Zuge der Arbeit wurden die Themengebiete Weiterentwicklung des Spritzgussprozesses für das Sensorcartridge, Konzeptentwurf eines Spritzgussfähigen Sensor-Aufnahmemoduls und Entwicklung und Aufbau eines Messstand-Aufnahmemoduls bearbeitet.

Für das Sensorcartridge bestanden bereits Prototypen-Spritzgussformen für die Hartkomponente als auch für die Weichkomponente. Die Hartkomponenten-Spritzgussform lieferte hierbei zufriedenstellende Bauteile, die Form der Weichkomponente jedoch nur unzufriedenstellende. Die ersten Änderungen wurden an der bestehenden Weichkomponenten-Form nachgearbeitet, wobei hier jedoch keine Verbesserungen erzielt werden konnten. Aufgrund dieser Tatsache wurde ein neuer Spritzgusslieferant gesucht, welcher die bestehende Hartkomponenten-Form übernehmen und eine neue Form für die Weichkomponente erstellen sollte. Nach einem ersten Bemusterungsversuch, bei welchem neuerlich Probleme mit Luftblasen auftraten, konnte nach der zweiten Bemusterung eine Vorserie, bestehend aus 500 Bauteilen, gefertigt werden. Die ursprünglichen Probleme an der Weichkomponente, wie Luftblaseneinschlüsse, Undichtigkeiten des Sensorcartridges aufgrund unvollständig ausgefüllter Dichtgeometrien und die zu grobe Oberfläche konnten beseitigt werden.

Im nächsten Schritt muss ein Hersteller gefunden werden, welcher die Serienproduktion des Sensorcartridges übernehmen kann. Dazu soll ein 2-Komponenten-Spritzgusswerkzeug erstellt werden, wodurch das Umsetzen des Hartkomponenten-Rohlings überflüssig wird und der Fertigungsprozess optimiert werden kann. Weiters muss der Hersteller den Spritzgussvorgang in einem Reinraum durchführen können.

Zur Charakterisierung und Weiterentwicklung des Sensorcartridges wurden insgesamt sechs komplette Teststände aufgebaut. Die Teststände bestehen aus dem Cartridge Connector, fünf Magnetventilen, einer Peristaltikpumpe und der Messelektronik. Über den im Laufe der Arbeit entwickelten Cartridge Connector wird das Sensorcartridge fluidisch und elektrisch kontaktiert. Mit den Testständen werden zur Zeit Testreihen mit den Sensorcartridges durchgeführt. Die Anforderungen, welche an den entwickelten Cartridge Connector gestellt wurden, konnten erfüllt werden. Bis zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keine Probleme wie Undichtheiten an den fluidischen Anschlusspunkten oder Kontaktprobleme an den elektrischen Kontaktpunkten des Cartridges.

In weiterer Folge muss ein Konzept erstellt werden, wie das Sensorcartridge im Gesamtgerät integriert werden kann. Daraus resultiert die endgültige fluidische und elektrische Kontaktierung des Cartridges.

Mit dem Sensor Substrate Testbed (SST) werden zurzeit weitere Charakterisierungen der Sensorvariante mit SolidRef durchgeführt. An dieser Vorrichtung gibt es jedoch wiederkehrend Probleme mit Luftblasen an der Sensormembran der Externen Glaselektrode, welche das Messergebnis beeinträchtigen. Hier sollte eine überarbeitete Version der Vorrichtung angedacht werden um diesen Fehler ausschließen zu können.

Mit dem entwickelten Dichtigkeitsteststand können die bestehenden Cartridges auf Dichtigkeit überprüft werden. Dabei wird sowohl Unterdruck als auch Überdruck am Cartridge angelegt und der Druckanstieg bzw. Druckabfall über die Zeit beobachtet. Dieser liegt bei dichten Cartridges im Bereich von ca. 1mbar pro Sekunde. Mit dem Testlauf wird sowohl die Dichtigkeit der Anschlusspunkte, als auch die Dichtigkeit der Dichtlippe des Messkanals geprüft. Der Teststand kann einerseits verwendet werden um die Sensoren während der Produktion zu testen, er kann jedoch auch zur Validierung der Zeitfestigkeit der Dichtung angewendet werden.

## 8. Literaturverzeichnis

- Awiszus, Birgit; Bast, Jürgen; Dürr, Holger; Mayr, Peter (2016): *Grundlagen Der Fertigungstechnik*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- BASF (2017): *Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPU) Elastollan-Materialeigenschaften*
- BASF (2016): *Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPU) Elastollan-Produktübersicht*
- BASF (2011): *Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPU) Elastollan-Verarbeitungshinweise*
- Breuninger, Jannis; Becker, Ralf; Wolf, Andreas; Rommel, Steve; Verl, Alexander (2013): *Generative Fertigung Mit Kunststoffen*, Springer Verlag, Berlin
- Bühlmann, Philippe; Chen, Li D. (2012): *Ion-Selective Electrodes With Ionophore-Doped Sensing Membranes, Supramolecular Chemistry* <<https://doi.org/10.1002/9780470661345.smc097>>
- Dominghaus, Hans; Elsner, Peter; Eyerer, Peter; Hirth, Thomas (2004): *Kunststoffe - Eigenschaften Und Anwendungen*, Springer Verlag, Berlin
- Eyerer, Peter; Hirth, Thomas; Elsner, Peter (2008): *Polymer Engineering*, Springer Verlag, Berlin
- GmbH, Cirp 'Vakuulguss' <[https://www.cirp.de/images/Vakuulguss\\_Verfahren.jpg](https://www.cirp.de/images/Vakuulguss_Verfahren.jpg)> [accessed 10 December 2018]
- Hellerich, Walter; Harsch, Günther; Baur, Erwin (2010): *Werkstoff-Führer Kunststoffe*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- Hopmann, Christian; Michaeli, Walter (2017): *Einführung in Die Kunststoffverarbeitung*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- Hu, Jinbo; Stein, Andreas; Bühlmann, Philippe (2016): 'Rational Design of All-Solid-State Ion-Selective Electrodes and Reference Electrodes', Elsevier B.V., *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 76 <<https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.11.004>>
- Idemitsu Kosan Co, Ltd (2008): *Property Table: General Purpose / Weather Resistance Polycarbonate*
- Kaiser, Wolfgang (2011): *Kunststoffchemie Für Ingenieure*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- Kalweit, Andreas; Paul, Christof; Peters, Sascha; Walbaum, Reiner (2012): *Handbuch Technisches Produktdesign*
- Kazmer, David O. (2016): *Injection Mold Design Engineering*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- Lindner, Erno; Pendley, Bradford D. (2013): 'A Tutorial on the Application of Ion-Selective Electrode Potentiometry: An Analytical Method with Unique Qualities, Unexplored Opportunities and Potential Pitfalls; Tutorial', *Analytica Chimica Acta*, 762 <<https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.11.022>>
- Medicalexpo 'I-Smart 30' <<http://www.medicalexpo.de/prod/i-sens/product-68808-442132.html>> [accessed 10 December 2018]
- Mennig, Günter; Stoeckhert, Klaus (2013): *Mold-Making Handbook*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG

- Meusburger 'FW-Wechselformen'  
 <<https://www.meusburger.com/DE/DE/produkte/formenbau/formaufbauten/fw-wechselform>>  
 [accessed 22 October 2018]
- Moeller, Elvira (2014): *Handbuch Konstruktionswerkstoffe*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- Richard, Hans Albert; Zipsner, Thomas (2017): *Additive Fertigung von Bauteilen Und Strukturen*, Springer Verlag, Berlin
- Ritter, Christoph (2014): *50 Jahre Innovation in Der Medizintechnik*, DBV-Verlag, Graz
- Rother, Harmut (2017): *3D-Drucken... Und Dann?*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- SI, Analytics (2017): 'Messgeräte Und Elektroden Und ProLab Serien'
- Sieber, Arne (2002): 'Hochgeschwindigkeits- Multianalysesystem Auf Basis von Elektrochemischen Sensoren in Dickschichttechnik', Graz
- St John, Andrew; Francis, Andrew; Walmsley, Noel (2001): *Critical Care Testing*, Roche Diagnostics
- VDI (2009): *VDI 3404 Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien*
- Wappis, Johann; Jung, Berndt (2008): *Taschenbuch Null-Fehler-Management*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- Wintermantel, Erich; Suk-Woo, Ha (2009): *Medizintechnik Life Science Engineering*, Springer Verlag, Berlin

## 9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Potentiometrische Messung .....	6
Abbildung 2: Messelektrode mit Innenelektrolyten .....	7
Abbildung 3: Messelektroden mit Innenelektrolyten, Quelle: Eigene Darstellung .....	7
Abbildung 4: Aufbau SolidRef Elektrode .....	8
Abbildung 5: Ionensensitiver Sensor, Quelle: Eigene Darstellung .....	8
Abbildung 6: Ionensensitive Messung.....	9
Abbildung 7: Ionensensitive Messung mit Solid-State Elektroden .....	10
Abbildung 8: Potentialsprünge SolidRef.....	10
Abbildung 9: 1-Punkt und 2-Punkt Kalibration, Quelle: Eigene Darstellung .....	11
Abbildung 10: Normalverteilung, Quelle: Eigene Darstellung .....	12
Abbildung 11: Addition von Verteilungsfunktionen, Quelle: Eigene Darstellung .....	13
Abbildung 12: Kunststoffarten, Quelle: Eigene Darstellung.....	14
Abbildung 13: Zusammenhang Spannung Dehnung Elastollan, Quelle: Eigene Darstellung .....	17
Abbildung 14: 3D Printing .....	19
Abbildung 15: Fused Deposition Modeling .....	20
Abbildung 16: Stereolithographie .....	21
Abbildung 17: Selektives Lasersintern .....	22
Abbildung 18: Vakuumguss .....	23
Abbildung 19: Aufbau einer Spritzgießmaschine .....	25
Abbildung 20: Ablauf Spritzguss.....	26
Abbildung 21: Aufbau Spritzgusswerkzeug .....	27
Abbildung 22: 2-K Spritzguss .....	28
Abbildung 23: Design Spritzguss .....	29
Abbildung 24: Rippendesign.....	31
Abbildung 25: Einfallstellen.....	31
Abbildung 26: Ecken und Kanten .....	32
Abbildung 27: Vermeidung Verzug .....	33
Abbildung 28: Formschrägen .....	33
Abbildung 29: Bindenähte.....	34
Abbildung 30: Hinterschnitte .....	35
Abbildung 31: Schieber .....	35

Abbildung 32: Blut Analyzer i-smart30.....	37
Abbildung 33: Sensorsubstratplatte mit SolidRef, Quelle: Eigene Darstellung.....	37
Abbildung 34: Aufbau ISE Sensorspot, Quelle: Eigene Darstellung .....	38
Abbildung 35: Sensorsubstratplatte mit KCl Ref, Quelle: Eigene Darstellung .....	39
Abbildung 36: Sensorsubstratplatte mit SolidRef, Quelle: Eigene Darstellung.....	40
Abbildung 37: Aufteilung Sensorsubstrate, Quelle: Eigene Darstellung.....	41
Abbildung 38: Sensorcartridge, Quelle: Eigene Darstellung .....	42
Abbildung 39: Anspritzpunkte Cartridge, Quelle: Eigene Darstellung .....	45
Abbildung 40: Doppeldichtlippe, Quelle: Eigene Darstellung .....	46
Abbildung 41: Anschlussgeometrie alt, Quelle: Eigene Darstellung .....	46
Abbildung 42: Übergang KCl-Kanal, Quelle: Eigene Darstellung.....	47
Abbildung 43:Knick Probenkanal, Quelle: Eigene Darstellung.....	47
Abbildung 44: Eingang KCl Kanal, Quelle: Eigene Darstellung .....	47
Abbildung 45: Verstemmdome, Quelle: Eigene Darstellung.....	48
Abbildung 46: Einfachlippe, Quelle: Eigene Darstellung.....	49
Abbildung 47: Übergang Probenkanal KCl Kanal, Quelle: Eigene Darstellung.....	49
Abbildung 48: Fluidische Ankopplung Sensorcartridges, Quelle: Eigene Darstellung .....	50
Abbildung 49: Formeinsatz alt Hinterschnitt, Quelle: Eigene Darstellung.....	50
Abbildung 50: Verlegung Anspritzpunkt, Quelle: Eigene Darstellung.....	51
Abbildung 51: Fehler 1. Bemusterung, Quelle: Eigene Darstellung .....	52
Abbildung 52: Probleme Sensorcartridge Stelle 1, Quelle: Eigene Darstellung.....	53
Abbildung 53: Probleme Sensorcartridge Stelle 2, Quelle: Eigene Darstellung.....	54
Abbildung 54: Probleme Sensorcartridge Stelle 3, Quelle: Eigene Darstellung.....	54
Abbildung 55: Elastollan Verarbeitung.....	55
Abbildung 56: Änderungen Hart- und Weichkomponente, Quelle: Eigene Darstellung .....	56
Abbildung 57: Weichkomponenteneinsatz inkl. Stammform, Quelle: Eigene Darstellung .....	56
Abbildung 58: 1. Bemusterung ELT, Quelle: Eigene Darstellung.....	57
Abbildung 59: 1. Bemusterung ELT Oberfläche, Quelle: Eigene Darstellung.....	57
Abbildung 60: Vermessung Sensorcartridge, Quelle: Eigene Darstellung .....	58
Abbildung 61: Prinzip Dichtheitstest, Quelle: Eigene Darstellung .....	60
Abbildung 62: Aufbau Dichtheitstest, Quelle: Eigene Darstellung.....	60
Abbildung 63: Cartridge Connector, Quelle: Eigene Darstellung.....	62
Abbildung 64: Axiale Dichtung Radiale Dichtung, Quelle: Eigene Darstellung .....	63
Abbildung 65: Anschlusspunkte Sensorcartridge, Quelle: Eigene Darstellung .....	64

Abbildung 66: Dichtkappe, Quelle: Eigene Darstellung .....	64
Abbildung 67: Abdichtung Dichtkegel, Quelle: Eigene Darstellung .....	65
Abbildung 68: Konzepte Abdichtung, Quelle: Eigene Darstellung .....	65
Abbildung 69: Ausgleichsbewegung Anschlusskappen, Quelle: Eigene Darstellung .....	66
Abbildung 70: Ausgleichprozess Versatz Anschlusskappen, Quelle: Eigene Darstellung .....	67
Abbildung 71: Elektrische Kontaktpads, Quelle: Eigene Darstellung .....	68
Abbildung 72: Federpin, Quelle: Eigene Darstellung .....	68
Abbildung 73: Einbau Elektrische Kontaktierung, Quelle: Eigene Darstellung .....	69
Abbildung 74: Kniehebelspanner und Positionierung, Quelle: Eigene Darstellung .....	69
Abbildung 75: Cartridge Connector, Quelle: Eigene Darstellung .....	70
Abbildung 76: Teststände Cartridge Connector, Quelle: Eigene Darstellung .....	70
Abbildung 77: Verschauchungsplan Cartidge Connector, Quelle: ERBA.....	71
Abbildung 78: Spritzgussgerechter Entwurf Modul, Quelle: Eigene Darstellung .....	74
Abbildung 79: Haupt- und Nebenentformungsrichtung, Quelle: Eigene Darstellung .....	75
Abbildung 80: Spritzgussfähiger Deckel, Quelle: Eigene Darstellung .....	75
Abbildung 81: Entformungsrichtung Deckel, Quelle: Eigene Darstellung.....	76
Abbildung 82: Montage Deckel, Quelle: Eigene Darstellung .....	76
Abbildung 83: Einlegen Cartidge Modul, Quelle: Eigene Darstellung .....	77
Abbildung 84: Modul 3D Druck, Quelle: Eigene Darstellung .....	77
Abbildung 85: Sensorsubstratplatte, Quelle: Eigene Darstellung .....	78
Abbildung 86: Externe Glas Referenzelektrode .....	79
Abbildung 87: SST aufgebaut, Quelle: Eigene Darstellung.....	80
Abbildung 88: PMMA Block, Quelle: Eigene Darstellung .....	80
Abbildung 89: Messkanal, Quelle: Eigene Darstellung.....	81
Abbildung 90: Flachdichtung Silikon, Quelle: Eigene Darstellung.....	82
Abbildung 91: Kniehebelspanner, Quelle: Eigene Darstellung.....	82
Abbildung 92: Einbau Externe Referenzelektrode, Quelle: Eigene Darstellung .....	83
Abbildung 93: Schlauchverschraubungen, Quelle: Eigene Darstellung .....	84
Abbildung 94: SST aufgebaut, Quelle: Eigene Darstellung.....	84
Abbildung 95: SST Problem Luftblasen, Quelle: Eigene Darstellung.....	85
Abbildung 96: SST Nacharbeit, Quelle: Eigene Darstellung .....	85