



Masterarbeit

# **Neuentwicklung eines Tauchcomputers mit berührungssensitivem Display**

verfasst von

Florian Thallinger BSc.



Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Clemens Holzer

Betreuer: Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Thomas Lucyshyn

Geschäftsführer der Partnerfirma: Dipl.-Ing Dr. mont. Arne Sieber

Leoben, November 2014

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature in this volume.

---

Datum

---

Unterschrift

## **Danksagung**

Für das Zustandekommen und die Durchsicht dieser Arbeit möchte ich dem Vorstand des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung, Herrn Univ.-Prof. Dipl.Ing. Dr.mont. Clemens Holzer, herzlich danken.

Mein größter Dank gilt meinem Betreuer Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Thomas Lucyshyn und dem Geschäftsführer der Firma Seabear Diving Technology, Herrn Dipl.-Ing Dr.tech. Arne Sieber, ohne deren Geduld und kompetentem Rat diese Masterarbeit kein positives Ende gefunden hätte.

Mein Dank gilt ebenfalls dem gesamten Team des Lehrstuhles Spritzgießen und Kunststoffverarbeitung der Montanuniversität Leoben, welches mir während dieser Arbeit immer mit herzlichem Entgegenkommen und gutem Rat zur Seite stand. Speziell Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont Gerald Berger möchte ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen. Ohne seine aktive Unterstützung im Bereich Spritzgussimulation hätte diese Arbeit kein positives Ende gefunden.

Außerdem gilt mein Dank auch Herrn Christopher Fischer MSc. BSc., welcher mir mit kompetentem Rat und fachlichem Know-how zur Seite stand.

Im Speziellen möchte ich dem Team der Abteilung „Werkstoffentwicklung“ der Firma Gebauer und Griller Kabelwerke Ges.m.b.H danken, welches mich während der gesamten Diplomarbeit tatkräftig unterstützt hat. Hier möchte ich vor allem Herrn Ing. Michael Kaufmann danken, ohne dessen fundiertem Wissen und Hilfsbereitschaft im Bereich Analytik der organischen Chemie diese Masterarbeit nicht zu Stande gekommen wäre.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Mutter und meiner Schwester danken, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt und begleitet haben.

## Kurzfassung

In der Welt des Tauchens hat sich in den letzten Jahrzehnten viel verändert. Neben den technischen Weiterentwicklungen der Tauchgeräte wird auch verstärkt auf den Trage- und Bedienkomfort geachtet. Ein Tauchcomputer für das Handgelenk mit berührungssensitivem Display und ergonomisch geformten Gehäuse verbindet die technische Weiterentwicklung mit dem Komfort der schnellen, einfachen und übersichtlichen Bedienung.

Ziel dieser Arbeit war es, einen Tauchcomputer mit berührungssensitivem Display zu entwickeln. Hierfür wurde ein Touchpanel benötigt, welches auch unter erhöhtem Außendruck auf die Eingabe des Fingers reagiert. Es musste ein Gehäusedesign entwickelt werden, in dem alle notwendigen Komponenten Platz haben, das eine 100 %ige Wasserdichtheit aufweist und sich ergonomisch an das Handgelenk anpasst.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein System aus Silikonöl und partiell verklebtem Touchpanel entwickelt. Dadurch funktioniert die berührungssensitive Einheit auch unter Wasser. Der Tauchcomputer und der Hohlraum zwischen Polymerfolie und Glasträger des Touchpanels werden mit Silikonöl gefüllt. Damit herrscht innerhalb des Tauchcomputers ein hydrostatischer Druckzustand, wodurch das Touchpanel auch unter Wasser auf den zusätzlich durch den Finger ausgeübten Druck reagiert.

Um die Wasserdichtheit zu garantieren, konnte eine spezielle Art der Verklebung gefunden werden. Diese besteht aus einem dauerplastischen, hoch adhäsiven Material auf Basis von Butylkautschuk, welches ausreichend gegen das Silikonöl beständig ist. Diese Beständigkeit wurde durch verschiedene Tests wie Extraktion, Thermogravimetrische Analyse und Gaschromatographie bestätigt.

Das Gehäuse wurde nach allen gegebenen Anforderungen designt. Das Design garantiert die Wasserdichtheit und beinhaltet alle notwendigen Komponenten. Zusätzlich wurde versucht, die Wandstärke möglichst gering zu halten, um Gewicht zu sparen, was sich auch positiv auf die Produktion auswirkt. Um den Tragekomfort zu erhöhen, wurde das Gehäuse an den Unterarm angepasst. Hierfür wurde eine Studie zur Ermittlung der durchschnittlichen Breite des Unterarms durchgeführt.

Für das Gehäuse wurden verschiedene Materialien gefunden, welche den Anforderungen entsprechen würden. Auf Basis dieser Ergebnisse konnten Füllsimulationen durchgeführt werden, die die Spritzgießbarkeit des Gehäuses bestätigten und einen Werkzeugvorschlag zuließen.

Zusammenfassend wurden alle Aufgabenstellungen erfolgreich gelöst. Es konnte die berührungssensitive Einheit an die erschwerten Umgebungsbedingungen angepasst werden. Zusätzlich wurde ein Gehäusedesign konstruiert, Materialvorschläge für dieses gefunden und die Spritzgießbarkeit bestätigt. Der Tauchcomputer ist allerdings noch nicht serienproduktionsreif. Es müssen Prototypen angefertigt werden, um die Einzelergebnisse und das Zusammenspiel der Komponenten zu bestätigen.

## **Abstract**

The field of diving has changed much over the last decades. In addition to the technical advantages of the diving equipment there is also an increasing focus on comfort and ease of use. A diving computer for the wrist with a touch-sensitive display and ergonomically designed case combines the technical advancement with the convenience of fast, easy and clear operation.

The aim of this thesis was to develop a diving computer with a touch-sensitive display. For this a touch panel is required, which reacts to the input of the finger under increased external pressure. A chassis has been developed in which space is provided for all the necessary components, which guarantees 100% waterproofness and fits ergonomically to the wrist.

In this work a system of silicone oil and a partially bonded touch panel was developed which allows the touch-sensitive unit to operate under water. The diving computer and the space between the polymer film and the glass substrate of the touch panel are filled with silicone oil. Therefore there is a hydrostatic pressure condition inside the diving computer, whereby the touch panel also reacts to the additional pressure exerted by the finger when submerged under water.

A special type of bonding was found to guarantee the waterproofness. It consists of a permanently plastic, highly adhesive material, based on butylene rubber that withstands the silicone oil. The resistance of the adhesive to the silicone oil was confirmed by various tests such as extraction, thermogravimetric analysis and gas chromatography.

The chassis has been designed for all given requirements. The design ensures waterproofness and includes all necessary components. Additionally an attempt was made to keep the wall thickness as low as possible, which also has a positive effect on the production. To increase comfort, the chassis has been adapted to fit the forearm. For this purpose, a study to determine the average width of the forearm was performed.

Various materials for the housing were found which meet the requirements. Based on these results, filling simulations were performed, confirming the injection moldability of the housing and allow a tool proposal.

To summarize, all tasks were successfully completed. The touch-sensitive unit has been adapted to the difficult conditions of the area of application. In addition, a chassis design was constructed, material suggestions were found for the chassis and with these results the injection moldability has been confirmed. However, the dive computer is not yet suitable for mass production. Some prototypes are necessary to confirm the individual results and the interaction of the components.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b>	<b>3</b>
2.1	TOUCHPANELS	3
2.1.1	Allgemeines	3
2.1.2	Resistive Touchpanels	3
2.1.3	Kapazitive Touchpanels	6
2.2	BUTYLKAUTSCHUK (IIR)	8
2.3	SILIKONÖL	11
2.3.1	Silikone	11
2.3.2	Silikonöle	13
2.4	KLEBEN	14
2.5	METHODEN ZUM NACHWEIS DER MATERIALSCHÄDIGUNG VON KUNSTSTOFFEN	17
2.5.1	Extraktion	17
2.5.2	Gas-Chromatographie	19
2.5.3	Thermogravimetrische Analyse (TGA)	24
2.6	SPRITZGUSSSIMULATION	28
<b>3</b>	<b>PRODUKTANFORDERUNGEN UND VORGEHENSWEISE</b>	<b>34</b>
3.1	ANFORDERUNGEN AN DEN TAUCHCOMPUTER	34
3.2	VORGEHENSWEISE	37
<b>4</b>	<b>DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERGEBNISSE</b>	<b>39</b>
4.1	TOUCHPANEL	39
4.1.1	Vorentwicklungen	39
4.1.2	Firmenrecherche und Befüllungsversuche	40
4.2	MATERIALVORAUSSWAHL	44
4.3	VERBINDUNG TOUCHPANEL/GEHÄUSE	50
4.3.1	Literaturrecherche	50
4.3.2	Prüfung auf Beständigkeit der Verbindung gegen Silikonöl und Nachweis der Dauergebrauchstemperatur	54
4.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Verbindungsauswahl	67
4.4	GEHÄUSEDESIGN	68
4.4.1	Konstruktionstechnische Richtlinien in Bezug auf den Tauchcomputer	68
4.4.2	Gehäusedesign 1	72
4.4.3	Gehäusedesign 2	75
4.5	SPRITZGUSSSIMULATION	77
4.5.1	Cadmould Simulation Gehäusedesign 1	78
4.5.2	Cadmould Simulation Gehäusedesign 2	81
4.5.3	Zusammenfassung und Werkzeugvorschlag	87
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>91</b>
<b>6</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>96</b>
<b>8</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>99</b>

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>9</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>100</b>
<b>10</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>104</b>
10.1	EXTRAKTIONSMESSUNGEN.....	104
10.2	GC/MS CHROMATOGRAMME DER EINZELMESSUNGEN.....	106
10.3	MASSEVERLUSTKURVEN DER EINZELNEN TGA UNTERSUCHUNGEN.....	120
10.4	VERZUGSERGEBNISSE DER GEHÄUSEDESIGNS IN DEN EINZELNEN EBENEN .....	124
10.5	FIRMENRECHERCHE .....	136

# 1 Einleitung

Wasser, als häufiger Bestandteil der Erde, spielt seit jeher eine große Rolle in dem Leben des Menschen. Zivilisationen bildeten sich von Anbeginn der Geschichte nahe an Flüssen und anderen Gewässern. Diese Gewässer dienten und dienen auch heute noch als Nahrungsgrundlage und als Transportwege. Aufgrund der zentralen Bedeutung des Wassers im Leben des Menschen ist es nicht verwunderlich, dass dieser die Bereiche unter der Wasseroberfläche zu erkunden versuchte. [18, 23]

Die Tradition des Tauchens geht zurück bis 4500 vor Christus. Hier beweisen archäologische Funde, dass sogenannte Apnoetaucher aus Indien und Ostasien im Arabischen Meer nach den Schätzen des Meeres tauchten. Über die Zeit hinweg wollte man immer weiter in die Tiefen der Meere vordringen. Der Mensch mit seinem begrenzten Lungenvolumen stößt hier allerdings an seine Grenzen. Daher wurden im Laufe der letzten Jahrhunderte immer bessere und effizientere Hilfsmittel für einen möglichst tiefen und langen Tauchgang entwickelt. [18,23]

Dies beginnt bei dem Prinzip der Tauchglocke von Aristoteles, über den Schnorchel im alten Rom, bis hin zu den Tauchanzügen und Druckluftflaschen im 18. Jahrhundert. Diese Erfindungen sind alles Grundlagen der heute eingesetzten Tauchcomputer, Atemgeräte und Neoprenanzüge. [18,23]

In dieser Arbeit werden der Tauchcomputer und sein Einsatzzweck behandelt. Tauchcomputer werden vor allem für Tauchgänge verwendet, bei denen sich der/die TaucherIn auf keiner konstanten Tiefe befindet (Multileveltauchgänge). Sie informieren den/die TaucherIn über alle tauchgangsrelevanten Informationen wie Tiefe, Druck, Zeit und Dekompressionsstopps. Aufgrund des erhöhten Umgebungsdruckes unter Wasser kommt es zu einer Aufnahme von Inertgasen (Henrys Gesetz). Ein zu schnelles Auftauchen aus großen Tiefen führt zu der Abgabe dieser Inertgase in den Körper und in weiterer Folge zur sogenannten Dekompressionskrankheit. Daher muss der/die TaucherIn, je nach Tiefe und Länge des Tauchganges, in bestimmten Abständen während des Auftauchens Dekompressionsstopps einhalten. Erst wenn die Inertgasdrücke einen gewissen Wert unterschreiten, darf der/die TaucherIn seine/ihre Distanz zur Oberfläche verringern. [49]

Um die Tauchgänge zu verlängern und die Dekompressionsstopps zu verkürzen, atmet der/die TaucherIn während seines/ihres Tauchganges keine reine Luft ein. Über einen Atemregler wird ein Gasgemisch aus verschiedenen Inertgasen (Helium, Stickstoff, Sauerstoff) zugeführt. Moderne Tauchcomputer ermitteln aufgrund der Tiefe und Zeit, über ein Dekompressionsmodell, das optimale Gasgemisch und die einzuhaltenden Dekompressionsstopps. Über die Eingabeeinheit des Tauchcomputers muss der/die TaucherIn dem Computer mitteilen, welches Gas gerade eingesetzt wird. Er/Sie kann über die Eingabeeinheit auch alle anderen relevanten Informationen wie Flaschendruck, Resttauchzeit und in manchen Fällen auch physiologische Daten wie die Herzfrequenz abrufen. [45]

Unter Wasser muss eine möglichst einfache und schnelle Eingabe in den Tauchcomputer möglich sein. Es existiert eine Vielzahl von Bedienelementen, welche alle auf unterschiedliche Weise funktionieren. Typische Bedienelemente sind mechanische Tasten [47],



## 1. Einleitung

---

Piezoschalter [4] und Magnetschalter [50]. Eine spezielle Form der Bedienung ist die Anwendung von Beschleunigungssensoren, welche dem Benutzer eine Eingabe durch Klopfen auf die Seitenflächen des Tauchcomputers ermöglichen. [1, 7, 45]

Die Eingabemöglichkeiten über Schalter oder Stellräder sind durch die Zahl der Tasten begrenzt. Da moderne Tauchcomputer mehrere Menüs und eine sehr große Anzahl an Werten und Daten anzeigen können, lässt sich die Bedienung nur mit mehreren Tastendrückern realisieren. Dies kann unter Wasser schnell problematisch werden. Fällt ein Atemgas unvorhergesehen aus, so befindet sich der/die TaucherIn in einer akuten, nicht kalkulierbaren Stresssituation. In einer solchen Situation muss der/die TaucherIn den Computer auf ein alternatives Gasgemisch kalibrieren. Aufgrund des erhöhten Stressfaktors ist es leicht möglich, dass er/sie die Tastenkombination nicht fehlerfrei eingibt. Die falsche Kalibrierung kann sehr leicht zu Dekompressionsunfällen führen. [45]

Eine Alternative zu den erwähnten Bedienmöglichkeiten wäre der Einsatz eines Tauchcomputers mit berührungssensitiver Einheit. Über einen Touchscreen könnte der/die TaucherIn schnell, einfach und intuitiv den Tauchcomputer bedienen. Durch dieses System muss sich der/die TaucherIn keine Tastenkombinationen merken und kann in einer Stresssituation adäquat reagieren. Der Einsatz dieses Systems würde nicht nur den Bedienkomfort erhöhen, sondern könnte auch dazu beitragen, die Unfallrate durch falsche Dekompressionsstopps zu verringern. [45]

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein solches System prototypenreif zu entwickeln. Es existiert bereits ein Patent zu dieser Aufgabenstellung [44]. Im Laufe dieser Arbeit wird an dieses Patent angeknüpft und die Bereiche der berührungssensitiven Einheit, des Gehäuses und der Produktionsfähigkeit optimiert, weiter bzw. neu entwickelt und in die Prototypenreife übergeführt.

# 2 Theoretische Grundlagen

## 2.1 Touchpanels

### 2.1.1 Allgemeines

Touchpanels in Verbindung mit einem geeigneten Display sind in der heutigen Zeit aus dem Technologiesektor kaum wegzudenken. Seit dem ersten Touchpanel 1971 von Dr. Sam Hurst stieg die Nachfrage nach einer Möglichkeit zur berührungssensitiven Eingabeeinheit. Heutzutage sind Touchpanels in jedem Handy, Tablet und teilweise auch bereits in PC-Bildschirmen und Maschinensteuerungen eingebaut. [41]

Ihr Vorteil liegt nicht nur im Ersetzen von Maus und Tastatur, sondern vor allem in ihrer Unempfindlichkeit gegenüber Staub und Feuchtigkeit. Zusätzlich ist die Handhabung dieser Systeme sehr einfach und erfordert kein spezielles Know-how. Die Touchpaneltechnologie erlaubt es, rein durch Softwareupdates neue Eingabemethoden und Benutzeroberflächen zur Verfügung zu stellen. Diese Vorteile lassen sich auf alle verschiedenen Touchpaneltechnologien übertragen. [22, 24, 41]

Ein Touchscreen besteht im Allgemeinen aus vier Elementen: Dem Touchsensor, dem Controller, einem hinter dem Touchpanel liegenden Display und einem Softwaretreiber. Bei dem Touchsensor handelt es sich um eine berührungsempfindliche Oberfläche. Diese besteht meist aus einem optischen Glas oder aus einer durchsichtigen Polymerschicht, welche bei den verbreitetsten Verfahren unter Strom steht. Der Controller ist eine PC-Karte. Er dient dazu, das Signal des Touchsensors zu verarbeiten und an ein geeignetes Betriebssystem weiterzuleiten. Abschließend ermöglicht die Software, die Daten des Controllers zu interpretieren und das System dementsprechend reagieren zu lassen. Häufig werden als Softwaretreiber Mausemulatoren eingesetzt, um eine Berührung auf dem Bildschirm mit einem Mausklick gleichzusetzen. [24]

Seit 1971 wurden viele verschiedene Touchpanelsysteme entwickelt. Neben den am häufigsten eingesetzten resistiven und kapazitiven Touchpanels existieren in der heutigen Zeit zusätzlich Surface Acoustic Wave (SAW) und akustische Systeme, sowie optische Systeme, induktive Systeme und Dispersive Signal Technologie (DST) Systeme. Da während dieser Arbeit mit einem resistiven Touchpanel gearbeitet wurde, werden nachfolgend nur das resistive Touchpanel und zum Vergleich das kapazitive Touchpanel näher erklärt. [24, 32]

### 2.1.2 Resistive Touchpanels

Das resistive Touchpanel ist ein auf Druck basierendes System. Es besteht aus einem mit Indium Zinn Oxid (ITO) beschichteten Toplayer, einem Abstandhalter und einem ebenfalls mit ITO beschichteten Grundlayer. Bei dem Toplayer handelt es sich hauptsächlich um beschichtete Polyethylen (PE) oder Polyethylenterephthalat (PET) Folien. Der Grundlayer besteht meist aus Acrylglas (Abbildung 1). Dadurch ist der Toplayer für Berührungen flexibel und der Grundlayer bildet die stabile Oberfläche. [24]

## 2. Theoretische Grundlagen

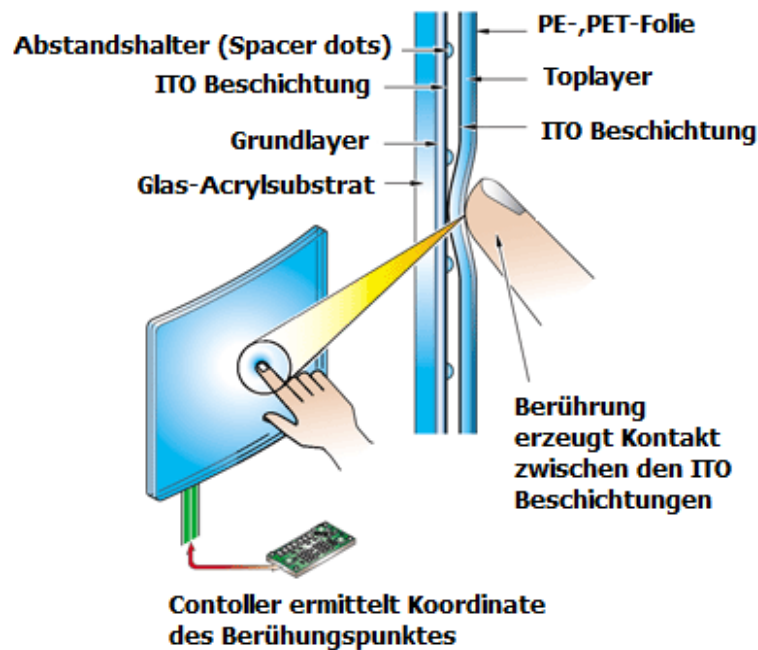


Abbildung 1: Aufbau eines resistiven Touchpanels [24]

Im Ausgangszustand sind die beiden leitenden ITO Beschichtungen durch die Abstandshalter (Spacer Dots) voneinander getrennt. An beiden Beschichtungen liegt eine geringe Spannung an. Durch die Spacer Dots kommt es ohne Fremdeinwirkung zu keiner Widerstands-, bzw. Spannungsänderung. Durch die Berührung werden die beiden leitenden ITO Schichten miteinander verbunden und es entsteht ein elektrischer Widerstand, welcher direkte Auswirkungen auf die angelegte Spannung hat. Je nach verwendetem System wertet der Controller nun die X- und Y-Koordinate des Berührungspunktes aus und das System reagiert dementsprechend darauf. [24]

### **4-wire resistive Touchpanels**

Bei den 4-wire resistiven Touchpanels dienen vier Kanäle als Verbindung zum Controller. Es werden beide ITO Beschichtungen zur Bestimmung des Berührungspunktes herangezogen. Auf beiden Schichten sind zwei Drähte derselben Art angebracht. Sie unterscheiden sich ausschließlich in ihrer Anordnung (Abbildung 2). [22, 24]

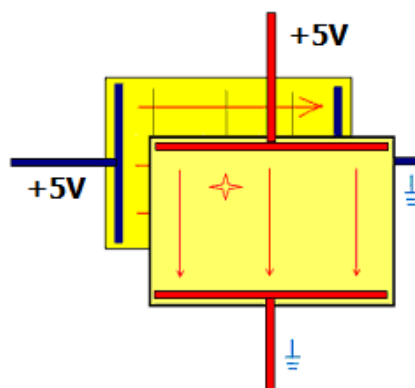


Abbildung 2: Kanäle des 4-wire resistiven Touchpanels [24]

## 2. Theoretische Grundlagen

---

Zu Beginn wird eine kleine Ladung von fünf Volt an einen der beiden Drähte der hinteren ITO Beschichtung angelegt. Je weiter entfernt sich der Berührungspunkte befindet, desto geringer wird die Ausgangsspannung. Abbildung 3 zeigt den Berührungspunkt bei 2,5 V. Dieser Wert wird an den Controller geliefert und ist die Position der X-Achse. Nun wird in Bruchteilen einer Sekunde die Spannung an einen der beiden Drähte der vorderen ITO Beschichtung geschickt. Der Spannungswert dieser Beschichtung liefert die Y-Koordinate. Über dieses System lässt sich zu jedem Zeitpunkt die Position der Berührung feststellen. [22, 24, 49]

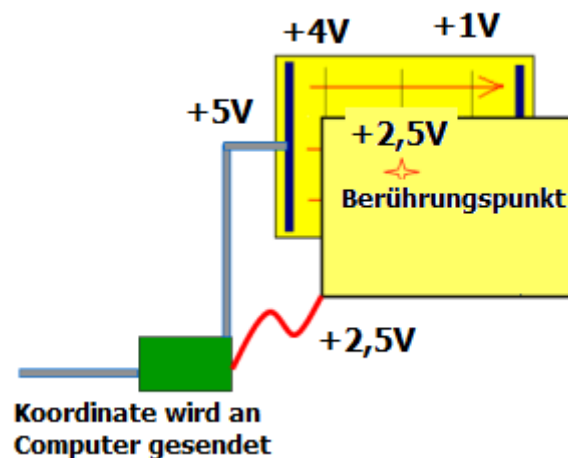


Abbildung 3: Auswertung einer Koordinate beim 4-wire resistiven Touchpanel [24]

### **5-wire resistives Touchpanel**

Im Gegensatz zum 4-wire resistiven Touchpanel verwendet das 5-wire resistive Touchpanel nur die hintere ITO Beschichtung zur Auswertung der Koordinaten des Berührungspunktes. Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau eines 5-wire resistiven Touchpanels. [22, 24]

Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, befinden sich auf der hinteren ITO Beschichtung vier Drähte mit den Eckpunkten A, B, C und D. Auf der vorderen ITO Beschichtung befindet sich der fünfte Draht, welcher für die Messung zuständig ist. Der Controller versorgt zuerst die Eckpunkte A und B mit Spannung, was zu einer vertikalen Ausbreitung der Ladung führt. C und D sind währenddessen geerdet. Durch die Berührung werden die beiden Schichten verbunden, über den Draht E wird die Ladung gemessen und die Y-Koordinate ausgegeben. Noch während der Berührung werden die Punkte A und C mit Spannung versorgt und die Punkte B und D geerdet. Durch den elektrischen Widerstand und den Draht E wird die X-Koordinate bestimmt. Somit ist, wie beim 4-wire resistiven Touchpanel, die Position der Berührung jederzeit bestimmbar. [22, 24]

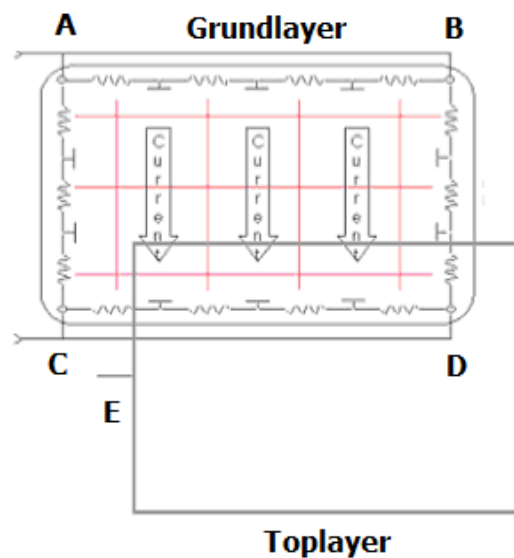


Abbildung 4: Aufbau eines 5-wire resistiven Touchpanels [24]

### Vorteile und Nachteile von resistiven Touchpanels

Der größte Vorteil der resistiven Touchpanels liegt darin, dass es sich um ein auf Druck basierendes System handelt. Daher kann die Eingabe auch mit Handschuhen unter einem Neoprenanzug oder mit Stiften und dergleichen erfolgen. Resistive Touchpanels können sehr leicht gegen Wasser abgedichtet werden. Sie weisen eine Reaktionszeit von drei Millisekunden auf, haben eine gute Langzeitstabilität, sowie eine hohe Positionsgenauigkeit und sind sehr kosteneffizient. [22, 26, 34, 49]

Nachteile dieser Technologie liegen in der Lichtdurchlässigkeit. Ein Touchscreen mit der resistiven Technologie verbraucht zirka 20 % - 25 % des ausgehenden Lichtes. Zusätzlich ist die Toplayerschicht sehr empfindlich, daher kann es bei der Verwendung von spitzen Gegenständen leicht zu einer Verletzung des Toplayers kommen. [26]

### 2.1.3 Kapazitive Touchpanels

Im Gegensatz zu den resistiven Touchpanels handelt es sich bei den kapazitiven Touchpanels nicht um ein druckinduziertes Verfahren. Bei den kapazitiven Panels wird ein Glasträger mit einer sehr dünnen Schicht ITO beschichtet. An den Ecken der Beschichtung des Substrates sind Elektroden integriert, welche durch Spannung ein elektrisches Feld über das gesamte Substrat aufbauen. Durch die Berührung eines kapazitiven, Ladung speichernden Mediums, kommt es zu einem Ladungstransport (Abbildung 5). Durch diesen Ladungstransport entstehen Ströme, die an den Eckpunkten durch die Elektroden aufgezeichnet werden. Die Störung des erzeugten Feldes gibt dem Controller Rückschlüsse darüber, an welcher Stelle sich die Berührung befindet. [17, 24]

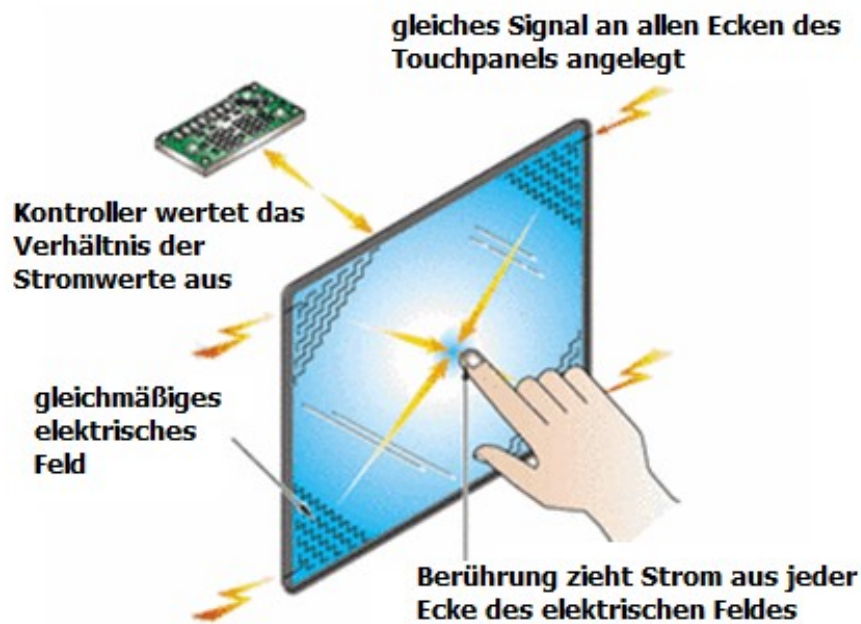


Abbildung 5: Funktionsweise eines kapazitiven Touchpanels [24]

Eine andere Technologie des kapazitiven Touchpanels besteht darin, ein Glassubstrat beidseitig mit dünnen ITO Bahnen zu beschichten. Auf der einen Seite erfolgt die Beschichtung in X-Richtung, auf der anderen Seite in Y-Richtung. Werden alle Bahnen der einen Seite gleichmäßig mit einer positiven Spannung versorgt und alle Bahnen der anderen Seite mit einer gleichmäßigen negativen Spannung, so verhalten sich die Kreuzungspunkte wie ein Kondensator mit einem Dielektrikum. Wenn ein kapazitives Medium die Glasplatte berührt, verändert sich das Feld und in der Folge auch die Spannungen an den Kreuzungspunkten. Der Controller misst die Ströme und ermittelt so die Position (Abbildung 6). [17, 40]

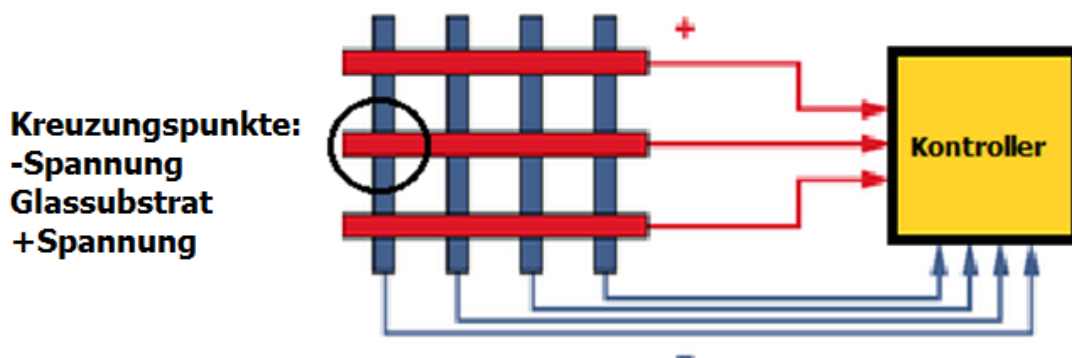


Abbildung 6: Kondensatorprinzip des kapazitiven Touchpanels [17]

Früher wurde die ITO Schicht, die mit dem kapazitiven Medium in Kontakt tritt, außen aufgebracht. Dies führte sehr schnell zu einer Abnutzung der Schicht. Durch moderne Algorithmen und leistungsfähigere Sensoren und Controller, ist es in der heutigen Zeit möglich, die ITO Beschichtung unter einer bis zu 13 mm dicken Glasscheibe anzubringen. Daher wird die Langlebigkeit um ein Vielfaches verbessert. [24, 26]

### **Vorteile und Nachteile von kapazitiven Touchpanels**

Im Gegensatz zu den resistiven Touchpanels wird die Lichtdurchlässigkeit bei den kapazitiven Touchpanels geringer negativ beeinflusst (< 10 %). Sie zeichnen sich durch ihre sehr große Langlebigkeit und ihre Positionsgenauigkeit aus. Da sie bereits auf geringste Berührungen reagieren, werden sie häufig für Bedienvorgänge wie Verschieben oder Scrollen verwendet. Daher sind sie in 99 % aller Laptops als Touchpads eingebaut. Zusätzlich sind kapazitive Touchpanels kalibrierungsfrei, da die Lage der Gitterstreifen fest bleibt [22, 40, 41].

Kapazitive Touchpanels sind kostenintensiver als resistive Touchpanels. Den größten Nachteil dieser Technologie stellt die notwendige Bedienung durch ein kapazitives Medium dar. Dadurch ist es nicht möglich, das Touchpanel für Anwendungen unter Wasser, oder zur Verwendung mit einem Stift einzusetzen. Zusätzlich wird die Reaktionsfähigkeit durch Schmutz oder Staub beeinträchtigt. [22, 26, 40]

## **2.2 Butylkautschuk (IIR)**

Butylkautschuk ist ein Copolymerisat aus Isobutylen und Isopren. Diese Copolymerisate sind seit 1942 am Markt. Vor dieser Zeit wurde hochmolekulares Polyisobutylen unter dem Markennamen Oppanol® als Zusatz für Klebstoffe, Kaugummi und als Additiv für Polyethylene verwendet. Oppanol ist bis heute am Markt erhältlich. [39]

### **Herstellung**

Die Herstellung von Butylkautschuk erfolgt über die kationische Copolymerisation von Isobutylen und geringen Mengen an Isopren, wobei der Isoprengehalt zwischen 0,5 Mol% und 2,5 Mol% liegt. Die Herstellung der einzelnen Monomere von Isobutylen und Isopren erfolgt durch den C4- bzw. C5-Schnitt bei der Naphthaherstellung. Die kationische Polymerisation von Butylkautschuk gliedert sich in folgende vier Schritte, wobei die Isopreneinheiten im Copolymer statistisch verteilt sind:

1. Start
2. Wachstum
3. Abbruch durch Protonenübertragung an das Monomer
4. Abbruch durch Protonenübertragung an den Katalysator

Abbildung 7 zeigt die chemischen Reaktionen während der einzelnen Schritte. Da die Polymerisationsreaktion sehr rasch geschieht, hängt die Molmasse im großen Ausmaß von der Polymerisationstemperatur ab. Würde man Isobutylen bei Raumtemperatur polymerisieren lassen, so ergeben sich Oligomere. Durch die Polymerisation bei tiefen Temperaturen ergeben sich langkettige Polymere. Daher verhält sich die Molmasse umgekehrt proportional zur Polymerisationstemperatur. [25, 39]

## 2. Theoretische Grundlagen

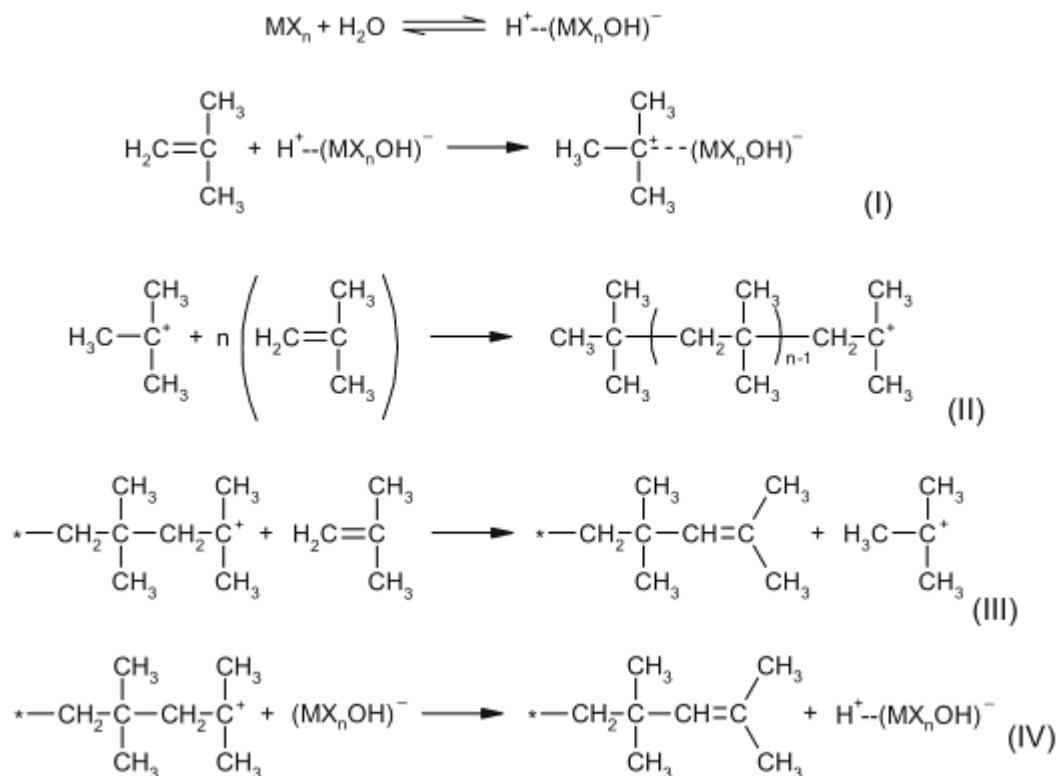


Abbildung 7: kationische Polymerisation von Butylkautschuk [39]

Großtechnisch erfolgt die Polymerisation von Butylkautschuk in Methylenechlorid bei Temperaturen von  $-100\text{ }^\circ\text{C}$ . Dabei wird  $\text{AlCl}_3$  als Katalysator eingesetzt. Das gekühlte Monomergemisch enthält eine Monomerkonzentration von 25 %, wobei der Gehalt von Isopren zwischen 0,5 % und 3 % variiert. Nach der Polymerisation werden die Lösungsmittelreste, sowie Monomerreste und die restlichen Kohlenwasserstoffe entfernt. Zusätzlich erfolgt in einem nachgeschalteten Extrusionsprozess die Entwässerung. Der so entstandene trockene Butylkautschuk wird abschließend zu Ballen gepresst. [39]

Butylkautschuke werden nicht nur in reiner Form polymerisiert, sondern auch unter Zusatz von Halogenen wie Brom oder Chlor. Diese sogenannten Chlorbutylkautschuke (CIIR) oder Brombutylkautschuke (BIIR) werden allgemein als Halogenbutylkautschuke (XIIR) bezeichnet. Ihr Vorteil liegt vor allem in der rascheren Vernetzung. Daher stellen sie den mengenmäßigen Hauptanteil an Butylkautschuken dar. Auf die Herstellung und Eigenschaften dieser Arten des Butylkautschuks wird im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht weiter eingegangen, da sie nicht essentiell für den Erfolg dieser Arbeit sind. [2, 25, 39]

### **Struktur von Butylkautschuk**

Die Struktur des Butylkautschuks ist linear und gelfrei. Handelsüblicher Butylkautschuk weist eine Mooney Viskosität von 30 bis 60 Einheiten auf, bei einer breiten Molmassenverteilung, mit einer mittleren Molmasse von 150.000 g/mol bis 500.000 g/mol. Die Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) von Butylkautschuk liegt bei  $-70\text{ }^\circ\text{C}$  und damit im Bereich von Naturkautschuk, welcher einen  $T_g$  von  $-73\text{ }^\circ\text{C}$  aufweist. Aufgrund der Vielzahl der Bewegungszustände der Polyisobutylenketten weist Butylkautschuk über einen großen Temperaturbereich eine hohe Dämpfung auf. Durch das günstige Dämpfungsverhalten des



## 2. Theoretische Grundlagen

Kautschuks wird er oft zur Stoß und Schwingungsdämpfung eingesetzt. Abbildung 8 zeigt den Vergleich der Rückprallelastizität von Butylkautschuk zu anderen Elastomeren. Daraus ist ersichtlich, dass Butylkautschuk, im Gegensatz zu Nitrilkautschuk (NR), Nitrilbutadienkautschuk (NBR) und Styrolbutadienkautschuk (SBR) in einem breiteren Temperaturbereich über eine geringe Rückprallelastizität verfügt, wodurch sich dieser Werkstoff als Schwingungsdämpfer eignet. [39]

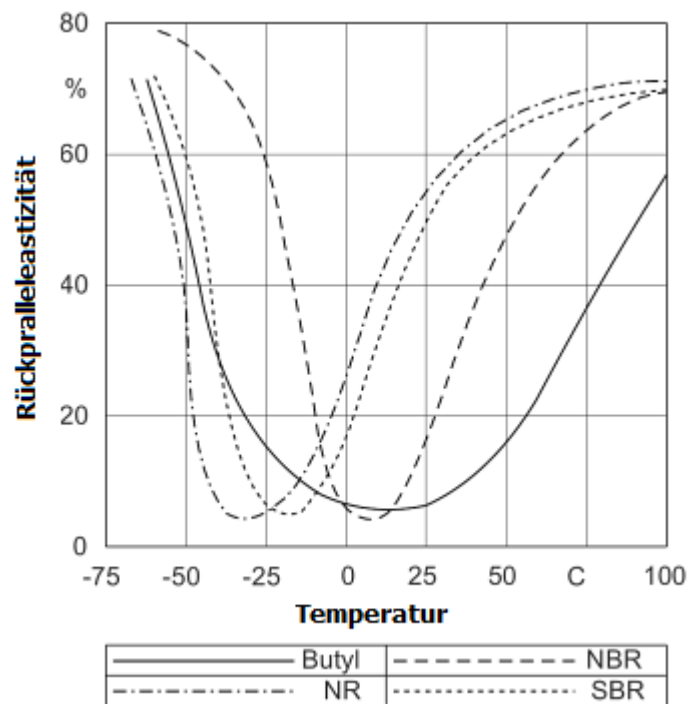


Abbildung 8: Temperaturabhängiger Vergleich der Rückprallelastizität von IIR mit anderen Elastomeren [39]

### Eigenschaften

Der Werkstoff zeichnet sich vor allem durch seine Beständigkeit gegen Wasser, wässrige Lösungen anorganischer Salze, Säuren und Alkalien, sowie starker Säuren, Laugen und stark oxidierender Lösungen aus. Diese Beständigkeit ist auch bei erhöhten Temperaturen gegeben. Eine Zerstörung des Werkstoffes tritt bei konzentrierter Salpeter-, sowie Salzsäure ein. [2, 13]

In Mineralölen und unpolaren Kohlenwasserstoffen tritt eine starke Quellung des Butylkautschuks auf. Geringe Quellung wird durch Butylcarbitol, Ethyl- oder Butylcellosolve verursacht. Der Werkstoff wird ebenfalls durch die meisten Chlorwasserstoffe angequollen. [13, 39]

Aufgrund der Anwesenheit von Doppelbindungen im Butylkautschuk ist der Werkstoff nur bedingt gegen Licht und Sauerstoff beständig. Dieser Umstand wird sehr stark durch die Halogenierung, durch Füllstoffe, sowie durch die Konzentration des Vernetzers beeinflusst. Mit steigendem Vernetzungsgrad nehmen die Risswachstumsgeschwindigkeit und die

## 2. Theoretische Grundlagen

---

kritische Dehnung ab. Eine hohe Konzentration an Füllstoffen, beispielsweise durch Ruß, kann zu einer erhöhten Rissbildung führen. Zusätzlich kann der Effekt der Elefantenhaut eintreten. Durch die Zerstörung der Elastomeroberfläche verdampft das abgebaute Material, was eine Schrumpfung der hochgefüllten Oberflächenschicht bewirkt. Dies führt zu einer Rissbildung, der sogenannten Elefantenhaut. Rußfreie bzw. ungefüllte Butylkautschuke weisen ein schlechtes Bewitterungsverhalten auf und bauen sich sehr schnell ab, wenn sie Sonnenlicht unter Luftzufuhr ausgesetzt sind. [13]

### Anwendungen

Der Anwendungsbereich von Butylkautschuk erstreckt sich von der Reifenindustrie über die Bekleidungsindustrie bis hin zur Dichtungsindustrie.

In der Pharmaindustrie finden vor allem halogenierte Butylkautschuke als Stopfen und Verschlüsse ihre Anwendung. Dabei ist die hohe Vernetzungsaktivität des Materials ausschlaggebend. Aufgrund der hohen Chemikalienbeständigkeit und geringen Gasdurchlässigkeit wird dieser Elastomer als spezielle Schutzkleidung, sowie als Dichtung und als Auskleidung für Tanks eingesetzt. Das Haupteinsatzgebiet des Butylkautschuks liegt jedoch in der Herstellung von Reifenschläuchen sowie als luftdichte Innenschicht schlauchloser Reifen, sogenannter „inner liner“ oder „Tubeless-Plate“. [2]

## 2.3 Silikonöl

### 2.3.1 Silikone

Silikone werden in der Chemie Polyorganosiloxane genannt und bezeichnen ein weites Spektrum von verschiedensten Werkstoffen, beginnend bei den Silikonölen, über Silikonemulsionen, bis hin zu Silikonkautschuken. Alle Silikone weisen ein Grundgerüst aus Silizium-Sauerstoffatomen auf. Durch verschiedene kohlenstoffhaltige Gruppen können die Eigenschaften der Silikone in einem großen Spektrum variiert werden. Durch den Einsatz dieser Gruppen werden die rheologischen Eigenschaften der Silikone von flüssigen Polymeren bis hin zu harzartigen Typen beeinflusst. Die wichtigste kohlenstoffhaltige Gruppe ist hier die Methylgruppe. Diese Gruppe ist um die Silizium-Sauerstoffkette frei drehbar und ist für den hydrophoben Charakter der Silikonprodukte verantwortlich. Die wichtigsten Eigenschaften der Silikone sind ihre gute Trennwirkung, die guten elektrischen Eigenschaften sowie ihre hohe Elastizität und ihre Umweltverträglichkeit. [11, 43]

Basis eines jeden Silikonproduktes ist elementares Silizium, welches industriell durch elektrochemische Reduktion mit Kohlenstoff bei 1400 °C gewonnen wird (Abbildung 9). [11]



Abbildung 9: Herstellung von elementarem Silizium [11]

Die industriell wirtschaftlichste Methode zur Herstellung von Silikonen ist die sogenannte Müller-Rochow Synthese. Das Verfahren dient zur Direktsynthese von Methylchlorsilanen aus

## 2. Theoretische Grundlagen

elementarem Silizium und organischem Methylchlorid (Abbildung 10). Dabei wird das Silizium mit Kupfer (Cu) als Katalysator in einem Wirbelschichtreaktor vermischt und das gasförmige Methylchlorid  $\text{CH}_3\text{Cl}$  eingeblasen. Es entstehen die wichtigsten monomeren Organochlorsilane (Abbildung 11). [3, 43]

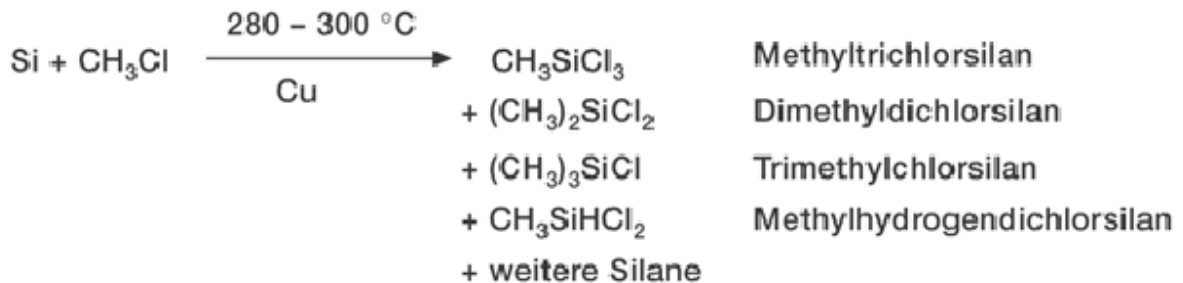


Abbildung 10: Müller-Rochow Synthese [11]

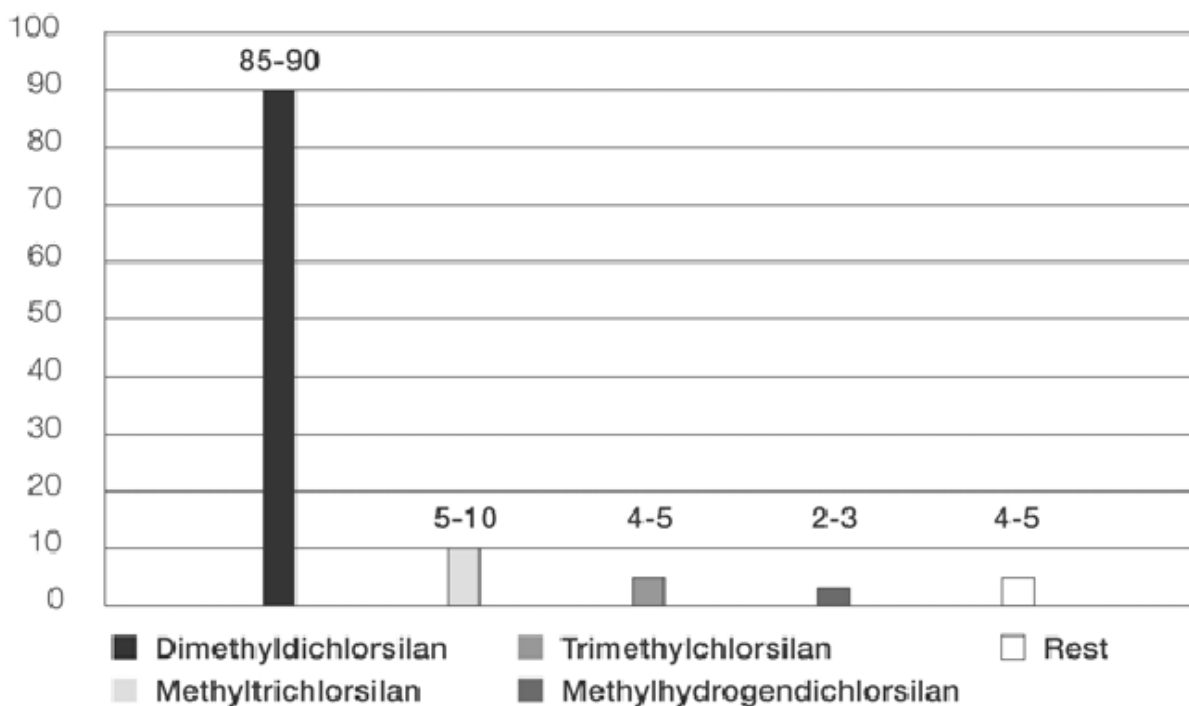


Abbildung 11: Produkte der Müller-Rochow Synthese (Angaben in %) [11]

Aus Abbildung 11 ist ersichtlich, dass sich zu 85 % - 90 % Dimethyldichlorsilan bildet, welches das wichtigste Organochlorsilan für die Herstellung von Silikonölen, Silikonemulsionen und Silikonharzen ist. Daher ist die Wirtschaftlichkeit der Müller-Rochow Synthese an der Ausbeute dieses Silans zu messen. Die optimale Ausbeute an Dimethyldichlorsilan wird über eine homogene Verteilung des  $\text{Si}/\text{CH}_3\text{Cl}$  Gemisches, sowie über den Cu-Katalysator erreicht. Zusätzlich wirkt sich die Temperaturführung des Reaktors auf die Ausbeute aus. Für die Herstellung von Silikonharzen ist das Methyltrichlorsilan essentiell. Für den Abbruch des Kettenwachstums während der Polykondensation wird das

## 2. Theoretische Grundlagen

Trimethylchlorsilan verwendet, welches ebenfalls in kleinen Mengen (Abbildung 11) bei der Müller-Rochow Synthese entsteht. [3, 11]

Die durch die Müller-Rochow Synthese hergestellten Organochlorsilane sind wasserklare, leicht bewegliche und farblose Flüssigkeiten. Bei der Produktion ist ein sehr hohes Maß an Reinheit geboten, da bereits geringe Verunreinigungen im ppm Bereich die Weiterverarbeitung stören. Der letzte Schritt der Herstellung von Silikonen ist die Substitution von OH unter Abspaltung von Chlorwasserstoff durch Hydrolyse. Dabei kondensieren die Monomere zu Siloxanketten, sogenannten Polysiloxanen. Abbildung 12 zeigt die Hydrolyse von Dimethyldichlorsilan zu Polymethylsiloxan. Die Kettenlänge des Polysiloxanmoleküls wird durch die Zusammensetzung des Silangemisches, sowie über die Art und Weise der Hydrolyse beeinflusst. [3, 11, 43]

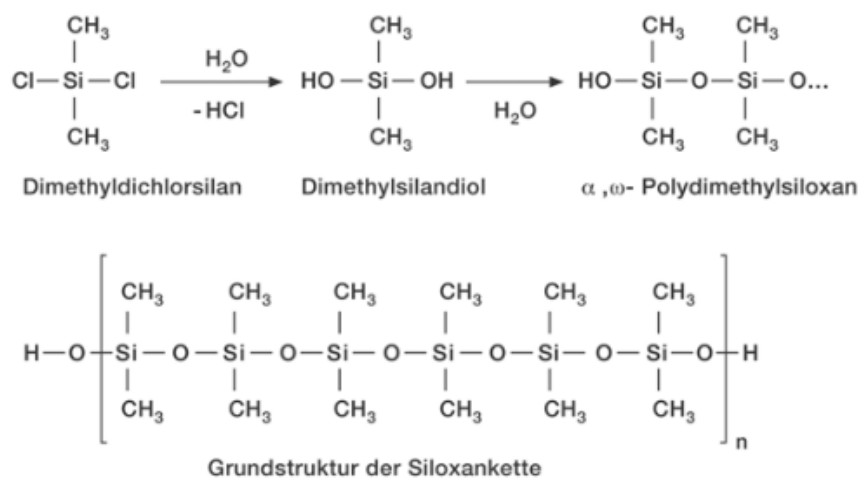


Abbildung 12: Hydrolyse von Dimethyldichlorsilan [11]

### 2.3.2 Silikonöle

Wie bereits erwähnt, wird das bei der Müller-Rochow Synthese entstehende Trimethylchlorsilan zur Steuerung der Kettenlänge von Silikonen verwendet. Durch den frühzeitigen Einsatz dieser sogenannten Kettenstoppern, entstehen Silikonöle mit unterschiedlichen Viskositäten. Die Grundstruktur der Silikonöle zeigt Abbildung 13. Je nachdem, wann der Kettenstopper eingesetzt wird, entstehen unterschiedlich lange Kettenmoleküle. Die Länge der Kette hat direkten Einfluss auf die Viskosität der Silikonöle. Tabelle 1 gibt Auskunft über den Zusammenhang zwischen Viskosität und Kettenlänge der Silikonöle. [11]

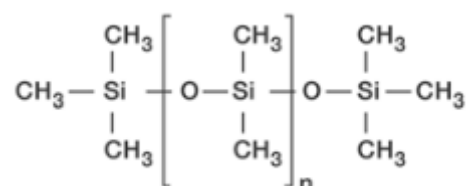


Abbildung 13: Grundstruktur der Silikonöle [11]

## 2. Theoretische Grundlagen

---

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Viskosität und Kettenlänge von Silikonölen [11]

mittlere Kettenlänge (n)	Viskosität (mPas)
0	0,65
5	5
10	10
40	50
70	100
100	200
200	1.000
400	5.000
500	10.000
1.030	100.000
2.200	1.000.000

Wie Tabelle 1 zeigt, reichen die Viskositäten der Silikonöle von 0,65 mPas bis  $1 \times 10^6$  mPas. Viele Hersteller von Silikonölen geben deren Viskosität bereits im Namen des Produktes an. Darunter befinden sich auch die Silikonöle der Wacker Chemie AG. Diese werden bei dem Silikonöl Elbesil von B0,65 bis B2.000.000 angeboten. 0,65 bis  $2 \times 10^6$  bedeutet in diesem Fall, dass die Silikonöle im Viskositätsbereich von 0,65 cSt bis  $2 \times 10^6$  cSt angeboten werden. Die Umrechnung von cSt in mPas ist eins zu eins. Dadurch ist ersichtlich, dass ein Silikonöl Elbesil B50 von Wacker eine Viskosität von 50 mPas bei einer mittleren Kettenlänge von 40 aufweist. [27, 28]

Durch den Kettenabbruch mit Trimethylchlorsilan sind Silikonöle weitgehend inert. Dieses inerte Verhalten kann durch den Einsatz von reaktiven, organischen Gruppen wie Aminoresten oder Glykolresten abgeschwächt und ein gestuftes Polaritätsverhalten erreicht werden. Zu ihren weiteren Eigenschaften zählen die Geschmacklosigkeit und die Geruchlosigkeit. Sie sind wassertransparente Flüssigkeiten. Durch die geringen intermolekularen Kräfte bleiben die Silikonöle über einen weiten Molekulargewichtsbereich flüssig. Silikonöle besitzen einen Flammpunkt von über 300 °C und einen Stockpunkt von -45 °C. Dabei ist auffällig, dass die physikalischen Eigenschaften wie Viskosität oder Wärmeleitfähigkeit kaum temperaturabhängig sind. [3, 5]

Aufgrund dieser Eigenschaften werden Silikonöle häufig als Trennmittel für die Entformung von Kunststoffteilen im Spritzgussbereich, sowie in der Reifenindustrie angewendet. Weitere Anwendungsgebiete sind Gleitmittel für Kunststofflager, Hydrauliköl für Stoßdämpfer, sowie der Einsatz als flüssiges Dielektrikum und Hydrophobierungsmittel. Neben diesen technischen Anwendungsgebieten werden Polysiloxanöle aufgrund ihrer Geschmacksneutralität und Umweltverträglichkeit auch in der Lebensmittelindustrie als Zusätze für Marmeladen, Bratöle und Kaugummis eingesetzt. [10, 11]

### 2.4 Kleben

Da bei vielen Verbindungen von Kunststoffen Spannungsspitzen, wie etwa beim Nieten oder beim Verschrauben unerwünscht sind, bedient man sich anderer Fügetechniken, die diese

## 2. Theoretische Grundlagen

Spannungsspitzen nicht aufweisen. Hierzu eignet sich z.B. das Schweißen. Da allerdings viele Kunststoffe nicht für das Verschweißen geeignet sind, wie etwa LCPs, welche nach dem Schweißprozess nur mehr eine Festigkeit von maximal 50 % aufweisen, greift man immer mehr auf das Fügen durch Kleben zurück. Bei diesem Prozess bleiben 100 % der Eigenfestigkeit erhalten und lokale Spannungsspitzen werden über die gesamte Klebefläche homogen verteilt. [30]

Wichtigster physikalischer Parameter bei der Verklebung sind die Adhäsionskräfte zwischen der Kunststoffoberfläche und den Klebstoffmolekülen. Eine Verklebung kann nur gewährleistet werden, wenn die Kohäsionskräfte des Klebers kleiner sind als die Adhäsionskräfte zwischen Kunststoffoberfläche und Klebermolekülen. Kleber weisen im Allgemeinen eine Oberflächenenergie von 35-40 mN/m auf. Daraus folgt, dass die zu verklebenden Kunststoffe eine höhere Oberflächenenergie aufweisen müssen. Der Nachweis erfolgt über den Tropfentest. Wird der Klebstoff auf den Kunststoff getropft, so verliert er seine Kugelform. Umso geringer der Benetzungswinkel  $\alpha$  ist, desto qualitativer ist die Verklebung, da der Kunststoff in diesem Fall eine sehr hohe Oberflächenenergie aufweist (Abbildung 14). [9, 31]

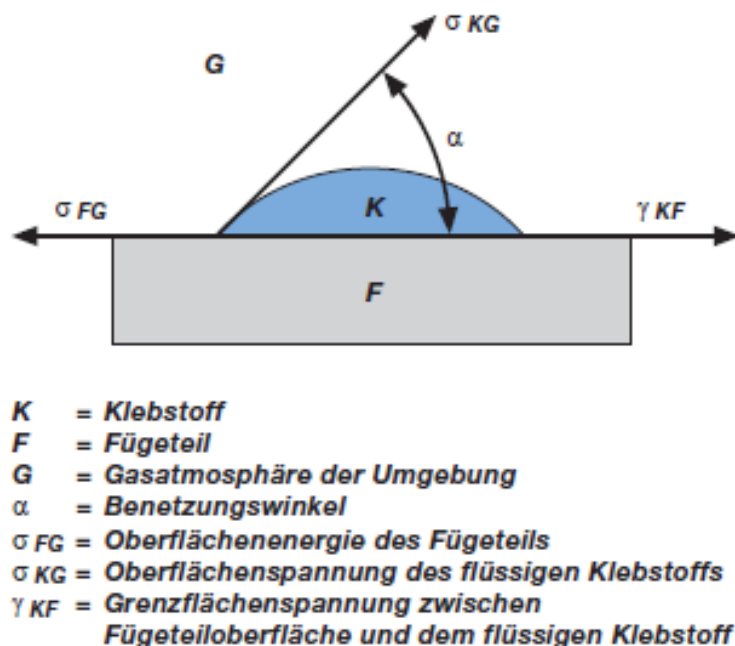


Abbildung 14: Benetzungswinkel beim Kleben [9]

Kunststoffe, die eine zu niedrige Oberflächenenergie aufweisen um eine qualitativ hochwertige Verklebung zu garantieren (Polyolefine wie PE) (Tabelle 2), müssen durch spezielle Oberflächenbehandlungen der Klebefläche vorbereitet werden [20, 31].

## 2. Theoretische Grundlagen

---

*Tabelle 2: Oberflächenenergie verschiedener Kunststoffe [20]*

Kunststoff	Kürzel	Oberflächenenergie (mN/m)
Acrylnitril-Butadien-Styrol	ABS	35-42
Polyamid	PA	49-57
Polycarbonat	PC	33-37
Polyethylen	PE	31
Polymethylmethacrylat	PMMA	33-44
Polybutylenterephthalat	PBT	35-38
Liquid crystalline polymers	LCP	33-37

Eine typische Oberflächenbehandlung ist das Beizen. Dabei wird die Oberfläche mit einer Säure behandelt. Bei Polyoxymethylen (POM) ist diese 85 %ige Phosphorsäure. Es existieren allerdings auch noch andere Verfahren zur Oberflächenbehandlung wie Coronaentladungen, UV-Strahlen oder Gasphasenfluorierung. Ein spezielles Verfahren ist die Behandlung der Oberfläche mit Plasma. [9, 20, 31]

Man unterscheidet zwischen Hochdruckplasmen wie Sonnen, Blitze oder Bogenentladungen und Niederdruckplasmen wie das Nordlicht, Glimmentladungen oder Neonröhren. In jedem Fall ist Plasma ein hochreaktives Gas und somit entweder teilweise, oder ganz ionisiert. Die Ionisierung geschieht hierbei durch die Anregung des Gases mit Mikrowellen. Das Plasma bewirkt eine höhere Polarität des Kunststoffes und somit eine Erhöhung der Oberflächenenergie. Dies geschieht durch den Effekt, dass in das ionisierte Gas Monomere eingebracht werden. Diese Monomere heizen sich spontan sehr stark auf, da die Moleküle mit Elektronen des Gases zusammenstoßen. Dadurch werden chemische Bindungen aufgebrochen und es können Reaktionen auftreten, wie Polymerisation der Monomere.

Abbildung 15 zeigt den Zusammenstoß der Monomere in einem Quarzrohr, dem sogenannten Plasmareaktionsraum, und die anschließende Anhaftung an die Substratoberfläche. Je nach Wahl der Monomere, welche in das Gas eingeleitet werden, können unterschiedliche Effekte auf der Kunststoffoberfläche beobachtet werden, wie z.B. hydrophile oder hydrophobe Schichten, Haft- oder Antihafschichten, sowie UV-Schutzschichten oder Diffusionssperrschichten. Um die Schichtdicken und die Eigenschaften besser steuern zu können, werden nach dem Reaktionsraum zusätzlich Monomere hinzugegeben (After-Glow Monomereinheiten). Durch das Brechen der chemischen Bindungen im Plasmareaktionsraum, entstehen Radikale, welche hoch reaktiv sind. Die zusätzlichen After-Glow Monomere starten das radikalische Kettenwachstum. After-Glow Monomere werden auch für das gezielte Vernetzen der Plasmaschicht verwendet. Dabei entstehen hochfeste Kratzbeschichtungen. [42]

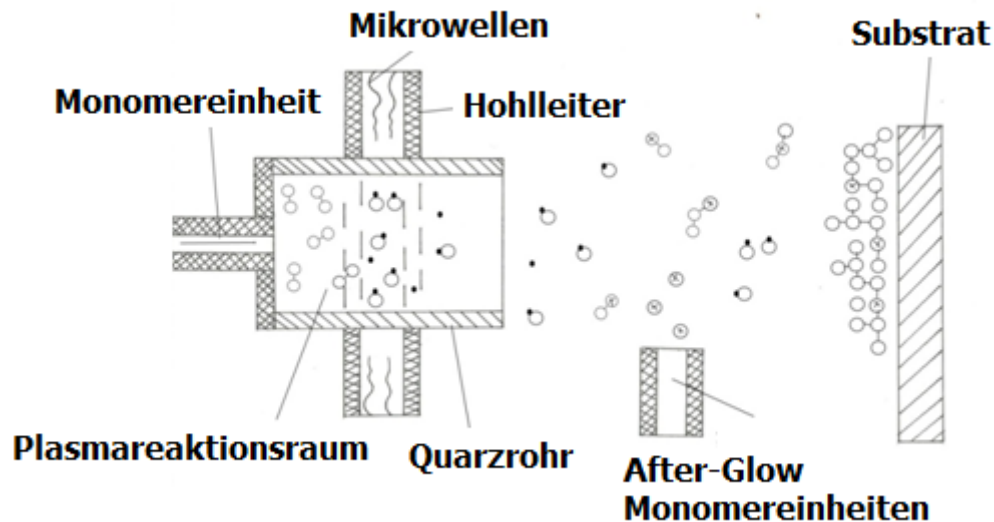


Abbildung 15: Funktionsweise des Plasmaprozesses [41]

Es gibt verschiedene Arten der Plasmabehandlung. Die wichtigsten sind die Niederdruckplasmabehandlung und die Atmosphärendruckplasmabehandlung. Die Niederdruckplasmabehandlung eignet sich vor allem für das Metallisieren oder Beschichten von Sperrschichtmaterialien, sowie für das Reinigen und Aktivieren von Folienbahnen. Die Atmosphärendruckplasmabehandlung erzielt ähnliche Effekte wie die Niederdruckplasmabehandlung, benötigt allerdings kein Vakuum, was sie attraktiv für kontinuierliche Prozesse mit hohen Geschwindigkeiten macht. [42]

## 2.5 Methoden zum Nachweis der Materialschädigung von Kunststoffen

### 2.5.1 Extraktion

Die Extraktion erweist sich als relativ einfache Methode zum Nachweis der Materialschädigung von bestimmten Kunststoffen. Allgemein bezeichnet die Extraktion ein Verfahren zur Überführung eines Stoffes von einer Phase, in der er gelöst oder suspendiert ist, in eine andere Phase. Die Feststoffextraktion im Speziellen wird zur Abtrennung eines Stoffes aus einem Feststoffgemisch mittels Lösungsmittel (Extraktionsmittel) verwendet. Wird ein Feststoffgemisch A in einem flüssigen Stoff B gelagert, so ist mittels Extraktion die quantitative Aufnahme des Stoffes B in Stoff A nachweisbar. [5, 12]

Es gibt verschiedene Arten von Extraktionsverfahren wie Flüssigextraktion, Feststoffextraktion, Perforation, etc.. Nachfolgend wird nur auf die Feststoffextraktion näher eingegangen, da nur dieses Verfahren für diese Masterarbeit maßgeblich ist.

Bei der Extraktion wird das Gemisch aus Lösungsmittel und extrahiertem Stoff als Extrakt, und der verbleibende Rückstand als Raffinat bezeichnet. Man unterscheidet zwischen Einfach- und Mehrfachextraktion. [5, 12]

Bei der Einfachextraktion wird das Raffinat mit dem Lösungsmittel erhitzt und das Extrakt anschließend filtriert oder dekantiert. Bei kleinen Mengen geschieht dies in einem



## 2. Theoretische Grundlagen

---

Reagenzglas. Für größere Mengen kann hier ein Rundkolben mit einem Rücklauf verwendet werden. [5, 12]

Bei der Mehrfachextraktion wird die eben erwähnte Prozedur mehrmals wiederholt. Hierfür stehen verschiedene, automatisch arbeitende Extraktoren zur Verfügung. Abbildung 16 zeigt die hierfür gebräuchlichsten Extraktoren. [5]

### Durchflussextraktor:

Durch den oben aufgebrauchten Kühler (1) wird die Substanz von dem im Kühler kondensierten Lösungsmittel ständig durchrieselt und daher strömt das Extrakt ständig in den unten angebrachten Kolben (3). [5]

### Soxhlet-Extraktor

Der Soxhlet-Extraktor unterscheidet sich vom Durchflussextraktor nur durch das zusätzlich angebrachte Heberrohr oder Heberknie (2). [5]

### Halbmikroextraktor

Die Halbmikroextraktoren werden für die Extraktion von hochsiedenden Lösungsmitteln verwendet. Durch Modifikation der eben erwähnten Extraktoren können diese ebenfalls zur Halbmikroextraktion verwendet werden. [5]

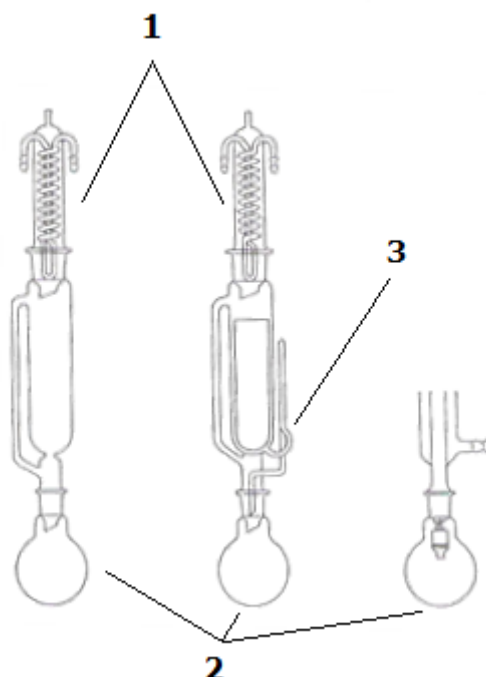


Abbildung 16: links: Durchflussextraktor; mitte: Soxhlet-Extraktor, rechts Halbmikroextraktor [5, 12]

Durch das aufgebrachte Heberknie erweist sich der Soxhlet-Extraktor als wirksamster Extraktor für reproduzierbare Ergebnisse. Das zu extrahierende Feststoffgemisch befindet sich in einer Extraktionshülse aus Pappe und das Extraktionsmittel im Rundkolben. Durch das Erhitzen des Extraktionsmittels bis zum Siedepunkt verdampft dieses. Der Dampf wird über

## 2. Theoretische Grundlagen

---

das seitliche Rohr zum Rückflusskühler geleitet und kondensiert dort. Das reine Lösungsmittel tropft anschließend in die Extraktionshülse. Dadurch steigt das Extrakt an der Außenwand der Extraktionshülse bis zur Höhe des Heberknies, durch welches es wieder in den Rundkolben zurückfließt und für einen neuen Extraktionsschritt bereit ist. Das Heberknie ist in das Dampfrohr eingebaut und wird daher immer vom heißen Dampf umspült. Das verhindert eine Ausfällung des gelösten Stoffes. Eine vollständige Extraktion kann mehrere Stunden dauern und erfordert je nach Feststoffgemisch und Anteil an gelösten Stoffen einige hundert Extraktionskreisläufe. [12]

### 2.5.2 Gas-Chromatographie

Die Gas-Chromatographie (GC) dient zur quantitativen und qualitativen Trennung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen. Der zu trennende Stoff befindet sich in einer Kapillare und wird vom Trägergas durchspült. Die flüchtigen Bestandteile, welche durch das Trägergas mitgenommen werden, können anschließend über einen geeigneten Detektor bestimmt und graphisch dargestellt werden. Dabei stellt das Trägergas die sogenannte mobile Phase und die Kapillare mit der unbekannt Substanz die stationäre Phase dar. Das Ergebnis der Gas-Chromatographie ist das sogenannte Chromatogramm. In der Kunststofftechnik wird die Gas-Chromatographie vor allem zur Bestimmung von niedermolekularen Abbauprodukten von Polymeren, sowie zur Identifikation von Zusatzstoffen eingesetzt. Für eine korrekte Auswertung eines GC-Versuchs ist neben den Kenngrößen des Chromatogramms auch die Anwendung der Gasgesetze, sowie Berechnung mehrerer Kenngrößen, wie etwa des Retentionsindex und die Rohrscheider-Konstanten notwendig. Die Bestimmung dieser Konstanten bzw. die Anwendung der Gasgesetze ist vor allem für die Bestimmung von unbekannt Substanzen zwingend erforderlich. In dieser Masterarbeit wird die GC für den Vergleich von Substanzen mit bekannten Inhaltsstoffen verwendet. Daher wird im Folgenden nicht auf die Anwendung der Gasgesetze und die Bestimmung der Kenngrößen eingegangen. [33, 41, 44]

Der zu untersuchende Stoff (gasförmig, flüssig, fest) wird über ein Probenaufgabeteil in eine Trennsäule gegeben. Innerhalb dieses Säulenofens findet der chromatographische Vorgang statt. Mit Hilfe des Trägergases wird die Substanz durch die thermostatierte Säule transportiert, nach dem Verlassen durch einen Detektor aufgezeichnet und über einen Schreiber, sowie einen Integrator auf dem PC wiedergegeben (Abbildung 17). Zur Auswertung der Peaks eines Chromatogramms stehen verschiedenen Datenbanken zur Verfügung [33, 44].

## 2. Theoretische Grundlagen

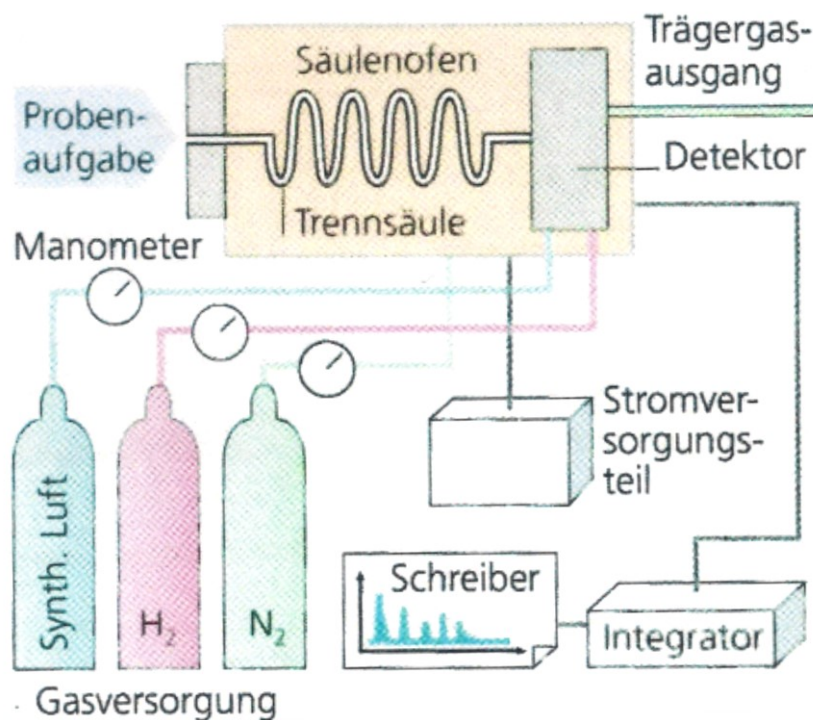


Abbildung 17: Aufbau eines Gas- Chromatographen [44]

Für die Probenaufbereitung von flüssigen Proben wird eine sogenannte Septumsinjektion verwendet (Abbildung 18). Dabei wird die Probe über ein Septum (Silikongummi) am Kopf der Säule in den Trägergasstrom eingebracht. Um eine unverzögerte Überführung in die Gasphase zu erreichen, befindet sich bei Flüssigkeiten ein getrennt vom Säulenofen beheizbarer Einspritzblock. [33, 44]

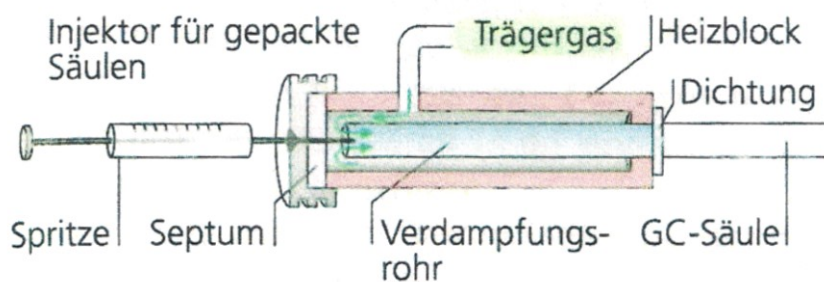


Abbildung 18: Septumsinjektion für die Untersuchung von Flüssigkeiten [44]

Für die Untersuchung mittels GC werden verschiedenste Probeaufbereitungen verwendet (Abbildung 19). Die gepackte Säule weist einen Innendurchmesser von 3 mm bis 8 mm und eine Länge von ca. 1 m bis 3 m auf. Die Kapillarsäulen haben einen Innendurchmesser von 0,2  $\mu\text{m}$  bis 1  $\mu\text{m}$  und eine Länge von bis zu 100 m. Kapillarsäulen werden als Dünnschicht- oder Dünnschichttrennsäulen ausgeführt. Bei den Dünnschichttrennsäulen befindet sich nur Trennflüssigkeit an der inneren Wand der Kapillare. Bei der Dünnschichttrennsäule befindet sich eine dünne Schicht aus Trennflüssigkeit und Trägermaterial auf der inneren Wand der Kapillare. Abbildung 16 zeigt die Dünnschichttrennsäule einmal mit reinem Trägermaterial (links) und einmal mit Trägermaterial und Trennflüssigkeit (rechts). Die Dünnschichttrennsäulen sind höher belastbar als die Dünnschichttrennsäulen. [33, 44]

## 2. Theoretische Grundlagen

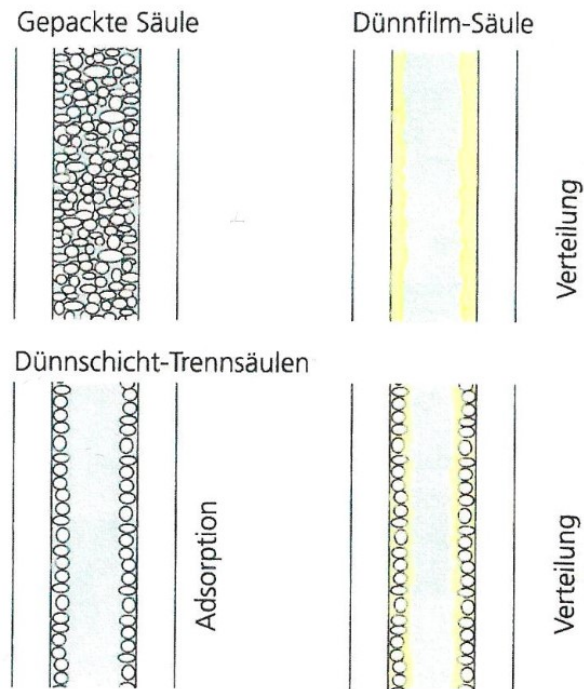


Abbildung 19: Links oben: gepackte Trennsäule, unten & rechts oben: verschiedene Kapillartrennsäulen [44]

Für GC-Trennungen werden hauptsächlich Kapillarsäulen verwendet. Besteht die zu trennende Substanz aus wenigen Komponenten, so wird in der Regel auch die gepackte Säule verwendet. Die Trennstufenanzahl (Anzahl der Gleichgewichtseinstellungen) liegt um den Faktor 100 höher als bei der gepackten Säule. Die Trennstufenhöhen (Trennleistung der Säule) sind um den Faktor 2 geringer. Mit Kapillarsäulen lassen sich Trennstufenanzahlen von 100.000 und mehr realisieren. Diese hohe Trennstufenanzahl wird durch die Länge der Säule realisiert. Abbildung 20 zeigt die bessere Auflösung der Kapillarsäule im Vergleich zur gepackten Säule. Die Gemischidentifikation ist mit Kapillarsäulen, durch die einfachere Auswertung der Peaks, schneller und vor allem nachvollziehbarer [33, 44].

## 2. Theoretische Grundlagen

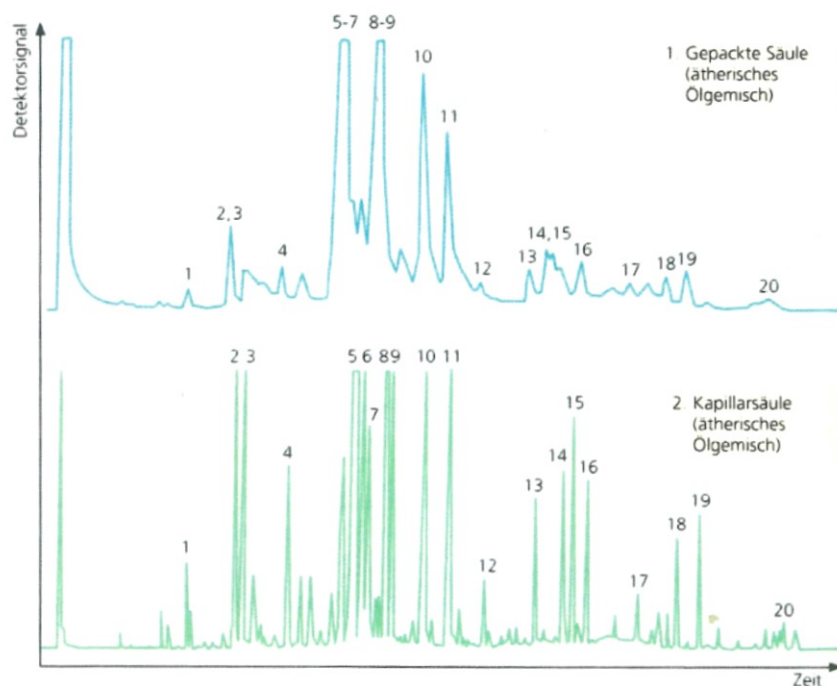


Abbildung 20: Unterschiede in der Auflösung zwischen Kapillarsäule und gepackter Säule [44]

Die mobile Phase (Trägergas) darf weder mit dem zu trennenden Gemisch, noch mit der Trennflüssigkeit oder dem Trägermaterial bei niedrigen, sowie bei hohen Temperaturen reagieren. Geeignete Gase für den Einsatz als mobile Phase sind Stickstoff (N), Helium (He), Argon (Ar) und mit Einschränkung Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlenmonoxid (CO). Die Gase müssen auch auf den Detektor abgestimmt werden. [33, 44]

Als universell einsetzbarer Detektor gilt der Wärmeleitfähigkeitsdetektor, der die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit zwischen Trägergas und zu analysierender Substanz feststellt. Am häufigsten wird der Flammenionisations-Detektor (FID) eingesetzt. Abbildung 21 zeigt den Aufbau eines solchen Detektors. Dabei wird das Trägergas/Eluat Gemisch am Ende der Trennsäule mit einem Gemisch aus Luft und Sauerstoff eingebracht. Das Gemisch strömt durch die Brennerdüse, den Glasteil und die darüber liegende als „Flame-Tip“ bezeichnete Anode. Durch die Verbrennung des Luft/Wasserstoffgemisches mit C-C-Bindungen oder C-H-Bindungen werden zuerst Radikale und anschließend über Pyrolyse oder Dissoziation, Ionen, wie das Methanol- Kation CHO<sup>+</sup> und Elektronen e<sup>-</sup> gebildet. Die Bildung von Ionen und Elektronen erfolgt zwischen Anode und Kathode. Ab einer Spannung von etwa 300 V fließt Strom zwischen Anode und Kathode, welcher als Signal registriert wird. Es wird nur etwa jedes millionste CH-Radikal ionisiert. Trotz der geringen Ausbeute an Reaktionen ist die Untergrenze der Nachweisbarkeit sehr gering, weil das Eigenrauschen der Flamme sehr niedrig ist. [33, 44]

## 2. Theoretische Grundlagen

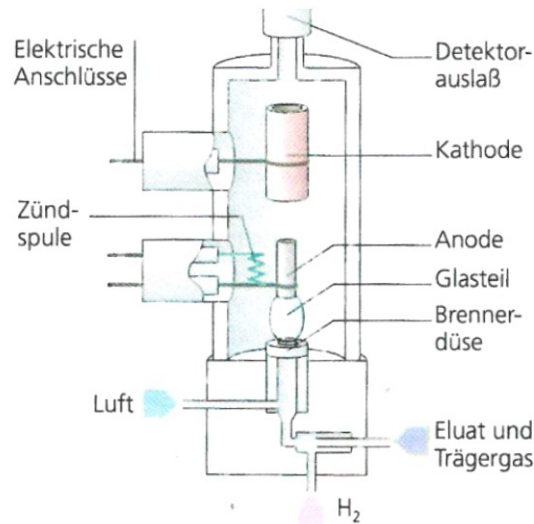


Abbildung 21: Aufbau eines FID Detektors [44]

Eine einfachere Möglichkeit der Detektion besteht in der Verwendung eines massenspektrometrischen Detektors (MSD). Dabei wird das Massenspektrometer direkt mit einer Säule gekoppelt. Dies ist bei der Kapillar-GC aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit des Trägergases möglich [33].

### Das Chromatogramm

Ergebnis der GC ist das Chromatogramm. Dabei wird das Detektorsignal (Abundanz) über die Zeit aufgetragen. Die häufigste Arbeitsweise zur Erstellung eines Chromatogramms ist die sogenannte Eluationstechnik. Die gelöste Probe wird am Kopf der Kapillarsäule aufgetragen und anschließend solange eluiert bis die zu trennenden Substanzen am Ende der Säule detektiert werden (Abbildung 22) [33].

Abbildung 22 oben zeigt schematisch eine Trennsäule mit einem Gemisch aus A und B. Dabei sieht man, von links nach rechts, den Weg des Gemisches durch die Trennsäule. Unterhalb wird das Detektorsignal über die Zeit aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass das Gemisch aus A und B sich über die Zeit in der Kapillare trennt. Der Stoff A bewegt sich schneller durch die Kapillare und wird daher auch zuerst vom Detektor aufgezeichnet.

Wie schnell sich ein Gemisch durch die Säule bewegt ist nicht nur von dem eingestellten Gasstrom abhängig, sondern auch von der eingesetzten mobilen und stationären Phase sowie von der eingesetzten Fritte. Eine Fritte ist dabei ein Filter aus Glas oder Keramik. Das Glas oder die Keramik sind leicht porös, sodass kleinste Partikel, wie durch ein Sieb hängen bleiben. Dadurch werden beispielsweise sehr kleine Partikel, welche die Messung stören könnten zurückgehalten.

## 2. Theoretische Grundlagen

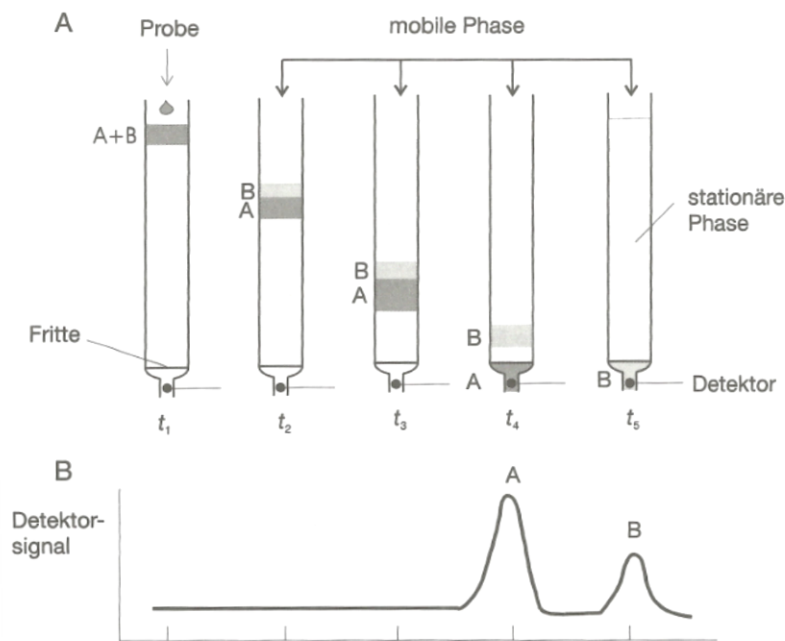


Abbildung 22: Elutionstechnik zur Erstellung eines Chromatogramms [33]

Sobald eine Substanz die Säule verlässt, wird diese vom Detektor aufgezeichnet und in Zeit und Intensität ausgewertet. Die Zeit, welche von der Substanz benötigt wird um durch die Kapillare zu gelangen, wird Retentionszeit ( $t_R$ ) genannt. [33]

Eine wichtige Kenngröße für die qualitative Bestimmung von Substanzen mittels GC, sind die einzelnen Retentionszeiten. Für eine Auswertung über die Retentionszeiten werden die Zeiten einer unbekannt Substanz mit den Zeiten einer bekannten Substanz verglichen. Allerdings ist die Reproduzierbarkeit mittels Retentionszeiten deutlich geringer als die Wellenlängengenauigkeit der Infrarot (IR)-Spektroskopie. Es lassen sich gute Aussagen über die An- oder Abwesenheit von Substanzen mittels GC treffen. Für eine genauere Bestimmung der Substanzen ist eine Kopplung von GC und IR- Spektroskopie notwendig [33].

Für die quantitative Analyse von Substanzen mittels GC werden die Peakhöhen, sowie die Peakflächen herangezogen. Bei der Auswertung der Peakhöhe muss auf eine genaue Kalibrierung über Standardsubstanzen geachtet werden. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass sich die Peakform nicht aufgrund von chromatographischen Bedingungen ändert. Dadurch wäre die Peakhöhe nicht mehr proportional groß oder klein zur Konzentration der Substanz. Störgrößen, welche die Peakhöhe beeinflussen, sind die Säulentemperatur, die Strömungsgeschwindigkeit und das Injektionsvolumen. Zusätzlich dürfen die Säule und der Detektor nicht überladen werden. Wird eine quantitative Aussage über die Peakfläche getroffen, so ist eine Veränderung der Peakform nicht von Bedeutung. Die Auswertung der Peakfläche erfolgt durch computerunterstützte numerische Integration und gibt ebenfalls Rückschlüsse auf die Konzentration der Substanz [33].

### 2.5.3 Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Die TGA gehört neben anderen Prüfverfahren zu den thermischen Analyseverfahren. Mit ihnen können neben Strukturveränderungen, mechanischen oder thermischen Eigenschaften

## 2. Theoretische Grundlagen

auch chemische Reaktionen wie Zersetzung, thermische Stabilität sowie Reaktionen in Lösung bzw. flüssiger Phase und Reaktion mit dem Spülgas bestimmt werden. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die gängigen thermischen Analyseverfahren und ihre Messgrößen. [16, 19].

Das thermogravimetrische Analyseverfahren basiert auf dem Prinzip der Masseveränderung in Abhängigkeit von der Zeit bzw. Temperatur. Masseveränderungen können durch verschiedene Vorgänge, wie etwa Verdampfen, Zersetzen, chemische Reaktionen oder durch Aufnahme von Gasen entstehen. Durch Auftragen der Masseveränderung über die Temperatur oder die Zeit können Rückschlüsse auf die Bestandteile im Kunststoff gezogen werden. Neben der Masseänderung ist auch der Verlauf der thermischen Zersetzung der Kunststoffprobe von Bedeutung. Es ist ebenfalls möglich, die TGA mit einem FT-IR Spektrometer, einem Gaschromatographen oder einem Massenspektrometer zu koppeln, um genauere Rückschlüsse auf die Bestandteile zu bekommen [16, 19].

*Tabelle 3: Überblick über die gängigen thermischen Analyseverfahren [16]*

Kurzzeichen	Verfahrensname/Messprinzip • Messgröße	Maßeinheit
DDK (DSC)	Dynamische Differenzkalorimetrie • Phasenumwandlungstemperaturen • Phasenumwandlungsenthalpien • spezifische Wärmekapazität	°C J/g J/(gK)
TGA	Thermogravimetrische Analyse • Masse • Masseänderung • thermische Stabilität • Zersetzungstemperatur	g % °C °C
TMA	Thermomechanische Analyse • Temperatureausdehnung • Ausdehnungskoeffizient • Erweichungsverhalten • spezifisches Volumen	1/K 1/K K cm <sup>3</sup> /g
DMA (DMTA)	Dynamisch-mechanische Analyse • viskoelastisches Verhalten • komplexe Steifigkeit • mechanischer Verlustfaktor • Umwandlungstemperatur • Frequenzen	MPa - °C Hz

Der Aufbau einer TGA ist relativ einfach gehalten (Abbildung 23). Die Probe befindet sich in einem geschlossenen Ofen, in dem eine definierte Atmosphäre vorherrscht. Der Ofen wird anschließend mit einem, je nach Prüfmethode, vorgegebenen Temperaturprogramm mit einer konstanten Heizrate aufgewärmt. Während dieser Aufheizung wird die Masse über eine Mikrowaage kontinuierlich gemessen und mit der Ausgangsmasse verglichen. Es kann sowohl



## 2. Theoretische Grundlagen

eine Masseabnahme durch Entweichen von Stoffen oder eine Massezunahme, durch z.B. Oxidationsreaktionen mit dem Spülgas oder der Luft, eintreten.

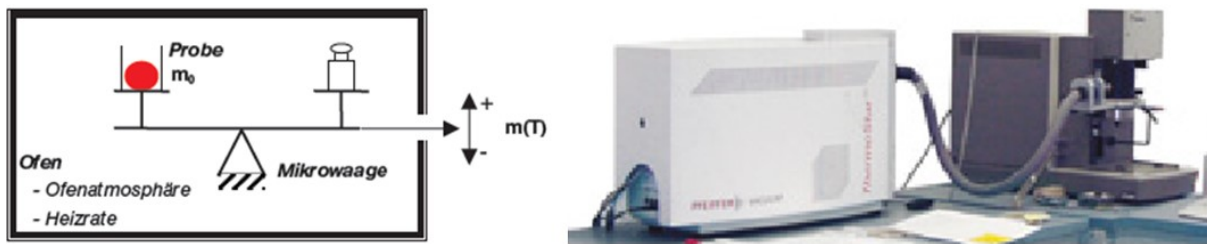


Abbildung 23: Aufbau einer TGA Apparatur: Links: schematisch; rechts: TGA-Gerät der Fa. TA Instruments, USA [16, 19]

Standardmessgeräte sind für Probewinngen bis zu 100 mg ausgelegt. Üblicherweise werden Ausgangsmassen von 10 mg bis 50 mg verwendet. Das Prüfverfahren startet meistens bei einer inerten Atmosphäre durch Stickstoff. Danach wird die Probe bis zur vollständigen Pyrolyse mit konstanter Heizrate aufgeheizt. Nach der Pyrolyse wird auf Sauerstoff als Spülgas gewechselt, um auch den entstandenen Pyrolyseruß und alle organischen Bestandteile des Kunststoffes zu verbrennen. Nach Abschluss des Messverfahrens bleiben nur anorganische Füllstoffe zurück (Abbildung 24). Organische Inhaltsstoffe, die während der TGA verbrennen, sind meist Farbstoffe, Farbrüße oder Kohlenstofffasern. Die eingesetzten Verarbeitungshilfsmittel wie etwa Weichmacher verflüchtigen sich während der Messung und führen ebenfalls zu einer Masseänderung. [16, 19]

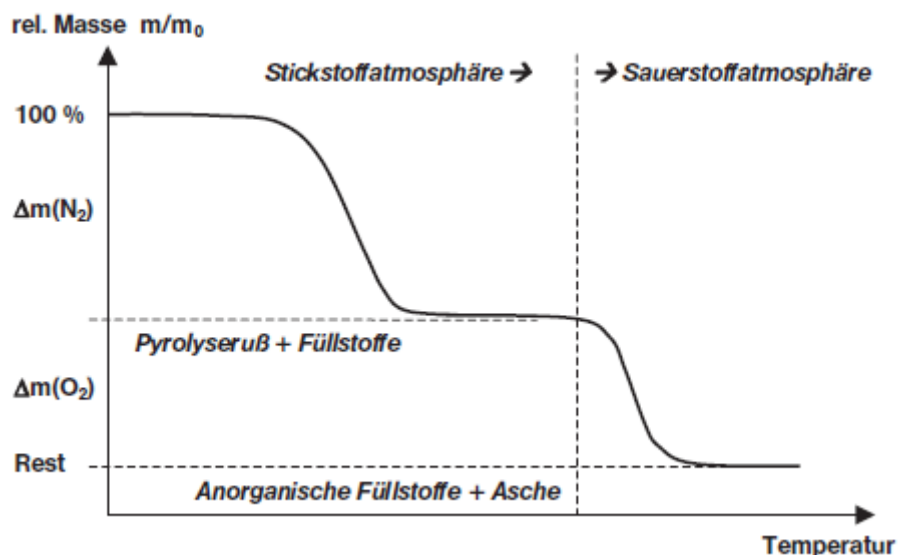


Abbildung 24: TGA Kurve mit konstanter Heizrate [16]

Jene Stoffe die mit dem Spülgasstrom aus dem Ofen geleitet werden, können mit den oben erwähnten Methoden qualitativ bestimmt werden. Der Aufwand solcher

## 2. Theoretische Grundlagen

Kopplungsmethoden ist sehr groß, erweist sich allerdings als sehr hilfreich zur Detektion von chemischen Reaktionen. [16, 19]

Die TGA Analyse kann sowohl als dynamische Messung oder auch als isotherme Messung durchgeführt werden. Bei der dynamischen Messung werden Heizraten von bis zu 20 K/min verwendet. Das Temperaturprogramm kann auch so gewählt werden, dass bei der dynamischen Messung die Ofenatmosphäre eine kurze isotherme Phase aufweist. Wird die Analyse isotherm durchgeführt, so erfolgt die Messung zeitabhängig. Als Abbruch für die Messung kann sowohl eine Endtemperatur, als auch eine bestimmte Restmasse herangezogen werden. Typische Endtemperaturen liegen bei 600 °C bis 1000 °C. [16, 19]

Bei der Auswertung von TGA Kurven sind folgende spezifische Einflussparameter zu berücksichtigen: Probenvorbereitung, Probeneinwaage, Spülgas und Spülgasstrom, Temperaturprogramm und Heizrate. Abbildung 25 zeigt eine TGA Kurve verschiedener Polyamide. Alle Polyamide weisen eine nahezu einheitliche Zersetzungstemperatur auf. PA6 und PA66 unterscheiden sich nur in ihrem nach dem Verbrennen verbleibenden Aschegehalt. PA66–GF 30 weist nach dem Verbrennen noch einen anorganischen Faseranteil auf, was zu einem geringeren Masseverlust führt. Die Messung aller drei Werkstoffe wurde bei gleicher Heizrate von 20 K/min, gleichem Spülgas, gleichem Gasstrom und gleicher Atmosphäre durchgeführt. Wäre einer dieser Faktoren unterschiedlich, könnte man keinen Vergleich der Kurven durchführen. Um TGA-Kurven qualitativ miteinander vergleichen zu können, müssen vor jeder Messung gleiche Prüfparameter garantiert werden [16].

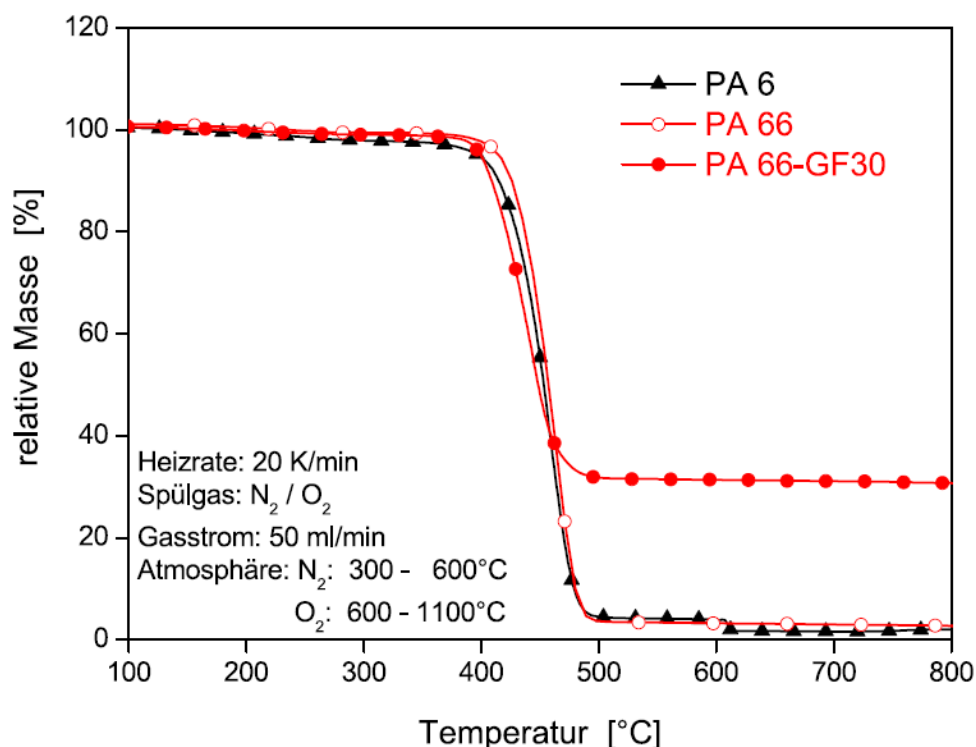


Abbildung 25: TGA-Kurven unterschiedlicher Polyamide [16]

### 2.6 Spritzgussimulation

Der Bereich der Kunststofftechnik ist ein stetig wachsender Bereich. Die Produktion an Kunststoff nimmt mit jedem Jahr zu (Abbildung 26). Durch dieses Wachstum nimmt auch die Vielfalt an Produkten zu. In Zeiten immer dünnwandigerer Bauteile und immer kürzerer Zykluszeiten rücken Simulationsprogramme immer mehr in den Vordergrund.

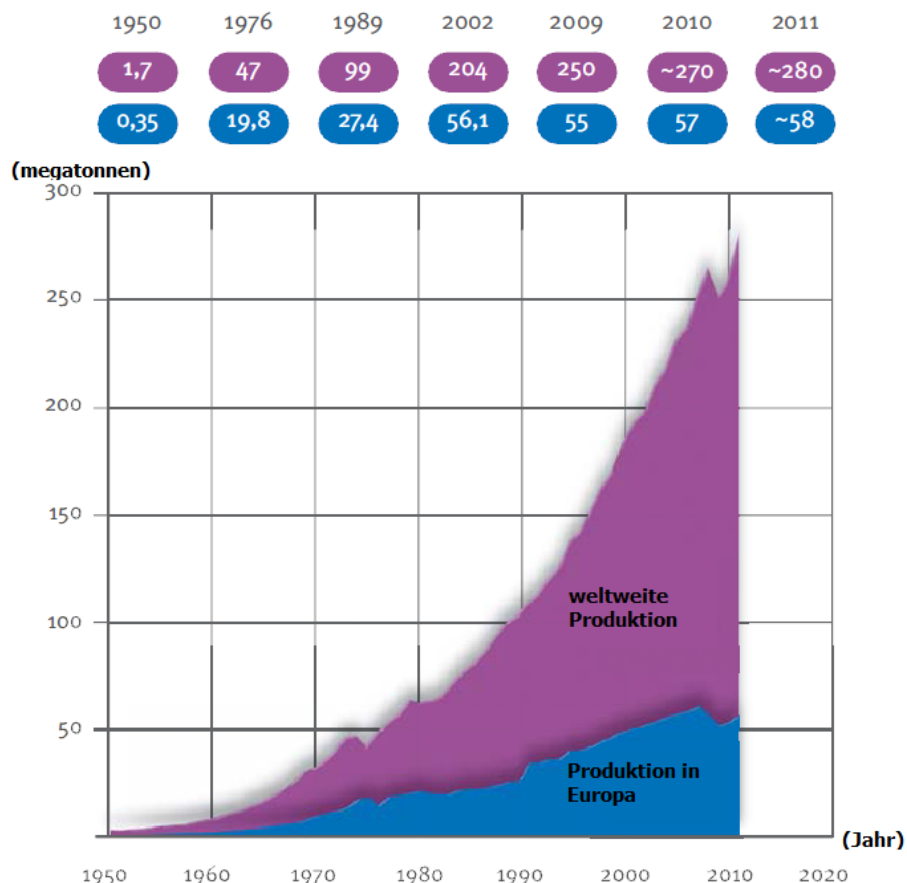


Abbildung 26: Produktion an Megatonnen Kunststoff weltweit und im europäischen Raum bis 2011 [38]

Insgesamt gibt es zurzeit fünf große Anbieter von Simulationssoftware im Spritzgussbereich: Autodesk Simulation Moldflow Insight, Cadmould 3D-F, Moldex3D, Sigmasoft und Simpoe-Mold. Da im Laufe dieser Masterarbeit nur das Programm Cadmould 3D-F angewendet wurde, wird nachfolgend spezifisch auf dieses Programm und seine Unterschiede zu anderen Programmen eingegangen [14, 15, 29, 30].

#### **Warum Spritzgussimulation?**

Aufgrund der steigenden Anzahl an komplexen Produkten steigt auch die Zahl an komplexen Werkzeugen. Produkte müssen im einwandfreien Zustand angeboten werden, was dazu führt, dass sehr viel Know-how und Zeit nicht nur in das Produktdesign, sondern vor allem auch in die Werkzeugauslegung und dadurch in den Prototypbau fließt. Das Werkzeugdesign folgt vier Auslegerkriterien, für die oft ein Kompromiss gefunden werden muss. Es handelt

## **2. Theoretische Grundlagen**

---

sich hierbei um die thermische Auslegung, die rheologische Auslegung, die mechanische Auslegung und die Werkzeugkosten. [15, 30]

### Rheologische Auslegung:

- Optimale Position des Angusses und Balancierung des Angusses
- Optimale Lage der Formnester
- Vermeidung von Bindenähten im Sichtbereich oder an beanspruchten Stellen
- Vermeidung von Dickensprüngen bereits beim Bauteildesign
- Minimierung des Druckverbrauchs

### Thermische Auslegung:

- Gleichmäßige Kühlung; Verringerung des Verzuges
- Frühzeitiges Einfrieren verhindern, dabei Zykluszeiten gering halten
- Einsätze mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit (Kupfer, Alu)
- Auslegung der Kühlkreisläufe (Anzahl, Art...)
- Optimierung von Heißkanälen

### Mechanische Auslegung:

- Berücksichtigen der auftretenden Belastungen wie: Schließ- und Zuhaltekräfte, Formöffnungs- und Auswerferkräfte
- Berechnung des Kernversatzes bei becher- und hülsenartigen Formteilen, Berechnung des Versatzes von Einlegeteilen, sowie Berücksichtigung des Versatzes und der Verformung von Bolzen und Schieberelementen

### Werkzeugkosten:

- Wirtschaftlichkeitsanalyse; Zykluszeit vs. teure Werkstoffe vs. Produktqualität
- Notwendigkeit eines teuren Heißkanalsystems oder einer variothermen Kühlung
- Gezielte Anordnung von Temperierkanälen

Da bei der Auslegung von Spritzgusswerkzeugen nicht auf alle Auslegungskriterien gleichermaßen Rücksicht genommen werden kann, kommen an dieser Stelle Spritzguss-Simulationsprogramme zum Einsatz. Mit diesen Programmen ist ein frühzeitiges Erkennen und Vermeiden von möglichen Fehlerquellen möglich. Zusätzlich kann der gezielte Einsatz von Simulationsprogrammen die Entwicklungszeit, sowie die Produktkosten reduzieren. Werden die so gefundenen Fehlerquellen vor dem Werkzeugbau behoben, führen Simulationsprogramme zu einer Reduktion von Iterationsschleifen, sowie zu einer Verringerung der notwendigen Prototypen bis zur Produktreife. Durch den Einsatz von FEM-Programmen kann eine Zykluszeitverkürzung von 15 % und eine Verringerung der Werkzeugänderungskosten von bis zu 50 % erzielt werden [14, 15, 29, 30].

Neben diesen Vorteilen existieren auch gewisse Nachteile, die im Hinblick auf die Simulationsprogramme nicht außer Acht gelassen werden dürfen. So ist die Vorbereitung des Simulationsprozesses unerlässlich für die Richtigkeit der Ergebnisse. Sind die Materialdaten fehlerhaft oder unvollständig, werden die Ergebnisse nicht der Realität entsprechen. Daher ist es notwendig, alle wichtigen Daten (Viskosität, Wärmeleitfähigkeit...) bereits vor der Simulation bereit zu haben. Für ein optimales Simulationsergebnis sind nicht nur die Materialdaten ausschlaggebend, sondern auch die genaue Kenntnis der eingesetzten

## 2. Theoretische Grundlagen

Maschine sowie Umgebungsparameter, wie Wassertemperatur etc., notwendig. Trotzdem muss immer berücksichtigt werden, dass es sich auch mit ausreichender Prozesskenntnis nur um eine modellhafte Darstellung der Realität handelt und umso genauer das Simulationsergebnis wird, desto länger ist die Simulationsdauer und desto leistungsintensiver muss der verwendete Computer sein [14, 15, 30].

### **Cadmould 3D-F vs. Moldflow Insight**

Um die Unterschiede zwischen den beiden Programmen zu erklären, werden die Strömungsverhältnisse in einem einfachen Spritzgussteil betrachtet (Abbildung 27).

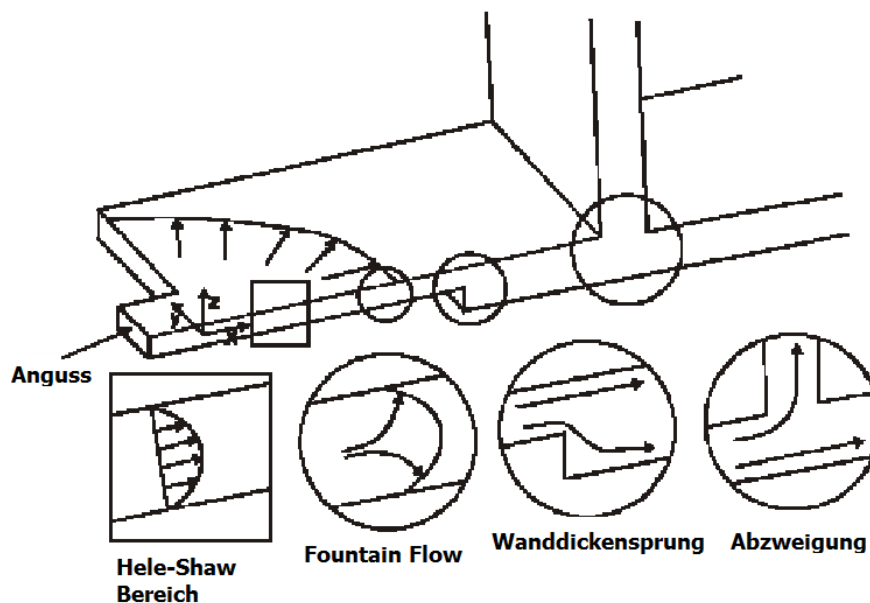


Abbildung 27: Unterschiedliche Strömungsarten in einem Spritzgussteil [14, 35]

In dem ebenen Bereich, welcher sich bereits hinter der Fließfront befindet, spricht man von dem sogenannten Hele-Shaw Bereich. In diesem Bereich existiert keine Komponente in Z-Richtung. Die Vernachlässigung der Z-Richtung reduziert den Rechenaufwand erheblich. Bei großflächigen und dünnwandigen Bauteilen wird dabei die Genauigkeit der Berechnung nur unwesentlich eingeschränkt. Daher kann die Hele-Shaw als Basis für die Füllsimulation solcher Bauteile herangezogen werden [14, 15, 30].

Für die Hele-Shaw Strömung wird eine ebene Strömung angenommen, wobei zusätzlich ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil über die Dicke berechnet wird. Dieses ergibt sich aus dem strukturviskosen Fließverhalten und der Randbedingung des Wandhaftens der Kunststoffschmelze. Daraus ergibt sich, dass dieser Ansatz ein Kompromiss zwischen reinen 2D- und exakten 3D-Berechnungen ist. Man bezeichnet diesen Ansatz als eine 2.5D-Berechnung. Cadmould 3D-F hat als Basis den 2.5D-Ansatz. Um mit der 2.5D-Berechnung reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, sollte ein B/H-Verhältnis von größer als 4 vorliegen. Daher eignet sich Cadmould 3D-F vor allem für dünnwandige und großflächige Bauteile, allerdings nicht zur Untersuchung von 3D-Strömungseffekten. Neben dem Standardspritzguss können mit Cadmould 3D-F auch Mehrkomponentenverfahren,

## 2. Theoretische Grundlagen

---

Gasinjektionsverfahren, reaktiver Spritzguss, sowie Transfer Molding und Spritzprägen simuliert werden [14, 15, 29, 30].

Nach dem Hele-Shaw Bereich folgt der sogenannte Fountain Flow Bereich, welcher die Fließfront der Kunststoffschmelze beschreibt. Dieser kann nicht mit der 2.5D-Methode beschrieben werden, da hier eine Quellströmung vorliegt, welche einen Massefluss in Z-Richtung beinhaltet. Daher wird zur Berechnung der Fließfront eine 3D-Betrachtung benötigt. Auch alle weiteren Strömungsvorgänge wie Wanddickensprünge, Abzweigungen und Freistrahlbildung, benötigen den 3D-Ansatz zur Berechnung. Moldflow Insight verwendet einen 3D-Ansatz. Dabei wird das Modell aus dreidimensionalen finiten Elementen, in Form eines Tetraeders, aufgebaut. Durch diesen Ansatz ist das Programm nicht auf dünnwandige, flächige Bauteile beschränkt, sondern kann auch 3D-Strömungsverhältnisse berechnen. Weitere Besonderheiten dieses Programms sind die sehr umfassende Datenbank (>9000 Materialien unterschiedlicher Hersteller), die 3D-CFD Berechnung von Kühlsystemen und die Möglichkeit, das gesamte Werkzeug zu modellieren und Wärmeübergänge im gesamten Werkzeug zu simulieren. Wie Cadmould kann Moldflow Insight neben dem Standardspritzguss ebenfalls Spritzprägen, Mehrkomponentenverfahren, Gasinjektionsverfahren und reaktiven Spritzguss simulieren [14, 15, 29, 30].

### **Essentielle Ergebnisse der Simulation für diese Arbeit**

Wie bereits erwähnt, können Simulationsprogramme für sehr viele verschiedene Anwendungen eingesetzt werden, die von Standardanwendungen bis hin zu sehr speziellen Anwendungen reichen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Simulationssoftware zur Untersuchung der Füllbarkeit herangezogen.

Da es sich bei dem zu entwickelnden Produkt um einen Tauchcomputer handelt, der gegenüber Flüssigkeiten von außen dicht sein muss und Flüssigkeiten im Inneren nicht austreten dürfen, sind essentielle Ergebnisse der Simulation auch Schwindung und Verzug. Da sich diese Ergebnisse für die Funktionsfähigkeit des Produktes in einem gewissen Rahmen bewegen müssen, wird nachfolgend im Detail auf die Ursachen eingegangen.

Unter Schwindung versteht man im Allgemeinen die Verringerung einer Dimension eines Spritzgußteils in eine beliebige Richtung nach der Entformung im Werkzeug. Die Gesamtschwindung eines Bauteils wird von vier Einflussgrößen beeinträchtigt [15, 30]:

#### Volumenschwindung:

- Ausgangsbasis ist das pVT-Verhalten des Materials
- Wird für Füll-, Nachdruck- und Kühlphase separat berechnet
- Zeitlicher Verlauf von Druck und Temperatur wird berücksichtigt

#### Kristallisation

- Wird bestimmt durch die Abkühlgeschwindigkeit, die abhängig von der Werkzeugtemperatur und der Wandstärke des Formteils ist
- Hohe Abkühlgeschwindigkeiten führen zu geringerer Kristallinität

#### Geometriebedingte Behinderung der Schwindung

- In Zonen, in denen die Verformung behindert wird, bauen sich Spannungen auf

## 2. Theoretische Grundlagen

- Diese Spannungen relaxieren, wobei der zeitliche Temperaturverlauf während den einzelnen Phasen des Spritzgusszyklus die Geschwindigkeit der Relaxation der Spannungen beeinflusst

### Orientierung

- Polymere Moleküle in einer Scherströmung richten sich in Fließrichtung aus
- Wird die Schmelze eingefroren bevor die Moleküle relaxieren können, werden auch die Orientierungen eingefroren
- Orientierungen sind abhängig von der Schergeschwindigkeit, sowie von der Temperatur

Diese Einflussparameter sind abhängig von verschiedenen Verarbeitungsparametern. Abbildung 28 gibt einen Überblick über die wichtigsten Verarbeitungsparameter.

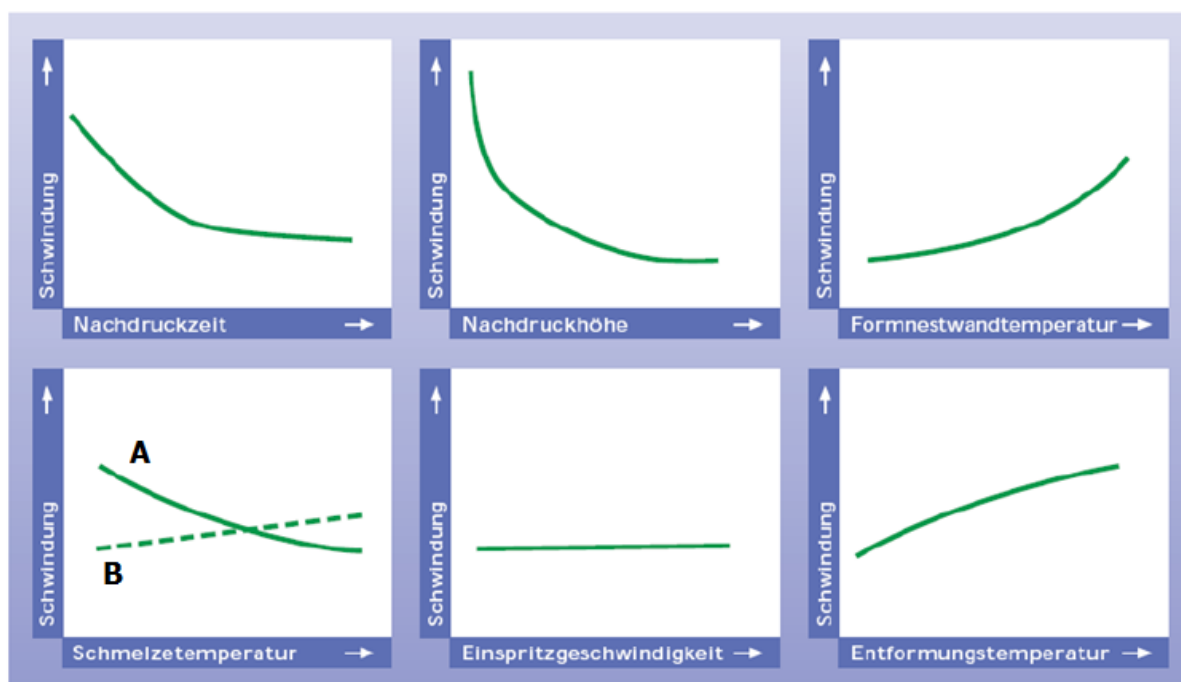


Abbildung 28: Verarbeitungsparameter mit Auswirkung auf das Schwindungsverhalten von Kunststoffen [15]

### Nachdruckzeit:

- Über den Nachdruck kann zunächst noch Material in die Kavität gedrückt werden, um der Volumenkontraktion entgegenzuwirken. Ist der Siegelpunkt des Anschnittes erreicht, kann das Schwindungsverhalten durch einen längeren Nachdruck nicht mehr beeinflusst werden.

### Nachdruckhöhe:

- Eine Erhöhung des Nachdruckes führt zu einer Verringerung der Schwindung. Als limitierender Faktor ist hier die maximale Schließkraft der Spritzgussmaschine zu sehen.

### Formnestwandtemperatur (Werkzeugwandtemperatur)

## 2. Theoretische Grundlagen

---

- Durch eine höhere Werkzeugwandtemperatur steigt das Schwindungsverhalten des Formteils, da die Abkühlrate zu gering ist. Durch die geringe Abkühlrate steigt der Kristallinitätsgrad in teilkristallinen Polymeren, was zu einer Erhöhung der Schwindung führt.

### Schmelzetemperatur

- Umso höher die Temperatur, desto niedriger die Viskosität der Schmelze, wodurch der Nachdruck besser wirken kann (A).
- Mit zunehmender Massetemperatur endet die Nachdruckphase bei sonst gleichbleibenden Prozessparametern bei einer höheren Temperatur des Materials in der Kavität, was aufgrund des pvT-Verhaltens zu einer geringeren Dichte und damit einer höheren Schwindung führt (B).

### Einspritzgeschwindigkeit:

- Die Einspritzgeschwindigkeit hat praktisch keine Einfluss auf die Schwindung des Formteiles

### Entformungstemperatur

- Umso niedriger die Entformungstemperatur desto geringer die Schwindung, da sich die Dauer des ausgeprägten Formzwanges erhöht

Unter Verzug versteht man im Allgemeinen die Abweichung der Gestalt des Formteiles von der Kavität des Formnestes. Wenn jedes Volumenelement gleichermaßen schwinden würde, dann wäre ein Schwinden ohne Verzug möglich, da es sich dann um eine reine Verkleinerung handelt. Dies ist aber bei keinem Spritzgussteil der Fall. Schwindungsunterschiede in den einzelnen Ebenen resultieren aus lokal unterschiedlichen Temperaturverhältnissen, lokal unterschiedlichen Druckverhältnissen und der Werkstoffanisotropie [15, 30].



## 3 Produktanforderungen und Vorgehensweise

### 3.1 Anforderungen an den Tauchcomputer

Die Produktanforderungen des Tauchcomputers orientieren sich an dem Patent „WO 2012/035021 A1; Touch Sensitive Display, and method for the operator control of a diving computer“ [45]. Hier wird ein Tauchcomputer mit berührungssensitivem Display beschrieben, welcher auch unter erhöhtem Umgebungsdruck unter Wasser bedienbar ist. Abbildung 29 zeigt die durch das Patent festgelegten Komponenten und eine schematische Darstellung des Tauchcomputers.

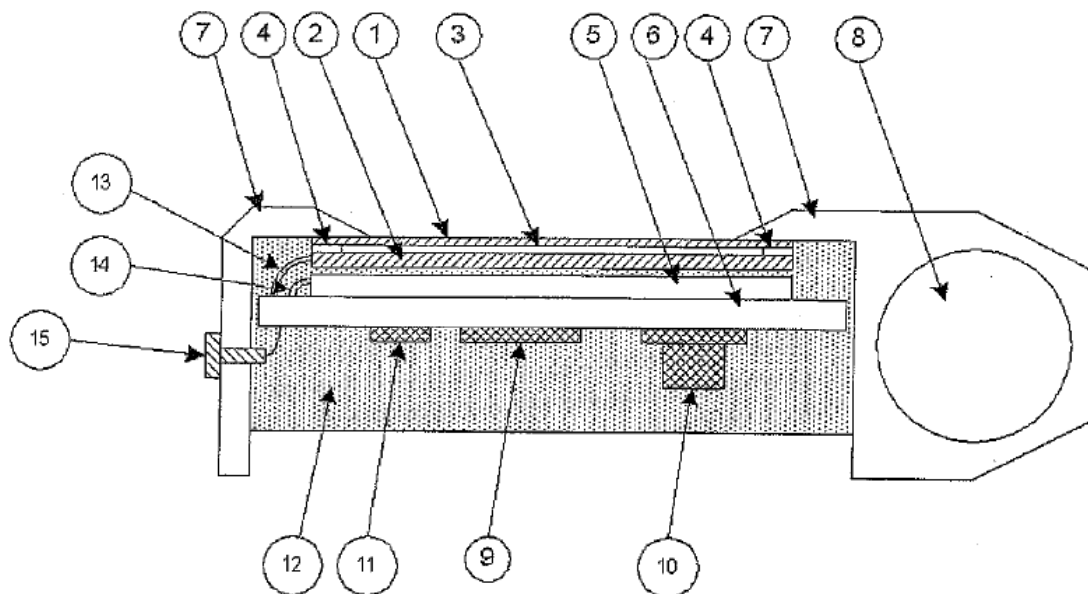


Abbildung 29: Komponenten des Tauchcomputers [44]

Die einzelnen Komponenten erklären sich wie folgt:

1. Flexible Schicht des Touchpanels (Polymerfolie)
2. Starre Schicht des Touchpanels, üblicherweise Glasträger
3. Hohlraum des Touchpanels (mit Silikonöl gefüllt)
4. Abstandhalter des Touchpanels
5. Display
6. Elektronische Platine
7. Gehäuse
8. Batteriefach
9. Mikroprozessor
10. Drucksensor
11. Speicherchip
12. Inkompressibles Medium im Innenraum des Computers (Silikonöl)
13. Anschlüsse des Touchpanels
14. Anschlüsse des Displays
15. Wasserkontakte

### **3. Produktanforderungen und Vorgehensweise**

---

Der Rahmen dieser Masterarbeit beschränkt sich auf die Neuentwicklung bzw. Verbesserung der berührungssensitiven Einheit, sowie die Verklebung dieser mit dem Gehäuse. Zusätzlich wurden mögliche Designs für das Gehäuse ausgearbeitet und mit einem entsprechenden Simulationsprogramm auf ihre spritzgussgerechte Auslegung überprüft.

#### **Berührungssensitive Einheit**

Wie in dem bereits erwähnten Patent beschrieben ist, soll die berührungssensitive Einheit des Tauchcomputers durch Einsatz eines inkompressiblen Mediums auch unter erhöhtem Außendruck unter Wasser funktionieren.

Es galt ein Touchpanel zu entwickeln, das die Möglichkeit bietet, ein fluides inkompressibles Medium zwischen die flexible Schicht (Polymerfolie) und die starre Schicht (Glasträger) zu injizieren. Dabei war es vor allem wichtig, den Vorgang der Injektion reproduzierbar zu gestalten um eine gleichbleibende Qualität der Bedienung des Touchpanels zu garantieren. Neben der Reproduzierbarkeit des Injektionsvorganges musste auch eine luftblasenfreie Füllung des Hohlraumes garantiert werden. Zusätzlich sollte das Panel eine gewisse Größe haben und ein auf Druck basierendes System zur Bedienung aufweisen. Von Seiten der Partnerfirma waren die Anforderungen an das Touchpanel wie folgt:

- Möglichkeit zur reproduzierbaren und luftblasenfreien Füllung des Hohlraumes zwischen flexibler und starrer Schicht
- 3,7" Touchpanel
- 4-Wire Touchpanel
- Resistives Touchpanel

Neben dem Touchpanel inkludiert die berührungssensitive Einheit auch ein Display. Die Kompatibilität mit dem Touchpanel ist dabei eine notwendige Voraussetzung an das Display. Zusätzlich sind die Anforderungen an diese Komponente des Tauchcomputers eine Auflösung von 320 x 240 Pixel so wie Sonnenlichttauglichkeit (sunlight readable) und die Fähigkeit zur Informationsausgabe in Farbe (RGB Display).

#### **Verklebung**

Das Hauptaugenmerk bei der Verklebung liegt in der Wasserdichtheit. Durch die Verklebung des Touchpanels mit dem Gehäuse muss garantiert werden, dass kein fluides Medium während des Tauchganges in den Computer eindringen, oder auch ausdringen kann. Diese Anforderung setzt auch voraus, dass eine Verklebung gewählt werden muss, die in keiner Wechselwirkung mit dem verwendeten fluiden Mittel innerhalb des Tauchcomputers tritt. Um die Funktionalität des Touchpanels durch die Verklebung nicht zu beeinflussen, muss ein Kleber gewählt werden, der bei der Aushärtung keine zu großen Volumensänderungen aufweist. Ändert der Kleber während der Aushärtung zu sehr sein Volumen, können die Kräfte auf die flexible Komponente eine kritische Größe überschreiten. Dies führt dazu, dass sich die Verklebung von der flexiblen und starren Seite des Touchpanels löst und daher die Funktionalität des Touchpanels nicht mehr garantiert werden kann. Neben diesen Anforderungen muss die Verklebung auch den Einsatzbedingungen des Tauchcomputers standhalten. Daraus ergeben sich Anforderungen wie UV-, Wasser- sowie Salzwasserbeständigkeit und ein Temperaturanwendungsbereich von -20 °C bis +60 °C.

### **3. Produktanforderungen und Vorgehensweise**

---

#### **Gehäuse**

Die Aufgabenstellung der Gehäusekonstruktion beinhaltet nicht nur die Konstruktion, sowie die Überprüfung auf ihre Spritzgießbarkeit, sondern auch eine Materialvorauswahl.

Die Anforderungen seitens der mechanischen Eigenschaften sind bei dieser Anwendung untergeordnet, da der Tauchcomputer keinen großen Kräften ausgesetzt ist. Selbst bei sehr großen Tauchtiefen befindet sich der Tauchcomputer aufgrund der Füllung mit einem inkompressiblen Medium in einem hydrostatischen Druckzustand. Dieser Umstand begünstigt die Materialauswahl, da hier auf die mechanischen Eigenschaften so gut wie keine Rücksicht genommen werden muss. Einziger Aspekt an die mechanischen Eigenschaften wäre eine kratzfeste Oberfläche, um das Erscheinungsbild des Produktes über einen längeren Zeitraum aufrecht zu erhalten.

Anders ist es im Bereich der chemischen und physikalischen Beständigkeit. Der Temperaturanwendungsbereich ist derselbe wie jener der Verklebung von  $-20\text{ °C}$  bis  $+60\text{ °C}$ . Das Material muss beständig gegen Silikonöl, Süßwasser- und Salzwasser sein. Zusätzlich sollte das Material in Bezug auf die Verklebung in derselben Materialklasse wie die flexible Schicht des Touchpanels liegen, um die Verklebung zu erleichtern.

Die Anforderungen an das Gehäuse sind sehr allgemein gehalten. Um den Tragekomfort des Tauchcomputers zu erhöhen, sollte das Gehäuse leicht und somit dünnwandig und der Tauchcomputer möglichst klein sein. Das Gehäuse muss Platz für alle notwendigen Komponenten aufweisen, sowie eine Möglichkeit, diese Komponenten miteinander zu verbinden (Schraubverbindung, Steckverbindung), beinhalten. Bei der Gehäusekonstruktion ist auch auf die Stromversorgung Rücksicht zu nehmen, da sich das Design durch den Wechsel von einem Flachakku zu einem Rundakku erheblich ändert. Die komplette Wasserdichtheit nach Einbau aller Komponenten muss durch das Gehäusedesign garantiert werden. Zusätzlich muss die Möglichkeit bestehen, den Computer mit Silikonöl zu befüllen.

Die Spritzgießbarkeit, sowie alle spritzgussrelevanten Parameter wie beispielsweise Verzug und Schwindung, müssen abschließend mit einem entsprechenden Simulationsprogramm überprüft werden. Das hierzu verwendete Simulationsprogramm ist Cadmould 3D-F.

#### **Zusammenfassung:**

Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die Anforderungen der einzelnen Komponenten, die im Rahmen dieser Masterarbeit für diesen Tauchcomputer neuentwickelt, beziehungsweise in Anlehnung an das erwähnte Patent optimiert wurden.

### 3. Produktanforderungen und Vorgehensweise

---

Tabelle 4: Überblick der Anforderungen an die Komponenten des Tauchcomputers

<b>Komponente</b>	<b>Anforderungen</b>
Touchpanel	Möglichkeit zur qualitativ reproduzierbaren Befüllung mit einem inkompressiblen Fluid 3,5" 4 wire, resistives Touchpanel
Display	302x 240 Pixel Auflösung RGB Display sun light readable
Verklebung	Beständigkeit gegen Silikonöl Beständigkeit gegen Süßwasser Beständigkeit gegen Salzwasser UV Beständigkeit geringe Volumenänderung während der Aushärtung Garantie der Wasserdichtheit
Gehäusematerial	Beständigkeit gegen Silikonöl Beständigkeit gegen Süßwasser Beständigkeit gegen Salzwasser UV Beständigkeit moderate mechanische Eigenschaften
Gehäuse	spritzgussgerechte Auslegung dünnwandig geringes Gewicht Platz für alle benötigten Komponenten Garantie der Dichtheit gegen äußere so wie innere Fluide Möglichkeit zur Befüllung mit inkompressiblen Medien

### 3.2 Vorgehensweise

Für die erfolgreiche Erfüllung der Aufgabenstellung hatte die Entwicklung der berührungssensitiven Einheit eine maßgebliche Bedeutung. Es war hierbei notwendig ein System zu entwickeln, das Fluid qualitativ reproduzierbar zwischen die flexible und die starre Schicht des Touchpanels zu injizieren. Es bestand auch die Möglichkeit dieses System nicht selbst zu entwickeln, sondern im Zuge einer Literaturrecherche eine Firma zu finden, welche Touchpanels mit den gegebenen Anforderungen herstellt.

Daher war das erste Ziel dieser Arbeit, ein geeignetes Touchpanel in Kombination mit einem geeigneten Display zu finden. Der Versuch dieses Ziel zu erfüllen wurde durch eine groß angelegte Literaturrecherche, sowie durch eigene Versuche mit verschiedenen Methoden zur Befüllung des Touchpanels umgesetzt. Erst nachdem ein Touchpanel in Kombination mit einem Display gefunden wurde, das diesen Anforderungen entspricht, konnte mit der Optimierung, beziehungsweise mit der Neuentwicklung der anderen Komponenten weitergemacht werden.

Für den Erfolg der Verklebung war es notwendig, das Material des Gehäuses zu bestimmen. Daher wurde anschließend ein geeignetes Material für das Gehäuse gesucht. Für die

### **3. Produktanforderungen und Vorgehensweise**

---

Erfüllung dieses Teilziels wurde eine Materialrecherche mit der zur Verfügung stehenden Materialsuchmaschine Cambridge Engineering Selector (CES) angelegt.

Erst nachdem die Materialsuche eine überschaubare Menge an spezifisch ausgewählten Materialien ergab, konnte das Teilgebiet der Verklebung weiter bearbeitet werden. Dies implizierte nicht nur die Suche verschiedenster Kleber, sondern auch die Suche nach Alternativverfahren oder Materialien, welche mit den Anforderungen kompatibel sind. Dabei wurde eine Literatur- und Firmenrecherche durchgeführt. Wurden Materialien oder Verfahren gefunden, so waren diese auf ihre Funktionalität durch verschiedene Tests und Prüfungen zu untersuchen.

Abschließend wurde ein Gehäusedesign entwickelt und dieses mit einem entsprechenden Simulationsprogramm auf seine Spritzgießbarkeit überprüft. Bei der Erfüllung dieses Teilziels lag das Hauptaugenmerk auf der praktischen Handhabung und der Wirtschaftlichkeit, im Bezug auf die Herstellung, des Tauchcomputers. Es wurde versucht ein Gehäuse zu designen, welches sowohl in seinen Abmaßen gering gehalten wird und zusätzlich den Tragekomfort bei geringem Gewicht behält. Auch wenn die mechanischen Eigenschaften des Materials nachrangig waren, so wurde beim Gehäusedesign auf eine steife Konstruktion hingearbeitet um die Langlebigkeit des Produktes zu gewährleisten. Die Konstruktion des Gehäuses erfolgte auf dem Programm SolidWorks 2008.

Zur Überprüfbarkeit der Spritzgießbarkeit wurde das Simulationsprogramm Cadmould 3DF verwendet. Dabei wurden spritzgussrelevante Faktoren überprüft. Beginnend bei der Füllbarkeit des Gehäuses, über den Druckverbrauch während des Spritzgießens, bis hin zu Schwindung und Verzug wurden wichtige Faktoren analysiert und interpretiert.

# 4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

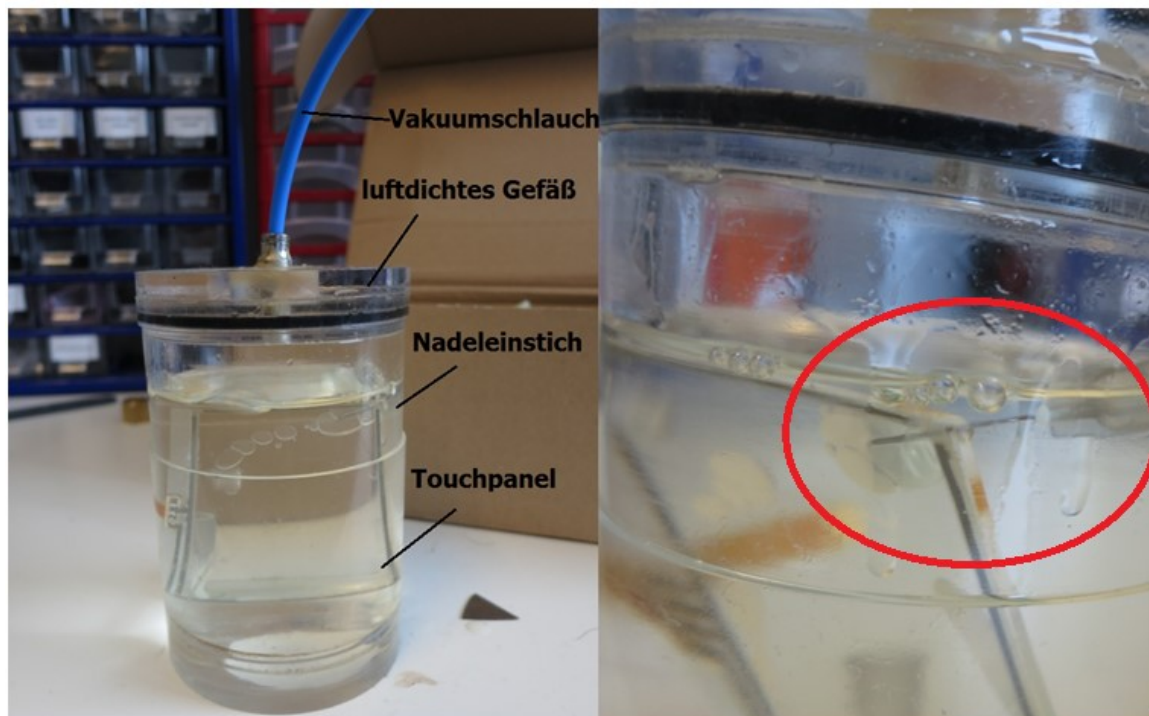
## 4.1 Touchpanel

### 4.1.1 Vorentwicklungen

Da für den Erfolg des Tauchcomputers die berührungssensitive Einheit von großer Bedeutung ist, wurden bereits vor Beginn dieser Arbeit Versuche in diesem Bereich durchgeführt.

Als Fluid für die Befüllung des Touchpanels und des gesamten Tauchcomputers wurde aufgrund von bereits im Vorfeld durchgeführten Vorversuche, das Silikonöl Elbesil B20 von der Firma Wacker ausgewählt [27, 28]. Dieses Öl ist ein sehr dünnflüssiges Öl (B20 = 20 cST) aus Polydimethylsiloxanen. Es handelt sich um eine wasserklare Flüssigkeit mit weitgehender Geruchs- und Geschmacksneutralität. Zusätzlich ist dieses Öl UV-beständig, was für diese Anwendung unabdingbar ist.

Zu diesem Zeitpunkt wurden für die Versuche herkömmliche 4-wire, resistive, 2,3" Displays verwendet. Diese Displays weisen keinerlei Öffnungen zum Befüllen mit Flüssigkeiten auf. Daher wurde mit einer 300 µm dicken Nadel zwischen die PE-Folie und das Trägerglas gestochen. Das Touchpanel, mit der durch die Nadel verursachten Öffnung, konnte nun in einem Ölbad unter Vakuum befüllt werden (Abbildung 30).



*Abbildung 30: links: Befüllungsvorgang mit Nadel; rechts: Detailansicht, Nadeleinstich*

Durch das angelegte Vakuum wird das Öl nicht in das Panel gedrückt sondern durch die Öffnung hineingezogen. Diese Methode zeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, ein

## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Touchpanel mit dem ausgewählten Öl zu befüllen. Sie erweist sich allerdings nicht als reproduzierbar und ebenfalls auch nicht als automatisierbar. Bei jedem Nadeleinstich besteht die Gefahr, dass man die PE-Folie, die Leiterbahnen oder die ITO Schicht des Touchpanels verletzt. Zusätzlich darf die Nadel nicht im Tauchcomputer verbleiben.

Bei der zukünftigen Produktion des Tauchcomputers werden die einzelnen Bestandteile im Ölbad zusammengebaut. Durch anschließendes Anlegen von Vakuum wird das Touchpanel und der gesamte Innenraum des Tauchcomputers befüllt. Abschließend wird der Computer abgedichtet und damit das Öl im Display gehalten. Daher ist es nicht möglich, dass die Nadel während der Produktion im Touchpanel verbleibt. Es besteht die Möglichkeit, jedes Touchpanel vor der Produktion mit der Nadel anzustechen, die Nadel zu entfernen und die Komponenten anschließend zusammenzubauen. Durch den Kleber zwischen Trägerglas und PE-Folien kann das Herausziehen der Nadel allerdings dazu führen, dass das Loch selbstständig wieder verschlossen wird und eine Befüllung unmöglich macht. Zusätzlich würde es sich hier um einen zusätzlich Arbeitsschritt in der Produktion handeln.

Aufgrund dieser Probleme wurde versucht ein Touchpanel zu entwickeln, welches bereits Öffnungen zwischen Trägerglas und PE-Folie zum Befüllen mit ÖL aufweist.

### 4.1.2 Firmenrecherche und Befüllungsversuche

Während der Literaturrecherche wurden verschiedene Firmen auf verschiedensten Wegen kontaktiert um eine Firma zu finden, die Touchpanels mit Öffnungen zwischen Trägerglas und PE-Folie anbietet, bzw. herstellen kann. Die Suche wurde auf den europäischen Raum eingeschränkt, da es sich herausstellte, dass viele Firmen welche, die Produktion ihrer Produkte in Asien durchführen, in Europa einen Vertrieb haben, über welchen die Kontaktaufnahme einfacher von Statten geht. Für die Erfüllung der Anforderung war es zusätzlich wichtig, dass es sich um ein 3,5" großes, 4-wire resistives Touchpanel handelt.

Zu Beginn der Recherche galt es häufig die Verständnisbarrieren der Funktionsfähigkeit des Tauchcomputers zu überwinden. Eine derartige Anwendung eines Touchpanels war für viele Firmen neu. Für einige Firmen würde eine partielle Unterbrechung der Verklebung zu Stabilitätsverlusten führen und die Panels könnten keine Kräfte mehr übertragen. Es benötigte sehr viel Zeit diesen Firmen verständlich zu machen, dass sich der Tauchcomputer in einem hydrostatischen Druckzustand befindet, da er innen komplett mit Öl befüllt ist. Nachdem dieser Tatbestand den Firmen verständlich gemacht wurde, konnten Firmen gefunden werden, welche Interesse an diesem Projekt hatten. Diese werden nachfolgend näher erläutert. Im Anhang 10.5 befindet sich eine Tabelle mit allen gefundenen Firmen.

Die Firma Datamodul AG zeigte großes Interesse an der Anwendung. Es wurden einige telefonische Gespräche mit dem gefundenen Kontakt durchgeführt. Sollte die Firma Datamodul AG in dieses Projekt investieren, müsste man ein eigenes Werkzeug bauen, da mit deren Maschinen die Touchpanelproduktion mit Öffnungen im Touchpanel nicht möglich ist. Leider scheiterte die Zusammenarbeit mit dieser Firma an der zu geringen Abnahmemenge an Touchpanel. Sollte der Tauchcomputer in die Serienproduktion gehen, strebt die Partnerfirma eine Absatzmenge von 20.000 bis 25.000 Stück pro Jahr an. Diese Stückzahlen sind für Touchpanelhersteller sehr gering.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Durch die geringen Stückzahlen scheiterte auch die Zusammenarbeit mit AlfaNet Computer & Electronic Handels GmbH, GMS Display System, Actron AG so wie Fujitsu Components Europe B.V.

Die Zusammenarbeit mit der Firma Admatec AG erwies sich vorerst als sehr vielversprechend. Von Seiten der Firma wurde ein Angebot zu einem Display, welches zu einem 3,5" Touchpanel passt, getätigt. Sie würden sich auch dem Projekt der Öffnungen im Touchpanel annehmen. Auskunft zur Machbarkeit sowie zum Preis des Projektes, könnten allerdings von Seiten der Firma erst nach der nächsten Budgetsitzung gegeben werden. Dieser Termin, war für den Erfolg dieses Projektes viel zu spät. Daher musste vorerst auf eine Zusammenarbeit mit dieser Firma verzichtet werden.

Die Firma Electronic Assembly GmbH (EA) nahm sich dem Projekt nach über einem Monat Detailbesprechungen schlussendlich an. Es wurde festgelegt, dass ein 3,5" Touchpanel mit jeweils vier Öffnungen gefertigt wird. Abbildung 31 zeigt die Skizze des neuen Touchpanel. Links das gesamte Touchpanel und rechts die Leiterbahnen mit dem Anschluss. Zusätzlich sind die Außenabmaße so wie die Abmaße für den aktiven Bereich ersichtlich. Die Öffnungen befinden sich auf der oberen und unteren Seite des Panels (jeweils zwei auf jeder Seite).

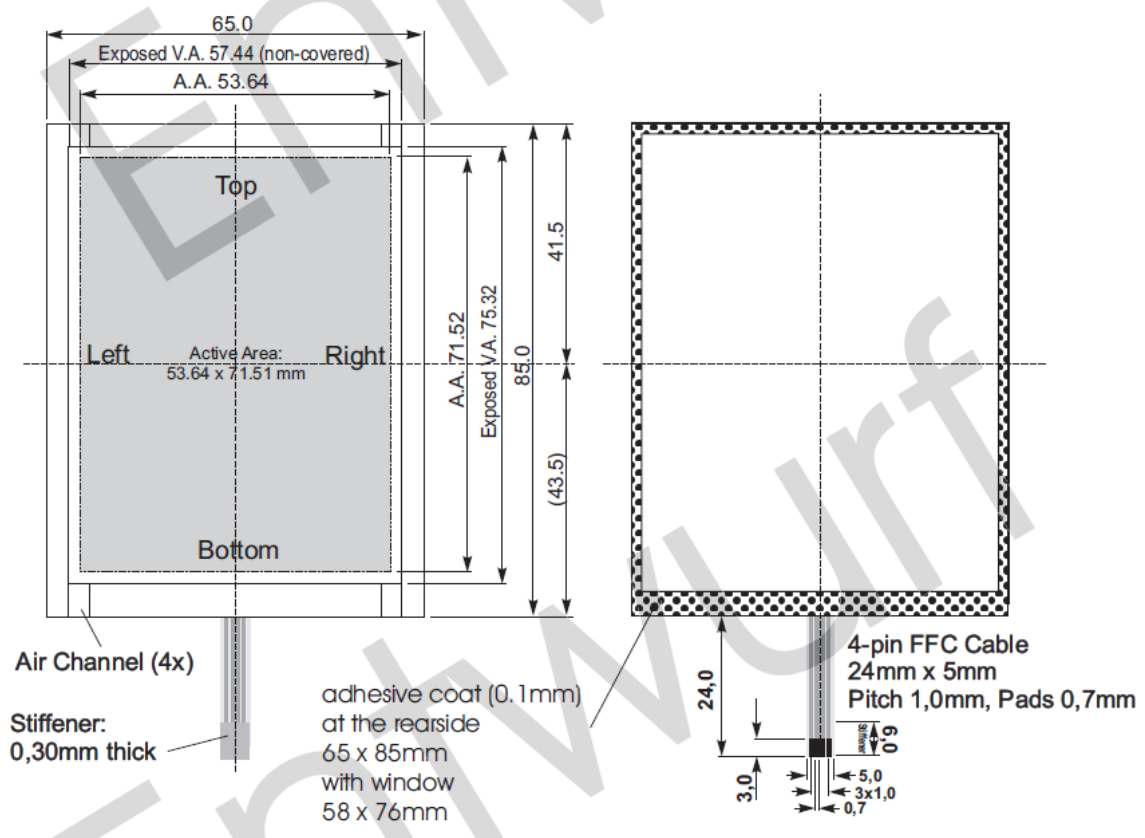


Abbildung 31: Skizze des 3,5" Displays mit 4 Öffnungen von der Firma EA

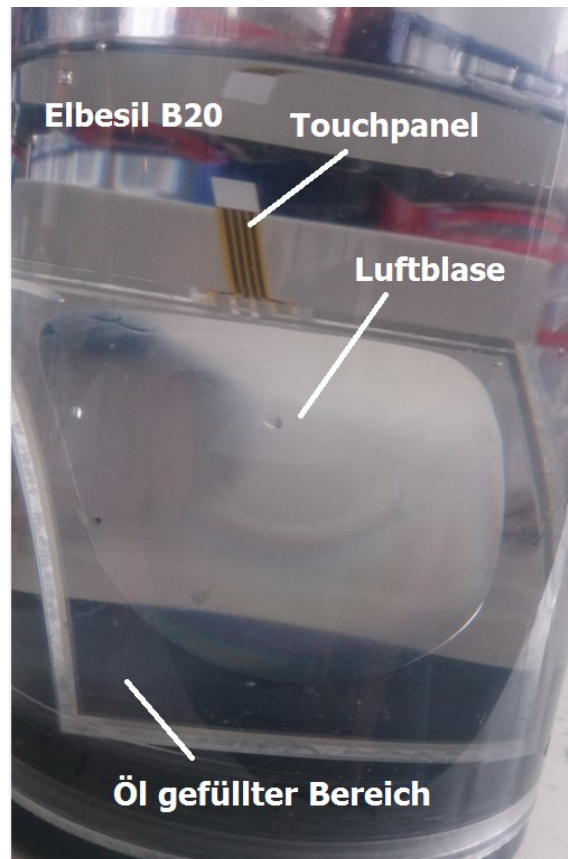
Die Öffnungen haben eine Breite von 2 mm und eine Höhe in der Dicke der Leiterbahnen, welche eine Dicke von 300 µm aufweisen. Für die Herstellung der Panels musste die Firma ein eigenes Werkzeug bauen. Dieses Werkzeug kostete 5000 €. Nach Rücksprache mit der Partnerfirma dieser Arbeit, wurde die Investition getätigt und die ersten Panels gefertigt.



#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Nach zirka einem Monat konnten die ersten Muster für die Füllversuche verwendet werden. Das Touchpanel wurde in ein luftdichtes, mit Elbesil B20 Öl befülltes Gefäß gegeben. Dieses wurde an eine Vakuumpumpe angeschlossen. Durch das erzeugte Vakuum von 980 Millibar sollte sich das Öl durch die eingefügten Spalte zwischen PE-Folie und Glasträger hineinziehen. Es konnte festgestellt werden, dass trotz einer längeren Wartezeit von mehreren Stunden (>10 h) eine Luftblase zwischen Glasträger und Folie verblieb (Abbildung 32).



*Abbildung 32: Luftblase bei ersten Touchpanels mit Befüllungsöffnung*

Die entstandene Luftblase warf zu diesem Zeitpunkt folgende Fragen auf:

- Wieso kann die Luft durch den Spalt nicht entweichen, wenn es zuvor bereits mit einer Nadel funktionierte, welche eine Öffnung von ebenfalls 300 µm hatte?
- Ist das Öl zu dickflüssig?
- Ist das Vakuum zu gering?
- Sind die Befüllungsöffnungen zu klein?

Die einfachste Lösung wäre in diesem Fall gewesen, das Öl durch ein dünnflüssigeres zu ersetzen. Die Firma Wacker bietet neben dem Elebesil B20 auch Elebesil Öle mit 10 cSt und 5 cSt an. Diese Öle wurden allerdings nicht verwendet, da mit solch dünnflüssigen Ölen die spätere Dichtheit des Computers nicht mehr garantiert werden könnte

Die Tatsache, dass es bereits mit dem Nadeleinstich, bei gleich großem Vakuum funktioniert hatte, ließ nur darauf schließen, dass die Öffnungen zu klein waren. Daher wurden die Öffnungen unter dem Mikroskop vermessen (Abbildung 33). Das Programm des Mikroskops

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

gab keine Einheiten in den Bildern an. Es handelte sich um Größenangaben in Millimeter. Es zeigte sich, dass die Öffnungen nicht so dick wie Leiterbahnen waren. Die Öffnungsdicke schwankte zwischen 60 µm und 70 µm. Diese Dicke ist zu gering für eine Befüllung mit Silikonöl.

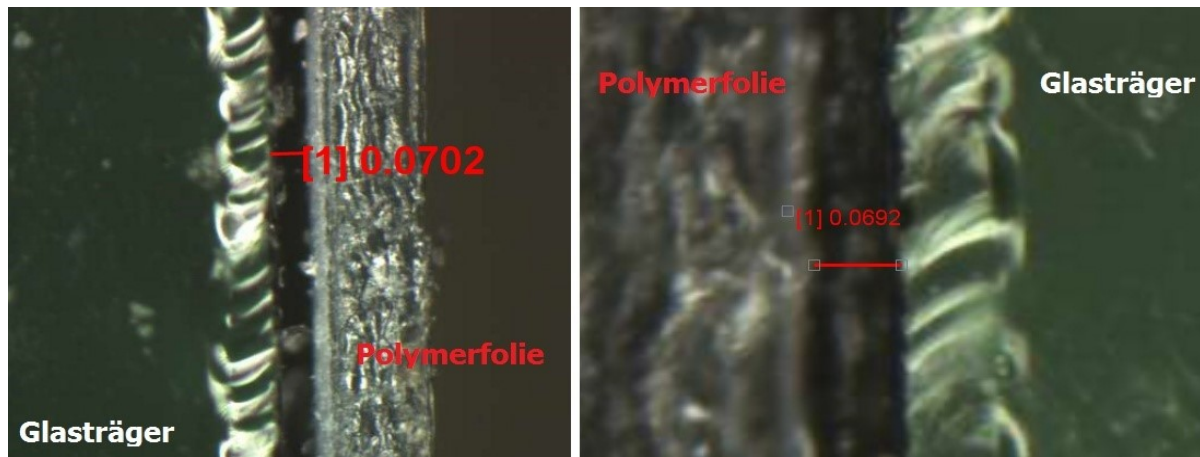


Abbildung 33: Mikroskopaufnahme der Befüllungsöffnung; links: rechts unten; rechts: links oben

Durch den zu kleinen Spalt kann das gefertigte Werkzeug nicht für die Produktion verwendet werden. Nach Rücksprache mit der Firma EA konnte die Ursache und auch eine Lösung des Problems gefunden werden. Der Träger und die Polymerfolie wurden durch eine Presse miteinander verklebt. Die Leiterbahnen weisen zwar eine Höhe von 300 µm auf, allerdings wurden die Komponenten auch außerhalb der Leiterbahnen verklebt. Daher wird die Polymerfolie über die Leiterbahnen gebogen und der Spalt verringert. Das Werkzeug konnte so umgebaut werden, dass eine Spalthöhe von 250 µm +/- 50 µm Toleranz entsteht. Die neuen Touchpanels wurden, gleich wie die alten, vermessen und befüllt.

Die Mikroskopaufnahme des neuen Touchpanels zeigte, dass sich der Spalt in den festgelegten Toleranzen befand (Abbildung 34). Wie der Befüllungsvorgang zeigte, ist die neue Höhe des Spaltes ausreichend, um eine vollständige Befüllung des Touchpanels zu garantieren (Abbildung 35). Daher konnte das gefertigte Werkzeug der Firma für die Produktion der Touchpanels verwendet werden.

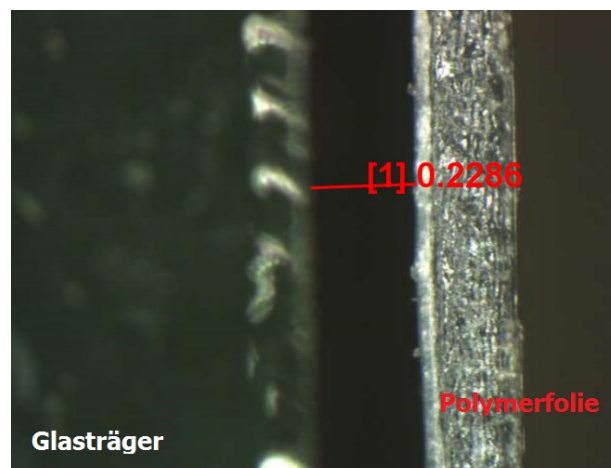


Abbildung 34: Mikroskopaufnahme der Befüllungsöffnung der neuen Touchpanels

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---



Abbildung 35: Befüllung mit Silikonöl Elbesil B20; Vergleich altes und neues Touchpanel

#### **Zusammenfassung**

Alle Anforderungen an das Touchpanel von Seiten der Partnerfirma wurden erfüllt. Es wurde eine Firma gefunden, die sich diesem Projekt annahm und 4-wire resistive Touchpanels mit einer Größe von 3,5" und Befüllungsöffnungen herstellt.

Die Firma EA stellte für diese speziellen Touchpanel ein eigenes Werkzeug her, mit dem Touchpanels mit vier Befüllungsöffnungen gefertigt werden können. Diese Befüllungsöffnungen haben eine Breite von zwei Millimeter und eine Höhe von 250  $\mu\text{m}$   $\pm$  50  $\mu\text{m}$ . Die Mikroskopaufnahmen zeigten, dass sich die Öffnungsdicken nach der Produktion in den vorgegeben Toleranzen bewegen. Die Befüllungsversuche bestätigten die Annahme durch die Mikroskopaufnahmen dahingehend, dass eine komplette Befüllung des Touchpanels mit dem Silikonöl möglich und reproduzierbar ist.

Die Firmenrecherche ergab, dass sich mehrere Firmen an diesem Projekt beteiligen würden, allerdings die zu geringen Stückzahlen an Touchpanels für viele Firmen ein Hindernis darstellt. Sollten die Preisverhandlungen mit der Firma EA von Seiten der Partnerfirma nicht zu deren Gunsten ausfallen, besteht noch die Möglichkeit auf eine Beteiligung der Firma Admatec AG. Diese Firma wäre ebenfalls an diesem Projekt interessiert. Aufgrund der zeitlichen Beschränkung dieser Arbeit, konnte vorerst keine Beteiligung der Firma in Betracht gezogen werden.

#### **4.2 Materialvorauswahl**

Um die Problematik der Verklebung zu vereinfachen, wurde im Zuge dieser Arbeit eine Materialvorselektion getroffen. Diese Materialsuche hatte den Zweck, die Verklebung auf ein

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

paar wenige Materialtypen zu beschränken. Dadurch wird die Suche eines geeigneten Klebers deutlich vereinfacht.

Bei den ausgewählten Materialien handelt es sich nur um eine grobe Vorauswahl. Der endgültig gewählte Materialtyp und die Zusammensetzung des Polymers sind von der Partnerfirma in Zusammenarbeit mit dem Hersteller des jeweiligen Materials abzuklären.

Die Materialsuche wurde mit dem CES Selector 2014, Granta Design Limited Cambridge, UK, 2013 durchgeführt.

Der CES Selector verwendet verschiedene Synonyme für die Bewertung der Auswahlkriterien im Bereich thermische Stabilität, physikalische Stabilität und chemische Stabilität. Daher muss zuerst auf diese verwendeten programmspezifischen Ausdrücke näher eingegangen werden [6, 48]:

Excellent: Beständigkeiten: Keine Veränderung der Materialleistung, auch nach Langzeiteinwirkung [6].

Verarbeitung: Das Material wird für dieses Verfahren verwendet und weist keine Probleme bei der Verarbeitung auf [6].

Acceptable: Beständigkeiten: Verlangt eventuell zusätzlichen Schutz [6].

Verarbeitung: Material wird für die Verarbeitung verwendet, muss aber möglicherweise optimiert werden [6].

Satisfactory: Material widersteht dem Fluid für mindestens 14 Tage bei Raumtemperatur im unbelasteten Zustand. Die mechanischen Eigenschaften des Materials werden nach Entfernung des Fluids eine Verschlechterung im Rahmen von 10 % aufweisen [6].

Fair: Widersteht der UV-Strahlung für Monate/Jahre. Die meisten der Polymere befinden sich in diesem Spektrum. Für Langzeiteinwirkung wird ein zusätzlicher Schutz benötigt [6].

#### **Auswahlkriterien**

Tabelle 5 gibt einen Überblick über ausgewählte Auswahlkriterien. Diese Kriterien wurden in Anlehnung an die Vorgaben der Partnerfirma getroffen (Punkt 3.1. Anforderungen an den Tauchcomputer). Die wichtigsten Anforderungen waren die Beständigkeit gegen jegliche Art von Wasser, da es sich um einen Tauchcomputer handelt, so wie die Beständigkeit gegen Silikonöl. Daher durften diese Punkte einen Wert von „Excellent“ nicht unterschreiten. Der CES beinhaltet nicht das Auswahlkriterium Silikonöle, sondern nur Flüssigsilikone. Wie im Punkt 2.3.2. Silikonöle bereits beschrieben, handelt es bei Silikonölen um Silikone, welche mit Hilfe eines Kettenstoppers auf die gewünschte Viskosität hin polymerisiert werden. Somit ist die Beständigkeit gegen Flüssigsilikone gleichzusetzen mit der Beständigkeit gegen Silikonöle.

„Satisfactory“ ist bei den Auswahlkriterien Meereswasser, destilliertes Wasser und Flüssigsilikone, das beste zu erreichende Ergebnis. Vergleichbar mit „Excellent“ bei Frischwasser und Salzwasser.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Der Unterschied zwischen Meereswasser und Salzwasser, liegt darin, dass bei Meereswasser in tatsächlichem Meereswasser getestet wurde und bei Salzwasser, Leitungswasser mit Salz verwendet wurde. Da die Vorgabe war, dass der Tauchcomputer gegen jede Art von Wasser beständig sein muss, wurden beide Varianten des Salzwassers als Kriterium festgelegt.

Da sich die UV-Stabilität je nach Additivierung ändern kann, durften die ausgewählten Polymere eine UV-Stabilität von „Fair“ bis „Excellent“ aufweisen. Sollte die UV-Stabilität nicht ausreichen, muss das Polymer zusätzlich stabilisiert werden.

Der Tauchcomputer wird keinen hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Er ist ein abgeschlossenes System mit einem hydrostatischen Druckzustand. Dadurch entstehen auf das Produkt, selbst bei großen Tauchtiefen (bis max. 120 m), keine speziell zu berücksichtigenden Kräfte. Trotzdem muss der Computer während der Anwendung formstabil bleiben. Die mechanischen Kennwerte wie E-Modul und Zugfestigkeit wurden an die Werte von PE angelehnt. Als Vorgabe wurde ein E-Modul von 1000 N/mm<sup>2</sup> und eine Zugfestigkeit von 20 N/mm<sup>2</sup> festgelegt. Dies entspricht den Werten von PE-HD und garantiert, dass der Tauchcomputer während seiner Anwendung die Form behält.

Da das Produkt nicht saisonal angewendet wird, sondern das ganze Jahr in Einsatz sein soll, wurde der Temperaturanwendungsbereich von -20 °C im Winter bis zu + 60°C im Sommer festgelegt.

Das Gehäuse des Tauchcomputers muss in einem diskontinuierlichen Prozess hergestellt werden, da es Durchbrüche, Gewinde und 3D-Ausformungen aufweist. Hierfür eignet sich der Prozess des Spritzgießens. Daher wurden nur nach spritzgussfähigen Materialien gesucht. Um die Fülle an Materialien weiter einzugrenzen, wurde auf Materialien mit Verstärkungsfasern verzichtet. Zusätzlich wurde der maximale Kilopreis mit 5 € festgelegt, um jegliche Hochleistungspolymere, welche für diese Anwendung unnötig hohe mechanische und thermische Werte aufweisen, ebenfalls aus der Materialauswahl auszuschließen.

*Tabelle 5: Auswahlkriterien im CES*

Kriteriumsbezeichnung	Wert
Verarbeitung mittels Spritzgießen	excellent
E-Modul (N/mm <sup>2</sup> )	1000
Zugfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	20
Maximale Einsatztemperatur (°C)	60
Minimale Einsatztemperatur (°C)	-20
Beständigkeit gegen Frischwasser	excellent
Beständigkeit gegen Salzwasser	excellent
Beständigkeit gegen Meereswasser	satisfactory
Beständigkeit gegen destilliertes Wasser	satisfactory
Beständigkeit gegen Flüssigsilicone	satisfactory
UV-Beständigkeit	fair, good, excellent
Anteil an Glasfasern (%)	0
Preis (€)	<5
Tabelle von CES Selector 2014, Granta Design Limited, Cambridge, UK 2013	

### Ergebnisse

Unter der Voraussetzung, dass alle Kriterien erfüllt werden, wurden 17 verschiedene Materialien aus 8 verschiedenen Polymeren gefunden. Alle diese Materialien erfüllen die mit „Excellent“ und „Satisfactory“ angegebenen Kriterien gleichermaßen. Daher kann eine Unterscheidung, bzw. eine engere Auswahl nur über die mechanischen Eigenschaften, die thermischen Eigenschaften, den Preis, so wie über die UV-Stabilität getroffen werden. Abbildungen 36 und 37, sowie die Tabelle 6 setzen diese ins Verhältnis.

Werden diese vier spezifischen Auswahlkriterien betrachtet, ist deutlich ersichtlich, dass PA 610 mit durchschnittlicher UV-Stabilität und seinem hohen Preis für eine Empfehlung nicht in Frage kommt.

Die Familie der CA-Polymere und PC-Polymere liegen bei fast allen Kriterien im Mittelfeld und heben sich bei keinem der Kriterien von den anderen Materialien ab. Abgesehen von der minimalen Einsatztemperatur von bis zu  $-90\text{ °C}$  bei CA und der maximalen Einsatztemperatur von bis zu  $144\text{ °C}$  bei PC. Allerdings werden diese Temperaturen in der Anwendung des Produktes nie erreicht und sind deswegen kein Ausschlusskriterium. Teilweise befinden sich die CA-Polymere sogar unterhalb der geforderten maximalen Einsatztemperatur. ASA/PC verhält sich ähnlich wie PC. Es liegt bei fast allen Kriterien im Mittelfeld.

Die Materialien SMMA und PS zeichnen sich vor allem durch ihren erhöhten E-Modul aus, sind aber beide im Kriterium UV-Stabilität nur moderat beständig. PBT und ASA/PC, die beide in Bezug auf den E-Modul und die Zugfestigkeit im mittleren Bereich liegen, weisen hingegen eine gute UV-Stabilität auf.

PE-HD und PP-UV-stabilisiert sind die günstigsten der ausgewählten Materialien. Beide Materialien weisen ausreichende mechanische Festigkeiten und Temperatureinsatzbereiche auf. PP hat die beste UV-Stabilität der ausgewählten Materialien.

Durch die sehr gute UV-Beständigkeit, den günstigen Preis und die leichte Zugänglichkeit zu PP-UV-stabilisiert, wurden alle weiteren Versuche unter der Annahme durchgeführt, dass das Gehäuse aus PP-UV-stabilisiert hergestellt wird.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

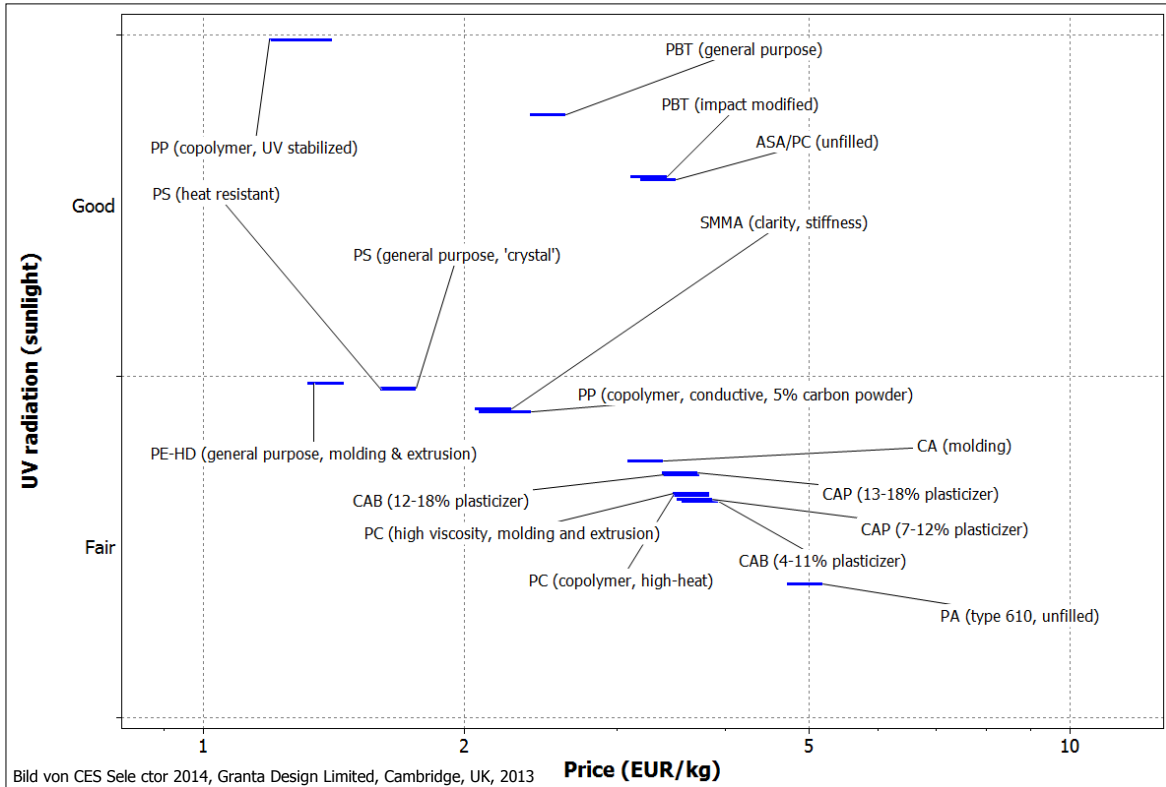


Abbildung 36: Verhältnis von UV-Stabilität zu Preis [6]

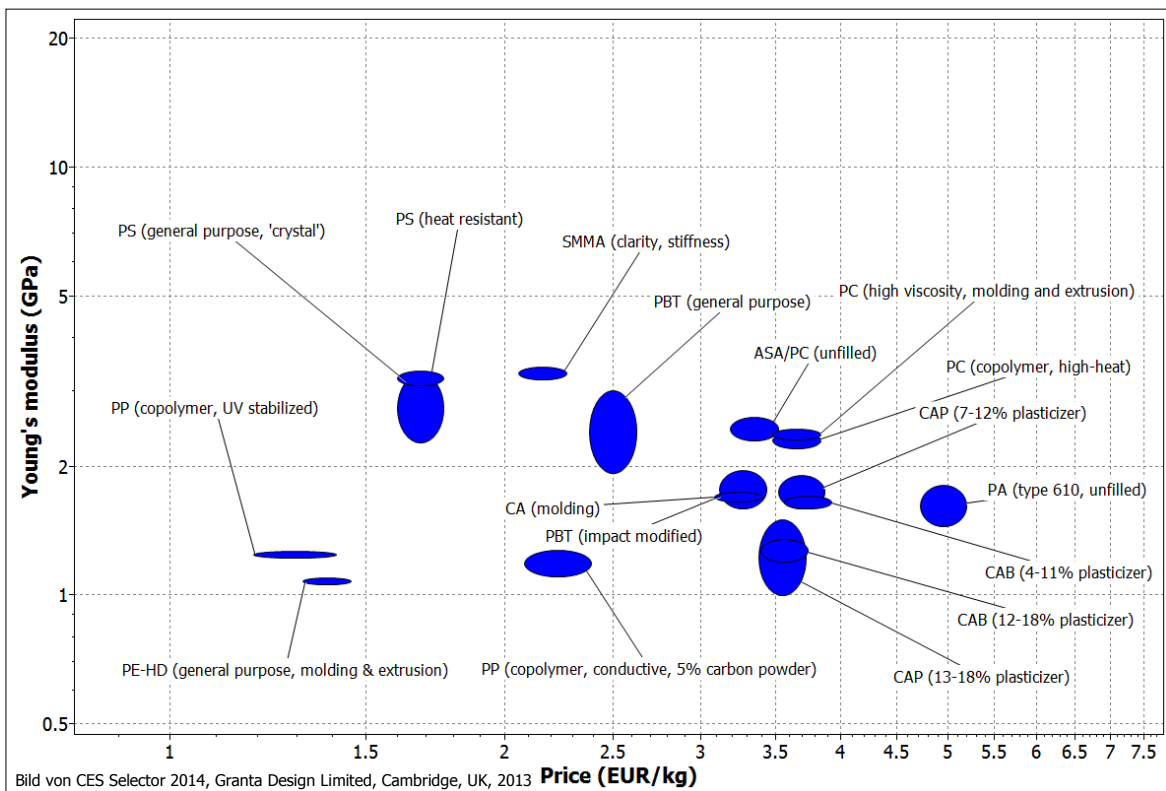


Abbildung 37: Verhältnis von E-Modul zu Preis [6]

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Tabelle 6: Spezifische Auswahlkriterien der 17 gefundenen Materialien

Polymer	E-Modul (N/mm <sup>2</sup> )	Zugfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	UV-Stabilität	Preis (€)	Maximale Einsatztemp. (°C)	Minimale Einsatztemp. (°C)
ASA/PC	2300-2600	59-62	good	3,19-3,51	90-110	-48- -28
CA	1660-1740	21-31	fair	3,08-3,39	53-67	-74- -54
CAB (4-11% Weichmacher)	1600-17000	35,9-52,4	fair	3,56-3,92	96-101	-52- -32
CAB (12- 18% Weichmacher)	1200-1350	31-39,3	fair	3,39-3,74	88,1-96,9	-54- -34
CAP (7-12 % Weichmacher)	1600-1900	31-42,7	fair	3,52-3,87	53-67	-46,9- -33
CAP (12-18 % Weichmacher)	1000-1500	27,6-38,3	fair	3,38-3,72	53-67	-57- -53
SMMA	3200-3400	58-61	fair	2,06-2,27	70-84	-53- -33
PA 610	1450-1800	56,6-69,2	fair	4,72-5,19	90-120	-64- -44
PBT	1930-3000	56,5-60	good	2,38-2,62	112-127	-70- -50
PBT (schlagzäh modifiziert)	1600-1950	27-40	good	3,11-3,43	89-104	-70- -50
PC (COPO hochtemp.)	2210-2400	57,2-69	fair	3,48-3,83	128-144	-47- -37
PC (hochviskos)	2320-2440	62,7-72,4	fair	3,48-3,83	88,1-96,9	-54- -34
PE-HD	1070-1090	22,1-31	fair	1,32-1,45	113-129	-82- -72
PP (COPO; 5% CP)	1110-1270	15,9-16,7	fair	2,08-2,39	58,2-75	-25- -10
PP (COPO; UV stabilisiert)	1230-1260	23,4-24,6	good	1,19-1,41	64,6-81,7	-25- -20
PS (temp. stabilisiert)	3100-3340	44,4-56,5	fair	1,6-1,76	85-95	-75- -65
PS	2280-3280	35,9-51,7	fair	1,6-1,76	75-90	-75- -65

Tabelle von CES Selector 2014, Granta Design Limited, Cambridge, UK 2013

#### Zusammenfassung

Zusammenfassend werden die vier Materialien PP-UV-stabilisiert, PBT, ASA/PC und PE-HD als Gehäusematerialien empfohlen. PP-UV-stabilisiert wegen seiner guten UV-Stabilisation und wegen seines niedrigen Preises. PBT, ASA/PC wegen der UV-Stabilisation und der günstigen mechanischen, sowie thermischen Eigenschaften. PE-HD wegen seines günstigen Preises und seinen guten thermischen Eigenschaften.



## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Tabelle 7 gibt eine Übersicht über typische Anwendungen, Produktnamen und Hersteller der ausgewählten Materialien. Bei dieser Auswahl handelt es sich nur um eine Vorauswahl um weitere Versuche dieser Arbeit zu vereinfachen. Die Entscheidung der genauen Typenauswahl obliegt der Partnerfirma und ist mit dem Hersteller, dem Verarbeiter und dem Konstrukteur gemeinsam abzuklären.

*Tabelle 7: Anwendungen, Produktnamen und Hersteller der ausgewählten Materialien*

Polymer	Anwendungen	Handelsnamen	Firma
ASA/PC	Außenverkleidungen; Gartenmöbel	Luran® Geloy®	Styrolution Sabic
PBT	Außenteile für Autos; elektrische Anschlüsse	Vestodur® Ultradur®	Evonik BASF
PE-HD	Rohre; Tanks; Schüsseln; Spielzeug	Borstar® Hostalen®	Borealis LyondellBasell
PP (COPO; UV stabilisiert)	Außenteile für Autos; Rohre; Batteriekästen	Hostacom® Polyfort®	Lyondell Basell A.Schulmann

Tabelle von CES Selector 2014, Granta Design Limited, Cambridge, UK 2013

## 4.3 Verbindung Touchpanel/Gehäuse

### 4.3.1 Literaturrecherche

Da der Tauchcomputer innen vollständig mit Silikonöl gefüllt ist, muss die Verbindung nicht nur eine vollständige Wasserdichtheit garantieren, sondern im Speziellen auch beständig gegen das eingesetzte Silikonöl sein. Da es üblich ist Touchpanels zu verkleben (Abbildung 38), wurde in erster Linie nach einem Verklebungssystem gesucht.

Während der Verklebung ist vor allem darauf zu achten, dass die Öffnungen zur Befüllung des Touchpanels frei von Kleberspuren bleiben, damit der Befüllungsvorgang ungehindert durchgeführt werden kann.

Es stellte sich während der Literaturrecherche heraus, dass die größte Herausforderung nicht die Beständigkeit gegen das Silikonöl war, sondern einen Kleber zu finden, welcher die PE-Folie des Touchpanels wasserdicht mit dem Gehäusematerial verbindet.

Die Firma Permabond Engineering Adhesives Limited empfiehlt zwei verschiedene Kleber, die den Anforderungen entsprechen könnten. Der Permabond® UV-Cure Gasketmaker. Er ist ein UV-härtender Kleber mit großer Flexibilität auf Basis von Urethanacrylat. Dieser Kleber wird für die Verklebung von großen Panels eingesetzt. Für eine vollständige Aushärtung ist eine Verklebungsbreite von 0,2 mm ausreichend. Bei dem zweiten Kleber handelt es sich um den Permabond® MS 359 Clear auf Basis MS-Polymer (modifiziertes Silan). Dieser Kleber zeichnet sich vor allem durch seine UV-Beständigkeit und seine hohe Klarheit nach der Aushärtung aus. Beide Kleber sind beständig gegen das eingesetzte Silikonöl. Allerdings benötigen die Kleber eine Vorbehandlung der PE-Folie des Touchpanels. Von Seiten der Firma wird der

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Einsatz von ND-Plasma als Oberflächenvorbehandlung oder der Einsatz eines geeigneten Primers empfohlen [36, 37].

Delo Industrie Klebstoffe GmbH empfiehlt einen ihrer optisch klaren Kleber. Dabei handelt es sich um den Delo Dualbond® AD VE516642, den Delo Photobond® OC4011 und den Delo-Dualbond® OC4911. Die Firma verwendet diese Kleber selbst zur Display- und Touchpanelverklebung. Allerdings unterscheidet sich dieses System teilweise von dem in dieser Arbeit eingesetzten System. Wie Abbildung 38 zeigt, verwendet Delo nach dem Verkleben der Touchpanel Folie ein Deckglas. Dieses ist bei dem Tauchcomputer nicht vorhanden. Das resistive 4-Wire Touchpanel liegt direkt am Gehäuse an und ist mit diesem verklebt. Daher befindet sich bei dem System des Tauchcomputers anstelle des Deckglases bereits das Gehäuse [8].

Der Kleber Delo Dualbond® AD VE516642 zeichnet sich vor allem durch seine geringe Volumenschumpfung aus. Eine geringe Volumenschumpfung ist für diese Anwendung notwendig, damit auf das Touchpanel keine zu großen Kräfte übertragen werden. Sind die Kräfte aufgrund der Volumenschumpfung des Klebers zu groß, kann es zu einer Ablösung der PE-Folien von dem Glas-Träger kommen, da diese selbst miteinander verklebt sind. Die Verklebung des Groundlayers mit dem Toplayer des Touchpanels ist nicht für große Belastungen ausgelegt [8].

Alle angebotenen Kleber sind optisch klar, hochtransparent und UV-beständig. Sie weisen eine hohe Feuchtebeständigkeit auf und sind extrem flexibel. Zusätzlich sind alle angebotenen Kleber beständig gegen das eingesetzte Silikonöl [8].

Wie bereits bei den Klebern von Permabond Engineering Adhesives Limited empfiehlt Delo eine Vorbehandlung mit ND-Plasma oder den Einsatz eines Primers, da keiner der Kleber ohne Vorbehandlung eine ausreichende Haftung auf PE aufweist.

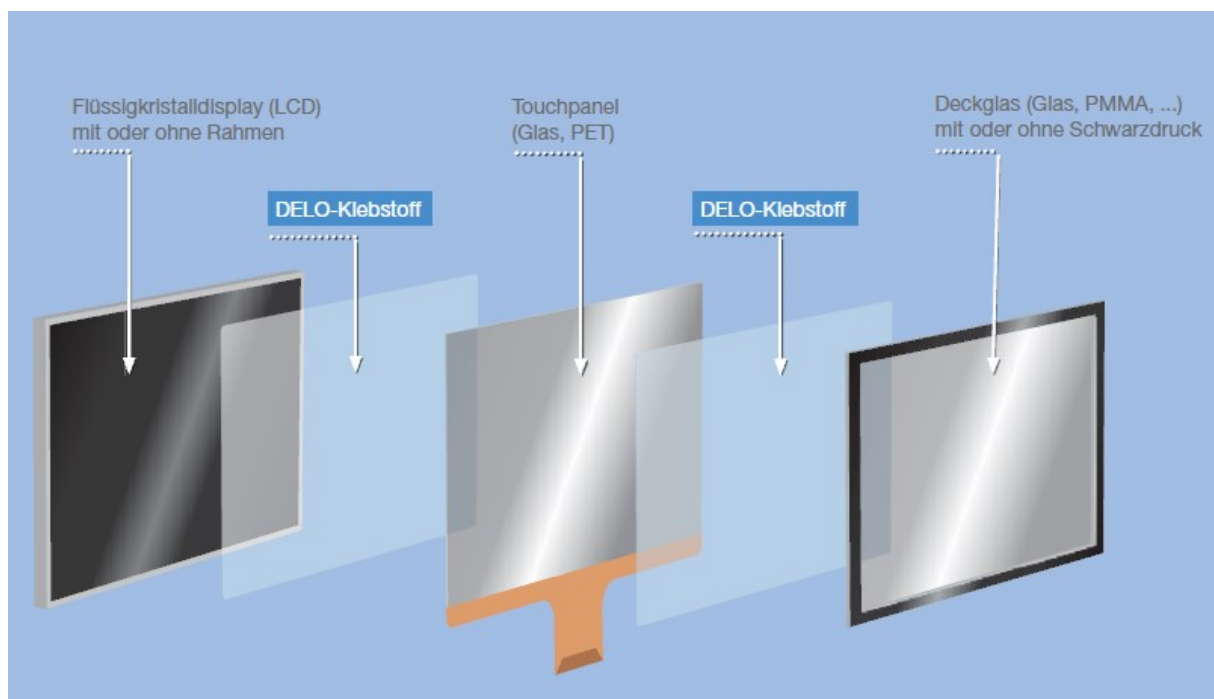


Abbildung 38: System der Touchpanelverklebung von Delo [8]

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Über einen Kontakt bei den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) konnte mit der OFI Technologie & Innovation GmbH Kontakt aufgenommen werden. Laut dem OFI existiert derzeit kein Kleber auf dem Markt, mit dem es möglich ist PE zu verkleben ohne eine entsprechende Vorbehandlung durchzuführen oder einen entsprechenden Primer einzusetzen. Zusätzlich konnte herausgefunden werden, dass der Markt der Displayverklebung fast vollständig in den asiatischen Raum abgewandert ist. Die größten Chancen für einen entsprechenden Kleber würden sich bei der Firma Henkel ergeben.

Aufgrund der Informationen des OFI wurde mit der Firma Henkel Kontakt aufgenommen. Henkel war sehr interessiert an diesem Projekt. Nach einigen Meetings übernahm die Firma das Projekt. Henkel empfiehlt den Loctite 5366<sup>®</sup>. Dabei handelt es sich um einen 1K-Acetoxy-Silikon Kleber. Wie bei allen bereits gefundenen Klebern, ist auch der Loctite 5366<sup>®</sup> unbrauchbar ohne Vorbehandlung oder den Einsatz eines Primers. Henkel wollte daher verschiedenste Vorbehandlungen (ND-Plasma) und Primer ausprobieren und die Verklebung des Touchpanels mit dem Gehäusematerial testen.

Kurz bevor die Touchpanels zum Testen an die Firma Henkel weitergegeben wurden, hielt man Rücksprache mit der Firma EA. Es stellte sich heraus, dass die Verklebung der PE-Folie mit dem Glasträger äußerst schwach ist. Laut Aussagen der Firma dürfte man keine Verklebung auf der PE-Folie vornehmen. Das Touchpanel muss von hinten an das Gehäuse gedrückt werden. Sie selbst hatten die Panels noch nie auf der Seite der PE-Folie verklebt, sollte allerdings von uns eine Verklebung stattfinden, kann die Firma keine Garantie für die richtige Funktionsweise des Touchpanels geben.

Um weiteren Komplikationen aus dem Weg zu gehen, wurde gemeinsam mit Henkel an einer Alternativmöglichkeit gearbeitet. Es musste eine Lösung gefunden werden welche folgende Anforderungen erfüllt:

- Auf die Verklebung zwischen PE-Folie und Glasträger dürfen keine Schälspannung und Zugspannungen übertragen werden.
- Kein aushärtendes System, da es während der Aushärtung zu Volumensänderungen kommt, welche unerwünschte Spannungen mit sich ziehen würde.
- Kein zu großer Anpressdruck des Touchpanels an das Gehäuse, da es sonst zu einem Verschließen der Touchpanelöffnungen kommen kann. Das würde die Befüllung des Touchpanels mit dem eingesetzten Silikonöl negativ beeinflussen
- Dichtheit gegen das Eindringen von Wasser und gegen das Austreten des Silikonöls.

Mit diesen teilweise neuen Anforderungen wurde schnell klar, dass es sich nicht um Verklebung im herkömmlichen Sinne handeln kann. Daher wurde nach einem System gesucht, welches ein Verpressen des Touchpanels mit dem Gehäuse und ein Abdichten gegen Eindringen/Ausdringen von Flüssigkeiten kombiniert. Es wurde schlussendlich ein System ausgewählt, bei dem das Touchpanel, das Display und die Platine mit den elektronischen Komponenten von hinten über M2 Schrauben an das Gehäuse gepresst werden. Zusätzlich verläuft eine Nut im Gehäuse auf der Höhe der Leiterbahnen des Touchpanels. In diese Nut soll eine elastische Dichtmasse eingebracht werden. Durch die Verschraubung von hinten wird die Dichtheit des Computers garantiert und durch das elastische Verhalten der Dichtmasse würden die Befüllungsöffnungen nicht verschlossen werden. Punkt 4.3. „Gehäusedesign“ beschreibt das gewählte System genauer und

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

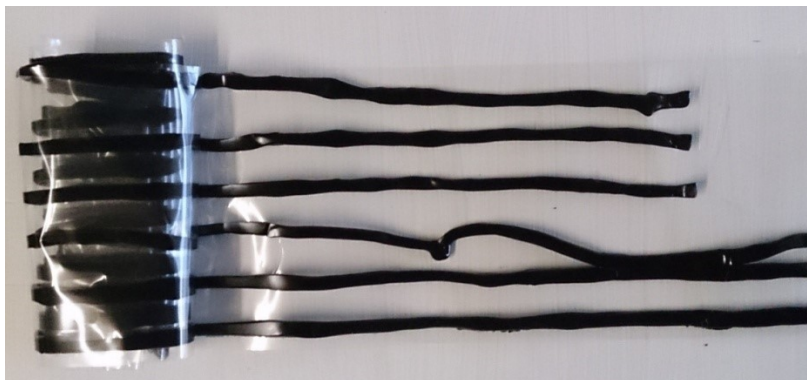
anschaulicher. In diesem Punkt wird nachfolgend nur auf die gewählten Dichtmassen eingegangen.

Nachdem diese Lösung von allen beteiligten Firmen als durchführbar angesehen wurde, konnte mit der Auswahl der Dichtmassen begonnen werden. Henkel empfiehlt hierzu zwei verschiedene Lösungen. Auf der einen Seite ein Spezialsilikon, Loctite SI 5970<sup>®</sup> (Abbildung 39). Das Silikon müsste zwar auch aushärten, allerdings könnte dies vor dem Einbau des Touchpanels geschehen. Man würde das Silikon in die Nut einbringen und aushärten lassen. Nach dem Aushärtungsvorgang werden Touchpanel, Display und Platine eingelegt und verschraubt. Das elastische Silikon würde für die Dichtheit garantieren. Zusätzlich wäre es gegen das Silikonöl beständig, transparent und UV- stabil. Der Nachteil an diesem System liegt in der Aushärtezeit. Von Seiten der Firma wäre eine Aushärtezeit von einer Woche vorgeschrieben. Davor ist das Silikon nicht zu 100 % ausgehärtet, was zu unerwünschten Spannungen auf das Touchpanel führen kann. Daher ist es fraglich, ob dieses System für eine Produktion von 20.000 bis 25.000 Tauchcomputern wirtschaftlich ist.



*Abbildung 39: Kartusche des Loctite SI 5970 der Firma Henkel*

Die zweite Variante wäre eine plasto-elastische Dichtmasse welche nicht aushärten müsste. Es handelt sich um das sogenannte Terostat 81<sup>®</sup> (Abbildung 40). Terostat 81<sup>®</sup> ist ein Dichtstoff auf Basis von Butylkautschuk. Es ist ein stark klebendes, plasto-elastisches Dichtband zum Verkleben von PE-Folien und anderen Kunststoffbahnen. Dieser Dichtstoff würde sich sehr gut für diese Anwendung eignen, da man aufgrund seiner starken Klebrigkeit keine großen Kräfte für die Dichtheit aufbringen muss. Ein zusätzlicher Vorteil besteht darin, dass dieses Material nicht aushärten muss. Daher können die anderen Komponenten, direkt nach dem Einlegen des Dichtbandes in die Nut, mit dem Gehäuse verbunden werden. Dieses System weist allerdings einen nicht zu unterschätzenden Nachteil auf [21].



*Abbildung 40: Terostat 81<sup>®</sup> von der Firma Henkel*

## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Der Einsatz dieses Werkstoffes liegt in der Trockenanwendung oder in der Anwendung als Fensterdichtmasse. Dadurch ist er UV-stabil und wasserbeständig, allerdings liegen keine Ergebnisse über die Beständigkeit gegenüber Silikonöl vor. Die Literaturrecherche (siehe Punkt 2.2 Butylkautschuk) bzw. auch Informationen seitens der Firma Henkel ergaben, dass Butylkautschuk nur mäßig beständig gegen Silikone ist. Durch den ständigen Kontakt mit dem Silikonöl kann es passieren, dass die Dichtung über längere Zeit hinweg Silikon aufnimmt und daher aufgrund der Quellung als flüssige Masse aus der Fuge austritt. Dies würde zu einem Versagen der Dichtungswirkung führen. Zusätzlich ist die Dauergebrauchstemperatur der Dichtmasse zu überprüfen. Laut Aussagen der Firma ist die Temperaturbeständigkeit des Werkstoffes ab einer Temperatur von 60 °C kritisch. Da unter Sonnenlichteinwirkung die Temperatur des Tauchcomputers zeitweise über 60 °C ansteigen kann, ist dies ebenfalls zu überprüfen [21].

### Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass es im europäischen Raum schwer ist, Kleber für die Touchpanelverklebung zu finden, da große Teile dieses Marktes nach Asien abgewandert sind. Zusätzlich ist es notwendig, die PE- Folie entweder mit einem geeigneten Verfahren vorzubehandeln oder einen geeigneten Primer einzusetzen. Aufgrund der Tatsache, dass die Verklebung zwischen PE- Folie und Glasträger des Touchpanels nur sehr geringe Schäl- und Zugkräfte aushält, wird auf eine Verklebung mit aushärtenden Systemen verzichtet. Sollten die ausgewählten System bei den Prototypentests nicht funktionieren, können nachfolgend Tests mit den gefundenen Klebern der Firma Delo und der Firma Permabond Engineering Adhesives Limited durchgeführt werden. Das System der Firma Henkel mit der Silikondichtmasse wird im Zusammenhang mit dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Es handelt sich hierbei um ein zu unwirtschaftlicheres System aufgrund von anfallenden Liegezeiten, da die Aushärtezeit von Seiten der Firma mit einer Woche datiert ist. Diese Art der Verklebung weist allerdings sonst keine Nachteile auf und kann daher als Alternative zu dem gewählten System angesehen werden.

Am Ende der Recherche wurde ein System ausgewählt bei dem der Dichtstoff aus Butylkautschuk besteht. Dieses System kann am einfachsten umgesetzt werden und ist am wirtschaftlichsten, da es keine Aushärtezeit benötigt. Es mussten allerdings Nachfolgeuntersuchungen im Bereich Beständigkeit gegen das eingesetzte Silikonöl und im Bezug auf Dauergebrauchstemperatur durchgeführt werden.

### 4.3.2 Prüfung auf Beständigkeit der Verbindung gegen Silikonöl und Nachweis der Dauergebrauchstemperatur

Die Literatur zeigt, dass Butylkautschuk nur mäßig gegen Silikonöl beständig ist. Nach Aussagen der Firma des Terostat 81<sup>®</sup>, welches als Basis Butylkautschuk hat, sollte eine Lagerung in Silikonöl über längere Zeit vermieden werden. Es kann der Fall eintreten, dass das Terostat 81<sup>®</sup> durch das Silikonöl verflüssigt wird. Dieser Umstand würde keine Wasserdichtheit garantieren.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Da alle anderen Eigenschaften auf diese Anwendung passen, musste die Beständigkeit gegen das Silikonöl überprüft werden. Hierzu wurden vorerst verschiedene Lagerungsversuche bei Raumtemperatur durchgeführt. Dazu wurden 1 g bis 2 g an Terostat 81<sup>®</sup> in das Silikonöl Elbesil B20 eingelegt um eine mögliche Massenänderung nachzuweisen (Abbildung 41). Dazu wurden die Proben aus dem Silikonöl entfernt, anschließend mit Wasser ab gespült und mit einem trockenen Tuch abgewischt. Ist die Änderung des Gewichtes nach längerer Lagerung in Silikonöl markant (beispielsweise über 20 %), so kann davon ausgegangen werden, dass das Silikonöl einen starken Einfluss auf den Butylkautschuk hat.

Eine Verringerung des Gewichtes lässt drauf schließen, dass das Silikonöl Stoffe aus dem Butyl herauslöst. Auf der anderen Seite würde eine Gewichtszunahme auf eine Quellung, bzw. Aufnahme des Silikonöls schließen lassen. Sollte eine dieser beiden Abweichungen vom Ausgangsgewicht eintreten, kann das Material nicht als Dichtstoff für den Tauchcomputer eingesetzt werden. Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Lagerungsversuche bei Raumtemperatur.

Neben der Gewichtsänderung wurde die Verklebbarkeit rein subjektiv festgehalten. Hierzu wurden zwei PP-Plättchen mit Hilfe von Terostat 81<sup>®</sup> verklebt und ebenfalls in Silikonöl gelagert. In gewissen Abständen, siehe Tabelle 8, wurden die Plättchen aus dem Silikonöl genommen, ab gespült und versucht die Plättchen voneinander zu trennen. Es wurde der rein subjektive Kraftaufwand zur Trennung, sowie das Aussehen der Klebeflächen festgehalten. Findet eine Dehnung des Terostat 81<sup>®</sup> während des Auseinanderziehens statt, so kann davon ausgegangen werden, dass die adhäsiven Kräfte durch das Silikonöl nicht zerstört wurden. Rutschen die einzelnen Plättchen vom Terostat 81<sup>®</sup> ab, so wurde der Werkstoff durch das Silikonöl so weit verändert, dass seine klebrigen Eigenschaften nicht mehr in Kraft treten.

Polypropylene ist einer der Werkstoffe, der sich aufgrund der Materialvorauswahl als geeignetes Gehäusematerial eignet. Es wurde für die Verklebungsversuche ausgewählt, da er die größte und einfachste Verfügbarkeit für schnelle Voruntersuchungen aufweist. Sollte man sich im Nachhinein für ein anderes Material aus der Vorauswahl entscheiden, müssen die Klebrigkeitsvoruntersuchungen nochmals durchgeführt werden.



Abbildung 41: Lagerung des Terostat 81<sup>®</sup> in Silikonöl

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Tabelle 8: Übersicht der Lagerungsversuche von Terostat 81<sup>®</sup> bei Raumtemperatur

Lagerungsdauer	Einwaage vor Lagerung (g)	Gewicht nach Lagerung (g)	Masseänderung (%)	Bemerkung zur Verklebung
24h	1,016	1,012	0,39	Verklebung unter Kraftaufwand trennbar; Terostat 81 <sup>®</sup> haftet gut auf PP-Patte
	1,420	1,390	2,11	
1Woche	1,226	1,220	0,49	Kein markanter Unterschied zu 24h
	1,342	1,344	-0,15	
2 Wochen	1,771	1,765	0,33	Kein markanter Unterschied zu 24h
	1,825	1,822	0,16	
4 Wochen	1,391	1,395	-0,29	Kein markanter Unterschied zu 24h
	1,742	1,722	1,15	
8 Wochen	1,903	1,892	0,58	Kein markanter Unterschied zu 24h
	2,019	2,018	0,05	
12 Wochen	1,510	1,420	5,96	Kein markanter Unterschied zu 24h
	1,600	1,490	6,87	

Aus Tabelle 8 ist ersichtlich, dass während der Lagerung keine markanten Gewichtsveränderungen stattgefunden haben. Die Änderungen befinden sich in einer Größenordnung, in welcher keine qualitative Aussage über die Gewichtsveränderungen durch das Silikonöl möglich ist. Die Änderungen wurden mit großer Wahrscheinlichkeit durch das Auftreten von Fehlerquellen verursacht. Mögliche Fehlereinflüsse sind die Messungenauigkeit der Waage, sowie keine 100 %ige Entfernung des Silikonöls auf der Oberfläche des Terostat 81<sup>®</sup>. Der Lagerungsversuch zeigte, dass die Lagerung im Silikonöl über 3 Monate bei Raumtemperatur keinen markanten Einfluss auf die Klebrigkeit des Terostat 81<sup>®</sup> hat.

Um genauere Aussagen über den Einfluss des Silikonöls auf das Terostat 81<sup>®</sup> treffen zu können, wurde eine weitere Testserie entwickelt. Dabei wurde nicht nur die Lagerungsdauer, sondern auch die Temperatur variiert. Die Lagerung erfolgte dabei jeweils 2 Wochen bei den unterschiedlichen Temperaturen in einem Umluftofen und anschließend 2 Wochen bei Raumtemperatur. Die höheren Temperaturen sollten die möglichen Reaktionen beschleunigen, sodass eine Masseänderung deutlicher sichtbar wurde (Tabelle 9). Nach der Messung der Masseänderung wurden die Proben unterschiedlichen Verfahren ausgesetzt um qualitativ festzustellen, ob Silikonöl vom Werkstoff aufgenommen wurde und ob die erhöhten Temperaturen den Werkstoff thermisch schädigten.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Tabelle 9: Lagerungsbedingungen und Masseänderung der Testserie bei erhöhten Temperaturen

Lagerungsdauer	Lagerbedingungen	Einwaage vor Lagerung (g)	Gewicht nach Lagerung (g)	Masseänderung (%)
4 Wochen	4 Wochen Raumtemperatur	1,799	1,792	0,390
		1,820	1,790	1,650
	2 Wochen 60°C + 2 Wochen Raumtemperatur	1,514	1,510	0,260
		1,620	1,550	4,320
	2 Wochen 80°C + 2 Wochen Raumtemperatur	2,321	2,300	0,900
		2,154	2,129	1,160

Tabelle 9 zeigt, dass auch bei erhöhten Lagerungstemperaturen die Massenänderungen sehr klein sind (<5 %). Werden die einzelnen Werte miteinander verglichen, so ist ein leichter Trend zu erkennen: Umso höher die Lagerungstemperaturen, desto mehr Masse verliert der Werkstoff. Allerdings befinden sich die Masseänderungen in einem so kleinen Bereich, dass wiederum die Änderung des Gewichtes durch die möglichen Fehlerquellen nicht auszuschließen ist.

Daher war es zwingend notwendig, genauere Verfahren auszuwählen, welche den Einfluss des Silikonöls auf den Werkstoff beschreiben und qualitativ festhalten. Der erste Schritt war die Durchführung einer Extraktion der Proben von Tabelle 9.

#### Extraktion

Wie bereits in Kapitel 2.5.1 beschrieben, bedient sich die Extraktion der unterschiedlichen Löslichkeiten der zu untersuchenden Stoffe. Daher musste ein Lösungsmittel gefunden werden, welches Silikon bzw. Silikonöl löst, das Terostat 81<sup>®</sup> auf Basis von Butylkautschuk allerdings unangetastet lässt.

Laut Literatur [46] wird Silikon durch die Chemikalie Isopropanol gelöst. Um zu untersuchen, ob sich das Terostat 81<sup>®</sup> in Isopropanol nicht löst, wurden ca. 15 g des Werkstoffes in kochendes Isopropanol gelegt. Es zeigte sich, dass der Werkstoff nach einer Stunde in kochendem Isopropanol nicht gelöst wurde. Es war noch mehr als 90 % der eingelegten Masse vorhanden. Daher wurde für die Extraktionversuche Isopropanol als geeignetes Lösungsmittel verwendet. Um dieses Ergebnis abzusichern, wurde von Terostat 81<sup>®</sup> ohne Lagerung in Silikonöl ebenfalls eine Extraktion durchgeführt.



## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

### Verwendete Geräte

- Ultra-Zentrifugalmühle Retsch ZM 200 (12 Zahn-Rotor, Sieb 1 mm)
- Rundfilter (125 mm Whatman 602 H)
- Soxhelt 30 ml + Rückflusskühler
- Siedesteinchen
- Analysenwaage Mettler Toledo AG245 (GeräteNr.: S500603)
- Exsikkator
- Rundkolben 250 ml

### Probenvorbereitung

Die zu untersuchende Probe wurde aus dem Silikonöl entnommen, das auf der Oberfläche verbleibende Silikonöl wurde möglichst restlos mit Wasser abgespült und anschließend das verbliebene Wasser abgewischt. Danach wurde die Probe mit Flüssigstickstoff (LN<sub>2</sub>) vorgekühlt und auf der Retsch ZM 200 mit einem 1 mm Sieb bei 10000 U/min gemahlen. Aufgrund der hohen Klebrigkeit des Werkstoffes verklebten die gemahlene Stücke nach dem Mahlen wieder. Daher musste eine Einwaage in den Rundfilter möglichst schnell (< 1 min) stattfinden. Der Rundfilter wurde vor der Messung 1 h bei 105 °C getrocknet und anschließend im Exsikkator ausgekühlt.

### Durchführung

Es wurde zwischen 0,6 g und 0,8 g Probe in den Filter eingewogen. Dabei wart zu beachten, dass sowohl Filter als auch Probe separat verwogen werden, da das Gewicht des Filters in geringen Maßen variiert. Der Filter wurde verschlossen und im 30 ml Soxhelt Extraktor eingebracht. Ein 250 ml Erlenmayer Kolben, in welchem sich 50 ml Lösungsmittel und drei Siedesteinchen befanden, wurde ebenfalls am Extraktor angebracht. Danach lief die Extraktion nach dem Automatikprogramm. Die Messung dauerte 17 h mit 15 - 25 Überläufen pro Stunde. Abschließend wurde der Filter aus dem Extraktor entfernt, 2 h bei 105 °C getrocknet, ausgekühlt und verwogen. Die Auswertung der Massenverhältnisse erfolgte nach folgender Formel:

$$\text{extrahierbare Anteile [\%]} = \frac{m_{\text{Probe}} - (m_{\text{extrahierter Filter}} - m_{\text{Filter}})}{m_{\text{Probe}}} \times 100$$

Von jeder Probe wurden zwei Extraktionen durchgeführt und die Mittelwerte miteinander verglichen. Für eine qualitative Aussage des Mittelwertes, sind zwei Messwerte in der Regel zu wenig. Aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit der Maschine, konnten allerdings keine weiteren Messungen durchgeführt werden. Dies stört allerdings nicht weiter die Qualität der Ergebnisse, da man durch die Extraktion lediglich einen Trend herauslesen wollte. Die Absolutwerte der Messungen sind in diesem Fall nachrangig. Üblicherweise sollte bei zwei Messungen mit dem minimalen und maximalen Wert weitergearbeitet werden. Da die Werte allerdings sehr ähnlich sind, wurde in diesem Fall trotz der geringen Anzahl an Werten, der Mittelwert für die Interpretation herangezogen.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

##### Ergebnisse

Alle Ergebnisse mit den jeweiligen Einwaagen befinden sich im Anhang 10.1. Tabelle 10 gibt eine Übersicht zu den extrahierten Anteilen der einzelnen Proben entsprechend Tabelle 9.

*Tabelle 10: extrahierte Anteile im Überblick*

Lagerbedingungen	Proben Nr.	Messungs Nr.	extrahierter Anteil (%)	Mittelwert (%)
4 Wochen Raumtemperatur	1	1	1,71	1,69
		2	1,67	
	2	1	1,69	1,68
		2	1,66	
2 Wochen 60°C + 2 Wochen Raumtemperatur	3	1	2,26	2,30
		2	2,34	
	4	1	2,02	2,07
		2	2,12	
2 Wochen 80°C + 2 Wochen Raumtemperatur	5	1	5,07	5,10
		2	5,13	
	6	1	5,13	5,11
		2	5,09	
reines Terostat 81 <sup>®</sup> ohne Lagerung im Silikonöl	7 (Extrakt neutral)	1	2,06	2,15
		2	2,24	

Wie schon bei den Massenänderungsuntersuchungen waren auch hier die Unterschiede gering. Betrachtet man die einzelnen Ergebnisse genauer, so ist auffällig, dass die extrahierten Anteile des reinen Terostat 81<sup>®</sup> größer waren, als die der Proben bei vier wöchiger Lagerung in Silikonöl bei Raumtemperatur. Wurde die Lagerungstemperatur erhöht (Probe 3 & 4 60 °C, Probe 5 & 6 80 °C), so stiegen die extrahierten Anteile mit zunehmender Temperatur an.

Die Lagerung bei 80 °C überschreitet die Dauergebrauchstemperatur des Werkstoffes um 20 °C. Es ist daher nicht auszuschließen, dass sich bei dieser Temperatur bereits Abbauprodukte bildeten und diese in Isopropanol löslich waren.

Die Extraktion zeigte, dass sich durch die Lagerung in Silikonöl mit erhöhten Temperaturen mehr lösliche Bestandteile im Werkstoff befanden. Dies lässt auf eine Aufnahme von Silikonöl in das Terostat 81<sup>®</sup> schließen. Aufgrund der Extraktionsergebnisse kann allerdings keine Aussage dazu getroffen werden, warum das reine Terostat 81<sup>®</sup> mehr lösliche Anteile aufwies als das in Silikonöl gelagerte. Eine Möglichkeit besteht darin, dass das Terostat 81<sup>®</sup> leicht flüchtige Bestandteile an das Silikonöl abgibt, welche durch Isopropanol lösbar wären. Diese befinden sich nach der Lagerung im Silikonöl nicht mehr im Terostat 81<sup>®</sup> und daher sinkt der gesamte Anteil an extrahierbaren Bestandteilen. Allerdings kann dies auch auf die entstandenen Fehlerquellen, wie Restsilikon auf der Oberfläche der Probe, ungenaue Einwaage etc., zurückgeführt werden. Da sich die extrahierten Anteile in einem sehr kleinen Bereich befanden beeinflussen auch kleine Fehlerquellen die Ergebnisse sehr stark. Um zu bestimmen, welche Anteile sich aus den Proben lösten und ob die 80 °C zu einer Schädigung des Materials führten, wurden von den Extrakten TGA- und Gaschromatographieuntersuchungen durchgeführt.

## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

### Gaschromatographie

Die Gaschromatographie in Kombination mit einem Massenspektrometer lässt sowohl eine qualitative, als auch eine quantitative Bestimmung der Bestandteile der zu untersuchenden Probe zu. Im Zuge dieser Arbeit wurde das Verfahren nur zur qualitativen Untersuchung verwendet. Ziel der Gaschromatographie war es, zu beweisen, dass die extrahierten Bestandteile der Terostat 81<sup>®</sup> Proben, Silikonanteile aufweisen. Dies würde bestätigen, dass der Werkstoff bei der Lagerung im Silikonöl Teile des Silikonöls aufnimmt. Aus zeitlichen Gründen wurde von den einzelnen Extrakten jeweils nur von der ersten Messung ein Chromatogramm aufgenommen. Zu jeder Extraktprobe wurde ebenfalls das Silikonöl chromatographisch untersucht, um festzustellen ob Terostat 81<sup>®</sup>-bestandteile während der Lagerung in das Silikonöl übergegangen sind.

#### Verwendete Geräte

- Gaschromatograph Agilent Technologies 7890 A GC-System (Geräte Nr. : S000781)
- Massenspektrometer Agilent Technologies 5975 C inert XL EI/CI MSD

#### Probenvorbereitung

Bei den Extraktproben wurde keine Probenvorbereitung durchgeführt. Die Extraktlösungen wurden unvorbehandelt in die GC/MS eingewogen. Die Silikonöle der jeweiligen Proben wurden volumetrisch 1:1000 mit Isopropanol verdünnt

#### Durchführung

Zur Bestimmung wurden 0,5 µl der Probe eingespritzt und das Chromatogramm bis zu einer Zeit von 40 min aufgenommen. Die dabei eingestellten Parameter sowie die verwendete Peripherie zur Durchführung von GC /MS gibt Tabelle 11 wieder. Bei der Trennsäule handelte es sich um eine Dünnschicht-Kapillartrennsäule.

*Tabelle 11: Parameter und Peripherie der GC/ MS*

Liner	Single dot + Glaswolle (JAS 90303L)
Einspritzvolumen	0,5 µL (splitless)
Inj. Temp.	280 °C
Säule	J&W HP-5MS, 30 m x 0,25 mm, 0,25 µm Film
Detektor	MS(MS Interface 320 °C)
Trägergas	Helium 6.0
Flow	1,0 ml/min

#### Ergebnisse

Abbildung 42 zeigt die Kurven aller Chromatogramme der Extrakte. Die Zuordnung der Proben erfolgte nach Tabelle 10. Betrachtet man das Diagramm allgemein, so lässt sich ein möglicher Trend herauslesen. Der typische Peakverlauf des Butyls ist im Zeitbereich zwischen 15 min und 25 min erkennbar (wellenartiger Verlauf der Basislinien). Dieser wellenartige Verlauf, war zu erwarten, da das Terostat 81<sup>®</sup> als Basisstoff Butylkautschuk

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

aufweist. Umso höher die Lagerungstemperatur im Silikonöl ist (Probe 5 und 6), desto niedriger wird die Basislinie der Proben (graue und orange GC-Kurve). Das würde bedeuten, dass umso höher die Lagertemperatur ist, desto mehr Butyl wird aus der Probe herausgelöst. Dies wäre allerdings eine quantitative Aussage und darf in diesem Fall nicht getätigt werden. Die Untersuchung diente nur zur qualitativen Ermittlung der Bestandteile. Es fand keine Validierung der Methode statt. In der Abbildung wäre zwar ein Trend erkennbar, dieser kann aber auch aufgrund von Fehlerquellen entstanden sein, ist daher nicht reproduzierbar und muss sich nicht bei einer Wiederholungsmessung bestätigen. Zusätzlich ist aufgrund der Höhe der Peaks ersichtlich, dass der Detektor überladen wurde, da der Detektor nur bis zu einer Abundanz bis  $<8.000.000.000$  ausgelegt ist. Betrachtet man die einzelnen Chromatogramme aller Proben (Anhang 10.2), so stellt man auch ein Fronting fest, welches auf eine Überladung der Säule hindeutet. Daher darf in den Diagrammen keine Aussage über die Höhe der Basislinie, noch über die Höhe der Peaks getroffen werden. Die Chromatogramme können nur auf vorhandene oder nicht vorhandene Peaks ausgewertet werden. Um die Höhe der Peaks zu verringern, bzw. das Fronting zu verhindern, wäre eine Verdünnung der Proben notwendig. Dies wurde allerdings nicht durchgeführt, da ohne Verdünnung die einzelnen Bestandteile besser sichtbar sind und die Auswertung auf vorhandene Peaks leichter durchführbar ist.

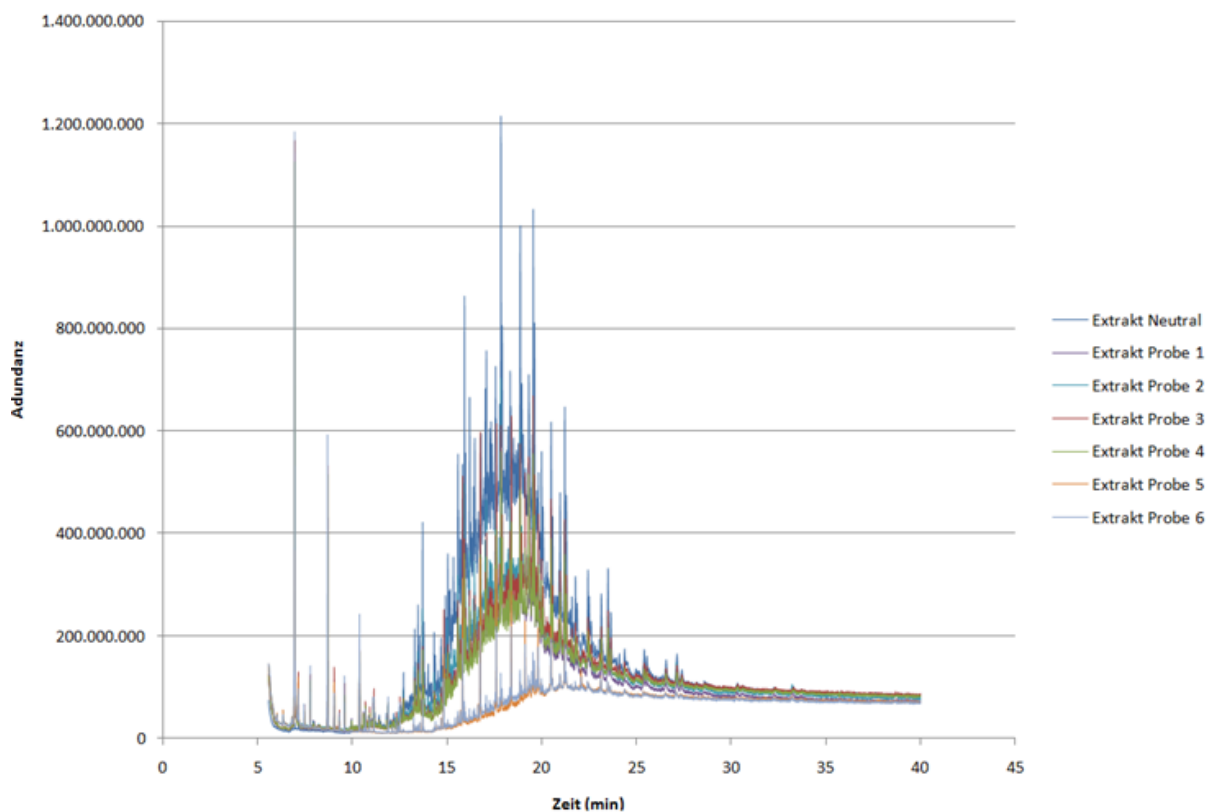


Abbildung 42: Chromatogramme der Extraktionen

Betrachtet man den vorderen Bereich des Diagramms (Abbildung 43), so lassen sich qualitative Aussagen über die Extrakte treffen. Es ist erkennbar, dass die Peaks bei 7 min, 8,75 min und fast 10,5 min nur bei dem neutralen Extrakt nicht vorhanden sind. Bei diesen Peaks handelt es sich um Octamethylcyclotetrasiloxan, Dekamethylcyclopentasiloxan und Dodecanmethylcyclohexasiloxan. Diese Substanzen sind alle Bestandteile von Silikon bzw.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Silikonöl. Dadurch wird bestätigt, dass das Terostat 81<sup>®</sup> bei Lagerung in Silikonöl Bestandteile von diesem aufnimmt. Es kann allerdings keine Aussage darüber getroffen werden, inwiefern sich diese Aufnahme auf das Verhalten des Werkstoffes auswirkt, bzw. wie viel von diesen Bestandteilen bei der jeweiligen Temperatur aufgenommen wird.

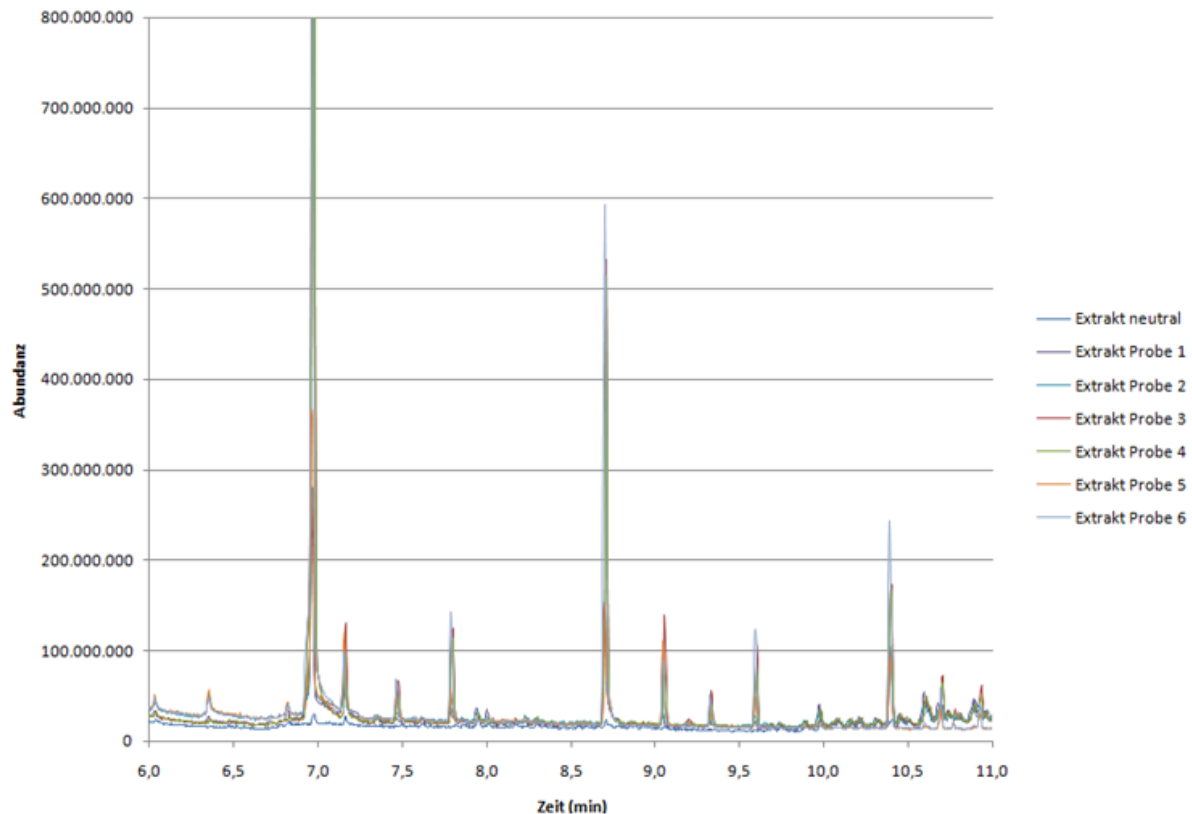


Abbildung 43: Chromatogramme der Extraktionen im Bereich von 6 min bis 11 min

Abbildung 44 zeigt den Vergleich aller Chromatogramme der getesteten Silikonöle. Aus dem Zusammenstellungsdiagramm lässt sich keine Aussage darüber treffen, ob Bestandteile des Terostat 81<sup>®</sup> in das Silikonöl übergegangen ist. Das Chromatogramm der Extraktionen zeigte, dass sich die für Butyl typischen Peaks im Zeitbereich von 15 min bis 25 min ergeben. Daher wurde dieser Zeitbereich auch bei den Silikonölen genauer untersucht. In diesem Zeitbereich wurde versucht einen Peak ausfindig zu machen, welcher bei allen Proben, außer bei der reinen Silikonölprobe (Elbesil B20) vorhanden ist. Das würde qualitativ daraufhin deuten, dass Teile des Terostat 81<sup>®</sup> in das Silikonöl übergegangen sind.

Um die Kurven genauer voneinander unterscheiden zu können wurde der erwähnte Zeitbereich in Minutenabständen ausgewertet. Es zeigte sich, dass zwischen den einzelnen Proben die Peakhöhe deutlich variiert, die Peaks jedoch bei allen Proben vorhanden sind. Daher wurde der Zeitbereich über die gesamte Messdauer minütlich ausgewertet. Es musste festgestellt werden, dass kein Peak, der bei der reinen Silikonprobe nicht vorhanden ist, bei den anderen Proben vorhanden ist. Das würde darauf schließen lassen, dass keine Bestandteile des Terostat 81<sup>®</sup> in das Silikonöl übergehen.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Betrachtet man die Messung allerdings genauer, lässt sich dies nicht mit Sicherheit bestätigen. Die Extraktion hatte gezeigt, dass nur geringe Anteile des Terostat 81<sup>®</sup> extrahierbar waren. In diesen Extrakten befanden sich Spuren von Silikonöl. Diese Proben wurden unverdünnt mittels GC/MS untersucht. Die Silikonölproben wurden mit einer Verdünnung von 1:1000 untersucht. Diese hohe Verdünnung war notwendig, um eine zu große Überladung des Detektors zu verhindern. Sieht man sich die Chromatogramme der einzelnen Proben der Silikonöle an, so kann man ein Tailing erkennen, was auf eine Überladung der Säule hinweist. Zusätzlich weist jedes Gerät ein gewisses Grundrauschen der Basislinie auf, was die Auswertung von sehr kleinen Peaks schwer bis unmöglich macht. Dadurch kann auch davon ausgegangen werden, dass selbst wenn Spuren von Terostat 81<sup>®</sup> in das Silikonöl übergegangen sind, diese aufgrund der Verdünnung und des Rauschens so gering sind, dass sie mit dieser Methode nicht ausreichend darstellbar sind.

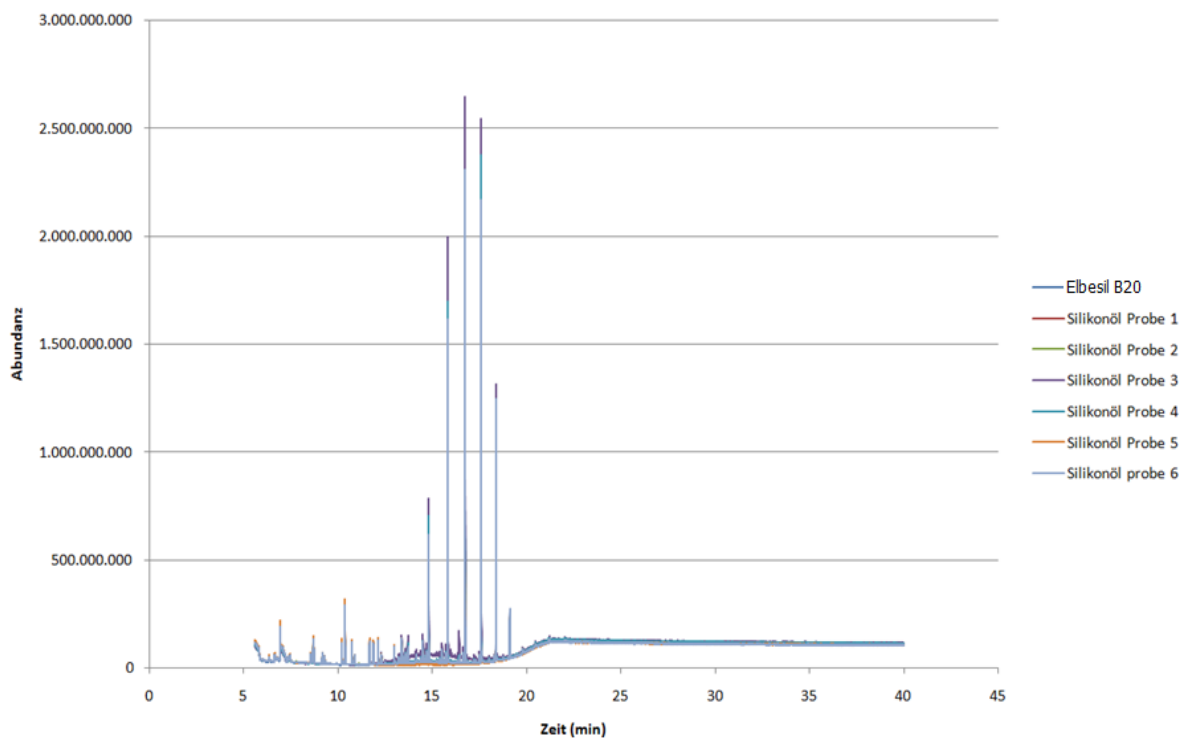


Abbildung 44: Chromatogramme der Silikonöle

#### TGA

Die TGA Untersuchung diente dazu, den Effekt des Silikonöls auf die thermische Beständigkeit des Terostat 81<sup>®</sup> zu untersuchen und um einen möglichen Abbau des Terostat 81<sup>®</sup> bei der 80 °C Lagerung festzustellen. Für die TGA Untersuchungen wurden alle Proben verwendet, die bereits für die Extraktion verwendet wurden. Zusätzlich wurde das reine Silikonöl als Vergleich untersucht. Bis auf das Silikonöl wurden von jeder Probe zwei Untersuchungen durchgeführt. Eine zweite Messung des Silikonöls wurde aufgrund der Tatsache, dass sich dessen Qualität nicht ändert und das Gerät vorschriftsmäßig kalibriert wurde, für nicht notwendig empfunden.

#### Verwendete Geräte

- Netzsch TGA 209 F1 (GeräteNr.: S00779)

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tiegel 85 µl gegläht bei 1000 °C/1h
- Analysenwaage Sartorius, CP2P (GeräteNr.: S00780)

##### Probenvorbereitung

Die Proben wurden, wie bei der Extraktion, aus dem Lagerungsbehältnis entfernt, mit Wasser abgespült und anschließend das verbleibende Silikon an der Oberfläche möglichst restlos mit Hilfe eines Tuches entfernt.

##### Durchführung

Die Proben wurden auf das µg genau in den Tiegel eingewogen und in diesem platziert. Die Aufnahme der TGA Kurven erfolgte anschließend automatisch. Tabelle 12 gibt Auskunft über die eingestellten Maschinenparameter. Die eingestellten Parameter blieben für alle untersuchten Proben gleich.

*Tabelle 12: Maschinenparameter zur TGA Untersuchung*

Einwaage	13 mg - 17 mg	
Heizrate	15 °C/min	
Temperaturprogramm	35 °C - 650 °C	40 ml/min Stickstoff
	650 °C - 950 °C	40 ml/min Synthetische Luft
Schutzgas	40 ml/min Stickstoff	

##### Ergebnisse

Abbildung 45 zeigt die gesamten Ergebnisse der TGA Untersuchungen. Dabei erfolgte die Probenzuordnung nach Tabelle 10, Seite 58. Obwohl die Anzahl an Proben das Diagramm überladen, ist bereits hier deutlich ersichtlich, dass das Silikon keine anorganischen Reste aufweist. Alle Bestandteile des Silikonöls werden in der ersten Abbaustufe entfernt und es verbleibt kein anorganischer Rest. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass die erste Abbaustufe der einzelnen Proben mit unterschiedlichen Steigungen entsteht. Zusätzlich liegen die Proben nach der ersten und zweiten Abbaustufe auf unterschiedlichen Restmasseniveaus. Eine genauere Interpretation der Kurven lässt sich aus diesem Diagramm nicht herauslesen.

Zur genaueren Interpretation der Ergebnisse wurden die Kurven zusammengefasst. Probe 1 und 2, Probe 3 und 4, sowie Probe 5 und 6 weisen jeweils die gleichen Lagerungsbedingungen auf. Daher wurden die Proben untereinander verglichen. Es zeigte sich, dass sich zwischen den Proben mit der gleichen Lagerungsbedingung kein erkennbarer Unterschied ergab. Ebenso zwischen der ersten und zweiten Messung. Im Anhang 10.3 befinden sich die Diagramme zu den jeweiligen Vergleichen. Die kleinen Unterschiede in den Kurven lassen sich auf Abweichungen in der Probenvorbereitung und auf eine Schwankung der Qualität der Messung seitens des Gerätes zurückführen.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

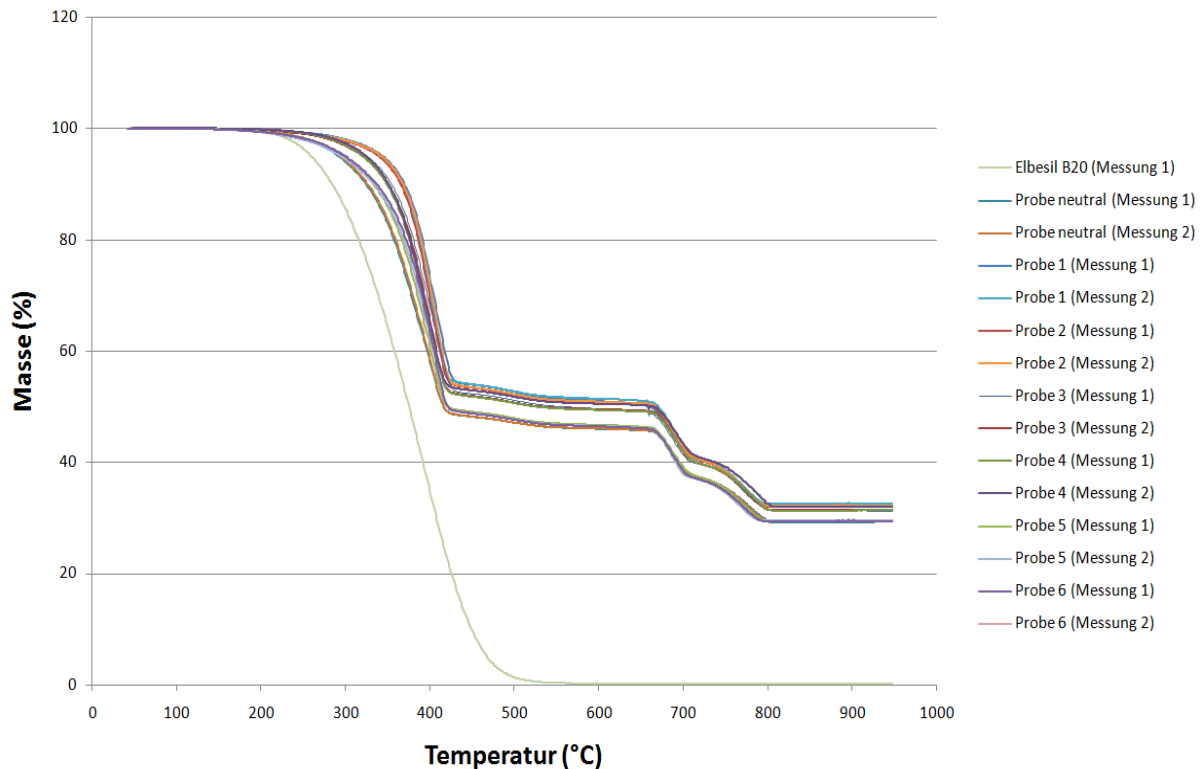


Abbildung 45: Masseverlustkurven der TGA Untersuchung

Da die Kurven fast deckungsgleich sind, wurde aus den Proben mit den gleichen Lagerungsbedingungen der Mittelwert gebildet und dieser mit den anderen Proben verglichen. Abbildung 46 zeigt den Vergleich der Mittelwerte der jeweiligen Proben.

Das Diagramm zeigt, dass der Masseabbau bei allen Proben ungefähr gleich beginnt. Allerdings ist die Steigung stark unterschiedlich. Betrachtet man die Massen der jeweiligen Proben bei 400 °C, so stellt man fest, dass das Silikonöl (Elbesil B20) bereits nur mehr 35 % seiner Ausgangsmasse aufweist. Im Gegensatz zu den Terostat 81<sup>®</sup>-proben, welche bei dieser Temperatur eine Restmasse im Bereich von 65 % - 72 % ihrer Ausgangsmasse besitzen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Silikonöl aus leicht flüchtigen organischen Bestandteilen besteht. Daher besitzt es auch nur eine Abbaustufe und seine Restmasse ist bereits nach 550 °C nahe dem Nullniveau.

Betrachtet man ausschließlich die verschiedenen Terostat 81<sup>®</sup>-proben, so zeigt sich, dass jene Probe, welche nicht im Silikonöl gelagert wurde (Probe neutral) den schnellsten Masseverlust und die geringste Restmasse aufweist. Auf der anderen Seite weist die Probe, die nur bei Raumtemperatur im Silikonöl gelagert wurde, den langsamsten Masseverlust und die größte Restmasse auf. Umso höher die Lagerungstemperatur im Silikon ist, desto mehr nähern sich die Kurven an die Probe an, welche nicht im Silikonöl gelagert wurde.

Dies lässt sich dadurch erklären, dass durch die Lagerung im Silikonöl leicht flüchtige organische Bestandteile des Terostat in das Silikonöl übergehen. Durch den Verlust dieser leicht flüchtigen Bestandteile, wird der Massenverlust über die Temperatur gehemmt und verschiebt die TGA Kurve zu höheren Temperaturen. Die Restmasse, der anorganische Anteil, ist entsprechend höher, da im Verhältnis zum reinen Terostat 81<sup>®</sup> weniger organische



#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Teile im Werkstoff vorhanden sind und damit der Masseverlust im Verhältnis zur Ausgangsmasse weniger ist.

Wird die Lagerungstemperatur im Silikonöl erhöht, so nähert sich die Kurve immer mehr jener Probe an, welche nicht im Silikonöl gelagert wurde. Durch die erhöhten Lagerungsbedingungen treten leicht flüchtige Anteile des Silikons in das Terostat 81<sup>®</sup> ein. Die in das Terostat 81<sup>®</sup> übergegangenen Silikonanteile lassen sich mit dem GC/MS detektieren. Umso mehr organische Silikonanteile von dem Terostat 81<sup>®</sup> aufgenommen werden, desto mehr werden die Kurven zu tieferen Temperaturen verschoben und desto weniger anorganische Restmasse, im Verhältnis zur Ausgangsmasse, verbleibt. Bei einer Lagerung mit 80 °C im Silikonöl lassen die Kurven darauf schließen, dass fast genau soviel organische Bestandteile durch das Silikon aufgenommen, wie abgegeben wurden, da die Kurven nach der ersten Abbaustufe nahezu identisch sind.

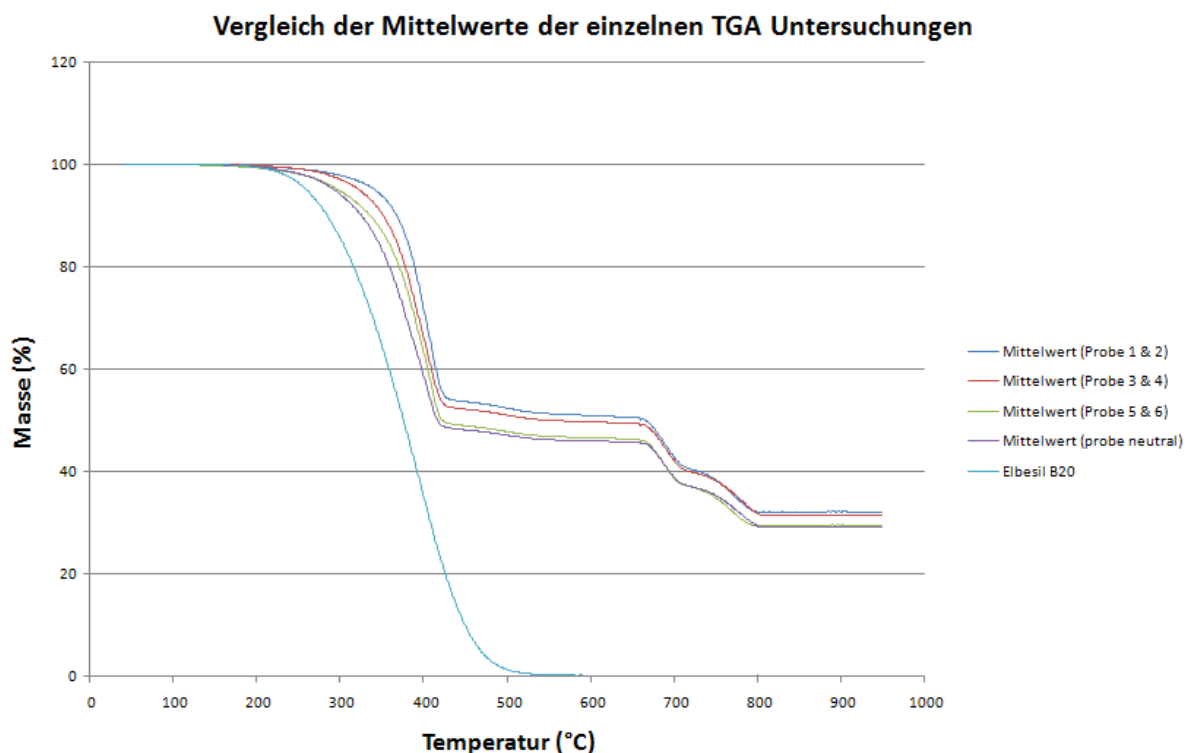


Abbildung 46: Vergleich der Mittelwerte der TGA Untersuchungen

Die TGA Untersuchung zeigte, dass kein thermischer Abbau während der Lagerung im Silikonöl stattfand. Durch das Herauslösen der leicht flüchtigen organischen Bestandteile des Terostat 81<sup>®</sup> in das Silikonöl wurde der Werkstoff geringfügig stabilisiert. Bei einer Lagerung von 80 °C wies der Werkstoff ein ähnliches Verhalten auf wie ohne Lagerung im Silikonöl. Es wäre noch zu untersuchen, ob der gefundene Trend bei höheren Temperaturen ebenfalls vorhanden ist. Allerdings sind die untersuchten 80 °C bereits 20 °C über der Einsatzgrenze des Werkstoffes. Daher wurden bei höheren Temperaturen keine Untersuchungen durchgeführt.

### 4.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Verbindungsauswahl

Wird jeder Versuch und seine Ergebnisse separat betrachtet, so kann nicht explizit festgestellt werden, ob sich dieser Werkstoff für den vorgesehenen Einsatzzweck eignet. Das Zusammenspiel der Ergebnisse zeigte allerdings, dass der Werkstoff hinsichtlich der Lagerung im Silikonöl ausreichend stabilisiert ist.

Betrachtet man die Ergebnisse der TGA Untersuchungen, sieht man, dass keine thermische Schädigung des Werkstoffes bei der Lagerung eintrat. Durch den Übergang von leicht flüchtigen organischen Bestandteilen des Terostat 81<sup>®</sup> in das Silikonöl verblieb mehr anorganische Restmasse und der Masseabbau geschah über die Temperatur langsamer. Wurde die Lagerungstemperatur im Silikonöl erhöht, so näherten sich die Kurven an jene Probe an, welche nicht im Silikonöl gelagert wurde. Dieses Verhalten wurde sowohl durch die GC/MS Untersuchung, als auch durch die Extraktion bestätigt.

In den Extrakten wurden während der GC/MS Messung leicht flüchtige Bestandteile des Silikonöls detektiert. Hierbei handelte es sich nur um eine qualitative Methode. Daher kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie viel von dem jeweiligen Bestandteil in das Terostat 81<sup>®</sup> übergegangen ist. Die Ergebnisse der GC/MS bestätigten die Annahmen aus der TGA bezüglich der Stabilisierung und Aufnahme von Silikonöl.

Die Extraktionsergebnisse bestätigten diese ebenfalls. Hier zeigte es sich, dass bei Lagerung im Silikonöl bei Raumtemperatur weniger extrahierbare Anteile im Werkstoff vorhanden waren als bei der Probe, welche nicht im Silikonöl gelagert wurde. Dies lässt darauf schließen, dass leicht flüchtige Bestandteile aus dem Werkstoff in das Silikonöl übergegangen sind. Dies konnte durch die GC/MS nicht bestätigt werden, da trotz einer volumetrischen Verdünnung von 1:1000 der Silikonöle die Säule sehr stark überladen wurde. Durch die hohe Verdünnung in Kombination mit den geringen Extraktionsanteilen konnten keine Bestandteile des Terostat 81<sup>®</sup> im Silikonöl festgestellt werden.

Umso höher die Lagerungstemperaturen waren, desto mehr extrahierbare Anteile wiesen die Proben auf. Dies deckt sich ebenfalls mit den TGA Ergebnissen, da hier die Kurven mit erhöhter Temperatur sich der neutralen Probe nähern, was auf eine Aufnahme von Silikonbestandteilen schließen lässt.

Die TGA Kurven in Kombination mit den Extraktionsergebnissen zeigten ebenfalls, dass die Untersuchung der Masseänderung nicht unbedingt auf eine ungenaue oder fehlerhafte Messung schließen lässt. Die Gewichtsveränderung bei den Proben, die 4 Wochen bei Raumtemperatur im Silikonöl gelagert wurden, wiesen beinahe dieselben Masseveränderungen auf, wie extrahierbare Anteile enthalten sind. Da bei erhöhten Lagerungstemperaturen Bestandteile aus dem Silikonöl in das Terostat übergangen, wurden hier auch keine großen Masseveränderungen festgestellt.

Es muss allerdings erwähnt werden, dass aufgrund der Anzahl an verschiedenen Untersuchungen und unterschiedlichen Einwaagen sowie Probenvorbereitungen Fehlerquellen nicht auszuschließen sind. Größte Fehlerquelle bei all diesen Versuchen ist verbleibendes Silikonöl auf der Oberfläche der Proben. Es kann nie davon ausgegangen werden, dass das Silikonöl restlos von der Oberfläche entfernt wurde. Allerdings handelt es sich bei diesen Untersuchungen weder um quantitative Bestimmungen noch um

## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Bestimmungen zur Kennwertermittlung unter bestimmten Umgebungsbedingungen. Es handelte sich hierbei nur um Verhältnisbestimmungen, welche für diesen Zweck ausreichend sind.

In seiner Anwendung wird der Dichtstoff nur mit einem Bruchteil seiner Oberfläche mit dem Silikonöl in Kontakt kommen. Während den Lagerungsversuchen war fast die gesamte Oberfläche des Werkstoffes in Kontakt mit dem Silikonöl. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Aufnahme von Silikonölbestandteilen und die Abgabe von flüchtigen Anteilen des Terostat 81<sup>®</sup> in der Anwendung um ein Vielfaches langsamer ablaufen werden als in den Versuchen. Zusätzlich wird der Dichtstoff den Lagerungstemperaturen nicht über eine so lange Zeitspanne hinweg ausgesetzt sein, was den Prozess zusätzlich verlangsamen wird.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde das Terostat 81<sup>®</sup> auf Basis von Butylkautschuk für diese Anwendung als ausreichend stabilisiert befunden. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Werkstoff in Kombination mit einem geeigneten Gehäusedesign für eine Wasserdichtheit des Tauchcomputers sorgt.

### 4.4 Gehäusedesign

#### 4.4.1 Konstruktionstechnische Richtlinien in Bezug auf den Tauchcomputer

Die zukünftige Herstellung der Gehäuseteile erfolgt über das Verfahren des Spritzgießens. Daher wurde während der gesamten Konstruktionsphase auf mögliche spritzgießtechnische Probleme Rücksicht genommen. Aufgrund der Komplexität der Bauteile sind Wanddickensprünge nicht vermeidbar. Trotzdem wurde versucht eine möglichst gleichmäßige Wandstärke bei den Bauteilen zu erreichen. Zusätzlich war das Ziel, eine minimale Wandstärke von einem Millimeter nicht zu unterschreiten und eine maximale Wandstärke von vier Millimeter nicht zu überschreiten. Dadurch sollten bereits im Vorfeld mögliche Füllprobleme, sowie ungleichmäßige Abkühlbedingungen und in weiterer Folge negative Schwindungs- und Verzugseigenschaften vorgebeugt werden.

Bevor mit der eigentlichen Konstruktion begonnen wurde, musste abgeklärt werden, welche Anschlüsse das Gehäuse des Tauchcomputers aufweisen musste. Mögliche Anschlüsse sind hierbei die Möglichkeit zur Befüllung des Tauchcomputers mit dem Silikonöl, Stromanschluss zum Aufladen des Akkus und ein USB Anschluss für die Übertragung der Daten auf einen Computer. Nach Rücksprache mit der Partnerfirma wurde beschlossen, dass der Tauchcomputer keine Anschlüsse am Gehäuse aufweisen sollte. Der Zusammenbau des Tauchcomputers erfolgt im Silikonöl unter Vakuum, damit sind keine Anschlüsse für das Befüllen notwendig. Der Akku wird über Induktion aufgeladen und der Datenaustausch soll zukünftig über einen sogenannten NFC Sensor funktionieren. Mit diesem ist der kabellose Austausch von Daten möglich.

Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, muss das Gehäuse des Tauchcomputers zusätzlich zu dem Touchpanel, dem Display und dem Dichtungsstoff auch andere Komponenten wie eine Energiequelle, die Platine und eine Membran besitzen. Diese Komponenten sind teilweise in ihrer Größe nicht veränderbar. Daher musste während der Konstruktion auf diese Abmaße

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Rücksicht genommen werden. Tabelle 13 gibt Auskunft über die einzubauenden Komponenten und ihre vorgegebenen Abmaße.

*Tabelle 13: Übersicht der einzubauenden Komponenten*

<b>Komponente</b>	<b>Abmaße (mm)</b>
Touchpanel	65 x 85 x 1,5 aktiver Bereich: 53,64 x 71,52
Display	63,5 x 85 x 3,03 aktiver Bereich 53,64 x 71,52
Platine	Breite und Länge frei wählbar Dicke 1,5 mm + 3,5 mm an elektronischen Komponenten
Energiequelle	Abmaße frei wählbar, technische Anforderungen: 4000 mAh bei 3,7 V Versorgungsspannung
Membrane	Abmaße frei wählbar

Aufgrund der vorgegebenen Abmaße des Touchpanels und des Displays wurden alle Designs von diesen Komponenten aus konstruiert. Die Konstruktion erfolgte auf SolidWorks 2008.

Abbildung 47 zeigt die Lage des Touchpanels im Gehäuse. Dabei stellt der violette Bereich schematisch das Touchpanel dar (2). Da der aktive Bereich von dem Display sowie von dem Touchpanel 53,64 mm x 71,52 mm beträgt, wurde eine Ausnehmung von 53 mm x 71 mm im Gehäuse vorgenommen (6). Die Öffnungen für das Silikonöl befinden sich auf den Längsseiten des Touchpanels. Daher musste darauf geachtet werden, dass der Platz im Gehäuse größer ist als 85 mm. Für das Eindringen des Silikonöls wurden 0,5 mm vorgesehen (4). Wird das Touchpanel symmetrisch eingelegt, verbleiben 0,25 mm für das Silikonöl. Dieser Spalt sollte ausreichen, damit das Silikonöl ohne Komplikationen in das Touchpanel eindringen kann, da die Öffnungen im Touchpanel ebenfalls im Bereich von 0,25 mm liegen. Zwischen Gehäuse und Touchpanel befindet sich der ausgewählte Dichtstoff. Dieser wird in eine umlaufende Nut gelegt (3). Die Nut befindet sich auf der Höhe der Leiterbahnen, damit der Dichtstoff nicht in den sichtbaren Bereich eindringt und auf der anderen Seite die Öffnungen für das Silikonöl nicht verschließt.

Das Touchpanel wird mit der Platine verbunden (5). Für diese Verbindung musste ebenfalls eine Ausnehmung im Gehäuse vorgesehen werden. Um Material zu sparen und aus symmetrischen Gründen wurde die Ausnehmung für die Verbindung auf beiden Seiten vorgenommen.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

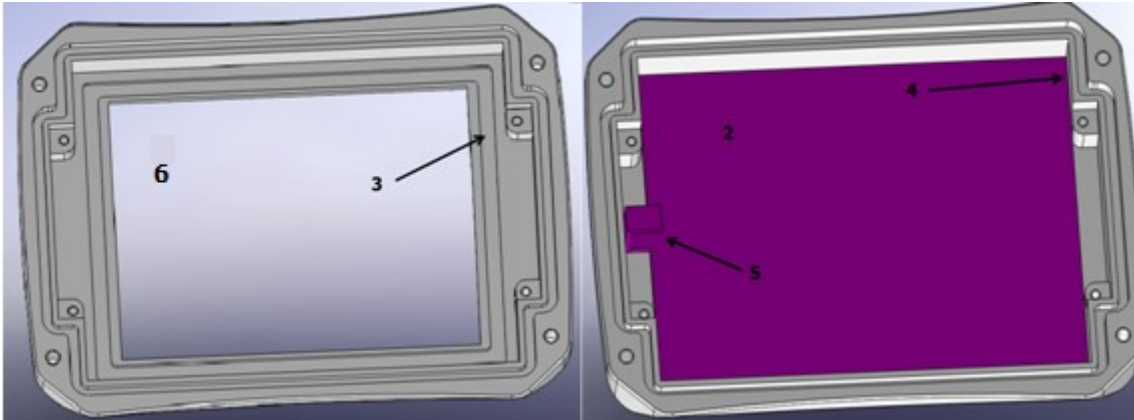


Abbildung 47: links: Blick in die Vorderseite ohne Touchpanel; rechts: Blick in die Vorderseite mit Touchpanel

Direkt auf das Touchpanel wird das Display gelegt. Darüber befindet sich die Platine. Diese wird durch vier selbstschneidende M2 Zylinderkopfschrauben mit Innensechskant am Gehäuse befestigt. Durch das Verschrauben der Platine mit dem Gehäuse wird das Touchpanel auf den in der Nut liegenden Dichtstoff gedrückt, und sorgt daher für die gewünschte Wasserdichtheit. Abbildung 48 zeigt die Verschraubung der Platine in der 3D Ansicht und Abbildung 49 zeigt die Verschraubung der Platine in der Schnittdarstellung. Dabei werden die Komponenten folgendermaßen bezeichnet.

- 1) Vorderseite des Gehäuses
- 2) Touchpanel
- 3) Nut für den Dichtstoff Terostat 81<sup>®</sup>
- 4) Platine mit schematisch dargestellten elektronischen Komponenten auf der Ober- und Unterseite
- 5) Verschraubung (Zylinderkopfschrauben mit Innensechskant M2 x 6)
- 6) Ausnehmung für das Touchpanel

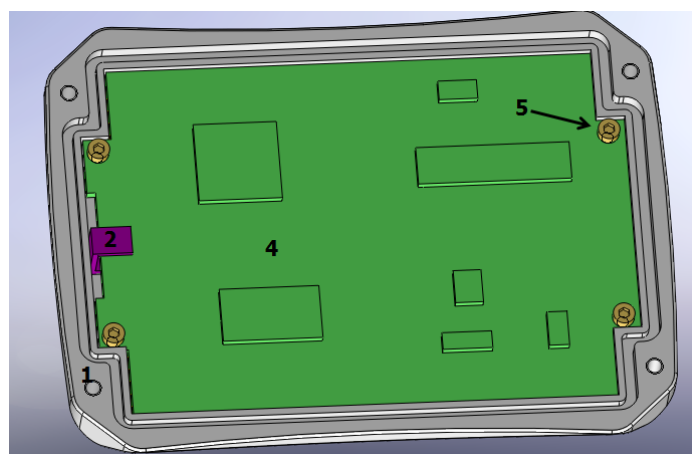


Abbildung 48: 3D-Darstellung der Verschraubung der Platine

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

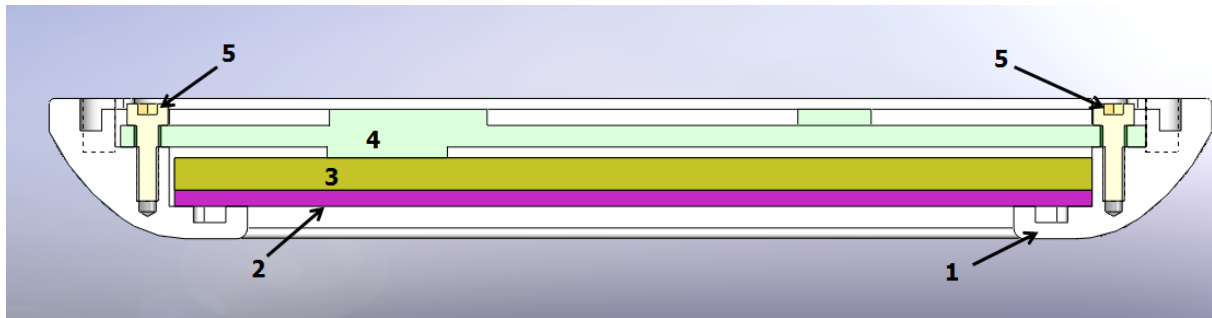


Abbildung 49: Schnittdarstellung der Verschraubung der Platine

Auf die Platine wird die Energieversorgung platziert. Hier musste entschieden werden ob man einen Rundakku oder einen Flachakku verwendet. Mit den geforderten Milliampere und der geforderten Versorgungsspannung wäre ein Rundakku in seinem Durchmesser verhältnismäßig groß. Das würde sich negativ auf die Größe des Tauchcomputers auswirken. Allerdings wäre es möglich, den Rundakku so im Tauchcomputer anzuordnen, dass sich das Gehäuse an den Unterarm anpasst. Es wurden verschiedene Gehäusedesigns mit einem Rundakku konstruiert. Abbildung 50 zeigt eines der Designs mit einem Rundakku. Nach genauerer Beurteilung wurde eine Variante ohne Rundakku gewählt, da das Design durch den Akku sehr klobig wirkt. Somit wurde für alle weiteren Designs ein Flachakku verwendet. Der ausgewählte Flachakku weist die Abmessungen 89 mm x 60 mm x 8,5 mm auf.

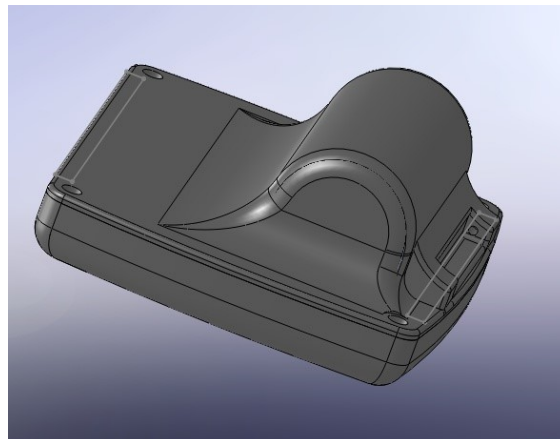


Abbildung 50: Designvariante mit Rundakku

Zur Abdichtung des Tauchcomputers zwischen den beiden Gehäusehälften, wird eine 3D-Membran zwischen die Gehäusehälften, bzw. zwischen den Akku und dem hinteren Teil eingelegt. Die Membran unterliegt keinen vorgegebenen Abmessungen. Sie wurde an den verwendeten Akku bzw. an das jeweilige Gehäusedesign angepasst. Die Membran, sowie der Dichtstoff zwischen Gehäuse und Touchpanel, dienen zur Abdichtung des Tauchcomputers zwischen Vorderseite und Rückseite. Daher wurde im Gehäuse eine umlaufende Nut vorgesehen, in der die Membran eingelegt wird. Der Deckel wurde so designt, dass er mit dem Gehäuse über vier M3 Schrauben verschraubt wird und daher die Membran in die Nut drückt. Das garantiert, dass das Silikonöl im Tauchcomputer verbleibt und kein Wasser zwischen Deckel und Gehäuse in den Tauchcomputer eindringen kann. Abbildung 51 zeigt eine Schnittdarstellung der in der Nut liegenden Membran. Das im Tauchcomputer befindliche Öl verändert sein Volumen durch Temperaturunterschiede. Diese

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Volumenänderung wird direkt auf die Membran übertragen. Damit keine Druckänderung im Tauchcomputer zu Stande kommt, muss zwischen Deckel und Membran ein Luftspalt verbleiben. Durch diesen Luftspalt, kann die Membran auf eine Volumenänderung reagieren, ohne dass sich der Druckzustand im Tauchcomputer ändert. Wäre statt der Membran nur eine Dichtung wie zwischen Touchpanel und Vorderseite des Gehäuses eingebaut, würde der Drucksensor einen falschen Wert ausgeben, weil die Volumenschwankung des Öl einen zusätzlichen Druck auf den Sensor ausübt.



- 1) Vorderseite des Gehäuses
- 2) Rückseite des Gehäuses
- 3) 3D-Membran

Abbildung 51: Membran zur Abdichtung des Tauchcomputers

Insgesamt wurden über zehn verschiedenen Gehäusedesigns konstruiert. Unter Beachtung aller erwähnten Vorgaben wurden zwei Gehäusedesigns ausgewählt, welche für weitere Simulationen verwendet wurden. Nachfolgend wird auf die Unterschiede dieser beiden Gehäusedesigns näher eingegangen.

##### 4.4.2 Gehäusedesign 1

Bei diesem Design wurde der Tauchcomputer möglichst genau an den Unterarm angepasst, um den Tragekomfort des Benutzers zu verbessern. Das bedeutete allerdings, dass der Computer etwas dicker wurde und somit mehr Materialanhäufungen aufwies, die sich negativ auf die Spritzgussproduktion auswirken könnten.

Abbildung 52 zeigt den Tauchcomputer in der 3D-Darstellung, links von vorne und rechts von hinten. Er weist die Abmessungen 107,5 mm x 80 mm x 33 mm auf. Der Deckel wird über vier Innensechskantschrauben (M3x11) mit dem Gehäuse verbunden.

Die Ausnehmungen auf der Rückseite des Tauchcomputers sind für die Befestigung eines Uhrbandes. Dieses wird über einen Stift, welcher in das durchgehende Loch eingeführt wird, mit dem Deckel verbunden.

Es wurde versucht, dem Tauchcomputer ein modernes Design zu geben. Ein rechteckiger Computer mit gerader Außenkontur wirkte sehr klobig, daher wurden die Ecken abgeflacht und die Außenkontur leicht geschwungen ausgeführt. Über die gesamte Außenkontur der Vorderseite des Tauchcomputers, befindet sich eine verhältnismäßig große Rundung ( $r = 10$  mm). Das sorgt für einen fließenden Übergang von Vorderseite zu Rückseite und spart zusätzlich Material ein. Der Radius der Rundung ist über den gesamten Umfang gleich. Die

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Rückseite des Tauchcomputers wurde über die gesamte Fläche mit einer runden Ausnehmung versehen, um den Tragekomfort zu erhöhen.

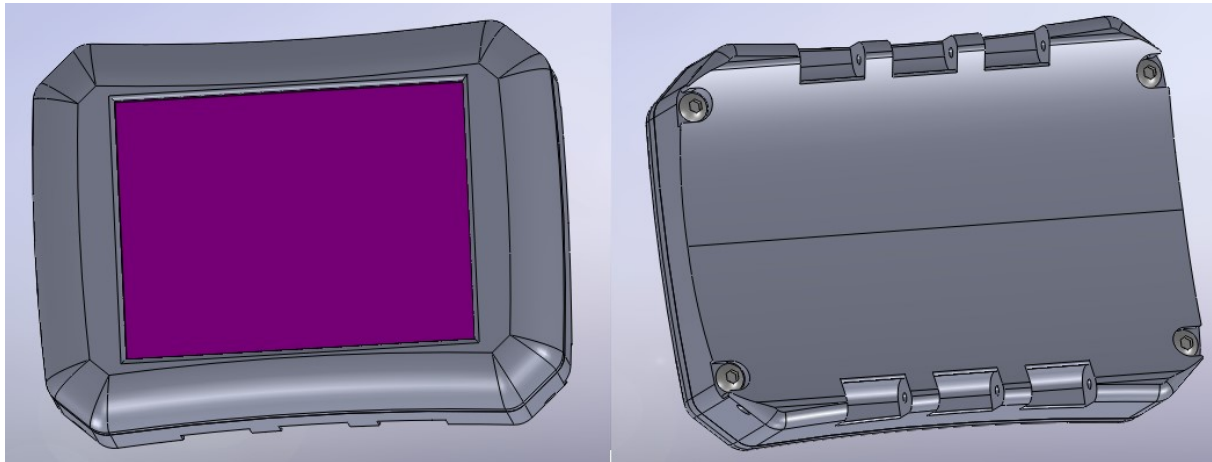


Abbildung 52: 3D-Darstellung des Gehäusedesigns 1; links: Vorderseite; rechts: Rückseite

Um die Ausnehmung an der Rückseite des Tauchcomputer möglichst genau an den Unterarm anzupassen wurde die Breite der Unterarme von insgesamt 120 Menschen im Alter von 18 - 50 Jahren vermessen. Die Messstelle befand sich dort, wo man normalerweise eine Uhr tragen würde, ca. 80 mm über dem Handgelenk. Tabelle 14 gibt eine Auskunft über die daraus resultierenden Ergebnisse.

Tabelle 14: Auswertung der Breite der Unterarme

Geschlecht	Anzahl (n)	Breite des Unterarms (mm)
weiblich	55	40-60
	5	60-70
männlich	58	55-70
	2	80

Zu diesen Breitenangaben müssen mindestens 10 mm hinzugerechnet werden, da der Taucher meist nicht mit nackter Haut seinen Tauchgang durchführt. Die Ausnehmung wurde aufgrund dieser Ergebnisse 80 mm breit und 8 mm tief ausgeführt. Dadurch würde sich der Tauchcomputer bei allen befragten Probanden an den Unterarm anpassen. Ist der Anzug des Tauchers wesentlich dicker als 10 mm, so würde er die 80 mm Ausnehmung überschreiten. Bei Anlegen des Tauchcomputers werden die Haut sowie der Anzug zusammengedrückt. Dadurch würde der Tauchcomputer auch bei diesen Probanden besser auf dem Unterarm sitzen, als bei einer flachen Ausführung. Sollte man die Ausnehmung trotzdem überschreiten, so wurde die Rückseite mit Rundungen versehen, damit keine Kanten auf den Unterarm des Benutzers drücken. Zusätzlich wurden die Schraubenköpfe versenkt, damit sich keine unerwünschten Erhebungen auf der Rückseite befinden.

Abbildung 53 zeigt die Innenansicht der beiden Gehäuseteile. Links befindet sich die Oberseite und rechts die Rückseite. Es ist klar ersichtlich, dass die Innenkontur der Vorderseite wesentlich komplexer ausgeführt ist, da in ihr alle Komponenten, bis auf die



#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Membran und den Flachakku, Platz haben müssen. Auf der Vorderseite sind die Verschraubungen für die Platine, das Display und das Touchpanel erkennbar (1). Diese werden mit selbstschneidenden M2 Zylinderkopfschrauben mit Innensechskant (M2x6) verschraubt. Die außenliegenden Bohrungen dienen zum Verschrauben der beiden Gehäusehälften (2). Zusätzlich sind die umlaufende Nut für den Dichtstoff zur Verklebung des Touchpanels mit dem Gehäuse (3) und die Nut für die Membran erkennbar (4). Die Rückseite weist nur Durchgangslöcher für die M3 Schrauben (2) auf, sowie eine Ausnehmung für die Membran und den Akku.

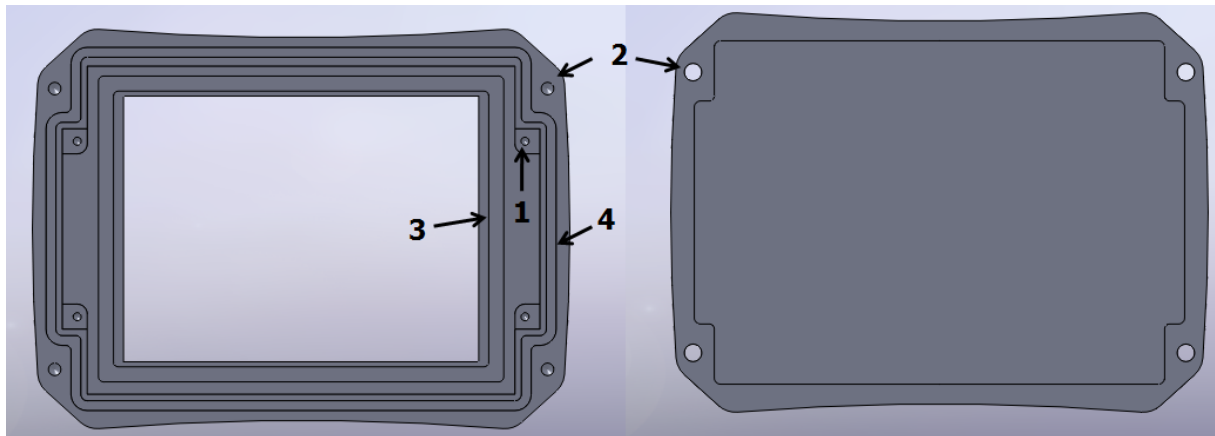


Abbildung 53: Gehäusedesign 1: links: Innenseite der Vorderseite; rechts: Innenseite der Rückseite

Die Ausführung mit der durchgehenden Rundung auf der Vorderseite und der ergonomisch angepassten Rückseite ergab folgende Probleme: Abbildung 54 zeigt eine Schnittdarstellung der Konstruktion. Dabei sind die Masseanhäufungen im Bereich der Vorderseite (1) so wie im Bereich der Rückseite (2) erkennbar. Diese Masseanhäufungen könnten die Fertigung sowie die Bauteilqualität negativ beeinflussen. Es könnte vermehrt zu Einfallstellen, Verzug und Deformationen aufgrund ungleichmäßiger Abkühlung und Schwindung kommen. Zusätzlich würde aufgrund der erhöhten Wandstärken die Zykluszeit verlängert werden, was sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt. Diese Annahmen mussten durch eine entsprechende Simulation bestätigt werden.

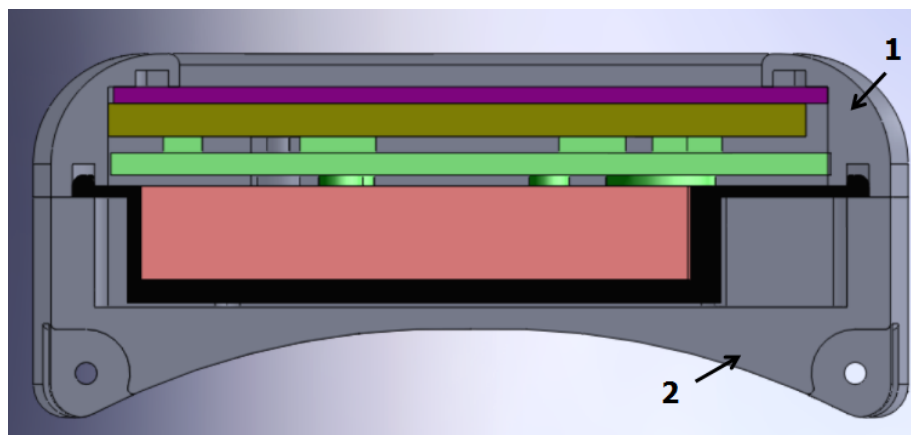


Abbildung 54: Schnittdarstellung von Gehäusedesign 1 mit erkennbaren Masseanhäufungen

### 4.4.3 Gehäusedesign 2

Bei diesem Gehäusedesign handelte es sich um eine Optimierung des ersten Gehäusedesigns. Es wurde versucht durch verschiedene Designänderungen die Masseanhäufungen, welche durch das erste Design verursacht wurden, zu verringern. Ein weiteres Ziel war es, die Dicke des Tauchcomputers zu verringern. Dabei wurde auf das ergonomische Design verzichtet, da der Tragekomfort zwar erhöht wird, dieser allerdings Nachteile im Bezug auf die Fertigung (Masseanhäufungen) und das Aussehen (wirkt klobiger) hat. Abbildung 55 zeigt die Konstruktion in der 3D-Darstellung, links von vorne, rechts von hinten. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass die Rückseite des Tauchcomputer nun flach ausgeführt ist. Dies hat zur Folge, dass der Tauchcomputer insgesamt dünner ist. Seine Abmessungen sind dadurch 107 mm x 80 mm x 24,5 mm. Dadurch konnten mehr als 8,5 mm an Dicke eingespart werden. Die Ausnehmung an den Ecken auf der Rückseite lassen den Tauchcomputer während der Anwendung zusätzlich nochmals dünner wirken. Die Befestigung des Uhrenbandes am Tauchcomputer erfolgte bei diesem Design gleich wie bei dem vorherigen. Es wird mit einem Stift in den drei Ausnehmungen am Rand des Computers befestigt.

Die Vorderseite des Computers wurde dahingehend verändert, dass die durchgehende Rundung von  $r = 10$  mm entfernt wurde und stattdessen unterschiedliche Rundungen auf der Länge und der Breite des Tauchcomputers vorgenommen wurden. Dies sparte zusätzlich Material, da die Materialstärke genauer optimiert werden konnte.

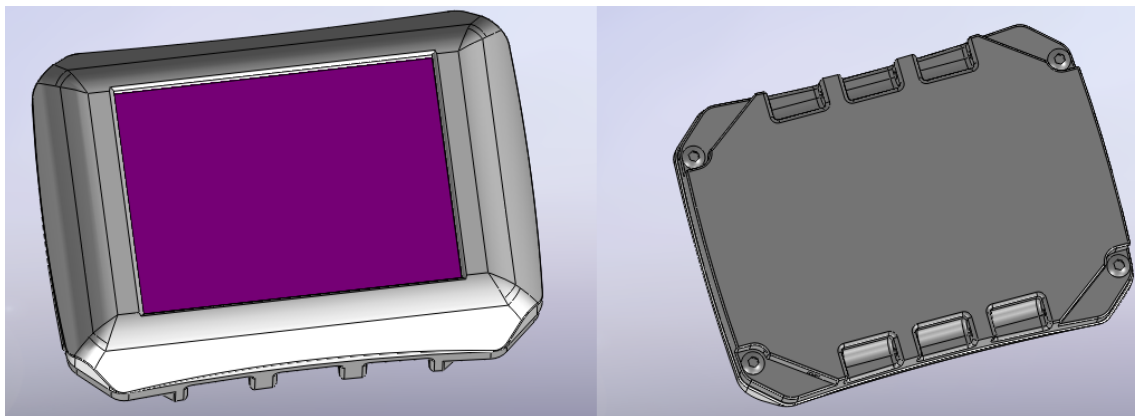


Abbildung 55: 3D-Darstellung des Gehäusedesigns 2; links: vorne; rechts: hinten

Aus Abbildung 56 ist ersichtlich, dass die Innenkontur der Vorderseite gleich ist wie bei Design 1. Hier wurde nur die Rundung auf der Vorderseite hinsichtlich der Masseanhäufung verbessert. Die Innenseite der Rückseite unterscheidet sich deutlich vom Design 1. Da es sich nun um eine flache Ausführung der Rückseite handelt, musste die Befestigung des Uhrenbandes auf die Höhe des Akkus gelegt werden. Da der Akku nur eine Breite von 65 mm aufweist, ist bei einer mittigen Anordnung der Komponente entsprechend ausreichend Platz für die Befestigung des Uhrenbandes und die Membran. Diese wird in den Abstand zwischen Akku und Rückseite des Tauchcomputers eingelegt. Abbildung 57 zeigt den Abstand zwischen Akku (rot eingefärbt) und Gehäuserückseite.

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

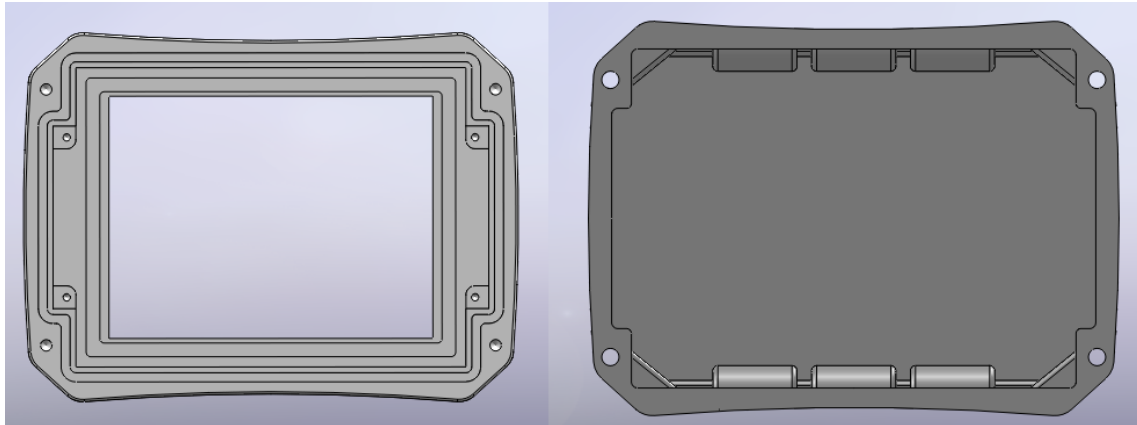


Abbildung 56: Gehäusedesign 2: links: Innenseite der Vorderseite; rechts: Innenseite der Rückseite

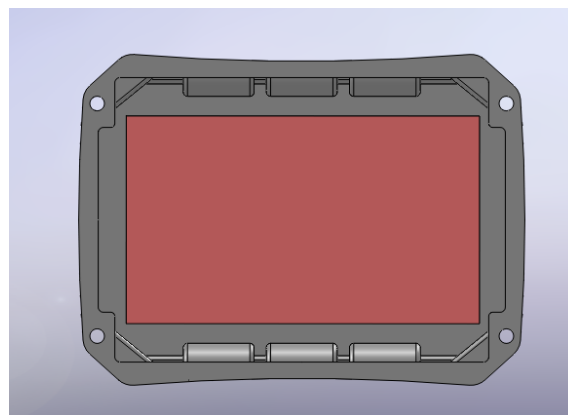


Abbildung 57: Innenkontur der Rückseite des Gehäusedesigns 2 mit eingelegtem Akku

Abbildung 58 zeigt eine Schnittdarstellung des Tauchcomputers von Design 2. Daraus ist ersichtlich, dass die Masseanhäufungen von Design 1 durch die unterschiedlichen Optimierungen stark verringert wurden. Es zeigte sich allerdings, dass durch die unterschiedlichen Rundungen auf der Vorderseite des Gehäuses eine Dünnstelle entstand. Diese könnte möglicherweise zu Füllproblemen während des Spritzgussprozesses führen. Ansonsten wird davon ausgegangen, dass sich die Optimierungen positiv auf die Fertigung und die Bauteilqualität auswirken, da bei diesem Gehäusedesign die Wanddicken gleichmäßiger sind.

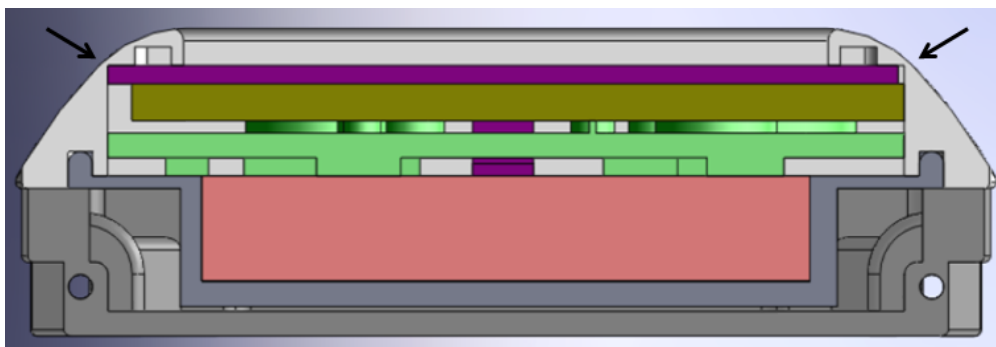


Abbildung 58: Schnittdarstellung des Gehäusedesigns 2

## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Abbildung 58 zeigt zusätzlich, dass die Vorderseite und Rückseite nicht die gleichen Außenabmessungen aufweisen. Die Vorderseite wurde auf jeder Seite um einen Millimeter größer ausgeführt und mit einer Rundung versehen. Während der Herstellung der Bauteile kann es zu einer Formabweichung der Komponenten kommen. Würden die Bauteile mit identischen Außenabmaßen verschraubt werden, würde jegliche Formabweichung durch die deckungsgleich designten Kanten vom Benutzer bemerkt werden. Die etwas größere Ausführung der Vorderseite verhindert das. Allerdings muss sich die Formabweichung im Bereich von +/- 0,5 mm bewegen, da die Kante der Rückseite sonst sichtbar ist.

### 4.5 Spritzgussimulation

Die Aufgabenstellung der Spritzgussimulation diente vor allem dazu, die Füllbarkeit der Bauteile zu überprüfen. Zusätzlich wurde eine Kühlung für alle Bauteile designt und in weiterer Folge ein Vorschlag zu einem möglichen Werkzeugdesign vorgenommen.

Neben den Ergebnissen der Füllbarkeit waren auch die Verzugs- und Deformationsergebnisse der Simulationen wichtig. Da die beiden Gehäusekomponenten miteinander verschraubt werden und über diese Verschraubung die Wasserdichtheit garantiert werden soll, müssen die beiden Komponenten in jeder Ebene geringen Verzug und eine geringe Deformation aufweisen. Es war auch zu überprüfen, ob sich der entstandene Verzug während des Zusammenbaus durch die Verschraubung ausgleichen lässt. Formabweichungen bis zu 0,5 mm sind durch das Gehäusedesign für den Benutzer nicht erkennbar. Daher liegt der maximale Wert der zulässigen Deformations- und Verzugsergebnisse bei 0,5 mm zueinander.

Im Sinne der Wirtschaftlichkeit wurde eine maximale Zykluszeit von 60 s vorgegeben. Es wurde versucht, durch eine geeignete Kühlung diesen Wert bei beiden Bauteilen nicht zu überschreiten.

Alle Simulationen wurden mit dem gleichen Material durchgeführt. Bereits bei der Suche nach einer geeigneten Verklebung wurde von einem Gehäusematerial aus UV-stabilisiertem Polypropylen ausgegangen. Daher wurde versucht, für die Simulation nach Möglichkeit ebenfalls ein UV-stabilisiertes PP zu verwenden. Es zeigte sich, dass keines der Materialien in der Materialdatenbank von Cadmould 3-DF UV-stabilisiert ist. Daher wurde ein herkömmliches PP für die Simulation verwendet. Bei dem Material handelt es sich um die Type Daplen<sup>®</sup> EE040AE von der Firma Borealis. Aufgrund der geringen Mengen von 1 % - 3 % eingesetztem UV-Stabilisator kann davon ausgegangen werden, dass der zusätzlich eingesetzte Stabilisator keine signifikanten rheologischen Einflüsse hat, was die Simulation negativ beeinflussen würde. Zusätzlich muss die endgültige Materialauswahl in Kooperation mit dem Materialhersteller vorgenommen werden.

Für das Material werden eine Verarbeitungstemperatur von 250 °C, eine Werkzeugtemperatur von 40 °C und eine Entformungstemperatur von 110 °C empfohlen. Während der gesamten Simulationen wurde auf diese Parameter Rücksicht genommen.

Bei allen Simulationen wurde vor der Füllsimulation eine Wandtemperaturanalyse durchgeführt. Die Füllsimulation durfte erst beginnen, sobald die Werkzeugwandtemperaturabweichung zwischen zwei Zyklen kleiner als 2 °C war. Mit den entwickelten Kühlkreisläufen konnte dieses Kriterium bereits nach 2 Zyklen erreicht werden. Das weist auf eine sehr

## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

homogene Kühlung hin, was auch die entsprechenden Deformations- und Verzugsergebnisse zeigen.

Nachfolgend wird auf die Simulationen der beiden Komponenten der ausgewählten Gehäusedesigns näher eingegangen. Da von jedem Bauteil mindestens 10 Simulationen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt wurden, werden nur jene Simulationen näher behandelt, welche die besten Ergebnisse erzielten.

### 4.5.1 Cadmould Simulation Gehäusedesign 1

Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, weist das Gehäusedesign 1 bei beiden Komponenten Masseanhäufungen auf. Es wurde versucht, durch eine entsprechende Kühlung und eine entsprechende Anspritzung, diesem Problem entgegen zu wirken.

#### Simulation Vorderseite

Da es sich bei dem Bauteil um ein Sichtteil handelt, wurde eine innenliegende Anspritzung vorgenommen. Die Vorderseite des Gehäuses weist eine Rahmenkontur auf. Daher ist es nicht möglich eine Anspritzung vorzunehmen bei der keine Bindenähte entstehen. Zu Beginn der Simulationen wurde eine Anspritzung über einen Kaltkanalverteiler festgelegt. Da das Bauteil allerdings wenig Platz für eine Anspritzung zur Verfügung stellt, musste ein relativ kleiner Anspritzpunkt von einem Millimeter Durchmesser gewählt werden. Wäre der Anspritzpunkt größer, wäre der Abstand zur Kühlung zu gering. Abbildung 59 zeigt die gewählte Anspritzung und das Kühlungsdesign. Die Simulationen zeigten, dass eine Anspritzung über einen Kaltkanal, aufgrund der Masseanhäufungen und des frühzeitigen Einfrierens des Anspritzpunktes, mit großer Wahrscheinlichkeit, Einfallstellen ausbildet. Durch den Wechsel zu einem Heißkanalverteiler konnte der wirkende Nachdruck um 14 s erhöht werden und in Folge dessen die Einfallstellen stark reduziert werden. Der Nachdruck wirkt über 20 s auf das Bauteil.

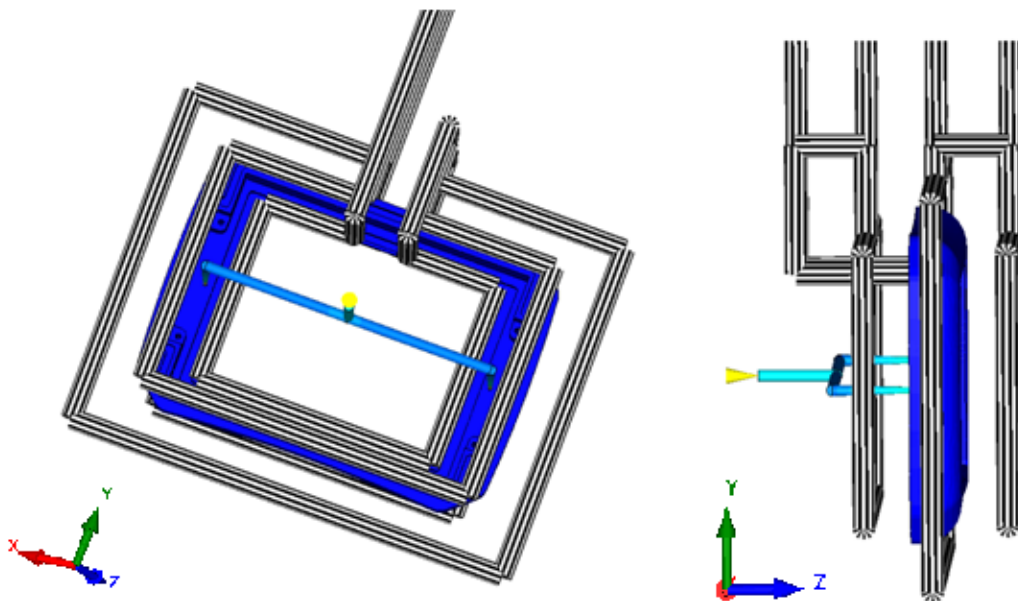


Abbildung 59: Anspritzung und Kühlungsdesign der Vorderseite von Gehäusedesign 1; links: 3D-Darstellung; rechts: seitliche Darstellung

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Bauteil lässt sich mit einer Füllzeit von 0,8 s und einem daraus resultierenden Massestrom von 31 cm<sup>3</sup>/s einwandfrei füllen. Der benötigte Einspritzdruck bei dieser Füllzeit liegt bei 254 bar. Die Fließfronten weisen aufgrund der relativ schnellen Füllung keinen Temperaturverlust vor dem Zusammentreffen auf. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Fließfronten beim Zusammentreffen ausreichend gut verschweißen und es dadurch zu keinem mechanischen Versagen des Bauteils in der Anwendung kommt.

Bei der Kühlung wurde versucht, dass der Abstand zum Bauteil möglichst gleichmäßig ist (Abbildung 59), um homogene Kühlbedingungen zu schaffen und daher den Verzug, sowie die Deformation in Grenzen zu halten. Das gesamte Kühlsystem besteht aus zwei Kühlkreisläufen. Eine Vorlauftemperatur von 40 °C und eine Durchflussrate von 10 l/min führen zu einer maximalen Entformungszeit von 45 s. Werden für die Maschinenbewegungen vier Sekunden Nebenzeiten (Öffnen, Schließen, Auswerfen...) hinzu berechnet, so befindet sich die Zykluszeit < 50 s.

Die gewählte Kühlung in Kombination mit dem Heißkanalverteiler führte zu relativ geringen Deformations- und Verzugsergebnissen (Tabelle 15; Anhang 10.4). Dabei ist anzumerken, das Cadmould als Deformation, die Kombination von Schwindung und Verzug darstellt. Es ist allerdings fraglich, ob die Verschraubung diese Formabweichungen ausgleichen kann. Zusätzlich bewegt man sich mit diesen Ergebnissen sehr knapp an den maximal geforderten 0,5 mm Formabweichung. Ist die Formabweichung zu groß, kann eine Wasserdichtheit des Tauchcomputers nicht mehr garantiert werden. Zusätzlich würde es sich negativ auf das Erscheinungsbild des Tauchcomputers auswirken, da eine zu große Formabweichung vom Benutzer registriert wird. Durch eine Optimierung der Dickstellen des Bauteils wäre allerdings eine Reduktion dieser Formabweichungen möglich. Zusätzlich könnte aufgrund der geringeren Wandstärke die Zykluszeit verringert werden.

*Tabelle 15: Deformations- und Verzugsergebnisse der Vorderseite von Gehäusedesign 1*

Koordinate		X	Y	Z
von der Mittellinie aus betrachtet (Deformation)	Minimalwert (mm)	-0,415	-0,409	-0,326
	Maximalwert (mm)	0,414	0,401	0,184
Gesamtdeformation (mm)		0,829	0,81	0,51
von der Mittellinie aus betrachtet (Verzug)	Minimalwert (mm)	-0,164	-0,231	-0,304
	Maximalwert (mm)	0,163	0,223	0,151
Gesamtverzug (mm)		0,327	0,254	0,455

Die Simulationen haben gezeigt, dass sich das Bauteil einwandfrei füllen lässt und eine akzeptable Zykluszeit mit der gewählten Kühlung aufweist. Allerdings hat diese Komponente noch Optimierungspotenzial in Hinblick auf Deformation und Verzug.

## 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

### Simulation Rückseite

Die Rückseite weist aufgrund ihrer ergonomischen Form unterschiedliche Wandstärken auf. Es wurde versucht einen Anspritzpunkt zu finden, bei dem es zu keiner Ausbildung von Bindenähten kommt. Daher erfolgte die Anspritzung innenliegend, in der Mitte des Bauteils (Abbildung 60). Dieser Anspritzpunkt hat allerdings den Nachteil, dass es sich nicht um die dickste Stelle des Bauteils handelt, was sich negativ auf den wirksamen Nachdruck auswirkt. Theoretisch wäre es möglich, den Anspritzpunkt als Stangenanguss auszulegen, welcher am Bauteil verbleibt und im Nachhinein abgeschnitten werden muss. Um dem frühzeitigen Einfrieren entgegenzuwirken wurde der Anguss wie bei der Vorderseite als Heißkanal ausgeführt. Dadurch wird zusätzlich der Bearbeitungsschritt zur Entfernung des Angusses eliminiert. Der Anspritzpunkt weist einen Durchmesser von zwei Millimeter auf.

Das Bauteil lässt sich mit einer Füllzeit von einer Sekunde und einem daraus resultierenden Volumenstrom von  $\sim 50 \text{ cm}^3/\text{s}$  einwandfrei füllen. Der benötigte Einspritzdruck bei dieser Füllzeit liegt bei 188 bar.

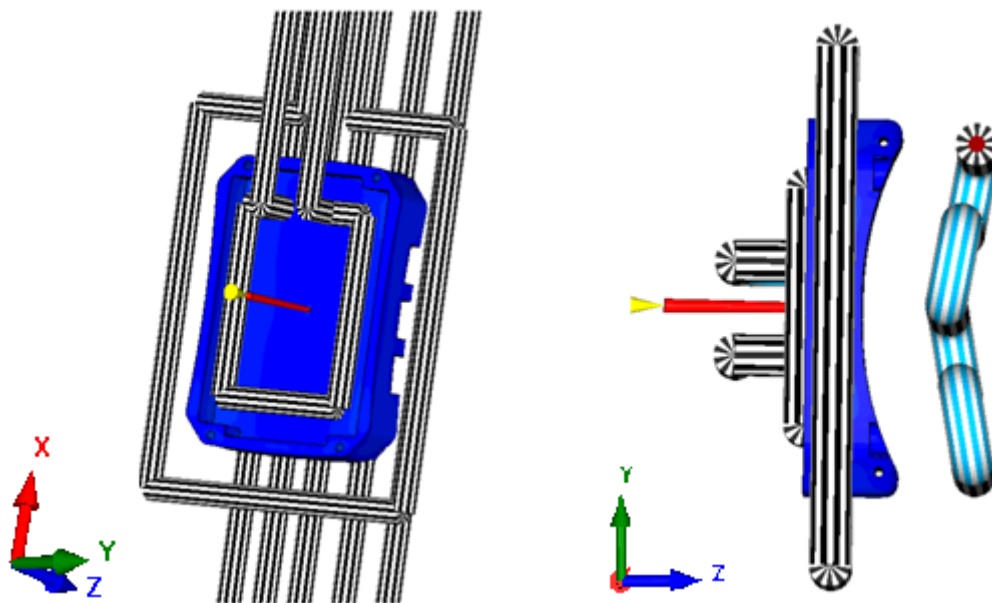


Abbildung 60: Anspritzung und Kühlungsdesign der Rückseite von Gehäusedesign 1; links: 3D-Darstellung; rechts: seitliche Darstellung

Das Kühlsystem wurde wie bei der Vorderseite des Gehäuses möglichst symmetrisch angeordnet. Wie die Wandtemperaturanalyse zeigte, weist das designte System eine homogene Kühlleistung auf.

Das Kühlungsdesign in Kombination mit einer Vorlauftemperatur von  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , einer Durchflussrate von  $10 \text{ l/min}$  und einem Kühlbohrungsdurchmesser von neun Millimeter führte zu einer maximalen Entformungszeit von 116 sec. Abbildung 61 zeigt, dass sich diese hohen Entformungszeiten durch die Dickstellen im Bauteil ergeben (links Innenansicht, rechts Außenansicht). Diese Dickstellen werden durch den ergonomisch ausgeformten Teil der Komponente hervorgerufen. Eine Entformungszeit von  $\sim 115 \text{ sec}$  liegt 55 sec über der maximal vorgegebenen Zykluszeit. Diese Differenz konnte nicht durch eine Optimierung der Kühlung, der Anspritzung oder einer Optimierung der anderen spritzgussrelevanten Faktoren

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

ausgeglichen werden. Daher musste eine Änderung der Dickstellen des Designs vorgenommen werden.

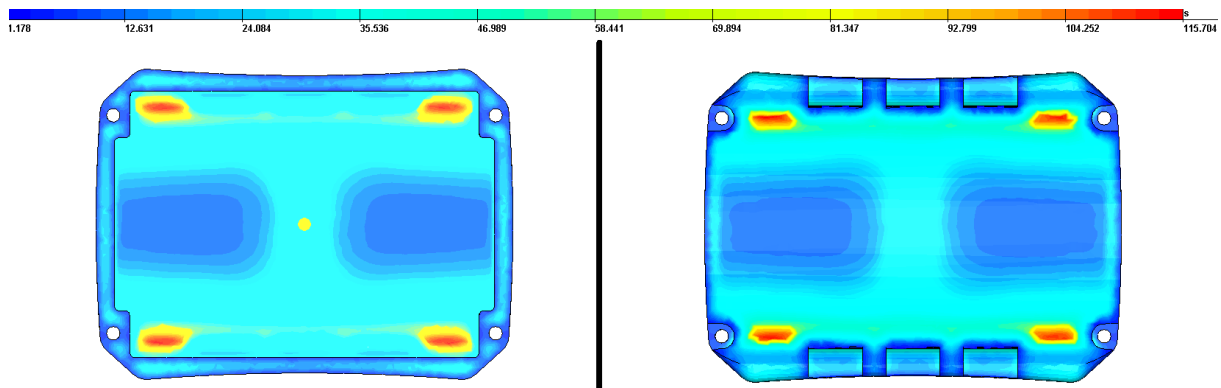


Abbildung 61: maximale Entformungszeit der Rückseite von Gehäusedesign 1

Neben der hohen Entformungszeit führten die Masseanhäufungen zu inakzeptablen Deformations- und Verzugsergebnissen (Tabelle 16; Anhang 10.4). Alle Formabweichungen überschreiten die geforderten 0,5 mm. Die Formabweichungen könnten mit einer Änderung der Kühlung, bzw. des Angussystems verbessert werden. Da die Entformungszeit allerdings sehr weit von den geforderten 60 s entfernt lag, musste eine Optimierung des Gehäusedesigns vorgenommen werden. Daher wurde an diesem Punkt die Simulation unterbrochen.

Tabelle 16: Deformations- und Verzugsergebnisse der Rückseite von Gehäusedesign 1

Koordinate		X	Y	Z
von der Mittellinie aus betrachtet (Deformation)	Minimalwert (mm)	-0,815	-0,634	-0,244
	Maximalwert (mm)	0,809	0,627	0,257
Gesamtdeformation (mm)		1,624	1,261	0,501
von der Mittellinie aus betrachtet (Verzug)	Minimalwert (mm)	-0,203	-0,198	-0,138
	Maximalwert (mm)	0,194	0,19	0,239
Gesamtverzug (mm)		0,397	0,388	0,377

#### 4.5.2 Cadmould Simulation Gehäusedesign 2

Da es sich bei dem Gehäusedesign 2 um eine Optimierung des Gehäusedesigns 1 handelt, wurden von dieser Simulation bessere Ergebnisse als bei der Simulation von Gehäusedesign 1 erwartet.



#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Wie bei Gehäusedesign 1 erfolgte die Anspritzung bei beiden Komponenten auf der Innenseite der Kontur. Es wurde ebenfalls ein Heißkanalverteiler verwendet, da die Verwendung eines Kaltkanals zu einer unnötigen Verkomplizierung des Werkzeugdesigns und einem frühzeitigen Einfrieren des Anspritzpunktes führen würde.

##### Simulation Vorderseite

Das Verteilersystem des Heißkanals ist identisch mit jenem von Gehäusedesign 1. Abbildung 62 zeigt die Vorderseite mit Anspritzung und Kühlung.

Als Füllzeit wurden 0,8 s vorgegeben. Daraus ergibt sich ein Einspritzvolumenstrom von  $24,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Dieser Volumenstrom kann von einer herkömmlichen Spritzgießmaschine realisiert werden. Als Nachdruck wurde eine Höhe von 600 bar über eine Zeit von 20 s vorgegeben. Wird Abbildung 63 links näher betrachtet, so kann man erkennen, dass die Nachdruckhöhe wesentlich größer ist als die Fülldruckhöhe. Für die Füllung wird ein Druck von 228 bar benötigt. Während den Simulationen wurden verschiedene Nachdruckhöhen getestet, auf welche nicht genauer eingegangen wird. Es zeigte sich, dass eine Nachdruckhöhe von 600 bar zu den besten Verzugs und Deformationsergebnissen führte. Abbildung 63 rechts, in Kombination mit einer max. Siegelzeit von 20 s zeigt, dass der Nachdruck von 20 sec ausreichend lange gewählt wurde, da nach 20 s kein Massefluss mehr stattfindet.

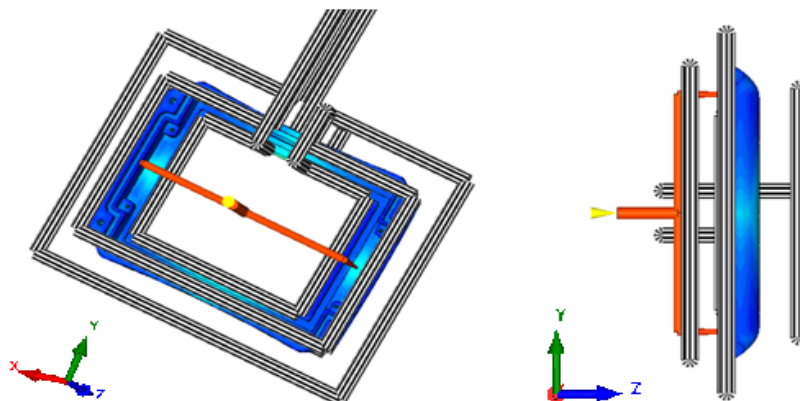


Abbildung 62: Anspritzung und Kühlung der Vorderseite von Gehäusedesign 2 links: 3D-Darstellung; rechts: seitliche Darstellung

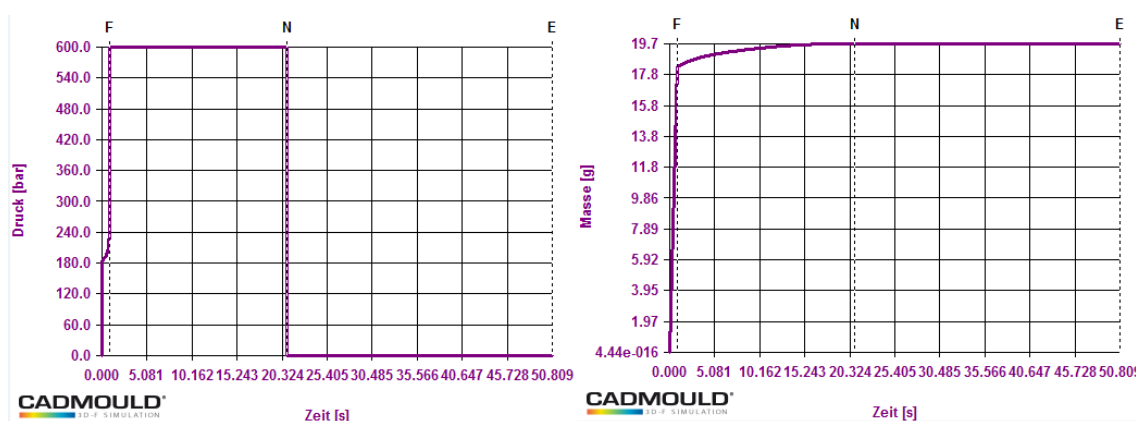


Abbildung 63: Vorderseite Gehäuse 2; links Druckverlauf; rechts Massezunahme

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Abbildung 64 zeigt eine Momentaufnahme der Fließfronten bei einem Füllstand von ~98 %. Daraus ist ersichtlich, dass sich in der Mitte des Bauteiles eine Bindaht über die gesamte Breite des Bauteils ergibt. Da es sich um ein Bauteil in Rahmenform handelt, ist eine Anspritzung ohne Bindaht nicht möglich. Die Fließfronten weisen eine Temperatur von ~249 °C beim Zusammentreffen auf. Daher wird davon ausgegangen, dass sie ausreichend gut miteinander verschweißen und es zu keiner optischen Beeinträchtigung und zu keinem mechanischen Versagen während der Anwendung des Tauchcomputers kommt.

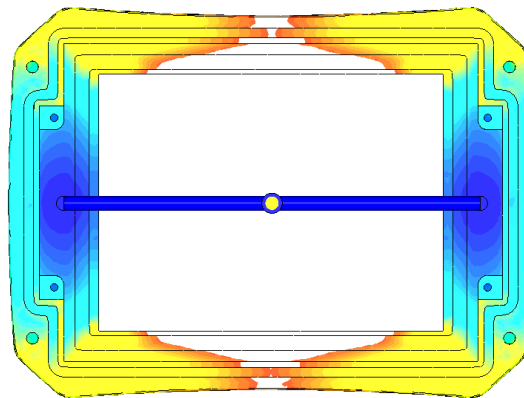


Abbildung 64: Momentaufnahme: Füllstand von 98 % der Vorderseite von Gehäusedesign 2

Die Anordnung und Anzahl der Kühlkanäle unterscheidet sich vom Gehäusedesign 1 nicht. Es handelt sich um 2 Kühlkreisläufe mit einem vorgegebenen Volumenstrom von 10 l/min und einer Vorlauftemperatur von 40 °C. Diese Konfiguration führt zu einer maximalen Entformungszeit von 37 s. Wird für die Nebenzeiten 4 sec zusätzlich miteingerechnet, befindet sich die Zykluszeit des Bauteils <45 s.

Die Kühlung wurde möglichst symmetrisch ausgelegt. Zusätzlich wurde versucht, die Mindestabstände zu dem Bauteil, sowie zwischen den Kühlkanälen einzuhalten. Tabelle 17 gibt eine Übersicht zu den Deformations- und Verzugsergebnissen. Anhang 10.4 zeigt die Grafiken der Verzugsergebnisse. Insgesamt lag eine mittlere Schwindung von 0,3 % vor. Dabei handelte es sich um einen berechneten Wert von Cadmould 3-DF.

Tabelle 17: Deformations- und Verzugsergebnisse der Vorderseite von Gehäusedesign 2

Koordinate		X	Y	Z
von der Mittellinie aus betrachtet (Deformation)	Minimalwert (mm)	-0,182	-0,254	-0,256
	Maximalwert (mm)	0,182	0,254	0,15
Gesamtdeformation (mm)		0,364	0,508	0,406
von der Mittellinie aus betrachtet (Verzug)	Minimalwert (mm)	-0,081	-0,122	-0,237
	Maximalwert (mm)	0,08	0,124	0,128
Gesamtverzug (mm)		0,161	0,246	0,355

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Werden die Ergebnisse der Vorderseite betrachtet, so wurde eine Verbesserung zwischen Gehäusedesign 1 und Gehäusedesign 2 erreicht. Das Design lässt sich trotz der auftretenden Dünnstelle einwandfrei füllen und weist eine Zykluszeit von <45 s auf. Die Schwindungs- und Verzugsergebnisse bewegen sich in einem so kleinen Rahmen, dass sie den geforderten Qualitätsansprüchen genügen.

##### Simulation Rückseite

Zu Beginn wurde versucht, die gleiche Anspritzung wie von Gehäusedesign 1 zu verwenden. Die Simulation zeigte, dass es bei dieser Anspritzung über den Umfang zu einer großen Neigung von Einfallstellen kommt. Das ergibt sich daraus, dass die Wanddicke im Bereich des Anspritzpunktes geringer ist, als am Rand des Bauteils. Dadurch friert der Bereich um den Anguss schneller ein und der Nachdruck kann die durch die Abkühlung bedingte Volumenschwindung nicht komplett ausgleichen. Daher wurde eine Anspritzung mit 2 Anspritzpunkten und einem Heißkanalverteiler verwendet. Abbildung 65 zeigt, dass dadurch das Auftreten von Einfallstellen deutlich reduziert wurde. Diese Anspritzung hat allerdings zur Folge, dass sich in der Mitte des Bauteils, bedingt durch das Zusammenfließen der Fließfronten, Bindenähte ergeben (Abbildung 66). Aufgrund der relativ schnellen Füllung von einer Sekunde und der dadurch bedingten geringen Abkühlung der Fließfront, kann davon ausgegangen werden, dass die Fließfronten während der Füllung ausreichend gut miteinander verschweißen. Die Simulation zeigte, dass die Temperaturen der Fließfronten beim Zusammentreffen im Bereich von 249 °C liegen. Durch dieses Ergebnis wird keine mechanische Schwächung des Bauteils während der Anwendung erwartet.

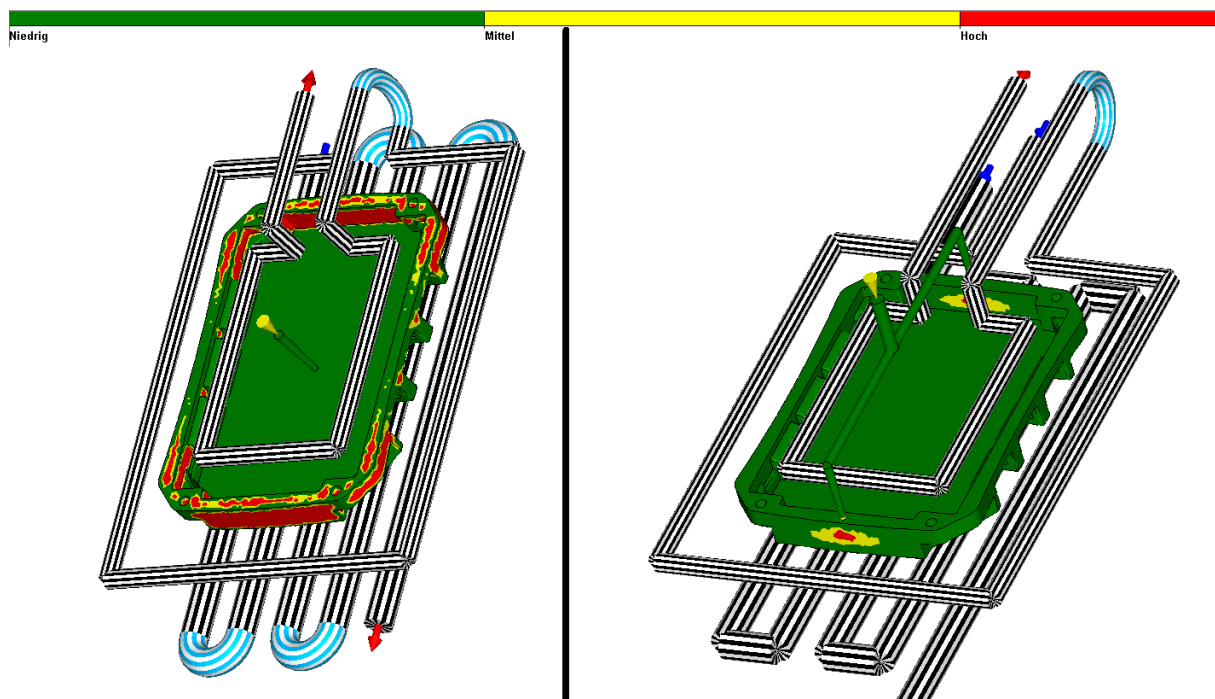


Abbildung 65: Einfallstellenreduktion durch Veränderung der Anspritzung bei der Rückseite von Gehäusedesign 2; links: zentrale Anspritzung; rechts: zwei Anspritzpunkte

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

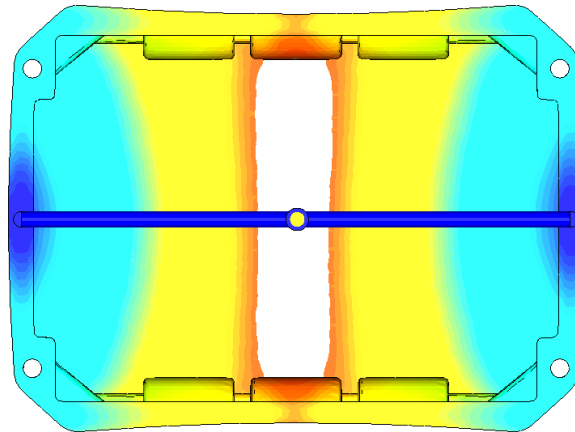


Abbildung 66: Momentaufnahme während der Füllung der Rückseite von Gehäusedesign 2

Die Füllung des Bauteils verlief ohne Komplikationen. Mit einer vorgegebenen Einspritzzeit von einer Sekunde ergibt sich ein Einspritzvolumenstrom von  $28 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Dieser kann wiederum von einer der Bauteilgröße entsprechenden Standardspritzgussmaschine realisiert werden. Abbildung 67 links zeigt, dass der Nachdruck deutlich höher gewählt wurde als der benötigte Fülldruck. Der Fülldruck bei diesem Bauteil beträgt 188 bar. Wie bei der Vorderseite des Designs zeigte sich, dass der hohe Nachdruck eine Verbesserung der Verzugs- und Deformationsverhalten aufweist. Abbildung 67 rechts, in Kombination mit einer max. Siegelzeit von 20 sec, zeigt dass der Nachdruck von 20 sec ausreichend lange gewählt wurde, da nach 20 s kein Massefluss mehr stattfindet.

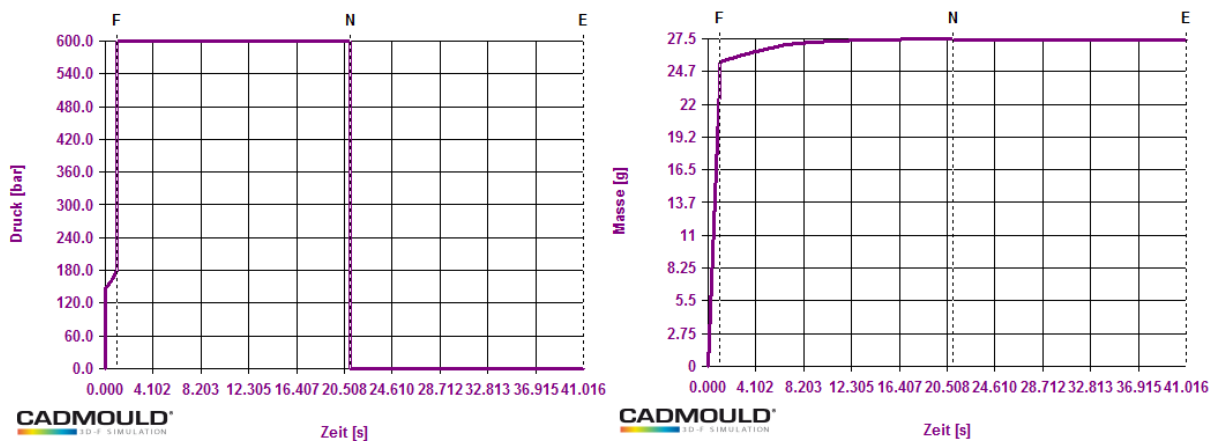


Abbildung 67: Rückseite Gehäuse 2; links Druckverlauf; rechts Massezunahme

Die Kühlung der Rückseite wurde an das neue Design angepasst. Da der ergonomisch geformte Teil nun nicht mehr vorhanden war, mussten die Kühlkanäle nicht durch das ganze Werkzeug verlaufen, sondern konnten innenliegend mit Bohrungen versehen werden. Da sich durch die Optimierung der ergonomisch geformten Rückseite, die Wandstärke deutlich reduzierte, wurde die gesamte Kühlung mit 6 mm Kühlbohrungsdurchmesser konstruiert. Zusätzlich musste der umlaufende Kühlkanal aufgrund der Dickenreduzierung verschoben werden. In Abbildung 68 sind die Unterschiede der beiden Kühlungen klar ersichtlich.

Da es sich bei Vorder- und Rückseite um dasselbe Material handelt, wurde auch hier eine Vorlauftemperatur von  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , bei einem Volumendurchsatz von  $10 \text{ l}/\text{min}$  gewählt. Dieses

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Kühlkreislaufdesign führt zu einer maximalen Entformungszeit von 45 s. Werden gleich wie bei der Vorderseite vier Sekunden Nebenzeiten der Maschine hinzu gerechnet, so beträgt die Gesamtzeit < 50 s. Allerdings weist die Kühlung einen großen Nachteil auf: Durch die geringere Dicke von Gehäusedesign 2 kann keine symmetrische Kühlung in Kombination mit einem Schieberelement realisiert werden, da der für um die Kavität herumführende Kühlkanal das Loch für die Befestigung des Uhrbandes verdeckt. Abbildung 68 zeigt links, dass sich der um das Bauteil herumführende Kühlkanal nicht auf der Höhe der Bohrung für das Uhrband (1) befindet. Abbildung 68 rechts zeigt, dass der um das Bauteil herumführende Kühlkanal, genau auf Höhe der Uhrbandbefestigung liegt. Dadurch ist es beim Gehäusedesign 2 nicht möglich, einen Kühlkanal zu konstruieren, der die Außenkontur des Bauteils symmetrisch kühlt. Es wäre sehr aufwendig eine Kühlkonstruktion zu entwickeln, die einen Schieber für die Befestigung des Uhrbandes zulässt und gleichzeitig eine homogene Kühlung über das gesamte Bauteil aufweist. Daher muss während der Werkzeugkonstruktion überlegt werden, ob es wirtschaftlicher ist, das Loch nach dem Spritzgießen händisch zu bohren.

Da für das Verzug und Deformationsverhalten bestmögliche Ergebnisse erreichen werden sollten, wurden die Parameter mit einer symmetrisch umlaufenden Kühlung simuliert. Tabelle 18 gibt Auskunft über die einzelnen Deformations- und Verzugsergebnisse. Im Anhang 10.4 befinden sich die Grafiken zu den Verzugsergebnissen. Insgesamt lag eine mittlere Schwindung von 0,4 % vor.

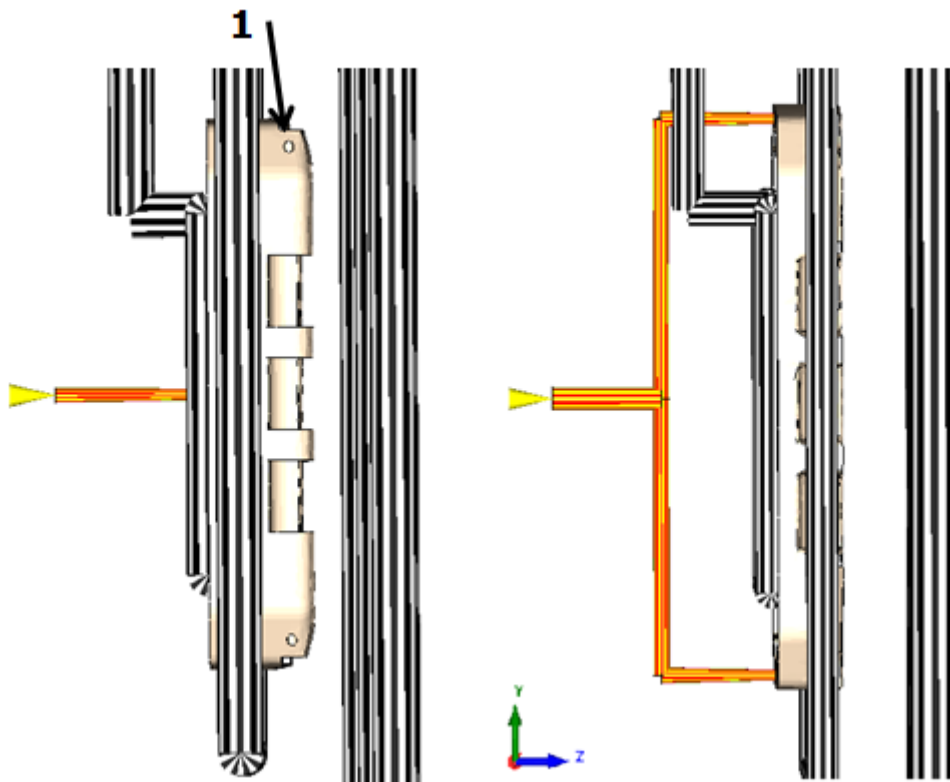


Abbildung 68: links, Design 1 mit Platz für ein Schieberelement; rechts, Design 2

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Ergebnisse der Rückseite von Gehäusedesign 2 zeigen, dass eine deutliche Verbesserung zu Gehäusedesign 1 erreicht wurde. Durch die Änderung des Anspritzpunktes lässt sich das Design einwandfrei füllen und weist eine Entformungszeit von <50 s auf. Die Schwindungs- und Verzugsergebnisse bewegen sich aufgrund der Größe des Bauteiles in einem so kleinen Rahmen, dass sie den geforderten Qualitätsansprüchen genügen.

*Tabelle 18: Deformations- und Verzugsergebnisse der Rückseite von Gehäusedesign 2*

Koordinate		X	Y	Z
von der Mittellinie aus betrachtet (Deformation)	Minimalwert (mm)	-0,233	-0,23	-0,148
	Maximalwert (mm)	0,226	0,232	0,123
Gesamtdeformation (mm)		0,459	0,462	0,291
von der Mittellinie aus betrachtet (Verzug)	Minimalwert (mm)	-0,057	-0,093	-0,12
	Maximalwert (mm)	0,058	0,095	0,11
Gesamtverzug (mm)		0,115	0,188	0,23

#### 4.5.3 Zusammenfassung und Werkzeugvorschlag

Die Simulationen haben gezeigt, dass die Optimierung von Gehäusedesign 1 zu wesentlich besseren Ergebnissen im Bereich Zykluszeit sowie Deformations- und Verzugsverhalten führt. Es musste festgestellt werden, dass eine ergonomisch geformte Gehäuserückseite zwar den Tragekomfort erhöhen würde, allerdings die Simulationsergebnisse deutlich schlechter sind. Eine ergonomisch geformte Rückseite, führt zu einer Erhöhung der Zykluszeit und zu einer Erhöhung des Verzuges in jede Koordinatenrichtung um ~200 %. Daher wurde auf eine ergonomisch geformte Rückseite des Gehäuses verzichtet, da das Ziel ein Bauteil mit möglichst geringer Zykluszeit und möglichst geringem Verzug in jede Koordinatenrichtung war.

Beide Komponenten können mit einer Zykluszeit von unter 50 s gefertigt werden, was die Vorgabe von 60 s deutlich unterschreitet.

Die Deformations- und Verzugsergebnisse wurden bei der Vorderseite ebenfalls verbessert. Die Ergebnisse liegen nun unter den geforderten 0,5 mm. Da die beiden Teile miteinander verschraubt werden, ist es wichtig den Z-Verzug der beiden Bauteile genauer zu untersuchen (Tabelle 19). Wölben sich beide Bauteile in der Mitte auf, so würde immer ein sichtbarer Spalt zwischen den Komponenten verbleiben und die Wasserdichtheit könnte nicht garantiert werden. Abbildung 69 und Abbildung 70 zeigen die beiden Bauteile in der Ansicht, wie sie miteinander verschraubt werden. Dabei stellen die blauen Farben eine negative Deformation und die gelben bis roten Farben eine positive Deformation dar. Abbildung 69 zeigt die beiden Bauteile nebeneinander liegend ohne Verzugsdarstellung. Abbildung 70 zeigt die Bauteile wie sie zusammengeschraubt werden mit der Darstellung des entstehenden Z-Verzuges. Da sich

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

die Bauteile auf den Außenseiten auseinander deformieren, kann diese Formabweichung durch die Verschraubung aufgehoben werden.

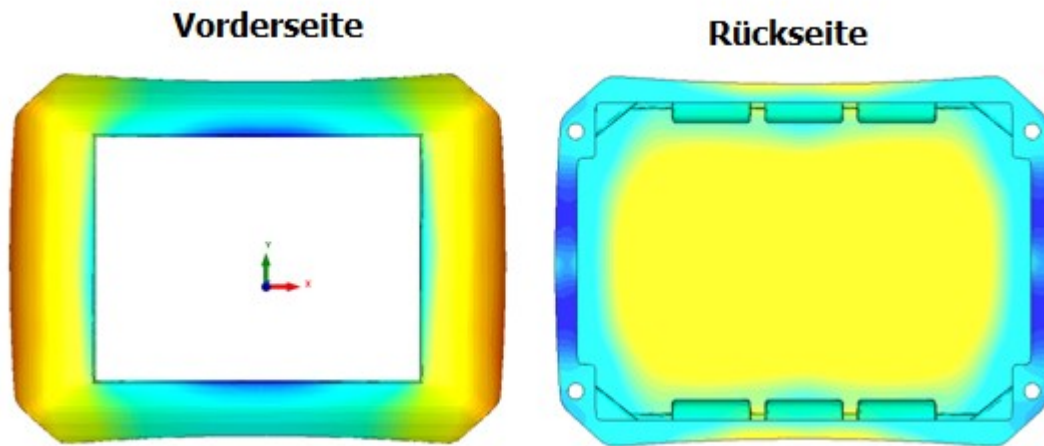


Abbildung 69: Z-Deformation der Gehäusehälften

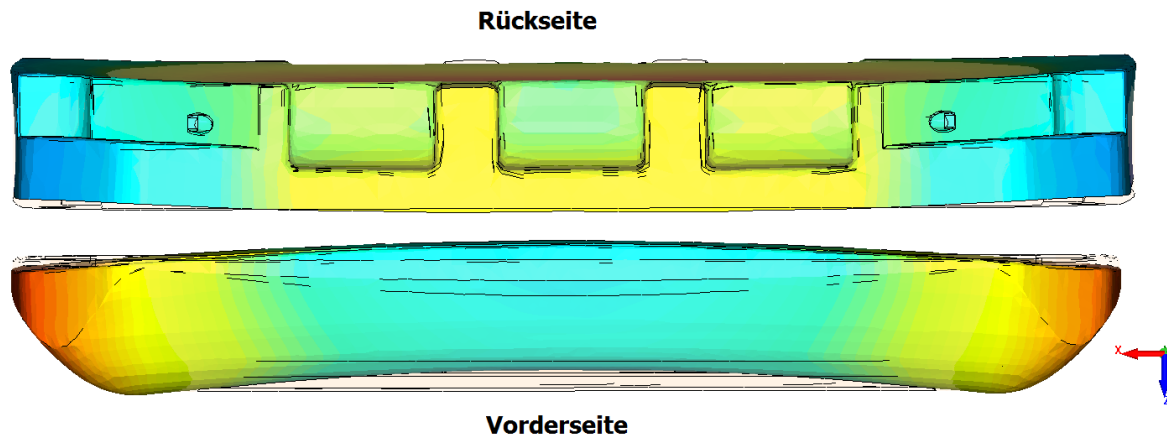


Abbildung 70: Z-Verzug beim Zusammenbau der Komponenten

Tabelle 19: Vergleich der Z-Komponente von Vorderseite und Rückseite im Bezug auf die Deformation und den Verzug

Komponente		Vorderseite	Rückseite
von der Mittellinie aus betrachtet (Deformation)	Minimalwert (mm)	-0,256	-0,148
	Maximalwert (mm)	0,15	0,123
Gesamtdeformation (mm)		0,406	0,291
von der Mittellinie aus betrachtet (Verzug)	Minimalwert (mm)	-0,237	-0,12
	Maximalwert (mm)	0,128	0,11
Gesamtverzug (mm)		0,355	0,23

#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

Beide Bauteile wurden jeweils in einem eigenen Werkzeug simuliert. Nachdem das Gehäusedesign 2 ausreichend gute Ergebnisse in der Simulation aufwies, wurden abschließend Simulationen in einem gemeinsamen Werkzeug durchgeführt (Abbildung 71). Das hätte den Vorteil, dass die benötigte Produktionszeit für die Herstellung beider Komponenten um die Hälfte reduziert werden könnte. Zusätzlich würden sich die Investitionen im Punkte Maschinenanschaffung und Maschinenwartung halbieren.

Für die gemeinsame Kühlung wurden die Kühlungen der einzelnen Komponenten kombiniert. Dadurch unterscheiden sich die Kühlbedingungen für die einzelnen Bauteile kaum zu der Fertigung in einem eigenen Werkzeug. Bei einer Durchlaufrate von 10 l/min und einer Vorlautemperatur von 40 °C erwärmt sich das Wasser um 0,3 °C während des Durchfließens. Es zeigte sich, dass die Herstellung in einem gemeinsamen Werkzeug zu fast identischen Deformations- und Verzugsergebnissen führte. Die Zykluszeit blieb bei der Fertigung in einem Werkzeug mit der gewählten Kühlung ebenfalls unter 60 s. Nach Rücksprache mit Konstrukteuren im Bereich Spritzgusstechnik, ist allerdings von der Verwendung eines gemeinsamen Werkzeuges abzuraten. Da die beiden Bauteile unterschiedliche Fülldrücke benötigen und die projizierte Fläche der beiden Komponenten sehr unterschiedlich ist (Tabelle 20), könnte es infolge der unterschiedlichen Belastung des Werkzeuges zu einer verringerten Lebensdauer des Werkzeuges kommen. Durch die unterschiedliche Belastung ist es auch möglich, dass das Werkzeug sich verzieht, dadurch die Toleranzen nicht mehr eingehalten werden und die Produktqualität im Hinblick auf Optik und Formgenauigkeit abnimmt. Zusätzlich muss auf eine genaue rheologische Auslegung des Heißkanalverteilers geachtet werden. Wird eines der beiden Bauteile schneller gefüllt als das andere, kann es in Folge der ungleichmäßigen Füllung zu nicht unerheblichen Druckspitzen kommen, was die Lebensdauer des Werkzeuges ebenfalls stark verringern kann. Das würde sich bei der Verwendung einer holmlosen Spritzgussmaschine stärker auf die Bauteilqualität auswirken als bei einer Standardspritzgussmaschine.

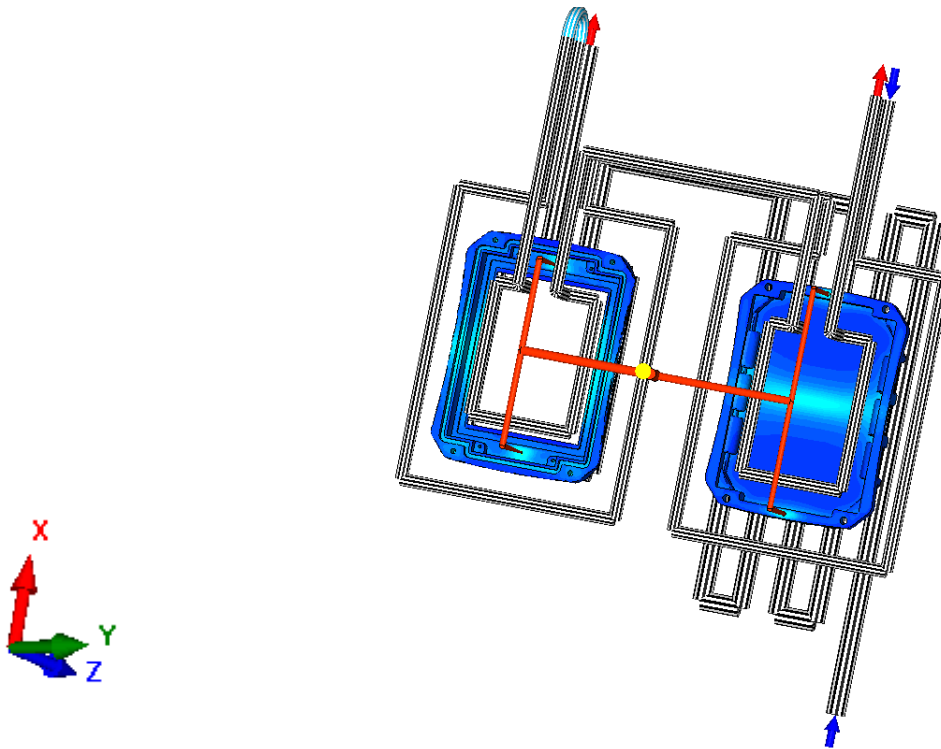
*Tabelle 20: Vergleich der Schließkraft beider Gehäusehälften*

Komponente	Vorderseite	Rückseite
benötigter Fülldruck (bar)	228	188
projizierte Fläche in z-Richtung (mm <sup>2</sup> )	4561	8082
Schließkraft in z-Richtung (kN)	253	456



#### 4. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

---

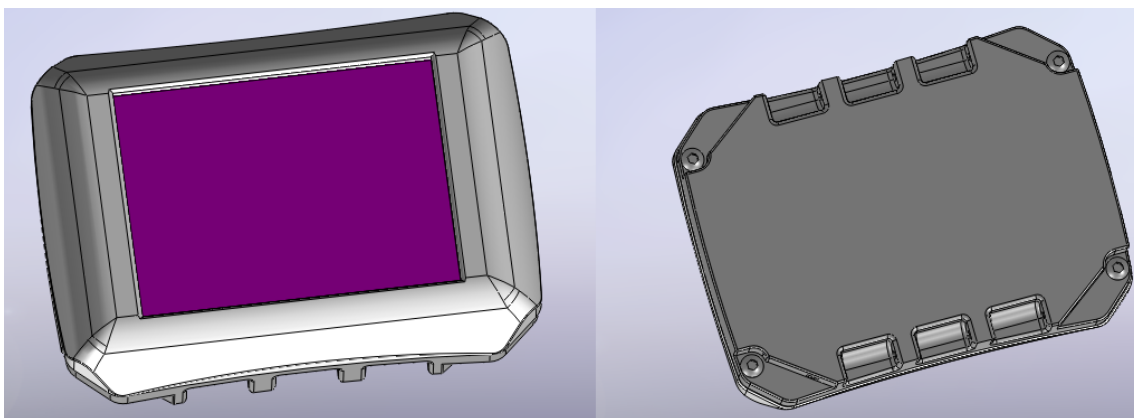


*Abbildung 71: Anguss und Kühlung der gemeinsamen Simulation*

Da bei beiden Komponenten eine Anspritzung über einen Heißkanalverteiler vorgenommen wurde, kann das Werkzeug in Form eines 3 Plattenwerkzeuges mit pneumatisch gesteuerter Auswerferplatte realisiert werden. Es wäre auch eine Auswerfung über Auswerferstifte möglich. Da sich die Anspritzung allerdings auf der Innenseite der Komponenten befindet, würden die Auswerferstifte auf der sichtbaren Fläche des Tauchcomputers Abdrücke hinterlassen, was das Erscheinungsbild des Tauchcomputer negativ beeinflussen würde. Eine düsenseitige Auswerferplatte würde dem entgegenwirken. Allerdings ist dies nur ein Vorschlag aufgrund der vorliegenden Simulationsergebnisse. Das genaue Werkzeugdesign muss nach der Prototypenphase mit einem Konstruktionsteam genauer besprochen werden.

### 5 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Masterarbeit wurde das Ziel, einen prototypenfähigen Tauchcomputer mit berührungssensitiver Eingabeeinheit, in Anlehnung an das Patent „WO 2012/035021 A1; Touch Sensitive Display, and method for the operator control of a diving computer“ [45] zu entwickeln, erreicht. Alle Komponenten des Tauchcomputers wurden entsprechend den Anforderungen neu entwickelt bzw. angepasst. Abbildung 72 zeigt den nun für die Prototypenfertigung freigegebenen Tauchcomputer: Links in der Vorderansicht und rechts in der Ansicht von hinten.



*Abbildung 72: Tauchcomputer in dem prototypenfähigen Design; links: Vorderseite; rechts: Rückseite*

Damit der Tauchcomputer unter Wasser mit einer berührungssensitiven Einheit funktioniert, musste ein handelsübliches Touchpanel modifiziert werden. Durch das Einbringen von kleinen Öffnungen zwischen der Verklebung des Glasträgers und der Polymerfolie des Touchpanels ist es möglich, Silikonöl in den Spalt zwischen den beiden Komponenten zu injizieren. Befindet sich das Silikonöl zusätzlich im gesamten Tauchcomputer (ausgenommen der Luftspalt zwischen Membran und Gehäuserückseite zum Ausgleich der Volumenschwankungen des Öl unter erhöhtem Druck), herrscht in diesem ein hydrostatischer Druckzustand, wodurch der erhöhte Wasserdruck keinen Kontakt zwischen den ITO beschichteten Komponenten auslöst. Bereits vor Beginn dieser Arbeit wurde ein Silikonöl ausgewählt, das sich für diese Anwendung eignen sollte. Es handelte sich hierbei um ein durchsichtiges Silikonöl mit einer Viskosität von 20 cSt. Die Versuche dieser Arbeit bestätigen die Eignung des Öls.

Es konnte eine Firma gefunden werden, welche ein 4-wire resistives Touchpanel mit einer Größe von 3,5" mit vier kleinen Öffnungen versieht. Die Befüllungsversuche zeigten, dass die Öffnungen mindestens 200 µm dick sein müssen, damit die Befüllung unter Vakuum luftblasenfrei ablaufen kann. Für diesen Zweck wurde seitens der Firma ein neues Werkzeug zur Herstellung dieses Touchpanels gebaut.

Ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit war es, eine Verbindung zwischen Touchpanel und Gehäuse zu realisieren. Diese Verbindung musste die Komponenten im Inneren des Computers gegen das Eindringen des Wassers während des Tauchganges schützen.

## 5. Zusammenfassung

---

Zusätzlich musste sie ein Auslaufen des Silikonöls aus dem Computer verhindern. Dafür musste der Dichtstoff bzw. Kleber langzeitbeständig gegen Silikonöl und jegliche Art von Wasser sein.

Bevor nach einer passenden Art der Verbindung gesucht wurde, musste eine Materialvorselektion für das Gehäuse vorgenommen werden. Aufgrund der speziellen Anforderungen an das Material des Tauchcomputers, wie Beständigkeit gegen Silikonöl bzw. UV-Stabilität, konnte die Anzahl an Materialien auf vier Materialklassen eingegrenzt werden. Es handelte sich hierbei um ASA/PC, PBT, PE-HD und PP. Es handelt sich dabei allerdings nur um einen Materialvorschlag. Die Materialauswahl für die Serienproduktion muss mit dem entsprechenden Hersteller und Konstrukteur abgeklärt werden. Aufgrund der geforderten UV-Beständigkeit und auch in Hinblick auf den Preis, wurde für weitere Versuche das Material PP UV-stabilisiert ausgewählt.

Das Material PP-UV-stabilisiert würde sich negativ auf eine Verbindung mittels einer herkömmliche Verklebung auswirken, da eine Verklebung von der PE-Folie des Touchpanels und dem PP-Gehäuse nicht ohne Vorbehandlung der Komponenten zu einem ausreichend guten Ergebnis führen würde. Es konnte während der Arbeit allerdings festgestellt werden, dass eine herkömmliche Verklebung nicht in Frage kommt. Aufgrund der Öffnungen im Touchpanel dürfen keine Kleber verwendet werden, die während der Aushärtung ihr Volumen verändern. Durch die Volumensänderung beim Aushärten würden Schälspannungen auf die Verklebung des Touchpanels übertragen werden, die zu einem Versagen des Touchpanels führen können. Zusätzlich könnte die einwandfreie Funktionsweise durch eine Vorbehandlung mit ND-Plasma oder eines Primers nicht garantiert werden.

Aufgrund dieser speziellen Anforderungen an die Verklebung konnte keine Verklebung im herkömmlichen Sinne verwendet werden. Die Recherche nach einem passenden Material lies nur ein klebriges elasto-plastisches Material auf Basis von Butylkautschuk zu. Da Butylkautschuk im Allgemeinen nur mäßig gegen Silikonöl beständig ist, wurden verschiedene Versuche zur Untersuchung dieser Beständigkeit durchgeführt.

Dabei wurde der Dichtstoff bis zu 3 Monate bei Raumtemperatur im Silikonöl gelagert. Zusätzlich wurden auch Lagerungsversuche bei 60 °C und 80 °C, in Kombination mit der Lagerung bei Raumtemperatur, durchgeführt. Alle Proben wurden auf Masseverlust, extrahierbare Anteile, gaschromatographisch, in Kombination mit einem Massenspektrometer und thermogravimetrisch untersucht.

Die Versuche ergaben, dass der Dichtstoff bei der Lagerung in dem ausgewählten Silikonöl Bestandteile des Silikonöls aufnimmt und mit großer Wahrscheinlichkeit auch leicht flüchtige Bestandteile seinerseits an das Silikonöl abgibt. Diese Bestandteile sind allerdings so gering, dass davon ausgegangen werden kann, dass eine Lagerung über mehrere Monate (>24) zu keiner Beeinträchtigung der Wasserdichtheit, bzw. der Dichtheit gegen das Silikonöl auftritt. Es muss auch erwähnt werden, dass der Dichtstoff bei seiner Anwendung im Tauchcomputer nur mit einem Bruchteil seines Querschnittes mit dem Silikonöl in Berührung kommt und daher die Aufnahme des Silikonöls noch einmal deutlich verringert wird.

Die Versuche zeigten ebenfalls, dass obwohl die Lagerungstemperatur von 80 °C 20 °C über der Anwendungstemperatur liegt, es zu keiner signifikanten Materialschädigung kommt.

## 5. Zusammenfassung

---

Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Dichtstoff für jeden Temperaturbereich, in dem der Tauchcomputer eingesetzt wird, angewendet werden kann.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der Dichtstoff auf Basis von Butylkautschuk als geeignet bewertet. Es wurde beschlossen, dass der Dichtstoff mit einem Durchmesser von vier Millimetern eingesetzt wird. Hier wurde bereits ein Hersteller gefunden.

Im Bereich Gehäusedesign wurden insgesamt 10 verschiedene Designs konstruiert. Die Designs wurden alle in Hinblick auf die eingebauten Komponenten, sowie auf das Herstellungsverfahren durch Spritzgießen optimiert. Zwei dieser Designs wurden mittels Spritzgießsimulation auf ihre Spritzgießbarkeit überprüft. Aufgrund der geforderten geringen Dicke des Tauchcomputers fiel die Entscheidung auf das Design mit dem Flachakku

Das erste Design, welches auf seine Spritzgießbarkeit überprüft wurde, konnte ergonomisch an den Unterarm angepasst werden. Hierfür wurde eine Studie zur Ermittlung der Breite des durchschnittlichen Unterarms durchgeführt. Es zeigte sich allerdings, dass die ergonomische Form zu einem verlängerten Spritzgusszyklus führt. Dies wird durch die Masseanhäufungen auf der Rückwand des Tauchcomputers ausgelöst. Diese Masseanhäufungen führen zusätzlich zu einem erhöhten Deformations- und Verzugsverhalten während des Spritzgusszyklus.

Aufgrund dieser Ergebnisse entschied man sich für das Gehäusedesign 2. Dieses weist keine ergonomische Auslegung des Deckels vom Tauchcomputer auf. Das ausgewählte Design für den Tauchcomputer weist die Abmessungen 107 mm x 80 mm x 24,5 mm auf. Es beherbergt alle notwendigen Komponenten und bietet die Möglichkeit zur Anbringung eines Uhrbandes für die Befestigung am Unterarm.

Die Spritzgießsimulationen der Vorderseite so wie der Rückseite des ausgewählten Designs weisen ausreichend geringe Verzugs- und Schwindungsergebnisse auf. Insgesamt benötigt die Vorderseite eine Zykluszeit von ungefähr 45 s und die Rückseite eine Zykluszeit von ungefähr 50 s. Jegliche Abweichungen in der Geometrie der Teile befindet sich in einem so kleinen Ausmaß, dass es durch die Verschraubung der beiden Teile miteinander ausgeglichen werden sollte.

Das Auftreten von Bindenähten ist durch die Form der Teile unausweichlich. Durch die relativ schnelle Füllung der Teile und die daraus resultierende geringe Abkühlung der Kunststoffschmelze während der Füllung kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die auftretenden Bindenähte zu keiner optischen Beeinträchtigung und zu keinem mechanischen Versagen der Bauteile in der Anwendung führen werden.

Zusätzlich zu den Füllsimulationen wurde eine Kühlung designt, welche eine ausreichend symmetrische Abkühlung der Bauteile garantiert. Dies setzt allerdings voraus, dass die Öffnung für die Befestigung des Uhrbandes im Nachhinein gebohrt wird. Wird das Werkzeug mit einem Schieber realisiert, muss die Kühlung entweder komplizierter oder unsymmetrischer ausgelegt werden, was zu schlechteren Schwindungs- und Verzugsergebnissen führt.

Aufgrund der Ergebnisse und der angewendeten Kühlung wird für das Werkzeugdesign ein Dreiplattenwerkzeug mit pneumatisch betätigter Auswerferplatte und Heißkanal empfohlen. Eine Ausführung mit einem Kaltkanal wäre nicht zu empfehlen, da es hier aufgrund der

## 5. Zusammenfassung

---

innenliegenden Anspritzung zu einer unnötigen Verkomplizierung des Werkzeugdesigns kommen würde.

Durch den geringen Druckverbrauch und den geringen Massestrom bei verhältnismäßig schneller Füllung der beiden Komponenten ist eine Auslegung als Mehrfachkavitätenwerkzeug nicht auszuschließen. Es wurden auch Simulationen durchgeführt, bei welchen beide Komponenten in einem Werkzeug gespritzt wurden. Diese Simulationen weisen ebenfalls ausreichend gute Ergebnisse in Bezug auf Zykluszeit, sowie Deformations- und Verzugsverhalten auf. Es ist allerdings davon abzuraten, beide Teile in einem gemeinsamen Werkzeug zu fertigen, da der Druckverbrauch sowie die Fließwege und projizierten Flächen der einzelnen Teile sehr unterschiedlich sind. Das könnte über mehrere tausend Zyklen zu einer Schädigung des Werkzeuges und zu Qualitätsproblem der Bauteile führen.

Zusammenfassend konnten in dieser Arbeit die Aufgabenstellungen erfolgreich erfüllt werden. Es wurden alle Komponenten entweder optimiert oder neu entwickelt. Zusätzlich wurden alle Designs oder ausgewählte Materialien durch etwaige Tests und Simulationen in ihrer Verwendung bestätigt. Daher kann der Tauchcomputer nun für weitere Prototypentests freigegeben werden.

# 6 Ausblick

Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit können nun von dem ausgewählten Gehäuse Prototypen gefertigt werden. Diese werden vorerst durch das Verfahren des Fräsens hergestellt. Die Prototypen müssen hinsichtlich des Zusammenspiels der Komponenten, des Platzes der Komponenten im Gehäuse und der Wasserdichtheit überprüft werden. Zusätzlich muss eine Membran gefertigt werden, welche auf die Geometrie des Gehäuses angepasst wird.

Danach können diverse Tests unter den Anwendungsbedingungen durchgeführt werden.

Zukünftig sollen die zwei Hälften des Gehäuses über das Verfahren des Spritzgießens hergestellt werden. Zeigen die Prototypen, dass alle Komponenten im Gehäuse ausreichend Platz haben, für die Füllung des Panels mit Silikonöl etc., und die Wasserdichtheit mit dem gewählten Design garantiert werden kann, sollte noch einmal eine detaillierte Spritzgussimulation durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wäre ein DoE (Design of Experiments) von Vorteil. Dieser könnte die Phase der Werkzeugkonstruktion erheblich verkürzen. In dieser Phase muss auch entschieden werden, ob ein Werkzeug mit einem Schieber gefertigt wird. Sollte man auf den Schieber verzichten, so muss die Öffnung für die Befestigung des Uhrbandes im Nachhinein händisch gebohrt werden.

Während der Simulationsphase sollten bereits die verschiedenen Materialhersteller einbezogen werden. Auf Basis der Materialvorauswahl muss eine endgültige Materialtype ausgewählt werden. Dadurch könnte man die Simulation mit dem in der Praxis verwendeten Material durchführen. Die Ergebnisse der Simulation werden durch das richtige Material realitätsgetreuer.

Abschließend muss mit einem Konstruktionsteam ein Werkzeug entwickelt werden, welches alle Anforderungen hinsichtlich Formstabilität der Komponenten und Zykluszeit erfüllt.

Führen alle diese weiteren Schritte zu einem Erfolg, kann mit der Serienproduktion begonnen werden.

# 7 Literaturverzeichnis

- [1] Patentanmeldung: GB2455389; Dive computer with accelerometer-controlled finger tap button-less interaction; Abdel, F.; Anmeldedatum: 10.06.2009
- [2] Abts, G.: Einführung in die Kautschuktechnologie; Carl Hanser Verlag München; Deutschland; 2007
- [3] Ackermann, J.; Damrath, V.: Chemie in unserer Zeit; 3; VCH Verlagsgesellschaft mbH; Weinheim; Detschland; 1989
- [4] Ambient Pressure Diving Ltd; <http://www.apdiving.com/en/rebreathers/technology/> abgerufen am 02.11.2014
- [5] Becker H.G.O.; Berger, W.; Domschke, G.: Organikum; 22; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim; Deutschland; 2007
- [6] CES Selector software, Granta Design Limited, Cambridge, UK, 2014
- [7] Patentanmeldung: US5899204 A; Dive computer with wrist activation; Cochran, M.; Anmeldedatum: 29.12.1995
- [8] Delo Industrie Klebstoffe: Firmenbrochüre: optisch klare Klebstoffe; Für Display- und Touchpanel-Verklebungen; 06.2013
- [9] Delo Industrie Klebstoffe; Firmenbrochüre; Verkleben von Kunststoffen; 2010
- [10]Die Verbraucher Initiative e.V. (Bundesverband); URL: [http://www.zusatzstoffe-online.de/zusatzstoffe/271.e900\\_dimethylpolysiloxan.html](http://www.zusatzstoffe-online.de/zusatzstoffe/271.e900_dimethylpolysiloxan.html); abgerufen am: 21.10.2014
- [11]Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften; 5; Springer Verlag Berlin; Deutschland [u.a.]; 1998
- [12]Eckhardt, S.; Gottwald, W.; Stieglitz, B.: 1x1 der Laborpraxis; 2; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim; Deutschland; 2007
- [13]Ehrenstein, Gottfried, W.; Pongratz, S.: Beständigkeit von Kunststoffen Band1; Carl Hanser Verlag München; Deutschland; 2007
- [14]Freytag, R.; Vorlesungsunterlagen: Simulation in der Werkstoffverarbeitung Teil 1 Spritzgussimulation; FH Wels; WS 2010/2011
- [15]Freytag, R.; Vorlesungsunterlagen: Simulation in der Werkstoffverarbeitung Teil 2 Spritzgussimulation; FH Wels; WS 2010/2011
- [16]Frick, A.; Stern, C.: Praktische Kunststoffprüfung; 1; Carls Hanser Verlag, München; Deutschland; 2011
- [17]Geysel, A.: Wie funktionieren Touchpad und Touchscreen?; <http://www.weltderphysik.de/thema/hinter-den-dingen/elektronische-geraete/touchpad-und-screen/>; abgerufen am 26.10.2014
- [18]Gierschner, N.: Meine Illustrierte Chronologie und Bibliografie Tauchgeschichte/ Systematically and Alphabetical Bibliography; 2; Gierschner Verlag; 2011; Deutschland

## 7. Literaturverzeichnis

---

- [19]Grellmann, W.; Seidler, S.: Kunststoffprüfung; 2; Carl Hanser Verlag, München; Deutschland; 2011
- [20]Hellerich, W.; Harsch, G.; Baur, E.: Werkstoff-Führer Kunststoffe; 10; Hanser Verlag München; Deutschland; 2010
- [21]Henkel AG & Co.KGaA, Technisches Datenblatt: Terostat 81; 07.2010
- [22]Hughes, N.: Touchscreen Technologien im Vergleich; <http://www.channelpartner.de/a/touchscreen-technologien-im-vergleich,633708> ; abgerufen am 26.10.2014
- [23]Jung, M.: Das Handbuch der Tauchgeschichte; Stuttgart: Nagelschmid; 1999; Deutschland
- [24]Kahl, D.: Resistive vs. Kapazitive Touchscreens; [http://winfwiki.wifom.de/index.php/Resistive\\_vs.\\_Kapazitive\\_Touchscreens](http://winfwiki.wifom.de/index.php/Resistive_vs._Kapazitive_Touchscreens) abgerufen am 28.10.2014; abgerufen am 26.10.2014
- [25]Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure; 3; Hanser Verlag München; Deutschland; 2011
- [26]Lamelot, M.: Touchscreens: Hat die Revolution begonnen?; <http://www.tomshardware.de/Touchscreens,testberichte-240158-3.html> ; abgerufen am 26.10.2014
- [27]L.Böwing GmbH; Technisches Datenblatt zu Elebesil Öle
- [28]L.Böwing GmbH, EU-Sicherheitsdatenblatt: Elbesil Öl B 3-50
- [29]Lucyshyn, T.; Vorlesungsunterlagen: Übung zu Spritzgießen I Theorieteil; Montanuniversität Leoben; 07.11.2013
- [30]Lucyshyn, T.; Vorlesungsunterlagen: Computergestützte Auslegung von Spritzgießwerkzeugen; Montanuniversität Leoben; Sommersemester 2008
- [31]Mayer, W.; Niederenergetische Oberflächen Kleben; Kunststoffe, 105-107, 3/2009
- [32]Omio: Resistive Vs. Capacitive Touchscreens, What`s The Difference; <http://mobilenews.omio.com/mobile-phone-guides/resistive-vs-capacitive-touchscreens-whats-the-difference/> ; abgerufen am 26.10.2014
- [33]Otto, M.: Analytische Chemie; 3; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA; 2006; Deutschland
- [34]Pabst, M.: Neue Touchpanel-Technologie ermöglicht Bedienung mit Handschuhen; <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/index.cfm?pid=876&pk=125863> ; abgerufen am 26.10.2014
- [35]Peinhopf, W. : Auslegung von Spritzgießwerkzeugenmittels der Methode der Finiten Elemente; Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, 2000
- [36]Permabond Engineering Adhesives Limited, Provisional Technical Datasheet: Permabond® MS359 Clear MS Polymer Adhesive



## 7. Literaturverzeichnis

---

- [37]Permabond Engineering Adhesives Limited, Provisional Technical Datasheet: Permabond® UV686.21 UV-Cure Gasketmaker
- [38]Plastics Europe: Plastics-the Facts 2012, An analysis of European plastics production demand and waste data for 2011; [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20121120170458-final\\_plasticsthefacts\\_nov2012\\_en\\_web\\_resolution.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20121120170458-final_plasticsthefacts_nov2012_en_web_resolution.pdf); abgerufen am 27.10.2014
- [39]Röthenmeyer, F.; Sommer, F.: Kautschuk Technologie, Werkstoffe-Verarbeitung-Produkte; 2. Überarbeitete Auflage; Carl Hanser Verlag München Wien; Deutschland; 2006
- [40]Rügheimer, H.: Kapazitiv: Display als Kondensator; <http://www.connect.de/ratgeber/kapazitiv-display-als-kondensator-377871.html> ; abgerufen am 26.10.2014
- [41]Rügheimer, H.: So funktioniert ein Touchscreen, Siegeszug mit Touch; <http://www.connect.de/ratgeber/siegeszug-mit-touch-377935.html> ; abgerufen am 26.10.2014
- [42]Saechtling, H.; Baur, E.: Saechtling-Kunststoff-Taschenbuch; 30; Hanser Verlag München; Deutschland; 2007
- [43]Schliebs, R.; Ackermann, J.: Chemie in unserer Zeit; 4; VCH Verlagsgesellschaft mbH; Weinheim; Deutschland; 1987
- [44]Schwedt, G.: Analytische Chemie; 1; Wiley- VCH Verlag GmbH & Co.KGaA Weinheim; Deutschland; 2004
- [45]Patentanmeldung: WO2012/035021 A1; Touch-sensitive display, and method for the operator control of a diving computer; Sieber, A.; Anmeldedatum: 13.09.2011
- [46]Smith, A.L.: The Analytical Chemistry of Silicones; 112; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA; 1991; New York
- [47]Suunto; <http://www.suunto.com/de-AT/Sportuhr-Kollektionen/SUUNTO-EON-STEEL/>; abgerufen am 02.11.2014
- [48]Thallinger, F.: Praktikum zur Werkstoffprüfung der Kunststoffe WS2013-2014, Werkstoffauswahl; Protokoll; 23.11.2013
- [49]TLC Elektronik: 3M/MicroTouch Touchscrees resistiv; [http://www.tlc-elektronik.de/ts\\_info\\_res.html](http://www.tlc-elektronik.de/ts_info_res.html) ; abgerufen am 26.10.2014
- [50]Vobster Marine Systems <http://www.vmsrebreathers.com/sentinel.php#SECTION003>; abgerufen am 02.11.2014

# 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Viskosität und Kettenlänge von Silikonölen [6]	Seite14
Tabelle 2: Oberflächenenergie verschiedener Kunststoffe [8]	Seite 16
Tabelle 3: Überblick über die gängigen thermischen Analyseverfahren [13]	Seite 24
Tabelle 4: Überblick der Anforderungen an die Komponenten des Tauchcomputers	Seite 36
Tabelle 5: Auswahlkriterien im CES	Seite 45
Tabelle 6: Spezifische Auswahlkriterien der 17 gefundenen Materialien	Seite 48
Tabelle 7: Anwendungen, Produktnamen und Hersteller der ausgewählten Materialien	Seite 49
Tabelle 8: Übersicht der Lagerungsversuche von Terostat bei Raumtemperatur	Seite 55
Tabelle 9: Lagerungsbedingungen und Masseänderung der Testserie bei erhöhten Temperaturen	Seite 56
Tabelle 10: Extrahierte Anteile im Überblick	Seite 58
Tabelle 11: Parameter und Peripherie der GC/ MS	Seite 59
Tabelle 12: Maschinenparameter zur TGA Untersuchung	Seite 63
Tabelle 13: Übersicht der einzubauenden Komponenten	Seite 68
Tabelle 14: Auswertung der Breite der Unterarme	Seite 72
Tabelle 15: Deformations- und Verzugsergebnisse der Vorderseite von Gehäusedesign 1	Seite 78
Tabelle 16: Deformations- und Verzugsergebnisse der Rückseite von Gehäusedesign 1	Seite 80
Tabelle 17: Deformations- und Verzugsergebnisse der Vorderseite von Gehäusedesign 2	Seite 82
Tabelle 18: Deformations- und Verzugsergebnisse der Rückseite von Gehäusedesign 2	Seite 86
Tabelle 19: Vergleich der Z-Komponente von Vorderseite und Rückseite im Bezug auf die Deformation und den Verzug	Seite 87
Tabelle 20: Vergleich der Schließkraft beider Gehäusehälften	Seite 88

# 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau eines resistiven Touchpanels [24]	Seite 4
Abbildung 2: Kanäle des 4-wire resistiven Touchpanels [24]	Seite4
Abbildung 3: Auswertung einer Koordinate beim 4-wire resistiven Touchpanel [24]	Seite 5
Abbildung 4: Aufbau eines 5-wire resistiven Touchpanels [24]	Seite 6
Abbildung 5: Funktionsweise eines kapazitiven Touchpanels [24]	Seite 7
Abbildung 6: Kondensatorprinzip der kapazitiven Touchpanels [17]	Seite 7
Abbildung 7: kationische Polymerisation von Butylkautschuk [39]	Seite 9
Abbildung 8: Temperaturabhängiger Vergleich der Rückprallelastizität von IIR mit anderen Elastomeren [39]	Seite 10
Abbildung 9: Herstellung von elementarem Silizium [11]	Seite 11
Abbildung 10: Müller-Rochow Synthese [11]	Seite 12
Abbildung 11: Produkte der Müller-Rochow Synthese (Angaben in %) [11]	Seite 12
Abbildung 12: Hydrolyse von Dimethyldichlorsilan [11]	Seite 13
Abbildung 13: Grundstruktur der Silikonöle [11]	Seite 13
Abbildung 14: Benetzungswinkel beim Kleben [9]	Seite 15
Abbildung 15: Funktionsweise des Plasmaprozesses [42]	Seite 17
Abbildung 16: Durchflussextraktor; Soxhlet-Extraktor; Halbmikroextraktor[5,12]	Seite 18
Abbildung 17: Aufbau eines Gas- Chromatographen [44]	Seite 20
Abbildung 18: Septumsinjektion für die Untersuchung von Flüssigkeiten [44]	Seite 20
Abbildung 19: Links oben: gepackte Trennsäule, unten & rechts oben: verschiedene Kapillartrennsäulen [44]	Seite 21
Abbildung 20: Unterschiede in der Auflösung zwischen Kapillarsäule und gepackter Säule [44]	Seite 22
Abbildung 21: Aufbau eines FID Detektors [44]	Seite 23
Abbildung 22: Eluationstechnik zur Erstellung eines Chromatogramms [32]	Seite 24
Abbildung 23: Aufbau einer TGA Apparatur: Links: schematisch; rechts: TGA-Gerät der Fa. TA Instruments, USA [16, 19]	Seite 26
Abbildung 24: TGA Kurve mit konstanter Heizrate [16]	Seite 26
Abbildung 25: TGA Kurven unterschiedlicher Polyamide [16]	Seite 27
Abbildung 26: Produktion an Megatonnen Kunststoff weltweit und im europäischen Raum bis 2011 [38]	Seite 28

## 9. Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 27: Unterschiedliche Strömungsarten in einem Spritzgussteil [14]	Seite 30
Abbildung 28: Verarbeitungsparameter mit Auswirkung auf das Schwindungsverhalten von Kunststoffen [15]	Seite 32
Abbildung 29: Komponenten des Tauchcomputers [45]	Seite 34
Abbildung 30: links: Befüllungsvorgang mit Nadel; rechts: Detailansicht, Nadeleinstich	Seite 39
Abbildung 31: Angebot für ein 3,5" Display mit 4 Öffnungen von der Firma EA	Seite 41
Abbildung 32: Luftblase bei ersten Touchpanels mit Befüllungsöffnung	Seite 42
Abbildung 33: Mikroskopaufnahme der Befüllungsöffnung; links: rechts unten; rechts: links oben	Seite 43
Abbildung 34: Mikroskopaufnahme der Befüllungsöffnung der neuen Touchpanel	Seite 43
Abbildung 35: Befüllung mit Silikonöl Elbesil B20; Vergleich altes und neues Touchpanel	Seite 44
Abbildung 36: Verhältnis von UV-Stabilität zu Preis [6]	Seite 48
Abbildung 37: Verhältnis von E-Modul zu Preis [6]	Seite 48
Abbildung 38: System der Touchpanelverklebung von Delo [8]	Seite 51
Abbildung 39: Kartusche des Loctite SI 5970 der Firma Henkel	Seite 53
Abbildung 40: Terostat 81 <sup>®</sup> von der Firma Henkel	Seite 53
Abbildung 41: Lagerung des Terostat 81 <sup>®</sup> in Silikonöl	Seite 55
Abbildung 42: Chromatogramme der Extraktionen	Seite 61
Abbildung 43: Chromatogramme der Extraktionen im Bereich von 6 min bis 11 min	Seite 62
Abbildung 44: Chromatogramme der Silikonöle	Seite 63
Abbildung 45: Masseverlustkurven der TGA Untersuchung	Seite 65
Abbildung 46: Vergleich der Mittelwerte der TGA Untersuchungen	Seite 66
Abbildung 47: links: Blick in die Vorderseite ohne Touchpanel; rechts: Blick in die Vorderseite mit Touchpanel	Seite 70
Abbildung 48: 3D- Darstellung der Verschraubung der Platine	Seite 70
Abbildung 49: Schnittdarstellung der Verschraubung der Platine	Seite 71
Abbildung 50: Designvariante mit Rundakku	Seite 71
Abbildung 51: Membran zur Abdichtung des Tauchcomputers	Seite 72

## 9. Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 52: 3D-Darstellung des Gehäusedesigns 1; links: Vorderseite; rechts: Rückseite	Seite 73
Abbildung 53: Gehäusedesign 1: links: Innenseite der Vorderseite; rechts: Innenseite der Rückseite	Seite 74
Abbildung 54: Schnittdarstellung von Gehäusedesign 1 mit erkennbaren Masseanhäufungen	Seite 74
Abbildung 55: Darstellung des Gehäusedesigns 2; links: vorne; rechts: hinten	Seite 75
Abbildung 56: Gehäusedesign 2: links: Innenseite der Vorderseite; rechts: Innenseite der Rückseite	Seite 76
Abbildung 57: Innenkontur der Rückseite des Gehäusedesigns 2 mit eingelegtem Akku	Seite 76
Abbildung 58: Schnittdarstellung des Gehäusedesigns 2	Seite 76
Abbildung 59: Anspritzung und Kühlungsdesign der Vorderseite von Gehäusedesign 1; links: 3D-Darstellung; rechts: seitliche Darstellung	Seite 78
Abbildung 60: Anspritzung und Kühlungsdesign der Rückseite von Gehäusedesign 1; links: 3D-Darstellung; rechts: seitliche Darstellung	Seite 80
Abbildung 61: maximale Entformungszeit der Rückseite von Gehäusedesign 1	Seite 81
Abbildung 62: Anspritzung und Kühlungsdesign der Vorderseite von Gehäusedesign 2 links: 3D-Darstellung; rechts: seitliche Darstellung	Seite 82
Abbildung 63: Vorderseite Gehäuse 2; links Druckverlauf; rechts Massezunahme	Seite 82
Abbildung 64: Momentaufnahme: Füllstand von 98 % der Vorderseite von Gehäusedesign 2	Seite 83
Abbildung 65: Einfallstellenreduktion durch Veränderung der Anspritzung bei der Rückseite von Gehäusedesign 2; links: zentrale Anspritzung; rechts: zwei Anspritzpunkte	Seite 84
Abbildung 66: Momentaufnahme während der Füllung der Rückseite von Gehäusedesign 2	Seite 85
Abbildung 67: Rückseite Gehäuse 2; links Druckverlauf; rechts Massezunahme	Seite 85
Abbildung 68: links, Design 1 mit Platz für ein Schieberelement; rechts, Design 2	Seite 86
Abbildung 69: Z-Deformation der Gehäusehälften	Seite 88
Abbildung 70: Z-Verzug beim Zusammenbau der Komponenten	Seite 88
Abbildung 71: Anguss und Kühlung der gemeinsamen Simulation	Seite 90

## 9. Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 72: Tauchcomputer in dem prototypenfähigen Design; links:  
Vorderseite; rechts:Rückseite

Seite 91

## 10 Anhang

### 10.1 Extraktionsmessungen

	Probe 1	
	Messung 1	Messung 2
Filter (g)	0,9916	0,998
EW Probe (g)	0,6494	0,6692
Probe+Filter (g)	1,641	1,6672
Auswaage (g)	1,6299	1,656
extrahierbare Anteile	1,71%	1,67%
Mittelwert	1,69%	

	Probe 2	
	Messung 1	Messung 2
Filter (g)	0,9954	1,0052
EW Probe (g)	0,7163	0,62
Probe+Filter (g)	1,7117	1,6252
Auswaage (g)	1,6996	1,6149
extrahierbare Anteile	1,69%	1,66%
Mittelwert	1,68%	

	Probe 3	
	Messung 1	Messung 2
Filter (g)	1,0097	1,0179
EW Probe (g)	0,6026	0,6118
Probe+Filter (g)	1,6123	1,6297
Auswaage (g)	1,5987	1,6154
extrahierbare Anteile	2,26%	2,34%
Mittelwert	2,30%	

	Probe 4	
	Messung 1	Messung 2
Filter (g)	0,9792	0,9735
EW Probe (g)	0,5999	0,6048
Probe+Filter (g)	1,5791	1,5783
Auswaage (g)	1,567	1,5655
extrahierbare Anteile	2,02%	2,12%
Mittelwert	2,07%	

## 10. Anhang

---

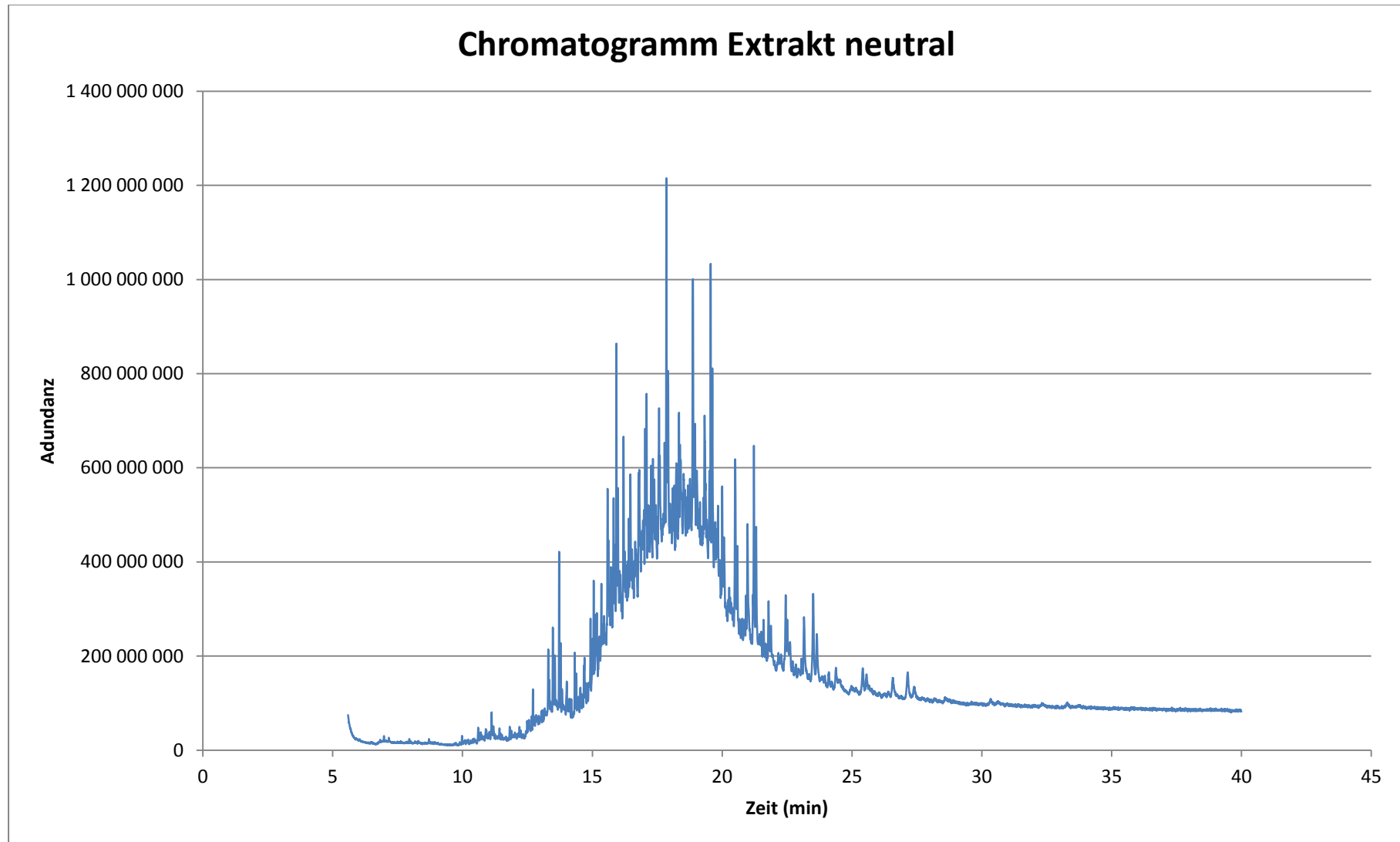
	Probe 5	
	Messung 1	Messung 2
Filter (g)	0,9975	0,9959
EW Probe (g)	0,675	0,7
Probe+Filter (g)	1,6725	1,6959
Auswaage (g)	1,6383	1,66
extrahierbare Anteile	5,07%	5,13%
Mittelwert	5,10%	

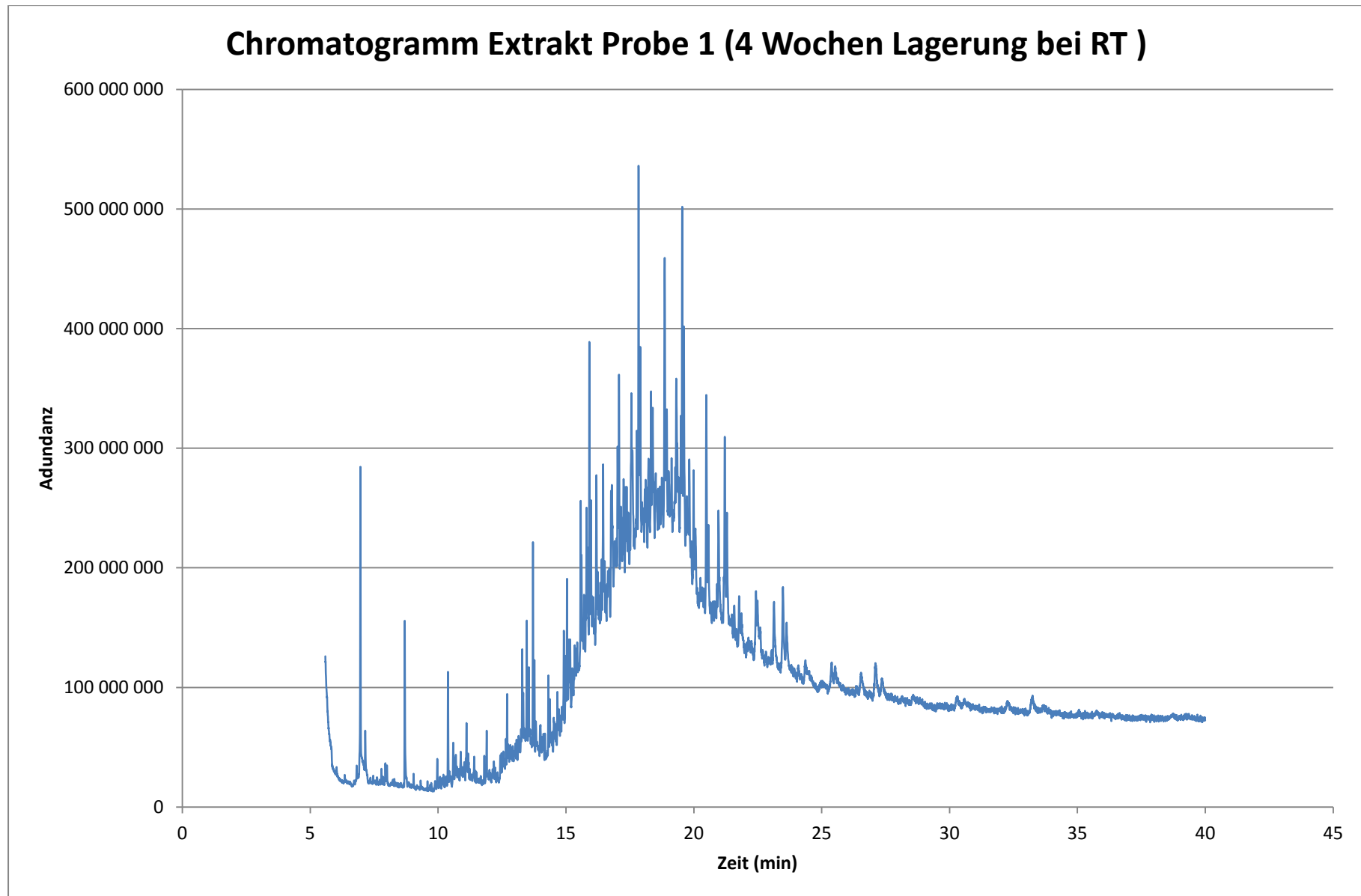
	Probe 6	
	Messung 1	Messung 2
Filter (g)	0,9974	1,0001
EW Probe (g)	0,7317	0,711
Probe+Filter (g)	1,7291	1,7111
Auswaage (g)	1,6916	1,6749
extrahierbare Anteile	5,13%	5,09%
Mittelwert	5,11%	

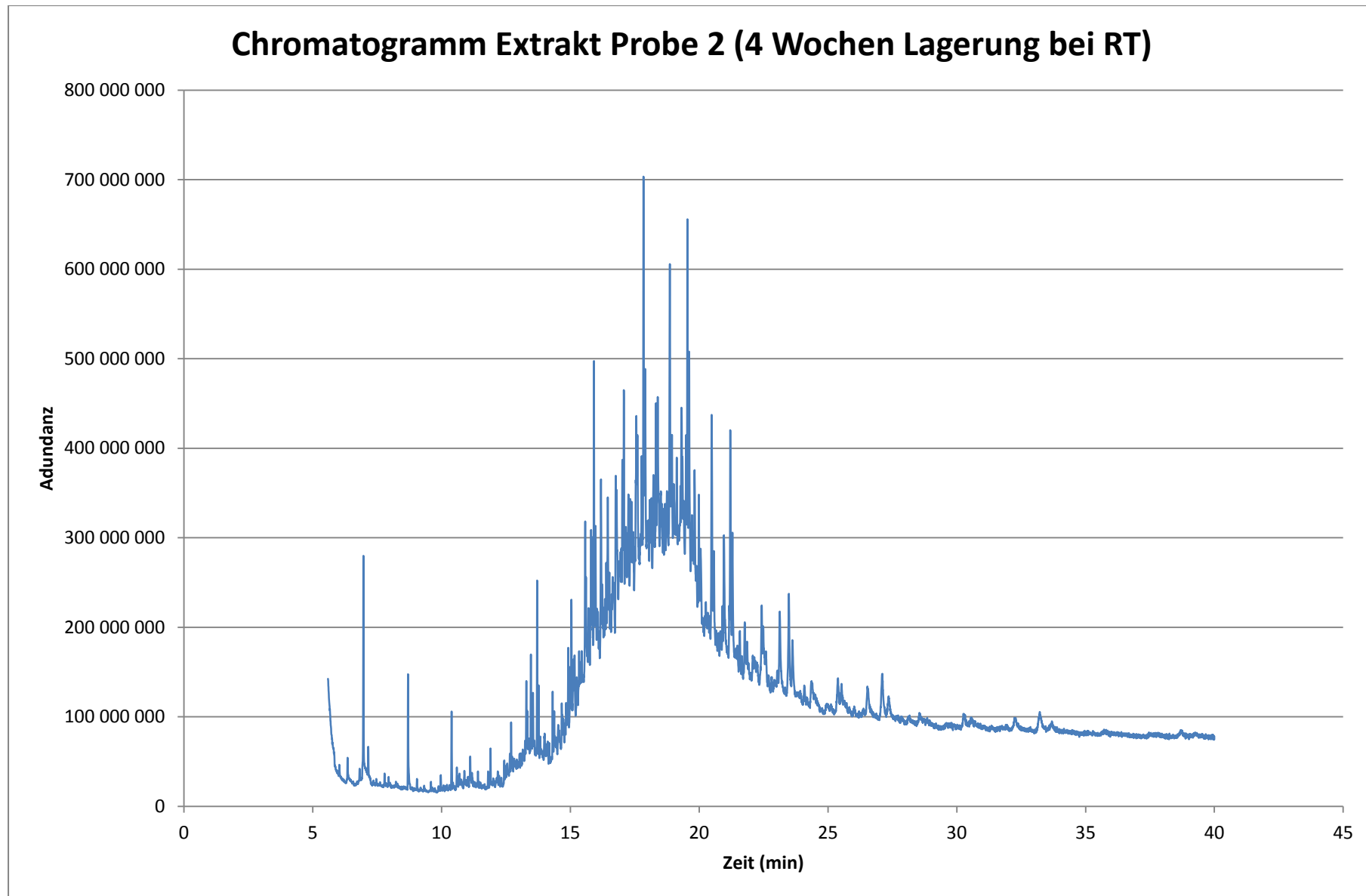
	Probe 7	
	Messung 1	Messung 2
Filter (g)	0,9983	0,9581
EW Probe (g)	0,6161	0,5934
Probe+Filter (g)	1,6144	1,5515
Auswaage (g)	1,6017	1,5382
extrahierbare Anteile	2,06%	2,24%
Mittelwert	2,15%	

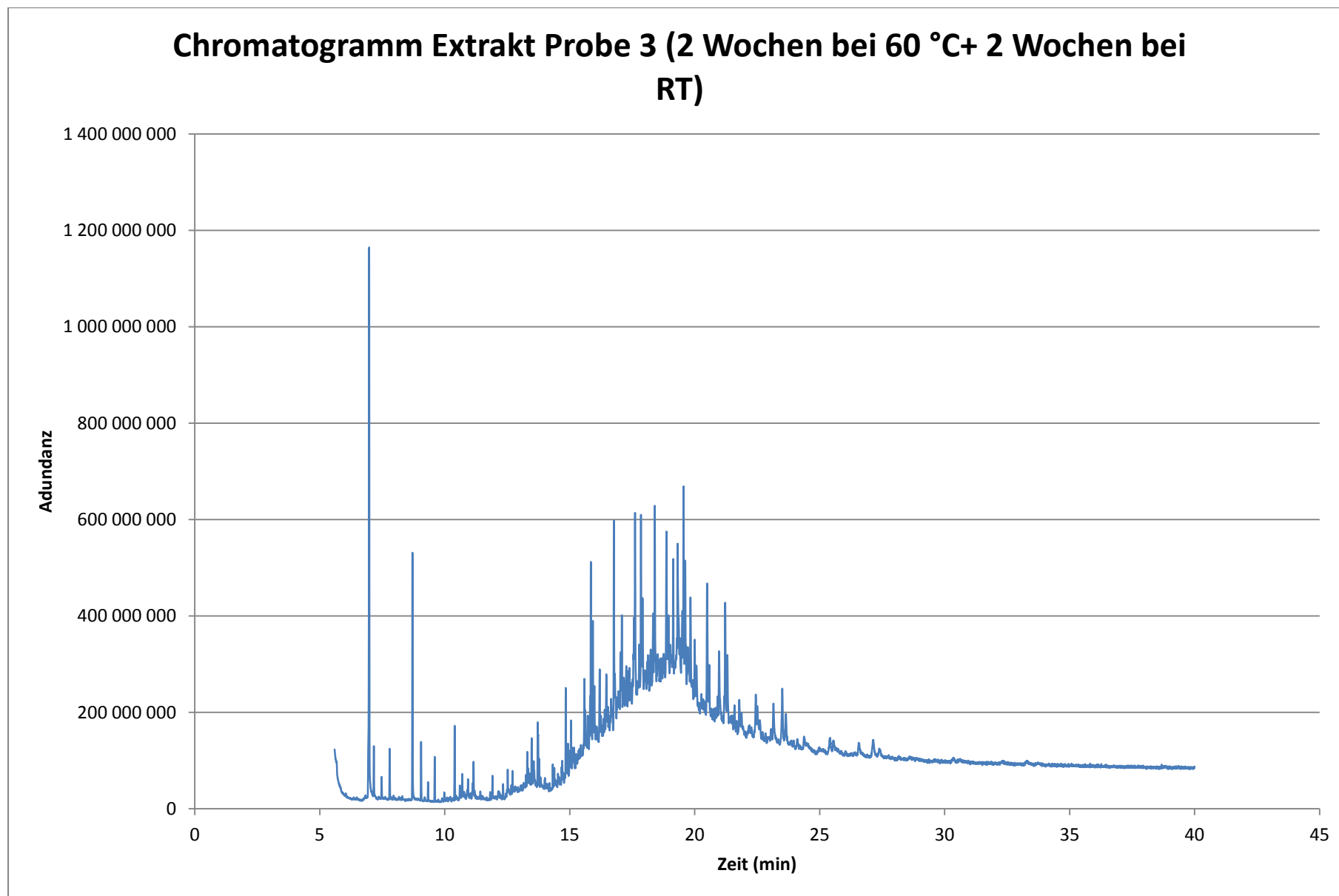


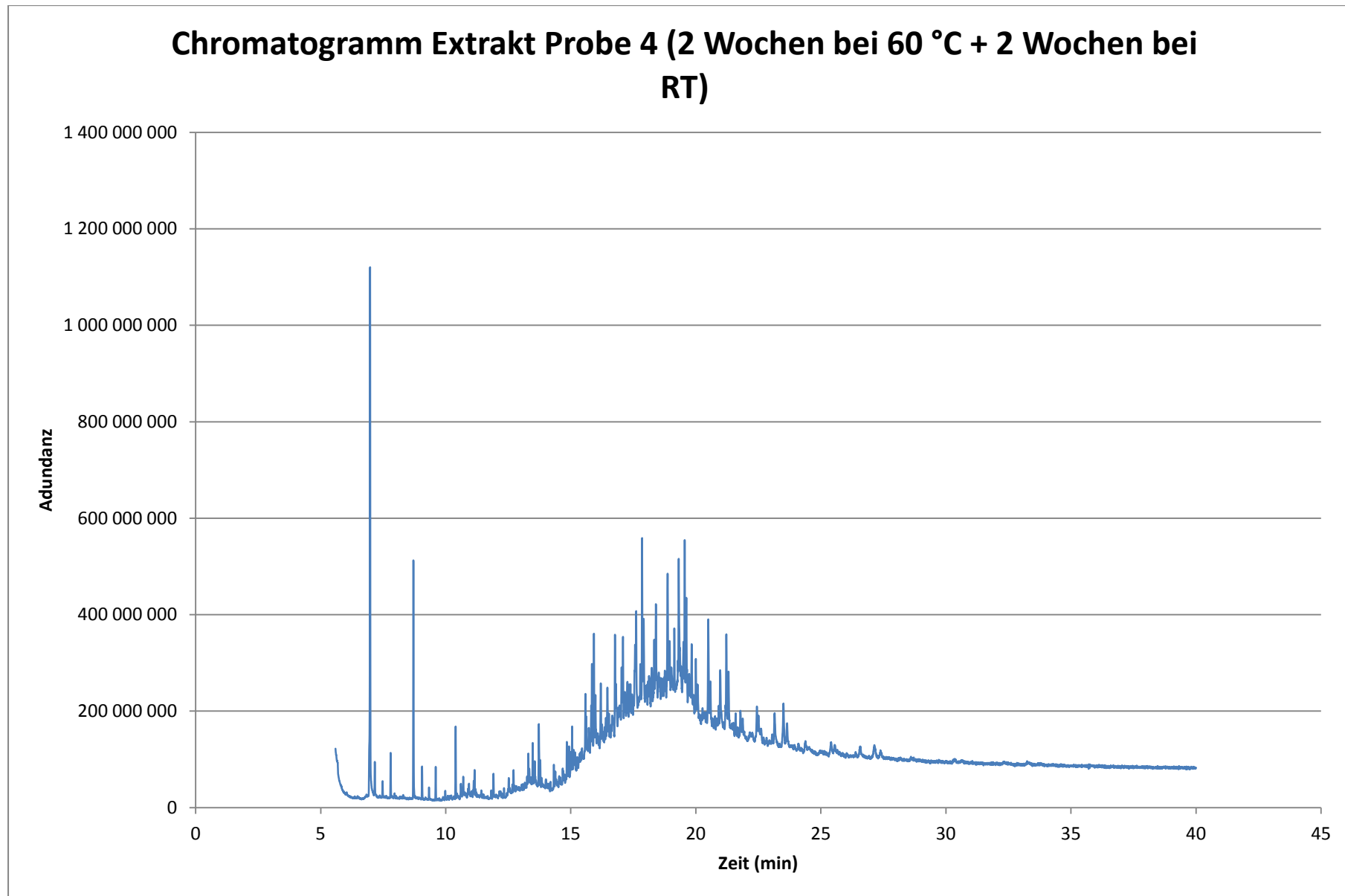
## 10.2 GC/MS Chromatogramme der Einzelmessungen

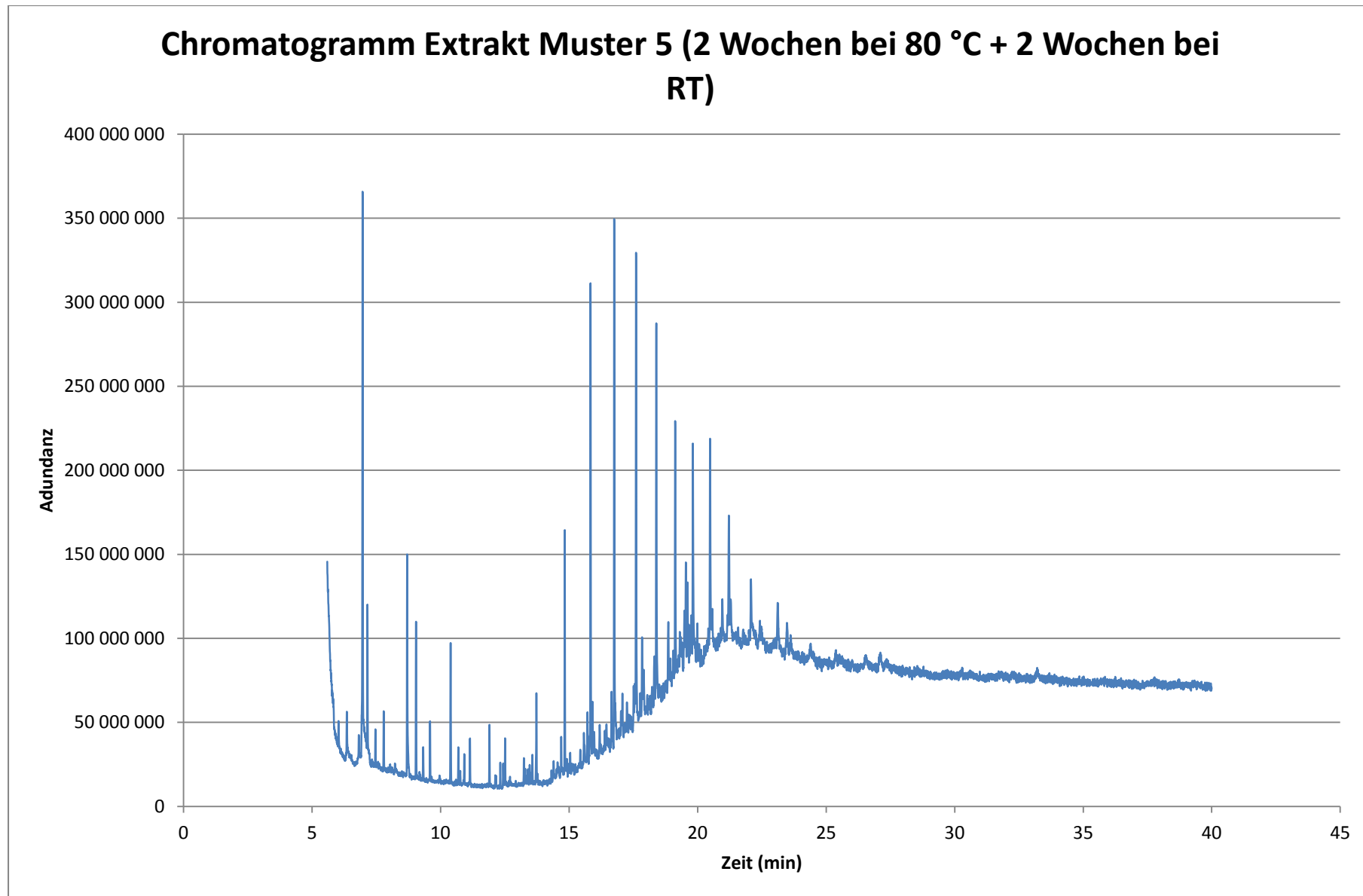


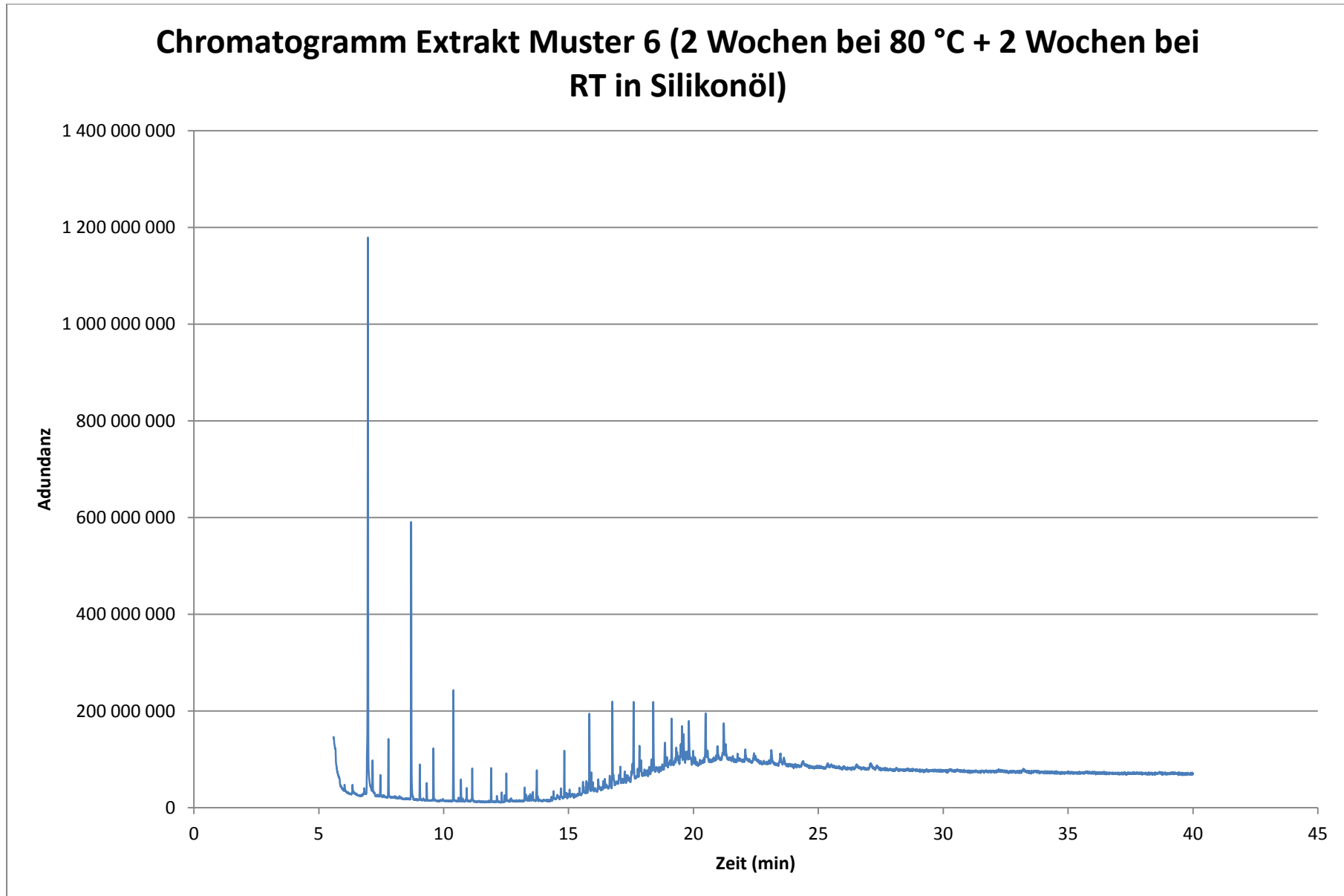


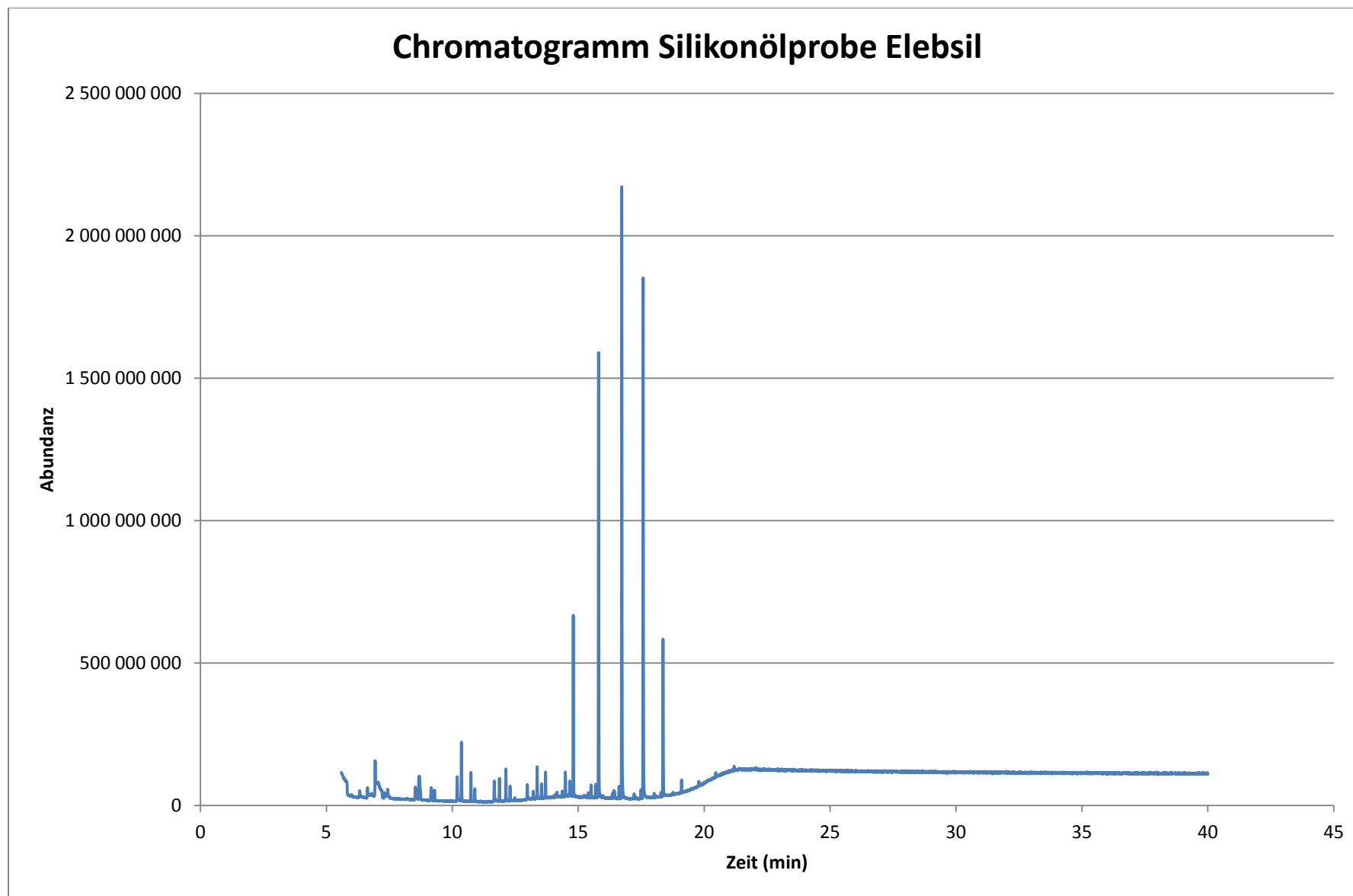




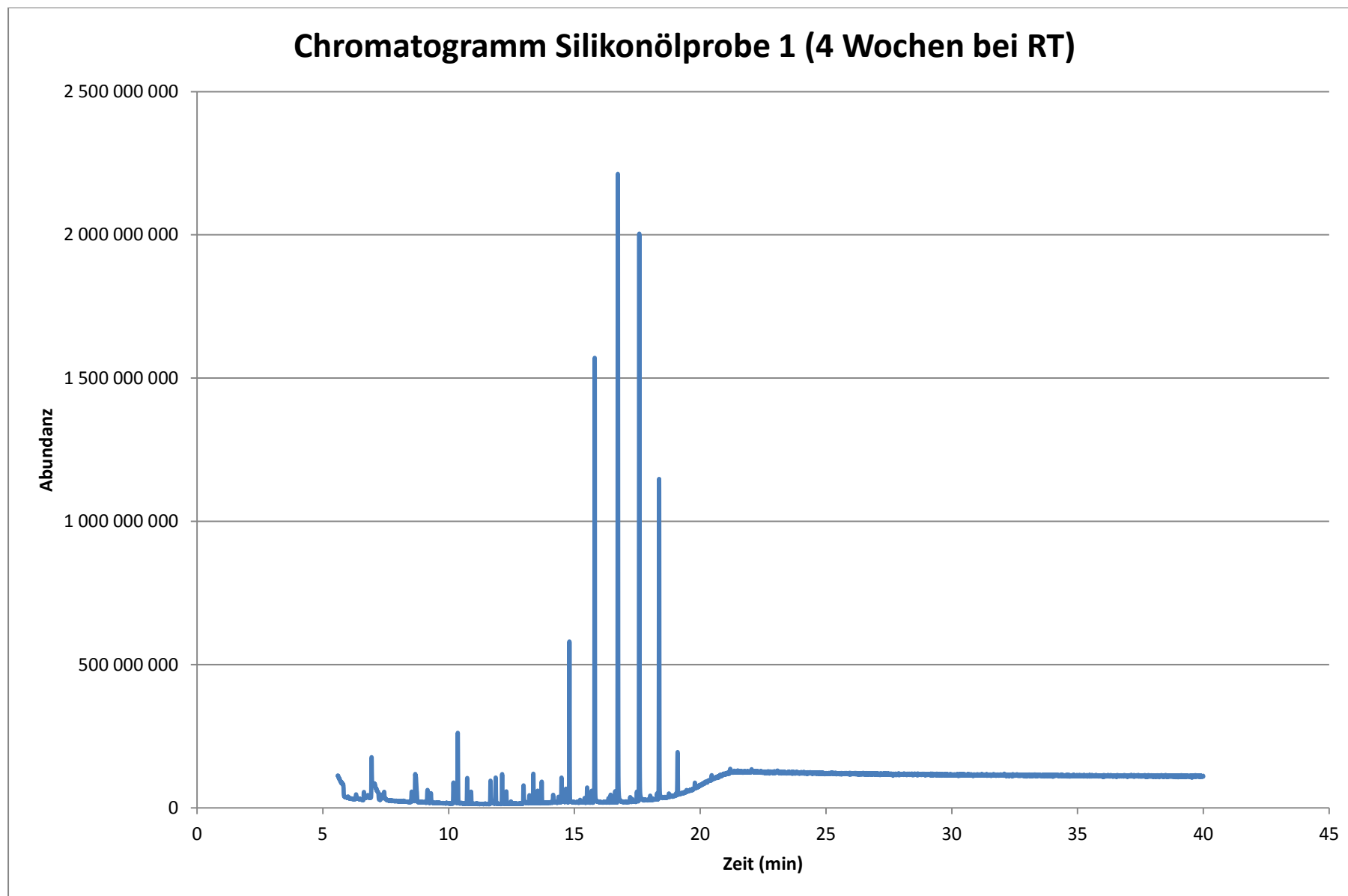


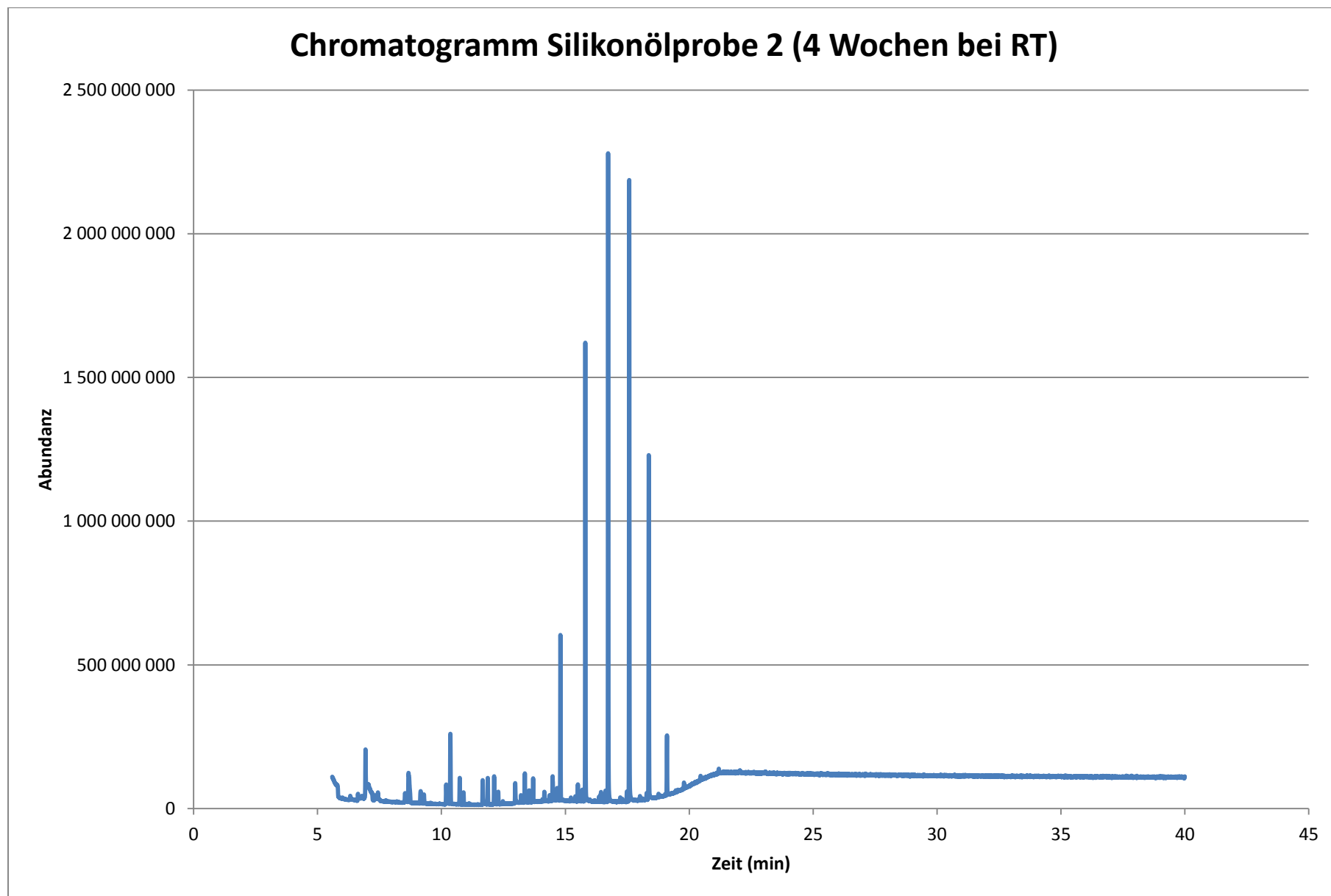


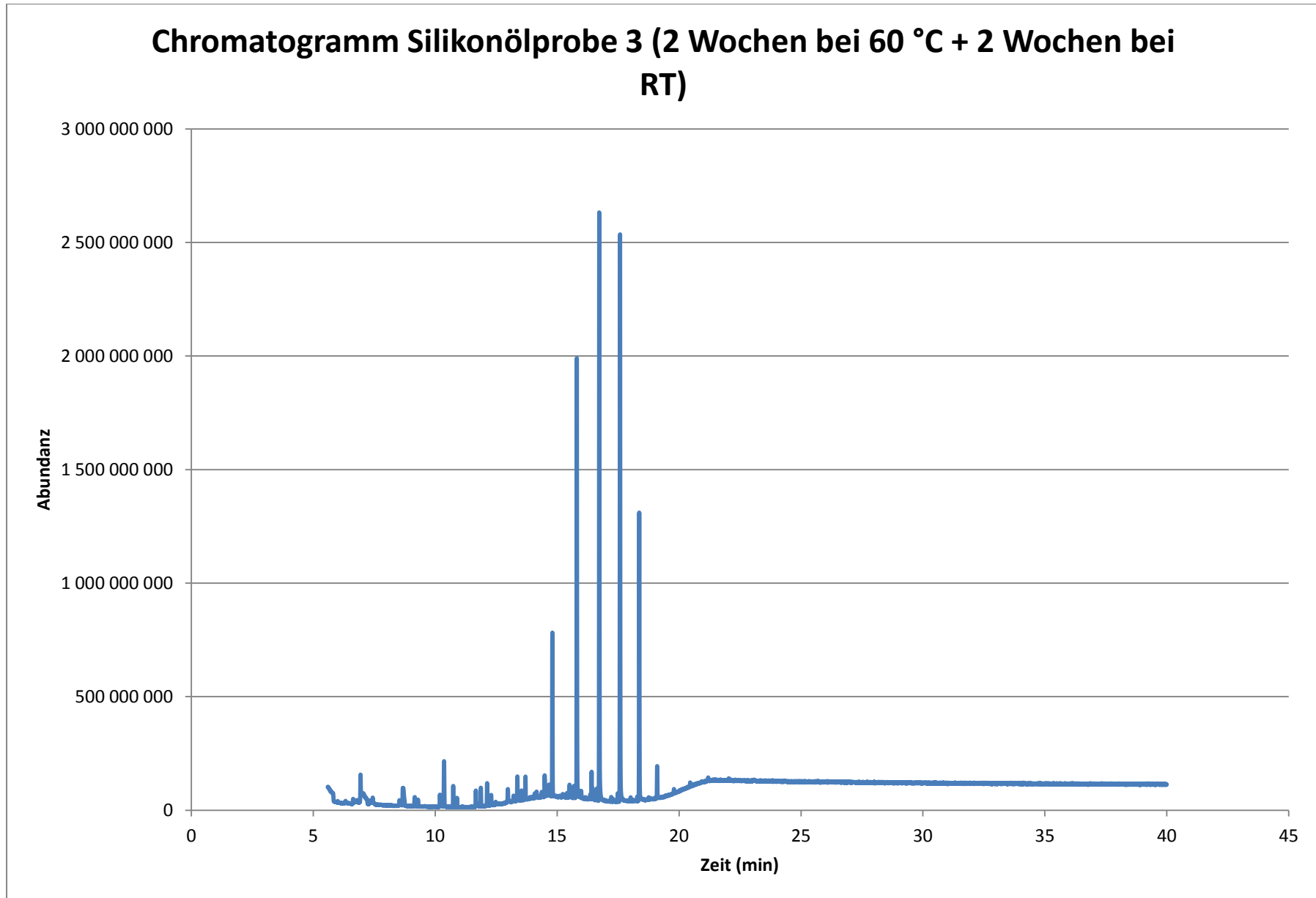


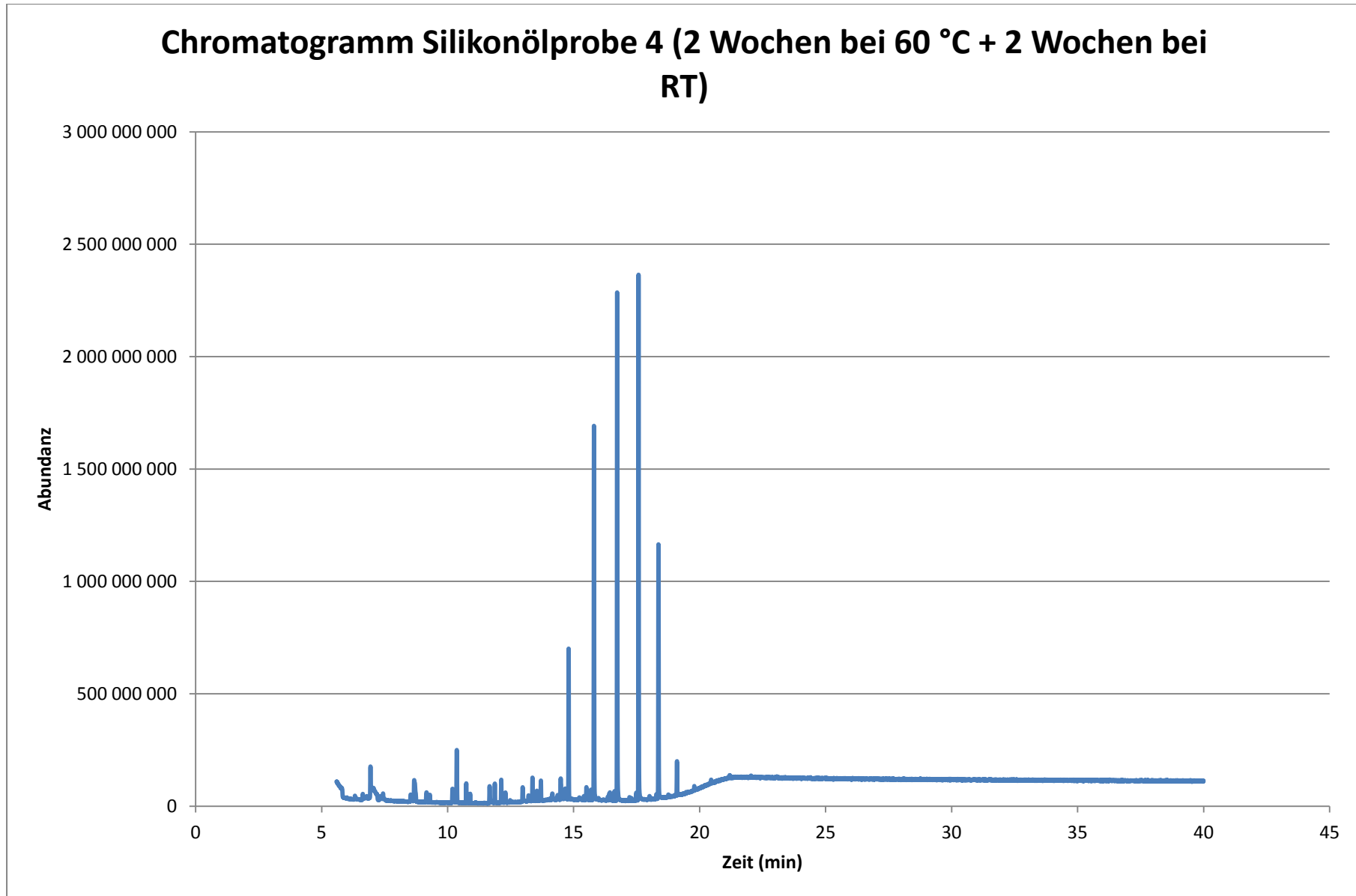


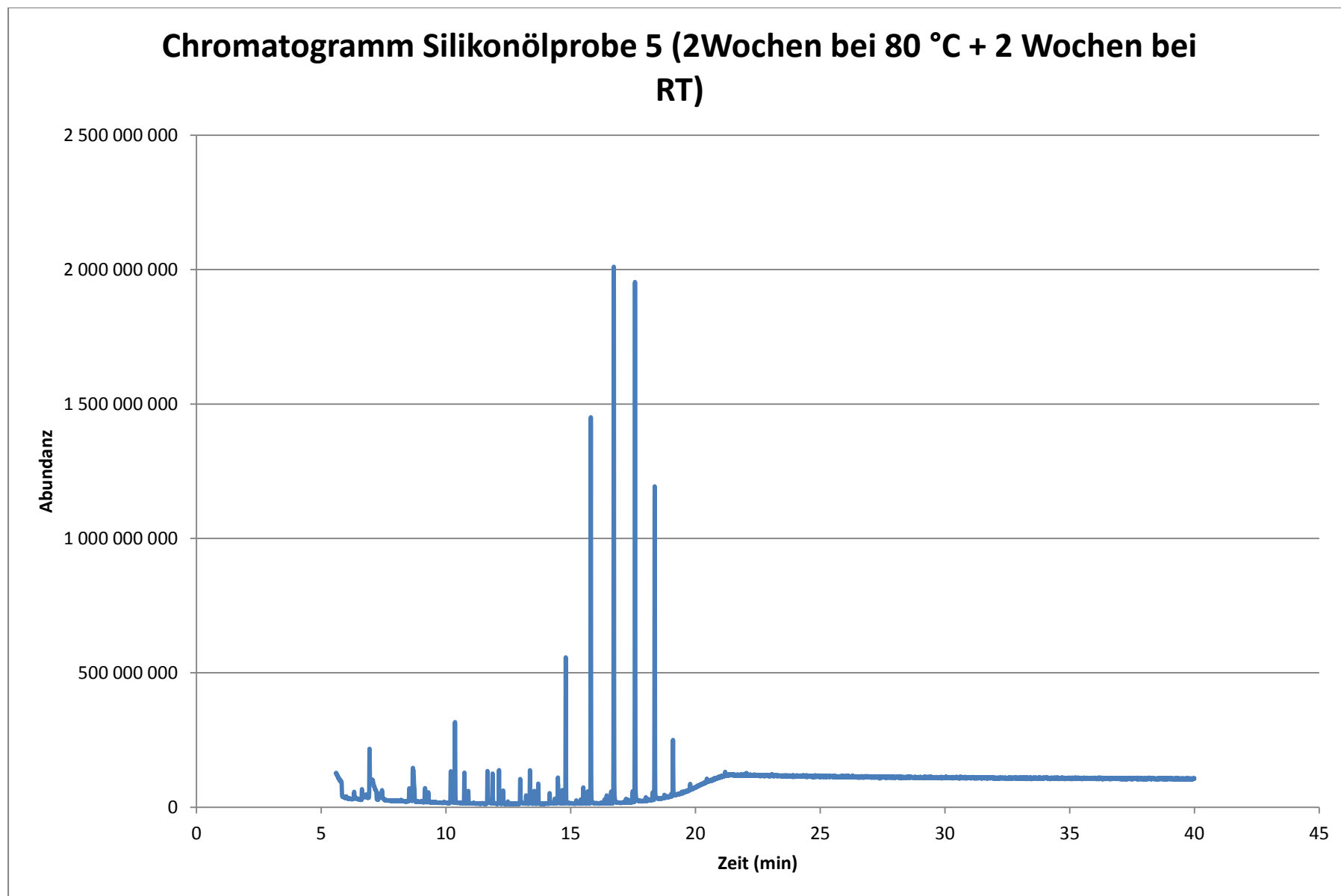


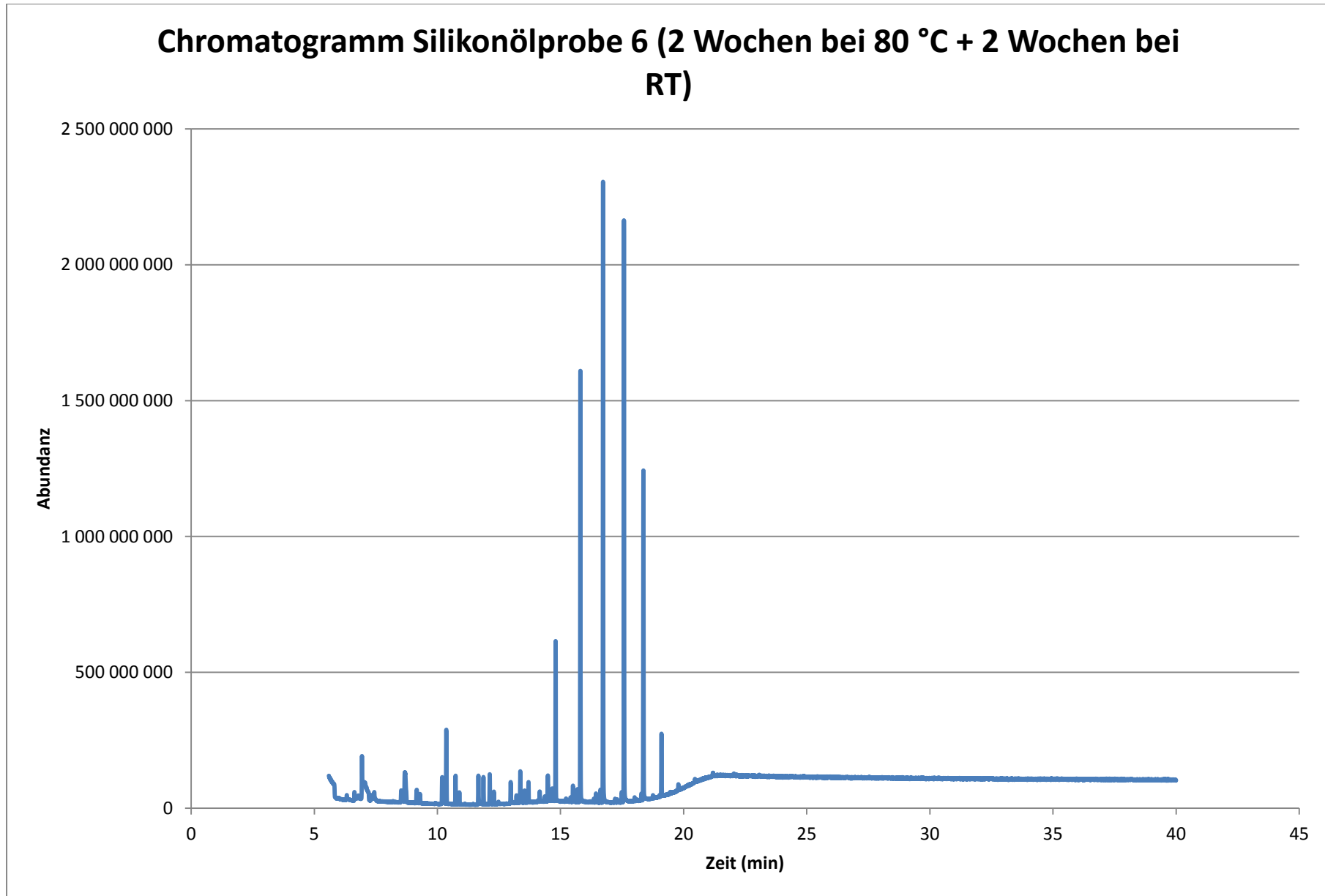




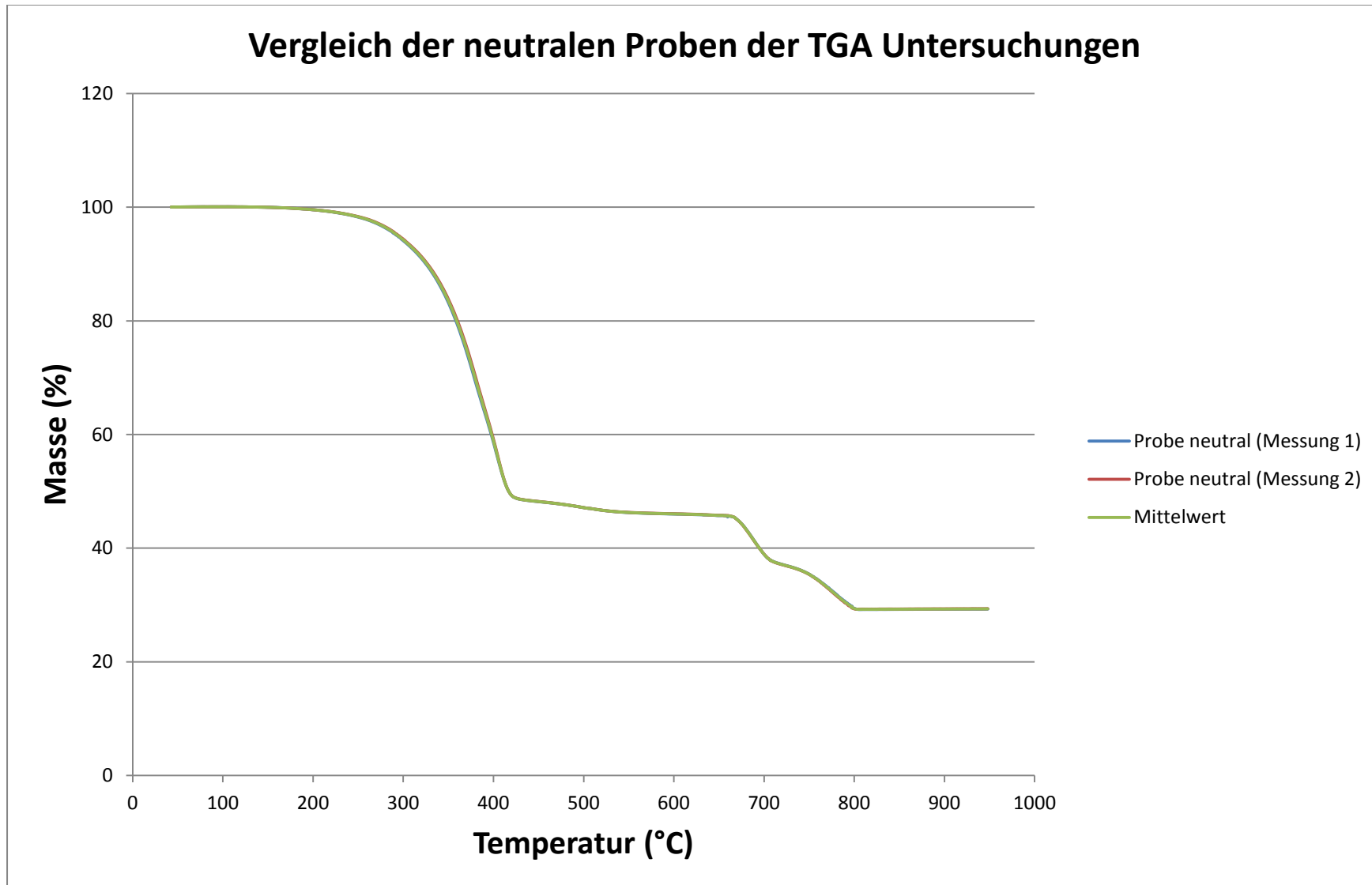


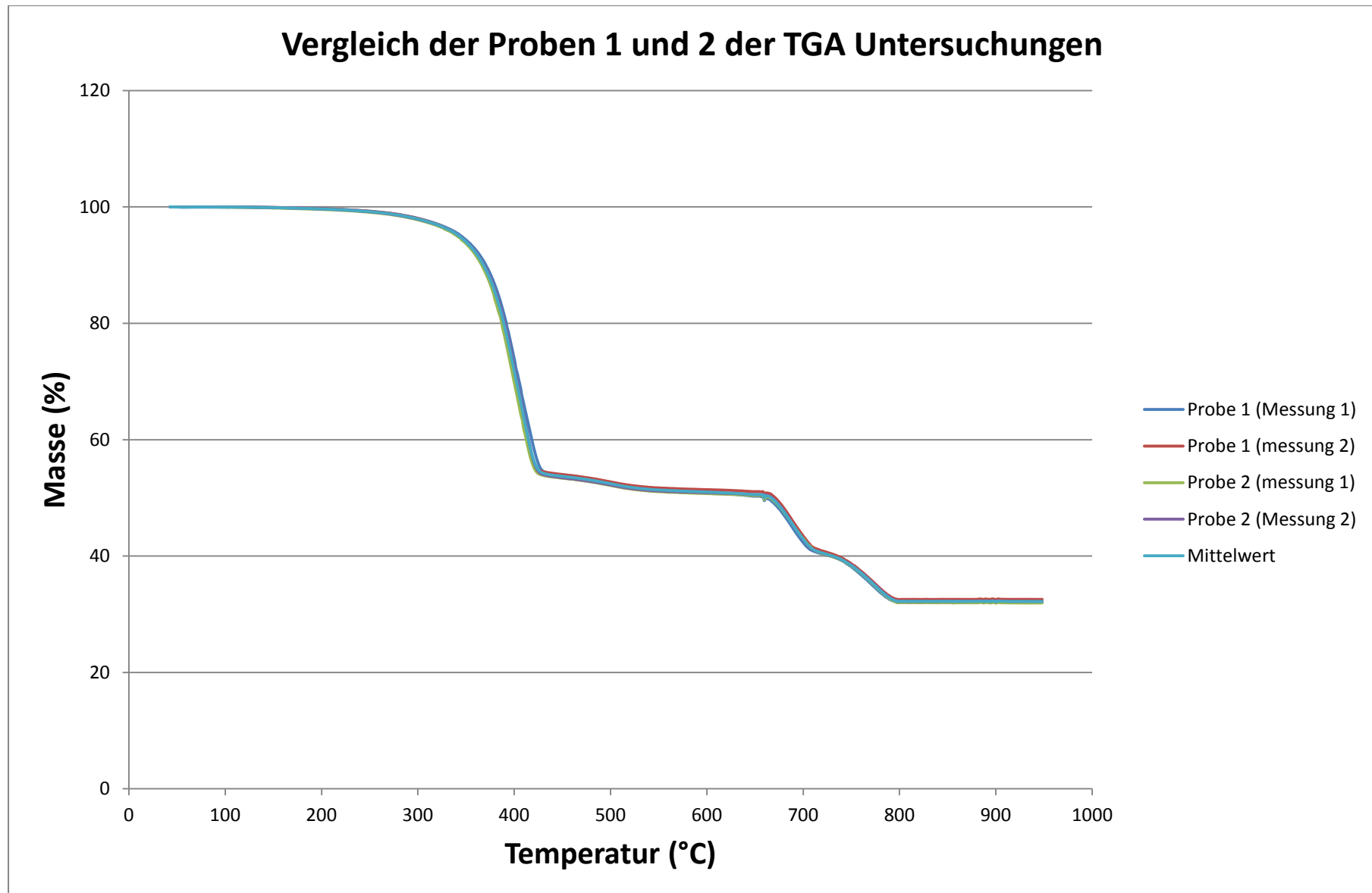




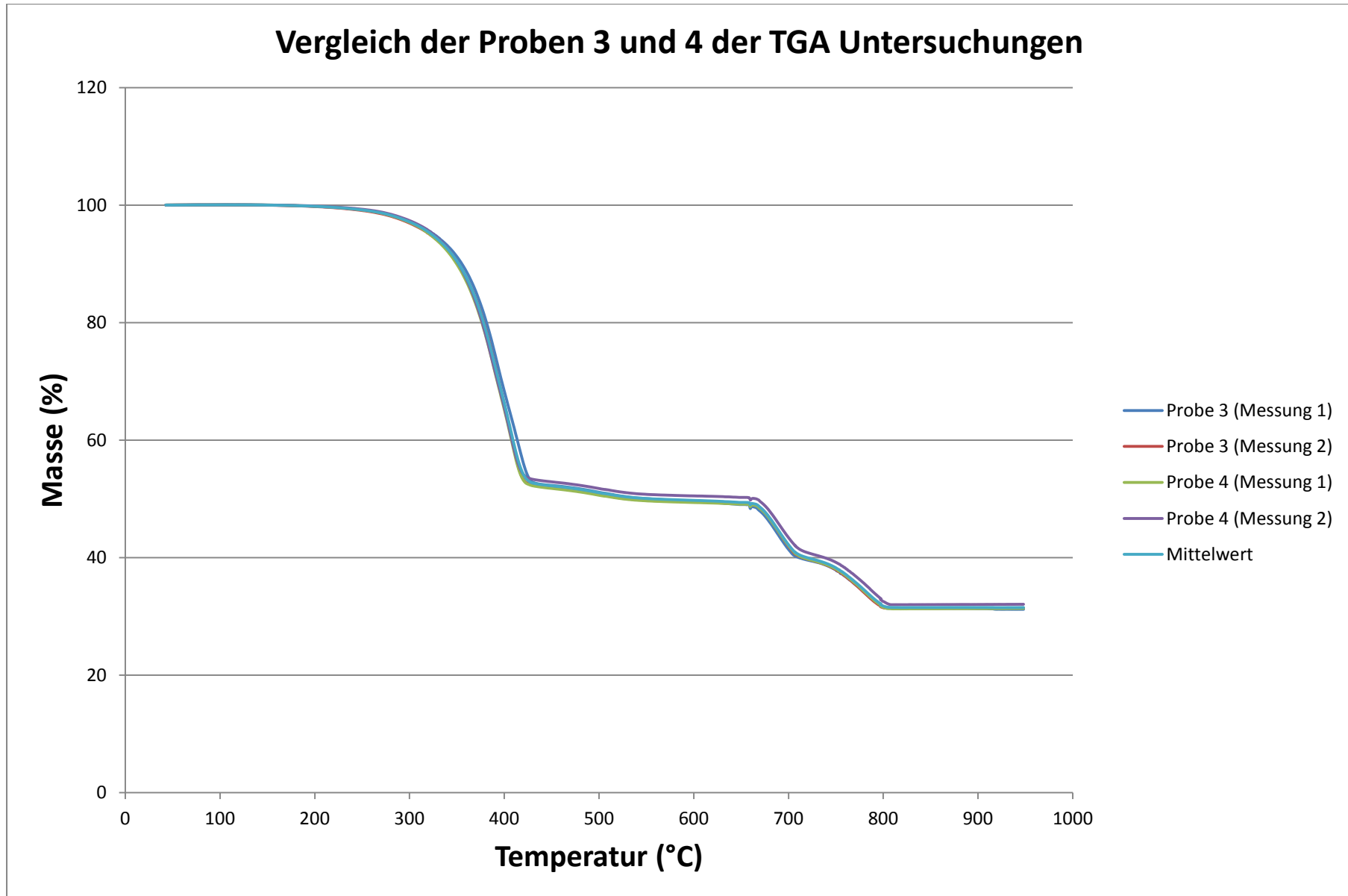


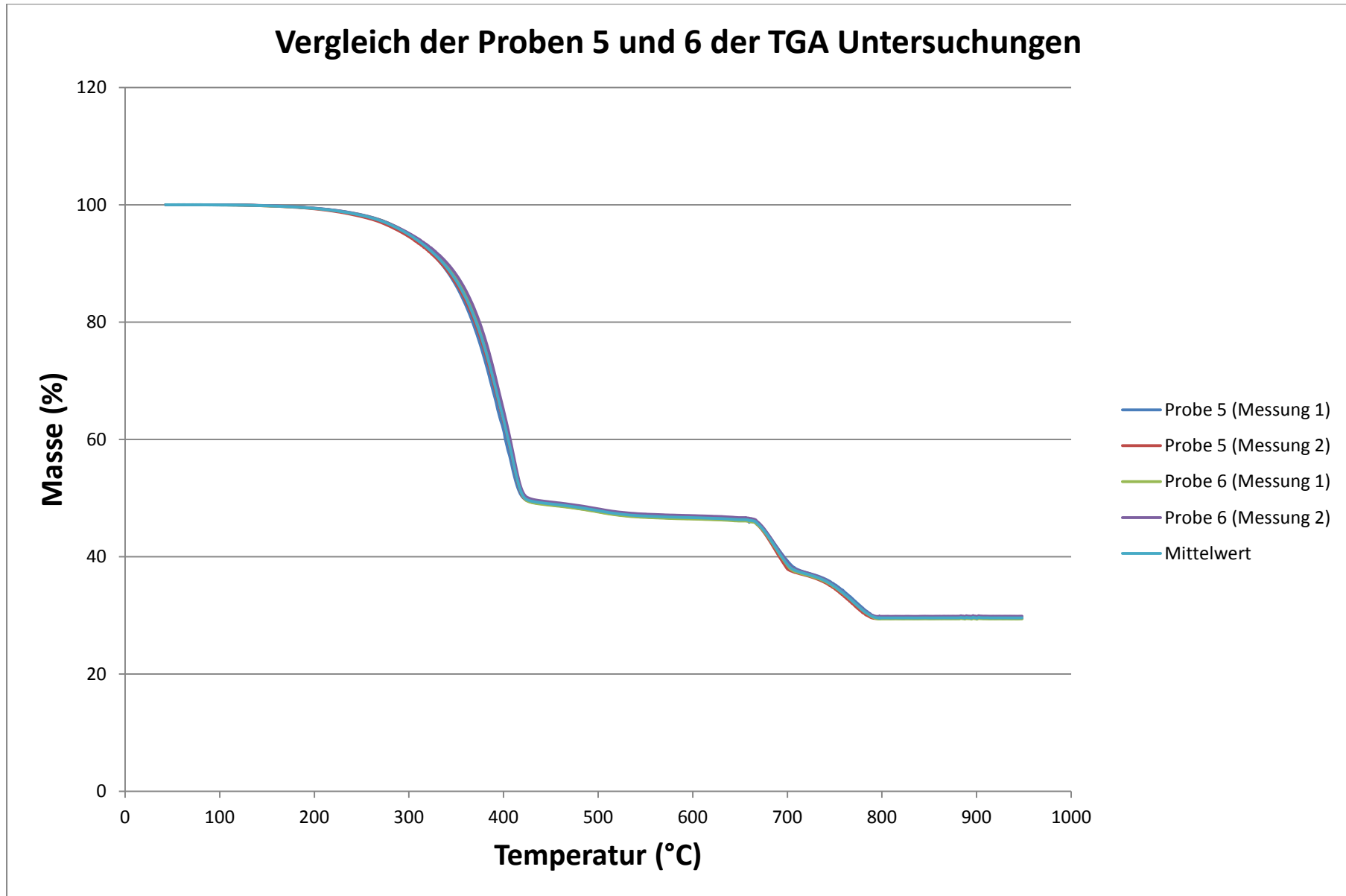
### 10.3 Masseverlustkurven der einzelnen TGA Untersuchungen



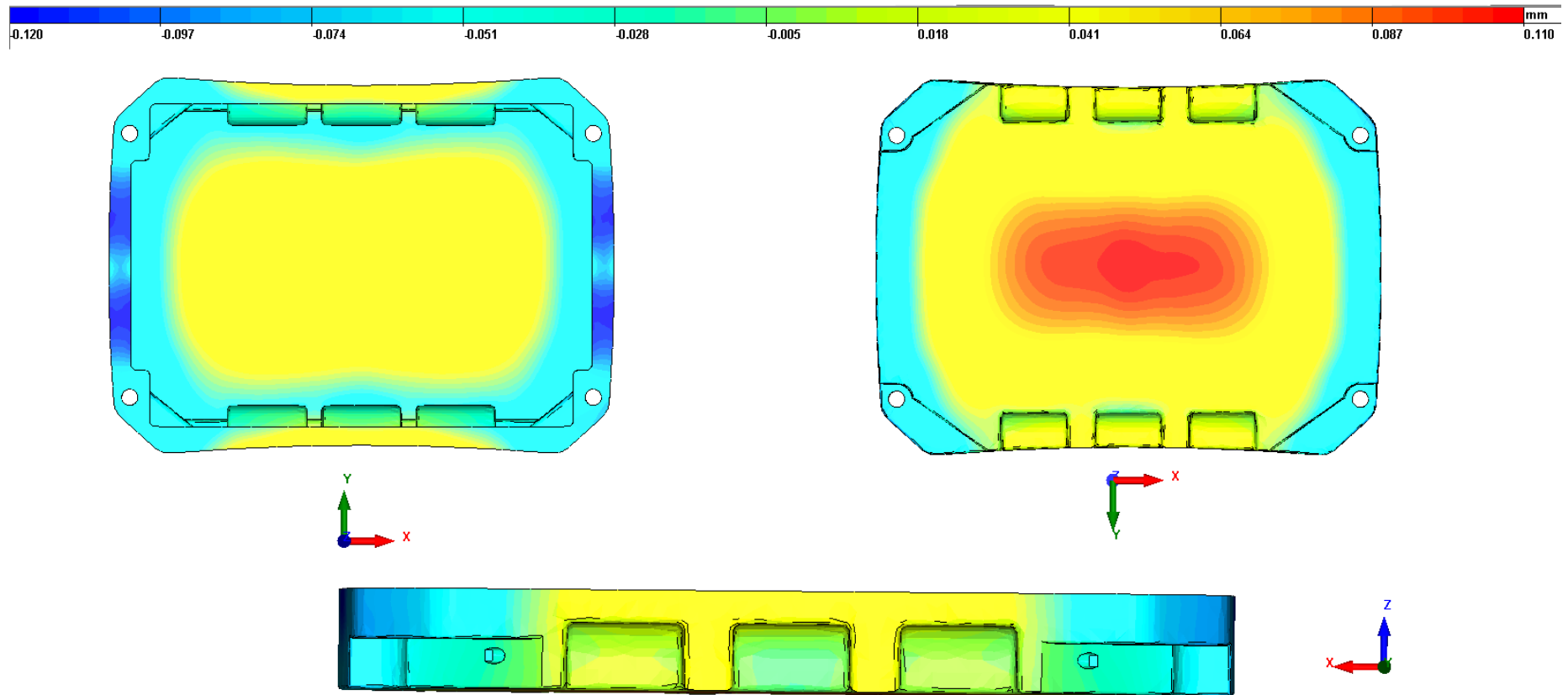






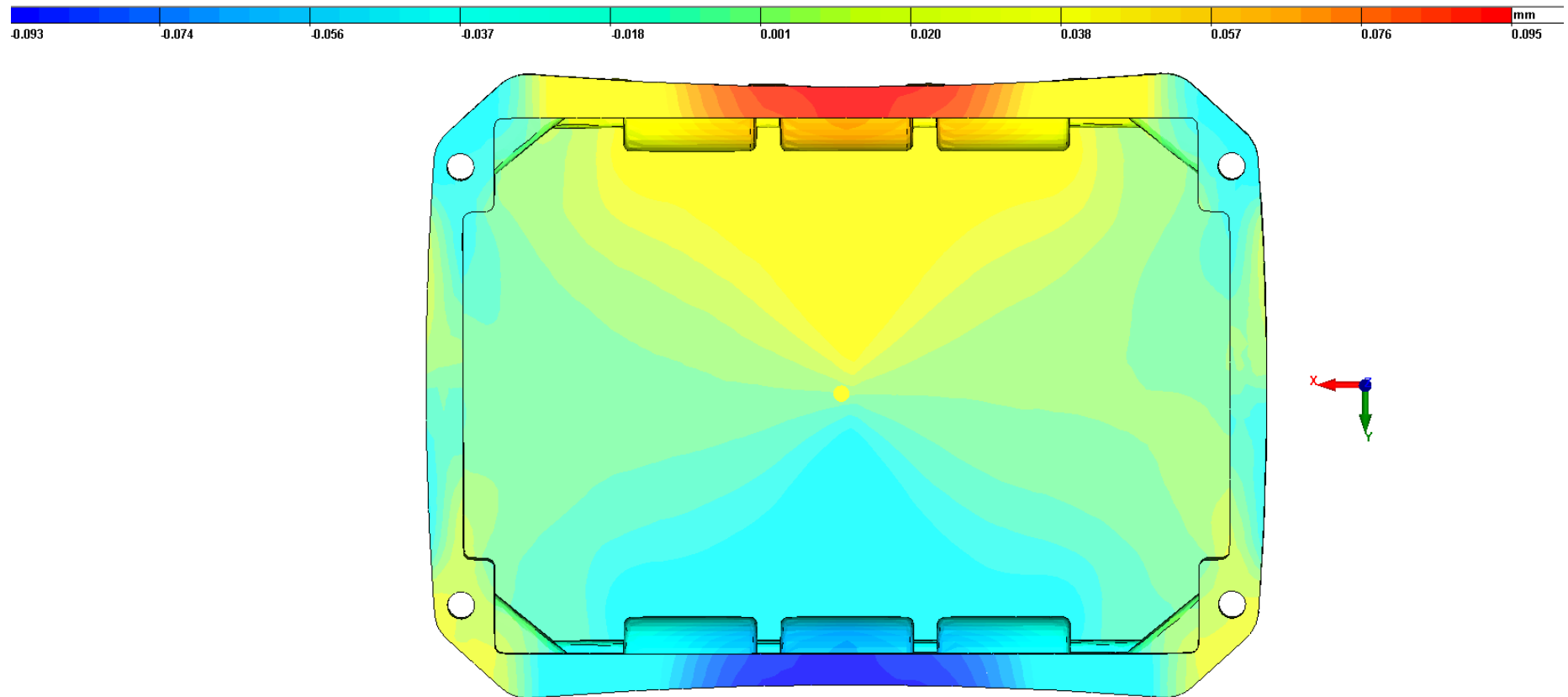


### 10.4 Verzugsresultate der Gehäusedesigns in den einzelnen Ebenen



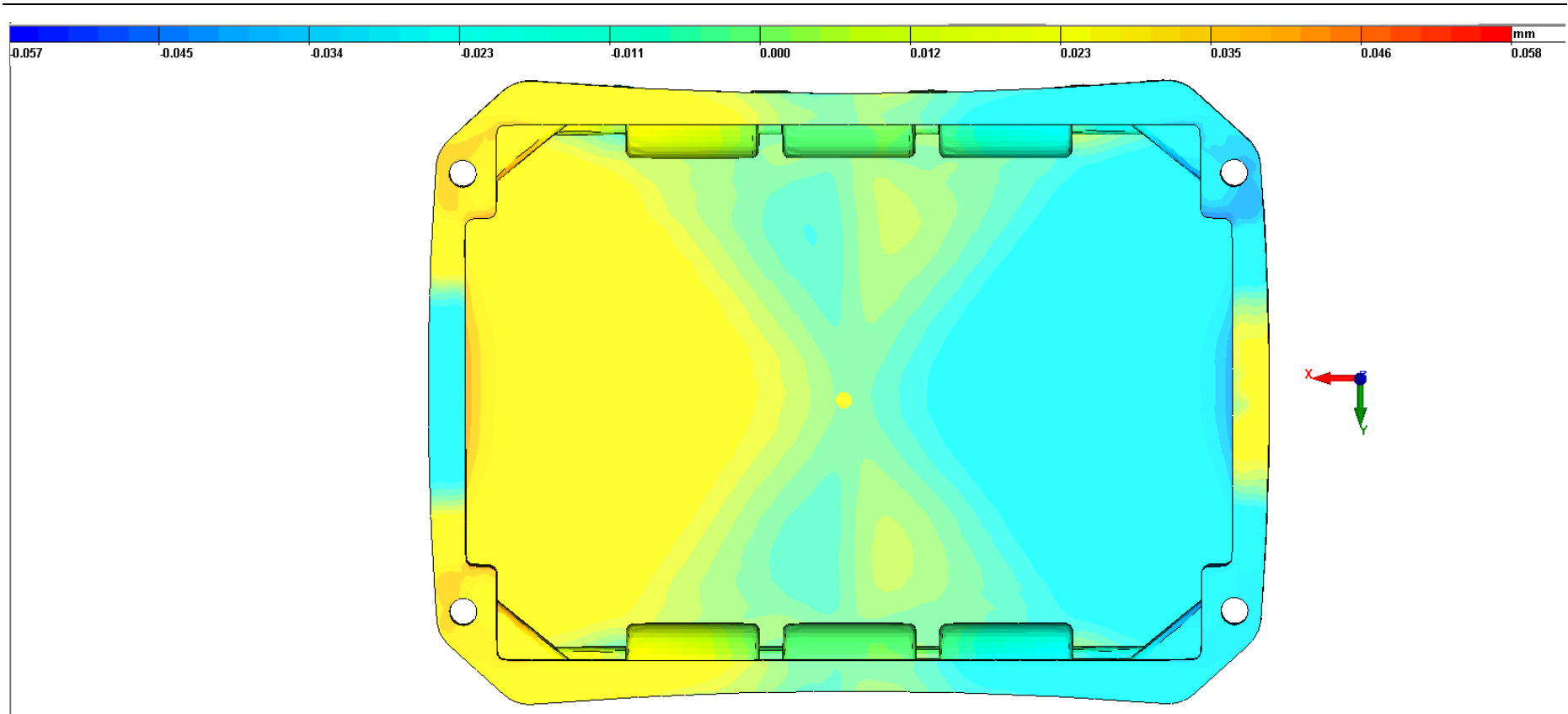
Z-Verzugsresultate der Rückseite von Gehäusedesign 2

## 10. Anhang



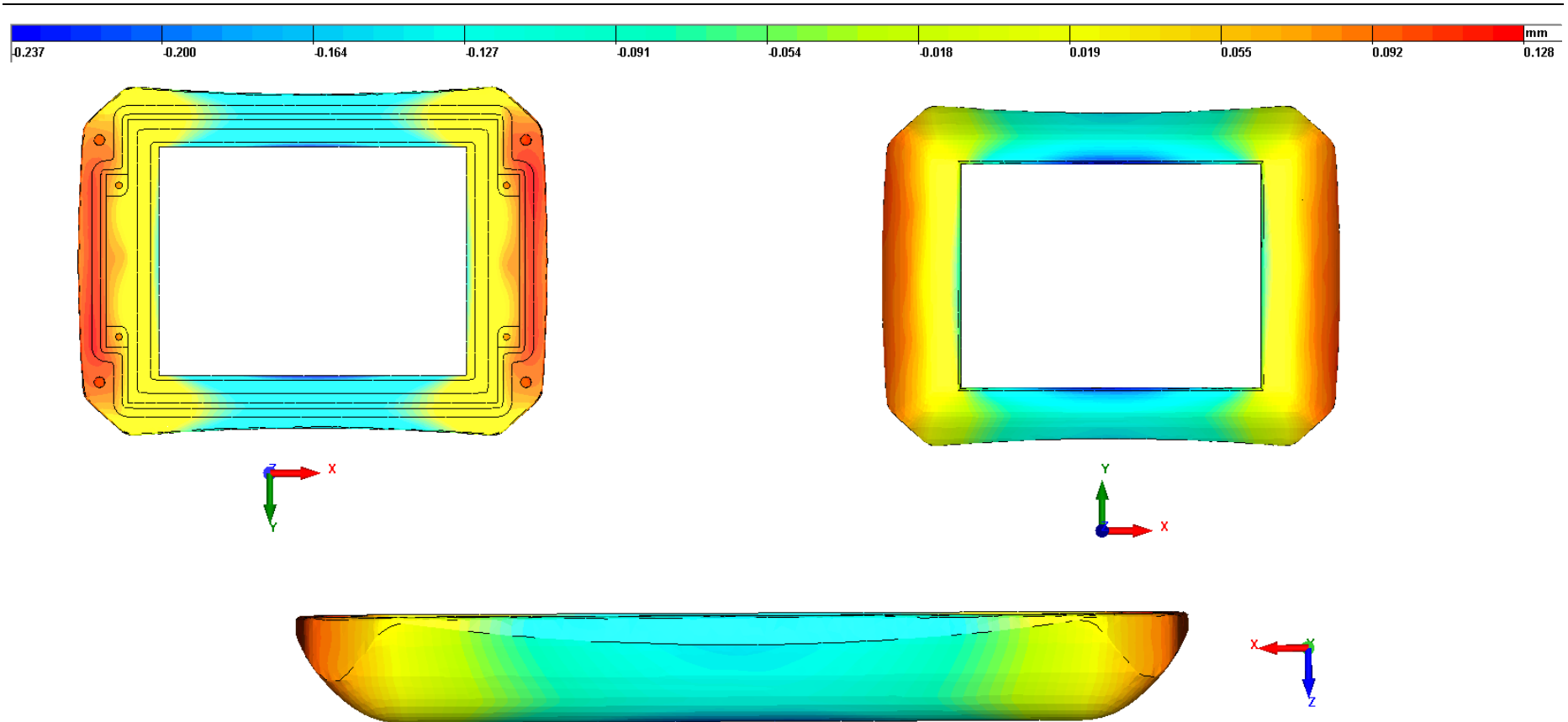
Y-Verzugsergebnisse der Rückseite von Gehäusedesign 2

## 10. Anhang



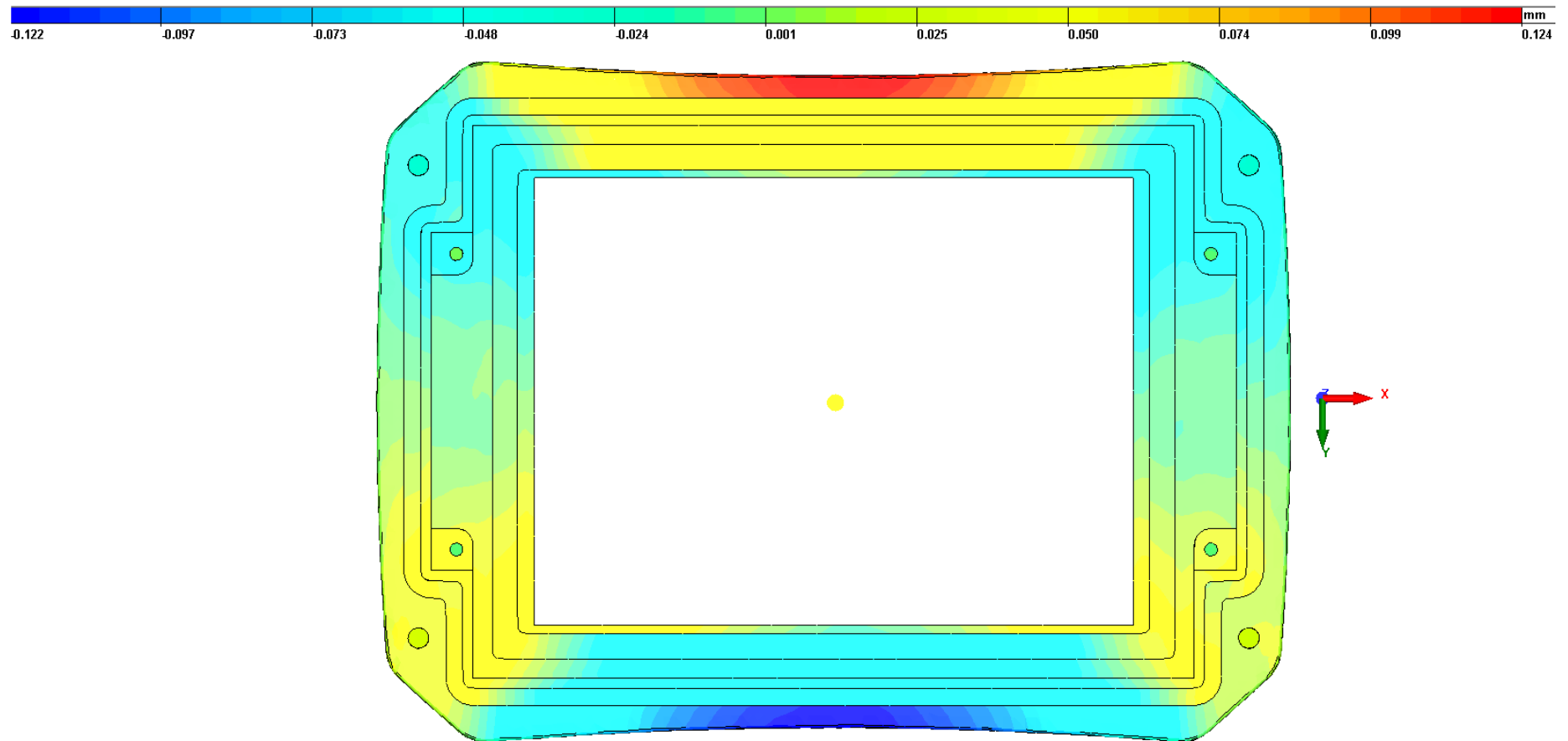
X-Verzugsergebnisse der Rückseite von Gehäusedesign 2

## 10. Anhang



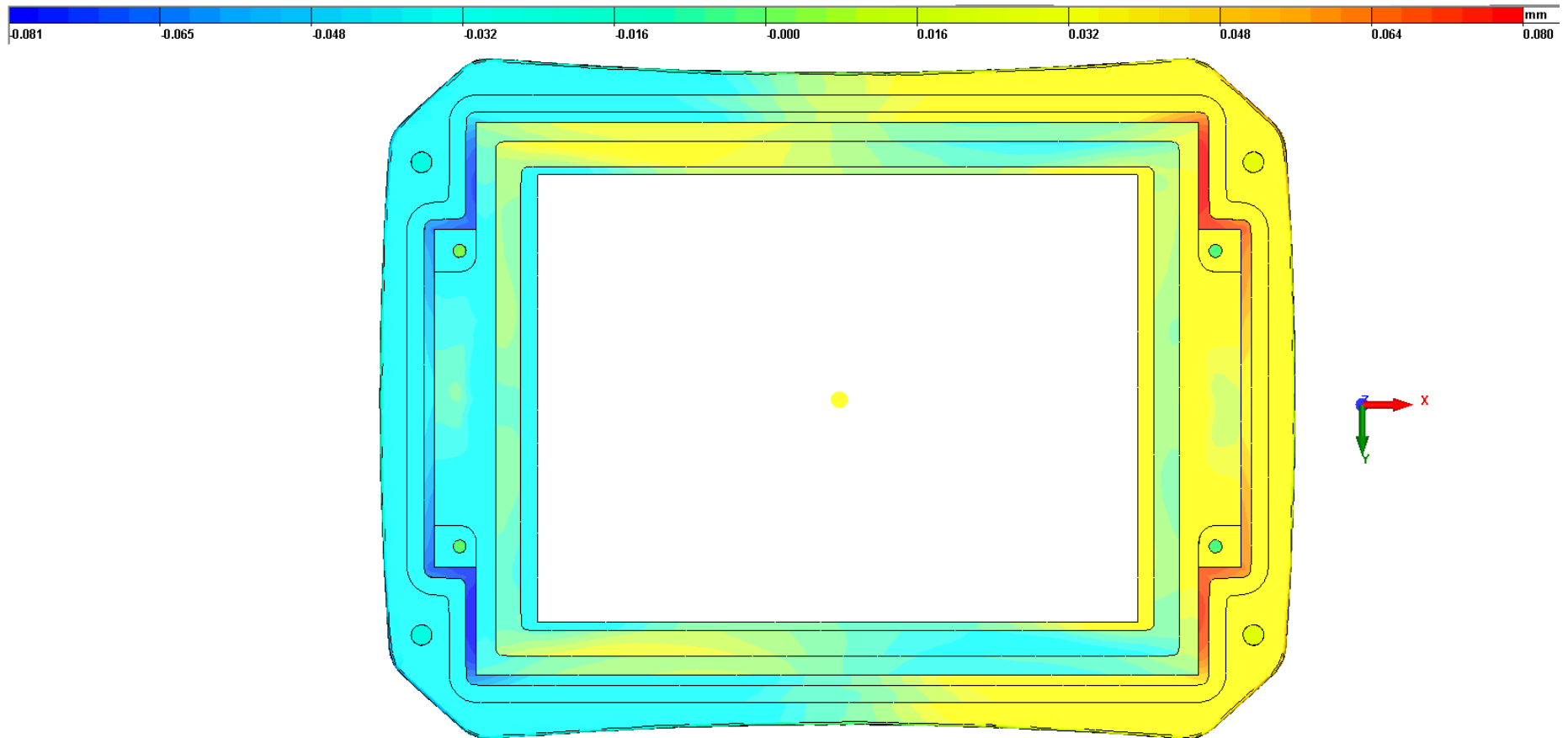
Z-Verzugsresultate der Vorderseite von Gehäusedesign 2

## 10. Anhang



Y-Verzugsresultate der Vorderseite von Gehäusedesign 2

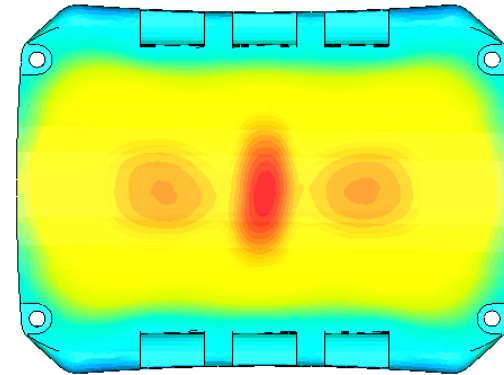
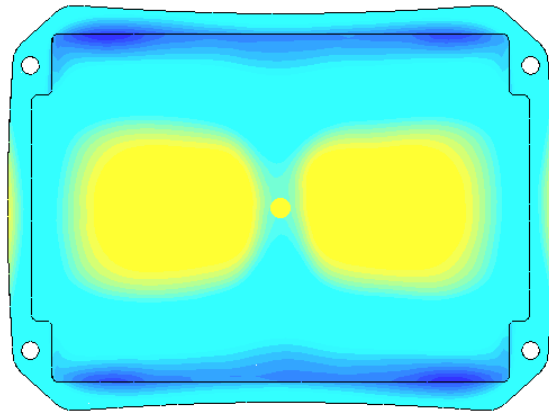
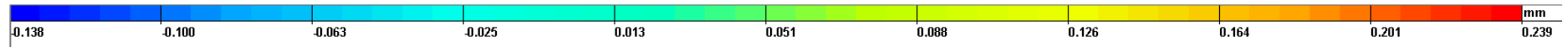
## 10. Anhang



X-Verzugsresultate der Vorderseite von Gehäusedesign 2

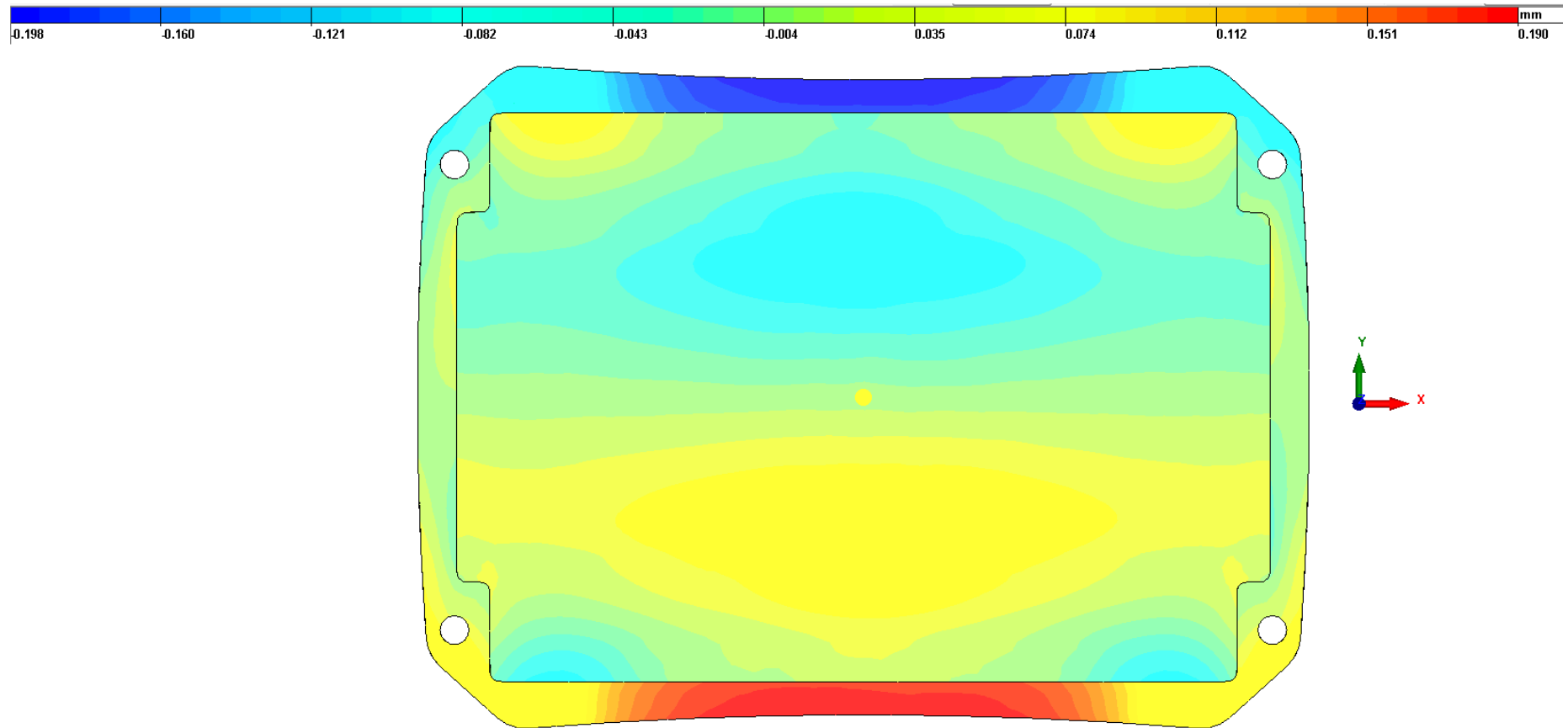


## 10. Anhang



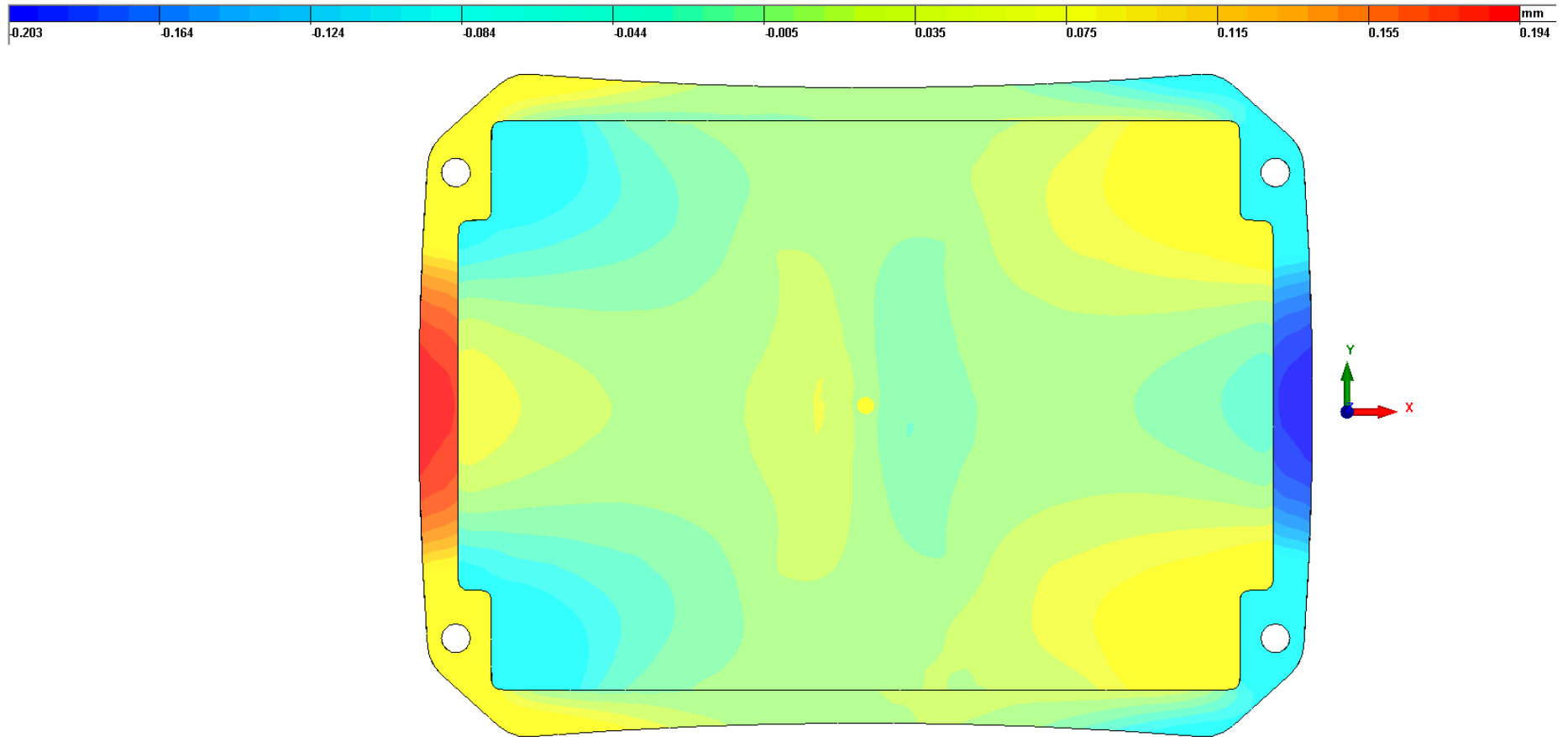
Z-Verzugsresultate der Rückseite von Gehäusedesign 1

## 10. Anhang



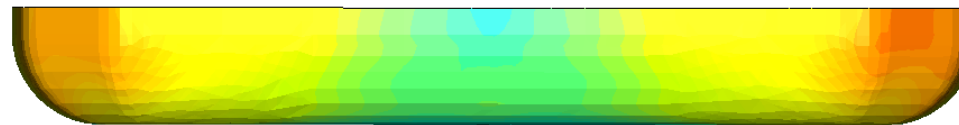
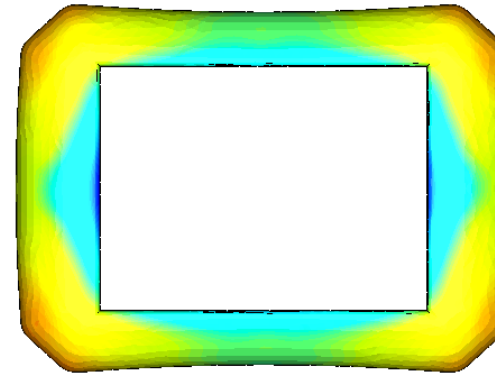
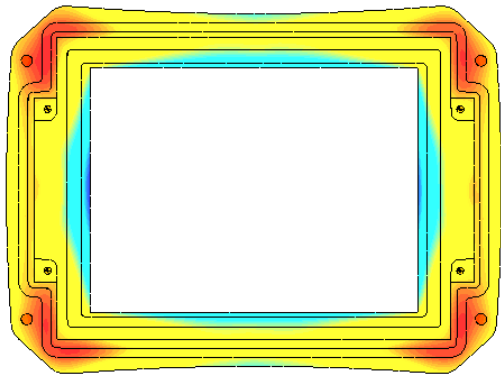
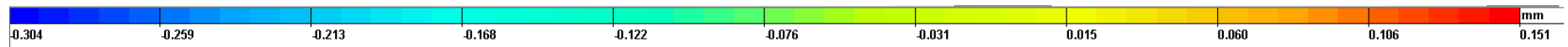
Y-Verzugsergebnisse der Rückseite von Gehäusedesign 1

## 10. Anhang



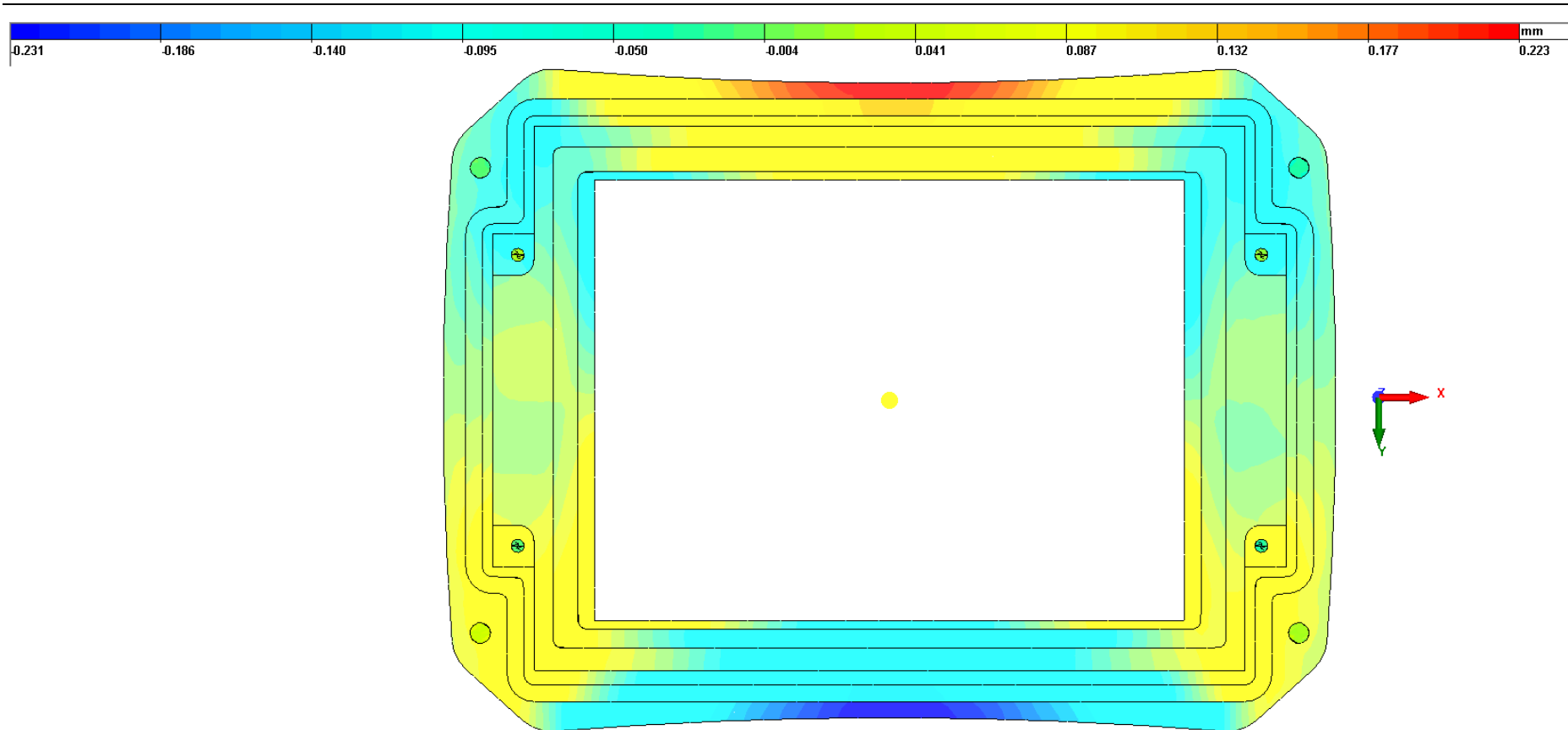
X-Verzugsresultate der Rückseite von Gehäusedesign 1

## 10. Anhang



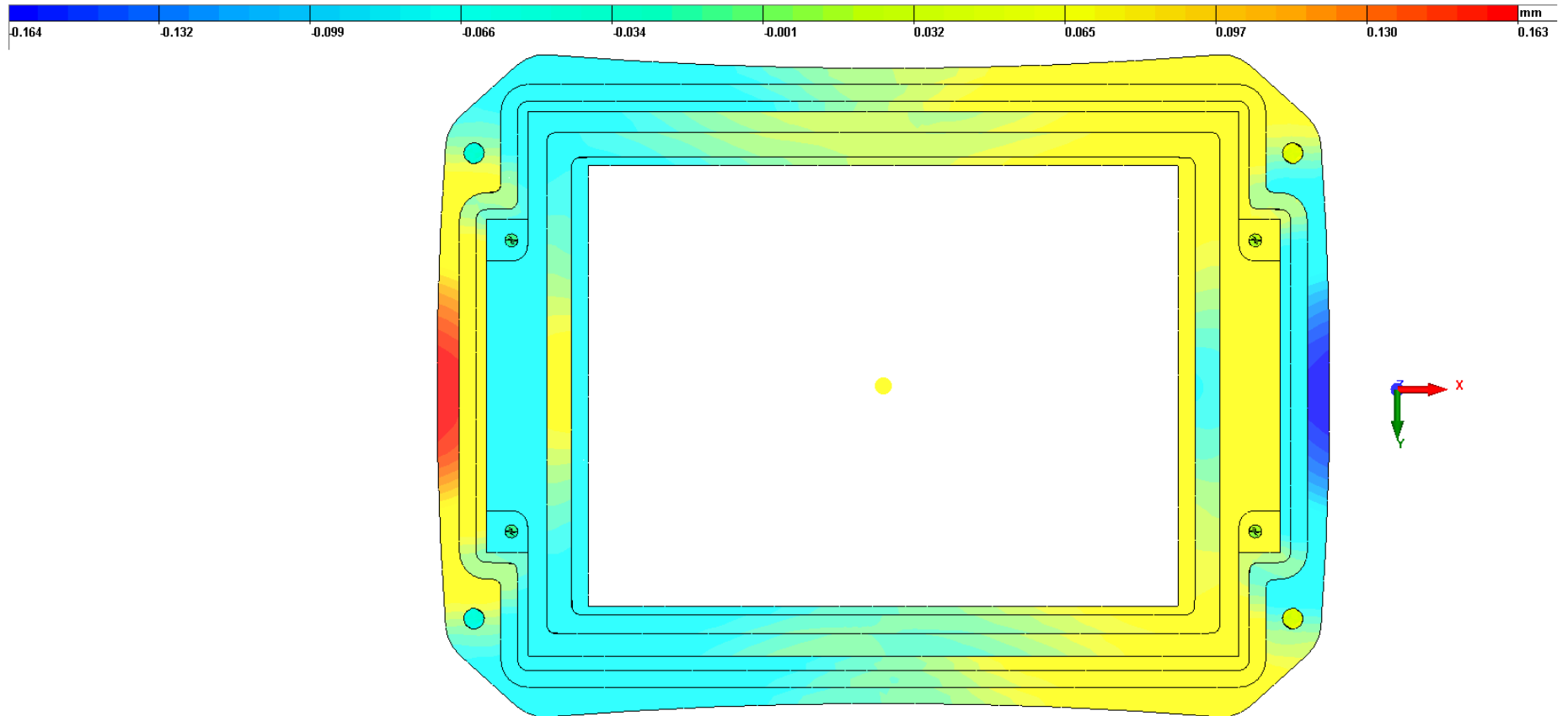
Z-Verzugsresultate der Vorderseite von Gehäusedesign 1

## 10. Anhang



Y-Verzugsresultate der Vorderseite von Gehäusedesign 1

## 10. Anhang



X-Verzugsergebnisse der Vorderseite von Gehäusedesign 1

## 10. Anhang

### 10.5 Firmenrecherche

Firmenname	Kontakt	E-Mail	Telefon	Anmerkung	Antwort
Batron AG	Martin Schellenberg	<a href="mailto:mschellenberg@data-modul.com">mschellenberg@data-modul.com</a>		großer Custom Service	sehr Interessiert, Telefonkonferenzen scheiterte an zu geringer Stückzahl
Electronic Assembly GmbH	Ole Dreessen	<a href="mailto:odreessen@lcd-module.de">odreessen@lcd-module.de</a>	Geschäftlich: +49-8105-778090 Mobil: +49-151-6245-6165	großer Custom Service; bieten sehr viel Touchpanel an	sehr interessiert, betreut unser Projekt, verlässt die Firma
Electronic Assembly GmbH	Herr Tischer	<a href="mailto:rtischer@lcd-module.de">rtischer@lcd-module.de</a>	Geschäftlich: +49-8105-778090		Betreut jetzt unser Projekt. Übernimmt die Touchpanels Bietet auch ein Display an; Muster wird mit den Touchpanels mitgeschickt;
GMS Display System	Irina Falkenstein Adrea Gehrschitz	<a href="mailto:irina.falkenstein@gms-ds.de">irina.falkenstein@gms-ds.de</a> <a href="mailto:andreas.gehrsitz@gms-ds.de">andreas.gehrsitz@gms-ds.de</a>	+49-7721-897-0	RGB Displays; Temperaturbereich angegeben	kann uns nicht weiterhelfen; zu wenig Produkte für den Aufwand der Umstellung; scheiterte an zu geringer Stückzahl
AlfaNet Computer & Electronic Handels GmbH	Rebecca Lie	<a href="mailto:rebecca@litemax.de">rebecca@litemax.de</a>	+49-4215-6568-0	ebenfalls Custom Service	scheiterte an zu geringer Menge und an unseren Preisvorstellungen
LiteMax Europe Service Center		<a href="mailto:rebecca@litemax.de">rebecca@litemax.de</a>	+49-4215-6568-0	Teilbereich von AlfaNet; gleiche Adresse, gleiche Kontakte	scheiterte an zu geringer Menge und an unseren Preisvorstellungen
Bressner Technology GmbH	Alexande Pluntke	<a href="mailto:Apluntke@bressener.de">Apluntke@bressener.de</a>	+49-8142-47284-42	haben auch einen Marinebereich mit Touchdisplays	Zeigt Interesse an diesem Projekt, wollte mehr Informationen; Hat Prinzipskizze bekommen; Haben keine Produkte für uns
Bopla Gehäuse System GmbH	Joachim Niermann	<a href="mailto:Jniermann@bopla.de">Jniermann@bopla.de</a>	+49-5223-969-166	Bieten Folien und Frontplatte separat an. Zumindest zeigen sie den Aufbau im Internet	Hat Skizze bekommen. Haben keine Produkte für uns
ITP systems & Solutions GmbH & Co.KG	Werner Till	<a href="mailto:wft@itpsyso.com">wft@itpsyso.com</a>	+49-8092-8510	4-Wire Fujitsu Touch Panels; Partner of Fujitsu Components Europe B.V.	Zeigt Interesse und hat mir Unterlagen geschickt und will weiter in Kontakt bleiben; Detailfragen sollen direkt mit Fujitsu geklärt werden; hat mir Kontakt für Fujitsu gegeben
Actron AG	Daniel Dietrich	<a href="mailto:dm@actron.de">dm@actron.de</a>	+49-89-991509-18 geschäftlich +49-170-3737-332	bieten 4-Wire Resistive Touchpanel in allen Größen an	sehr interessiert, bieten Komplettlösungen an, meint, dass resistive ungut für Sonnenlicht ist; Keine Produkte für uns
Electrosil	Thomas Plöhn	<a href="mailto:tp@electrosil.com">tp@electrosil.com</a>	+49-40840001-35 +49-1729980047	Kundenspezifische Lösungen; Ihre Variante im Aufbau Glas-ITO Abstandshalter - ITO-PET Film-Glas	Telefonkonferenz; Aufwand zu groß; Keine Produkte für uns

## 10. Anhang

Admatec AG	Chrisoph Heim	<a href="mailto:ch.heim@admatec.ch">ch.heim@admatec.ch</a>	geschäftlich: +41628960048 Mobil: +41793303566	4-Wire Touchpanels, Kundenspezifisch, bieten im Internet allerdings nur Pannels ab 5,7`` an	Angebot für ein 3,7`` Display; würde das Projekt betreuen Projekt. Startwäre allerdings zu spät
Fujitsu Components Europe B.V.	Frank Menigat	<a href="mailto:frank.menigat@fceu.fujitsu.com">frank.menigat@fceu.fujitsu.com</a>	geschäftlich: +496174998133 mobil: +491728665996	Kontakt von ITP;	klärt das mit den Japan ab, wollte das Projekt betreuen Fujitsu stellt nur komplett verklebte Touchpanel her, kann uns nicht weiterhelfen
Elo touch Solutions		<a href="mailto:elosales@elotouch.com">elosales@elotouch.com</a>		weltweit für Touchpanels aller Art	Keine Produkte für uns