

# Entwicklung und Konstruktion eines neuartigen Mundstücks für ein Kreislauftauchgerät

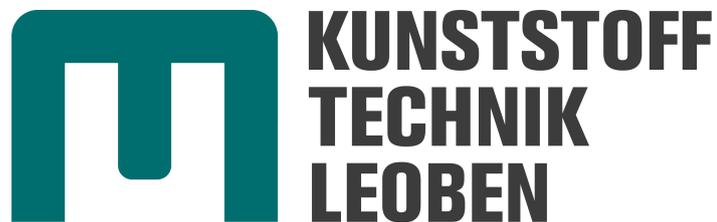
Masterarbeit

von

Michael Kessler, BSc

erstellt und eingereicht am

**Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung  
an der Montanuniversität Leoben**



---

**KUNSTSTOFFVERARBEITUNG**

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

Begutachtung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Clemens Holzer

Leoben, Februar 2013



# 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 cited in this volume.

Leoben, 28. Februar 2013

---

Michael Kessler, BSc



# Danksagung

Für die Begutachtung meiner Masterarbeit möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Clemens Holzer, Leiter des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont Thomas Lucyshyn, der mir während der gesamten Arbeitsdauer stets zur Seite stand und mich in ausgezeichneter Weise unterstützte.

Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Arne Sieber von Seabear Diving Technology und seinen Mitarbeitern danke ich für die gute Zusammenarbeit und konstruktive Kommunikation, sowie die Einführung in die Technologie des Gerätetauchens.

Patrick Pazour hat mich in scheinbar aussichtslosen Situationen bei der Modellierung der Geometrie mit seiner Erfahrung als Konstrukteur unterstützt, wofür ich ihm danken will. Meinen Bürokollegen Hans-Jürgen Luger und Manuel Berger danke ich für die abwechslungsreichen Stunden während langer Arbeitstage, sowie für die Hilfestellungen bei Problemen.

Bei Dipl.-Ing. Florian Müller, Dipl.-Ing. Martin Burgsteiner, Dipl.-Ing. Tobias Struklec und Dipl.-Ing. Peter Guttmann, sowie allen anderen Kollegen des Departments für Kunststofftechnik an der Montanuniversität Leoben, die mich so tatkräftig unterstützt haben, möchte ich mich ebenfalls bedanken.

Allen Freunden, die ich während meiner Studienzeit in Leoben kennen gelernt habe, möchte ich für diese schöne Zeit danken.

Mein abschließender Dank gilt meiner Familie, die mich während der gesamten Studiendauer ideell und materiell unterstützt, und mir das Studium ermöglicht hat.



# Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Mundstück als Teil eines Kreislauf-Tauchgeräts entwickelt und konstruiert. Zur Erhöhung der Sicherheit während des Tauchens beinhaltet das Mundstück zwei Hauptfunktionen. In der ersten Funktion befindet sich das Mundstück im geschlossenen Modus, wobei das Mundstück als Schnittstelle zwischen dem Taucher und dem Kreislauf des Tauchgeräts dient. Die zweite Funktion wird durch eine mechanische Umschaltung in den offenen Modus erreicht, bei dem der Kreislauf im Mundstück verschlossen ist und Atemgas direkt aus einer Druckgasflasche bezogen wird.

Ausgehend von Anforderungen, welche im Zuge einer Marktrecherche erarbeitet wurden, entstanden zunächst Konzepte und Lösungsvarianten, welche die geforderten Funktionen qualitativ erfüllten. Die vielversprechendste Lösungsvariante wurde weiterentwickelt und optimiert. Zu diesem Zweck wurde die Geometrie mittels CAD modelliert und detailliert. Das Ergebnis waren mehrere neu konstruierte Komponenten, die zusammen mit am Markt erhältlichen Zukaufteilen das Mundstück als System ergaben. Parallel zum Design der Geometrie wurde eine Werkstoffauswahl durchgeführt, aus der zwei geeignete Materialien (ASA und POM) für die Anwendung hervorgingen. Weiters wurden Fertigungsverfahren zur Herstellung der Geometrie ausgewählt, wie zum Beispiel Spritzgießen, Kleben und mechanische Nachbearbeitung. Mit Hilfe von Spritzgießsimulationen konnte die Geometrie hinsichtlich kunststoffgerechter Konstruktion optimiert werden. Durch die Herstellung und Prüfung mehrerer Serien von Prototypen während des Konstruktionsprozesses konnten virtuelle Ergebnisse realitätsnah validiert werden. Das Ergebnis der Masterarbeit war eine optimierte Geometrie, welche die gestellten Anforderungen hinsichtlich Funktion, Konstruktion, Material und Technologie bestmöglich erfüllte.



# Abstract

Within this thesis, a mouthpiece was designed and developed as a part of a rebreather. To improve safety during the dive, the mouthpiece includes two main functions. In the first function, the mouthpiece is in the closed circuit mode, where the mouthpiece serves as the interface between the diver and the circuit of the diving apparatus. The second function is achieved by a mechanical switch to the open circuit mode, in which the circuit in the mouthpiece is closed and breathing gas is obtained directly from a gas storage tank.

Based on requirements, which were developed as part of a market analysis, concepts and possible solutions fulfilling the requirements were developed. The most promising solution was advanced and optimized. The geometry was modeled and detailed using CAD. Several new developed components combined with available existing parts led to the mouthpiece as a system. Parallel to the design of the geometry a material selection was carried out and resulted in two appropriate materials (ASA and POM) for the application. Further, manufacturing processes have been selected for the production of the geometry, such as injection moulding, gluing and mechanical finishing. Using injection moulding simulation, the geometry could be optimized for a polymer-appropriate design. Through the production and testing of some series of prototypes during the design process, virtual results could be validated in reality. The conclusion of this work was an optimized geometry that fulfilled the requirements in the best way concerning function, design, materials and technology.



# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	i
Affidavit	i
Danksagung	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Tauchgerätetechnologie . . . . .	3
2.1.1 Allgemeines . . . . .	3
2.1.2 Offene Tauchgeräte . . . . .	4
2.1.3 Kreislauftauchgeräte . . . . .	5
2.1.4 Mundstücke . . . . .	7
2.2 Produktentwicklung . . . . .	11
2.2.1 Produktdefinition . . . . .	11
2.2.2 Allgemeiner Problemlösungszyklus . . . . .	13
2.2.3 Konstruieren und Entwickeln . . . . .	14
2.2.4 Werkstoffauswahl . . . . .	21
2.2.5 Auswahl von Fertigungsverfahren . . . . .	24
2.3 Einteilung und Eigenschaften von Kunststoffen . . . . .	25
2.3.1 Einteilung . . . . .	25
2.3.2 Eigenschaften . . . . .	27
2.3.3 Werkstoffverhalten . . . . .	28
2.4 Prototypen aus Kunststoff . . . . .	30
2.4.1 Konventionell hergestellte Prototypen . . . . .	31

---

2.4.2	Rapid Prototyping . . . . .	31
2.4.3	Vakuumgießen . . . . .	33
2.5	Spritzgießen von Kunststoffen . . . . .	34
2.5.1	Verfahrensablauf . . . . .	35
2.5.2	Werkzeug . . . . .	37
2.5.3	Spritzgießsimulation . . . . .	42
2.6	Spritzgießgerechte Konstruktion . . . . .	45
2.6.1	Formfüllung . . . . .	45
2.6.2	Abkühlung und Erstarrung . . . . .	47
2.6.3	Entformung . . . . .	51
2.7	Fügen von Kunststoffen . . . . .	52
2.7.1	Schweißen . . . . .	52
2.7.2	Kleben . . . . .	55
2.8	Spanende Bearbeitung von Kunststoffen . . . . .	58
2.8.1	Fräsen . . . . .	59
2.8.2	Drehen . . . . .	59
3	Grundlegende Vorgehensweise und Definition der Anforderungen	61
3.1	Vorgehensweise . . . . .	61
3.2	Anforderungen an das Produkt . . . . .	63
3.2.1	Funktionsanforderungen . . . . .	63
3.2.2	Konstruktionsanforderungen . . . . .	64
3.2.3	Materialanforderungen . . . . .	66
3.2.4	Technologische Anforderungen . . . . .	67
4	Ergebnisse	69
4.1	Geometrie . . . . .	69
4.1.1	Komponenten . . . . .	70
4.1.2	Mechanische Funktionen . . . . .	79
4.2	Werkstoffauswahl . . . . .	84
4.2.1	Werkstoffvorauswahl . . . . .	85
4.2.2	Feinauswahl der Materialien . . . . .	88
4.3	Fertigung der Komponenten . . . . .	93
4.3.1	Gehäuse . . . . .	93
4.3.2	Walze . . . . .	97
4.3.3	BOV-Verschlußplatte . . . . .	99

---

4.3.4	Hebel . . . . .	99
4.4	Spritzgießsimulation . . . . .	100
4.4.1	Definition der Geometrie und Prozessparameter . . . . .	101
4.4.2	Ergebnisse . . . . .	105
4.4.3	Einfluss der 3D-Vernetzung auf Simulationsergebnisse . . . . .	113
4.5	Prototypen . . . . .	115
5	Zusammenfassung und Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	119
	Abbildungsverzeichnis	123
	Tabellenverzeichnis	129
A	Anhang	131
A.1	Geometrie . . . . .	131
A.2	Materialdatenblätter . . . . .	132
A.3	Spritzgießsimulation . . . . .	141
A.3.1	Materialdaten . . . . .	141
A.3.2	Randbedingungen . . . . .	150
A.3.3	Ergebnisse . . . . .	151



# 1 Einleitung und Zielsetzung

Das Jungunternehmen Seabear Diving Technology ist ein Entwicklungslabor, das sich vor allem mit der Thematik Unterwassermedizin und Tauchgerätetechnologie auseinandersetzt. Im Speziellen fokussiert sich Seabear Diving Technology auf die Entwicklung eines neuartigen Kreislauf-Tauchgeräts, welches im Gegensatz zu herkömmlichen, offenen Tauchgeräten, bei denen die Taucherin in das Wasser ausatmet, die ausgeatmete Luft recycelt und wiederaufbereitet. Ein Mundstück, welches die Schnittstelle zwischen Kreislauf-Tauchgerät und Taucherin darstellt, ist eine von vielen Komponenten des Kreislauf-Tauchgeräts, welches sich derzeit in Entwicklung befindet.

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist die Entwicklung und Konstruktion des Mundstücks, welches zwei Hauptfunktionen beinhaltet. In der ersten Funktion atmet die Taucherin durch das Mundstück in den Kreislauf und aus dem Kreislauf. Ausgeatmetes Gas strömt im Kreislauf durch einen Filter, der überschüssiges Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) entfernt. Nachdem das Gas den Filter passiert hat, strömt es als frisches Atemgas wieder zum Mundstück. Somit kann Sauerstoff, welcher sich im ausgeatmeten Gas befindet, wiederverwendet werden, wodurch eine hohe Gaseffizienz (Verhältnis zwischen verstoffwechseltem Sauerstoffvolumen und eingeatmetem Atemgasvolumen) erreicht wird [5, 34]. In dieser geschlossenen Funktion treten keinerlei Gasblasen aus dem System aus, was zu einem geräuschärmeren Tauchen führt. Sollte das Kreislauf-Tauchgerät technisch versagen, kann die Taucherin in die zweite Funktion umschalten, in der das Mundstück wie ein herkömmliches Tauchgerät funktioniert. Dabei ist der Kreislauf im Mundstück verschlossen und frisches Atemgas wird direkt aus einer Druckgasflasche geliefert. Diese Umschaltung soll auf Grund einer geeigneten Ergonomie möglichst einfach und kräfteschonend geschehen.

Bei der Entwicklung und Konstruktion des Mundstücks soll systematisch nach dem in VDI 2221 vorgeschlagenen Modell der Entwicklung und Konstruktion vorgegangen werden, wobei der Konstruktionsprozess in die Aufgabenklärungsphase, Konzeptphase, Entwurfsphase und Ausarbeitungsphase unterteilt wird [8].

Aufbauend auf einem Lastenheft sowie einer Marktrecherche und dem Studium der Mundstücke des Mitbewerbers sollen Anforderungen für das neue Mundstück erarbeitet werden. In weiterer Folge sollen Konzepte und Lösungsvarianten ausgearbeitet werden, deren Ergebnis ein qualitativ funktionierendes Produkt darstellt.

Das vielversprechendste Konzept soll mit Hilfe der CAD-Software *PTC Creo*® (PTC Inc.) geometrisch modelliert werden. Ausgehend von einer einfachen Geometrie, welche auf dem Konzept-Modell aufbaut, soll der Konkretisierungsgrad und somit die Details der Geometrie fortlaufend erhöht werden. Dabei soll während der Modellierung insbesondere auf ein kunststoffgerechtes Design geachtet werden, um ein qualitativ hochwertiges Produkt zu erhalten [9]. Parallel zur Entwicklung der Geometrie sollen im Zuge der Werkstoffauswahl Materialien für die Geometrie ausgewählt werden, welche die definierten Anforderungen bestmöglich erfüllen, wobei es anzustreben ist, nach dem Prozess der Werkstoffauswahl vorzugehen, bei dem kein Material zu Beginn des Auswahlprozesses ausgeschlossen wird [48].

Die Durchführung von Spritzgießsimulationen mit der Software *SIGMASOFT*® (Sigma Engineering GmbH, Aachen, Deutschland) zielt darauf ab, geometriebedingte Fehler hinsichtlich spritzgießgerechter Auslegung im Sinne der Frontloading-Strategie frühzeitig zu erkennen und zu beheben, sowie die Fertigungsmöglichkeit der Geometrie zu validieren. Zudem sollen durch die Spritzgießsimulation grundlegende Prozessparameter gefunden werden, mit denen die Herstellung des Produktes durch Spritzgießen möglich sein sollte. Da es vorgesehen ist, das Mundstück als Kleinserie zu produzieren, ist die Verwendung eines Werkzeuges aus Aluminium anstelle eines Stahlwerkzeuges denkbar. Deshalb soll der Einfluss des Werkzeugmaterials auf die Ergebnisse der Spritzgießsimulation analysiert werden.

Auf Grund der vorgesehenen Produktion von wenigen tausend Stück ist eine Nachbearbeitung nach dem Spritzgießen zugunsten einer einfachen und vergleichsweise kostengünstigen Gestaltung des Spritzgießwerkzeugs zu überlegen. Deshalb sollen weitere Fertigungsverfahren untersucht werden, mit denen das Produkt im Anschluss an den Spritzgießprozess nachbearbeitet und fertiggestellt werden kann.

Um die virtuellen Ergebnisse realitätsnah untersuchen zu können, soll die Herstellung von Prototypen in Auftrag gegeben werden. Die Prototypen sollen auf ihre Funktionen und geometrischen Merkmale geprüft werden.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Tauchgerätetechnologie

#### 2.1.1 Allgemeines

Im Allgemeinen wird unter dem Begriff „Tauchen“ das vollständige Eindringen eines Körpers in eine Flüssigkeit verstanden. Im Folgenden ist der Begriff als die Tätigkeit des Menschen zu verstehen, „sich im Meer, einem See, einem Fluss oder einer anderen Wassermasse zu militärischen, wissenschaftlichen, kommerziellen oder entspannenden Zwecken unterhalb der Wasseroberfläche zu bewegen“ [25]. Da Menschen ohne Sauerstoff nicht überlebensfähig sind, muss Sauerstoff beim Tauchen entweder in der menschlichen Lunge oder mit Hilfe einer externen Luftversorgung mitgeführt werden. Da Sauerstoff zum einen in seiner reinen Form, als auch in Sauerstoff enthaltenden Gasgemischen durch den menschlichen Körper aufgenommen werden kann, werden im Folgenden alle zum Atmen geeigneten Gase als Atemgas bezeichnet.

Unter *Apnoetauchen* wird das Tauchen mit angehaltenem Atem verstanden. Dabei wird Atemgas in der Lunge der Taucherin mitgeführt und weitgehend auf Ausrüstung verzichtet. Die Tauchdauer (auch Apnoezeit genannt) ist durch den körperlichen Zustand der Taucherin begrenzt und kann einige Minuten betragen. Apnoetauchen wird meist sportlich betrieben, um zum Beispiel neue Rekorde hinsichtlich Tauchtiefen und Apnoezeiten aufzustellen [47].

Unter *Gerätetauchen* (engl.: „scuba-diving“) wird das Tauchen mit externer Luftversorgung verstanden. Üblicherweise wird das Atemgas in Druckluftflaschen gespeichert und mit Hilfe von weiteren technischen Mitteln wie Druckschläuchen, Atemregler und Mundstück dem menschlichen Körper zugeführt. Die Tauchdauer ist somit maßgeblich durch die Menge des mitgeführten Atemgases begrenzt. Tauchgeräte lassen sich grundsätzlich in *offene Tauchgeräte* und *Kreislauf-Tauchgeräte* einteilen [34].

### 2.1.2 Offene Tauchgeräte

Hauptbestandteile einer typischen Ausrüstung offener Tauchgeräte sind eine Druckluftflasche mit einem Volumen von 10 bis 18 l und zwei Druckstufenregler [34, 35]. Die erste Stufe reduziert den Druck der Druckluftflasche von 200 bar auf 8 bis 10 bar über dem Umgebungsdruck. Die zweite Stufe reduziert diesen Druck weiter auf Umgebungsniveau und ermöglicht der Taucherin mit Hilfe eines Mundstückes unter Wasser zu atmen. Ausatemluft entweicht durch ein Auslassventil in das umgebende Wasser. Die Maximalzeit, welche eine Taucherin unter Wasser bleiben kann, ist größtenteils abhängig von der mitgeführten Atemgasmenge, der Tauchtiefe und dem konsumierten Atemgasvolumen pro Zeit [53].

Vorteile offener Tauchgeräte sind der einfache und robuste Aufbau, der geringe Wartungsaufwand sowie eine einfache Handhabung der Ausrüstung. Aufgrund dieser Einfachheiten sind diese Geräte vor allem bei Freizeittauchern sehr beliebt.

Ein bedeutender Nachteil offener Tauchgeräte ist die schlechte Gaseffizienz (Verhältnis zwischen verstoffwechseltem Sauerstoffvolumen und eingeatmetem Atemgasvolumen), welche sich unmittelbar auf die Tauchdauer auswirkt: Eine entspannte Taucherin verstoffwechselt ca. 0,8 bis 1  $\text{bar l}/\text{min}$  Sauerstoff. Dieser Sauerstoffbedarf kann bei physischer Belastung auf 2,5 bis zu 3,5  $\text{bar l}/\text{min}$  ansteigen [35]. Die durch eine Taucherin konsumierte Luft beträgt an der Oberfläche (1 bar Umgebungsdruck) 25  $\text{bar l}/\text{min}$ . Da Luft aus ca. 21 % Sauerstoff besteht, enthält das konsumierte Luftvolumen 5,25  $\text{bar l}/\text{min}$  Sauerstoff. Wie erwähnt werden jedoch nur 0,8  $\text{bar l}/\text{min}$  verstoffwechselt, was einer Gaseffizienz von ca. 3 % gegenüber der eingeatmeten Luft entspricht. Bei einer Tauchtiefe von 40 m herrscht ein Umgebungsdruck von 5 bar, das konsumierte Luftvolumen beträgt somit 125  $\text{bar l}/\text{min}$ . Da der Sauerstoffbedarf durch den menschlichen Körper nicht vom Umgebungsdruck abhängig ist, sinkt die Gaseffizienz bei dieser Tiefe auf 0,6 %. Die mögliche Tauchdauer sinkt im selben Maße wie die Gaseffizienz. Jenes Sauerstoffvolumen, welches nicht durch den menschlichen Körper verstoffwechselt wird, entweicht durch das Auslassventil. Weitere Nachteile offener Tauchgeräte sind kaltes Atemgas durch die Expansion des gespeicherten Gases auf Umgebungsdruck (*Joule-Thomson-Effekt*) und trockenes Atemgas. Weiters ist das Tauchen mit offenen Tauchgeräten bedingt durch die entweichende Luft relativ laut [53].

### 2.1.3 Kreislauf-Tauchgeräte

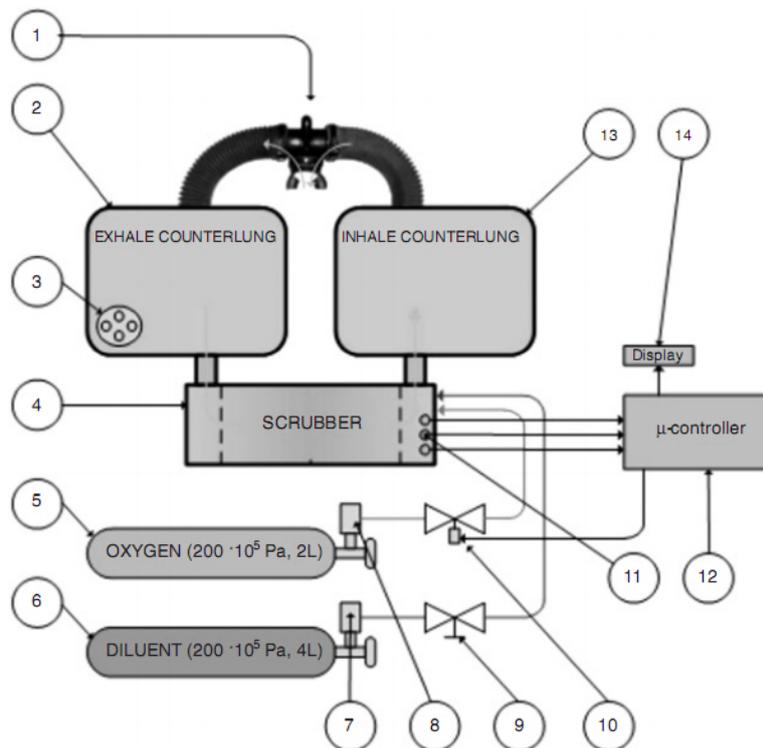
Eine Möglichkeit die Gaseffizienz zu erhöhen, ist die Verwendung von Kreislauf-Tauchgeräten (engl.: „Rebreathers“), bei denen die Taucherin in einen Kreislauf atmet, anstatt das verstoffwechselte Gas in die Umgebung auszulassen. Im Kreislauf integriert sind sogenannte Gegenlungen (flexible Behälter), in welchen das eingeatmete bzw. ausgeatmete Gas kurzfristig gespeichert wird. Im Kreislauf befindet sich außerdem ein chemischer Filter, der das Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) absorbiert, welches stoffwechselbedingt im menschlichen Körper entsteht. Das absorbierte Kohlendioxid wird durch die Zugabe von Sauerstoff aus der Druckluftflasche substituiert. Es wird zwischen mehreren Ausführungen unterschieden [5, 34]:

**Sauerstoff-Kreislauf-Tauchgeräte** funktionieren mit reinem Sauerstoff. Aufgrund der Tatsache, dass Sauerstoff ab einem Sauerstoffpartialdruck von 1,6 bar toxisch wirkt, ergibt sich eine maximale Tauchtiefe von 6 m. Sauerstoff-Kreislauf-Tauchgeräte werden vorwiegend für militärische Zwecke eingesetzt, da keinerlei Luftblasen im Wasser erzeugt werden.

**Halbgeschlossene Kreislauf-Tauchgeräte** (engl.: semiclosed circuit rebreather - SCR) funktionieren mit Sauerstoff angereichertem Gasgemisch. Da bei der Substitution des verstoffwechselten Sauerstoffs neben Sauerstoff weitere Gasbestandteile in das System eingebracht werden, muss das überschüssige Gas in die Umgebung ausgelassen werden. Daher werden durch diese Geräte Luftblasen erzeugt, jedoch deutlich weniger als bei offenen Tauchgeräten. Halbgeschlossene Tauchgeräte werden vorwiegend von Sporttauchern eingesetzt und weisen eine typische Gaseffizienz von ca. 10 % auf.

**Geschlossene Kreislauf-Tauchgeräte** (engl.: closed circuit - CCR) funktionieren mit einer Kombination aus reinem Sauerstoff und einem Gasgemisch, das jeweils in einer Druckluftflasche gespeichert ist. Durch eine geregelte Zudosierung in den Kreislauf ist es möglich, den Sauerstoffpartialdruck unter 1,6 bar zu halten, um eine Sauerstoffintoxikation zu vermeiden. Bei Geräten mit elektronischer Regelung („eCCR“), wie in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt, wird der Sauerstoffpartialdruck mit Sauerstoffsensoren gemessen und frischer Sauerstoff aus einer Sauerstoffflasche dem Kreislauf zudosiert, um den Sauerstoffpartialdruck auf einem definierten Wert zu halten. Zusätzlich wird dem System ein Gasgemisch aus einer Gasgemischflasche zudosiert. Die Regelung erfolgt mit Hilfe einer elektronischen Regelung und der Betätigung von

Druckreglern und Ventilen. Über ein Display können der Taucherin Informationen mitgeteilt werden. Das Mundstück ist über zwei Schläuche mit einer Ausatemgegenlunge und einer Einatemgegenlunge verbunden. Ein Filter absorbiert  $\text{CO}_2$  und ermöglicht ein erneutes Einatmen des Atemgases. Über das Überdruckventil kann zum Beispiel während des Auftauchens Atemgas in die Umgebung abgegeben werden. Die Vorteile von geschlossenen Kreislauf-Tauchgeräten sind das blasenfreie und somit lautlose Tauchen, warmes und feuchtes Atemgas, eine höhere Sicherheit gegenüber Tauchunfällen sowie eine Gaseffizienz von bis zu 100 %. Durch die hohe Gaseffizienz wird der Einsatz von kostenintensiveren Helium-Gasgemischen interessant, mit denen größere Tauchtiefen erreicht werden können. Nachteile geschlossener Kreislauf-Tauchgeräte sind unter anderem die Notwendigkeit spezifischer Tauchtrainings, aufwändige Bedienung, erhöhter Wartungs- und Reinigungsbedarf sowie vergleichsweise hohe Anschaffungskosten.



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung eines geschlossenen Kreislauf-Tauchgerätes mit elektronischer Steuerung. 1: Mundstück; 2: Ausatemgegenlunge; 3: Überdruckventil; 4: CO<sub>2</sub>-Filter; 5: Sauerstoffflasche; 6: Gasgemischflasche; 7,8: Druckregler; 9: Manuelles Ventil; 10: Magnetventil; 11: Sauerstoffsensoren; 12,14: Elektronische Regelung mit Display; 13: Einatemgegenlunge [54].

Aufgrund der genannten Nachteile sind geschlossene Kreislauf-Tauchgeräte vor allem

für kommerzielle Taucherinnen und sehr ambitionierte Sporttaucherinnen interessant. Diese Geräte sind auch für wissenschaftliche Taucherinnen eine interessante Alternative zu offenen Tauchgeräten [54].

### 2.1.4 Mundstücke

Im Folgenden werden auf dem Markt erhältliche Mundstücke für Kreislauf-Tauchgeräte und offene Tauchgeräte vorgestellt, deren Spezifikationen die Basis für das neu zu entwickelnde Mundstück darstellen.

#### Dräger Ray

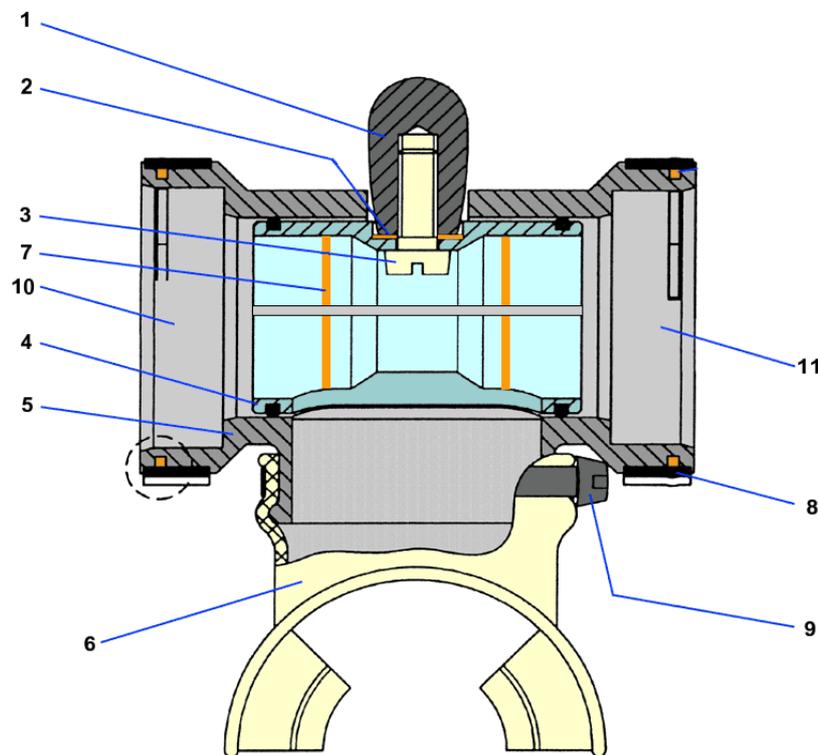
Das *Dräger Ray* ist ein halbgeschlossenes Mischgaskreislauf-Tauchgerät für die Verwendung beim Sporttauchen. Hauptbestandteile des Mundstücks des Dräger Ray sind ein Gehäuse aus Polycarbonat (PC) mit 30 % Glasfaserverstärkung und eine innenliegende Walze aus Polyoxymethylen (POM) (siehe Abbildung 2.2). Diese Walze ist längs geschlitzt und wird durch zwei innenliegende Spannringe leicht aufgedrückt, wodurch eine Flächenpressung zwischen der Gehäuseinnenwand und der Walze entsteht. Eine Fettschicht zwischen Gehäuse und Walze bewirkt eine Abdichtung. Im Gegensatz zu O-Ringen, welche üblicherweise die Dichtfunktion zwischen beweglichen Teilen gewährleisten, hat die Fett-Dichtung den Vorteil einer größeren Leichtgängigkeit.



**Abbildung 2.2:** Walze (links) und Gehäuse (rechts) des Mundstücks des *Dräger Ray* [24].

Durch einen Griff, welcher an der Walze befestigt ist, lässt sich die Walze in einen Zustand verdrehen, in dem das Mundstück wasserdicht gegen die Umgebung abgeschlossen werden kann (siehe Abbildung 2.3). Dadurch wird es der Taucherin ermöglicht,

das Mundstück loszulassen, ohne dass Wasser in den Kreislauf eindringt. Das Atemgas des Kreislaufs wird dem Mundstück über einen Einatemschlauch zugeführt und über einen Ausatemschlauch abgeführt. Die Flussrichtung des Atemgases wird durch zwei Richtungsventile gesteuert, welche sich bezogen auf den Kreislauf jeweils am Eingang und Ausgang des Mundstücks befinden. Das Atemgas aus der Druckluftflasche wird nicht durch das Mundstück, sondern an einer anderen Stelle dem Kreislauf zugeführt. Das Totraumvolumen ist definiert als Volumen zwischen den beiden Richtungsventilen im Kreislauf, in dem sich ausgeatmetes, verstoffwechseltes Gas mit einem geringeren Sauerstoffgehalt befindet, welches beim Einatmen erneut konsumiert wird. Das Totraumvolumen des Mundstücks beträgt  $95 \text{ cm}^3$  [30].



**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung des Mundstücks des *Dräger Ray* [24].  
1,2,3: mit Schraube befestigter Griff, 4: Walze, 5: Gehäuse, 6: Mundstück, 7: Spannring, 8: Schutzring, 9: Kabelbinder, 10: Richtungsventil (Einlass), 11: Richtungsventil (Auslass).

Da dieses Mundstück keine Funktion zur Umschaltung vom geschlossenen Kreislauf in den offenen Kreislauf aufweist, muss zusätzlich ein Ersatzmundstück mitgeführt werden, um bei einem Defekt im Kreislauf auf ein funktionierendes System wechseln zu können.

### Poseidon MKVI

Beim *Poseidon MKVI* handelt es sich um ein geschlossenes Kreislauf-Tauchgerät, welches speziell auf die Bedürfnisse der Sporttaucherin zugeschnitten ist [55]. Das Mundstück des MKVI kann durch eine einfache Bewegung eines Schalters zwischen dem Betrieb im geschlossenen Kreislauf (CC-Modus) zum Betrieb im offenen Kreislauf (OC-Modus) umgeschaltet werden (siehe Abbildung 2.4). Somit entfällt im Notfall die Notwendigkeit, nach einem Ersatzmundstück zu suchen. Bei der Umschaltung zwischen CC-Modus und OC-Modus wird eine innenliegende, hohle Walze rotiert, wobei die Dichtung zwischen Gehäuse und Walze durch O-Ringe gewährleistet wird.

Das MKVI-Mundstück enthält ein druckgeregeltes „Automatisches Diluentgas-Ventil“ (ADV), welches die tiefenabhängige Kompression des Atemvolumens in der Gegenlunge beim Abtauchen ausgleicht und somit automatisch ein volles Atemvolumen sichert. Durch einen speziellen Mechanismus wird das Atemgas nur zugeführt, wenn das Atemvolumen in der Gegenlunge für einen vollen Atemzug nicht ausreichend ist. Das Mundstück enthält ein Head-up-Display (HUD), welches die Taucherin visuell auf mögliche Probleme aufmerksam macht [42]. Das Gehäuse des Mundstücks besteht aus Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA).



**Abbildung 2.4:** Mundstück des *Poseidon MKVI* [42]. Die Kreislauf-Anschlüsse mit den Richtungsventilen befinden sich auf der Unterseite des Mundstücks (in der Abbildung nicht sichtbar).

### Scubapro R190

Das *Scubapro R190* ist eine sogenannte „2. Stufe“, ein robustes und kompaktes Mundstück für offene Tauchgeräte (siehe Abbildung 2.5).



**Abbildung 2.5:** Scubapro R190.

Die wichtigsten Elemente des Mundstücks sind in Abbildung 2.6 dargestellt. Atmet die Taucherin ein, entsteht im Mundstück ein Unterdruck. Durch die Druckdifferenz zum umgebenden Wasser wird eine Membran, welche in direktem Kontakt zum umgebenden Wasser und zum Atemgas im Mundstück steht, verformt. Die Versteifung in der Mitte der Membran betätigt in weiterer Folge den durch eine Feder vorgespannten Hebel eines Druckluft-Ventils, wodurch Druckluft in das Mundstück einströmt und der Taucherin Atemgas zur Verfügung stellt. Die auf Grund der Druckdifferenz wirkende Kraft auf die Membran und die Kraft des vorgespannten Hebels befinden sich im Gleichgewicht. Durch diese Funktion wird sichergestellt, dass der bereitgestellte Druck des Atemgases stets dem Umgebungsdruck entspricht und somit ein leichtes Atmen ermöglicht. Da das einströmende Atemgas eine Erhöhung des Druckes im Mundstück zur Folge hat, sobald die Taucherin seinen Atemzug beendet hat, verformt sich die Membran bedingt durch die Hebelkraft zurück in die Ausgangsposition und das Druckluft-Ventil wird verschlossen. Atmet die Taucherin aus, öffnet sich ein Richtungsventil (Auslassventil) auf der Unterseite des Mundstücks, wodurch die Ausatemluft in die Umgebung entweichen kann.

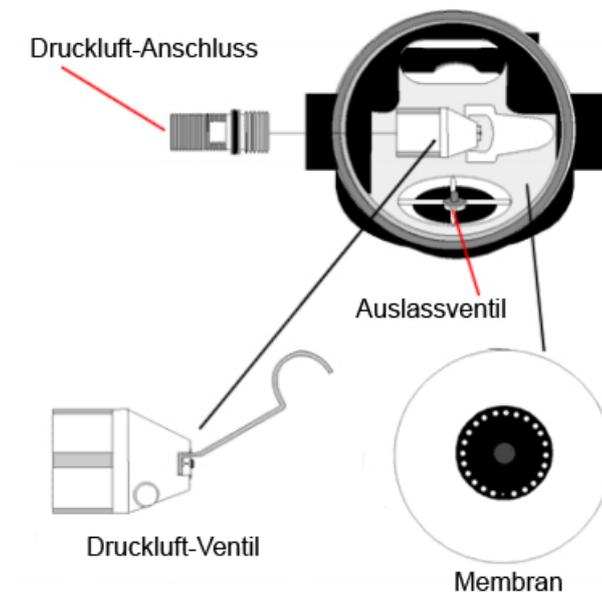


Abbildung 2.6: Hauptbestandteile des Scubapro R190 [31].

## 2.2 Produktentwicklung

### 2.2.1 Produktdefinition

Unter einem Produkt versteht man ein materielles oder immaterielles Objekt, welches auf dem Markt angeboten wird, um Bedürfnisse oder Wünsche eines Kunden zu erfüllen [8]. Der Wert eines Produktes spielt einerseits eine wichtige Rolle bei der Kaufentscheidung eines Kunden, als auch bei der Entscheidung eines Unternehmens, ein bestimmtes Produkt zu produzieren.

Der Wert eines Produktes lässt sich definieren als Verhältnis von Nutzen zu Aufwand (Gleichung 2.1). Dementsprechend ist ein Produkt wertvoll, wenn der Nutzen im Vergleich zum Aufwand überwiegt.

$$\text{Allgemeiner Produktwert} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad (2.1)$$

Wird ein Produkt aus *Herstellersicht* betrachtet, kann dessen Nutzen für das Unternehmen durch den Gewinn und der nötige Aufwand zur Produkterstellung durch die anfallenden Selbstkosten des Produktes, die wesentlich aus den Herstell- und Entwicklungskosten bestehen, ausgedrückt werden. Folglich ist der Wert eines Produktes aus

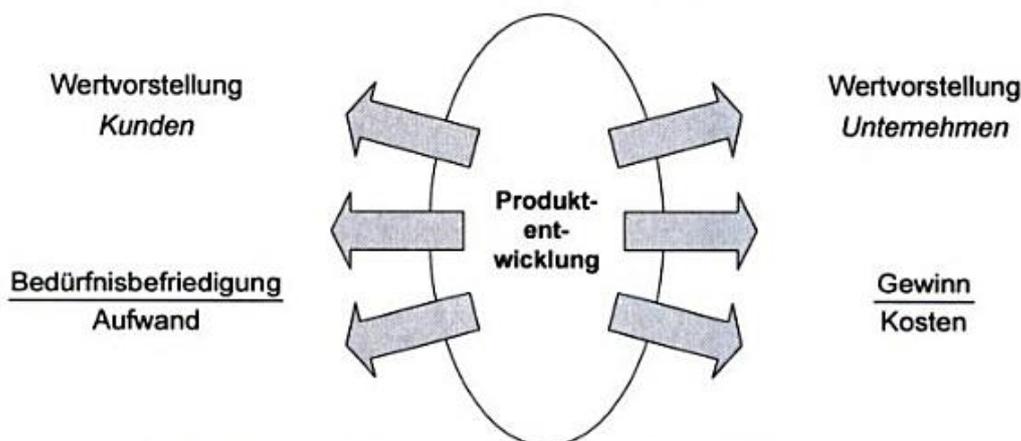
Herstellersicht (Gleichung 2.2) am größten, wenn es bei niedrigen anfallenden Kosten einen maximalen Gewinn erwirtschaftet, wobei der Gewinn als Differenz zwischen dem am Markt erzielbaren Preis und allen anfallenden Kosten zur Produktrealisierung bis zur Serienreife definiert werden kann [8].

$$\text{Produktwert aus Herstellersicht} = \frac{\text{Gewinn}}{\text{Kosten}} \quad (2.2)$$

Bei einer Betrachtung des Wertebegriffes aus *Kundensicht* kann der Nutzen als Fähigkeit eines Produktes zur Befriedigung von individuellen Bedürfnissen verstanden werden (Gleichung 2.3). Aufwände sind beispielsweise der Zielmarktpreis, also der vom Kunden zu zahlende Preis um das Produkt zu erwerben, als auch laufende Kosten, die während der Produktlebensdauer auftreten, sowie zeitliche Verfügbarkeit und Entsorgungskosten des Produktes [8].

$$\text{Produktwert aus Kundensicht} = \frac{\text{Bedürfnisbefriedigung}}{\text{Aufwand}} \quad (2.3)$$

Als Produktentwicklung wird der gesamte Prozess verstanden, der abläuft, bis ein Produkt genutzt werden kann [7]. Weil sowohl der Hersteller als auch der Kunde einen maximalen Produktwert erhalten wollen, findet die Produktentwicklung stets im Spannungsfeld zwischen den Wertvorstellungen des Herstellers und des Kunden statt (siehe Abbildung 2.7). Aus diesem Grund ist es wichtig, bereits vor dem Entwicklungsbeginn die wertbestimmenden Faktoren des Herstellers und des Kunden zu kennen [8].



**Abbildung 2.7:** Produktentwicklung im Spannungsfeld zwischen den Wertvorstellungen des Kunden und des Unternehmens [8].

### 2.2.2 Allgemeiner Problemlösungszyklus

Der Produktentwicklungsprozess umfasst sowohl den Konstruktionsprozess, den Materialauswahlprozess, als auch den Prozess zur Auswahl von geeigneten Fertigungsverfahren. Diese Prozesse haben gemeinsam, dass zur Lösung derer Probleme stets ein allgemein formulierter Problemlösungszyklus bewusst oder unbewusst beschritten wird [48].

Abbildung 2.8 stellt den allgemeinen Problemlösungszyklus grafisch dar. Ein bestimmter Anstoß, wie beispielsweise die Motivation zur Entwicklung eines neuen Produktes, um neue Märkte oder Kundenwünsche zu befriedigen, führt zu einer Idee, welche umgesetzt werden soll. Zunächst erfolgt eine Situationsanalyse, bei der Informationen und Kenntnisse über die vorliegende Situation gesammelt werden. Bei einer wirkungsbezogenen, zielorientierten Betrachtung werden aus diesen Situationskenntnissen heraus Zielvorstellungen formuliert. Dabei ist zu beachten, dass es Ziele gibt, die unbedingt erreicht werden *müssen* (Forderungen), sowie Ziele, die zur erfolgreichen Lösung des Problems nicht unbedingt eingehalten werden müssen, aber einen gewissen Mehrwert des Ergebnisses schaffen (Wunsch- und Sollziele). Diese Ziele sind Eingangsgrößen für eine Synthese (z.B. Vorstellungen, Zeichnungen) und Analyse (z.B. Berechnungen, Bewertungen). Bei einer strukturbezogenen, lösungsorientierten Betrachtung ist die Situationskenntnis die Eingangsgröße der Synthese und Analyse. Um den Mehrwert einer Lösung zu quantifizieren, stellen die Wunsch- und Sollziele Bewertungskriterien dar. Auch Lösungsvarianten können als ergänzende Bewertungskriterien herangezogen werden. Die besten Bewertungen werden zur Entscheidung vorgeschlagen. Die Entscheidung schließt den Prozess des Problemlösungszyklus ab [48].

Gerade bei Problemen mit großer Komplexität muss methodisch vorgegangen werden, um den Erfolg der Umsetzung nicht dem Zufall zu überlassen. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass auf Grund der Komplexität von technischen Problemen oft wenig methodisch vorgegangen werden kann. Viele Probleme sind mit weiteren Problemen verknüpft, die erst während der Synthese und Analyse zum Vorschein kommen. Aus diesem Grund ist es in den meisten Fällen notwendig, an bestimmten Stellen des Problemlösungszyklus, vor allem während der Synthese und Analyse, Iterationsschritte durchzuführen, bei denen ein Prozess mit neu gewonnenen Informationen erneut durchlaufen wird. Synthese und Analyse beeinflussen sich somit und wechseln sich ständig ab. Zwischenergebnisse sollen bestmöglich dokumentiert werden, um die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen zu gewährleisten [48].

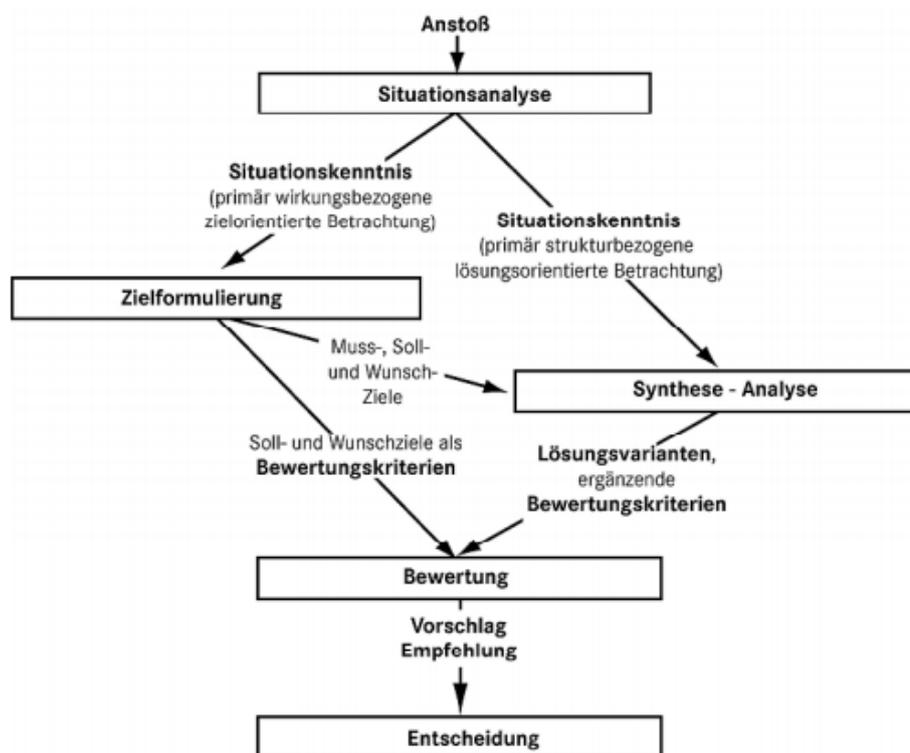


Abbildung 2.8: Allgemein formulierter Problemlösungszyklus [12].

### 2.2.3 Konstruieren und Entwickeln

#### Definitionen, Aufgaben und Ziele

Die *Entwicklungstätigkeit* ist definiert als die Tätigkeit, bei der ausgehend von Anforderungen die geometrisch-stofflichen Merkmale eines technischen Produkts mit allen seinen lebenslaufbezogenen Eigenschaften bis hin zur Entsorgung festgestellt werden. Es handelt sich dabei um einen Optimierungsprozess unter Einbeziehung von Musterbau, Versuch, Fertigung, Montage und Zulieferern. Die *Konstruktionstätigkeit* entspricht der Entwicklungstätigkeit ohne die unmittelbare Einbeziehung von Musterbau und Versuch [7].

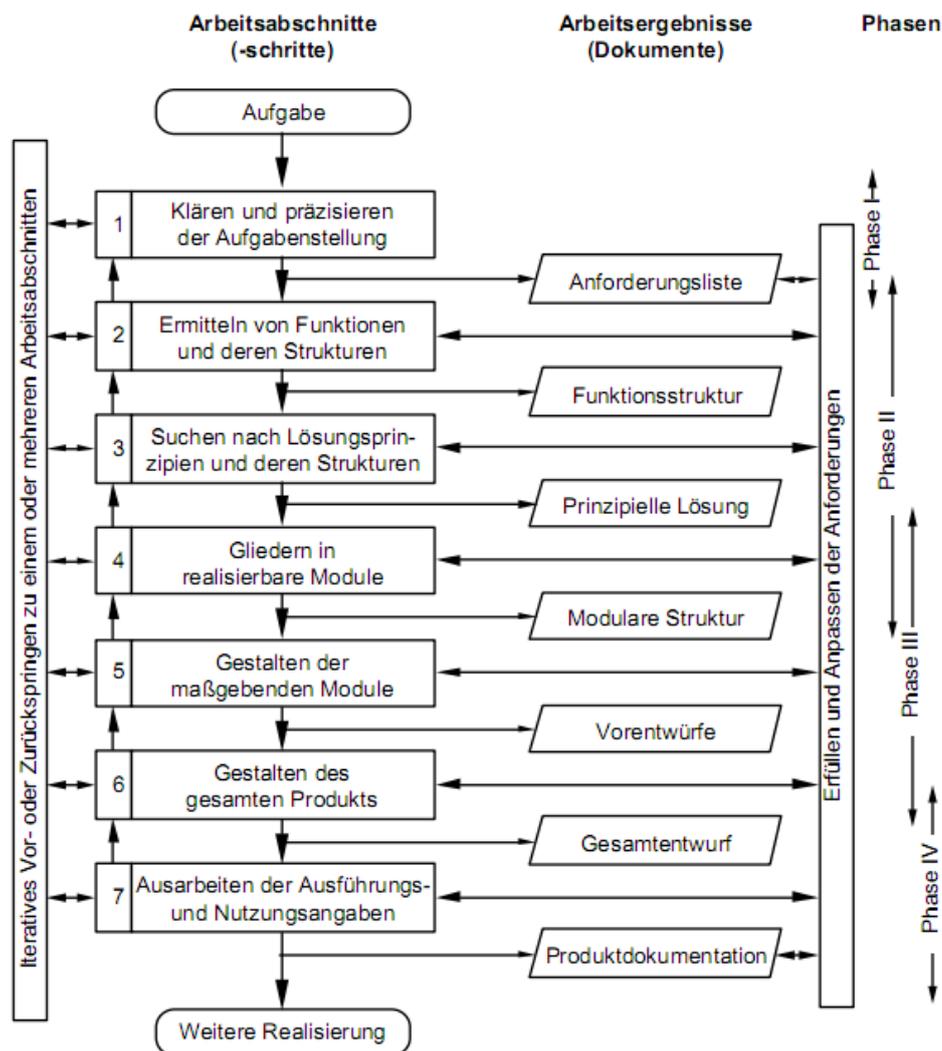
Die *Aufgabe der Entwicklung und Konstruktion* ist das Festlegen von Produkteigenschaften ausgehend von der Aufgabenstellung in Form von Informationen. Benötigte Informationen werden gewonnen, verarbeitet und weitergegeben. Auf Basis dieser Informationen wird das Produkt in der Produktion materiell hergestellt [7].

Das *Ziel des Konstruierens und Entwickelns* ist es, der Produktion Informationen zur

Verfügung zu stellen, um ein Produkt mit einem maximalen Produktwert zu erzeugen und somit auf die Forderungen und Wünsche des Kunden bzw. des Marktes einzugehen, sodass das Produkt eine hohe Qualität erreicht. Unter Qualität versteht man dabei den Grad der Annäherung der Ist- an die die Soll-Eigenschaften des Produktes, wobei alle möglichen Eigenschaftsarten gemeint sind, zum Beispiel Funktionserfüllung, Sicherheit, Ergonomie etc. [2].

### Vorgehensweise beim Konstruieren und Entwickeln

Die Basis der Vorgehensweise beim Konstruieren und Entwickeln ist der in Kapitel 2.2.2 dargestellte allgemeine Problemlösungszyklus. Die VDI-Richtlinie 2221 beschreibt das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren, wie in Abbildung 2.9 dargestellt. Dabei ist die Realisierung in sieben Arbeitsschritte unterteilt, welche grundsätzlich in dargestellter Reihenfolge von oben nach unten durchlaufen werden und zur Erhöhung der Flexibilität über Informationsbrücken miteinander verbunden sind (rechts in der Abbildung: Erfüllen und Anpassen der Anforderungen). Damit soll gezeigt werden, dass zu jedem Zeitpunkt ein Anpassen und Ergänzen der Anforderungsliste möglich ist. Die Informationsbrücken auf der linken Seite der Abbildung verdeutlichen die Möglichkeit, iterativ zu einem anderen Arbeitsschritt vor- oder zurückzuspringen. Die Arbeitsschritte führen jeweils zu entsprechenden Arbeitsergebnissen. Mehrere Arbeitsschritte werden in die vier Konstruktions- und Entwicklungsphasen unterteilt: Aufgabenklärungsphase (Phase I), Konzeptphase (Phase II), Entwurfsphase (Phase III) und Ausarbeitungsphase (Phase IV). Diese stellen die Schwerpunkte des Konstruktionsprozesses dar. Im Anschluss an die generelle Vorgehensweise erfolgt die „weitere Realisierung“, unter der beispielsweise die Produktion gemeint ist.



**Abbildung 2.9:** Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [8].

Die **Aufgabenklärungsphase** (Phase I) hat das Ziel, alle Zusammenhänge, die mit der Aufgabenstellung verknüpft sind, zu klären und zu präzisieren. Dies umfasst sowohl die Gliederung der Aufgabe, die zeitliche und personelle Organisation der Arbeitsabläufe sowie Informationen, die mit der Aufgabenstellung im Zusammenhang stehen. Die Informationsbeschaffung über geltende Vorschriften und Gesetze sowie über zu berücksichtigende Normen darf dabei nicht unberücksichtigt gelassen werden. Es werden Anwendervorgaben detailliert, sowie die Realisierungsforderungen unter Berücksichtigung konkreter Lösungsansätze beschrieben. Es wird definiert, wie die Forderungen zu realisieren sind. Aus dem Lastenheft bzw. dem Pflichtenheft entsteht schließlich eine Anforderungsliste, in der die Gesamtheit aller Anforderungen in der

Sprache der Konstrukteurin festgehalten sind [7].

Das *Lastenheft* ist definiert als die „Gesamtheit aller Forderungen an die Lieferungen und Leistungen“ [29]. Im Lastenheft sind die Forderungen aus Anwendersicht einschließlich Randbedingungen zu beschreiben. Diese Forderungen und Randbedingungen sollen qualifizierbar und prüfbar sein. Es wird festgelegt, welche Aufgabe vorliegt und wofür diese zu lösen ist. Das *Pflichtenheft* ist das „erarbeitete Realisierungsvorhaben aufgrund der Umsetzung des Lastenheftes“ [29].

Die **Konzeptphase** (Phase II) umfasst die Arbeitsschritte 2 („Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen“), 3 („Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen“) und 4 („Gliedern in realisierbare Module“) und dient der Synthese und Analyse. Die Aufgabe wird dabei zunächst in bekannte Teilaufgaben bzw. Teilfunktionen zerlegt. Auf Basis der Funktionsstrukturen, welche aus diesem Schritt hervorgehen, ergeben sich verschiedenste Lösungsvarianten, welche nicht nur durch technische Randbedingungen, sondern auch durch die persönliche Erfahrung der Konstrukteurin geprägt sind. Das Ergebnis ist das Konzept, das die Funktionstruktur, die prinzipiellen Lösung und die modulare Lösung eines Produktes enthält. Bewertungskriterien sind dabei hilfreich, jene Lösungsvariante auszuwählen, welche die definierten Anforderungen am wahrscheinlichsten erfüllen. Optimalerweise ist die Lösungsvariante in Module gegliedert, welche unterschiedliche Funktionen erfüllen. Die Darstellung des Konzeptes kann beispielsweise durch Skizzen oder einfache Modellen erfolgen [7].

In der **Entwurfsphase** (Phase III) wird das qualitativ funktionierende Produkt (Konzept) in ein quantitativ funktionsfähiges, fertigbares und materielles Gebilde überführt. Die Entwurfsphase überschneidet sich zum Teil mit der Konzeptphase und umfasst die Arbeitsschritte 4 („Gliedern in realisierbare Module“), 5 („Gestalten der maßgebenden Module“) und 6 („Gestalten des gesamten Produkts“). Die Konzentration erfolgt dabei auf die wesentlichen Bauteile und Baugruppen mit ihren Werkstoffen. Zusätzlich ist es notwendig festzustellen, mit welchen Fertigungsverfahren die Bauteile und Materialien verarbeitet werden können, da die zu produzierende Gestalt eines Produktes wesentlich durch die Möglichkeiten des Fertigungsverfahrens bestimmt werden. Die Entwurfsphase ist ein ausgeprägt iterativer Prozess, im Zuge dessen Lösungen detailliert werden: Es entsteht ein Grobentwurf, der immer stärker verfeinert wird (Feinentwurf). Ein dementsprechendes Beispiel ist die Verfeinerung der modularen Bauteile, die in Summe das Gesamtprodukt ergeben. Da es sich beim Gestalten um

eine der wesentlichen Tätigkeiten in der Entwurfsphase handelt, ist die Zeichnung als Ergebnis der gestalterischen Tätigkeit das wichtigste Ausdrucksmittel der Konstrukteurin. Im Zuge der Entwurfsphase werden außerdem Berechnungen durchgeführt, wie beispielsweise mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode [7].

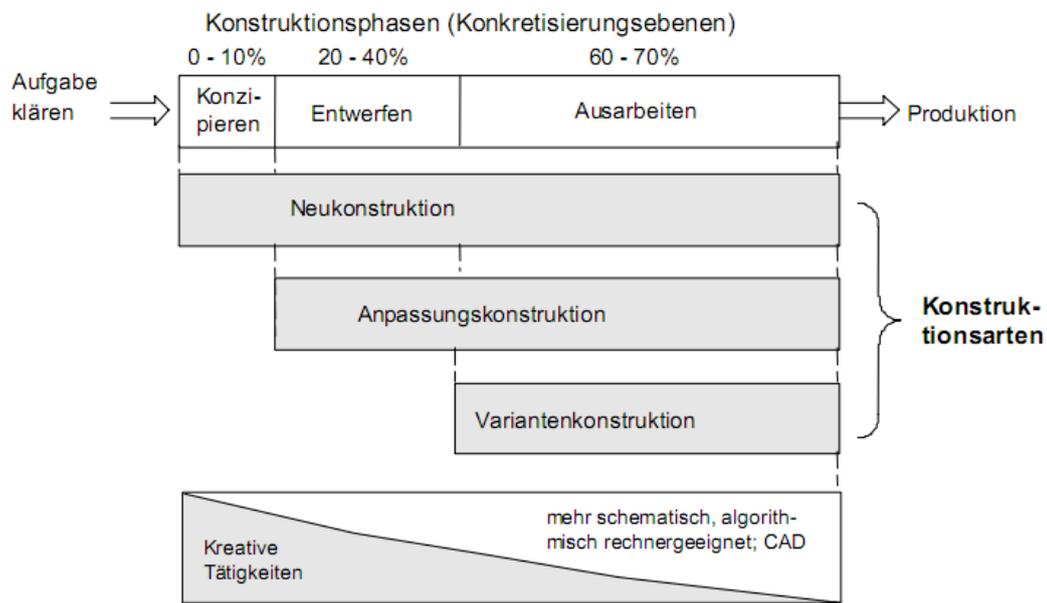
Während der **Ausarbeitungsphase** (Phase IV), welche die Arbeitsschritte 6 („Gestalten des gesamten Produkts“) und 7 („Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben“) umfasst, findet die Erstellung aller notwendigen Fertigungsunterlagen, wie zum Beispiel Fertigungszeichnungen und Festigkeitsnachweise des Gesamtentwurfes statt, welche für die Materialbeschaffung und Produktion benötigt werden. Da die endgültige Gestaltung des Produktes und die Festlegung aller Details sowohl der Entwurfsphase, als auch der Ausarbeitungsphase zugeordnet werden können, ist eine strikte Trennung der beiden Phasen oft nicht ohne weiteres möglich. Das Ergebnis der Ausarbeitungsphase ist die Produktdokumentation, welche alle im Rahmen des Konstruktionsprozesses geschaffenen Unterlagen für die Herstellung und Nutzung des Produktes umfasst. Anschließend erfolgt die Produktion des Produktes [7].

Es hat sich gezeigt, dass die Konzeptphase 0 bis 10 %, die Entwurfsphase 20 bis 40 % und die Ausarbeitungsphase 60 bis 70 % des zeitlichen Aufwandes während des Konstruktionsprozesses in Anspruch nehmen [51]. Dabei sind die frühen Konstruktionsphasen geprägt von kreativen Tätigkeiten wie zum Beispiel der Ideenfindung, während bei späteren Konstruktionsphasen die schematische und algorithmische Vorgehensweise vorherrscht. Abbildung 2.10 verdeutlicht diese Aussagen.

### Konstruktionsarten

Je nach Bearbeitungstiefe eines Produktes, welches durch die Neuheit seiner Merkmale bestimmt ist, kann zwischen den Konstruktionsarten Neukonstruktion, Anpassungskonstruktion und Variantenkonstruktion unterschieden werden, welche dadurch gekennzeichnet sind, dass die Konstruktionsphasen unterschiedlich intensiv oder auch gar nicht durchlaufen werden (siehe Abbildung 2.10). Die Phase der Aufgabenklärung wird bei allen Konstruktionen durchlaufen, um den voraussichtlich nötigen Aufwand zur Bewältigung der nachfolgenden Konstruktionsphasen feststellen zu können. Im Vergleich zu bereits bestehenden Produkten können produktbestimmende Merkmale, wie zum Beispiel Werkstoff, Fertigungsart oder Funktion, den Ausprägungen „neu“,

„ähnlich wie“ und „gleich wie“ zugeteilt werden [7].



**Abbildung 2.10:** Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen [7]. Die Prozentzahlen entsprechen dem zeitlichen Aufwand zur Bewältigung der Konstruktionsphasen in der Praxis [51].

Unter einer **Neukonstruktion** wird eine Konstruktionsaufgabe bezeichnet, bei der nach der Aufgabenklärung alle nachfolgenden Konstruktionsphasen durchlaufen werden. Bei einer Analyse von sechs Werkzeugmaschinenherstellern hat sich gezeigt, dass es sich bei 10 % aller Konstruktionsaufgaben um Neukonstruktionen handelt, bei 15 % um Anpassungskonstruktionen und bei 70 % um Variantenkonstruktionen [49]. Generell muss diesbezüglich mit firmeninternen Schwankungen gerechnet werden. Innovative Neukonstruktionen, die weder firmenintern noch bei Konkurrenten ähnliche Vorläufer aufweisen, sind selten [7].

Bei einer **Anpassungskonstruktion** ist die prinzipielle Lösung (Konzept) bereits bekannt. Es werden Gestalt, Abmessungen, Werkstoff und Fertigungsverfahren an veränderte Anforderungen angepasst [7].

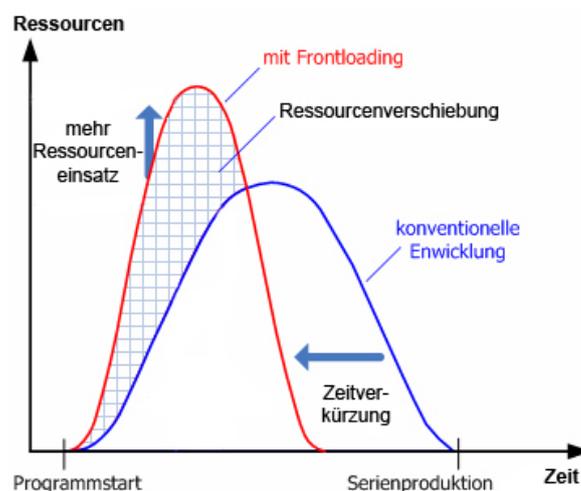
Als **Variantenkonstruktion** wird eine Konstruktionsaufgabe verstanden, bei der Gestalt und Werkstoff bekannt sind und im Wesentlichen nur bestimmte Maße verändert werden. Es wird das Lösungskonzept einer bestehenden Konstruktion übernommen [7].

## Frontloading

Frontloading ist definiert als eine Problemlösungsstrategie zur Erhöhung der Entwicklungsleistung, in dem die Identifizierung und Lösung von Problemen hin zu früheren Phasen des Produktentwicklungsprozesses verschoben wird [57]. Der Ressourceneinsatz wird dadurch ebenfalls zu frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses verschoben. Durch diese Vorgehensweise werden kritische Aktivitäten, welche zu wichtigen Entscheidungen für den weiteren Prozess und zu Problemen führen könnten, möglichst früh durchlaufen.

Probleme, welche während späterer Phasen der Produktentwicklung auftreten, führen zu höheren Kosten, da die Beeinflussungsmöglichkeit (Freiheitsgrad für Entscheidungen) mit zunehmendem Konstruktionsfortschritt abnimmt. Beispielsweise sind Änderungen am bereits bestehenden Werkzeug wesentlich arbeitsintensiver und teurer als Änderungen an der Konstruktionszeichnung während der Formteilentwicklung.

Wie in Abbildung 2.11 dargestellt führt die Anwendung der Frontloading-Strategie neben der Kostenreduktion zu einer Verringerung der Zeit bis zum Start der Serienproduktion, da der erhöhte Ressourceneinsatz bei der frühen Behebung von Problemen in späteren Phasen zu einer deutlichen Zeit- und Kostenersparnis führt. Als Beispiel für Frontloading ist der systematische und mehrfache Einsatz von Spritzgießsimulationen zu nennen.



**Abbildung 2.11:** Ressourceneinsatz über die Zeit für konventionelle Entwicklung (blau) und Entwicklung mit Frontloading (rot) [44].

### 2.2.4 Werkstoffauswahl

Als Werkstoffauswahl werden jene Tätigkeiten während des Konstruktions- und Entwicklungsprozesses verstanden, die dazu dienen, für alle Anforderungen geeignete Materialien auszuwählen, aus denen das Produkt gefertigt wird.

#### Anlässe zur Durchführung einer Werkstoffauswahl

Die Motivation für die Verwendung neuer oder geänderter Werkstoffe kann vielerlei Gründe haben, welche hauptsächlich auf folgenden Sachverhalten beruhen [48]:

- **Gesetze des Marktes:** Ein Produkt wird verbessert oder dessen Herstellkosten reduziert, um im Wettbewerb von Angebot und Nachfrage mithalten zu können. Abhängig von der Produktart (Kleinserien-, Großserien-, Massenprodukt) hat der Anteil der Materialkosten im Vergleich zu den Herstellkosten ein unterschiedliches Gewicht bei der Werkstoffentscheidung. Beispielsweise spielt der Materialkostenanteil bei Kleinserien, die durch Spritzgießen hergestellt werden, eine untergeordnete Rolle, da sich derartige Produkte in der Regel über den technischen Gebrauchswert verkaufen, und der Kunde somit bereit ist, einen entsprechenden Preis für den hohen Nutzen zu bezahlen. Hingegen sind bei Massenprodukten die Materialkosten wesentlich für die Gewinn- und Umsatzsteuerung verantwortlich, da die Materialkosten den größten Teil der Herstellkosten ausmachen.
- **Neue Produkte:** Im Zuge der Konstruktion neuer Produkte finden in der Regel Materialauswahlprozesse statt, sofern das Material nicht durch den Kunden vorgegeben ist. Eine Werkstoffauswahl kann es ermöglichen, neue Märkte zu erschließen. In diesem Sinne muss die Produktstrategie berücksichtigt werden, welche die Materialentscheidung von der gewünschten Marktposition abhängig macht.
- **Neue Fertigungsverfahren:** Da sich viele Werkstoffe nur mit bestimmten Verfahren verarbeiten lassen, kann die Änderung von Fertigungsverfahren die Durchführung einer Materialauswahl zur Folge haben. Umgekehrt ist es auch möglich, dass geänderte Materialien durch andere Verfahren verarbeitet werden müssen.
- **Qualitätsprobleme:** Das Versagen eines Produktes kann neben konstruktiven Mängeln, Überbeanspruchungen, ungeeigneter Fertigungsverfahren oder falscher

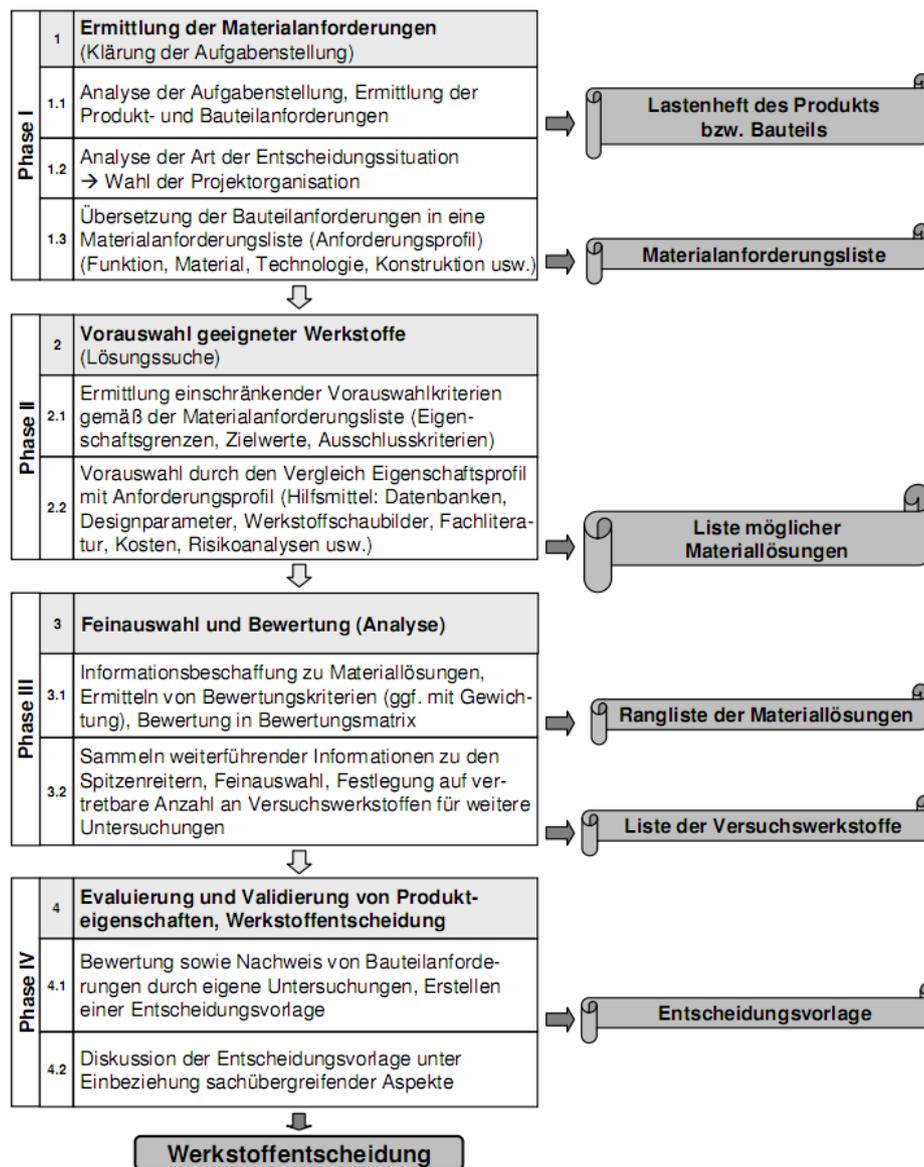
Verwendung durch eine fehlerhafte Materialwahl begründet werden. In vielen Fällen kann der Produktfehler durch die Verwendung eines anderen Werkstoffes gelöst werden.

- **Normen, Vorschriften, Bestimmungen:** Viele Produkte unterliegen Normen, Vorschriften oder Bestimmungen. Deshalb kann die Verwendung oder Vermeidung von Werkstoffen bei bestimmten Anwendungen vorgegeben sein. Beispielsweise müssen nach der Lebensmittelkontakt-Gesetzgebung in Europa Kunststoffprodukte, welche mit Lebensmitteln in Berührung kommen, der EU-Verordnung 20/2011 vom 14. Jänner 2011 genügen. Die Anforderungen an derartige Produkte sind, dass nur zugelassene Substanzen zur Herstellung verwendet werden dürfen und bestimmte Restriktionen und Spezifikationen eingehalten werden müssen [40].
- **Standardisierung:** Da jeder zusätzliche Werkstoff für ein Unternehmen zu einem logistischen Mehraufwand und zusätzlichen Kosten führt, werden Standardisierungen innerhalb eines Unternehmens eingeführt, welche die Werkstoffsorten auf ein Mindestmaß reduzieren.

### Methodik eines systematischen Werkstoffauswahlprozesses

Um aus den Unmengen an Werkstoffinformationen einen geeigneten Werkstoff für eine bestimmte Anwendung auswählen zu können, ist es notwendig, eine systematische Werkstoffauswahl zu betreiben.

Basis der systematischen Werkstoffauswahl ist der allgemeine Problemlösungszyklus, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Analog zu den Konstruktions- und Entwicklungsphasen (siehe Kapitel 2.2.3) wird der Prozess der Werkstoffauswahl in vier Phasen unterteilt, wie in Abbildung 2.12 dargestellt [48]. Dabei wird ausgehend von einer unüberschaubaren Zahl an Werkstoffen mit den Ergebnissen der einzelnen Arbeitsschritte die Zahl der Lösungsmöglichkeiten immer weiter eingeschränkt. Somit wird gewährleistet, dass kein Werkstoff zu Beginn des Auswahlprozesses ausgeschlossen wird.



**Abbildung 2.12:** Prozess der Werkstoffauswahl. Auf der rechten Abbildungshälfte sind die Dokumente angeführt, welche während den einzelnen Phasen entstehen. Das Ergebnis des Gesamtprozesses ist die Werkstoffentscheidung [48].

Zu Beginn des Prozesses erfolgt die **Ermittlung der Materialanforderungen** (Phase I). Diese umfasst die Analyse aller auf die Materialwahl einwirkenden Größen. Die Materialanforderungsliste ist das Ergebnis dieses Teilprozesses, auf der die nachfolgende Lösungssuche beruht [48].

Bei der **Vorauswahl geeigneter Materialien** (Phase II) wird die Materialanforderungsliste auf quantitative Werkstoffeigenschaften, wie zum Beispiel Eigenschaftsgrenzen, untersucht. Stimmen die Eigenschaften von gefundenen Werkstoffen mit denen der

Materialanforderungsliste überein, werden diese Materialien in die Liste möglicher Materiallösungen aufgenommen. Sie ist die Grundlage für nachfolgende Prozessschritte [48].

Die Aufgabe der **Feinauswahl und Bewertung** (Phase III) umfasst die Informationsbeschaffung zu den Materiallösungen. Zu diesem Zweck werden Bewertungskriterien und Gewichtungsfaktoren auf Basis der Forderungen ermittelt, welche es ermöglichen, eine Rangliste der Materiallösungen zu erstellen. Das Sammeln weiterführender und vertiefender Informationen, welches beispielsweise durch Anfragen an den Materialhersteller erfolgen kann, führt zu einer weiteren Verringerung der in Frage kommenden Werkstofflösungen. Außerdem muss auf die Verarbeitbarkeit der Werkstoffe mit angestrebten Fertigungsverfahren geachtet werden. Die aussichtsreichsten Materialien werden in einer Liste von Versuchswerkstoffen zusammengefasst [48].

In der **Evaluierung und Validierung der Produkteigenschaften** (Phase IV) wird durch eigene Untersuchungen bewertet und nachgewiesen, ob das produktspezifische Verhalten des Materials die Forderungen und Wünsche der Produkthanforderungsliste erfüllt. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen wird eine Entscheidungsvorlage erstellt, welche unter Einbeziehung sachübergreifender Aspekte zu einer Werkstoffentscheidung führt und den Werkstoffauswahlprozess abschließt [48].

Es muss beachtet werden, dass die Konstruktions- und Entwicklungstätigkeit sowie die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens sehr eng mit Prozessen der Werkstoffauswahl verbunden ist. Beispielsweise ist eine sinnvolle Auslegung der Wanddicke eines Bauteils hinsichtlich mechanischen Belastungen nur möglich, wenn der verwendete Werkstoff mit seinen Materialdaten bekannt ist.

### 2.2.5 Auswahl von Fertigungsverfahren

Als wesentliche Eigenschaften von Fertigungsverfahren ist deren Wirtschaftlichkeit und die Bedeutung fixer (Maschinen und Werkzeuge) und variabler Kosten (Material und Personal) zu nennen. Außerdem spielt die erreichbare Qualität der Erzeugnisse eine wichtige Rolle. Übergeordnet ist zu überlegen, ob Bauteile durch Eigenfertigung hergestellt oder zugekauft werden sollen. Die Auswahl von Fertigungsverfahren ist als Teil des Konstruktionsprozesses zu sehen und hängt vor allem von folgenden Faktoren ab [18]:

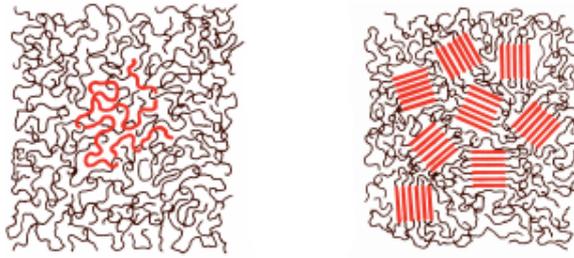
- **Wirtschaftlichkeit:** Jenes Fertigungsverfahren ist zu bevorzugen, welches die Herstellkosten minimiert. Je größer die Stückzahl, desto geringer sind die Herstellkosten des Produktes pro Stück, und desto größer dürfen die Fixkosten ausfallen, da die Fixkosten auf einer größeren Anzahl von hergestellten Produkten verteilt werden. Dadurch kann bei großen Stückzahlen die Anschaffung von teuren Maschinen und Werkzeugen vorteilhaft sein. Bei großen Stückzahlen eignen sich besonders Urform- und Umformverfahren. Spanende Verfahren sind besonders für die Produktion von kleinen Stückzahlen interessant.
- **Qualität:** Geforderte Qualitätsmerkmale des Produktes müssen mit statistischer Sicherheit erreicht werden. Als Qualitätsmerkmal sind beispielsweise Maßtoleranzen zu nennen. Bauteile mit großen Toleranzen werden auf Grund der Wärme- dehnung des Bauteils und des Verschleißes des Werkzeugs vorzugsweise durch Urformen oder Umformen hergestellt. Kleine Toleranzen werden beispielsweise durch spanende Verfahren, wie zum Beispiel Fräsen oder Drehen, erreicht.

## 2.3 Einteilung und Eigenschaften von Kunststoffen

Kunststoffe sind hochmolekulare organische Verbindungen, welche durch chemische Aneinanderlagerung niedermolekularer Grundbausteine (Monomere) durch verschiedenartige chemische Reaktionen entstehen [6].

### 2.3.1 Einteilung

Kunststoffe lassen sich je nach Struktur und Bindungsmechanismus der Makromoleküle in Werkstoffgruppen einteilen: **Thermoplaste** bestehen aus linearen oder verzweigten Kettenmolekülen, welche nicht miteinander vernetzt sind. Thermoplaste ohne kristalline Strukturen werden als *amorphe Thermoplaste* bezeichnet, wie in Abbildung 2.13 (links) schematisch dargestellt. Da sich unter bestimmten Voraussetzungen, wie beispielsweise einem regelmäßigen Aufbau der Makromoleküle, Teile der Makromoleküle aneinander lagern können, entstehen dort kristalline Strukturen. Neben den kristallinen Strukturen befinden sich amorphe, ungeordnete Bereiche der Makromoleküle. Thermoplaste, welche kristalline Strukturen aufweisen, werden als *teilkristalline Thermoplaste* bezeichnet. Ihre Molekülanordnung ist in Abbildung 2.13 (rechts) dargestellt.

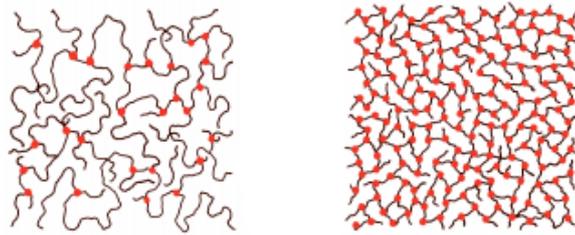


**Abbildung 2.13:** Schematische Darstellung der Molekülanordnung in amorphen (links) und teilkristallinen Thermoplasten (rechts) [15].

Ein besonderes Merkmal von Thermoplasten ist die Möglichkeit, diese Stoffe durch Temperatureinwirkung wiederholt aufschmelzen und erstarren zu können. Die Makromoleküle gleiten bei Überschreitung einer kritischen Temperatur leicht aneinander ab und können in diesem Zustand verformt werden. Bei Unterschreitung dieser kritischen Temperatur verschlaufen die Makromoleküle ineinander und erstarren. Kunststoffverarbeitungsverfahren, wie beispielsweise das Spritzgießen oder die Extrusion, machen sich diese Eigenschaft der Formbarkeit unter Temperatureinwirkung zu nutze.

Sind die einzelnen Makromoleküle chemisch miteinander verbunden, spricht man von vernetzten Makromolekülen. Aufgrund dessen können die Makromoleküle im Gegensatz zu Thermoplasten nicht aneinander abgleiten, was das Eigenschaftsbild deutlich verändert. Unterschieden werden kann dabei zwischen weitmaschig vernetzten Makromolekülen (Elastomeren) sowie engmaschig vernetzten Makromolekülen (Duromeren). **Elastomere** zeichnen sich dadurch aus, dass die Beweglichkeit der Makromoleküle bei Raumtemperatur ausreichend hoch ist, sich reversibel sehr stark verformen zu lassen. Die schematische Molekülanordnung von Elastomeren ist in Abbildung 2.14 (links) dargestellt. **Duromere** sind aufgrund der engmaschigeren Vernetzung steifer, härter und spröder als Elastomere. Abbildung 2.14 (rechts) zeigt die schematische Molekülanordnung von Duromeren. Duromere sind nicht schmelzbar, sondern zersetzen sich, wenn die Temperatur ein bestimmtes Maß überschreitet.

Die Verarbeitung von Duromeren und Elastomeren erfolgt zunächst im unvernetzten Zustand. Während des Härtungsvorganges setzt eine chemische Reaktion ein, durch die die Makromoleküle miteinander vernetzt werden [19].



**Abbildung 2.14:** Schematische Darstellung der Molekülanordnung in Elastomeren (links) und Duromeren (rechts) [15]. Die Punkte stellen chemische Bindungen zwischen den Makromolekülen dar.

### 2.3.2 Eigenschaften

Aufgrund der großen Zahl von Möglichkeiten, verschiedenartige Monomere auf unterschiedliche Weise zu verknüpfen, ergibt sich eine Vielzahl von Eigenschaften, die zu einem außergewöhnlichen Leistungsspektrum von Kunststoffen führen. Aus diesem Grund werden Kunststoffe oft als „Werkstoff nach Maß“ bezeichnet [22]. Einige der besonderen Eigenschaften von Kunststoffen, welche zu einem Vorteil in deren Einsatz führen können, sind im Folgenden dargestellt [6, 13]:

- Verglichen mit Metallen und Keramiken sind Kunststoffe mit einer Dichte zwischen  $0,8$  und  $2,2 \text{ g/cm}^3$  leicht.
- Aufgrund der im Vergleich zu Metallen deutlich niedrigeren Verarbeitungstemperaturen lassen sich Kunststoffe wirtschaftlich und mit geringem Energieeinsatz verarbeiten.
- Kunststoffe eignen sich hervorragend für die Massenproduktion.
- Kunststoffe zeigen ein breites Spektrum an mechanischen Eigenschaften, das weitgehend einstellbar ist. Dabei können Kunststoffe weich und dehnbar, aber auch hart und steif sein.
- Für eine Vielzahl an Anwendungsgebieten ist die gute thermische und elektrische Isolationsfähigkeit von Kunststoffen essentiell.
- Die Möglichkeit, Kunststoffe fast beliebig einzufärben zu können, macht deren Verwendung auch optisch interessant.
- Aufgrund der hohen chemischen Beständigkeit einiger Kunststoffe können diese in Umgebungen eingesetzt werden, wo andere Werkstoffe innerhalb kurzer Zeit versagen.

### 2.3.3 Werkstoffverhalten

#### Rheologisches Werkstoffverhalten

Die Rheologie ist die Wissenschaft von der Deformation und dem Fließen von Körpern. Besonders in der Verarbeitung ist die Kenntnis des rheologischen Werkstoffverhaltens von großer Bedeutung, da Kunststoffe meist in schmelzeförmigem Zustand verarbeitet werden. *Kunststoffe in geschmolzener Form* liegen vor, wenn die Erweichungs- bzw. Schmelztemperatur überschritten wird. Das Fließverhalten von Kunststoffschmelzen wird durch die Viskosität charakterisiert, die den inneren Widerstand der Schmelze gegen eine von außen einwirkende Beanspruchung beschreibt [15]. Die Schmelze wird in Verarbeitungsmaschinen hauptsächlich geschert, da Kunststoffschmelzen in der Regel an den Oberflächen der Werkzeuge haften [22]. Diese Scherung wird durch die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  beschrieben.

Steigt die Schubspannung  $\tau$  linear mit der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  an, spricht man von Newtonschem Fließen. Schubspannung und Schergeschwindigkeit sind demnach proportional (siehe Gleichung 2.4). Proportionalitätsfaktor ist die dynamische Viskosität  $\eta$ . Der bekannteste Vertreter von Newtonschen Fluiden ist Wasser.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

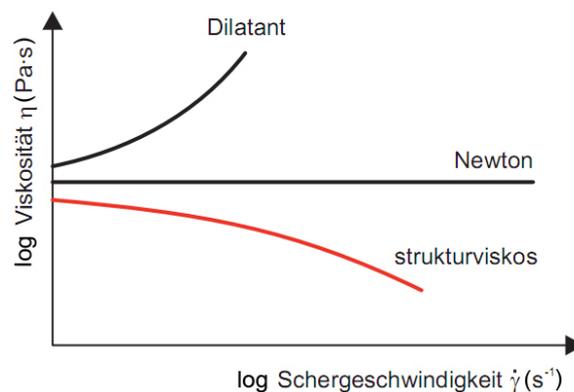
Kunststoffschmelzen verhalten sich hingegen nicht newtonsch. Wirkt eine Scherbeanspruchung auf die Kunststoffschmelze ein, verhält sich die Spannungszunahme degressiv (Schubspannung und Schergeschwindigkeit sind nicht mehr proportional). Die dynamische Viskosität  $\eta$  ist in diesem Fall direkt von der Schergeschwindigkeit abhängig (siehe Gleichung 2.5). Man spricht in diesem Fall von strukturviskosem Fließen.

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Wird die Viskosität  $\eta$  über der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  aufgetragen (doppellogarithmisch), erhält man eine Viskositätskurve (siehe Abbildung 2.15). Es ist für strukturviskose Fluide klar zu erkennen, dass die dynamische Viskosität für kleine Schergeschwindigkeiten zunächst relativ konstant bleibt, jedoch mit zunehmender Schergeschwindigkeit

abnimmt. Dieses Verhalten äußert sich zum Beispiel während des Einspritzvorganges beim Spritzgießen durch eine überproportionale Zunahme des Massedurchsatzes  $\dot{m}$ , wenn der Einspritzdruck vergrößert wird.

Die Fließfähigkeit von Kunststoffschmelzen ist zusätzlich zur Schergeschwindigkeit abhängig von Temperatur und hydrostatischem Druck. In der Praxis ist der Einfluss des hydrostatischen Drucks jedoch von vergleichsweise geringer Bedeutung [22].



**Abbildung 2.15:** Schematische, doppellogarithmische Darstellung der Viskositätskurven viskoser Flüssigkeiten [15].

### Mechanisches Werkstoffverhalten

Die Gebrauchstemperatur von Kunststoffen liegt im Gegensatz zu vielen anderen Werkstoffen, wie zum Beispiel Metallen oder Keramiken, relativ nahe an der Erweichungs- bzw. Schmelztemperatur. Aus diesem Grund weisen *Kunststoffe in erstarrter Form* eine Mischform aus elastischem und viskosem Verhalten auf. Diese Werkstoffeigenschaft wird als Viskoelastizität definiert [19].

Eine zeitliche Abhängigkeit des Werkstoffverhaltens lässt sich unter der Wirkung äußerer Belastungen beobachten. Dabei nimmt die Deformation unter konstanter Last zu („Kriechen“), während die Spannung unter einer konstanten Verformung mit der Zeit abnimmt („Relaxieren“). Neben dem zeitabhängigen Werkstoffverhalten ist auch das temperaturabhängige Werkstoffverhalten eine wesentliche Eigenschaft von Kunststoffen: Bei erhöhter Temperatur laufen zeitabhängige Erscheinungen beschleunigt ab, während derartige Fließvorgänge bei sehr tiefen Temperaturen fast vollständig unterdrückt werden. Das genannte Verformungsverhalten ist auf molekulare Umlagerungsvorgänge

zurückzuführen, welche bei höheren Temperaturen schneller ablaufen.

Kunststoffe können nur dann erfolgreich eingesetzt werden, wenn deren genannten Eigenschaften und ihr charakteristisches Werkstoffverhalten berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist es unbedingt notwendig, sich sowohl im Zuge der Materialauswahl mit der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Werkstoffe und deren Kennwerten zu beschäftigen, als auch bei der Bauteilkonstruktion auf eine kunststoffgerechte Vorgehensweise zu achten, welche sich aus den Eigenschaften dieser Materialien ergibt. Zudem ist es erforderlich, geeignete Fertigungsverfahren für zu verarbeitende Kunststoffe einzusetzen.

## 2.4 Prototypen aus Kunststoff

Bei einem Prototyp handelt es sich um ein Versuchsmodell eines geplanten Produktes oder Bauteils als Vorbereitung einer Serienproduktion, welches während des gesamten Produktentwicklungsprozesses Verwendung findet. Prototypen werden vor allem genutzt, um Entwicklungsergebnisse anschaulich präsentieren zu können, sowie um Fehler aller Art frühzeitig zu erkennen. Im technischen Prototypenbau wird je nach Detaillierungsgrad zwischen folgenden Arten von Prototypen unterschieden [23, 3]:

- Ein **Designprototyp** dient als Konzeptmodell zur Überprüfung ästhetischer und ergonomischer Merkmale. Dabei wird bewusst auf funktionale, mechanische oder werkstoffspezifische Anforderungen verzichtet. Konzeptmodelle sind hilfreich, um die Ideen neben zweidimensionalen Darstellungen „begreifbar“ zu machen. Dabei können grobe Gestaltungsfehler bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und unter Aufbringung geringer Kosten erkannt und behoben werden.
- Ein **geometrischer Prototyp** ist ein maßgenaues Modell für erste Montage- und Gebrauchsversuche und zur Konkretisierung des (Material-)Anforderungsprofils. Neben ergonomischen Qualitäten wird die Bedienbarkeit grob verifiziert, wobei die Modelle üblicherweise aus einem noch nicht der Serie ähnlichen Werkstoff hergestellt werden. Der Detaillierungsgrad dieser Modelle entspricht dem Serienprodukt.
- Ein **Funktionsprototyp** ist ein Prototyp, der bereits entscheidende funktionale Eigenschaften eines später in Serie gefertigten Bauteils aufweist. Spätere Produkteigenschaften werden durch Funktionsprototypen repräsentiert. Der verwendete

Werkstoff sollte dem Serienwerkstoff hinsichtlich Dichte, Festigkeit und Temperaturbeständigkeit möglichst ähnlich sein, um Fehler in der Konstruktion und Materialauswahl erkennen zu können.

- Ein **technischer Prototyp** ist ein mit dem Endprodukt weitgehend identisches Versuchsmodell, welches nach Möglichkeit im serienidentischen Material angefertigt wird. Die Herstellung erfolgt durch ein seriennahes Verfahren, um Einflüsse des Fertigungsprozesses auf das Produkt und dessen Funktion zu erfassen. Der technische Prototyp stellt die letzte Möglichkeit dar, Entwicklungsfehler vor der Serienfertigung vergleichsweise kostengünstig beheben zu können.

Es gibt eine Vielzahl von Verfahren, um Prototypen herzustellen. Abhängig vom Detaillierungsgrad, der Stückzahl, der Geometriekomplexität und den Anforderungen an die Prototypen wird ein geeignetes Verfahren ausgewählt.

#### 2.4.1 Konventionell hergestellte Prototypen

Spanende Bearbeitungsverfahren wie Bohren, Fräsen, Drehen, Sägen oder Schleifen werden allgemein eingesetzt, um Prototypen auch aus Polymerwerkstoffen herzustellen. Ausgangsbasis bilden dabei zumeist Halbzeuge in Form von Stäben oder Platten. Diese Art der Prototypenherstellung wird vor allem bei einfachen Modellen und geringer Stückzahl eingesetzt, um Modelle mit hoher Genauigkeit zu erhalten.

#### 2.4.2 Rapid Prototyping

Unter Rapid Prototyping werden generative Verfahren verstanden, mit deren Hilfe in frühen Phasen der Produktentwicklung eine schnelle Erstellung von Modellen, Prototypen und Vorserien für Designreviews, Funktions- sowie Ergonomietests ermöglicht wird. Ausgehend von CAD-Daten in Form von dreidimensionalen Geometrieinformationen werden Prototypen schichtweise durch die Anwendung unterschiedlicher Verfahren aufgebaut. Der Aufbau kann sowohl durch Verfestigung flüssiger Materialien (Polymerisationsverfahren), als auch durch Generieren aus festen Phasen erfolgen (zum Beispiel durch Aufschmelzen fester Materialien und anschließendem Erstarren in gewünschter Form). Da keine Formen für die Herstellung erforderlich sind, bieten generative Verfahren hinsichtlich Formmöglichkeiten eine mit keiner anderen Technik vergleichbare hohe Flexibilität [16]. Im Folgenden werden die beiden gebräuchlichsten generativen Verfahren zur Herstellung von Kunststoffprototypen dargestellt.

## Stereolithographie

Die Stereolithographie (STL) basiert auf der lokalen Aushärtung eines flüssigen, lichtempfindlichen Kunstharzes (Photopolymer) unter Einwirkung eines UV-Laserstrahles. Der Laserstrahl wird durch eine Optik und einen dynamischen Spiegel umgelenkt (siehe Abbildung 2.16). Dabei entstehen ausgehend von 3D-Geometriedaten komplexe Bauteile durch schichtweises Belichten einzelner Querschnitte, wobei die Schichtstärken zwischen 0,05 und 0,25 mm liegen [11]. Nach dem Belichten und Aushärten einer Schicht wird das Bauteil, welches sich auf einer Plattform befindet, ein wenig abgesenkt. Der Wischer bewegt sich in horizontaler Richtung über das abgesenkte Bauteil, wodurch weiteres Kunstharz zur Verfügung gestellt wird. Da das Modell in einer Flüssigkeit aufgebaut wird, werden für überhängende Bereiche Stützkonstruktionen benötigt, welche nach der Erstellung des Prototyps wieder entfernt werden. Nach der Erstellung des Modells im Kunstharzbad muss das Modell zur vollständigen Aushärtung unter Einwirkung von UV-Licht gelagert werden.

STL kommt sowohl bei der Herstellung von Geometrie- und Funktionsprototypen, als auch zur Bereitstellung von Modellen für das Vakuumgießen zum Einsatz. Die erzielbare Genauigkeit dieses Verfahrens liegt im Bereich von 0,05 mm und gilt als das genaueste aller generativen Verfahren. Stereolithographiemodelle können spanend nachbearbeitet werden. Je nach geforderter Genauigkeit und Bauraum bewegen sich die Kosten in der Größenordnung von unter hundert bis einigen tausend Euro [16].

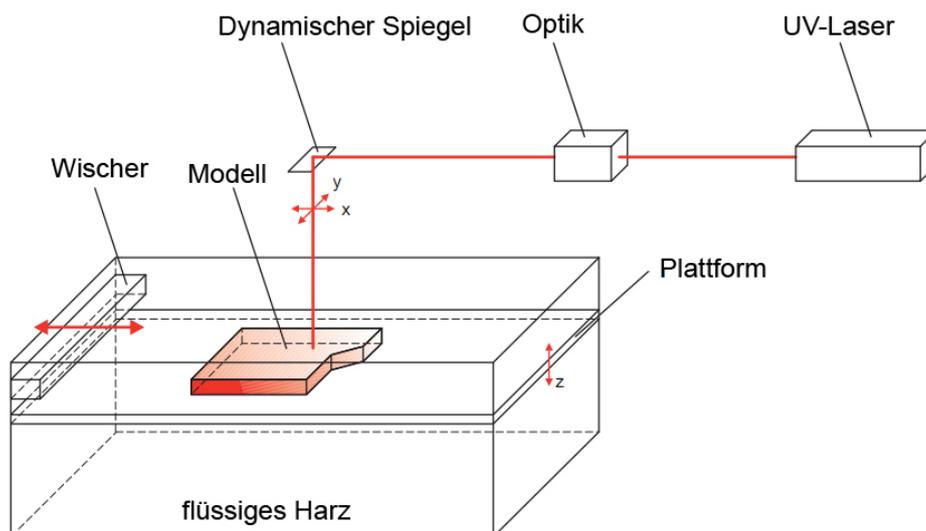


Abbildung 2.16: Prinzip einer STL-Anlage [15].

### Selektives Lasersintern

Beim selektiven Lasersintern (SLS) werden räumliche Strukturen durch Wärmeeinwirkung eines Laserstrahles auf pulverförmige Ausgangsstoffen über ihre Schmelztemperatur hergestellt. Einzelne Materialpartikel werden dabei miteinander verschmolzen. Nach dem Einwirken des Laserstrahles auf einen Bauteilquerschnitt in einem Pulverbett erfolgt der Pulverauftrag durch eine Walze, welche gleichzeitig zur Glättung des Pulverbettes verwendet wird. Durch schichtweises Belichten einzelner Bauteilquerschnitte und anschließendem Pulverauftrag entsteht der fertige Prototyp. Da der entstehende Prototyp vom Pulver umgeben ist, müssen überhängende Bereiche nicht abgestützt werden [11].

Durch SLS werden vor allem technische Prototypen hergestellt. Es können je nach verwendetem Material Genauigkeiten im Bereich von bis zu 0,1 mm erzeugt werden, wobei die Genauigkeit grundsätzlich durch die Größe der Pulverteilchen limitiert ist. Die verwendeten Materialien sind amorphe und teilkristalline Kunststoffe, wobei Polyamid am häufigsten eingesetzt wird. Zur Erhöhung der mechanischen Belastbarkeit des Prototyps wird gelegentlich eine Polyamid-Aluminium-Pulvermischung (Alumide) verwendet. Im Gegensatz zur Stereolithographie ist das selektive Lasersintern ein einstufiges Verfahren, bei dem außerdem eine größere Materialpalette abgedeckt werden kann. Zur Erzeugung dichter Bauteile werden die Modelle nach der Entnahme aus dem Pulverbett mit Epoxidharz infiltriert [16].

### 2.4.3 Vakuumgießen

Beim Vakuumgießen wird eine Gussform aus Silikonkautschuk verwendet, welche durch das Einbetten eines Urmodells (zum Beispiel ein Rapid-Prototyping-Modell) in das zunächst unvernetzte Silikon entsteht. Nach der Aushärtung des Silikons wird die Gussform aufgeschnitten, das enthaltene Urmodell entnommen und Einfüll- und Entlüftungskanäle angebracht.

Zur Herstellung von Bauteilen wird die Form geschlossen und unter Vakuum mit einem flüssigen Gießharz gefüllt. Nach dem Aushärten des Gießharzes wird entformt und die Gussform steht für die Herstellung weiterer Abgüsse zur Verfügung. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen vor allem in der hohen erzielbaren Genauigkeit, der kostengünstigen und raschen Formherstellung sowie der Möglichkeit, Hinterschnitte zu

realisieren. Der Nachbearbeitungsaufwand ist minimal. Als Nachteil ist insbesondere der Verschleiß der Silikonform zu nennen, da durchschnittlich nur 15 bis 25 Abgüsse pro Form durchgeführt werden können. Das Vakuumgießen kommt vor allem bei der Anfertigung einer größeren Anzahl von Prototypen oder Kleinserien zur Anwendung [16].

## 2.5 Spritzgießen von Kunststoffen

Spritzgießen ist ein diskontinuierliches Verfahren zur Herstellung von Formteilen aus makromolekularen Formmassen, wobei das Urformen unter Druck geschieht [27]. Mehr als ein Drittel aller Thermoplaste werden durch Spritzgießen verarbeitet und über die Hälfte aller Kunststoffverarbeitungsmaschinen sind Spritzgießmaschinen [43]. Auf Grund von einigen charakteristischen Merkmalen eignet sich der Spritzgießprozess hervorragend, um Massenprodukte sowohl einfacher als auch komplexer Geometrie herzustellen. Die wichtigsten Merkmale des Spritzgießens sind [22]:

- direkter Weg vom Rohstoff zum Fertigteil,
- keine oder nur geringe Nachbearbeitung des Formteils,
- vollautomatisierbares Verfahren und
- hohe Reproduzierbarkeit der Fertigung.

Mit Hilfe des Spritzgießens ist es möglich, eine sehr große Bandbreite von Formteilgrößen herzustellen. Die Massen der herstellbaren Formteile liegen in der Größenordnung zwischen  $10^{-6}$  kg (zum Beispiel kleinste Zahnräder) und  $10^2$  kg (Müllcontainer).

Die Basiselemente einer Spritzgießmaschine (siehe Abbildung 2.17) sind das Maschinenbett, die Schließeinheit, das Werkzeug und das Plastifizieraggregat. Die einzelnen Verfahrensschritte werden durch die Steuerung der Maschine koordiniert. Die Temperiervorrichtung hat die Aufgabe, durch die Kunststoffschmelze in das Werkzeug eingebrachte Wärmeenergie abzuführen.

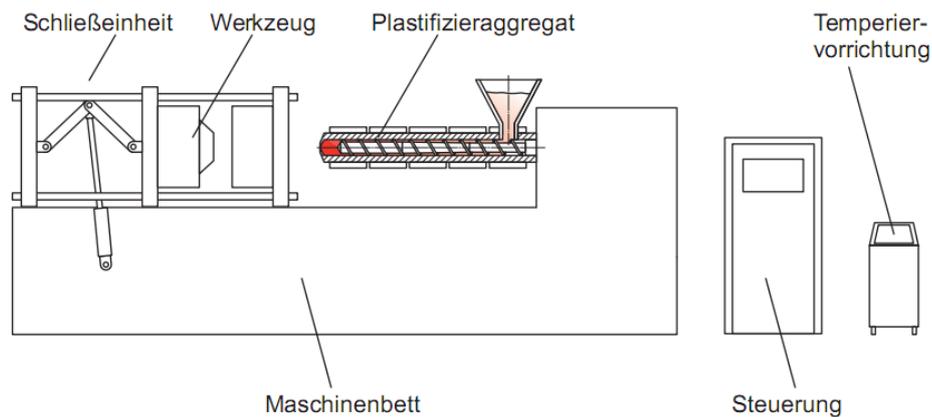


Abbildung 2.17: Schematischer Aufbau einer Spritzgießmaschine [15].

### 2.5.1 Verfahrensablauf

Der Verfahrensablauf ist in Abbildung 2.18 dargestellt und wiederholt sich zyklisch. Nach dem *Schließen des Werkzeuges* (Schritt 1) erfolgt das *Einspritzen des dosierten Materials* in das Werkzeug (Schritt 2). Dabei fährt die Schnecke ohne Rotation nach vorne und schiebt so die dosierte Masse durch eine Düse in das Werkzeug.

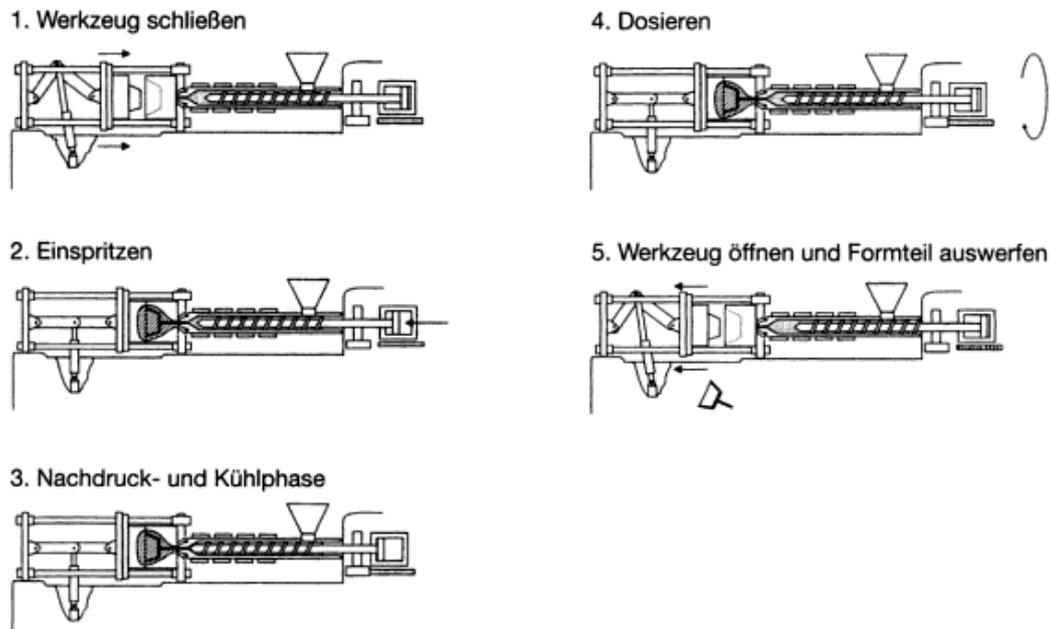
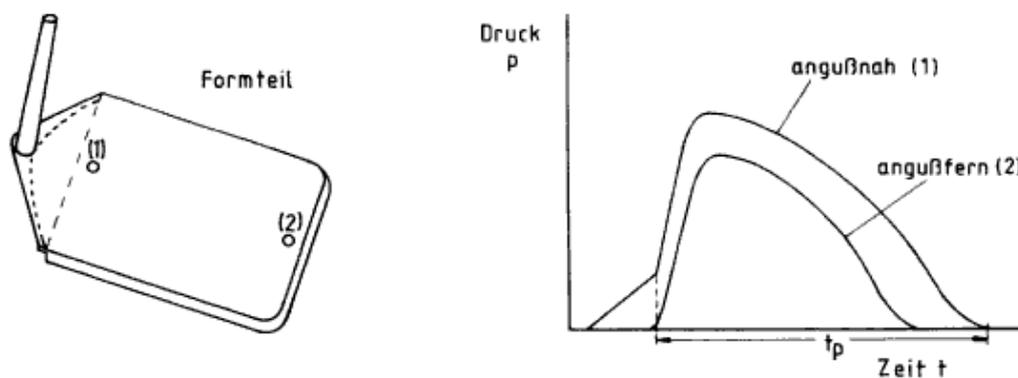


Abbildung 2.18: Verfahrensablauf beim Spritzgießen [22].

Die Einspritzgeschwindigkeit kann beispielsweise in Form eines Sollwertes vorgegeben werden. Während der Einspritzphase steigt der durch die Schnecke aufzubringende

Druck an, da zur Aufrechterhaltung des Fließvorganges im Werkzeug mit zunehmender Werkzeugfüllung ein steigender Druck notwendig ist, um einen vorgegebenen konstanten Einspritzvolumenstrom aufrecht zu erhalten. Aus diesem Grund ergibt sich angussnah ein höherer Druck als angussfern (siehe Abbildung 2.19). Diese Druckunterschiede sind neben der Geometrie des Formteils abhängig vom Material und den Verarbeitungsbedingungen. Aus der Form von Druckkurven lassen sich wichtige Hinweise auf potentielle Fehlerquellen bei der Produktion gewinnen [22]. Eine Rückstromsperre sorgt dafür, dass während des Einspritzens keine Schmelze zurück in die Plastifiziereinheit fließt. Mit dem Einspritzen beginnt die Kühlphase, da das flüssige Material mit der kalten Werkzeugwand in Berührung kommt und Wärmeenergie abgibt. Ist das Formteil volumetrisch gefüllt, findet eine Verdichtung der Masse statt, wodurch der Druck in der Kavität stark ansteigt [22].



**Abbildung 2.19:** Angussnah (1) und angussfern (2) gemessener Druckverlauf in einem stirnseitig angespritzten Formteil [22].

Wird im Werkzeug ein definiertes Druckniveau erreicht, erfolgt die Umschaltung von der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase auf die druckgeregelte *Nachdruckphase* (Schritt 3). Dabei bewegt sich die Schnecke nur noch vergleichsweise langsam. Das Ziel der Nachdruckphase ist es, die infolge der Volumenschrumpfung beim Erstarrungsvorgang auftretende Volumenschwindung im Formteil durch Nachdrücken von Schmelze zu kompensieren. Infolge der Erstarrungsvorgänge nimmt der Druck im Formteil mit der Zeit ab. Die Nachdruckphase ist beendet, sobald auf Grund der fortschreitenden Erstarrung keine Schmelze mehr in das Formteil nachgedrückt werden kann. Wird die Nachdruckzeit oder die Nachdruckhöhe zu gering gewählt, treten in Folge der nicht kompensierbaren Volumenschwindung Einfallstellen am Formteil auf [22]. Ab dem Zeitpunkt der Erstarrung des Anschnittes kann die erneute *Dosierung* erfolgen (Schritt

4). Durch Friktionswärme, welche bei der Schneckenrotation auf Grund der Reibung zwischen Material und Schnecke bzw. Zylinderwand entsteht, wird das Material, welches über den Trichter in die Plastifiziereinheit eingezogen wurde, plastifiziert. Zusätzlich wird ein weiterer Anteil der benötigten Wärmeenergie durch die den Zylinder umgebenden Heizbänder über Wärmeleitung zugeführt. Da die in den Schneckenorraum geförderte Masse Platz benötigt, wird die Schnecke axial nach hinten bewegt [22].

Infolge mangelnder Formstabilität durch noch nicht erstarrte Bereiche muss das Formteil zur weiteren Abkühlung im Werkzeug verbleiben. Erst nachdem ein bestimmtes werkstoffspezifisches Temperaturniveau unterschritten wurde, kann das Werkzeug geöffnet und das Formteil ausgeworfen werden (Schritt 5). Diese zusätzlich erforderliche Verweilzeit im Werkzeug bis zur Entformung wird „Restkühlzeit“ genannt. Die gesamte Kühlzeit beginnt mit dem Einspritzvorgang und endet mit dem Auswerfen des Formteils. Um eine möglichst hohe Ausstoßleistung zu erreichen, muss die Zykluszeit - und somit auch die Kühlzeit - soweit wie möglich reduziert werden.

## 2.5.2 Werkzeug

Das Werkzeug ist die zentrale Baugruppe bei der Spritzgießfertigung. Es muss für jeden zu fertigenden Artikel entworfen werden. Somit haben Fehler bei der Konstruktion des Werkzeugs eine direkte Auswirkung auf die Formteilqualität. Das Werkzeug erfüllt zwei grundlegende Aufgaben [22]:

### 1) *Technologische Aufgaben*

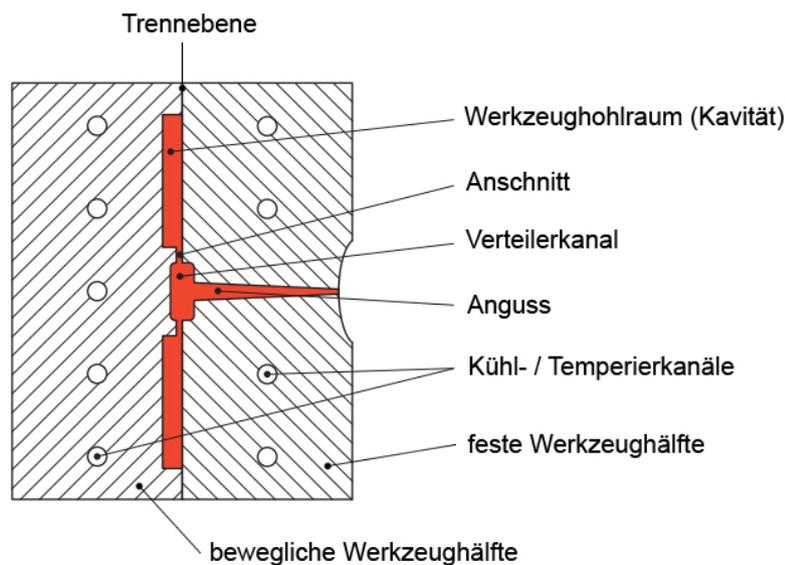
- Aufnahme und Verteilung der Schmelze
- Abkühlen der Schmelze
- Entformung

### 2) *Konstruktive Aufgaben*

- Kraftaufnahme
- Bewegungsübertragung
- Führung der Werkzeugteile

### Aufbau eines Spritzgießwerkzeuges

Abbildung 2.20 stellt den grundsätzlichen Aufbau eines Spritzgießwerkzeuges dar. Die *Trennebene* teilt das Werkzeug in eine *bewegliche Werkzeughälfte* und in eine *feste Werkzeughälfte*. Der Hohlraum in der Mitte des Werkzeuges wird *Kavität* genannt. Durch die Kavität ist die Geometrie des zu erzeugenden Bauteiles definiert, in die die Kunststoffschmelze hineingedrückt wird und erstarrt. Der *Anguss* und der *Verteilerkanal* erfüllen die Aufgabe, von der Plastifiziereinheit bereitgestellte Kunststoffschmelze zur Kavität zu führen und den durch die Maschine aufgebrachten Druck auf das Material in der Kavität zu übertragen. Die Verbindung zwischen Verteilerkanal und Bauteil wird *Anschnitt* genannt. Die Entformung des Bauteiles erfolgt durch eine Öffnungsbewegung der beweglichen Werkzeughälfte und die Betätigung von Auswerferstiften, die das Bauteil von der beweglichen Werkzeughälfte abstoßen. *Kühl- und Temperierkanäle* dienen der Werkzeugtemperierung durch ein Temperiermedium.



**Abbildung 2.20:** Schematischer Aufbau eines Spritzgießwerkzeuges (nach [15]).

### Werkzeugtemperierung

Beim Einspritzvorgang wird mit der Schmelze auch Wärmeenergie in die Kavität eingebracht. Diese Wärmeenergie wird aus dem Formteil in das Werkzeug geleitet und breitet sich in diesem aus. Um die Kühlzeit und in Folge dessen die Zykluszeit zu verringern, wird das Werkzeug temperiert, indem ein Temperiermedium (zum Beispiel Wasser) durch Bohrungen (sogenannte Temperierkanäle) im Werkzeug fließt. Das Tem-

periermedium nimmt die in das Werkzeug eingebrachte Wärme auf und transportiert sie aus dem Werkzeug. Nach einigen Spritzgießzyklen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen eingebrachter und abgeführter Wärmeenergie ein. Die daraus resultierende Werkzeugwandtemperatur liegt im Idealfall möglichst nahe an der vom Rohstoffhersteller angegebenen Werkzeugtemperatur, um ein qualitativ hochwertiges Formteil zu erzeugen. Die Temperierung des Temperiermediums erfolgt durch Wärmetauscher, die sogenannten Temperieraggregate [22].

### Angusssystem

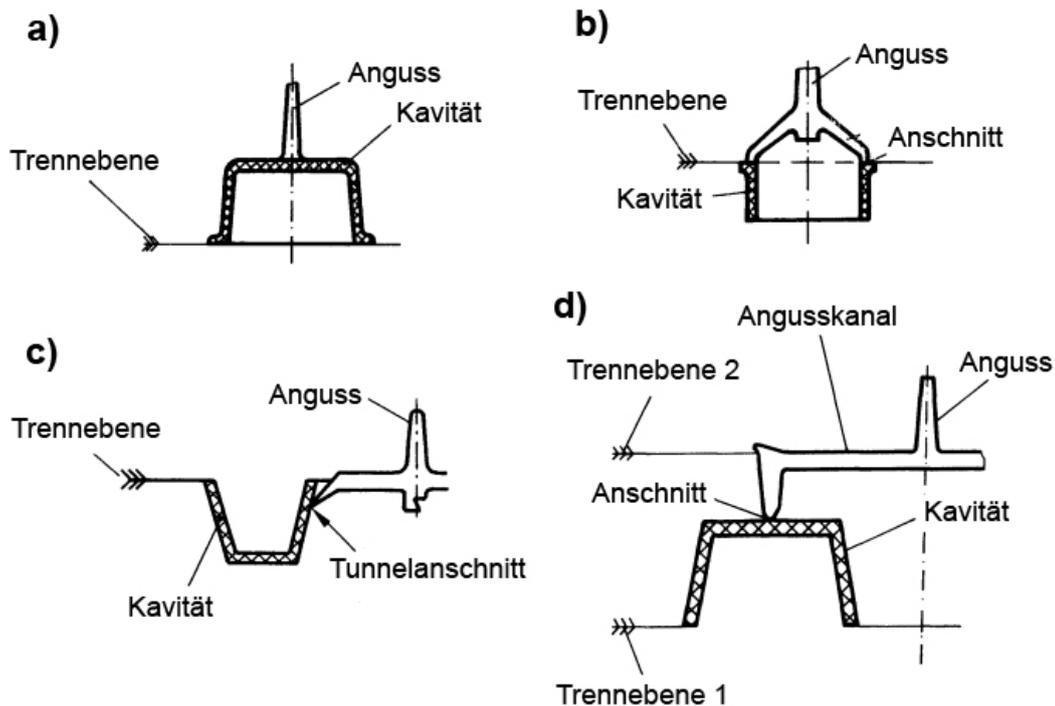
Durch das Angusssystem wird die von der Plastifiziereinheit kommende Kunststoffschmelze in die Kavität geleitet. Die rheologische Auslegung des Angusssystems beeinflusst den Spritzgießprozess und somit auch die Qualität des Formteils maßgeblich. Komponenten des Angusssystems sind der Anguss, der Verteilerkanal, und der Anschnitt. Es gibt eine Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten zur Realisierung eines Angusssystems. Grundsätzlich können Angusssysteme folgendermaßen eingeteilt werden [20]:

1. Anguss bleibt nach der Entformung am Formteil und muss durch mechanische Nachbearbeitung entfernt werden.
2. Anguss wird bei der Entformung automatisch vom Formteil getrennt. Die Entformung erfolgt separat.
3. Anguss wird bei der Entformung automatisch vom Formteil getrennt. Der Anguss bleibt dabei im Werkzeug.

Bei den Ausführungen 1 und 2 handelt es sich um *Standardsysteme*, bei denen das Angusssystem in das Werkzeug eingearbeitet und nicht temperiert ist. Die Schmelze im Angusssystem erstarrt daher während des Zyklus und muss nach jedem Einspritzvorgang mit dem Formteil entformt werden. Wird das Angusssystem temperiert und gegen das Werkzeug isoliert, spricht man von einem *Heißkanalsystem* (Ausführung 3). Die Temperatur dieses Systems liegt im Bereich der Schmelztemperatur des Materials. Somit erstarrt die Schmelze im Angusssystem nicht und muss nicht entformt werden. Vorteil von Heißkanalsystemen ist der geringere Materialverbrauch, da die Schmelze bis zur Kavität geleitet wird und nicht im Angusskanal erstarrt. Nachteile sind zum Beispiel erhöhte Kosten, die ein Heißkanalsystem mit sich bringt. Heißkanalsysteme

sind vor allem interessant, wenn sehr hohe Stückzahlen produziert werden sollen und sich somit die Zykluszeit besonders entscheidend auf die Produktkosten auswirkt [20].

Abbildung 2.21 stellt vier gebräuchliche Möglichkeiten für die Ausführung eines Standardangussystems dar. Der *Stangenanguss* (a) ist die einfachste Ausführung, bei der die Schmelze direkt über den Anguss in die Kavität gedrückt wird. Er wird in erster Linie für temperatursensible und hochviskose Materialien, sowie für Formteile mit großen Wandstärken eingesetzt, um geringe Toleranzen zu erhalten. Der Anguss muss allerdings im Zuge einer Nachbearbeitung vom Formteil getrennt werden. Der *Schirmanguss* (b) kommt bei rotationssymmetrischen Formteilen zum Einsatz, da die Schmelze gleichmäßig über den Umfang verteilt wird und stirnseitig in das Formteil eintritt. Somit können Bindenähte vermieden werden, was neben der Verbesserung der optischen Qualität zu einer Erhöhung der Festigkeit des Formteiles führt. Der *Tunnelanguss* (c) wird vor allem bei kleinen Formteilen in Mehrkavitätenwerkzeugen verwendet. Bei der Entformung wird der Anguss durch die Öffnungsbewegung der beweglichen Werkzeughälfte automatisch abgeschert. Auf Grund des vergleichsweise geringen Angussquerschnittes bringt der Tunnelanguss einen hohen Druckverlust mit sich, was sich bei komplizierten Bauteilen problematisch auf die Qualität auswirkt. Der *Punktanguss* (d) zählt zu den Angussystemen, bei denen der Anguss automatisch vom Formteil getrennt wird und die Entformung separat erfolgt. Um die separate Entformung zu ermöglichen, werden aufwändigere und teurere Werkzeuge mit zwei Trennebenen verwendet (3-Platten-Werkzeug) [20].



**Abbildung 2.21:** a) Stangenanguss, b) Schirmanguss, c) Tunnelanguss, d) Punktanguss [20].

### Werkzeugmaterialien

Beim Spritzgießen kann eine Vielzahl an Metallen und Metalllegierungen als Werkzeugmaterialien verwendet werden. Die Entscheidung für ein bestimmtes Werkzeugmaterial hängt neben dem zu verarbeitenden Material von wirtschaftlichen Überlegungen ab, da sich die Kosten von Werkzeugen unterschiedlicher Materialien stark unterscheiden. Neben den Materialkosten sind insbesondere die Bearbeitungskosten verschiedener Materialien zu nennen. In einer Form können für verschiedene Komponenten unterschiedliche Werkzeugmaterialien verwendet werden, um die jeweiligen Vorteile bestmöglich auszunutzen [20].

Als Werkzeugmaterial für Werkzeuge mit hoher Lebensdauer wird vor allem *Stahl* verwendet. Werkzeugstähle lassen sich wirtschaftlich bearbeiten, vergüten und weisen eine hohe Festigkeit und Zähigkeit auf. Außerdem sind Werkzeugstähle sehr resistent gegenüber Hitzeeinwirkung, Abnutzung und Korrosion [20].

Neben Stahl werden auch *Nichteisenmetalle* als Werkzeugmaterialien verwendet, wie zum Beispiel Kupfer-, Zink-, Aluminium- und Bismuth-Zinn-Legierungen. Kupfer-

Legierungen zeichnen sich insbesondere durch ihre hohe Wärmeleitfähigkeit und Zähigkeit aus und werden daher gerne als Zusatzmaterialien eingesetzt, wie zum Beispiel in Bereichen am Formteil, wo vergleichsweise viel Wärme ins Werkzeug abzuführen ist. Zink-Legierungen weisen wie Kupfer-Legierungen eine hohe Wärmeleitfähigkeit auf und werden auf Grund ihrer unterlegenen mechanischen Eigenschaften für Prototypen-Werkzeuge eingesetzt. Aluminium-Legierungen weisen eine geringe Dichte, gute Bearbeitbarkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit und eine gute Resistenz gegen Korrosion auf, und eignen sich insbesondere zur Produktion geringer Stückzahlen. Die Lebenszeit von Werkzeugen hängt ab vom verarbeiteten Kunststoff (verstärkt oder unverstärkt), den Verarbeitungsbedingungen (Einspritzdruck, Temperatur) und der Geometrie des Formteils [20]. Mit Aluminiumwerkzeugen können Ausbringungsmengen von 15.000 bis 200.000 Stück erreicht werden [21].

### 2.5.3 Spritzgießsimulation

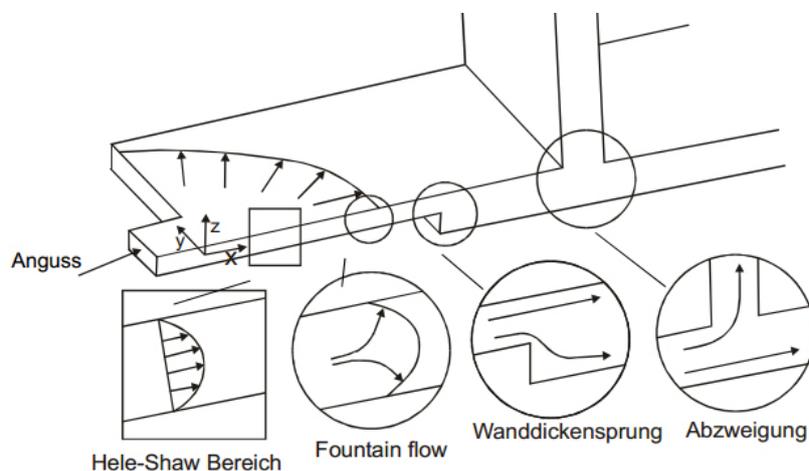
Die Spritzgießsimulation kann als Teil des Produktentwicklungsprozesses zur Entwicklung und Auslegung von Bauteilen und Werkzeugen eingesetzt werden, um einerseits im Sinne der Frontloading-Strategie Projektzeiten und Kosten zu minimieren und andererseits um die Bauteilqualität zu erhöhen. Darüber hinaus bietet die Spritzgießsimulation die Möglichkeit, Prozessfenster zu identifizieren, Prozesse zu optimieren sowie die Produktion bei der Fehlersuche zu unterstützen [58].

Bei der Spritzgießsimulation handelt es sich um numerische Verfahren, wie beispielsweise Finite-Elemente-Methoden (FEM) oder Finite-Volumen-Methoden (FVM), zur Simulation des Spritzgießprozesses und dessen Teilprozesse (Formfüllung, Nachdruckphase, Kühlphase, Entformung). Diese numerischen Verfahren sind Verkettungen von Algorithmen und Methoden aus der Mathematik, Numerik, Kontinuumsmechanik, Werkstoffkunde und Programmieretechnik und ermöglichen es, das Verhalten von nicht-diskreten Problemen durch Lösen partieller Differentialgleichungen mathematisch näherungsweise abzubilden. Zu diesem Zweck wird eine beliebige Bauteilgeometrie „vernetzt“, d.h. durch eine Vielzahl von kleinen Elementen approximiert. Für die Gesamtzahl dieser endlichen („finiten“) Elemente des diskretisierten Bauteiles wird ein System von beschreibenden Differentialgleichungen aufgestellt und durch Anwendung von numerischen Verfahren gelöst [56].

### Konzepte der Vernetzung

Bei der Simulation mit dem **2,5D-Konzept** werden zweidimensionale Dreieckselemente zur Vernetzung der Geometrie verwendet. Durch Mittelflächen oder Fachwerke wird die Geometrie zu einem Finite-Elemente-Modell vernetzt, wobei eine relativ geringe Anzahl an Elementen entsteht. Das 2,5D-Konzept basiert auf den Vereinfachungen nach Hele-Shaw, bei der eine ebene Strömung angenommen und die Geschwindigkeitskomponente in Dickenrichtung vernachlässigt wird. Es wird vor allem zur Berechnung von Formfüllvorgängen dünnwandiger bzw. flächiger Bauteile eingesetzt, da hierbei eine Strömungsbewegung in Dickenrichtung vernachlässigt werden kann [17].

Bei komplexen, dickwandigen Bauteilen eignet sich die Simulation mit dem **3D-Konzept** besser, da die Geometrie über dreidimensionale Kontinuums-elemente (Tetraeder oder Hexaeder) abgebildet wird und dreidimensionale Strömungen berechnet werden können. In Abbildung 2.22 sind solche Strömungen, welche beispielsweise durch Wanddickensprünge hervorgerufen werden, dargestellt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die 3D-Simulation für kleine kompakte Bauteile verglichen mit dem realen Füllverhalten deutliche genauere Ergebnisse liefert als die 2,5D-Simulation [50]. Nachteil gegenüber dem 2,5D-Konzept sind die erhöhten Rechenzeiten.



**Abbildung 2.22:** Strömungsverhältnisse in einer Kavität [45].

### Grundsätzliche Vorgehensweise

Die zur Spritzgießsimulation herangezogenen Geometriedaten werden aus dem CAD-System exportiert und im *Pre-Processor* aufbereitet. Dabei wird die Geometrie vernetzt

und Randbedingungen (Einspritzzeit, Nachdruckhöhe, Nachdruckzeit etc.) werden definiert. Das verwendete Material, welches durch Materialmodelle und Materialdaten beschrieben wird, wird festgelegt. Der *Solver* erzeugt und löst die beschreibenden Gleichungssysteme und legt die Ergebnisse in einer Datei ab. Im *Post-Processor* werden diese Ergebnisse anschließend graphisch dargestellt und analysiert.

### Formfüllung, Nachdruckphase und Kühlphase

Die Simulation der Formfüllung sowie der nachfolgenden Nachdruck- und Kühlphase liefert wichtige Informationen über Prozessparameter wie Werkzeuginnendruckverlauf, Massetemperatur, Werkzeugwandtemperatur sowie Füll- und Siegelzeit. Die Simulation gibt außerdem Aufschluss über zu erwartende Lage von Bindenähten und Fließnähten (mechanische Schwachstellen), Lufteinschlüssen (potenzielle Verbrennungen), örtlicher Erstarrung der Schmelze (Hinweise auf zu dünnwandige Partien) und Vektoren der Fließrichtung (Hinweise auf Orientierungen) [9]. Auf Basis dieser Ergebnisse können Optimierungen hinsichtlich Formteilgeometrie, Anguss- und Verteilersystem, Werkzeugtemperierung sowie des Spritzgießprozesses durchgeführt werden.

### Schwindung und Verzug

Weiter ermöglicht es die Spritzgießsimulation, Schwindung und Verzug des erstarrten Bauteiles zu simulieren. Ausgehend von den Randbedingungen, welche sich durch die Formfüllung ergeben (zeitlicher und örtlicher Verlauf von Druck und Temperatur), werden die Spannungen und Dehnungen berechnet, die durch die Volumenschwindung der Schmelze in Folge der Abkühlung aus der Schmelze hervorgerufen werden. Spannungen und Dehnungen führen nach dem Entformen zu Deformationen des Bauteils (Verzug) und Restspannungen. Dieses mechanische Antwortverhalten wird über einen Struktur-solver ermittelt, wobei das verwendete Materialmodell die Vorgänge des Erstarrungs- und Abkühlvorgangs abbilden muss.

### Materialdaten

Um Strömungsvorgänge zu berechnen, sind die Grundgleichungen der Strömungsmechanik (Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie) gemeinsam mit den Stoffgesetzen und Randbedingungen zu lösen. Die Qualität der Simulationsergebnisse wird unter

anderem von der Qualität der zu Grunde liegenden Materialdaten beeinflusst. Ungenaue und unvollständige Materialdaten führen dabei zu ungenauen Simulationsergebnissen.

Materialdaten, welche zur Simulation des Füllvorganges verwendet werden, sind die Viskosität, die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärme, das spezifische Volumen sowie die No-Flow-Temperatur, bei deren Unterschreitung das Material als Feststoff angenommen wird. Zur Simulation von Schwindung und Verzug dienen der E-Modul, die Querkontraktionszahl sowie der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient. Die genannten Größen werden mit Hilfe von geeigneten Messgeräten erfasst und sind weitgehend temperaturabhängig. Durch Materialmodelle und erfasste Materialdaten wird es ermöglicht, den charakteristischen Eigenschaften realer Materialien möglichst nahe zu kommen.

## 2.6 Spritzgießgerechte Konstruktion

Auf Grund der Vorgänge „Formfüllung“ (Einspritzen), „Abkühlung und Erstarrung“ (Nachdruck- und Kühlphase) und „Entformung“ (Auswerfen des Formteils) sowie den daraus resultierenden Konsequenzen hinsichtlich kunststoffspezifischen Eigenschaften ergeben sich Regeln für die spritzgussgerechte Bauteilkonstruktion. Auswirkungen auf die Bauteilqualität, welche beim Missachten dieser Regeln entstehen, können durch den gezielten Einsatz der Spritzgießsimulation erkannt werden.

### 2.6.1 Formfüllung

Ziel der Formfüllung ist es, die gesamte Kavität mit Schmelze auszufüllen. Die Kunststoffschmelze wird unter Druck über das Angussystem in die Werkzeugkavität gedrückt und folgt dabei dem Weg des geringsten Widerstandes: Bereiche mit geringer Wandstärke werden langsamer gefüllt als Bereiche mit großer Wandstärke. Den Materialeigenschaften des eingespritzten Kunststoffes, wie zum Beispiel der Fließfähigkeit oder der Wärmeleitfähigkeit, kommt dabei eine wesentliche Bedeutung zu.

#### Anguss und Angusspositionierung

Die Anzahl der Angüsse sollte möglichst gering gehalten werden, um Kosten und unnötige Bindenähte zu vermeiden. Dem gegenüber stehen allerdings die größeren

erreichbaren Fließweglängen. Um eine möglichst gleichmäßige Formfüllung zu erreichen, sollte die Angussposition so gewählt werden, dass in jede Richtung der selbe Fließwiderstand vorhanden ist. Die Position des Angusses sollte in Bereichen mit den höchsten Wandstärken liegen, um eine gleichmäßige Formfüllung mit steigendem Fließwiderstand zu erreichen. Da die Schmelze in dünnwandigen Bereichen des Formteiles mit großem Abstand zum Anguss zuerst erstarrt, kann ein möglichst langer Nachdruck aufgebracht werden [9].

Beim Anspritzen von dickwandigen, offenen Kavitätsbereichen kann es vorkommen, dass sich bei der Formfüllung nicht die gewünschte Quellströmung ausbildet, sondern der Schmelzestrom regelrecht in das Bauteil „geschossen“ wird, ohne eine Schmelzefront aufzubauen. Dieses Phänomen wird Freistrahler (engl.: Jetting) genannt und führt zu schlechten mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Freistrahlerbildung kann durch eine Veränderung der Angussgeometrie oder durch geringe Einspritzgeschwindigkeiten zu Beginn der Formfüllung verhindert werden.

### Bindenähte und Lufteinschlüsse

Bindenähte entstehen, wenn die Fronten zweier oder mehrerer Schmelzeströme im Werkzeug aufeinander treffen. Dazu kommt es, wenn ein Durchbruch im Formteil umflossen werden muss, das Formteil mehrfach angegossen wird oder auf Grund von Wanddickenunterschieden, die ein partielles Voreilen oder Zurückbleiben der Schmelzefront bedingen. Ein Lufteinschluss entsteht, wenn die Schmelzefronten einen Hohlraum umschließen, aus dem die eingeschlossene Luft nicht mehr entweichen kann [9].

Da Bindenähte und Lufteinschlüsse mechanische und optische Schwachstellen des Bauteils darstellen und sich nicht immer vermeiden lassen, sind deren Auswirkungen durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Dies kann durch eine geeignete Werkzeugkonstruktion erreicht werden: Mit der Wahl der Angussposition kann die Bindenaht in einen nicht sichtbaren oder mechanisch unkritischen Bereich verlagert werden. Gelingt dies nicht, lässt sich in vielen Fällen die mechanische Festigkeit durch gestalterische Maßnahmen wie Wanddickenvergrößerungen erhöhen (siehe Abbildung 2.23). Eine optisch störende Bindenaht kann durch eine Oberflächenstrukturierung kaschiert werden. Prozessparameter, wie hohe Massetemperaturen, kurze Einspritzzeiten und hoher Nachdruck führen zu erhöhter molekularer Diffusion und verbessern die Bindenahtfes-

tigkeit materialabhängig [9].

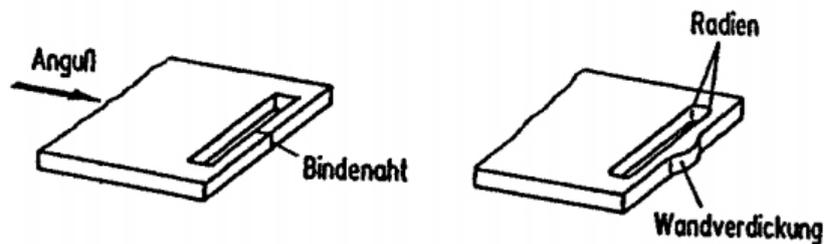


Abbildung 2.23: Wandverdickung im Bindenahtbereich [28].

### 2.6.2 Abkühlung und Erstarrung

Die Kunststoffschmelze gibt Wärme ab und erstarrt, sobald sie mit der Werkzeugwand in Berührung kommt. Die Abkühlung ist mit einer Volumenkontraktion (Schwindung) verbunden. Die Kühlzeit  $t_k$  einer Platte ist in Gleichung 2.6 definiert und ist proportional zum Quadrat der Formteildicke. Um die Zykluszeit und damit die Kühlzeit zu minimieren muss deshalb eine gleichmäßig dünne Wandstärke für das gesamte Formteil angestrebt werden, da die Kühlzeit durch die dickste Stelle des Bauteils bestimmt ist.

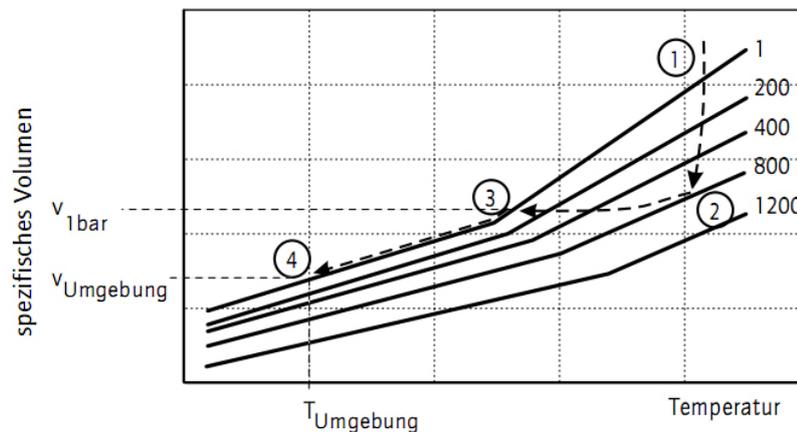
$$t_k = \frac{d^2}{\pi^2 a} \cdot \ln \left\{ \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right\} \quad (2.6)$$

$t_k$	Kühlzeit (s)
$d$	Formteildicke (mm)
$a$	Temperaturleitfähigkeit ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )
$T_M$	Massetemperatur (K)
$T_E$	Entformungstemperatur (K)
$T_W$	Werkzeugwandtemperatur (K)

#### Schwindung und Verzug

Als **Schwindung** wird die Differenz zwischen den Maßen des kalten Werkzeuges ( $23^\circ\text{C}$ ) und des entformten Bauteils nach einer 16-stündigen Lagerung unter Normalklima ( $23^\circ\text{C}$  bei 50% Luftfeuchte) verstanden [26]. Das pvT-Diagramm stellt den Zusammenhang zwischen Volumen, Druck und Temperatur eines erstarrenden Formteils dar. Wird der in der Kavität während eines Spritzgießzyklus herrschende Druck in ein pvT-Diagramm übertragen, erhält man Aussagen über die Volumenschwindung,

wie in Abbildung 2.24 dargestellt. Während der Füllphase (1-2) steigt der Druck von 1 bar auf den maximalen Einspritzdruck an. Während der Nachdruckphase (2-3) fallen Temperatur und Druck monoton, wobei sich das spezifische Volumen entsprechend ändert. Dabei ist der Zustand, an dem der Werkzeuginnendruck Atmosphärendruck annimmt (3) entscheidend für die Ausprägung der Schwindung, da sich bei weiterer Abkühlung das Formteil von der Werkzeugwand löst und schwindet. Wird eine definierte Temperatur unterschritten, kann das Bauteil entformt werden (4).



**Abbildung 2.24:** Darstellung des Spritzgießprozesses im pvT-Diagramm für einen amorphen Kunststoff. 1-2: Füllphase, 2-3: Nachdruckphase, 3-4: Schwindungsphase [14].

Die Volumenschwindung  $S_V$  ist in Gleichung 2.7 definiert. Unter der Annahme einer isotropen Schwindung beträgt die lineare Schwindung (Schwindung in die Raumrichtungen) im praxisrelevanten Bereich ca. ein Drittel der Volumenschwindung. Die lineare Schwindung einzelner Formteilmaße unterscheidet sich jedoch auf Grund von Werkstoffanisotropien (zum Beispiel durch Faserverstärkung), Schwindungsbehinderungen durch Werkzeuggeometrien oder bereits erstarrten Randschichten sowie ortsvariablen Abkühlverhältnissen [9].

$$S_V = \frac{V_W - V_F}{V_W} \quad (2.7)$$

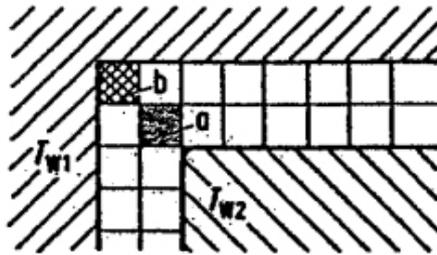
- $S_V$  Volumenschwindung (-)
- $V_W$  Volumen der Kavität ( $\text{cm}^3$ )
- $V_F$  Volumen des ausgekühlten Formteils ( $\text{cm}^3$ )

Unter **Verzug** versteht man die Abweichung eines Formteils von der Sollgestalt durch Verwölbung von Flächen oder Veränderung von Winkelmaßen. Verzug entsteht durch Schwindungsunterschiede in einem Formteil, welche beispielsweise auch durch ungleichmäßige Wärmeabfuhr durch unterschiedliche Temperaturen der Werkzeughälften entstehen können (siehe Abbildung 2.25). Die Schwindung an der wärmeren Seite fällt dabei größer aus als an der kälteren Seite. Der beschriebene thermisch induzierte Verzug kann vermieden werden, wenn im Formteil keine Schwindungsdifferenzen auftreten. Die diesbezüglich wirksamste Maßnahme ist die Optimierung der Werkzeugoberflächentemperatur mit Hilfe eines geeigneten Kühlsystems. Da eine exakt gleichmäßige Kühlung praktisch nicht zu realisieren ist, sollten ebene Flächen am Bauteil möglichst vermieden werden. Eine Möglichkeit zur Kompensation von Verzug ist das sogenannte Vorhalten von Gestaltabweichungen im Werkzeug, bei der die Werkzeugkavität mit einem negativen Verzug hergestellt wird, wodurch der zu erwartende Verzug kompensiert wird [9].



**Abbildung 2.25:** Verzug einer Platte bei ungleichmäßiger Wärmeabfuhr durch unterschiedliche Temperaturen der Werkzeughälften [52].

Winkerverzug entsteht an Kanten, da auf der Außenseite der Kante mehr Wärme abgeführt werden kann, weil eine größere Fläche zur Verfügung steht als auf der Innenseite (siehe Abbildung 2.26). Über das Volumenelement  $b$  kann auf Grund der größeren Kontaktfläche zum Werkzeug mehr Wärme in das Werkzeug abgeführt werden als über das Volumenelement  $a$ . Folglich ist die Schwindung auf der Innenseite größer und es resultiert ein Verzug nach innen, wodurch der Kantenwinkel verkleinert wird. Winkerverzug kann minimiert werden, indem die Wärmeabfuhr an der Kante beispielsweise durch Radien gleichmäßig wird [9].

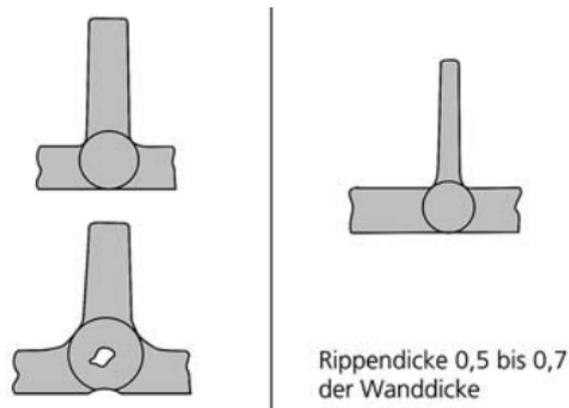


**Abbildung 2.26:** Winkelverzug an einer Kante. Über das Volumenelement b kann auf Grund der größeren Kontaktfläche mehr Wärme in das Werkzeug abgeführt werden als über das Volumenelement a [28].

### Einfallstellen und Lunker

Einfallstellen entstehen, wenn die Volumenkontraktion des abkühlenden Bauteils nicht durch nachgedrückte Masse ausgeglichen werden kann. Dabei werden die Wände des Bauteiles durch die Schwindung hin zu seinem Zentrum gezogen, während die Steifigkeit bereits erstarrter Kanten groß genug ist, dieser Verformung zu widerstehen. Ist die Steifigkeit der Wände groß genug, um den Kräften in Richtung Formteilzentrum entgegenzuwirken, können sich im Inneren des Formteils Hohlräume bilden (sogenannte Lunker).

Einfallstellen und Lunker werden minimiert, indem partielle Masseanhäufungen vermieden werden und auf möglichst konstante Wandstärken geachtet wird, da die Schwindung mit der Wandstärke zunimmt. In Abbildung 2.27 ist ein Gestaltungsbeispiel hinsichtlich Vermeidung von Masseanhäufungen am Beispiel einer Rippenkonstruktion dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Masseanhäufungen im Bereich Rippe/Wand zu Einfallstellen und Lunker führen können. Durch die Verringerung von Masseanhäufungen im genannten Bereich können Einfallstellen und Lunker minimiert werden, wobei die Rippendicke ca. 0,5 bis 0,7 Mal der Wanddicke betragen soll. Mithilfe von Oberflächenarabungen können Einfallstellen kaschiert und somit optisch unauffälliger gemacht werden [9].



**Abbildung 2.27:** Masseanhäufungen am Beispiel einer Rippe. Links: Masseanhäufungen im Bereich Rippe/Wand führen zu Einfallstellen und Lunker. Rechts: Verringerung von Masseanhäufungen [10].

### Toleranzen

Zulässige Toleranzen für Spritzgießbauteile sind durch die DIN 16901 vorgegeben. Die erreichbaren Maße stehen dabei in linearer, prozentueller Abhängigkeit vom Nennmaß und liegen bei normalem Spritzguss unter 1 %, bei technischem Spritzguss unter 0,6 % und bei Präzisionsspritzguss unter 0,3 % [9].

### 2.6.3 Entformung

Beim Entformen zieht die Schließeinheit die bewegliche Werkzeughälfte zurück. Dabei kann das erstarrte Formteil beispielsweise mechanisch durch die Betätigung von Auswerferstiften ausgeworfen werden. Die Entformbarkeit muss bei der Bauteilgestaltung berücksichtigt werden, um Oberflächenbeschädigungen wie zum Beispiel Kratzspuren an Sichtflächen zu vermeiden.

### Entformungsschrägen

Auf Grund der Schwindung schrumpft das erstarrende Formteil auf formende Werkzeugteile auf. Um eine einfache Entformung zu ermöglichen, muss an Flächen in Entformungsrichtung eine Schräge angebracht werden, wobei diese Entformungsschräge werkstoffspezifisch ist. In Tabelle 2.1 sind Richtwerte für Entformungsschrägen wiedergegeben. Da Oberflächennarben geringfügige Hinterschneidungen bilden, verlangen genarbte Flächen größere Entformungsschrägen, um Oberflächenbeschädigungen zu vermeiden [9].

**Tabelle 2.1:** Richtwerte für Entformungsschrägen [59]

Werkstoff	Winkel der Entformungsschräge (°)
PA, POM, PE-HD, ABS, PP	0,5
PBT, SB	1,0
PS, SAN, PC	1,5

## Hinterschneidungen

Hinterschneidungen an Spritzgussbauteilen sind zu vermeiden, da sie eine einfache Entformung behindern oder verhindern. Durch mehrere Trennebenen und Öffnungsrichtungen im Werkzeug, welche durch sogenannte Schieber oder Backen realisiert werden, können Bauteile mit Hinterschneidungen entformt werden, wodurch das Werkzeug allerdings teurer und störanfälliger wird. Bis zu einem gewissen Maß lassen sich Hinterschneidungen durch eine Zwangsentformung überwinden, wobei die Größe der entformbaren Hinterschneidungen eine Frage der Dehnung des betroffenen Materials ist. In vielen Fällen können Hinterschneidungen durch eine geschickte Wahl der Trennebene gänzlich verhindert werden [9].

## 2.7 Fügen von Kunststoffen

Unter dem Begriff „Fügen“ versteht man das dauerhafte Verbinden von zwei oder mehreren Bauteilen. Grundsätzlich lassen sich die für Kunststoffbauteile relevanten Fügeverfahren in Schweißen, Kleben sowie mechanische Fügeverfahren einteilen. Die Wahl eines geeigneten Fügeverfahrens hängt maßgeblich ab von der Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Verfahrens, der erzielbaren Nahtfestigkeit, der Frage der Lösbarkeit bzw. Nichtlösbarkeit der Verbindung, der Dichtigkeit der Verbindung, der Art der zu fügenden Werkstoffe, sowie der Serientauglichkeit des Verfahrens [46].

### 2.7.1 Schweißen

Schweißen wird den stoffschlüssigen Fügeverfahren zugeordnet. Sämtliche Schweißverfahren sind ausschließlich für Thermoplaste anwendbar, da die Fügeflächen in schmelzeförmigen Zustand versetzt werden müssen. Es können nur artgleiche Kunststoffe oder Kunststoffe mit ähnlichem Erweichungsbereich, z.B. PMMA und ABS,

miteinander verschweißt werden. Die Füge­teile werden dazu durch Zufuhr von Energie in den schmelzeförmigen Zustand überführt, gefügt und unter Druck abgekühlt. Um den zu schweißenden Werkstoff in den schmelzeförmigen Zustand zu überführen, stehen physikalische Mechanismen wie Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung, Reibung und Induktion zur Verfügung [22]. Durch die Fließbewegung in der Schweißnahtebene verschlaufen sich die Molekülketten unter Druck miteinander, wodurch eine stoffschlüssige Verbindung zwischen beiden Fügepartnern entsteht. Ziel ist es, jene Kombination aus den Schweißparametern Druck, Zeit und Temperatur zu ermitteln, welche zum wirtschaftlichsten und qualitativ besten Ergebnis der Schweißnaht führt.

### Verfahrensablauf

Um eine gute Schweißnahtqualität zu erreichen, sollen folgende Arbeitsschritte eingehalten werden [22]:

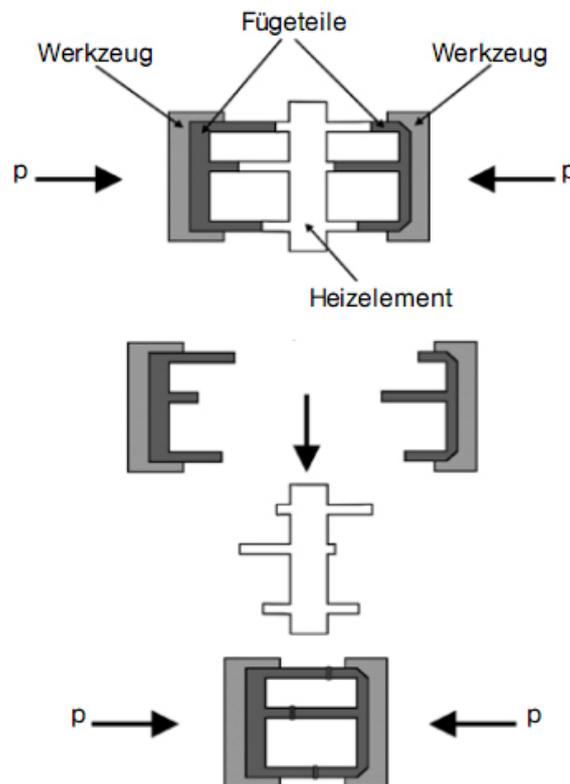
1. *Vorbereiten der Fügeflächen*: Fügeflächen müssen trocken, staub- und fettfrei sein.
2. *Erwärmen der Fügeflächen*: Die Erwärmungszeit ist so zu wählen, dass dem Schweißprozess ausreichend Schmelze zur Verfügung steht.
3. *Aufbringen des Fügedrucks*: Durch einen zu hohen Fügedruck wird zu viel Schmelze aus der Fügezone verdrängt, wodurch kältere Materialschichten aufeinander treffen und somit keine Verschlaufungen der Molekülketten in der Schweißnaht hervorgerufen werden kann. Der selbe Effekt wird bei geringer Fließbewegung infolge eines zu niedrigen Fügedrucks erreicht.
4. *Abkühlen unter Druck*: Der Druck soll so lange aufrecht erhalten werden, bis die Temperatur so weit zurückgegangen ist, dass die Verbindung einen formstabilen Zustand erreicht, um Verzug und Lunker zu vermeiden.
5. *Nachbearbeitung der Naht*: Falls aus optischen oder praktischen Gründen erforderlich, kann die störende Schweißwulst durch Nachbearbeitung (zum Beispiel Hobeln oder Schleifen) entfernt werden.

### Schweißverfahren

Auf Basis der Energieeinbringung, die zur Plastifizierung der Fügeflächen eingebracht wird, können die Schweißverfahren eingeteilt werden. Die wichtigsten Verfahren werden

im Folgenden erläutert [22].

Beim **Heizelementschweißen** wird die Energie den Fügeflächen durch elektrisch beheizte metallische Elemente mittels Wärmeleitung zugeführt und die Fügeflächen somit plastifiziert. Nach der Entfernung des Heizelements (Umstellphase) folgt die Fügephase, in der das Verbinden der Schweißteile durch Aneinanderpressen der plastifizierten Fügeflächen erfolgt. Der Fügedruck sorgt für eine Fließbewegung im Nahtbereich, wodurch die Moleküle miteinander verschlaufen und für eine Verbindung beider Fügeile sorgen. In Abbildung 2.28 ist der grundsätzliche Verfahrensablauf beim Heizelementschweißen dargestellt.



**Abbildung 2.28:** Verfahrensablauf beim Heizelementschweißen [1].

Das **Ultraschallschweißen** lässt sich den Reibschweißverfahren mit innerer Reibung zuordnen. Es werden mechanische Schwingungen im Ultraschallbereich (20 bis 40 kHz) dazu genutzt, um infolge innerer Reibung und Grenzflächenreibung in der Fügefläche Wärme zu erzeugen und das Material zu plastifizieren, während die Fügeile aneinander gedrückt werden. Auf Grund der kurzen Schweißzeiten (0,2 bis 1,5 s) eignet sich das Verfahren besonders für Massenartikel.

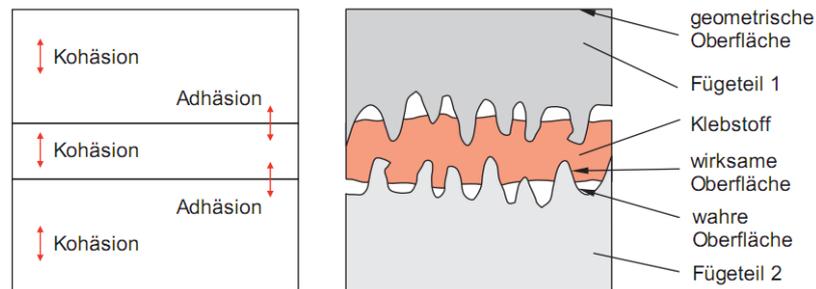
Beim **Strahlungsschweißen** erfolgt die Energieeinbringung entweder mittels Wärmestrahlung (Infrarot-Strahlung) oder mit Hilfe von Licht-/Laserstrahlen. Diese Verfahren haben im Gegensatz zum Heizelementschweißen den Vorteil, dass die Füge­teile in keinem direkten Kontakt zur Wärmequelle stehen und es somit in der Umstellphase zu keinem Fädenziehen kommt.

### 2.7.2 Kleben

Das Kleben von Kunststoffen hat als stoffschlüssiges Fügeverfahren enorm an Bedeutung gewonnen und stellt eine Ergänzung zum Schweißen dar. Im Gegensatz zum Schweißen lassen sich durch Kleben nicht nur Thermoplaste miteinander verbinden, sondern auch Elastomere und Duromere. Es können dabei nicht nur artgleiche, sondern auch verschiedenartige Materialien miteinander verbunden werden. Klebeverbindungen ermöglichen einen weiten Spielraum hinsichtlich Gestaltung, Materialauswahl und Herstellungstechnik der Füge­teile. Es lassen sich sehr kleine und auch kompliziert geformte Teile miteinander verkleben. Eine Klebeverbindung kann außerdem zusätzliche Aufgaben erfüllen, wie zum Beispiel Abdichten. Als einschränkende Faktoren bezüglich der Anwendung sind insbesondere die Aushärtezeit im Produktionsablauf, die zum Teil aufwändige Vorbehandlung der Füge­flächen und das unter Umständen ungünstige Alterungsverhalten unter Medieneinfluss zu nennen. Bei korrekter Durchführung ist das Kleben von Kunststoffen als vollwertiges Fügeverfahren anzusehen, mit dem unlösbare Verbindungen mit hohem Kraftschluss hergestellt werden können [22].

#### Mechanismus der Klebung

Adhäsionskräfte bewirken den Zusammenhalt zwischen Klebstoff und Füge­teil, Kohäsionskräfte bewirken den inneren Zusammenhalt des Klebstoffes und der Füge­teile. Durch diese Kräfte wird eine Haftsteifigkeit einer Klebeverbindung hervorgerufen. Die Haftfestigkeit wird vor allem durch die Oberflächengestalt der zu klebenden Flächen beeinflusst. Angestrebt wird eine vollständige Benetzung der Füge­flächen, um die wirksame Oberfläche (Grenzfläche Klebstoff/wahre Oberfläche) so weit wie möglich zu erhöhen [15]. Abbildung 2.29 erläutert die wirkenden Kräfte und Bezeichnungen beim Kleben.

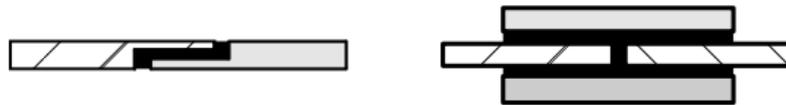


**Abbildung 2.29:** Kräfte und Bezeichnungen beim Kleben [15].

### Verfahrensablauf

Bei der Herstellung qualitativ hochwertiger Klebeverbindungen hat die Verfahrenstechnik eine entscheidende Bedeutung. Generell lässt sich der Klebevorgang in folgende Arbeitsschritte unterteilen [22]:

1. *Herstellen passender Fügeflächen:* Die Fügeflächen sollen klebegerecht gestaltet sein, wobei die günstigste Beanspruchungsart die Scherbeanspruchung darstellt (siehe Abbildung 2.30). Zug- und Schälbeanspruchungen sind zu vermeiden.



**Abbildung 2.30:** Klebegerechte Gestaltung der Fügeflächen. Links: abgesetzte Überlappung. Rechts: doppelte Lasche [4].

2. *Reinigen und Vorbehandlung der Fügeflächen:* Um Fremdkörper (zum Beispiel Fett, Staub, Trennmittel, Wasser) zu entfernen, müssen die Fügeflächen entsprechend gereinigt werden. Zu diesem Zweck werden beispielsweise organische Lösemittel verwendet. Für eine Reihe von Kunststoffen erfolgt zusätzlich zum Reinigungsprozess eine Vorbehandlung, um Oberflächeneigenschaften und -strukturen zu verändern. Als Beispiel ist das Aufrauen der Oberfläche zu nennen, welches mechanisch durch Schleifen oder Sandstrahlen oder chemisch durch Beizen erfolgen kann.
3. *Auftragen des Klebstoffes:* Beim Auftragen des Klebstoffes ist auf eine gleichmäßige Benetzung der Fügeflächen und eine konstante Schichtdicke des Klebstoffes zu achten. Für die Kleinserienfertigung erfolgt der Auftrag des Klebstoffes mit Pinsel

oder Spachtel, wogegen in der Großserienfertigung maschinelle Auftragsaggregate eingesetzt werden.

4. *Abwarten, bis der Klebstoff verbindungsfähig ist:* Je nach verwendetem Klebstoff müssen gewisse Zeitabstände vor dem Zusammenführen der Teile eingehalten werden.
5. *Fügen und Fixieren:* Häufig genügt ein Andrücken von Hand, bei größeren Teilen werden Pressen eingesetzt. Der Fügedruck dient dazu, die Luft aus der Klebefläche zu verdrängen. Der Abbindevorgang wird durch eine Temperaturerhöhung beschleunigt. Die Klebefilmstärke wird durch den Fügedruck beeinflusst. Es kann erforderlich sein, die Fügeteile zu fixieren, wenn die Fügeteile beispielsweise gegen Verrutschen gesichert werden müssen. Durch eine entsprechende Konstruktion der Fügeteile kann auf eine Fixierung verzichtet werden.
6. *Aushärten des Klebstoffes:* Je nach verwendetem Klebstoff muss eine bestimmte Aushärtezeit abgewartet werden, bis die Klebeverbindung eine gewisse Festigkeit erreicht hat. Die Wartezeit bis zum Erreichen der maximalen Klebefestigkeit kann bis zu einigen Tagen betragen.
7. *Entfernen der Fixierung:* Sobald die Klebeverbindung eine ausreichende Festigkeit erreicht hat, kann die Fixierung entfernt werden.

### Einteilung der Klebstoffe

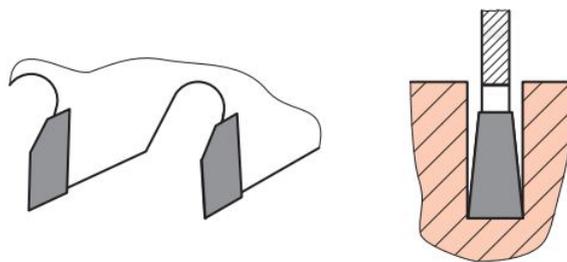
Die Einteilung von Klebstoffen erfolgt nach der Art des Abbindeprinzips. Es wird dabei zwischen physikalisch und chemisch abbindenden Klebstoffen unterschieden [15].

Zu den **physikalisch abbindenden Klebstoffen** zählen *Lösemittel- und Dispersionsklebstoffe*. Der zu fügende Kunststoff löst sich im Lösemittel. Nach dem Auftragen des Klebers ist durch Verdunstung für die Abführung des Lösemittels zu sorgen. *Schmelzklebstoffe* werden als plastifizierte Masse aufgetragen. Die Klebung erfolgt durch Unterschreiten der Schmelztemperatur und der einhergehenden Verfestigung des Schmelzklebstoffes. *Kontaktklebstoffe* enthalten Lösemittel, die vor dem Fügen verdunsten müssen. Unmittelbar danach können die Fügeteile zusammengeklebt werden [22].

**Chemisch abbindende Klebstoffe** sind Reaktionsklebstoffe, bei denen in Folge einer chemischen Reaktion Makromoleküle gebildet werden. Bei diesen Reaktionen handelt es sich - wie bei der Synthese von Kunststoffen - um Polymerisation, Polyaddition oder Polykondensation, wobei vernetzte Makromoleküle entstehen. In Gang gesetzt wird die Reaktion durch Reaktionsmittel (Beschleuniger oder Härter), Wärme oder durch Luftfeuchtigkeit [22].

## 2.8 Spanende Bearbeitung von Kunststoffen

Als Spanen bzw. Trennen von Körpern wird das Ändern der Form durch Verminderung des Zusammenhaltes bezeichnet. Zu diesem Zweck kommt eine keilförmige Werkzeugschneide zum Einsatz, welche in die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks eindringt und dünne Materialschichten (Späne) abschält, wobei das Werkzeugmaterial härter ist als der bearbeitete Werkstoff (siehe Abbildung 2.31). Eine spanende Bearbeitung von Kunststoffteilen ist erforderlich, wenn zum Beispiel Formteile mit Hinterschnitten nicht durch Spritzgießen hergestellt werden können oder eine Nachbearbeitung kleiner Serien oder Prototypen kostengünstiger ist als die Herstellung eines komplexen Spritzgießwerkzeuges. Zudem ist eine spanende Bearbeitung sinnvoll, wenn der Funktionsträger enge Toleranzen erfordert, welche durch das Spritzgießen nicht erreicht werden.



**Abbildung 2.31:** Spanende Bearbeitung: Eine keilförmige Werkzeugschneide (links) dringt in die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks ein (rechts) [15].

Bei der Herstellung von qualitativ hochwertigen Produkten mit Hilfe der spanenden Bearbeitung sind insbesondere thermische Eigenschaften des Kunststoffes, wie zum Beispiel Wärmeleitfähigkeit, zu berücksichtigen, da erhöhte Temperaturen durch den Bearbeitungsvorgang zu einer Beschädigung der Oberfläche führen können. Es empfiehlt sich, die in der Literatur vorhandenen Richtlinien für die spanende Bearbeitung der einzelnen Kunststoffe sowie deren unterschiedliches Werkstoffverhalten

zu berücksichtigen. Auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen im Vergleich zu Metallen sind Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Schneidengeometrie so zu wählen, dass die entstehende Wärme so weit wie möglich mit dem Span abgeführt wird. Wird ein Kühlmedium verwendet, ist darauf zu achten, dass der zu bearbeitende Kunststoff beständig gegen das Kühlmedium ist. Typische Werkzeugmaterialien für die spanende Bearbeitung von Kunststoffen sind Schnellarbeitsstähle (SS-Stahl), Hochleistungsschnellarbeitsstähle (HSS-Stahl), Hartmetall, Diamant und Korund [22]. Im Folgenden werden die beiden wichtigen spanenden Bearbeitungsmethoden *Fräsen* und *Drehen* erläutert.

### 2.8.1 Fräsen

Fräsen bezeichnet die spanende Bearbeitung von Werkstoffen mit Hilfe eines rotierenden Werkzeuges (Fräswerkzeug). Die Bearbeitung erfolgt in einer Fräsmaschine. Spezielle Kunststoff-Fräser weisen im Gegensatz zu Metallfräsern eine geringere Schneidenzahl auf. Hohe Zerspanleistungen bei gleichzeitig guter Oberflächenqualität und Genauigkeit lassen sich mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und mittleren Vorschüben realisieren [22].

### 2.8.2 Drehen

Als Drehen wird die spanende Bearbeitung bezeichnet, bei der sich im Gegensatz zum Fräsen das Werkstück dreht und somit die Hauptschnittbewegung mit seiner Rotation ausführt. Das Werkzeug (Drehmeißel) wird mit Hilfe eines Werkzeugschlittens am drehenden Werkstück entlang bewegt, um einen Span abzuheben. Die Bearbeitung erfolgt in einer Drehmaschine.

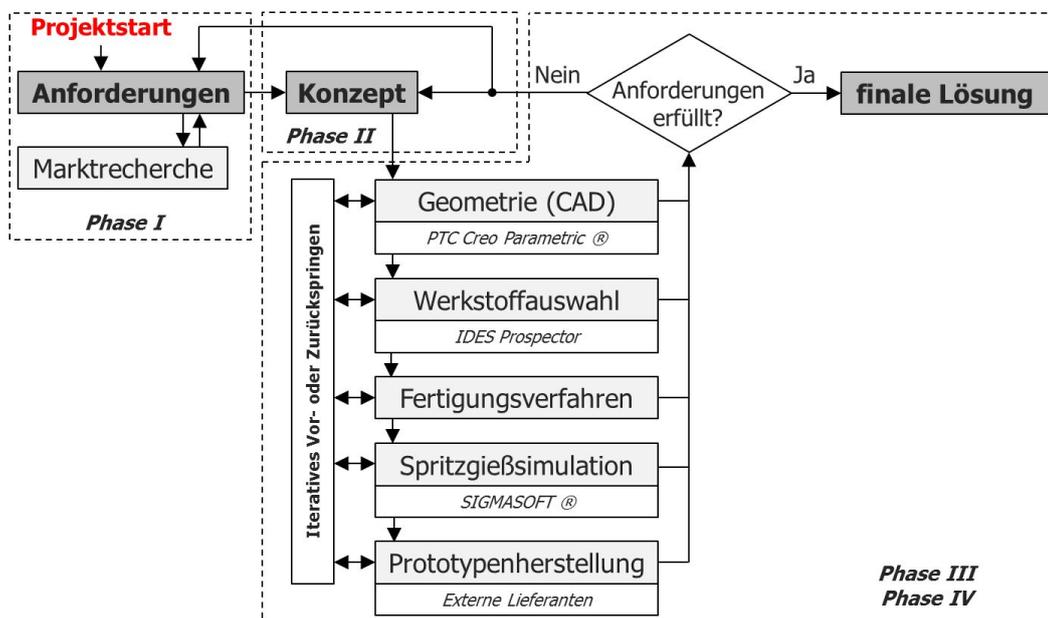
Für das Drehen von Kunststoffen sollen die Drehmaschinen schnelllaufend, in der Einstellbarkeit der Drehzahl variabel und mit einer Luft- und Flüssigkeitskühlung ausgestattet sein. Je nach Werkstoff wird mit einer Schnittgeschwindigkeit bis zu  $500 \text{ m/min}$  gedreht. Bei der Verwendung eines Drehmeißels mit abgerundetem Schneidenprofil entstehen auf der Werkstückoberfläche keine scharfkantigen Rillen, und die Oberfläche wird sehr hochwertig. Breitschlichtschneiden haben sich bewährt, um Oberflächen besonders hoher Qualität herzustellen [22].



# 3 Grundlegende Vorgehensweise und Definition der Anforderungen

## 3.1 Vorgehensweise

In Abbildung 3.1 ist die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Entwicklung und Konstruktion des Mundstücks dargestellt. Auf Basis eines Lastenheftes wurden nach dem Projektstart zunächst Anforderungen an das Produkt (Kapitel 3.2) definiert. Durch die Recherche von am Markt erhältlichen Mundstücken (Kapitel 2.1.4) wurden die Anforderungen ergänzt, um ein herausragendes Produkt zu erhalten. Die genannten Tätigkeiten entsprechen der **Aufgabenklärungsphase** (Phase I) im Konstruktionsprozess.



**Abbildung 3.1:** Allgemeine Vorgehensweise bei der Entwicklung und Konstruktion des Mundstücks.

Auf Basis der definierten Funktions-, Konstruktions-, Material- und technologischen Anforderungen wurden Konzepte ausgearbeitet, wobei im ersten Schritt grundsätzli-

che Lösungsvarianten überlegt wurden, welche die geforderten Funktionen qualitativ erfüllen könnten. Dabei wurde mit einfachen Mitteln, wie zum Beispiel Skizzen und gebastelten Modellen aus Papier gearbeitet. Derartige Modelle konnten innerhalb kurzer Zeit mit einfachen Hilfsmitteln, wie zum Beispiel Schere und Klebstoff, angefertigt werden und erlaubten es, etwaige Fehler in der Funktionsstruktur frühzeitig zu begreifen und zu eliminieren. Nachdem prinzipielle Lösungen gefunden wurden, folgte das virtuelle Design der Modelle mittels der CAD-Software *PTC Creo*<sup>®</sup>. Der Konkretisierungsgrad der Modelle konnte dadurch nach und nach erhöht werden. Diese Arbeitsschritte waren geprägt von Kreativität und lassen sich der **Konzeptphase** (Phase II) im Konstruktionsprozess zuordnen.

In weiterer Folge wurde die erfolgversprechendste Lösungsvariante konkretisiert: Die *Geometrie* (Kapitel 4.1) wurde mittels CAD unter Zuhilfenahme von Konstruktionsregeln weiterentwickelt, um eine fertigbare Geometrie mit bestmöglicher Bauteilqualität zu erzielen. Damit einhergehend wurde eine *Werkstoffauswahl* (Kapitel 4.2) mit Hilfe von geeigneter Literatur und Datenbanken (IDES Prospector) durchgeführt. Die möglichen *Fertigungsverfahren* (Kapitel 4.3) wurden auf Basis der Geometrie und der Materialien ausgewählt. Es wurden *Spritzgießsimulationen* (Kapitel 4.4) mit *SIGMA-SOFT*<sup>®</sup> durchgeführt, um etwaige konstruktionsbedingte Fehler frühzeitig zu erkennen und die Fertigungsmöglichkeit der Geometrie zu validieren. Um die virtuellen Ergebnisse hinsichtlich Funktion, Geometrie und Ergonomie in der Realität validieren zu können, wurden *Prototypen* (Kapitel 4.5) durch externe Lieferanten gefertigt. Anschließend wurden die Prototypen geprüft, um zu erkennen, ob die Prototypen entsprechend den Anforderungen funktionieren.

Die durchgeführten Arbeitsschritte beeinflussten sich gegenseitig: Beispielsweise ergaben sich durch die Geometrie in Kombination mit Materialien mögliche Fertigungsverfahren. Umgekehrt schränkte ein anzustrebendes Fertigungsverfahren die Auswahl der Materialien ein. Die erläuterten Tätigkeiten können auf Grund von Überschneidungen sowohl der **Entwurfsphase** (Phase III), als auch der **Ausarbeitungsphase** (Phase IV) zugeordnet werden, wobei die Arbeitsschritte dieser Phasen so lange wiederholt wurden, bis alle Anforderungen erfüllt waren (Iteration). Dabei nahmen der Konkretisierungsgrad bzw. die Details des Entwurfs mit jedem Iterationsschritt zu. Nicht erfüllbare Anforderungen wurden bei Bedarf modifiziert.

Auf die mechanische Analyse der Geometrie wurde verzichtet, da es nicht möglich war, Lastfälle während des Gebrauchs zu definieren. Die ursprüngliche Überlegung, dass

mit zunehmender Tauchtiefe große Kräfte auf Grund des steigenden Drucks wirken, ist nicht richtig, da der Druck sowohl im Kreislauf-Tauchgerät (und somit im Mundstück), als auch in den Atmungsorganen der Taucherin dem Umgebungsdruck auf Grund der Tauchtiefe entsprechen. Die größten mechanischen Belastungen sind nicht definierbare Stöße während des Gebrauchs des Geräts, wodurch die Schlagzähigkeit bei der Werkstoffauswahl eine besondere Bedeutung erlangt. Es wurden daher die Wandstärken im Mundstück entsprechend Mitbewerberprodukten (ca. 3 mm Wandstärke) gewählt, bei denen Materialien mit ähnlichen oder denselben mechanischen Eigenschaften eingesetzt wurden.

## 3.2 Anforderungen an das Produkt

Es wurden Anforderungen an das Produkt definiert, um den Produktwert sowohl aus Kundensicht als auch aus Herstellersicht zu maximieren. Als wichtigste Anforderungen, welche zur Kaufentscheidung des Produktes durch den Kunden beitragen, sind insbesondere die Erfüllung von herausragenden Funktionen sowie Konstruktionsmerkmale zu nennen, die einen Mehrwert gegenüber bestehenden Produkten schaffen. Aus Herstellersicht lässt sich der Produktwert durch eine geeignete Wahl der Fertigungsverfahren sowie verwendeter Werkstoffe positiv beeinflussen. Das Produkt soll in einer vergleichsweise geringen Stückzahl ausgeführt werden (Kleinserie mit voraussichtlich wenigen 1000 Stück jährlich). Die folgenden Anforderungen sind als Ergebnis der Aufgabenklärungsphase (Konstruktionsphase I) zu sehen, und wurden erst im Laufe des Konstruktionszyklus vervollständigt.

### 3.2.1 Funktionsanforderungen

Das Mundstück sollte als möglichst einfaches System ausgeführt werden, wobei durch eine einfache Bewegung zwischen dem geschlossenen Modus (CC: „closed circuit“) und dem offenen Modus (OC: „open circuit“) umgeschaltet werden kann. Bei einem technischen Defekt des Kreislaufgerätes kann die Taucherin vom CC-Modus in den OC-Modus umschalten, wobei das Mundstück die Funktion einer herkömmlichen 2. Stufe eines offenen Tauchgerätes übernimmt. Um die Taucherin mit aktuellen, wichtigen Informationen zu versorgen, wird ein Head-up-Display (HUD) verwendet, dessen Halterung in das Mundstück zu integrieren war.

Ist der **CC-Modus** aktiv, soll eine direkte Verbindung zwischen den Atmungsorganen der Taucherin und dem Kreislauf des Tauchgerätes bestehen. Das Auslassventil (BOV: „bail-out-valve“) soll in diesem Modus verschlossen sein, sofern der Druck im Mundstück weniger als 20 mbar über dem Umgebungsdruck liegt. Da beim Ausatemvorgang der Druck im Mundstück nur unwesentlich erhöht wird, entweicht die ausgeatmete Luft in den Kreislauf, ohne das BOV zu öffnen. Wird die genannte Druckdifferenz überschritten (zum Beispiel durch Erniedrigung der Tauchtiefe), soll Atemgas aus dem System über das BOV entweichen können und somit ein Druckausgleich stattfinden. Die Zuführung des Atemgases aus einer Druckluftflasche über ein Automatisches Diluentgas-Ventil (ADV) soll erfolgen, wenn der Druck im Mundstück über 30 mbar geringer ist als der Umgebungsdruck. Diese Situation tritt zum Beispiel bei Vergrößerung der Tauchtiefe auf.

Ist der **OC-Modus** aktiv, soll keine Verbindung zwischen den Atmungsorganen der Taucherin und dem Kreislauf bestehen. Beim Ausatemvorgang soll das Gas über das BOV in die Umgebung entweichen können, wobei der Auslösedruck weniger als 1 bis 2 mbar betragen soll, um das Ausatmen möglichst kräfteschonend zu gestalten. Das ADV soll im OC-Modus wie eine 2. Stufe funktionieren, die beim Einatmen und dem einhergehenden Druckabfall ab ca. 2 bis 3 mbar auslöst und Atemgas aus der Druckluftflasche zur Verfügung stellt.

### 3.2.2 Konstruktionsanforderungen

Folgende Konstruktionsanforderungen wurden zur Gestaltung der Geometrie festgelegt:

- **Erfüllung der Europäischen Normen EN14143 und EN250:** Die mechanische Konstruktion sollte so ausgeführt werden, dass das Mundstück den Anforderungen der Europäischen Normen EN14143 (Atemgeräte - Autonome Regenerationstauchgeräte) und EN250 (Atemgeräte - Autonome Leichttauchgeräte mit Druckluft - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung) gerecht wird [37, 41].
- **Kompatibilität zum Kreislauftauchgerät:** Das Mundstück sollte kompatibel mit Anschlüssen und Komponenten des Kreislauftauchgeräts, wie zum Beispiel einem Head-up-Display und den Anschlüssen der Kreislaufschläuche sein.
- **Dichtheit:** Das Mundstück sollte dicht sowohl hinsichtlich Entweichen von Atemgas, als auch hinsichtlich Eindringen von Wasser sein. Aus diesem Grund sind

zwischen beweglichen Teilen, welche in direktem Kontakt mit dem umgebenden Wasser stehen, Dichtungselemente (zum Beispiel O-Ringe) zu verwenden.

- **Geringes Totraumvolumen:** Das Totraumvolumen sollte möglichst gering gehalten werden, um das erneute Einatmen von bereits verstoffwechseltem Gas (Pendelatmung) zu minimieren. Im CC-Modus befindet sich das Totraumvolumen zwischen den Richtungsventilen des Kreislaufes und dem Mund, im OC-Modus zwischen ADV, BOV und dem Mund.
- **Große Querschnitte:** Die luftführenden Querschnitte sollten so groß wie möglich ausgeführt werden, um die Anstrengungen beim Atmen unter Wasser durch einen geringen Strömungswiderstand zu minimieren. Große Querschnitte und ein gleichzeitig geringes Totvolumen führen allerdings unweigerlich zu einem Zielkonflikt, da die Erhöhung der Querschnitte eine Erhöhung des Totraumvolumens zur Folge hat. Hier musste ein entsprechender Kompromiss zu gefunden werden.
- **Vermeidung von Ecken und Kanten:** Ecken und Kanten erhöhen den Strömungswiderstand in luftführenden Bereichen und waren so weit wie möglich zu vermeiden.
- **Ergonomisches Design:** Die Bedienung des Mundstückes sollte sich möglichst einfach und selbsterklärend gestalten.
- **Kleine, leichte und kompakte Ausführung:** Das Gewicht und die Größe des Mundstücks sollten möglichst gering gehalten werden. Diese anzustrebende Anforderung ist einerseits wichtig, um die Kräfte der Taucherin während des Tauchgangs zu schonen, und andererseits, um den Transport des Gerätes möglichst einfach und kostenschonend (zum Beispiel Minimierung von Fluggepäck) zu gestalten.
- **Kunststoffgerechte Konstruktion:** Das Mundstück wurde gemäß den Regeln einer spritzgießgerechten Konstruktion zu gestaltet. Fügeflächen sollten so konstruiert werden, dass eine ausreichende Festigkeit gewährleistet ist.
- **Toleranzen:** Die Toleranzen für Standardspritzguss sind durch die DIN 16901 vorgegeben und liegen bei Standardspritzguss unter 1 % Abweichung vom Nennmaß. Toleranzen für mechanisch nachbearbeitete Bauteile sind wesentlich enger.

### 3.2.3 Materialanforderungen

Eingesetzte Materialien müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

- **Thermische Eigenschaften:** Das Mundstück sollte in einem Temperaturbereich zwischen  $-10$  und  $+50$  °C verwendet werden. Da die Temperatur bei direkter Sonneneinstrahlung abhängig von der Farbe des Materials über  $+50$  °C ansteigen kann, müssen verwendete Materialien eine Gebrauchstemperatur von mindestens  $+80$  °C aufweisen.
- **Mechanische Eigenschaften:** Die Materialien sollten im definierten Temperaturbereich eine möglichst hohe Schlagzähigkeit aufweisen, um nach stoßartigen Beanspruchungen (zum Beispiel Fallenlassen und Aufschlagen auf dem Boden) die Funktionen weiterhin erfüllen zu können. Durch eine ausreichende Kratzfestigkeit soll das Produkt auch nach vielen Tauchgängen eine qualitativ hochwertige Oberfläche aufweisen.
- **Zulassung für Lebensmittelkontakt:** Da sich Teile des Mundstücks in unmittelbarer Nähe von Schleimhäuten befinden, sollen die Materialien für den Lebensmittelkontakt (FDA- oder EU-Zertifikat) zugelassen sein. Somit soll sichergestellt werden, dass keine Schadstoffe in die Atemwege gelangen.
- **Witterungs- und UV-Beständigkeit:** Eingesetzte Materialien dürfen durch Witterungseinflüsse, wie zum Beispiel Einwirkung von UV-Strahlung, weder optisch noch mechanisch beeinträchtigt werden. In diesem Zusammenhang müssen verwendete Materialien eine ausreichende Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung aufweisen, da Tauchen meist im Freien unter Sonneneinstrahlung ausgeübt wird.
- **Chemische Beständigkeit:** Eingesetzte Materialien müssen gegenüber Wasser und Salzwasser beständig sein, da das Mundstück sowohl in Süßwasser (zum Beispiel in Seen) als auch Salzwasser (im Meer) zur Anwendung kommt. Eine möglichst hohe Beständigkeit gegenüber chloriertem Wasser ist wünschenswert.
- **Optische Eigenschaften:** Die Materialien müssen schwarz eingefärbt sein, um ein einheitliches Aussehen des gesamten Kreislauf-Tauchgerätes zu gewährleisten.
- **Verarbeitbarkeit und Bearbeitbarkeit:** Zur Urformung müssen verwendete Materialien spritzgießbar sein. Es sollen klebbare Materialien verwendet werden, um defekte Teile fernab der Zivilisation reparieren zu können. Um Hinterschnitte realisieren zu können, müssen die Materialien spanend bearbeitbar sein.

### 3.2.4 Technologische Anforderungen

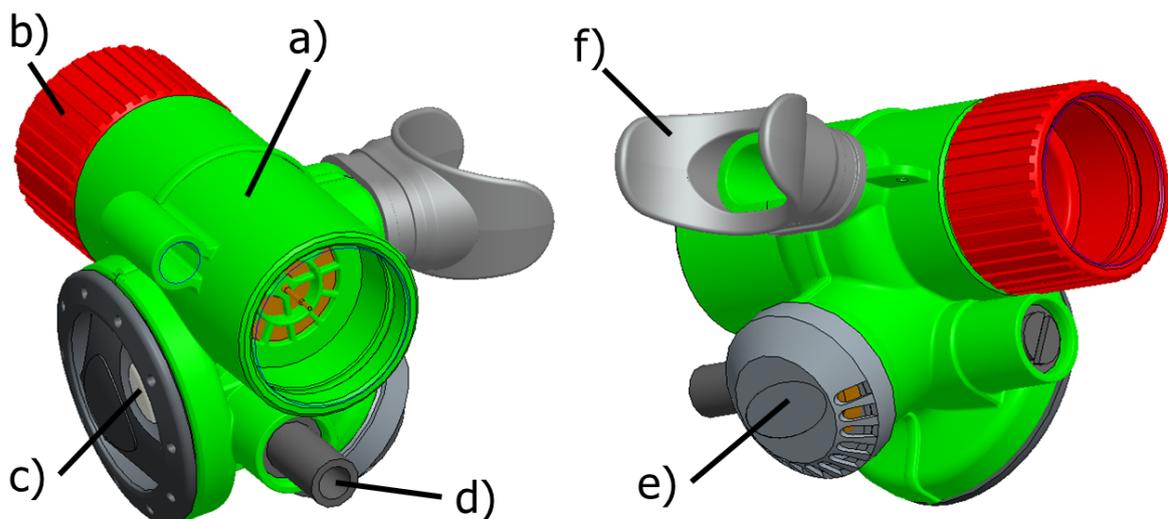
Da das Produkt in einer vergleichsweise geringen Stückzahl ausgeführt wird, sollen sich die Fertigungsverfahren möglichst einfach und kostengünstig gestalten. Es ist in Betracht zu ziehen, Spritzgießwerkzeuge aus Aluminium zu verwenden, welche verglichen mit Stahlwerkzeugen kostengünstiger in der Herstellung sind, wegen erhöhtem Verschleiß jedoch auf eine niedrige Ausbringungsmenge beschränkt sind. Die konstruktive Ausführung der Werkzeuge soll sich möglichst einfach gestalten. Durch die geringen Stückzahlen ergibt sich jedoch die Möglichkeit, spritzgegossene Bauteile nachzubearbeiten, um beispielsweise Hinterschnitte und engere Toleranzen realisieren zu können.



# 4 Ergebnisse

## 4.1 Geometrie

Abbildung 4.1 zeigt das fertige Geometriemodell des Mundstücks aus zwei unterschiedlichen Ansichten. Neben neu konstruierten Komponenten (zum Beispiel Gehäuse und Walze) besteht das Mundstück aus Komponenten, welche bereits am Markt erhältlich sind (zum Beispiel Membrane, Ventile und Verschlüsse). Diese erhältlichen Komponenten wurden durch eine entsprechende Gestaltung der konstruierten Bauteile in das Mundstück integriert.

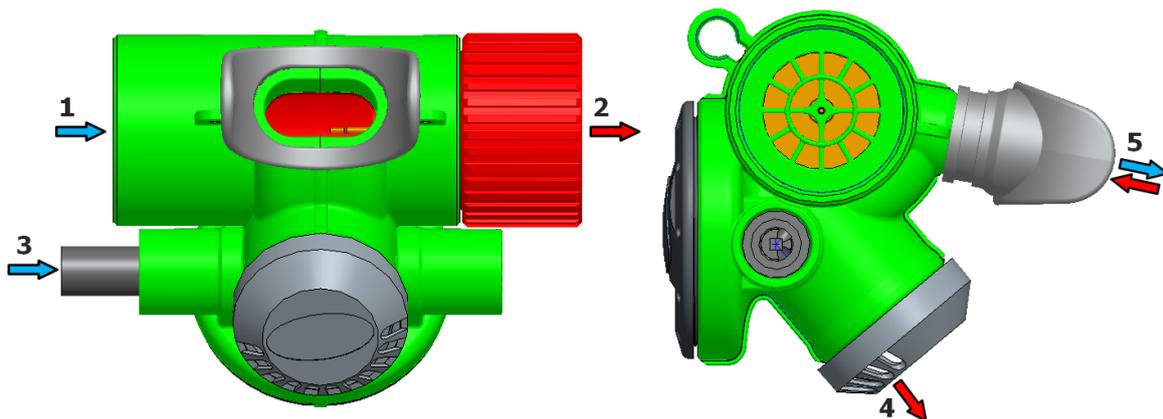


**Abbildung 4.1:** Mundstück dargestellt in unterschiedlichen Ansichten. Komponenten: Gehäuse (a), Walze (b), Membran des ADV (c), Druckluftanschluss des ADV (d), BOV (e), Elastomer-Mundstück (f).

In Abbildung 4.2 wird durch Richtungspfeile dargestellt, wo dem Mundstück Atemgas zu- bzw. abgeführt wird. Das Mundstück wird an Position 1 und 2 an den Kreislauf des Tauchgeräts angeschlossen, wobei die Richtung des strömenden Atemgases durch Richtungsventile definiert ist, welche sich im Inneren des Mundstücks befinden. An Position 3 wird ein Druckschlauch an das ADV angeschraubt, der Atemgas aus einer

Druckluftflasche liefert. An Position 4 befindet sich das BOV, worüber Atemgas in die Umgebung abgegeben werden kann. An Position 5 umschließt der Mund der Taucherin das Mundstück. Die Taucherin atmet frisches Atemgas ein, welches in weiterer Folge in der Lunge mit  $\text{CO}_2$  angereichert und ausgeatmet wird.

Die Umschaltung zwischen CC- und OC-Modus erfolgt durch Rotation der Walze. Befindet sich das Mundstück im CC-Modus und die Taucherin atmet ein, erfolgt die Zuführung von frischem Atemgas aus dem Kreislauf (1). Zusätzliches Atemgasvolumen, welches zum Beispiel auf Grund der Erhöhung der Tauchtiefe benötigt wird, wird dem Mundstück aus der Druckluftflasche über das ADV zugeführt. Atmet die Taucherin aus, strömt das Atemgas in den Kreislauf (2). Befindet sich das Mundstück im OC-Modus, erfolgt die Zuführung von Atemgas ausschließlich aus der Druckluftflasche über das ADV. Ausgeatmetes Atemgas wird über das BOV in die Umgebung abgegeben.



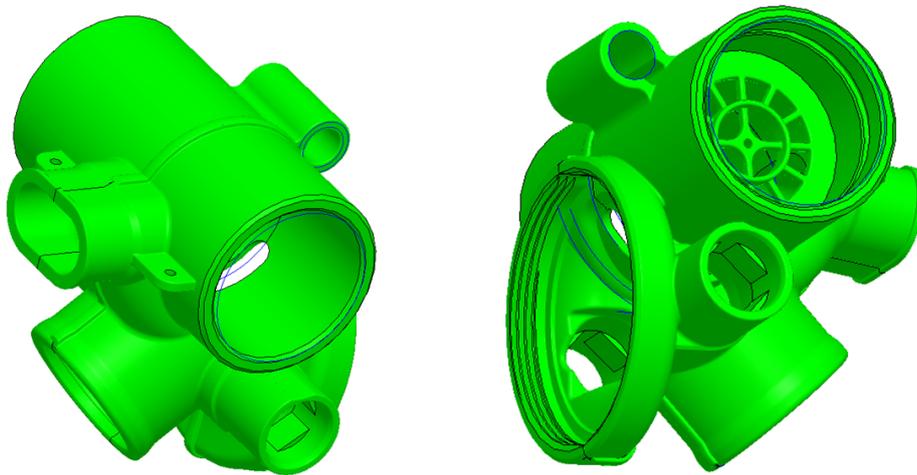
**Abbildung 4.2:** Zu- und Abführung von Atemgas am Mundstück durch Pfeile dargestellt (Blau: frisches Atemgas, rot: konsumiertes Atemgas). 1,2: Kreislauf. 3: ADV. 4: BOV. 5: Taucherin.

#### 4.1.1 Komponenten

Im Folgenden wird sowohl auf im Rahmen der Masterarbeit entwickelten Komponenten des Mundstücks als auch auf benötigte Zukaufteile eingegangen. Auf die Fertigung der Komponenten wird in Kapitel 4.3 eingegangen.

## Gehäuse

Das Gehäuse stellt das Herzstück des Mundstücks dar, da ein Großteil der Komponenten direkt in das Gehäuse eingebaut wird. Das Gehäuse besteht auf Grund der komplexen Geometrie aus zwei separat hergestellten Hälften, die zusammengeklebt werden. Abbildung 4.3 zeigt das Gehäuse aus zwei unterschiedlichen Ansichten.



**Abbildung 4.3:** Gehäuse aus zwei Ansichten.

Der Kreislauf wird wie in Abbildung 4.4 angedeutet an das Gehäuse angeschlossen. Unmittelbar nach dem Anschluss des Kreislaufs befindet sich eine Haltevorrichtung für ein Richtungsventil (siehe Abbildung 4.5 b) des Kreislaufs. Von der gegenüberliegenden Seite wird die Walze in das Gehäuse bis unmittelbar vor den Halter des Richtungsventils eingeschoben. Ein weiches Elastomer-Mundstück (siehe Abbildung 4.5 a), welches auf das Gehäuse aufgesteckt wird, ermöglicht der Taucherin ein angenehmes Tragegefühl. Sowohl beim Elastomer-Mundstück als auch beim Richtungsventil handelt es sich um Teile, welche bereits auf dem Markt erhältlich sind.

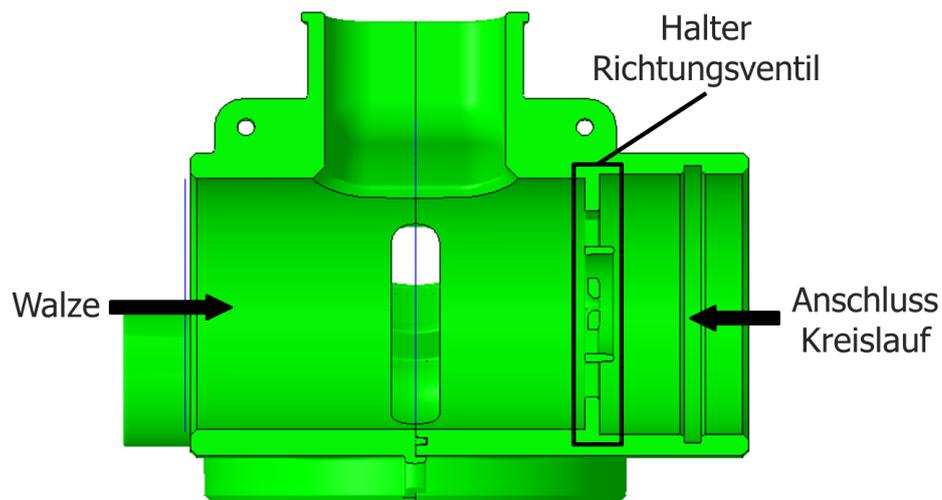


Abbildung 4.4: Gehäuse (geschnittene Ansicht).

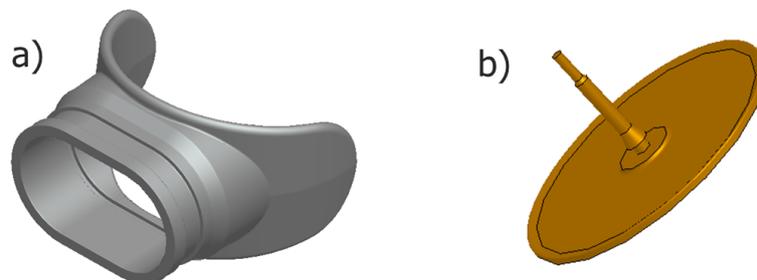
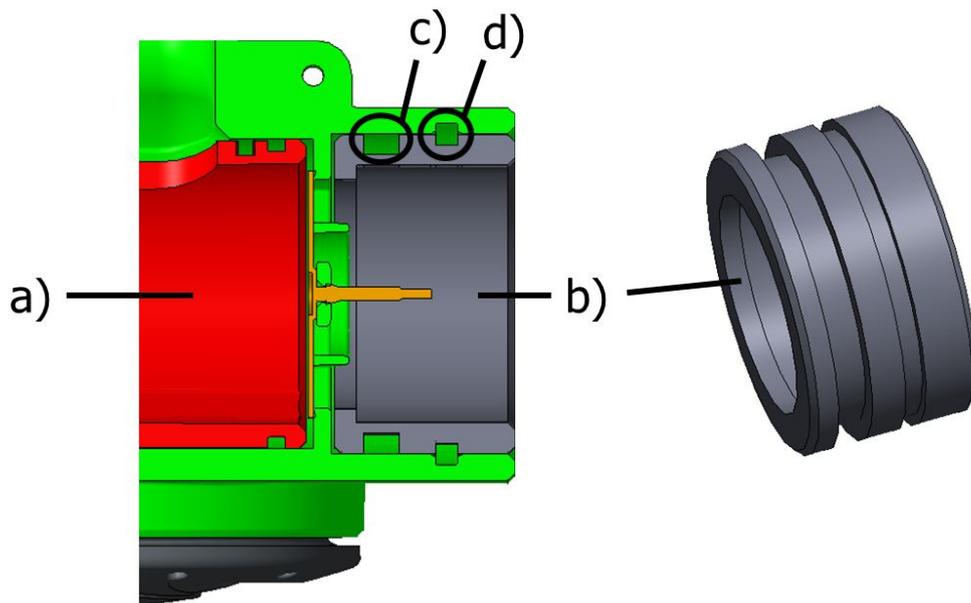


Abbildung 4.5: Elastomer-Mundstück (a) und Richtungsventil (b)

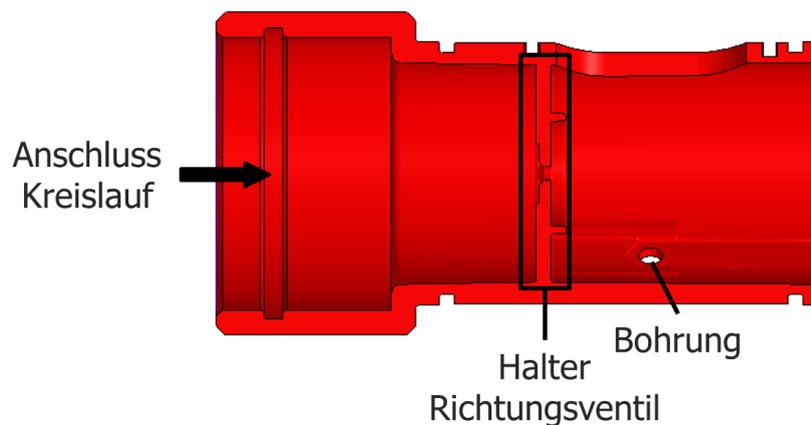
Der Anschluss des Kreislaufs hat die Aufgabe, das Gehäuse wasser- und gasdicht mit dem Schlauch des Kreislaufs zu verbinden. Zu diesem Zweck wird der Anschluss wie in Abbildung 4.6 dargestellt in das Gehäuse eingeführt. In Nut (c) wird ein O-Ring eingelegt, dessen Schnurdurchmesser größer ist als die Tiefe der Nut. Dadurch wird der O-Ring zusammengedrückt und dichtet wasser- und gasdicht ab. In Nut (d) wird durch eine Bohrung im Gehäuse ein flexibler Draht eingeschoben, der den Anschluss im Gehäuse fixiert.



**Abbildung 4.6:** Gehäuse mit eingebauter Walze (a) und Anschluss des Kreislaufs (b). Eine Nut (c) dient zur Aufnahme des O-Ringes, die andere Nut (d) dient zum formschlüssigen Fixieren des Anschlusses.

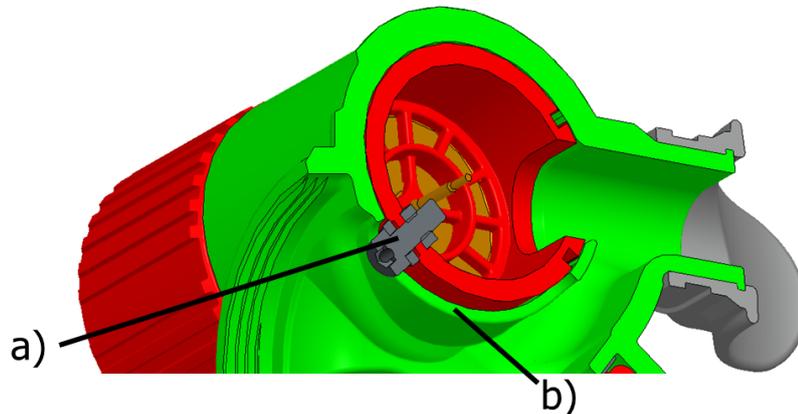
### Walze

Die Walze (siehe Abbildung 4.7) ermöglicht das Umschalten zwischen CC- und OC-Modus und ist gleichzeitig Teil des Kreislaufs. Sie ist weitgehend rotationssymmetrisch und enthält wie das Gehäuse eine Vorrichtung zum Anschluss des Kreislaufs und eine Haltevorrichtung für ein Richtungsventil. Der Anschluss der Walze an den Kreislauf erfolgt analog zum Anschluss des Kreislaufes an das Gehäuse. Die Walze wird in das Gehäuse eingeschoben, wie in Abbildung 4.6 dargestellt.



**Abbildung 4.7:** Walze (geschnittene Ansicht).

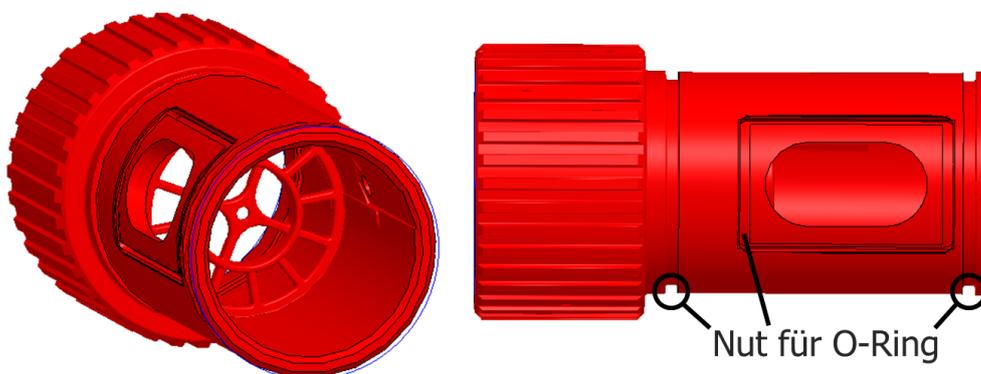
Die Walze weist eine Bohrung auf, in der eine Schraube mit Hilfe einer Mutter fixiert wird. Die Schraube ragt durch einen Führungsschlitz im Gehäuse durch, wodurch die Walze im Gehäuse fixiert ist und lediglich um  $80^\circ$  verdreht werden kann (siehe Abbildung 4.8). Gleichzeitig löst die Bewegung der Schraube durch die Drehung der Walze die Umschaltung zwischen mechanischen Funktionen aus (siehe Kapitel 4.1.2).



**Abbildung 4.8:** Schnittansicht: Schraube an Walze (a), Führung im Gehäuse (b).

Um Eindringen von Wasser in das Mundstück zu verhindern, muss die Grenzfläche zwischen Gehäuse und Walze wasser- und gasdicht sein. Es wurden zwei Konzepte zur Realisierung der Dichtheit erfolgreich erprobt:

**Konzept 1:** Die Dichtheit zwischen beweglichen Teilen wird in Tauchgeräten meist mit Hilfe von O-Ringen gewährleistet. Im vorliegenden Fall werden O-Ringe in Nuten eingelegt (siehe Abbildung 4.9). Der Schnurdurchmesser des O-Ringes ist größer als die Tiefe der Nut, wodurch der O-Ring beim Einschieben in das Gehäuse zusammengedrückt wird und somit weder Gas noch Wasser den O-Ring passieren kann (siehe 4.10).



**Abbildung 4.9:** Walze mit Nuten für O-Ringe zur Abdichtung.

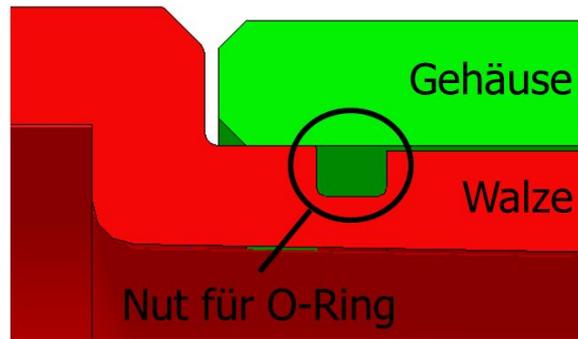


Abbildung 4.10: Walze mit Nut für O-Ring im Gehäuse.

**Konzept 2:** Wird die Walze mit einem Schlitz in Achsialrichtung versehen und von innen durch Spannringe aufgedrückt (siehe Abbildung 4.11), resultiert auf Grund des vergrößerten Durchmessers der Walze eine Flächenpressung zwischen Walze und Gehäuseinnenwand. Eine Fettschicht zwischen Gehäuse und Walze bewirkt eine Abdichtung. Dieses Prinzip wird im Mundstück des *Dräger Ray* angewendet, und hat gegenüber der Abdichtung mit O-Ringen den Vorteil einer größeren Leichtgängigkeit bei der Rotation der Walze.

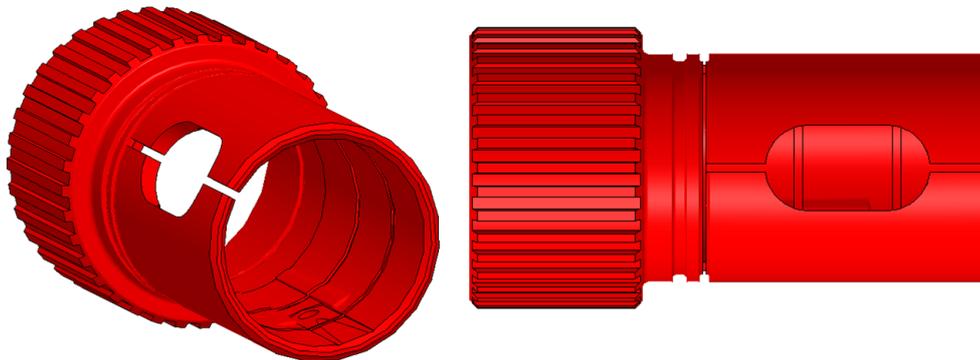
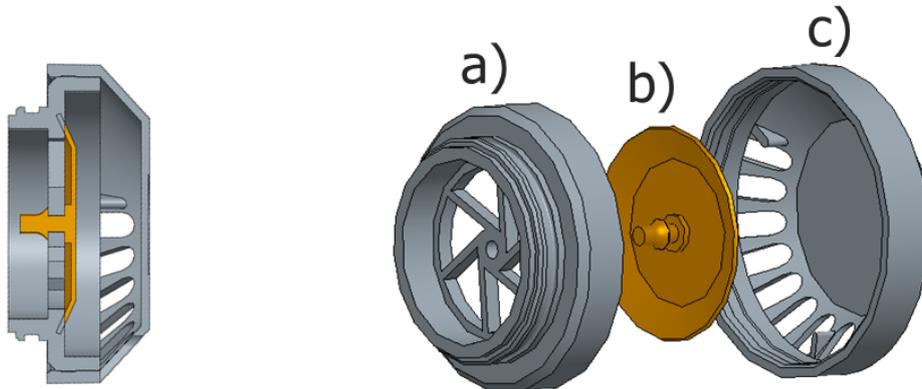


Abbildung 4.11: Geschlitzte Walze.

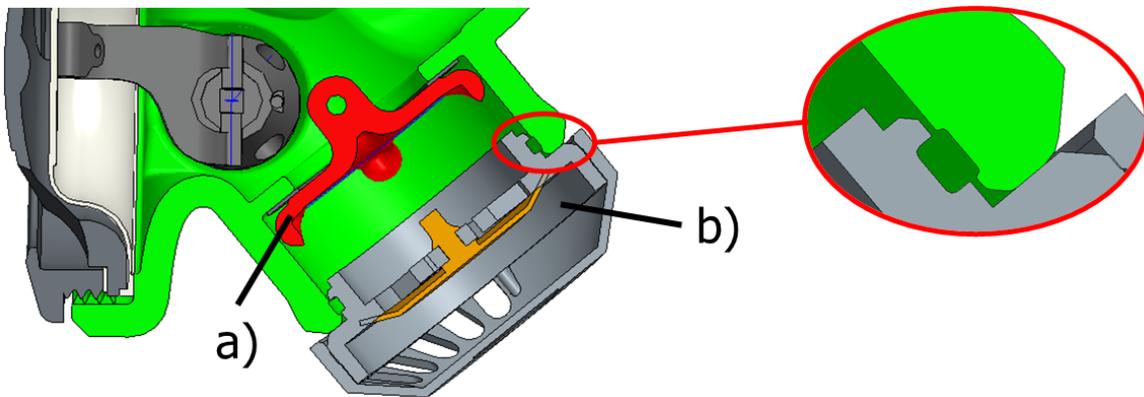
### Bail-out-Valve (BOV)

Das BOV wird auch als Auslassventil bezeichnet und ermöglicht ein Auslassen von Atemgas, wenn sich das Gerät im OC-Modus befindet. Das BOV besteht aus einem Richtungsventil in Form einer elastischen Membran, welche in einem Ventilhalter eingeschnappt ist. Zum Schutz gegenüber ungewollter Betätigung des Ventils von außen wird eine Schutzkappe auf den Ventilhalter aufgeschnappt (siehe Abbildung 4.12). Das BOV als System aus Ventilhalter, Richtungsventil und Schutzkappe ist bereits auf dem Markt erhältlich und wird mit Hilfe eines O-Ringes, welcher sich in der Nut des BOV

und des Gehäuses befindet, eingeschnappt (siehe Abbildung 4.13).

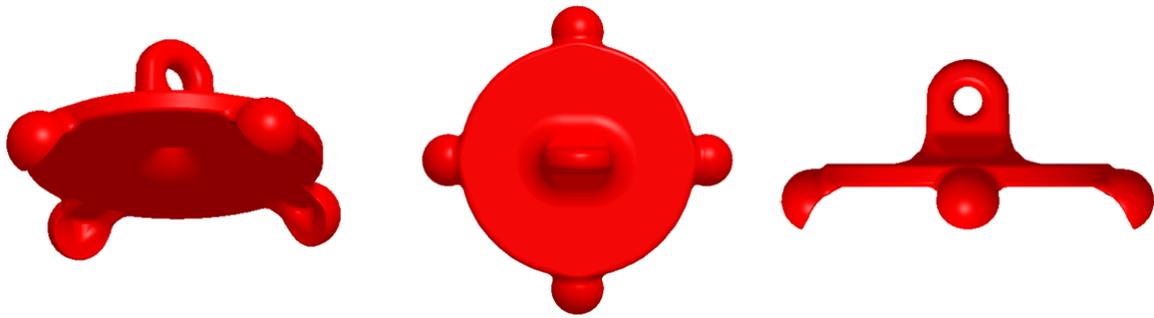


**Abbildung 4.12:** Komponenten des BOV: Ventilhalter (a), Richtungsventil (b), Schutzkappe (c).



**Abbildung 4.13:** BOV-Verschlussplatte (a) und eingebautes BOV (b) im geschlossenen Modus als Schnittansicht. Das BOV wird durch eine Nut, in der ein O-Ring Platz findet, in das Gehäuse eingeschnappt (siehe vergrößerte Ansicht).

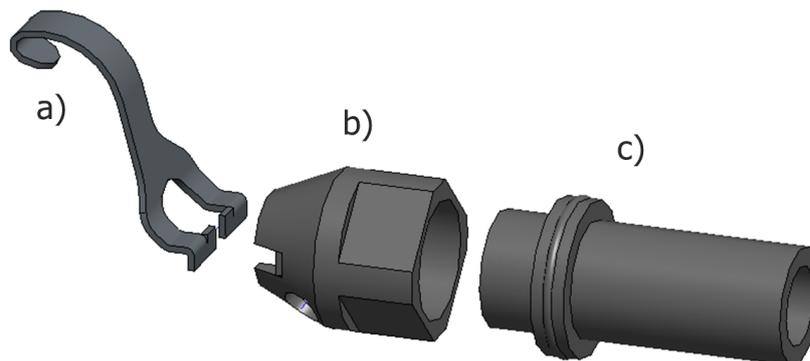
Die BOV-Verschlussplatte dient zum wasser- und gasdichten Verschließen des BOV im geschlossenen Modus. Die BOV-Verschlussplatte ist durch eine Zugfeder mit der Schraube der drehbaren Walze verbunden und axial verschiebbar (siehe Abbildung 4.13). Um die rein axiale Verschiebbarkeit zu gewährleisten, weist die BOV-Verschlussplatte seitlich vier kugelförmige Konstruktionen auf, welche die Komponente zentrieren und gleichzeitig ein Vorbeiströmen von Atemgas an der Verschlussplatte ermöglichen, wenn sich das Mundstück im OC-Modus befindet (siehe Abbildung 4.14).



**Abbildung 4.14:** BOV-Verschussplatte.

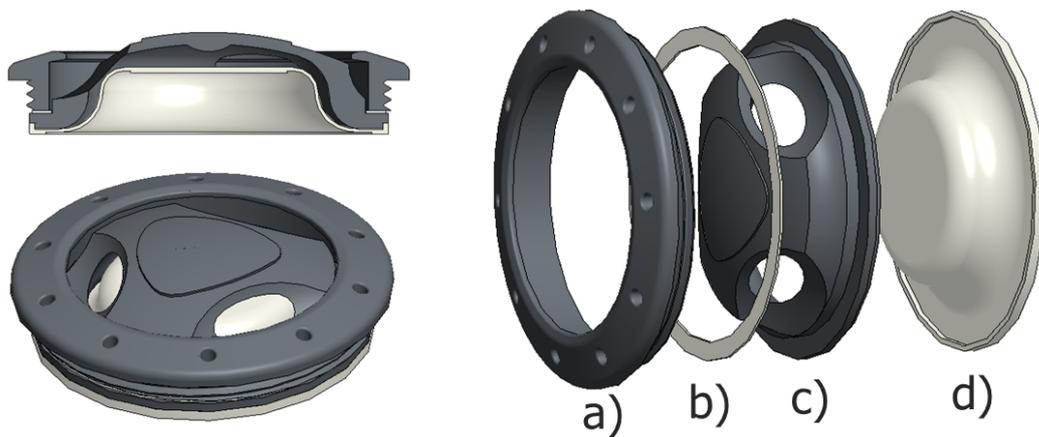
#### Automatisches Diluentgas-Ventil (ADV)

Um dem Mundstück Atemgas aus der Druckluftflasche zuführen zu können, kommt ein ADV zum Einsatz. Dieses besteht aus einem Hebel, der in ein Druckluftventil eingebaut ist (siehe Abbildung 4.15). Eine Druckfeder, welche im Druckluftventil zwischen der Halterung und dem Druckluftanschluss liegt, spannt den Hebel vor.

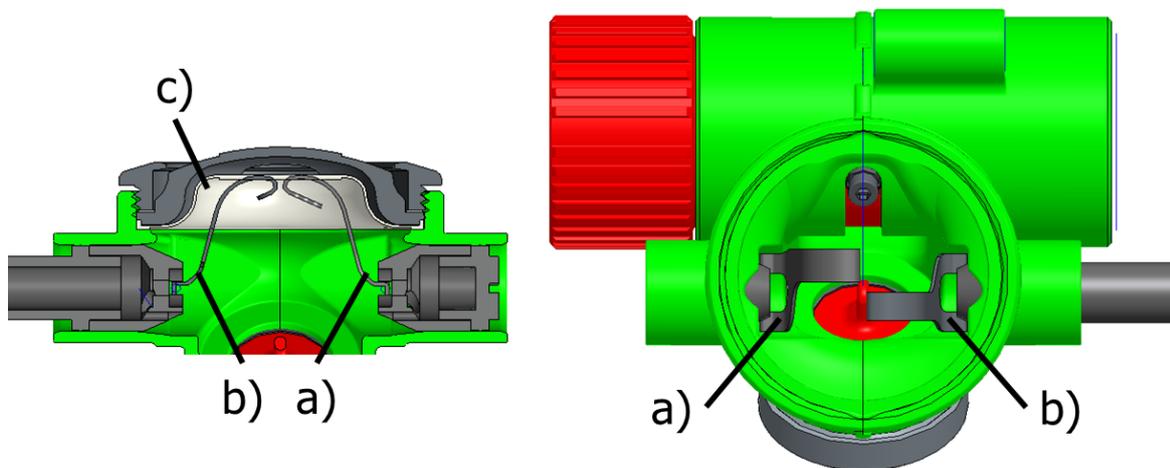


**Abbildung 4.15:** Druckluft-Ventil: Halterung (b) mit Hebel (a) und Druckluft-Anschluss (c).

Eine Membran (siehe Abbildung 4.16), die mit Hilfe eines Deckels und eines Schraubverschlusses am Gehäuse fixiert ist, berührt den innenliegenden Hebel, wie in Abbildung 4.17 dargestellt. Tritt im Mundstück ein Unterdruck von ca. 2 bis 3 mbar durch Einatmen oder Vergrößerung der Tauchtiefe auf, wird die Membran nach innen gedrückt und der vorgespannte Hebel gibt nach, wodurch das Druckluftventil geöffnet wird und Atemgas so lange einströmt, bis zwischen dem Druck im Mundstück und dem Umgebungsdruck wieder ein Gleichgewicht herrscht.

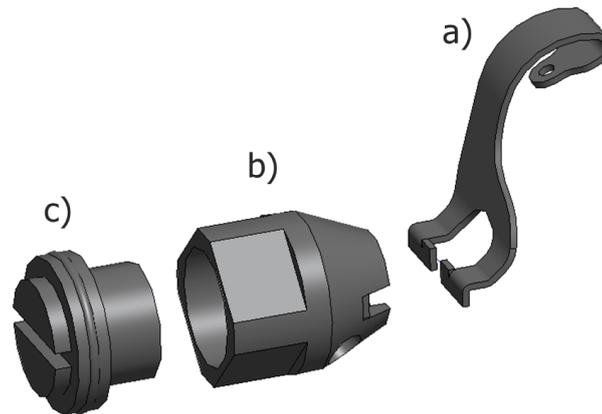


**Abbildung 4.16:** Schraubverschluss (a), Gleitring (b), Deckel (c), Membran (d).



**Abbildung 4.17:** Hebel zur Erhöhung der Kraft auf Membran (a), Hebel des Druckluft-Ventils (b), Membran (c).

Da beim Einatmen im CC-Modus ebenfalls ein Unterdruck von einigen mbar entsteht, würde zusätzlich zum Atemgas aus dem Kreislauf auch über das ADV Atemgas einströmen, was aber ungewollt ist. Im CC-Modus drückt daher ein weiterer Hebel, der auf der gegenüberliegenden Seite des ADV mit Hilfe einer Feder vorgespannt ist, gegen die Membran. Im Gegensatz zum Druckluft-Anschluss am ADV dichtet eine Verschlusschraube ab (siehe Abbildung 4.18). Durch die Wahl einer geeigneten Feder zwischen Halterung und Verschlusschraube wird erreicht, dass sich die Membran erst ab einem Unterdruck von ca. 30 mbar verformt und das ADV auslöst. Dieser Fall ist bei der Erhöhung der Tauchtiefe gewünscht.



**Abbildung 4.18:** Hebel zur Aufbringung einer zusätzlichen Kraft auf die Membran (a), Halterung (b), Verschlusschraube (c)

#### 4.1.2 Mechanische Funktionen

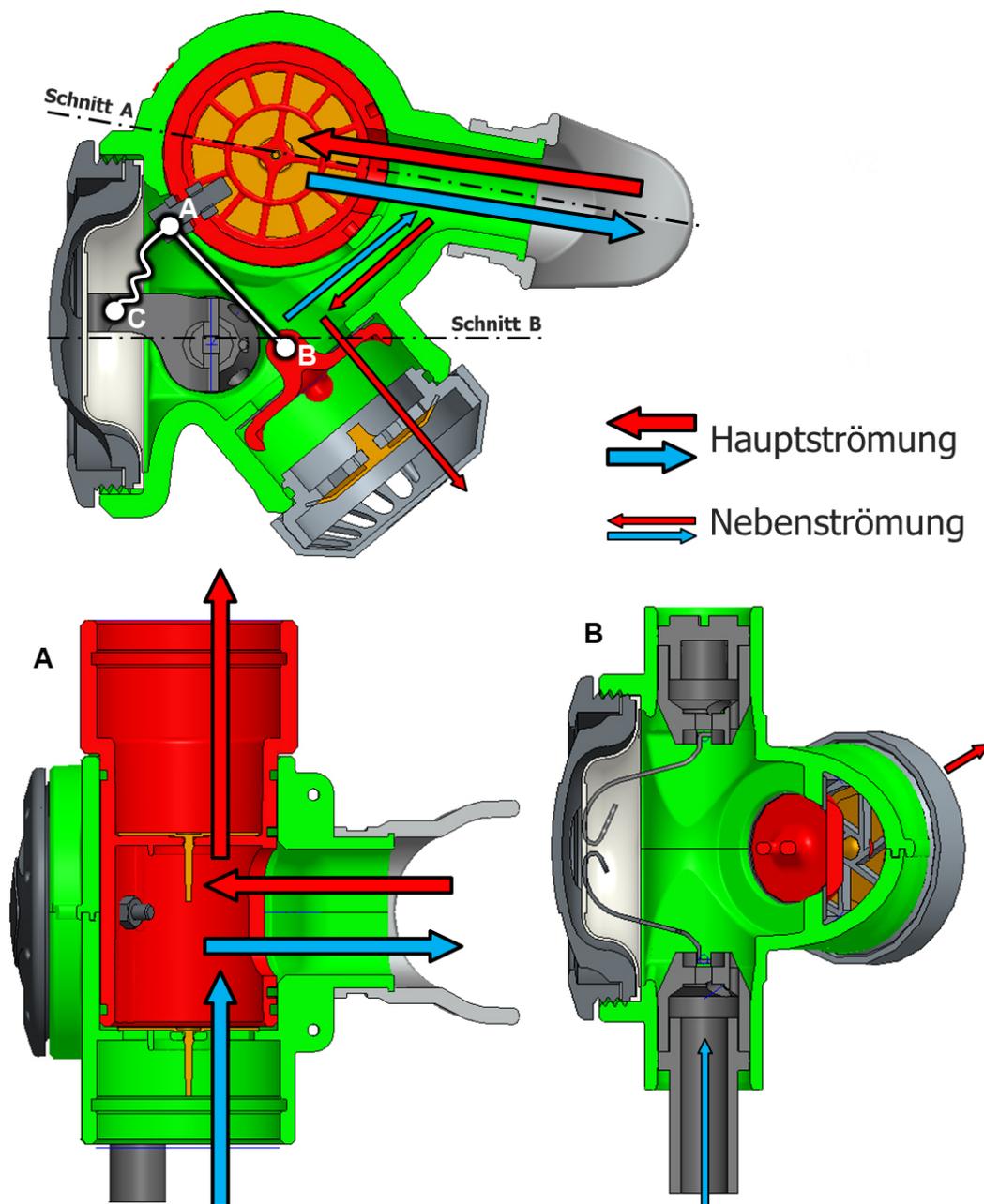
Das Mundstück wird im Normalfall im CC-Modus verwendet. Bei einem technischen Versagen des Tauchgeräte-Kreislaufs (zum Beispiel durch Eindringen von Wasser in den Kreislauf) kann die Taucherin das Mundstück durch Drehen der Walze in den OC-Modus umschalten, bei dem Atemgas über das ADV direkt aus der Druckluftflasche geliefert und die Verbindung zwischen der Taucherin und dem Kreislauf unterbrochen wird. Der Taucherin steht somit Atemgas zur Verfügung, um an die sichere Wasseroberfläche auftauchen zu können.

##### CC-Modus (Geschlossener Modus)

Im CC-Modus besteht eine Verbindung zwischen den Atmungsorganen der Taucherin und dem Kreislauf des Tauchgeräts. In Abbildung 4.19 sind Schnittansichten des Mundstücks aus unterschiedlichen Perspektiven dargestellt, um die Luftströme beim Ein- und Ausatmen durch Richtungspfeile zu verdeutlichen.

Atmet die Taucherin ein, entsteht im Mundstück ein Unterdruck, wodurch Atemgas aus dem Kreislauf angesaugt wird. Jener Hebel, der neben dem Hebel des ADV eine zusätzliche Kraft gegen die Membran aufbringt, verhindert ein Auslösen des ADV während des Einatmens. Durch eine Erhöhung der Tauchtiefe entsteht im Tauchgerät ein Unterdruck. Ab einem Unterdruck von 30 mbar hebt sich die Kraft der Membran,

welche aus dem Unterdruck resultiert, mit der Kraft der Hebel auf, wodurch frische Atemluft durch das ADV bis zum Erreichen eines Kräftegleichgewichts in das Mundstück einströmt. Der Hebel ist durch eine Schnur AC (siehe Abbildung 4.19) mit der Schraube an der Walze verbunden, wobei die Schnur im CC-Modus locker ist, wodurch der Hebel ungehindert gegen die Membran drücken kann.



**Abbildung 4.19:** Geschlossener Modus: Kreislauf geöffnet, BOV geschlossen. Darstellung der Atemgasströmung (Blau: frisches Atemgas. Rot: ausgeatmetes Gas).

Atmet die Taucherin aus, entsteht im Mundstück ein Überdruck, wodurch das ausgeatmete Gas in den Kreislauf gedrückt wird. Eine Zugfeder AB (siehe Abbildung 4.19) verbindet die Schraube an der Walze mit der BOV-Verschlussplatte und ist im geschlossenen Modus ausgelenkt. Dadurch wird die BOV-Verschlussplatte gegen einen ringförmigen Bereich des Gehäuses gezogen und verhindert ein Entweichen des Atemgases über das BOV. Liegt im Mundstück ein Überdruck von mehr als ca. 20 mbar vor (zum Beispiel auf Grund der Verringerung der Tauchtiefe), hebt sich die resultierende Kraft des Innendrucks auf die BOV-Verschlussplatte mit der Federkraft auf, wodurch Atemgas über das BOV in die Umgebung entweichen kann. Dadurch wird eine Beschädigung der menschlichen Atmungsorgane durch Überdruck verhindert.

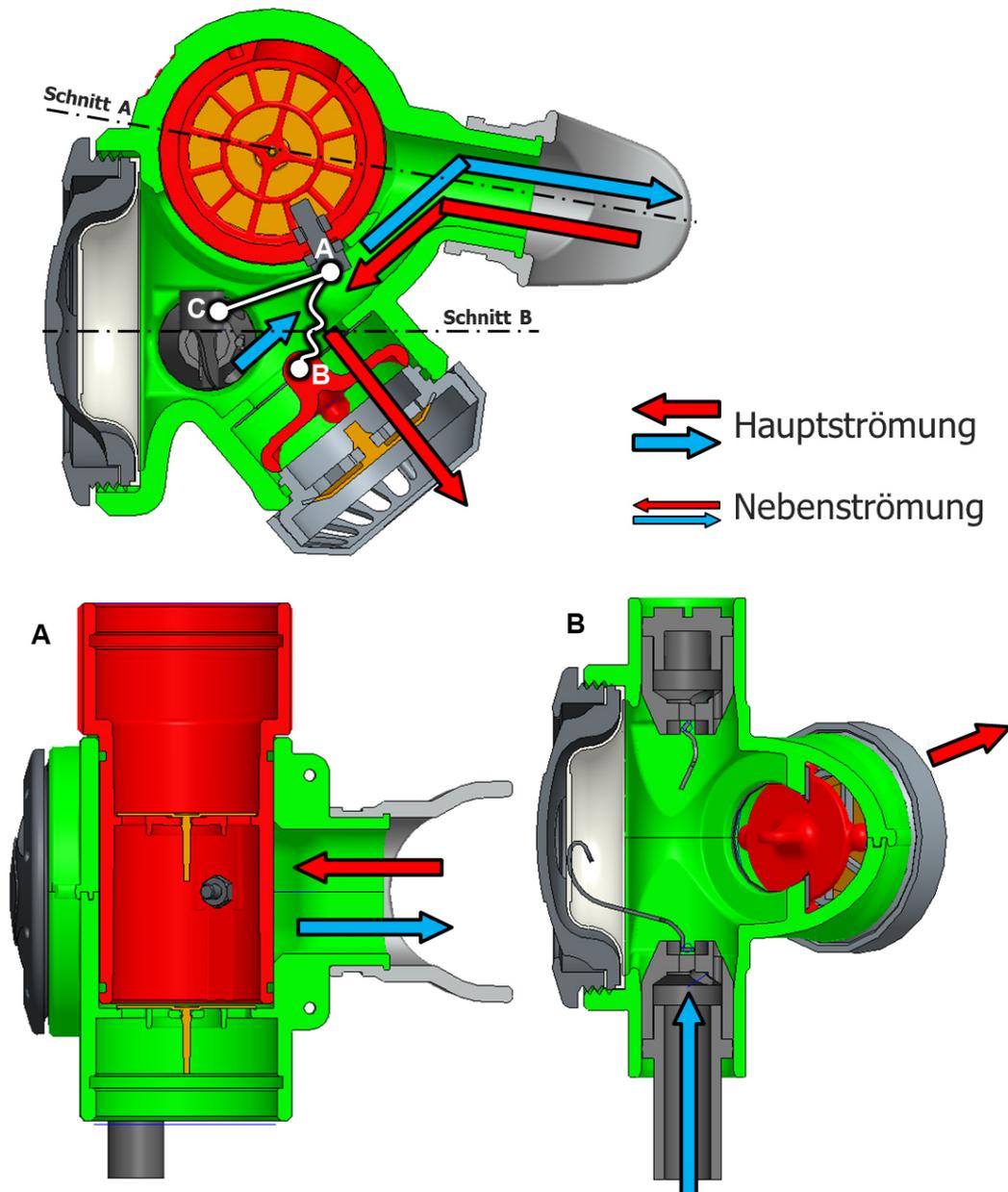
Die Strömungsrichtung des Atemgases im Kreislauf ist durch zwei Richtungsventile definiert, welche sich an den Positionen V1 und V2 befinden (siehe Abbildung 4.19). Das Totraumvolumen befindet sich zwischen den Richtungsventilen und dem Mund der Taucherin und beträgt ca.  $63 \text{ cm}^3$ . Im Vergleich zum Mundstück des *Dräger Ray* konnte das Totraumvolumen somit um  $32 \text{ cm}^3$  gesenkt werden.

#### OC-Modus (Offener Modus)

Das Mundstück wird in den OC-Modus umgeschaltet, indem die Taucherin die Walze aus seiner Sicht bis zum Anschlag weg dreht. Die Verbindung zwischen dem Inneren des Gehäuses und dem Inneren der Walze wird dadurch unterbrochen, wodurch der Kreislauf verschlossen wird (siehe Abbildung 4.20).

Durch die Rotation der Walze wird die Schraube an der Walze von der Membran weg bewegt und die Schnur AC gespannt, wodurch jener Hebel, welche im CC-Modus die zusätzliche Kraft auf die Membran aufbringt, von der Membran weg gezogen wird. Somit wirkt im OC-Modus lediglich der Hebel des ADV gegen die Membran. Atmet die Taucherin ein, wird ab einem Unterdruck von 1 bis 2 mbar das ADV durch die Verschiebung der Membran und der einhergehenden Bewegung des Hebels ausgelöst und es strömt frisches Atemgas aus der Druckluftflasche über das ADV in das Mundstück. Auf Grund der Rotation der Walze verringert sich der Abstand zwischen Schraube und BOV-Verschlussplatte unter die Länge der Feder AB, wodurch diese nicht mehr ausgelenkt ist und somit keine Kraft aufbringen kann. Atmet die Taucherin aus, strömt das Atemgas an der BOV-Verschlussplatte vorbei und verlässt das Mundstück über

das BOV in die Umgebung.



**Abbildung 4.20:** Offener Modus: Kreislauf geschlossen, BOV geöffnet. Darstellung der Atemgasströmung (Blau: frisches Atemgas. Rot: ausgeatmetes Gas).

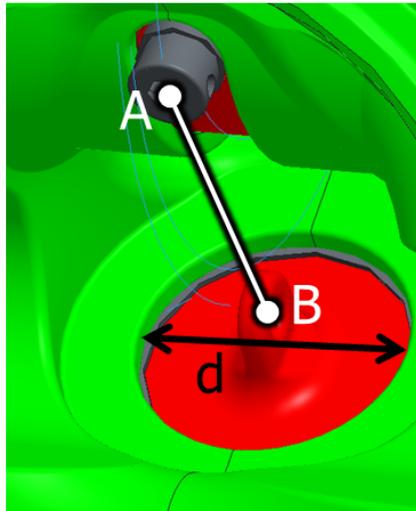
#### Berechnung der Federkonstante der Zugfeder AB

Die Zugfeder AB bringt eine in Richtung der Schraube wirkende Kraft auf die BOV-Verschlussplatte auf, um ein Entweichen von Atemgas im CC-Modus in die Umgebung zu verhindern. Ab einem definierten Überdruck  $p$  im Inneren des Mundstücks soll sich

die Federkraft mit der resultierenden Kraft der Druckdifferenz zwischen dem Inneren des Mundstücks und der Umgebung aufheben.

Aus der innenseitigen Fläche A der BOV-Verschlussplatte und dem Überdruck  $p$  ergibt sich eine resultierende Kraft  $F$  auf die BOV-Verschlussplatte entsprechend Gleichung 4.1, die nach außen wirkt. Die Fläche A ergibt sich aus dem Durchmesser  $d$ , wie in Abbildung 4.21 dargestellt. Die Federkonstante  $k$  verbindet die Auslenkung der Feder  $\Delta x$  mit der daraus resultierenden Kraft  $F$ .

$$F = p \cdot A = p \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = k \cdot \Delta x \quad (4.1)$$



**Abbildung 4.21:** Ausgelenkte Zugfeder AB im geschlossenen Modus.

In Tabelle 4.1 ist die Länge der Zugfeder AB zwischen CC- und OC-Modus gegenübergestellt, wobei die Feder im OC-Modus unausgelenkt vorliegt (Länge  $L_0$ ). Die Auslenkung  $\Delta x$  ist gleich die Differenz der Längen  $L_1$  und  $L_0$  und beträgt somit 14 mm.

**Tabelle 4.1:** Länge der Zugfeder AB in geschlossenem und offenem Modus

	CC-Modus	OC-Modus
Länge der Zugfeder AB	$L_1 = 34 \text{ mm}$	$L_0 = 20 \text{ mm}$

Wird die Federkonstante  $k$  aus Gleichung 4.1 freigestellt, ergibt sich Gleichung 4.2.

Somit lässt sich die Federkonstante  $k$  jener Zugfeder der Länge  $L_0$  berechnen, die bei der Auslenkung auf die Länge  $L_1$  die BOV-Verschlussplatte bis zu einem definierten Überdruck  $p$  zurückhält.

$$k = \frac{p \cdot d^2 \cdot \pi}{4 \cdot \Delta x} \quad (4.2)$$

Unter der Annahme eines Überdrucks  $p = 20$  mbar, einer Auslenkung  $\Delta x = 14$  mm und einem Durchmesser  $d = 23,5$  mm resultiert eine Federkonstante  $k = 0,062$  N/mm.

### HUD-Halterung und Sensor

Am Gehäuse befindet sich eine rohrartige Konstruktion (siehe Abbildung 4.22), die sowohl als Halterung für ein Head-up-Display (HUD) als auch für die Platzierung eines magnetischen Sensors dient. Auf Grund eines kleinen Magneten, welcher an der Walze angebracht ist, erkennt der Sensor durch die Position der Walze, in welchem Modus (offen oder geschlossen) sich das Mundstück befindet. Das HUD versorgt die Taucherin visuell mit wichtigen Informationen, wie zum Beispiel Tauchtiefe, Sauerstoffsättigung im Kreislauf und Modus des Mundstücks.

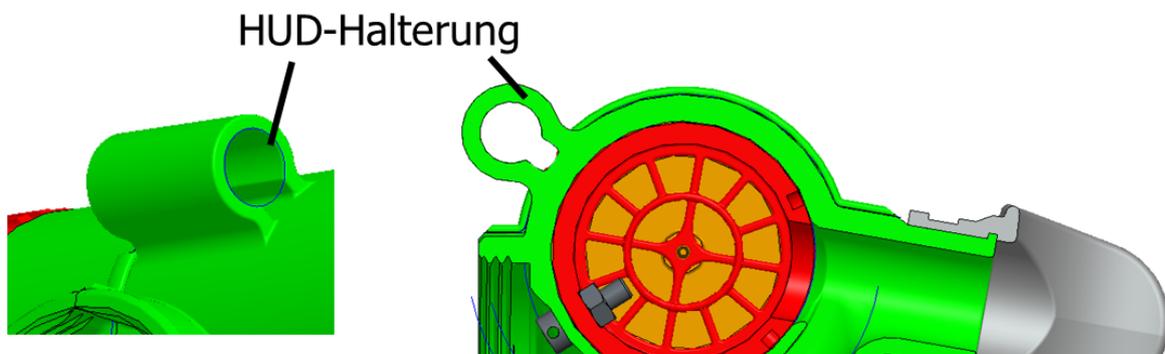


Abbildung 4.22: HUD-Halterung am Gehäuse des Mundstücks.

## 4.2 Werkstoffauswahl

Es wurde eine Werkstoffauswahl durchgeführt, um aus der Gesamtheit von verfügbaren polymeren Werkstoffen in allen Anforderungen optimale Materialien für das Mundstück auszuwählen. Durch diese Vorgehensweise wurde kein Werkstoff zu Beginn vom

Auswahlprozess ausgeschlossen. Auf Basis der Materialanforderungen (siehe Kapitel 3.2.3) wurde zunächst eine Materialvorauswahl durchgeführt, deren Ergebnis eine Liste möglicher Materiallösungen war. Durch weiterführende Informationsbeschaffung zu den möglichen Materiallösungen wurde eine Feinauswahl durchgeführt, deren Ergebnis zwei Materialien waren, welche die geforderten Anforderungen bestmöglich erfüllen.

### 4.2.1 Werkstoffvorauswahl

Auf Basis der Materialanforderungen wurden einschränkende Vorauswahlkriterien festgelegt. Durch den Vergleich der Vorauswahlkriterien mit den Eigenschaftsprofilen von Kunststoffen in Literatur und geeigneten Datenbanken entstand eine Liste möglicher Materiallösungen.

#### Vorauswahlkriterien

Folgende Vorauswahlkriterien (siehe Tabelle 4.2) wurden herangezogen, um aus der Vielzahl an verfügbaren Kunststoffen geeignete Materialien zu finden, welche die genannten Anforderungen erfüllen. Die maximale Gebrauchstemperatur von 80 °C wurde festgelegt, um das Produkt weder während des Gebrauchs, noch während des Transportes in Umgebungen mit hoher Temperatur zu schädigen. Das Material muss eine Zulassung für Lebensmittelkontakt (FDA- oder EU-Zertifikat) aufweisen. Das Material sollte eine möglichst hohe Schlagzähigkeit aufweisen, da das Produkt in der freien Natur verwendet wird und möglicherweise schlagförmigen Beanspruchungen ausgesetzt ist. Weiters muss es weitgehend beständig gegenüber UV-Strahlung, Salzwasser und chloriertem Wasser sein. Um ein niedriges Produktgewicht realisieren zu können, sollte das Material eine niedrige Dichte bei einem möglichst hohen E-Modul aufweisen. Die Verarbeitung sollte durch Spritzgießen möglich sein, wobei die Möglichkeit der Klebbarkeit und spanenden Nachbearbeitbarkeit gegeben sein soll. Da der Materialkostenanteil bei Kleinserien eine untergeordnete Rolle spielt, wurde der Materialpreis bei der Werkstoffauswahl nicht berücksichtigt.

**Tabelle 4.2:** Zur Werkstoffauswahl herangezogene Vorauswahlkriterien

<b>Kriterium</b>	<b>Wert</b>	<b>Forderung / Wunsch</b>
maximale Gebrauchstemperatur	80 °C	Forderung
schwarz eingefärbt		Forderung
Zulassung für Lebensmittelkontakt		Forderung
UV-Beständigkeit	max.	Wunsch
chemische Beständigkeit:		
Wasser	max.	Forderung
Salzwasser	max.	Forderung
chloriertes Wasser	max.	Wunsch
Kratzfestigkeit (Härte)	max.	Wunsch
Schlagzähigkeit	max.	Wunsch
Dichte	min.	Wunsch
E-Modul	max.	Wunsch
Verarbeitung durch Spritzgießen		Wunsch
Spanende Nachbearbeitung		Wunsch
Klebbar und schweißbar		Wunsch

### Ermittlung möglicher Materiallösungen

In Tabelle 4.3 sind Materiallösungen mit der jeweiligen maximalen Gebrauchstemperatur (dauernd), dem E-Modul, der Dichte und der Schlagzähigkeit dargestellt. Auf Grund der Vielzahl an verfügbaren Modifikationen, welche zum Beispiel durch den Zusatz von Additiven wie Verstärkungsstoffe entstehen, können für die genannten Eigenschaften oft nur Wertebereiche angegeben werden. In [6] sind detaillierte Informationen hinsichtlich Werkstoffeigenschaften zu den aufgelisteten Materialien zu finden.

**Tabelle 4.3:** Liste möglicher Materiallösungen

<b>Werkstoff</b>	<b>max. Gebrauchstemp.</b> °C	<b>E-Modul</b> MPa	<b>Dichte</b> g/cm <sup>3</sup>	<b>Schlagzähigkeit (23 °C)</b> kJ/m <sup>2</sup>
PC	135	2300	1,20	kein Bruch
PC-GF30	145	5500	1,43	30
ABS	75 – 85	2200 – 3000	1,04 – 1,06	kein Bruch
ASA	75 – 85	2300 – 2900	1,07	kein Bruch
POM	90	2800 – 3200	1,41 – 1,42	kein Bruch
PP	100	1300 – 1800	0,90 – 0,92	> 20
PP-GF30	100	5400	1,14	15

**Polycarbonat (PC)** ist amorph und zeichnet sich durch eine vergleichsweise hohe Festigkeit, hohe Schlagzähigkeit, hohe Maßstabilität und geringe Wasseraufnahme aus. Der transparente Kunststoff kann mit Hilfe von Farbstoffen eingefärbt werden. PC ist weitgehend beständig gegenüber UV-Strahlung und im Gebrauchstemperaturbereich gesundheitlich unbedenklich. Es weist eine gute Zerspanbarkeit auf, ist schweißbar und zum Beispiel mit Hilfe von Lösungsmitteln wie Dichlormethan ohne sichtbare Naht klebbar. PC ist kerbempfindlich und anfällig gegen Spannungsrisssbildung: Kommt PC mit Wasser über 60 °C (zum Beispiel bedingt durch Reinigungstätigkeiten) oder bestimmten Schmiermitteln in Berührung, entstehen Spannungsrisse, welche die mechanischen Eigenschaften deutlich reduzieren. Auch Kerben, welche zum Beispiel durch schlagartige Beanspruchung entstehen, initiieren Spannungsrisse. Typische Anwendungen sind Leuchten aller Art, Gehäuse und Isolierteile. Durch Verstärkungsstoffe, wie zum Beispiel Glasfasern, können die mechanischen Eigenschaften verändert werden. **Glasfaserverstärktes Polycarbonat (PC-GF)** weist im Vergleich zu unverstärktem PC zum Beispiel einen erhöhten E-Modul und eine höhere Formstabilität auf [6].

**Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)** ist ein Terpolymer, bestehend aus den drei Monomeren Acrylnitril, Butadien und Styrol und gehört zu den amorphen Thermoplasten. Es weist eine hohe Härte, hohe Schlagzähigkeit und hohe Maßbeständigkeit auf. Auf Grund des eingelagerten Butadiens ist ABS unempfindlicher gegen Spannungsrisssbildung als Polystyrol (PS) oder Styrol-Acrylnitril (SAN). Da Butadien allerdings durch UV-Strahlung zersetzt wird, altert ABS unter Einfluss von UV-Strahlung innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit [6].

**Acrylnitril-Styrol-Acrylester (ASA)** ist wie ABS ein Terpolymer, wobei die Butadienkomponente durch eine Acrylesterkomponente ersetzt ist. ASA weist ähnliche Eigenschaften wie ABS auf, ist jedoch weitaus beständiger gegenüber Witterungseinflüssen wie UV-Strahlung. ASA bildet qualitativ hochwertige, glänzende und kratzfeste Oberflächen, und weist eine sehr gute chemische Beständigkeit auf, vor allem gegenüber wässrigen Medien und verdünnten Säuren oder Alkalien sowie Waschlösungen. Verwendung findet ASA bei witterungsbeständigen Anwendungen, wie zum Beispiel im Sport- und Freizeitbereich als Surfbrett oder als Außenhaut von Automobilteilen. ASA ist in einem breiten Temperaturbereich problemlos verarbeitbar.

**Polyoxymethylen (POM)** ist ein teilkristalliner Thermoplast mit hoher Härte und Steifigkeit, hoher Formbeständigkeit in der Wärme und geringer Wasseraufnahme. POM weist eine hohe Beständigkeit gegen Lösemittel und gegen die Bildung von Spannungsrissen auf. Es ist bekannt für seine günstigen Gleit- und Verschleißigenschaften. POM ist in einem breiten Prozessfenster verarbeitbar und in allen Farben einfärbbar. Bedingt durch seine niedrige Oberflächenenergie ist POM ohne spezielle Oberflächenbehandlung nur bedingt klebbar [6].

**Polypropylen (PP)** ist ein teilkristalliner Thermoplast aus der Gruppe der Polyolefine und weist eine sehr hohe Beständigkeit gegen den Angriff durch Chemikalien und andere Medien auf. Auf Grund seiner geringen Oberflächenenergie lässt es sich schlecht kleben. PP ist physiologisch unbedenklich und für Anwendungen im Lebensmittelbereich geeignet. PP weist eine Glasübergangstemperatur von  $-10$  bis  $0$  °C auf. **Glasfaserverstärktes Polypropylen (PP-GF)** weist im Vergleich zu unverstärktem PP verbesserte mechanische Eigenschaften, wie zum Beispiel einen höheren E-Modul und eine höhere Formbeständigkeit auf, und kann daher für höher beanspruchte Bauteile eingesetzt werden [6].

#### 4.2.2 Feinauswahl der Materialien

Im Zuge der Feinauswahl wurden weiterführende Informationen der möglichen Materiallösungen zusammengetragen und bewertet. Als Hilfsmittel wurden sowohl allgemein bekannte Literatur zu Materialien und deren Eigenschaften, als auch die Materialdatenbank *IDES Prospector* herangezogen. Typische Kunststoffe, welche für Mundstücke im Tauchsport eingesetzt werden, sind POM, ASA und PC.

PC wurde im Zuge der Feinauswahl ausgeschlossen, da es beim Kontakt mit Wasser über einer Temperatur von 60 °C zur Bildung von Spannungsrissen neigt. Diese Temperaturen können insbesondere bei Reinigungstätigkeiten oder der direkten Einwirkung von Sonneneinstrahlung auf schwarze PC-Produkte erreicht werden.

ABS erweist sich für Tauchsport-Anwendungen auf Grund der vergleichsweise schlechten Witterungsbeständigkeit als wenig geeignet, wohingegen ASA eine ausgezeichnete Witterungsbeständigkeit aufweist.

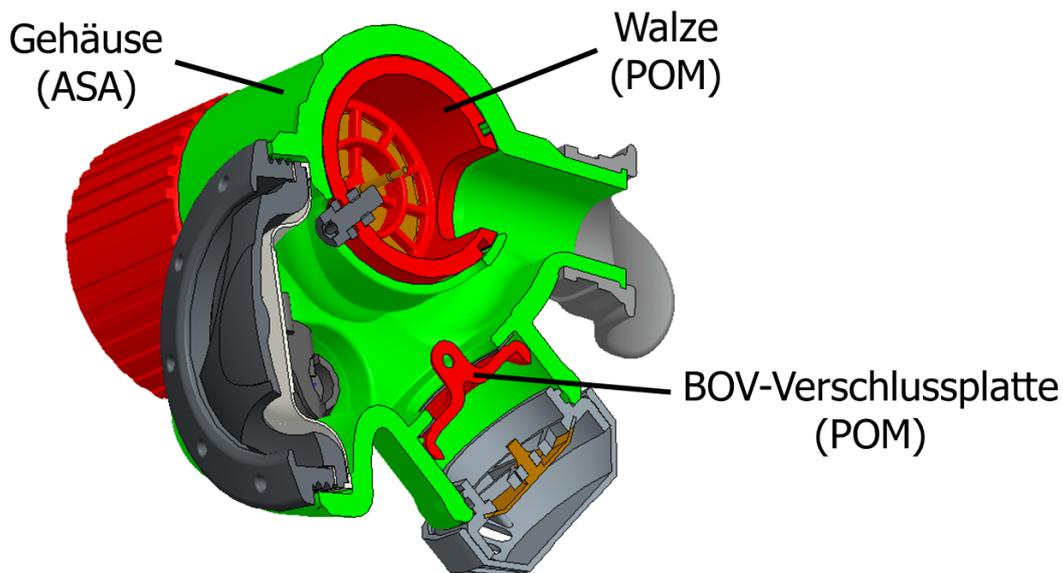
PP wurde auf Grund des vergleichsweise geringen E-Moduls und der geringen Festigkeiten ausgeschlossen. Zudem ist PP schlecht klebbar.

Auf Grund der Anisotropie glasfaserverstärkter Kunststoffe können sich beim Spritzgießen stark unterschiedliche Schwindungen in die Raumrichtungen ergeben, je nachdem, wie die Glasfasern im Bauteil angeordnet sind. Zudem führen glasfaserverstärkte Kunststoffe in Aluminiumwerkzeugen zu einem erhöhten Verschleiß des Werkzeuges. Auf Grund der genannten Eigenschaften wurden glasfaserverstärkte Kunststoffe im Zuge der Feinauswahl ausgeschlossen.

Für die vorliegende Anwendung zeigte sich, dass eine Kombination von Komponenten aus ASA und POM eine geeignete Lösung darstellt. Tabelle 4.4 zeigt, welche Kunststoffe für die Komponenten eingesetzt werden können. Bei der Auswahl der Produkte wurde insbesondere auf eine einfache Verarbeitbarkeit geachtet. Da es zwischen gegeneinander beweglichen, sich berührenden Teilen aus demselben Material zu erhöhtem Verschleiß sowie zur Geräusentwicklung (quietschen) kommen kann, wurde für die BOV-Verschlussplatte und die Walze ein anderes Material als für das Gehäuse ausgewählt (siehe Abbildung 4.23).

**Tabelle 4.4:** Komponenten und geeignete Materialien

<b>Komponente</b>	<b>Werkstoff</b>	<b>Hersteller, Produktname</b>
Gehäuse	ASA	Styrolution, Luran S 777 K FC
Walze	POM	Ticona, Hostaform C 9021
BOV-Verschlussplatte	POM	Ticona, Hostaform C 9021



**Abbildung 4.23:** Geschnittene Darstellung des Mundstücks: Komponenten und verwendete Kunststoffe. Walze und BOV-Verschlussplatte gleiten am Gehäuse.

### Luran S 777 K FC (ASA)

Bei Luran S 777 K FC handelt es sich um eine leichtfließende Spritzgussmarke mit guter Schlagzähigkeit, Kratzfestigkeit und Wärmeformbeständigkeit (Gebrauchstemperatur bis 85 °C) [39]. Luran S 777 K FC ist vor allem in Kombination mit einer schwarzen Einfärbung weitgehend beständig gegenüber Witterungseinflüssen, wie zum Beispiel UV-Strahlung oder Angriff durch Luftsauerstoff, und für den Lebensmittelkontakt zugelassen. Klassische Anwendungen dieses Produktes sind Automobil-Außenteile wie Spiegelgehäuse oder Kühlergrille, die auch ohne Lackierung mit einer edlen Optik überzeugen, sowie Sport- und Freizeitgeräte. Verschmutzte Teile lassen sich mit wässrigen Spül- oder Waschmitteln reinigen [38].

### Verarbeitung durch Spritzgießen

Formmassen aus Luran S können auf allen handelsüblichen Spritzgießmaschinen verarbeitet werden. Vor der Verarbeitung sollte Luran S-Granulat vorgetrocknet werden, um Schlieren zu vermeiden (siehe Tabelle 4.5). Es sind alle bekannten Angussarten sowie Heißkanalsysteme anwendbar. Da die Werkzeugoberflächentemperatur einen maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächengüte, Bindahtfestigkeit, Schwindung und Verzug hat, ist auf ein gut durchdachtes Temperiersystem im Werkzeug zu achten.

In Tabelle 4.6 sind die empfohlene Verarbeitungstemperatur, Werkzeugtemperatur, Entformungstemperatur sowie resultierende Schwindungswerte dargestellt. Formteile aus Luran S lassen sich gut entformen, wobei Entformungsschrägen von 0,5 bis 0,9° ausreichend sind [38].

**Tabelle 4.5:** Trocknungsbedingungen von Luran S [38].

Trocknungstemperatur	Trocknungszeit	Zulässiger Feuchtigkeitsgehalt
80 °C	2 – 4 h	< 0,1 %

**Tabelle 4.6:** Temperaturen und Schwindungen beim Spritzgießen von Luran S [38].

Verarbeitungs- temperatur	Werkzeug- temperatur	Entformungs- temperatur	Schwindungs- richtwerte
240 – 280 °C	40 – 80 °C	95 °C	0,4 – 0,7 %

### Spanende Bearbeitung

Luran S lässt sich auf üblichen Maschinen für die Metall- und Holzbearbeitung einfach spanend bearbeiten, wie zum Beispiel fräsen und drehen. Auf Grund der geringen Wärmeableitung ist es trotz niedriger Schnittgeschwindigkeiten oft erforderlich, mit Wasser zu kühlen [38].

### Klebarkeit

Luran S 777 K FC ist mit Hilfe von Lösungsmitteln wie Methyläthylketon, Dichlorethylen oder Cyclohexanon klebbar. Als Kleber eignen sich zum Beispiel Rohrklebstoffe vom Hersteller *Tangit*, die zum Verkleben von Trinkwasserrohren eingesetzt werden und auch zum Verkleben von ASA geeignet sind [38].

### Auswahl für das Mundstück

Für das Gehäuse wurde Luran S 777 K FC als Material ausgewählt, da das Gehäuse die größte Oberfläche der Komponenten des Mundstücks aufweist, auf die UV-Strahlung und mechanische Belastungen während des Gebrauchs (vor allem Stöße) einwirken.

### Hostaform C 9021 (POM)

Hostaform C 9021 ist eine Standardspritzgussmarke mit hoher Festigkeit, Kratzfestigkeit, Schlagzähigkeit und Wärmeformbeständigkeit (Gebrauchstemperatur bis 100 °C). Hostaform C 9021 weist eine gute chemische Beständigkeit gegenüber Kraftstoffen und starken Basen auf und besitzt eine gute Hydrolysebeständigkeit sowie eine hohe Beständigkeit gegenüber thermischem und oxidativem Abbau. Hostaform C 9021 ist für den Lebensmittelkontakt zugelassen [33]. Eine ausreichende Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung wird erreicht, wenn das Material schwarz (zum Beispiel mit Ruß) eingefärbt ist [36]. Hostaform C 9021 wird zum Beispiel für Teile in Langlauf-Skibindungen eingesetzt, die eine hohe Schlagzähigkeit in der Kälte aufweisen müssen.

#### Verarbeitung durch Spritzgießen

Hostaform kann auf allen Standardspritzgießmaschinen verarbeitet werden. Sofern das Granulat nicht unsachgemäß gelagert wurde, ist keine Vortrocknung nötig. In Tabelle 4.7 sind die empfohlene Verarbeitungstemperatur, Werkzeugtemperatur, Entformungstemperatur sowie resultierende Schwindungswerte dargestellt. [32].

**Tabelle 4.7:** Temperaturen und Schwindungen beim Spritzgießen von Hostaform C 9021 [33].

Verarbeitungs- temperatur	Werkzeug- temperatur	Entformungs- temperatur	Schwindungs- richtwerte
190 – 230 °C	60 – 120 °C	165 °C	1,8 – 2,0 %

#### Spanende Bearbeitung

Hinsichtlich mechanischer Nachbearbeitung (zum Beispiel mittels Drehen) lässt Hostaform C 9021 hohe Zerspanleistungen zu: Bei hohen Schnittgeschwindigkeiten sind großer Vorschub und große Schnitttiefe möglich. Die geringere Wärmeentwicklung bei Hostaform ist zum einen auf das gute Gleitverhalten gegen Stahl im Trockenlauf zurückzuführen. Zum anderen sind im Allgemeinen die entstehenden Späne relativ kurz und lassen sich leicht entfernen (zum Beispiel mit Hilfe von Druckluft). Dadurch wird viel

Wärme abgeführt, so dass ein Kühlen des Werkstücks nur in Einzelfällen erforderlich ist.

#### Auswahl für das Mundstück

Auf Grund der guten Gleiteigenschaften von Hostaform C 9021 wird dieses Material im Mundstück für jene Komponenten eingesetzt, welche gegenüber dem Gehäuse gleiten (siehe Abbildung 4.23). Dabei handelt es sich sowohl um die verschiebbare BOV-Verschlussplatte, als auch um die drehbare Walze. Auf Grund des nahezu identischen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten von Luran S 777 K FC und Hostaform C 9021 sind keine Probleme hinsichtlich gegenseitiger Behinderung bei Temperaturschwankungen zu erwarten.

### 4.3 Fertigung der Komponenten

Im Folgenden werden Fertigungsverfahren zur Herstellung der Komponenten des Mundstücks vorgeschlagen. Die jeweiligen Fertigungsverfahren ergaben sich aus der Geometrie und den ausgewählten Materialien, wobei die anzustrebende geringe Stückzahl des Produktes mechanische Nachbearbeitungsschritte, wie zum Beispiel Drehen oder Fräsen, zulässt. Bei Komponenten, welche in diesem Kapitel nicht erläutert sind, handelt es sich um zugekaufte Teile.

#### 4.3.1 Gehäuse

Die Fertigung des Gehäuses als *ein* Stück wäre zwar technisch mittels Spritzgießen realisierbar, jedoch wäre auf Grund der komplexen Geometrie ein vergleichsweise teures Spritzgießwerkzeug nötig, dessen Herstellung sich in Anbetracht der angestrebten kleinen Stückzahlen nicht rentiert. Daher sollen zwei Hälften des Gehäuses spritzgegossen, miteinander verklebt und anschließend mechanisch nachbearbeitet werden.

#### Spritzgießen

Die beiden Hälften des Gehäuses sollen zunächst spritzgegossen werden. Der Anguss befindet sich jeweils an der Stirnseite des rohrförmigen Bereiches (siehe Abbildung

4.24). Um ein problemloses Entformen der Bauteile zu ermöglichen, ist der genannte rohrförmige Bereich mit Entformungsschrägen ( $1^\circ$ ) versehen. Auf Grund der vergleichsweise geringen Stückzahl ist es in Betracht zu ziehen, Werkzeuge aus Aluminium zu verwenden, welche im Vergleich mit Werkzeugen aus Stahl kostengünstiger in der Herstellung sind. Dabei soll es sich um möglichst einfache Zweiplattenwerkzeuge handeln, wobei wenn möglich auf Schieber verzichtet wird. Der Stangenanguss verbleibt nach der Entformung am Formteil und wird anschließend mit einem geeigneten Werkzeug entfernt (zum Beispiel mittels Seitenschneider).

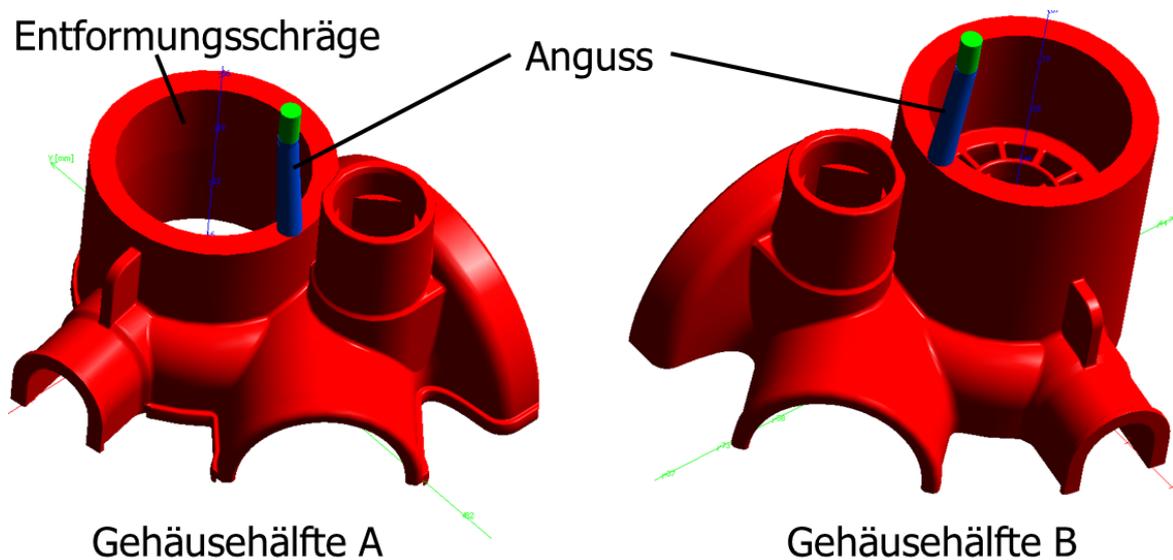
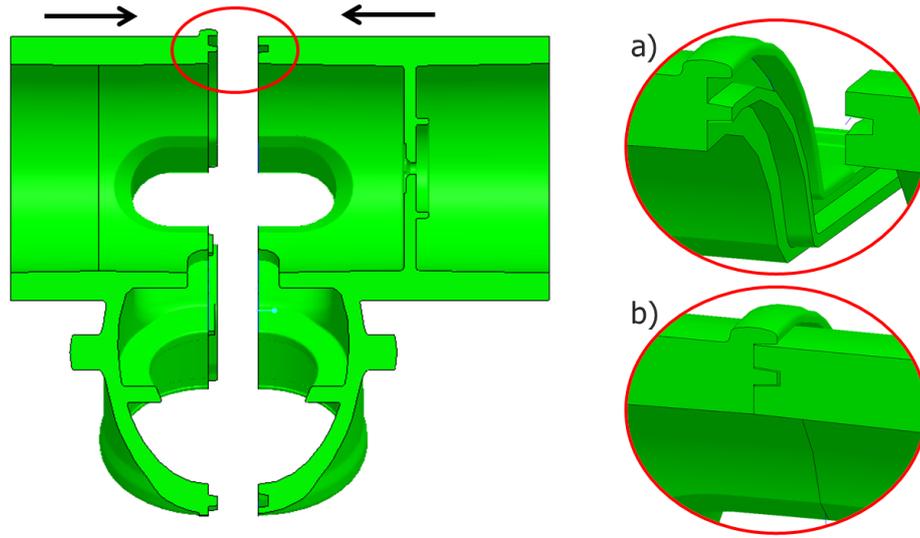


Abbildung 4.24: Gehäusehälften A und B mit Stangenanguss.

### Kleben

Die beiden Gehäusehälften sollen zusammengeklebt werden. Zu diesem Zweck sollen die Fügeflächen zuerst mit einem Reiniger vorbehandelt werden, um Schmutzreste zu entfernen und anschließend mit einem geeigneten Kleber eingepinselt. Beim Auftragen des Klebstoffes soll dabei auf eine möglichst gleichmäßige Benetzung der Fügeflächen und eine konstante Schichtdicke des Klebstoffes geachtet werden. Als Kleber eignet sich zum Beispiel das Produkt *PVC-U Spezial-Klebstoff* in Verbindung mit dem Reinigungsmittel *PVC-U/C/ABS-Reiniger* des Herstellers *Tangit*. Um die Eignung des Klebstoffes zu verifizieren, sind jedenfalls praktische Versuche durchzuführen. Während des Fügeprozesses werden die beiden Gehäusehälften, wie in Abbildung 4.25 angedeutet, aneinandergespresst.

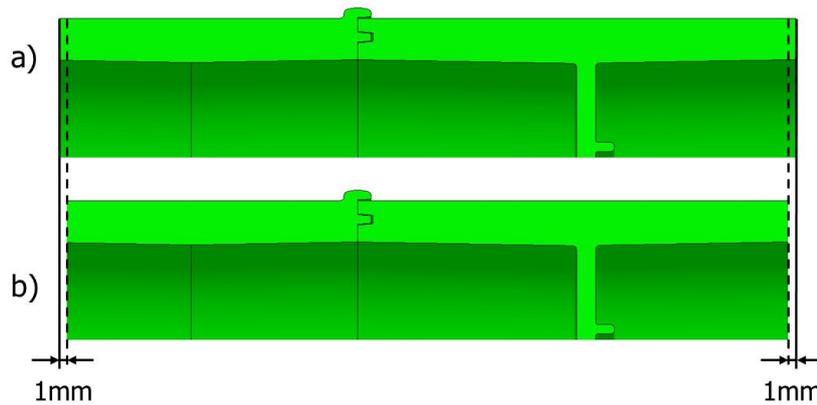
Die Fügeflächen sind als Nut-Kamm-Konstruktion ausgeführt, um die Gehäusehälften während des Fügeprozesses ohne weitere Hilfsmittel gegen seitliches Verrutschen positionieren zu können. Gleichzeitig ergibt sich durch die größere wirksame Oberfläche der Nut-Kamm-Verbindung eine vergleichsweise hohe Festigkeit der Klebung. Die Nut-Kamm-Verbindung verdeckt zudem durch eine „Nase“ die Klebung an der Bauteilaußenseite, was ein ästhetisch ansprechenderes Produkt ergibt (siehe Abbildung 4.25 b).



**Abbildung 4.25:** Kleben der Gehäusehälften. Nut-Kamm-Konstruktion vor (a) und nach (b) dem Fügeprozess.

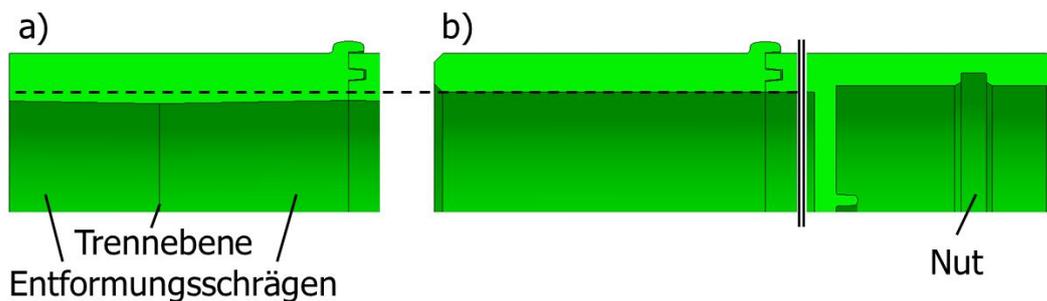
### Drehen

Nach dem Abwarten einer ausreichenden Aushärtezeit des Klebstoffes soll das Gehäuse in einer Drehmaschine zerspant werden. Um die Reste des Angusses zu entfernen und somit eine optisch ansprechende Oberfläche zu erhalten, soll zunächst jeweils 1 mm der Stirnseiten entfernt werden, wie in Abbildung 4.26 dargestellt.



**Abbildung 4.26:** Gehäuse vor (a) und nach (b) dem stirnseitigen Drehen.

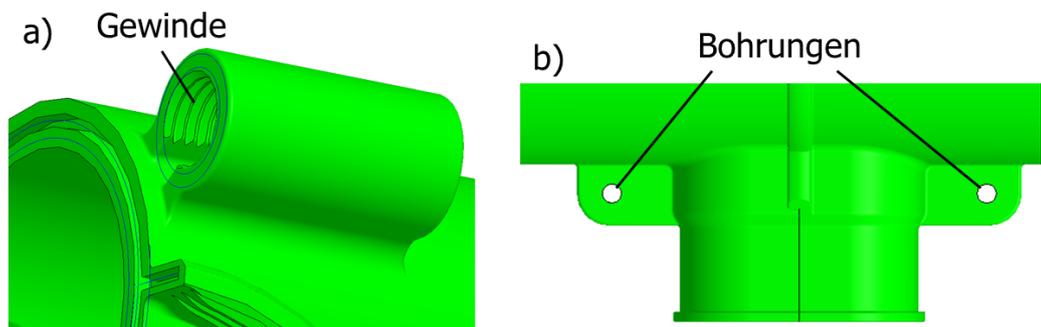
Um sowohl die Entformungsschrägen und Klebereste an der Fügefläche zu entfernen, als auch engere Toleranzen als beim Spritzgießen zu erreichen und einen Hinterschnitt in Form einer Nut herstellen zu können, soll das Gehäuse im entsprechenden Bereich innenseitig gedreht werden (siehe Abbildung 4.27). Es entsteht in diesem Bereich eine glatte Oberfläche, welche für die Dichtwirkung zwischen Gehäuse und Walze essentiell ist.



**Abbildung 4.27:** Gehäuse vor (a) und nach (b) dem innenseitigen Drehen.

#### Gewindeschneiden und Bohren

In die HUD-Halterung soll ein M12-Gewinde bis in eine Tiefe von 8 mm geschnitten werden, wie in Abbildung 4.28 (a) dargestellt, um das HUD mit Hilfe einer Schraubverbindung befestigen zu können. In die Laschen, welche sich seitlich des Anschlusses für das Elastomer-Mundstück befinden, soll jeweils ein Loch mit einem Durchmesser von 3 mm gebohrt werden (siehe Abbildung 4.28 b). An den genannten Bohrungen kann bei Bedarf ein Riemen befestigt werden, welcher das Mundstück während des Gebrauches an der Taucherin fixiert.

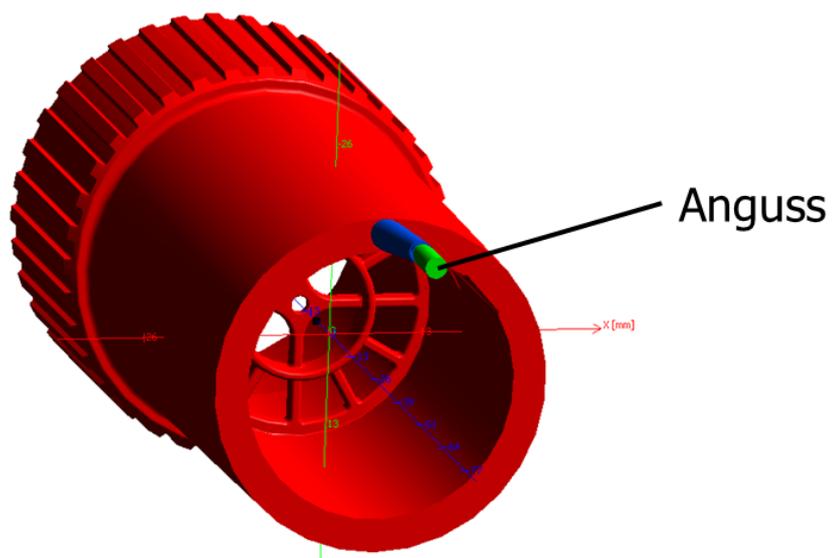


**Abbildung 4.28:** Gehäuse mit Gewinde in der HUD-Halterung (a) und Bohrungen in den Laschen (b).

### 4.3.2 Walze

#### Spritzgießen

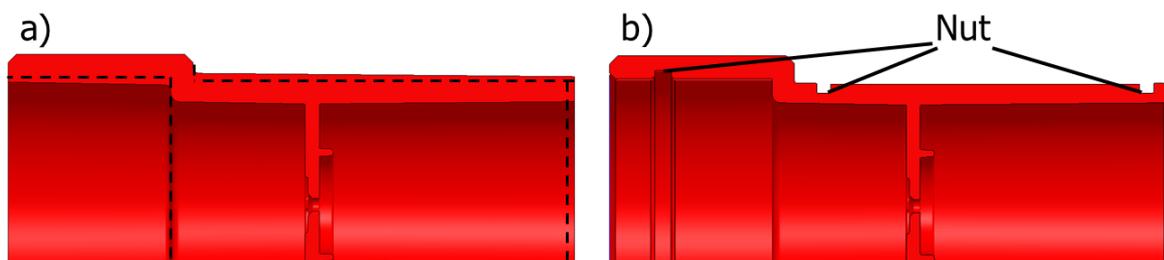
Im ersten Schritt soll die Walze spritzgegossen werden, wobei sich der Anguss an der Stirnseite der Walze befindet, wie in Abbildung 4.29 dargestellt. Entformungsschrägen sollen ein problemloses Entformen des Bauteils ermöglichen. Der Anguss verbleibt nach der Entformung am Formteil und wird in weiterer Folge mit einem geeigneten Werkzeug entfernt. Wie beim Gehäuse könnte auch bei der Verarbeitung der Walze ein kostengünstiges Formwerkzeug aus Aluminium zum Einsatz kommen.



**Abbildung 4.29:** Walze mit Stangenanguss.

## Drehen

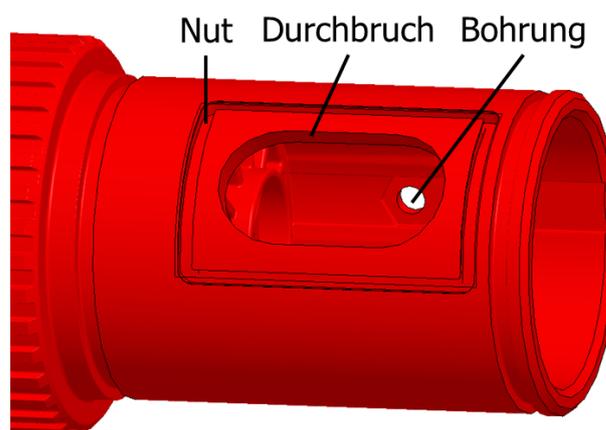
Nach dem Spritzgießen soll die Walze in einer Drehbank zerspannt werden, um analog zur Fertigung des Gehäuses sowohl die Reste des Angusses zu entfernen (stirnseitiges Drehen), als auch die Entformungsschrägen zu eliminieren und enge Toleranzen zu erreichen (innenseitiges und außenseitiges Drehen). Im gleichen Prozessschritt sollen Nuten in die Walze gedreht werden, welche sowohl zur Aufnahme von O-Ringen als auch zum Anschluss des Kreislaufschlauches dienen. In Abbildung 4.30 ist die Walze vor und nach dem Drehen dargestellt.



**Abbildung 4.30:** Walze vor (a) und nach (b) dem Drehen.

## Fräsen und Bohren

In die gedrehte, äußere Fläche soll ein Durchbruch gefräst werden, der eine Verbindung zwischen der Taucherin und dem Kreislauf ermöglicht (siehe Abbildung 4.31). Um diesen Durchbruch soll eine umlaufende Nut zur Aufnahme eines O-Rings gefräst werden. Eine Bohrung dient zum Montieren der Schraube, welche die mechanischen Funktionen des Mundstücks betätigen soll.



**Abbildung 4.31:** Walze mit Durchbruch und einer umlaufenden Nut und sowie einer Bohrung.

### 4.3.3 BOV-Verschlussplatte

Die BOV-Verschlussplatte wird durch Spritzgießen hergestellt. Der Anguss (in Abbildung 4.32 dargestellt) wird im Nachhinein formteilnah durch ein geeignetes Werkzeug abgetrennt. Da sich die BOV-Verschlussplatte nach dem Zusammenbau des Mundstücks in dessen Innerem befindet, stellen die verbleibenden Angussreste weder optisch noch funktional ein Problem dar.

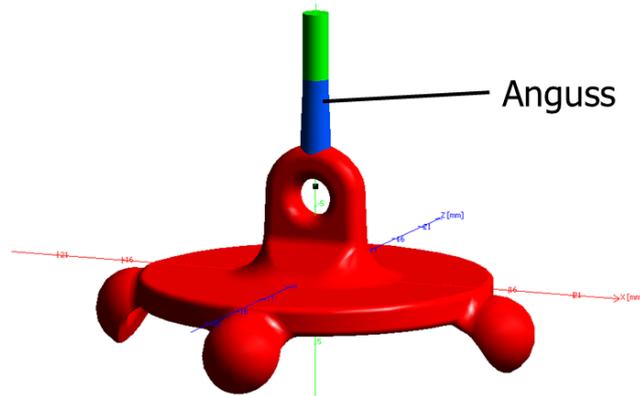


Abbildung 4.32: BOV-Verschlussplatte mit Anguss.

### 4.3.4 Hebel

Die Hebel, die im ADV eingesetzt werden, bestehen aus Edelstahl und werden im ersten Prozessschritt durch Laserschneiden aus Blechen gefertigt. Im zweiten Prozessschritt werden die Hebel gebogen, wobei für beide Hebel der selbe Biegeplan zu Grunde liegt. Die Hebel sind in Abbildung 4.33 nach dem Laserschneiden (a) und nach dem Biegen (b) dargestellt.

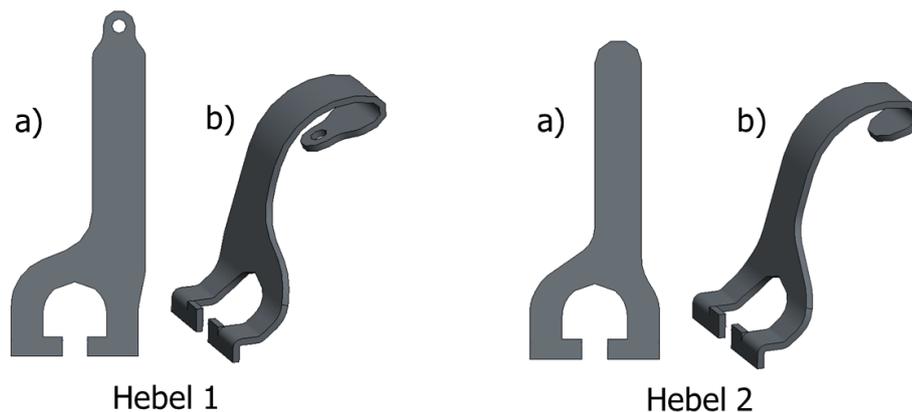


Abbildung 4.33: Lasergeschnittene (a) und gebogene (b) Hebel.

## 4.4 Spritzgießsimulation

Die Spritzgießsimulation wurde mit *SIGMASOFT*<sup>®</sup> (Fa. Sigma Engineering GmbH, Aachen, Deutschland), einer Software zur Prozesssimulation von Thermoplastformteilen mit dreidimensionalen Volumenmodellen, durchgeführt. Ziel der Spritzgießsimulation war es, etwaige geometriebedingte Fehler hinsichtlich spritzgießgerechter Auslegung frühzeitig zu erkennen und zu beheben und die Fertigungsmöglichkeit der Geometrie zu validieren. Wurden Fehler erkannt, wurde die Geometrie entsprechend optimiert, um die Fehler zu eliminieren. Weiters zielte die Spritzgießsimulation der Komponenten des Mundstücks darauf ab, die Größenordnung von Prozess- und Maschinenparametern, wie zum Beispiel Einspritzdruck, Nachdruck, Nachdruckzeit und Kühlzeit, zu ermitteln. Zudem wurden die Unterschiede der Ergebnisse zwischen der Simulation mit einem Stahl- und einem Aluminiumwerkzeug untersucht.

In Abbildung 4.34 ist die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Durchführung der Spritzgießsimulation dargestellt, wobei die Schritte Formfüllung, Nachdruck, Abkühlung und externe Kühlung jeweils so lange durch Veränderung von Prozessparametern oder Geometrie wiederholt wurden, bis bestmögliche Ergebnisse erzielt wurden. Zunächst wurde versucht, die Formfüllung optimal zu gestalten. Zu diesem Zweck wurden sowohl geometrische Abhängigkeiten, wie zum Beispiel Angussposition, als auch Prozessparameter, wie zum Beispiel Einspritzgeschwindigkeit, optimiert. Spritzgießfehler, die während der Formfüllung entstehen können (zum Beispiel Freistrahler und Bindenähte) wurden durch die Gestaltung einer geeigneten Geometrie und der Optimierung von relevanten Prozessparametern vermieden oder minimiert. In weiterer Folge wurde auf Basis einer Siegelkurve die Nachdruckzeit und Nachdruckhöhe bestimmt. Die Kühlzeit wurde erreicht, sobald überall im Bauteil eine definierte Entformungstemperatur unterschritten wurde. Nach der Simulation einer 24-stündigen Kühlung außerhalb der Werkzeugform bei Raumtemperatur (25 °C) wurde Schwindung und Verzug des Formteils ermittelt.

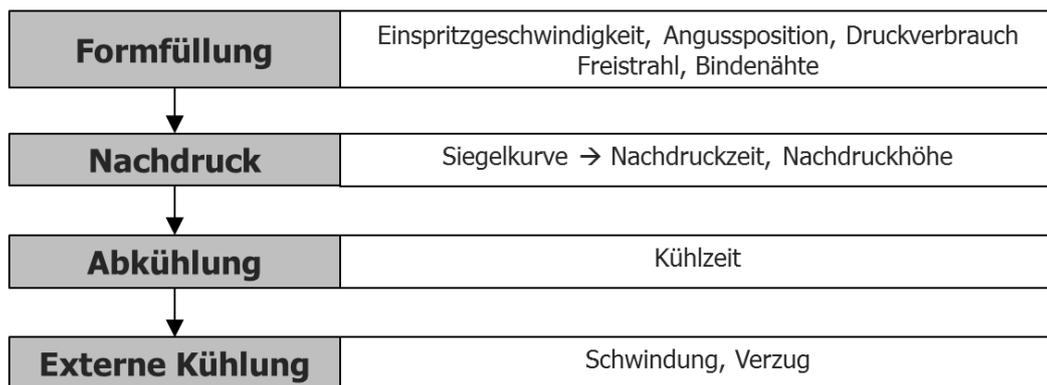


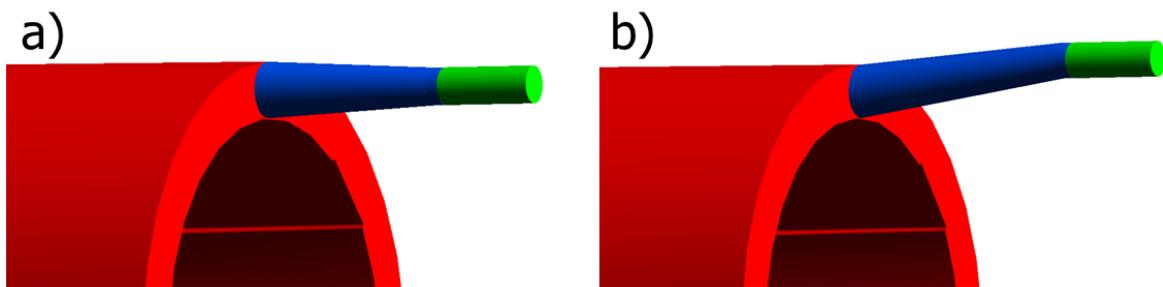
Abbildung 4.34: Vorgehensweise bei der Spritzgießsimulation.

#### 4.4.1 Definition der Geometrie und Prozessparameter

##### Anguss und Werkzeug

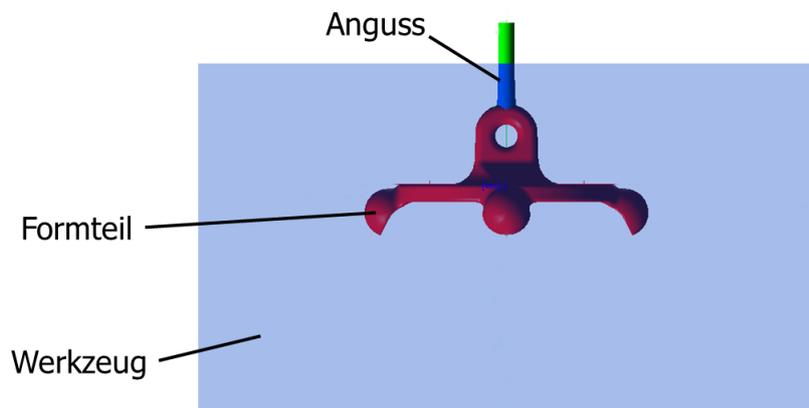
Die Anspritzpunkte wurden dort positioniert, wo eine möglichst gleichmäßige und problemlose Füllung der Formteile möglich war. Zu diesem Zweck wurden Füllstudien durchgeführt, aus denen die optimale Anspritzposition hervorging. Die gewählten Anspritzpositionen sind in Kapitel 4.3 definiert.

Um den Einfluss der Angussgeometrie auf die Simulationsergebnisse zu minimieren, wurden die Angüsse als kegelige Stangenangüsse ausgeführt, wobei die Durchmesser der Angüsse entsprechend den Wandstärken der Formteile gewählt wurden. Bei einer stirnseitigen Anspritzung, wie dies bei den Gehäusehälften und der Walze der Fall war, entspricht der Angussdurchmesser der Wandstärke an der entsprechenden Stelle. Somit kann von einer möglichst hohen Nachdruckwirksamkeit ausgegangen werden. Da bei einer stirnseitigen Anspritzung die Gefahr von Freistrahnbildung besteht, wie durch Simulationen erkannt wurde, wurde anstelle eines symmetrischen Stangenangusses ein schräger Stangenanguss modelliert (siehe Abbildung 4.35). Da die Kunststoffschmelze beim Füllvorgang zunächst an die Wand des Angusses trifft, wird die Ausbildung einer Quellströmung gefördert. Der schräge Stangenanguss stellt einen Hinterschnitt dar, der auf Grund der geringen Biegesteifigkeit der Angussgeometrie zwangsentformt werden kann. Das Bauteil sollte dabei auf Grund von Aufschumpfen auf den Kern an der Auswerferseite gehalten werden.



**Abbildung 4.35:** Walze mit Anguss: symmetrischer (a) und schräger (b) Stangenanguss.

Die Werkzeuge wurden in Form von Quadern modelliert, welche die Formteile umgeben, wobei die Seitenlängen der Quader ca. den dreifachen Längen der Formteile in die jeweilige Raumrichtung entsprechen. Auf die Modellierung von Kühlsystemen wurde verzichtet, da die Konstruktion der Werkzeuge nicht Teil der vorliegenden Arbeit war. Die Werkzeugtemperatur wird damit in der Simulation als ideal gleichmäßig angenommen. In Abbildung 4.36 ist das Modell der BOV-Verschlussplatte mit Werkzeug und Anguss dargestellt.

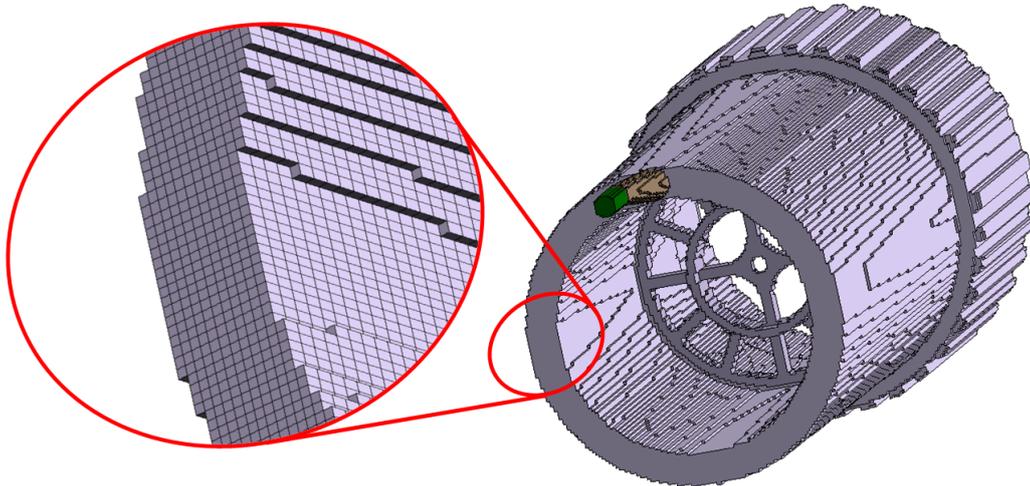


**Abbildung 4.36:** BOV-Verschlussplatte mit Werkzeug und Anguss.

### Vernetzung

Die Vernetzung der Geometrien erfolgte mit 3D-Volumenelementen. Um realitätsnahe Simulationsergebnisse zu erhalten, empfiehlt der Hersteller der Software, die Geometrie derart zu vernetzen, dass in jedem Bereich der Geometrie mindestens drei Volumenelemente über der Bauteildicke vorhanden sind. Um in gewölbten oder gerundeten Bereichen den Einfluss der Diskretisierung durch das Netz zu minimieren, wurde bei der Vernetzung auf die Existenz von ca. zehn bis zwölf Volumenelementen über der

Bauteildicke geachtet. In Abbildung 4.37 ist die Walze nach der Vernetzung dargestellt, wobei in der Vergrößerung deutlich die Diskretisierung der Geometrie zu erkennen ist. In Tabelle 4.8 ist die Elementanzahl der Komponenten nach der Vernetzung dargestellt. Die Parameter, welche in SIGMASOFT zur Vernetzung verwendet wurden, sind im Anhang zu finden.



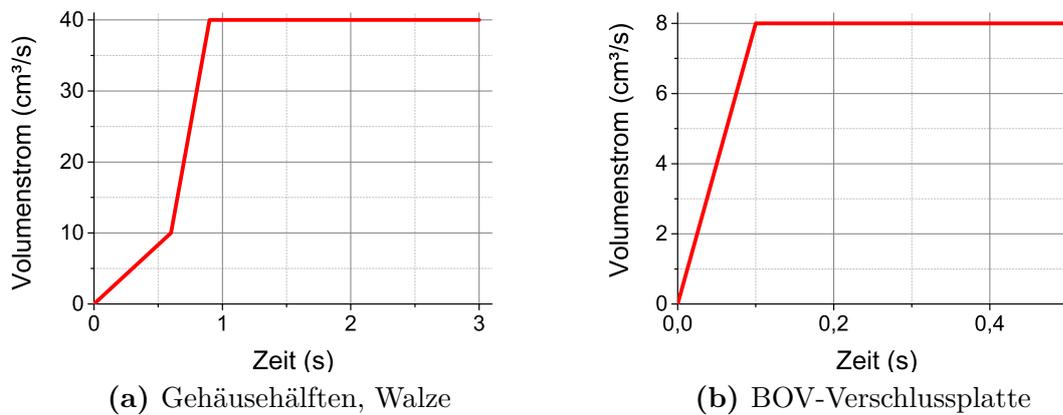
**Abbildung 4.37:** Vernetzte Walze mit 3D-Volumenelementen.

**Tabelle 4.8:** Elementanzahl nach der Vernetzung

Komponente	Elemente
Gehäusehälfte A	656152
Gehäusehälfte B	360418
Walze	559267
BOV-Verschlusspl.	49715

#### Prozessparameter und Materialdaten

Die Einspritzvolumenströme wurden entsprechend Abbildung 4.38 definiert. Zu Beginn der Formfüllung steigen die Volumenströme stetig an und werden ab einer bestimmten Zeit konstant gehalten. Auf Grund des strukturviskosen Verhaltens von Kunststoffschmelzen führt die vergleichsweise niedrige Einspritzgeschwindigkeit und die einhergehende niedrige Schergeschwindigkeit zu einer vergleichsweise hohen Viskosität, wodurch die Gefahr einer Freistrahlbildung minimiert wird.



**Abbildung 4.38:** Volumenstrom beim Einspritzvorgang.

Die Umschaltung auf Nachdruck erfolgte bei einer 98-prozentigen Formfüllung. Die Ermittlung der Nachdruckhöhe und Nachdruckzeit wurde mit Hilfe einer Siegelkurve durchgeführt. Ausgehend von einer zu hoch angesetzten Nachdruckzeit wurde jene Zeit ermittelt, ab der das Formteil eine konstante Masse aufwies, wie in Abbildung 4.43 (b) dargestellt. Diese Zeit wurde als Nachdruckzeit definiert. Die Nachdruckhöhe wurde relativ zum Druckverbrauch am Umschaltzeitpunkt angegeben. Um bei der Umschaltung Masserückfluss aus dem Formteil zu verhindern, erwies sich ein Nachdruck von 90 % als ausreichend hoch.

Die Masse-, Werkzeug- und Entformungstemperaturen wurden entsprechend den Angaben der Rohstoffhersteller des jeweiligen Kunststoffes definiert (siehe Tabelle 4.9). Simulationen wurden sowohl mit Stahl als auch Aluminium als Werkzeugmaterial durchgeführt, um den Einfluss dieser Materialien auf die Simulationsergebnisse zu überprüfen. Ein nennenswerter Unterschied zwischen den genannten Metallen ist zum Beispiel die Wärmeleitung  $\lambda$ , die für Aluminium über drei Mal größer ist als die Wärmeleitung von Stahl. Es wurden daher Unterschiede in jenen Ergebnissen erwartet, auf welche die Abfuhr von Wärme in das Werkzeug einen Einfluss hat, wie zum Beispiel Verzug.

Anschließend an den Spritzgießprozess wurde eine Kühlung außerhalb des Werkzeugs bei 25 °C für die Dauer von 24 Stunden simuliert, um Ergebnisse hinsichtlich Schwindung und Verzug der Bauteile nach vollständiger Abkühlung zu erzielen.

Die Materialdaten, welche zur Simulation verwendet wurden, stammen aus der Materialdatenbank von SIGMASOFT. Sämtliche Materialdaten und zu Grunde liegende Materialmodelle sind im Anhang zu finden.

**Tabelle 4.9:** Massetemperatur ( $T_M$ ), Werkzeugtemperatur ( $T_W$ ), Entformungstemperatur ( $T_E$ ), Einspritz-Volumenstrom ( $\dot{V}$ ) und relativer Nachdruck ( $p_N$ ).

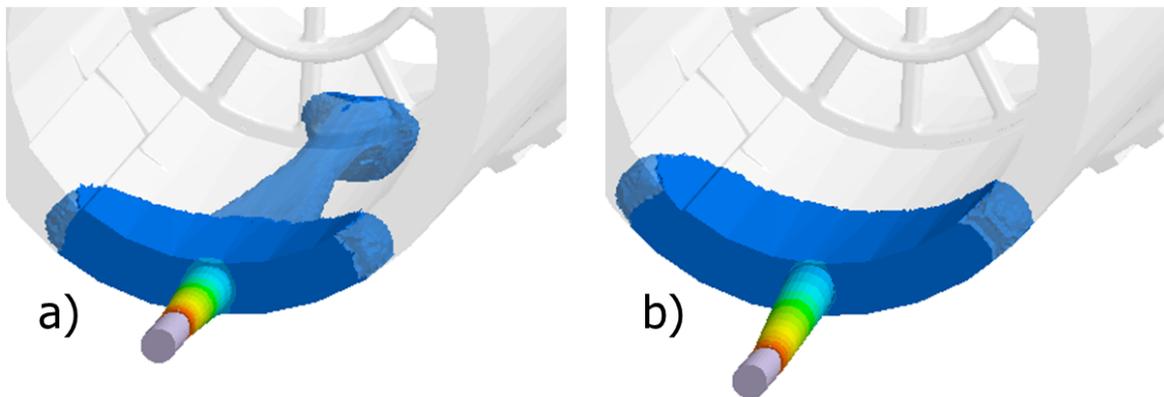
Komponente	$T_M$	$T_W$	$T_E$	$\dot{V}$	$p_N$
Gehäusehälfte A (Luran S 777 K)	260 °C	60 °C	95 °C	0,0 s: 0 cm <sup>3</sup> /s 0,6 s: 10 cm <sup>3</sup> /s 0,9 s: 40 cm <sup>3</sup> /s	90 %
Gehäusehälfte B (Luran S 777 K)	260 °C	60 °C	95 °C	0,0 s: 0 cm <sup>3</sup> /s 0,6 s: 10 cm <sup>3</sup> /s 0,9 s: 40 cm <sup>3</sup> /s	90 %
Walze (Hostaform C9021)	210 °C	80 °C	165 °C	0,0 s: 0 cm <sup>3</sup> /s 0,6 s: 10 cm <sup>3</sup> /s 0,9 s: 40 cm <sup>3</sup> /s	90 %
BOV-Verschlußplatte (Hostaform C9021)	210 °C	80 °C	165 °C	0,0 s: 0 cm <sup>3</sup> /s 0,1 s: 8 cm <sup>3</sup> /s	90 %

#### 4.4.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Spritzgießsimulation auszugsweise anhand von Beispielen erläutert. Die Ergebnisse aller untersuchten Geometrien sind gesammelt im Anhang zu finden.

##### Formfüllung

Bei den Gehäusehälften und der Walze zeigte sich eine Freistrahlbildung, wenn die Formfüllung durch einen symmetrischen Stangenanguss erfolgte. Die Freistrahlbildung konnte trotz niedriger Einspritzgeschwindigkeiten zu Beginn des Füllvorganges nicht vollständig unterbunden werden. Abhilfe schaffte ein schräger Stangenanguss, wie bereits in Abbildung 4.35 dargestellt. Am Beispiel der Walze ist klar zu erkennen, dass sich bei der Formfüllung durch einen schrägen Stangenanguss eine Quellströmung ausbilden kann (siehe Abbildung 4.39). Bei der weiteren Füllung mit gleicher Einspritzgeschwindigkeit traten keinerlei Probleme auf.



**Abbildung 4.39:** Formfüllung der Walze: symmetrischer Anguss mit Freistrahlfüllung (a) und schräger Anguss mit Quellströmung (b).

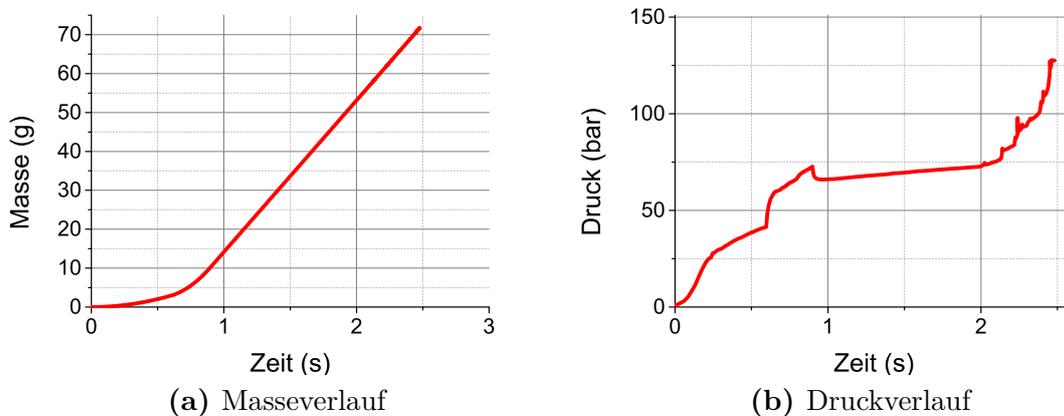
Bei der Formfüllung der BOV-Verschussplatte zeigte sich keinerlei Tendenz zur Freistrahlfüllung, da die Kunststoffschmelze unmittelbar nach Eintritt in die Kavität auf ein Hindernis trifft. Auch hier traten keinerlei Probleme bei der Füllung der Kavität auf. Der Füllvorgang der BOV-Verschussplatte ist in Abbildung 4.40 dargestellt.



**Abbildung 4.40:** Druckverbrauch während der Formfüllung der BOV-Verschussplatte.

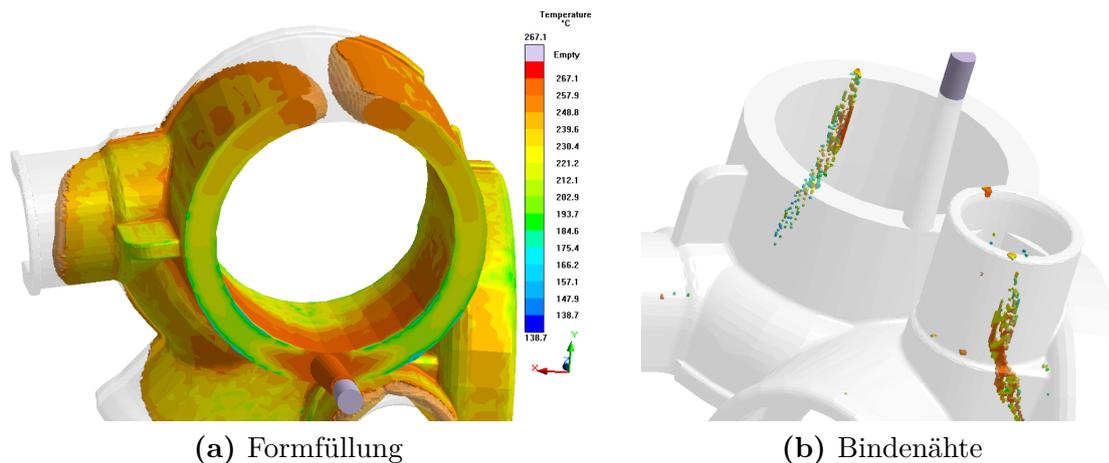
In Abbildung 4.41 ist der Masse- (a) und Druckverlauf (b) in Abhängigkeit der Einspritzzeit am Beispiel der Gehäusehälfte A dargestellt. Am zeitlichen Masseverlauf

ist deutlich das variable Einspritzgeschwindigkeitsprofil zu erkennen: Zu Beginn der Formfüllung wird vergleichsweise langsam eingespritzt, um Freistrahlbildung zu vermeiden, und erst ab einer Einspritzzeit, ab der das Bauteil soweit gefüllt ist, dass kein Freistrahл entstehen kann, wird eine konstante, maximale Einspritzgeschwindigkeit erreicht. Nach 2,5 s ist der Einspritzvorgang beendet, wobei bis zu diesem Zeitpunkt 72 g Kunststoffschmelze eingespritzt wurden. Aus dem Druckverlauf geht ein vergleichsweise geringer Druckverbrauch hervor: Unmittelbar vor der Umschaltung auf Nachdruck wird ein Druck von ca. 125 bar erreicht, was auf den geringen Fließwiderstand im Formteil zurückzuführen ist.



**Abbildung 4.41:** Eingespritzte Masse (a) und Druckverbrauch (b) während der Formfüllung der Gehäusehälfte A.

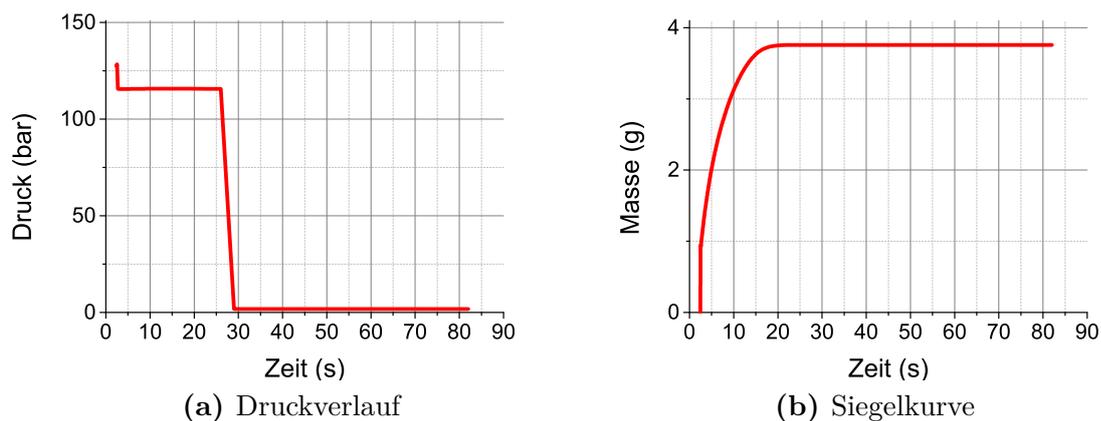
Wie in Abbildung 4.42 zu erkennen, entstehen Bindenähte dort, wo Schmelzeströme aufeinander treffen. Auf Grund der großen Wandstärken (6 bis 7 mm im Rohrbereich der Gehäusehälfte) wird davon ausgegangen, dass sich die Bindenähte vernachlässigbar auf die mechanische Festigkeiten auswirken.



**Abbildung 4.42:** Bindenähte der Gehäusehälfte B infolge der Formfüllung.

### Nachdruck- und Kühlphase

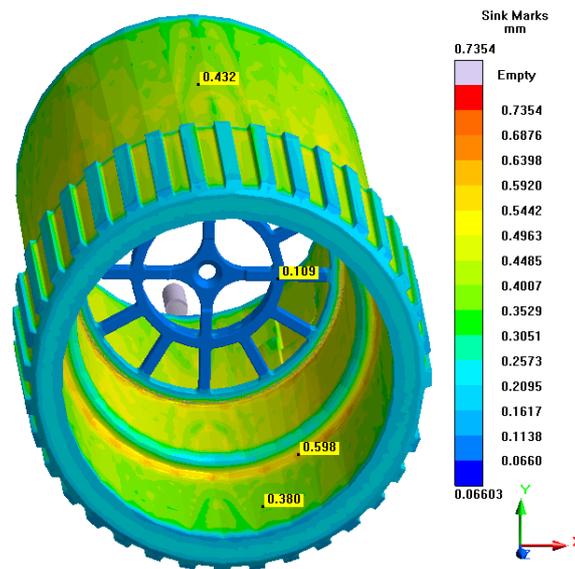
Die Nachdruckzeit wurde mit Hilfe der Siegelkurve bestimmt, indem ermittelt wurde, ab welchem Zeitpunkt die Masse des Formteils in der Nachdruckphase konstant war (Siegelzeit). In Abbildung 4.43 (a) ist der aufgebrauchte Nachdruck für die Gehäusehälfte A dargestellt, der zur Ermittlung der Siegelzeit für 26 Sekunden wirkte. Wie in Abbildung 4.43 (b) ersichtlich, ergab sich eine Siegelzeit von ca. 20 Sekunden: Ab diesem Zeitpunkt ist der Anguss eingefroren, wodurch keine Nachdruckwirksamkeit mehr besteht, und die Masse des Bauteils somit konstant bleibt.



**Abbildung 4.43:** Nachgedrückte Masse (a) und Druckverbrauch (b) während der Kühlphase der Gehäusehälfte A.

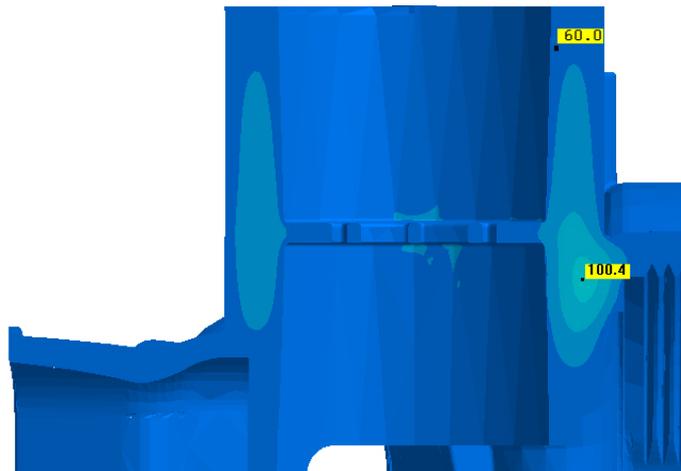
Die nicht kompensierbare Volumenschwindung der Schmelze auf Grund erstarrter

Bereiche im Formteil äußert sich zum Beispiel durch Einfallstellen, welche vor allem an Masseanhäufungen entstehen. In Abbildung 4.44 sind auftretende Einfallstellen der Walze dargestellt. Da jene Bereiche des Mundstücks mechanisch nachbearbeitet werden, wo enge Toleranzen erforderlich sind (zum Beispiel Außenseite der Walze), werden die dortigen Einfallstellen als nicht kritisch gewertet, da deren Tiefe durch die Nachbearbeitungstiefe übertroffen wird. An nicht nachzubearbeitenden Stellen (zum Beispiel Ventilhalter) sind die Einfallstellen vernachlässigbar gering und haben keinen Einfluss auf die Funktion des Mundstücks.



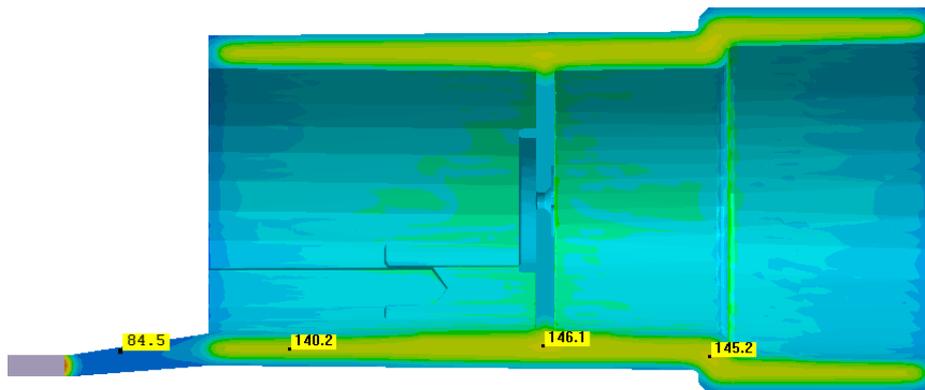
**Abbildung 4.44:** Einfallstellen an der Walze.

Das Formteil kann entformt werden, sobald eine definierte materialabhängige Temperatur (Entformungstemperatur) unterschritten wird. Zum Zweck der Ermittlung der Entformungstemperaturen der Formteile wurden diese an den Stellen der größten Wandstärke geschnitten und die Temperaturen während des Abkühlvorganges an den betreffenden Stellen beobachtet. In Abbildung 4.45 ist die Gehäusehälfte A kurz vor dem Entformungszeitpunkt geschnitten mit jenem Bereich dargestellt, wo die Temperatur zum spätesten Zeitpunkt unter die Entformungstemperatur fällt. Somit wird durch diesen Bereich die Kühlzeit und in weiterer Folge die Zykluszeit bestimmt.



**Abbildung 4.45:** Geschnittene Darstellung der Temperatur im wärmsten Bereich der Gehäusehälfte A kurz vor dem Entformungszeitpunkt.

Abbildung 4.46 zeigt eine geschnittene Darstellung der Walze kurz vor dem Entformungszeitpunkt. Die kritische Stelle hinsichtlich Kühlzeit befindet sich im Bereich des Richtungsventilhalters.



**Abbildung 4.46:** Geschnittene Darstellung der Temperatur im wärmsten Bereich der Walze kurz vor dem Entformungszeitpunkt.

In Tabelle 4.10 sind die ermittelten Einspritzzeiten, Nachdruckzeiten und Gesamtkühlzeiten aller Komponenten dargestellt. Die jeweilige Zykluszeit ergibt sich durch Addition der Einspritzzeit, der Gesamtkühlzeit und der Entformungszeit, welche mit 4 Sekunden angenommen wurde.

**Tabelle 4.10:** Einspritzzeit ( $t_E$ ), Nachdruckzeit ( $t_N$ ), Gesamtkühlzeit ( $t_K$ ) und Zykluszeit ( $t_Z$ ) der Komponenten

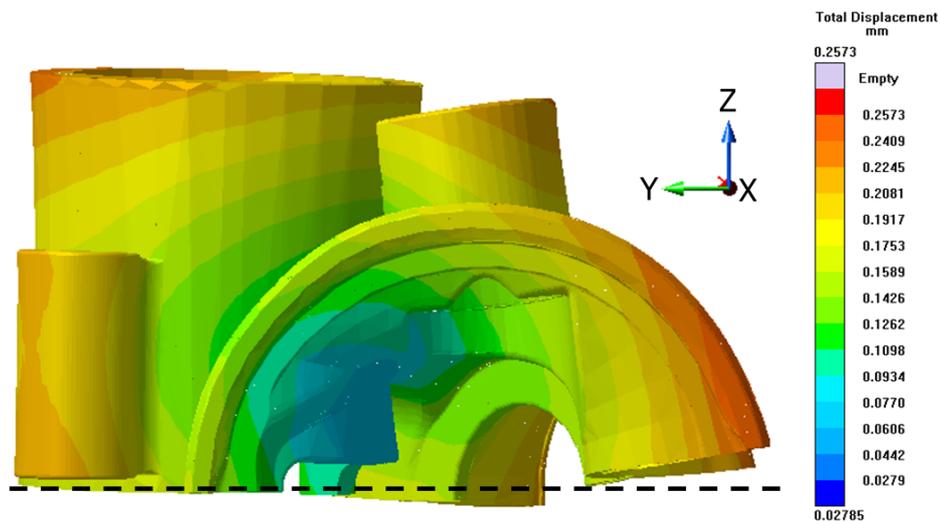
Komponente	$t_E(s)$	$t_N(s)$	$t_K(s)$	$t_Z(s)$
Gehäusehälfte A	2,5	20	140	146,5
Gehäusehälfte B	2,0	20	120	126,0
Walze	2,4	12	80	86,4
BOV-Verschlusspl.	0,25	5	30	34,25

### Externe Kühlung

Es wurde eine externe Kühlung der Formteile bei Raumtemperatur (25 °C) für eine Dauer von 24 Stunden simuliert, um Deformationsergebnisse (Schwindung und Verzug) zu erhalten. Zu beachten ist allerdings das Fehlen eines Kühlsystems, welches nach einigen Spritzgießzyklen möglicherweise zu unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen führt, und somit unterschiedliche Schwindungs- und Verzugsergebnisse hervorruft.

Es zeigte sich, dass Simulationen mit Stahl- und Aluminium-Werkzeugen zu identischen Schwindungs- und Verzugsergebnissen führten. Wie sich herausstellte, ist dies darauf zurückzuführen, dass bei der Simulation mit SIGMASOFT ohne Kühlsystem jene Materialgrößen nicht berücksichtigt werden, welche die Abführung thermischer Energie beeinflussen, wie zum Beispiel die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität. Die Abhängigkeit der Simulationsergebnisse vom verwendeten Werkzeugmaterial lässt sich in der vorliegenden Untersuchung somit nicht beurteilen.

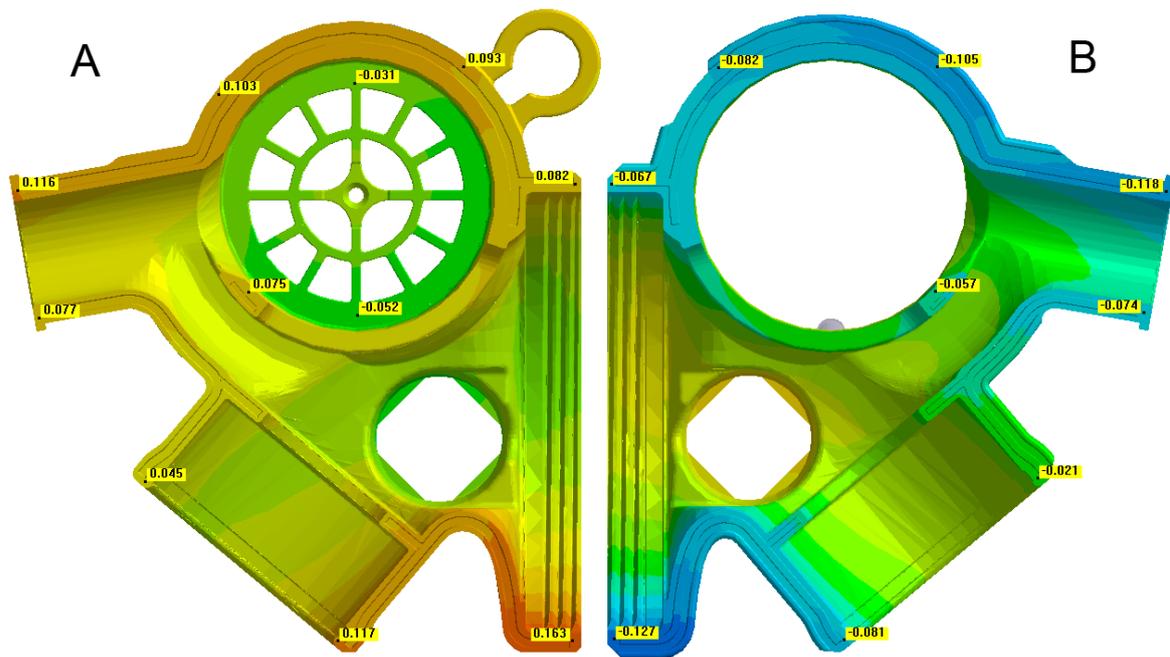
Die Kenntnis von Schwindung und Verzug der Gehäusehälften an den Fügeflächen ist wichtig, da die Fügeflächen geometrisch zueinander passen sollten, um ein problemloses Fügen der Teile zu gewährleisten. In Abbildung 4.47 ist die Deformation der Gehäusehälfte A mit 50-facher Vergrößerung dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass die Fügefläche durch Verzug von der Sollgestalt einer ebenen Fläche (dargestellt durch eine unterbrochene Linie) abweicht, wobei die größte totale Abweichung ca. 0,25 mm beträgt.



**Abbildung 4.47:** Gehäusehälfte A: Totale Deformation (50-fache Vergrößerung).

Werden beide Gehäusehälften (A und B) betrachtet, ist nahezu dasselbe Deformationsverhalten der Fügeflächen beider Gehäusehälften zu erkennen (siehe Abbildung 4.48), wobei die größte Verformung im unteren Bereich des Gewindes vorliegt. Werden die Gehäusehälften wie beim Fügeprozess aneinander gelegt, beträgt der Abstand im unteren Gewindebereich normal zu den Fügeflächen auf Grund der Deformation ca. 0,3 mm. Diese Deformation könnte im Zuge des Fügeprozesses problematisch werden, da beim Verkleben somit eine Gestaltänderung hervorgerufen wird, wodurch sowohl Spannungen im Inneren des Bauteils, als auch Zugspannungen in der Klebung hervorgerufen werden. Die genannten Zugspannungen wirken sich ungünstig auf die Festigkeit der Klebung aus, und sind grundsätzlich so weit wie möglich zu minimieren. Um beurteilen zu können, ob sich die Deformationen problematisch auf den Fügeprozess auswirken, sollten entsprechende Fügeversuche durchgeführt werden.

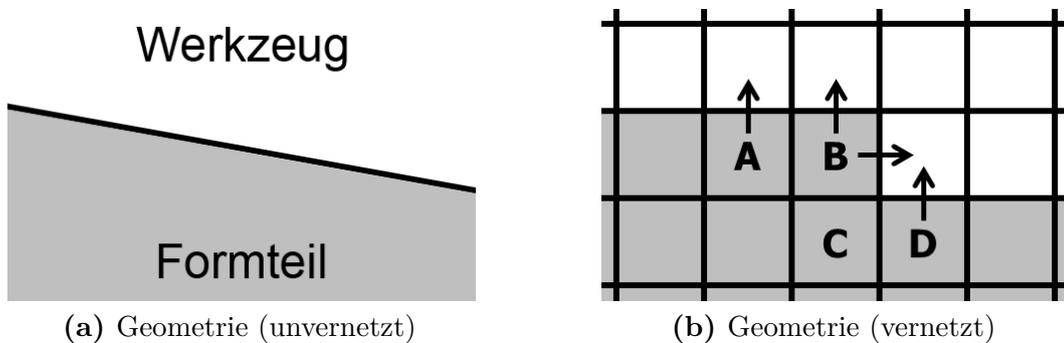
Es gilt zu beachten, dass ein Kühlsystem Schwindung und Verzug maßgeblich sowohl in die günstige als auch in die ungünstige Richtung beeinflussen kann. Durch die geeignete Auslegung eines Kühlsystems könnte der Verzug an kritischen Stellen minimiert werden, wodurch sich der Fügeprozess unkritischer gestalten würde.



**Abbildung 4.48:** Gehäusehälfte A und Gehäusehälfte B: Deformation normal zu den Fügeflächen (in mm).

#### 4.4.3 Einfluss der 3D-Vernetzung auf Simulationsergebnisse

Im Gegensatz zu ebenen Flächen können schräge, gewölbte oder runde Geometriebereiche durch die 3D-Vernetzung mit Quadern als Elementen nicht exakt nachgebildet werden, da die Kanten der Elemente stets in die Raumrichtungen des zugrunde liegenden Koordinatensystems zeigen. In Abbildung 4.49 ist die Vernetzung eines Formteils und des umgebenden Werkzeugs, deren Kontaktoberfläche nicht parallel zu den Raumrichtungen des Koordinatensystems liegt, schematisch dargestellt.

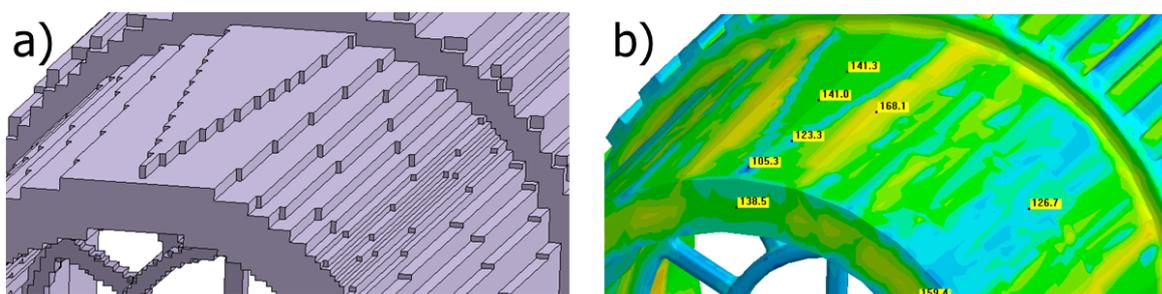


**Abbildung 4.49:** Vernetzung einer Geometrie mit 3D-Volumenelementen.

Auf Grund der Diskretisierung ergeben sich unterschiedliche Kontaktverhältnisse zwischen Formteil und Werkzeug: Während die Volumenelemente A und D jeweils mit einem Element des Werkzeugs in Kontakt sind, hat Volumenelement B Kontakt zu zwei Elementen des Werkzeugs. Volumenelement C ist gegenüber dem Werkzeug vollkommen isoliert. Besteht zwischen Formteil und Werkzeug ein thermisches Ungleichgewicht (zum Beispiel während der Formteilkühlung), wird Wärme von den Elementen des Formteils in die Elemente des Werkzeugs geleitet, wobei Elemente mit mehr Kontaktflächen zu den Werkzeugelementen mehr Wärme pro Zeit abgeben. Folglich kühlen derartige Elemente schneller aus und erstarren früher. Für den dargestellten Fall ergibt sich durch die Vernetzung eine inhomogene Wärmeabgabe, die abhängig von der Modellierung des Netzes ist. Dies führt zu unterschiedlichen Temperaturen an der Oberfläche des Formteils.

Es stellte sich heraus, dass die 3D-Vernetzung der Geometrie mit SIGMASOFT einen signifikanten Einfluss auf Simulationsergebnisse hatte. Im folgenden Beispiel wird der Einfluss der Feinheit des Netzes auf die Oberflächentemperatur des Formteils (Walze) während der Abkühlung erläutert.

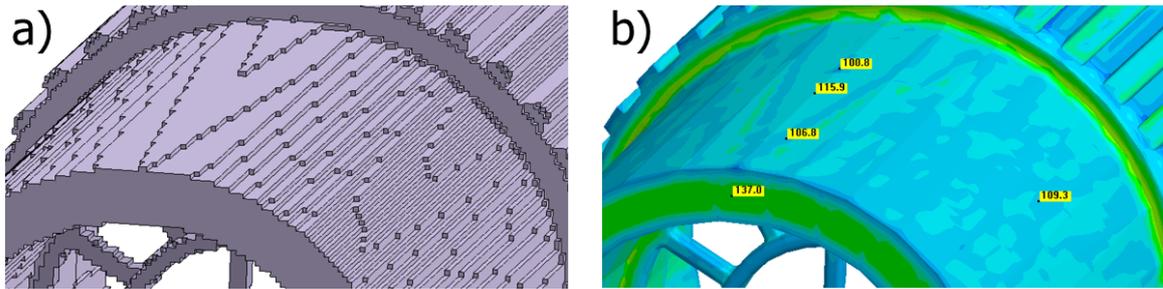
Bei der Vernetzung der Walze mit wenigen Elementen über die Wanddicke (grobes Netz) ist die Kontaktfläche zwischen Formteil und Werkzeug über den Umfang des rotationssymmetrischen Bereiches durch die grobe Diskretisierung lokal unterschiedlich (siehe Abbildung 4.50 a). Dies führte zu einer inhomogeneren Wärmeabgabe und folglich zu unrealistisch großen Temperaturunterschieden an der Formteiloberfläche, welche am Beispiel der Walze über 60 K betragen (siehe Abbildung 4.50 b).



**Abbildung 4.50:** Grobes Netz der Walze (a) führte zu inhomogener Temperaturverteilung mit Temperaturunterschieden von ca. 60 K an der Oberfläche während der Kühlphase (b).

Wird das Netz der Walze verfeinert, ergibt sich eine gleichmäßigere Verteilung der Kontaktflächen über den Umfang (siehe Abbildung 4.51 a). Dies äußerte sich in einer

gleichmäßigeren Temperaturverteilung (siehe Abbildung 4.50 b) mit Temperaturunterschieden von ca. 15 K. Für den betrachteten Fall stellte sich heraus, dass bei einer Vernetzung, die zu ca. zehn bis zwölf Elementen über die Wandstärke führt, bessere Ergebnisse als bei einer groben Vernetzung erhalten wurden. Eine weitere Verfeinerung des Netzes brachte zwar noch gleichmäßigere Temperaturverteilungen, erhöhte den Rechenaufwand für die Simulation jedoch enorm.



**Abbildung 4.51:** Feines Netz der Walze (a) führte zu weitgehend homogener Temperaturverteilung mit Temperaturunterschieden von ca. 15 K an der Oberfläche während der Kühlphase (b).

## 4.5 Prototypen

Während der Konstruktion des Mundstücks wurden mehrere Serien von Prototypen in Auftrag gegeben, aus denen Erkenntnisse hinsichtlich Design, Ergonomie, Geometrie und Funktionen abgeleitet wurden. Die Prototypen wurden mittels SLS, Vakuumguss und mechanischer Bearbeitung (Fräsen, Bohren und Drehen) hergestellt.

Die Einzelteile der Prototypen wurden entsprechend der CAD-Geometrie zusammengebaut und einfachen Prüfungen unterzogen. Es wurde beispielsweise geprüft, ob die Prototypen wasser- und gasdicht waren und ob die mechanischen Funktionen, wie zum Beispiel die Umschaltung vom CC-Modus in den OC-Modus, ordnungsgemäß funktionierten. Aus diesen Prüfungen ging unter anderem hervor, dass die Dichtung zwischen Walze und Gehäuse mittels O-Ringen eine größere Sicherheit aufweist, als eine Dichtung mittels einer geschlitzten Walze (vergleiche Kapitel 4.1.1). In Abbildung 4.52 ist ein Funktionsprototyp in zwei Ansichten dargestellt.



**Abbildung 4.52:** Funktionsprototyp: Außenansicht (a) und Innenansicht (b)

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Mundstück als Teil eines sich in Entwicklung befindenden Kreislauftauchgeräts entwickelt und konstruiert. Dabei wurde systematisch entsprechend den Konstruktionsphasen Aufgabenklärung, Konzeptionierung, Entwerfen und Ausarbeiten vorgegangen.

Im Zuge der Aufgabenklärungsphase wurde nach der Durchführung einer Marktrecherche und dem Studium der Mundstücke des Mitbewerbers Anforderungen an das neue Mundstück erarbeitet. Eine wichtige Anforderung an die Funktion des Mundstücks ist die Möglichkeit, bei einem technischen Versagen des Kreislauftauchgeräts von einem geschlossenen Modus (CC-Modus) in einen offenen Modus (OC-Modus) umzuschalten, bei dem Atemgas direkt aus der Druckluftflasche bezogen wird. Diese Umschaltung sollte sich möglichst einfach gestalten. Konstruktionsanforderungen dienten als Richtlinie zur Gestaltung der Geometrie. Materialanforderungen waren nötig, um einen geeigneten Werkstoff für die Geometrie auswählen zu können. Als Materialanforderungen sind insbesondere eine hohe Witterungsbeständigkeit sowie eine hohe Schlagzähigkeit zu nennen, da das Kreislauftauchgerät in der freien Natur verwendet wird.

In der Konzeptphase wurden Lösungsvarianten (Konzepte) in Form von qualitativ funktionierenden Modellen ausgearbeitet. Hilfsmittel während dieser kreativen Konstruktionsphase waren beispielsweise einfache Modelle aus Papier und Skizzen.

Während der Entwurfsphase wurde das vielversprechendste Konzept mit Hilfe der CAD-Software *PTC Creo*<sup>®</sup> geometrisch modelliert. Ausgehend von einer einfachen Geometrie, welche auf dem Konzept-Modell aufbaute, wurde der Konkretisierungsgrad der Geometrie fortlaufend erhöht. Ergebnis waren drei Komponenten (Gehäuse, Walze, BOV-Verschlussplatte), die zusammen mit Zukaufteilen, wie zum Beispiel Richtungsventilen, das Mundstück als System ergaben. Das Design wurde ergonomisch so ausgeführt, dass durch eine Drehung der Walze zwischen den beiden Funktionen

(geschlossener und offener Modus) umgeschaltet werden kann. Während der Geometriemodellierung wurde insbesondere auf ein kunststoffgerechtes Design geachtet, um ein qualitativ hochwertiges Produkt zu erhalten.

Parallel zur Entwicklung der Geometrie wurden im Zuge der Werkstoffauswahl Materialien für die Geometrie ausgewählt. Es zeigte sich, dass die Kunststoffe *Luran S 777 K FC* (ASA) des Herstellers Styrolution für das Gehäuse und *Hostaform C9021* (POM) des Herstellers Ticona für die Walze und die BOV-Verschlussplatte die Anforderungen bestmöglich erfüllten.

Auf Grund der Ausführung als Kleinserie war anzunehmen, dass die mechanische Nachbearbeitung durch Fräsen und Drehen einer komplizierten Werkzeuggeometrie beim Spritzgießen vorzuziehen ist. Das Gehäuse wird auf Grund der komplexen Geometrie aus zwei Hälften gefertigt und anschließend durch Kleben miteinander verbunden.

Mit Hilfe von Spritzgießsimulationen mit der Software *SIGMASOFT*<sup>®</sup> konnte die Geometrie hinsichtlich spritzgießgerechter Auslegung fortlaufend optimiert werden. Zudem stellte sich heraus, dass die Formfüllung der Geometrien auf Grund der vergleichsweise großen Wandstärken problemlos möglich war. Außerdem wurden durch die Spritzgießsimulation grundlegende Prozessparameter gefunden, mit denen die Herstellung des Produktes durch Spritzgießen möglich sein sollte. Weiters stellte sich heraus, dass Stahl- und Aluminiumwerkzeuge sowohl zu denselben Simulationsergebnissen hinsichtlich Formfüllung und Kühlung, als auch zu denselben Verzugsergebnissen führten, weil die Simulationen ohne Kühlsystem durchgeführt wurde.

Die Herstellung und Prüfung von mehreren Prototypen während des Konstruktionsprozesses verlief hinsichtlich Funktion und Ergonomie erfolgreich. Aus der Prüfung der Prototypen ging hervor, dass die Dichtung zwischen Walze und Gehäuse mittels O-Ringen der Dichtung mittels einer geschlitzten Walze auf Grund einer höheren Dichtigkeit vorzuziehen ist. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse konnte eine optimierte Geometrie als finale Lösung vorgeschlagen werden, welche die definierten Anforderungen hinsichtlich Funktionen, Konstruktion, Material, Fertigung und verwendeten Technologien erfüllte.

Die nächsten Schritte in der Produktentwicklung des Mundstücks sind die Konstruktion der Spritzgießwerkzeuge und die Fertigung des Produktes.

# Literaturverzeichnis

- [1] ABTS, G.: *Kunststoff - Wissen für Einsteiger: Eigenschaften, Verarbeitung und Prüfung*. Hanser Fachbuchverlag, 2010
- [2] ARNOLD, R.; BAUER, C.O.: *Qualität in der Entwicklung und Konstruktion*. TÜV-Verlag, 1990
- [3] BONTEN, C.: *Kunststofftechnik für Designer*. Hanser, 2003
- [4] CAMPO, E.A.: *The Complete Part Design Handbook: For Injection Molding Of Thermoplastics*. Hanser Gardner Publications, 2006
- [5] DEDERICHS, H.; FLOREN, G.; WALDBRENNER, M.; WILHELM, R.: *Handbuch technisches Tauchen*. Mueller Rueschlikon Verlags AG, 2004
- [6] DOMININGHAUS, H.: *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen, 7. Auflage*. Springer Verlag, 2008
- [7] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Hanser, 2009
- [8] ENGELN, W.: *Methoden der Produktentwicklung*. Oldenbourg Industrieverlag, 2006
- [9] ERHARD, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen, Bd. 10*. Hanser, 2008
- [10] EYERER, P.; HIRTH, T.; ELSNER, P.: *Polymer Engineering: Technologien und Praxis*. Springer, 2008
- [11] GEBHARDT, A.: *Rapid Prototyping*. Hanser, 2003
- [12] HABERFELLNER, R.; NAGEL, P.; BECKER, M.: *Systems Engineering - Methodik und Praxis*. Verlag Industrielle Organisation, 2002
- [13] HELLERICH, W.; HARSCH, G.; BAUR, E.: *Werkstoff-Führer Kunststoffe*. Hanser, 2010
- [14] JAROSCHEK, C.: *Spritzgießen für Praktiker*. Hanser, 2008
- [15] KAISER, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure*. Hanser Fachbuchverlag, 2011

- [16] KALWEIT, A.; PAUL, C.; PETERS, S.; WALLBAUM, R.: *Handbuch für Technisches Produktdesign: Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*. Springer, 2011
- [17] KENNEDY, P.: *Flow Analysis Of Injection Molds*. Hanser, 1995
- [18] KOETHER, R.; RAU, W.: *Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure*. Hanser, 2008
- [19] MENGES, G.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*. Hanser, 2002
- [20] MENGES, G.; MOHREN, P.; MICHAELI, W.: *How to Make Injection Molds*. Hanser, 2001
- [21] MENNIG, G.; STOECKERT, K.: *Mold-Making Handbook: For the Plastics Engineer*. Hanser, 1998
- [22] MICHAELI, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Hanser, 2010
- [23] MOELLER, E.: *Handbuch Konstruktionswerkstoffe: Auswahl, Eigenschaften, Anwendung*. Hanser, 2008
- [24] N., N.: [www.watersafety.net](http://www.watersafety.net), Abruf: 21.12.2012
- [25] N., N.: *Was ist Tauchen?* [www.divinig-zone.com](http://www.divinig-zone.com), Abruf: 28.10.2012
- [26] N., N.: *DIN 16901. Kunststoff-Formteile; Toleranzen und Abnahmebedingungen für Längenmaße*, 1982
- [27] N., N.: *DIN 24450. Maschinen zum Verarbeiten von Kunststoffen und Kautschuk*, 1987
- [28] N., N.: *Richtlinien für das Gestalten von Formteilen aus technischen Kunststoffen*. Hoechst-Firmenschrift C.3.4, 1991
- [29] N., N.: *DIN 69905. Projektabwicklung, Begriffe*, 1997
- [30] N., N.: *Dräger Ray - Gebrauchsanweisung*. 1999
- [31] N., N.: *Scubapro Repair Guide R290 - R190 Second Stages*. 2003
- [32] N., N.: *Hostaform*. Produktbroschüre, 2006
- [33] N., N.: *Hostaform C 9021*. Produktinformation, 2007
- [34] N., N.: *U.S. Navy Diving Manual, Volume 4, Revision 6. SS521-AG-PRO-010*. 2008. – Direction of Commander, Naval Sea Systems Command, USA

- [35] N., N.: *NOAA Diving Manual, Diving for Science and Technology, 4th Edition*. 2009. – US Department of Commerce, National Technical Information Service, Springfield
- [36] N., N.: *UV-beständiges Hostaform*. Ticona, 2009
- [37] N., N.: *DIN EN 14143. Atemgeräte - Autonome Regenerationstauchgeräte*, 2010
- [38] N., N.: *Luran S (ASA und ASA+PC)*. Produktbroschüre, 2010
- [39] N., N.: *Luran S 777 K FC*. Produktinformation, 2011
- [40] N., N.: *VERORDNUNG (EU) NR. 10/2011 DER KOMMISSION vom 14. Januar 2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen*. 2011
- [41] N., N.: *DIN EN 250. Atemgeräte - Autonome Leichttauchgeräte mit Druckluft - Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung*, 2012
- [42] N., N.: *Poseidon MKVI Benutzerhandbuch*. 2012
- [43] OSSWALD, T.A.; HERNANDEZ-ORITZ, J.P.: *Polymer Processing: Modeling and Simulation*. Hanser, 2006
- [44] OVTCHAROVA, J.: *Informationssysteme in der Produktions- und Konstruktions-technik (Vorlesungsskript)*. Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion, TH Karlsruhe, 2003
- [45] PEINHOPF, W.: *Auslegung von Spritzgießwerkzeugen mittels der Methode der Finiten Elemente*, Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, Dissertation, 2000
- [46] POTENTE, H.: *Fügen von Kunststoffen: Grundlagen, Verfahren, Anwendung*. Hanser Fachbuchverlag, 2004
- [47] RADERMACHER, P.; MUTH, C.-M.: Apnoetauchen - Physiologie und Pathophysiologie. In: *Deutsche Zeitschrift fuer Sportmedizin* 53 (2002), Nr. 6, S. 185–191
- [48] REUTER, M.: *Methodik der Werkstoffauswahl: Der systematische Weg zum richtigen Material*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2007
- [49] ROMANOW, P.: *Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen*, TU München, Dissertation, 1994
- [50] ROTH, S.; KÜSTER, B.; SURÄ, H.: 2 1/2 D oder 3D? - Simulationstechniken im Praxisvergleich. In: *Kunststoffe* 7 (2004), S. 65–67

- [51] SCHÖNFELD, S.; PÖTTRICH, W.; SIEBER, P.; FRANZ, L.: Analyse des Konstruktionsprozesses - Ein Mittel zur Rationalisierung und Intensivierung in der Konstruktion. In: *Maschinenbautechnik* 29 5 (1980), S. 204–208
- [52] SCHWESIG, H.: *Schwindung und Verzug*. VDI-K-Jahrbuch, 1984
- [53] SIEBER, A.; L'ABBATE, A.; BEDINI, R.: Oxygen Sensor Signal Validation for the Safety of the Rebreather Diver. In: *Diving and Hyperbaric Medicine* 39 (2009), S. 38–48
- [54] SIEBER, A.; PYLE, R.: A review of the use of closed-circuit rebreathers for scientific diving. In: *Underwater Technology* (2010)
- [55] SIEBER, A.; SJÖBLOM, K.: Electronically Controlled Closed Circuit Rebreather for Recreational Purposes. In: *EUBS conference, Aberdeen, UK, 2009*
- [56] STOMMEL, M.; STOJEK, M.; KORTE, W.: *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. Hanser, 2011
- [57] THOMKE, S.; FUJIMOTO, T.: The Effect of Front-Loading Problem-Solving on Product Development Performance. In: *Journal of Product Innovation Management* 17 (2000), S. 128–142
- [58] THORNAGEL, M.; FLOREZ, L.: Prozessorientierte Spritzgießsimulation - Schon im Ansatz richtig temperiert. In: *Kunststoffe* 11 (2011), S. 45–48
- [59] WIMMER, D.: *Kunststoffgerecht Konstruieren*. Hoppenstedt-Verlag, 1989

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung eines geschlossenen Kreislauftauchgerätes mit elektronischer Steuerung. 1: Mundstück; 2: Ausatemgegenlunge; 3: Überdruckventil; 4: CO <sub>2</sub> -Filter; 5: Sauerstoffflasche; 6: Gasgemischflasche; 7,8: Druckregler; 9: Manuelles Ventil; 10: Magnetventil; 11: Sauerstoffsensoren; 12,14: Elektronische Regelung mit Display; 13: Einatemgegenlunge [54]. . . . .	6
2.2	Walze (links) und Gehäuse (rechts) des Mundstücks des <i>Dräger Ray</i> [24].	7
2.3	Schematische Darstellung des Mundstücks des <i>Dräger Ray</i> [24]. 1,2,3: mit Schraube befestigter Griff, 4: Walze, 5: Gehäuse, 6: Mundstück, 7: Spannring, 8: Schutzring, 9: Kabelbinder, 10: Richtungsventil (Einlass), 11: Richtungsventil (Auslass). . . . .	8
2.4	Mundstück des <i>Poseidon MKVI</i> [42]. Die Kreislauf-Anschlüsse mit den Richtungsventilen befinden sich auf der Unterseite des Mundstücks (in der Abbildung nicht sichtbar). . . . .	9
2.5	Scubapro R190. . . . .	10
2.6	Hauptbestandteile des Scubapro R190 [31]. . . . .	11
2.7	Produktentwicklung im Spannungsfeld zwischen den Wertvorstellungen des Kunden und des Unternehmens [8]. . . . .	12
2.8	Allgemein formulierter Problemlösungszyklus [12]. . . . .	14
2.9	Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [8]. . . . .	16
2.10	Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen [7]. Die Prozentzahlen entsprechen dem zeitlichen Aufwand zur Bewältigung der Konstruktionsphasen in der Praxis [51]. . . . .	19
2.11	Ressourceneinsatz über die Zeit für konventionelle Entwicklung (blau) und Entwicklung mit Frontloading (rot) [44]. . . . .	20

2.12	Prozess der Werkstoffauswahl. Auf der rechten Abbildungshälfte sind die Dokumente angeführt, welche während den einzelnen Phasen entstehen. Das Ergebnis des Gesamtprozesses ist die Werkstoffentscheidung [48]. . . . .	23
2.13	Schematische Darstellung der Molekülanordnung in amorphen (links) und teilkristallinen Thermoplasten (rechts) [15]. . . . .	26
2.14	Schematische Darstellung der Molekülanordnung in Elastomeren (links) und Duromeren (rechts) [15]. Die Punkte stellen chemische Bindungen zwischen den Makromolekülen dar. . . . .	27
2.15	Schematische, doppellogarithmische Darstellung der Viskositätskurven viskoser Flüssigkeiten [15]. . . . .	29
2.16	Prinzip einer STL-Anlage [15]. . . . .	32
2.17	Schematischer Aufbau einer Spritzgießmaschine [15]. . . . .	35
2.18	Verfahrensablauf beim Spritzgießen [22]. . . . .	35
2.19	Angussnah (1) und angussfern (2) gemessener Druckverlauf in einem stirnseitig angespritzten Formteil [22]. . . . .	36
2.20	Schematischer Aufbau eines Spritzgießwerkzeuges (nach [15]). . . . .	38
2.21	a) Stangenanguss, b) Schirmanguss, c) Tunnelanguss, d) Punktanguss [20]. . . . .	41
2.22	Strömungsverhältnisse in einer Kavität [45]. . . . .	43
2.23	Wandverdickung im Bindenahtbereich [28]. . . . .	47
2.24	Darstellung des Spritzgießprozesses im pvT-Diagramm für einen amorphen Kunststoff. 1-2: Füllphase, 2-3: Nachdruckphase, 3-4: Schwindungsphase [14]. . . . .	48
2.25	Verzug einer Platte bei ungleichmäßiger Wärmeabfuhr durch unterschiedliche Temperaturen der Werkzeughälften [52]. . . . .	49
2.26	Winkelverzug an einer Kante. Über das Volumenelement b kann auf Grund der größeren Kontaktfläche mehr Wärme in das Werkzeug abgeführt werden als über das Volumenelement a [28]. . . . .	50
2.27	Masseanhäufungen am Beispiel einer Rippe. Links: Masseanhäufungen im Bereich Rippe/Wand führen zu Einfallstellen und Lunker. Rechts: Verringerung von Masseanhäufungen [10]. . . . .	51
2.28	Verfahrensablauf beim Heizelementschweißen [1]. . . . .	54
2.29	Kräfte und Bezeichnungen beim Kleben [15]. . . . .	56
2.30	Klebegerechte Gestaltung der Fügeflächen. Links: abgesetzte Überlappung. Rechts: doppelte Lasche [4]. . . . .	56

2.31	Spanende Bearbeitung: Eine keilförmige Werkzeugschneide (links) dringt in die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks ein (rechts) [15]. . .	58
3.1	Allgemeine Vorgehensweise bei der Entwicklung und Konstruktion des Mundstücks. . . . .	61
4.1	Mundstück dargestellt in unterschiedlichen Ansichten. Komponenten: Gehäuse (a), Walze (b), Membran des ADV (c), Druckluftanschluss des ADV (d), BOV (e), Elastomer-Mundstück (f). . . . .	69
4.2	Zu- und Abführung von Atemgas am Mundstück durch Pfeile dargestellt (Blau: frisches Atemgas, rot: konsumiertes Atemgas). 1,2: Kreislauf. 3: ADV. 4: BOV. 5: Taucherin. . . . .	70
4.3	Gehäuse aus zwei Ansichten. . . . .	71
4.4	Gehäuse (geschnittene Ansicht). . . . .	72
4.5	Elastomer-Mundstück (a) und Richtungsventil (b) . . . . .	72
4.6	Gehäuse mit eingebauter Walze (a) und Anschluss des Kreislaufs (b). Eine Nut (c) dient zur Aufnahme des O-Ringes, die andere Nut (d) dient zum formschlüssigen Fixieren des Anschlusses. . . . .	73
4.7	Walze (geschnittene Ansicht). . . . .	73
4.8	Schnittansicht: Schraube an Walze (a), Führung im Gehäuse (b). . . . .	74
4.9	Walze mit Nuten für O-Ringe zur Abdichtung. . . . .	74
4.10	Walze mit Nut für O-Ring im Gehäuse. . . . .	75
4.11	Geschlitzte Walze. . . . .	75
4.12	Komponenten des BOV: Ventilhalter (a), Richtungsventil (b), Schutzkappe (c). . . . .	76
4.13	BOV-Verschlussplatte (a) und eingebautes BOV (b) im geschlossenen Modus als Schnittansicht. Das BOV wird durch eine Nut, in der ein O-Ring Platz findet, in das Gehäuse eingeschnappt (siehe vergrößerte Ansicht). . . . .	76
4.14	BOV-Verschlussplatte. . . . .	77
4.15	Druckluft-Ventil: Halterung (b) mit Hebel (a) und Druckluft-Anschluss (c). . . . .	77
4.16	Schraubverschluss (a), Gleitring (b), Deckel (c), Membran (d). . . . .	78
4.17	Hebel zur Erhöhung der Kraft auf Membran (a), Hebel des Druckluft-Ventils (b), Membran (c). . . . .	78

4.18	Hebel zur Aufbringung einer zusätzlichen Kraft auf die Membran (a), Halterung (b), Verschlusschraube (c) . . . . .	79
4.19	Geschlossener Modus: Kreislauf geöffnet, BOV geschlossen. Darstellung der Atemgasströmung (Blau: frisches Atemgas. Rot: ausgeatmetes Gas). . . . .	80
4.20	Offener Modus: Kreislauf geschlossen, BOV geöffnet. Darstellung der Atemgasströmung (Blau: frisches Atemgas. Rot: ausgeatmetes Gas). . . . .	82
4.21	Ausgelenkte Zugfeder AB im geschlossenen Modus. . . . .	83
4.22	HUD-Halterung am Gehäuse des Mundstücks. . . . .	84
4.23	Geschnittene Darstellung des Mundstücks: Komponenten und verwendete Kunststoffe. Walze und BOV-Verschlussplatte gleiten am Gehäuse. . . . .	90
4.24	Gehäusehälften A und B mit Stangenanguss. . . . .	94
4.25	Kleben der Gehäusehälften. Nut-Kamm-Konstruktion vor (a) und nach (b) dem Fügeprozess. . . . .	95
4.26	Gehäuse vor (a) und nach (b) dem stirnseitigen Drehen. . . . .	96
4.27	Gehäuse vor (a) und nach (b) dem innenseitigen Drehen. . . . .	96
4.28	Gehäuse mit Gewinde in der HUD-Halterung (a) und Bohrungen in den Laschen (b). . . . .	97
4.29	Walze mit Stangenanguss. . . . .	97
4.30	Walze vor (a) und nach (b) dem Drehen. . . . .	98
4.31	Walze mit Durchbruch und einer umlaufenden Nut und sowie einer Bohrung. . . . .	98
4.32	BOV-Verschlussplatte mit Anguss. . . . .	99
4.33	Lasergeschnittene (a) und gebogene (b) Hebel. . . . .	99
4.34	Vorgehensweise bei der Spritzgießsimulation. . . . .	101
4.35	Walze mit Anguss: symmetrischer (a) und schräger (b) Stangenanguss. . . . .	102
4.36	BOV-Verschlussplatte mit Werkzeug und Anguss. . . . .	102
4.37	Vernetzte Walze mit 3D-Volumenelementen. . . . .	103
4.38	Volumenstrom beim Einspritzvorgang. . . . .	104
4.39	Formfüllung der Walze: symmetrischer Anguss mit Freistrahle (a) und schräger Anguss mit Quellströmung (b). . . . .	106
4.40	Druckverbrauch während der Formfüllung der BOV-Verschlussplatte. . . . .	106
4.41	Eingespritzte Masse (a) und Druckverbrauch (b) während der Formfüllung der Gehäusehälfte A. . . . .	107
4.42	Bindenähte der Gehäusehälfte B infolge der Formfüllung. . . . .	108
4.43	Nachgedrückte Masse (a) und Druckverbrauch (b) während der Kühlphase der Gehäusehälfte A. . . . .	108

4.44	Einfallstellen an der Walze. . . . .	109
4.45	Geschnittene Darstellung der Temperatur im wärmsten Bereich der Gehäusehälfte A kurz vor dem Entformungszeitpunkt. . . . .	110
4.46	Geschnittene Darstellung der Temperatur im wärmsten Bereich der Walze kurz vor dem Entformungszeitpunkt. . . . .	110
4.47	Gehäusehälfte A: Totale Deformation (50-fache Vergrößerung). . . . .	112
4.48	Gehäusehälfte A und Gehäusehälfte B: Deformation normal zu den Fügeflächen (in mm). . . . .	113
4.49	Vernetzung einer Geometrie mit 3D-Volumenelementen. . . . .	113
4.50	Grobes Netz der Walze (a) führte zu inhomogener Temperaturverteilung mit Temperaturunterschieden von ca. 60 K an der Oberfläche während der Kühlphase (b). . . . .	114
4.51	Feines Netz der Walze (a) führte zu weitgehend homogener Temperaturverteilung mit Temperaturunterschieden von ca. 15 K an der Oberfläche während der Kühlphase (b). . . . .	115
4.52	Funktionsprototyp: Außenansicht (a) und Innenansicht (b) . . . . .	116
A.1	Explosionszeichnung des Mundstücks . . . . .	131
A.2	Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 1 . . . . .	132
A.3	Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 2 . . . . .	133
A.4	Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 3 . . . . .	134
A.5	Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 4 . . . . .	135
A.6	Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 5 . . . . .	136
A.7	Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 6 . . . . .	137
A.8	Materialdatenblatt Luran S 777 K FC, Seite 1 . . . . .	138
A.9	Materialdatenblatt Luran S 777 K FC, Seite 2 . . . . .	139
A.10	Materialdatenblatt Luran S 777 K FC, Seite 3 . . . . .	140
A.11	Hostaform C9021: Specific Volume as function of Temperature . . . . .	149
A.12	Luran S 777 K: Specific Volume as function of Temperature . . . . .	150
A.13	Gehäusehälfte A: Eingespritzte Masse . . . . .	151
A.14	Gehäusehälfte A: Nachgedrückte Masse . . . . .	151
A.15	Gehäusehälfte A: Einspritzdruck . . . . .	152
A.16	Gehäusehälfte A: Nachdruck . . . . .	152
A.17	Gehäusehälfte A: Druckverbrauch am Ende der Formfüllung. . . . .	153
A.18	Gehäusehälfte A: Bindenähte. . . . .	153
A.19	Gehäusehälfte A: Temperatur im Inneren bei Entformung. . . . .	154

A.20 Gehäusehälfte A: Einfallstellen. . . . .	154
A.21 Gehäusehälfte A: Verschiebung in Z-Richtung (50-fache Skalierung). . .	155
A.22 Gehäusehälfte A: Verschiebung in Z-Richtung. . . . .	155
A.23 Gehäusehälfte B: Eingespritzte Masse . . . . .	156
A.24 Gehäusehälfte B: Nachgedrückte Masse . . . . .	156
A.25 Gehäusehälfte B: Einspritzdruck . . . . .	157
A.26 Gehäusehälfte B: Nachdruck . . . . .	157
A.27 Gehäusehälfte B: Druckverbrauch am Ende der Formfüllung. . . . .	158
A.28 Gehäusehälfte B: Bindenähte. . . . .	158
A.29 Gehäusehälfte B: Temperatur im Inneren bei Entformung. . . . .	159
A.30 Gehäusehälfte B: Einfallstellen. . . . .	159
A.31 Gehäusehälfte B: Verschiebung in Z-Richtung (50-fache Skalierung). . .	160
A.32 Gehäusehälfte B: Verschiebung in Z-Richtung. . . . .	160
A.33 Walze: Eingespritzte Masse . . . . .	161
A.34 Walze: Nachgedrückte Masse . . . . .	161
A.35 Walze: Einspritzdruck . . . . .	162
A.36 Walze: Nachdruck . . . . .	162
A.37 Walze: Druckverbrauch am Ende der Formfüllung. . . . .	163
A.38 Walze: Bindenähte. . . . .	163
A.39 Walze: Temperatur im Inneren bei Entformung. . . . .	164
A.40 Walze: Einfallstellen. . . . .	164
A.41 Walze: Verschiebung in Y-Richtung (50-fache Skalierung). . . . .	165
A.42 Walze: Totale Verschiebung (50-fache Skalierung). . . . .	165
A.43 BOV-Verschlussplatte: Eingespritzte Masse . . . . .	166
A.44 BOV-Verschlussplatte: Nachgedrückte Masse . . . . .	166
A.45 BOV-Verschlussplatte: Einspritzdruck . . . . .	167
A.46 BOV-Verschlussplatte: Nachdruck . . . . .	167
A.47 BOV-Verschlussplatte: Druckverbrauch am Ende der Formfüllung. . . .	168
A.48 BOV-Verschlussplatte: Bindenähte. . . . .	168
A.49 BOV-Verschlussplatte: Temperatur im Inneren bei Entformung. . . . .	169
A.50 BOV-Verschlussplatte: Einfallstellen. . . . .	169
A.51 BOV-Verschlussplatte: Verschiebung in Y-Richtung (50-fache Skalierung).170	
A.52 BOV-Verschlussplatte: Verschiebung in Y-Richtung. . . . .	170

# Tabellenverzeichnis

2.1	Richtwerte für Entformungsschrägen [59] . . . . .	52
4.1	Länge der Zugfeder AB in geschlossenem und offenem Modus . . . . .	83
4.2	Zur Werkstoffauswahl herangezogene Vorauswahlkriterien . . . . .	86
4.3	Liste möglicher Materiallösungen . . . . .	87
4.4	Komponenten und geeignete Materialien . . . . .	89
4.5	Trocknungsbedingungen von Luran S [38]. . . . .	91
4.6	Temperaturen und Schwindungen beim Spritzgießen von Luran S [38]. . . . .	91
4.7	Temperaturen und Schwindungen beim Spritzgießen von Hostaform C 9021 [33]. . . . .	92
4.8	Elementanzahl nach der Vernetzung . . . . .	103
4.9	Massetemperatur ( $T_M$ ), Werkzeugtemperatur ( $T_W$ ), Entformungstemperatur ( $T_E$ ), Einspritz-Volumenstrom ( $\dot{V}$ ) und relativer Nachdruck ( $p_N$ ). . . . .	105
4.10	Einspritzzeit ( $t_E$ ), Nachdruckzeit ( $t_N$ ), Gesamtkühlzeit ( $t_K$ ) und Zy- kluszeit ( $t_Z$ ) der Komponenten . . . . .	111
A.1	General Parameters . . . . .	141
A.2	Rheology (Cross-WLF) . . . . .	141
A.3	Thermal conductivity lambda as function of Temperature . . . . .	142
A.4	pvT Tait Coefficients . . . . .	142
A.5	Specific heat Cp as function of Temperature . . . . .	143
A.6	No-Flow Properties . . . . .	143
A.7	Crystallization Weibull Coefficients . . . . .	144
A.8	Young's Modulus E as function of Temperature . . . . .	144
A.9	Poisson ratio Nu as function of Temperature . . . . .	145
A.10	Thermal conductivity lambda as function of Temperature . . . . .	146
A.11	Specific head Cp as function of Temperature . . . . .	146
A.12	Young's Modulus E as function of Temperature . . . . .	147
A.13	Poisson ratio nu as function of Temperature . . . . .	148

A.14 Density $\rho$ as function of Temperature . . . . .	148
A.15 Coefficient of thermal expansion $\alpha$ as function of Temperature . . .	149
A.16 Vernetzungsparameter . . . . .	150

# A Anhang

## A.1 Geometrie

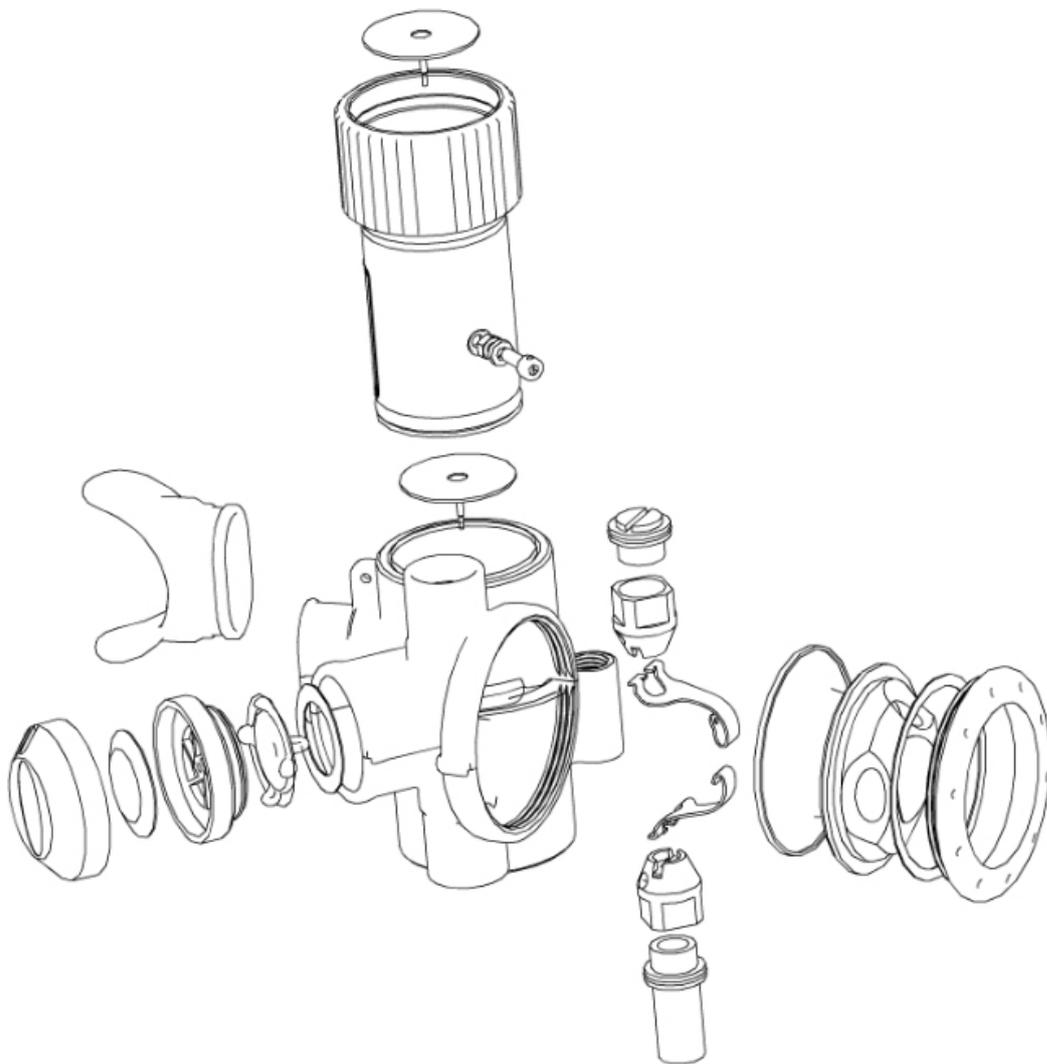


Abbildung A.1: Explosionszeichnung des Mundstücks

## A.2 Materialdatenblätter

**Ticona**  
Engineering Polymers

### HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

#### Description

Chemical abbreviation according to ISO 1043-1: POM  
Molding compound ISO 9988- POM-K, M-GNR, 03-002

POM copolymer

Standard-Injection molding type with high rigidity, hardness and toughness; good chemical resistance to solvents, fuel and strong alkalis as well as good hydrolysis resistance; high resistance to thermal and oxidative degradation.

Fulfills EG-directive 2002/72/EU as well as the recommendation XXXIII for consumer goods of the BgVV, corresponding to FDA-regulation for food contact.

UL-registration for all colours and a thickness more than 1.5 mm as UL 94 HB, temperature index UL 746 B electrical 110 °C, mechanical 90 °C.

Burning rate ISO 3795 and FMVSS 302 &lt; 75 mm/min for a thickness more than 1 mm.

Ranges of applications: automotive engineering, precision engineering, electric and electrical industry, domestic appliances.

FDA = Food and Drug Administration (USA)  
BgVV = Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin  
FMVSS = Federal Motor Vehicle Safety Standard (USA)  
UL = Underwriters Laboratories (USA)

Physical properties	Value	Unit	Test Standard
Density	1410	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183
Melt volume rate (MVR)	8	cm <sup>3</sup> /10min	ISO 1133
MVR test temperature	190	°C	ISO 1133
MVR test load	2.16	kg	ISO 1133
Mold shrinkage - parallel	2	%	ISO 294-4
Mold shrinkage - normal	1.8	%	ISO 294-4
Water absorption (23°C-sat)	0.65	%	ISO 62
Humidity absorption (23°C/50%RH)	0.2	%	ISO 62

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile modulus (1mm/min)	2850	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile stress at yield (50mm/min)	64	MPa	ISO 527-2/1A
Tensile strain at yield (50mm/min)	9	%	ISO 527-2/1A
Nominal strain at break (50mm/min)	30	%	ISO 527-2/1A
Tensile creep modulus (1h)	2500	MPa	ISO 899-1
Tensile creep modulus (1000h)	1300	MPa	ISO 899-1
Charpy impact strength @ 23°C	180P	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Charpy impact strength @ -30°C	160	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength @ 23°C	6.5	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA

Printed: 06. March 2007

Page: 1

 **Celanese**  
Ticona - A business of Celanese

Abbildung A.2: Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 1

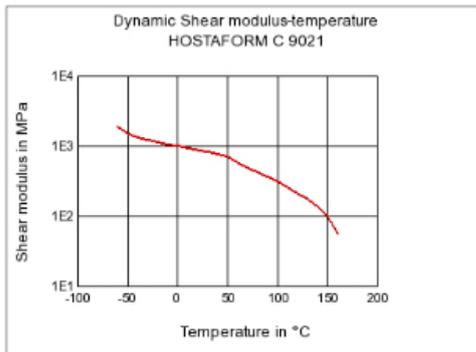
**HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled**

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Charpy notched impact strength @ -30°C	6	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (10°C/min)	166	°C	ISO 11357-1,-2,-3
DTUL @ 1.8 MPa	104	°C	ISO 75-1/-2
Vicat softening temperature B50 (50°C/h 50N)	150	°C	ISO 306
Coeff. of linear therm. expansion (parallel)	1.1	E-4/°C	ISO 11359-2
Coeff. of linear therm. expansion (normal)	1.1	E-4/°C	ISO 11359-2
Flammability @1.6mm nom. thickn.	HB	class	UL94
thickness tested (1.6)	1.5	mm	UL94
UL recognition (1.6)	UL	-	UL94
Flammability at thickness h	HB	class	UL94
thickness tested (h)	3	mm	UL94
UL recognition (h)	UL	-	UL94
Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
Relative permittivity - 100 Hz	4	-	IEC 60250
Relative permittivity - 1 MHz	4	-	IEC 60250
Dissipation factor - 100 Hz	20	E-4	IEC 60250
Dissipation factor - 1 MHz	50	E-4	IEC 60250
Volume resistivity	1E12	Ohm*m	IEC 60093
Surface resistivity	1E14	Ohm	IEC 60093
Electric strength	35	kV/mm	IEC 60243-1
Comparative tracking index CTI	600	-	IEC 60112
Test specimen production	Value	Unit	Test Standard
Processing conditions acc. ISO	9988	-	Internal
Injection molding melt temperature	195	°C	ISO 294
Injection molding mold temperature	85	°C	ISO 294
Injection molding flow front velocity	200	mm/s	ISO 294
Injection molding hold pressure	90	MPa	ISO 294
Rheological Calculation properties	Value	Unit	Test Standard
Density of melt	1200	kg/m <sup>3</sup>	Internal
Thermal conductivity of melt	0.155	W/(m K)	Internal
Specific heat capacity of melt	2210	J/(kg K)	Internal
Eff. thermal diffusivity	4.85E-8	m <sup>2</sup> /s	Internal
Ejection temperature	165	°C	Internal

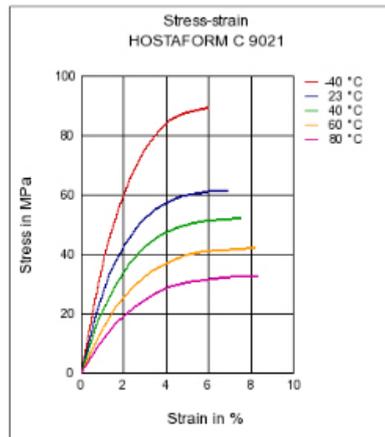
Abbildung A.3: Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 2

HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

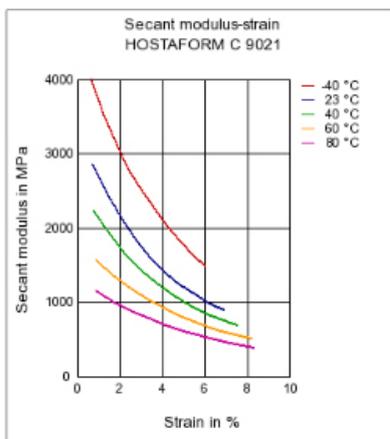
Dynamic Shear modulus-temperature



Stress-strain



Secant modulus-strain



Stress-strain (isochronous)

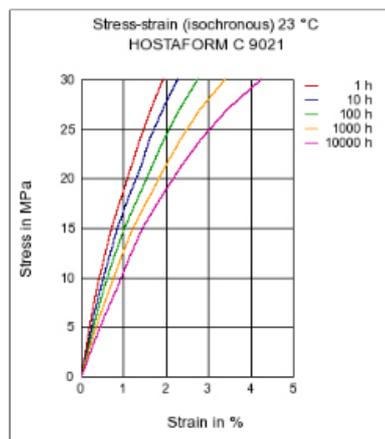
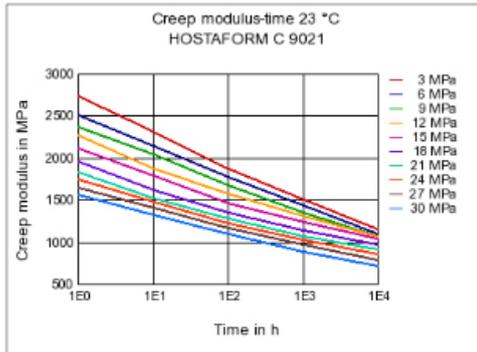


Abbildung A.4: Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 3

**HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled**

**Creep modulus-time**



**Typical injection moulding processing conditions**

Maximum residual moisture content: 0.1500%

Processing Temperatures:

	ϕ <sub>Cavity</sub>	ϕ <sub>Melt</sub>	ϕ <sub>Hot Runner</sub>	ϕ <sub>Die</sub>	ϕ <sub>4</sub>	ϕ <sub>3</sub>	ϕ <sub>2</sub>	ϕ <sub>1</sub>	ϕ <sub>Feeding</sub>	ϕ <sub>Hopper</sub>
min (°C)	80	190	190	190	190	190	180	170	60	20
max (°C)	120	210	210	210	210	200	190	180	80	30

Processing Pressures:

	Injection Pressure	Holding Pressure	Back Pressure
min (bar)	600	600	0
max (bar)	1200	1200	40

Injection speed: slow - medium

Screw speed:

Printed: 06. March 2007

Page: 4

**Abbildung A.5:** Materialdatenblatt Hostaform C9021, Seite 4

### HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

Screw diameter (mm)	25	40	55
Screw speed (rpm)	120	100	70

#### Pre-drying conditions:

It is normally not necessary to dry HOSTAFORM. However, should there be surface moisture (condensate) on the molding compound as a result of incorrect storage, drying is required. A circulating air drying cabinet can be used for this purpose if the granul

The product can then be stored in standard conditions until processed.

Drying time: 3 - 4 h

Drying temperature: 120 - 140 °C

#### Special information:

No special information available.

### Injection Molding

Standard injection moulding machines with three phase (15 to 25 D) plasticating screws will fit.

Melt temperature	190-230 °C
Mould temperature	60-120 °C

### Film Extrusion

Standard extruders with grooved feed zone and short compression screws (minimum 25 D) will fit.

Melt temperature	180-190 °C
------------------	------------

### Other Extrusion

Standard extruders with grooved feed zone and short compression screws (minimum 25 D) will fit.

Melt temperature	180-190 °C
------------------	------------

### Profile Extrusion

Standard extruders with grooved feed zone and short compression screws (minimum 25 D) will fit.

Melt temperature	180-190 °C
------------------	------------



## HOSTAFORM® C 9021 | POM | Unfilled

### Sheet Extrusion

Standard extruders with grooved feed zone and short compression screws (minimum 25 D) will fit.

Melt temperature 180-190 °C

### Contact Information

#### Americas

Ticona  
Product Information Service  
8040 Dixie Highway  
Florence, KY 41042  
USA  
Tel.: +1-800-833-4882  
Tel.: +1-859-372-3244  
email: [prodinfo@ticona.com](mailto:prodinfo@ticona.com)  
Ticona on the web: [www.ticona.com](http://www.ticona.com)

Customer Service  
Tel.: +1-800-526-4960  
Tel.: +1-859-372-3214  
Fax: +1-859-372-3125

#### Europe

Ticona GmbH  
Information Service  
Tel.: +49 (0) 180-5842662 (Germany)\*  
+49 (0) 69-30516299 (Europe)  
Fax: +49 (0) 180-2021202 (Germany & Europe)\*\*  
email: [infoservice@ticona.de](mailto:infoservice@ticona.de)  
Internet: [www.ticona.com](http://www.ticona.com)

\*starting 01.01.2007 0,14€/minute + local landline rates  
\*\*0,06€/Call + local landline rates

### General Disclaimer

NOTICE TO USERS: Values shown are based on testing of laboratory test specimens and represent data that fall within the standard range of properties for natural material. These values alone do not represent a sufficient basis for any part design and are not intended for use in establishing maximum, minimum, or ranges of values for specification purposes. Colorants or other additives may cause significant variations in data values.

Properties of molded parts can be influenced by a wide variety of factors including, but not limited to, material selection, additives, part design, processing conditions and environmental exposure. Any determination of the suitability of a particular material and part design for any use contemplated by the users and the manner of such use is the sole responsibility of the users, who must assure themselves that the material as subsequently processed meets the needs of their particular product or use.

To the best of our knowledge, the information contained in this publication is accurate; however, we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information. The information contained in this publication should not be construed as a promise or guarantee of specific properties of our products. It is the sole responsibility of the users to investigate whether any existing patents are infringed by the use of the materials mentioned in this publication.

Moreover, there is a need to reduce human exposure to many materials to the lowest practical limits in view of possible adverse effects. To the extent that any hazards may have been mentioned in this publication, we neither suggest nor guarantee that such hazards are the only ones that exist. We recommend that persons intending to rely on any recommendation or to use any equipment, processing technique or material mentioned in this publication should satisfy themselves that they can meet all applicable safety and health standards.

We strongly recommend that users seek and adhere to the manufacturer's current instructions for handling each material they use, and entrust the handling of such material to adequately trained personnel only. Please call the telephone numbers listed (+49 (0) 69 30516299 for Europe and +1 859-372-3244 for the Americas) for additional technical information. Call Customer Services for the appropriate Materials Safety Data Sheets (MSDS) before attempting to process our products.

The products mentioned herein are not intended for use in medical or dental implants.

© Copyright 2007, Ticona, all rights reserved. (Pub. 28-Feb-2007)



## PRODUKTINFORMATION



### Luran® S 777 K FC

Richtwerte für ungefärbtes Produkt bei 23 °C <sup>1)</sup>	Prüfnorm <sup>2)</sup>	Einheit	Werte <sup>3)</sup>
<b>PRODUKTMERKMALE</b>			
Polymer-Kurzzeichen	-	-	ASA
Dichte	ISO 1183	kg/m <sup>3</sup>	1070
Wasseraufnahme, Sättigung in Wasser bei 23°C	ähnlich ISO 62	%	1.65
Wasseraufnahme, 24 h bei 23°C	ISO 62	%	0.45
Feuchtigkeitsaufnahme, Sättigung bei Normalklima 23°C/50%r.F.	ähnlich ISO 62	%	0.35
<b>VERARBEITUNG</b>			
Verarbeitungsverfahren: Spritzgießen (M), Extrusion (E), Blasformen (B)	-	-	M
Schmelzevolumenrate MVR 220 °C/10 kg	ISO 1133	cm <sup>3</sup> /10min	15
Vortrocknung: Temperatur	-	°C	80
Vortrocknung: Zeit	-	h	2 - 4
Massetemperaturbereich, Spritzgießen	-	°C	240 - 280
Werkzeugtemperaturbereich	-	°C	40 - 80
Verarbeitungsschwindigkeit, frei, längs	-	%	0.4 - 0.7
<b>WERKSTOFFKENNWERTE ZUM BRENNVERHALTEN</b>			
Prüfung nach UL-Standard bei d = 1.6 mm	IEC 60695-11-10	class	HB
Prüfung von Elektroisolistoffen, Verfahren BH	IEC 60707	class	HB
Prüfung von Werkstoffen der Kfz-Industrie (d >= 1mm)	FMVSS 302	-	+
<b>MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN</b>			
Zug-E-Modul	ISO 527-1/-2	MPa	2300
Streckspannung, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	MPa	48
Streckdehnung, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	%	3.3
Nominelle Bruchdehnung, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	%	9
Zug-Kriechmodul, 1000 h, Dehnung <= 0.5%, 23°C	ISO 899-1	MPa	1400
Biegefestigkeit	ISO 178	MPa	70
Schubmodul	ISO 6721-2	MPa	800
Charpy-Schlagzähigkeit (23°C)	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	250
Charpy-Schlagzähigkeit (-30°C)	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	90
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (23°C)	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	17
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (-30°C)	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	4
Izod-Kerbschlagzähigkeit, Methode A (23°C)	ASTM D 256	J/m	180
Kugeldruckhärte H bei 358 N/30 s	ISO 2039-1	MPa	80
<b>THERMISCHE EIGENSCHAFTEN</b>			
HDT A (1.80 MPa), gemessen an getrockneten Probekörpern	ISO 75-1/-2	°C	97
HDT B (0.45 MPa), gemessen an getrockneten Probekörpern	ISO 75-1/-2	°C	101
Vicat-Erweichungstemperatur VST/A/50	ISO 306	°C	105
Vicat-Erweichungstemperatur VST/B/50	ISO 306	°C	97
Max. Gebrauchstemperatur, bis zu einigen Stunden	-	°C	85
Therm. Längenausdehnungskoeffizient, längs (23-80)°C	ISO 11359-1/-2	E-6/K	80 - 110
Wärmeleitfähigkeit	DIN 52612-1	W/(m K)	0.17

#### Fußnoten

- 1) Falls in der Produktbezeichnung oder in den Eigenschaften nicht anders angegeben.
- 2) Probekörper nach CAMPUS.
- 3) Das Stern-Symbol "\*" anstelle eines numerischen Wertes bedeutet unzutreffender Wert.

Styrolution GmbH, Carl-Bosch Straße 38, 67056 Ludwigshafen  
Telefon +49 621 41446, Mail styrenicinfopoint@styrolution.com, www.styrolution.com

Driving Success. Together.

Abbildung A.9: Materialdatenblatt Luran S 777 K FC, Seite 2

## PRODUKTINFORMATION



### Luran® S 777 K FC

Richtwerte für ungefärbtes Produkt bei 23 °C <sup>1)</sup>	Prüfnorm <sup>2)</sup>	Einheit	Werte <sup>3)</sup>
<b>ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN</b>			
Dielektrizitätszahl (100Hz)	IEC 60250	-	3.7
Dielektrizitätszahl (1 MHz)	IEC 60250	-	3.4
Dielekt. Verlustfaktor (100Hz)	IEC 60250	E-4	110
Dielekt. Verlustfaktor (1 MHz)	IEC 60250	E-4	240
Spez. Durchgangswiderstand	IEC 60093	Ohm*m	1E12
Spez. Oberflächenwiderstand	IEC 60093	Ohm	1E13
Elektrische Durchschlagfestigkeit K20/K20	IEC 60243-1	kV/mm	35
Vergleichszahl der Kriechwegbildung, CTI, Prüflösung A	IEC 60112	-	600

#### Fußnoten

- 1) Falls in der Produktbezeichnung oder in den Eigenschaften nicht anders angegeben.
- 2) Probekörper nach CAMPUS.
- 3) Das Stern-Symbol "\*" anstelle eines numerischen Wertes bedeutet unzutreffender Wert.

Styrolution GmbH, Carl-Bosch Straße 38, 67056 Ludwigshafen  
 Telefon +49 621 41446, Mail styrenicsinfopoint@styrolution.com, www.styrolution.com

Driving Success. Together.

Abbildung A.10: Materialdatenblatt Luran S 777 K FC, Seite 3

## A.3 Spritzgießsimulation

### A.3.1 Materialdaten

Im Folgenden werden die Materialdaten, welche im Zuge der Spritzgießsimulation mit SIGMASOFT verwendet wurden, dargestellt. Die Tabellenüberschriften in diesem Kapitel entsprechen den verwendeten Begriffen in SIGMASOFT.

Kunststoffe

**Tabelle A.1:** General Parameters

	<b>Hostaform C 9021</b>	<b>Luran S 777 K</b>
Material type	Plastic	Plastic
Initial temperature	220,0 °C	260,0 °C
No-Flow Properties	Based on pvT	Based on pvT
pvT material type	Semi-Cristalline	Amorphous
pvT model	Tait	Tait
Crystallization model	Weibull	-
Rheology model	Cross-WLF	Cross-WLF
extensional Rheology model	Off	Off
Viscosity relaxation model	Deactivated	Deactivated
Fibre Model	Deactivated	Deactivated
Stress Model	Elastic	Elastic

**Tabelle A.2:** Rheology (Cross-WLF)

<b>Coefficient</b>	<b>Hostaform C 9021</b>	<b>Luran S 777 K</b>	<b>Unit</b>
A1	0,8156	31,8560	
A2	52,6836	51,6000	K
n	0,2075	0,2954	
D1	534,3072	2,5973 10 <sup>13</sup>	Pa s
D2	210,0000	104,8500	°C
D3	4,2713 10 <sup>-3</sup>	0,0000	K/bar
D4	311724,1875	48788,6016	Pa

**Tabelle A.3:** Thermal conductivity lambda as function of Temperature

Temperature (°C)	Hostaform C 9021	Luran S 777 K
	Lambda (W/m K)	Lambda (W/m K)
20,00	0,1550	
37,00		0,1660
58,00		0,1650
79,00		0,1720
99,00		0,1790
120,00		0,1890
140,00		0,1900
159,00		0,1900
179,00		0,1910
199,00		0,1920
218,00		0,1940
238,00		0,1960
277,00		0,1940

**Tabelle A.4:** pvT Tait Coefficients

Coefficient	Hostaform C 9021	Luran S 777 K	Unit
b1m	0,8425	0,9371	cm <sup>3</sup> /g
b2m	6,4270 10 <sup>-4</sup>	5,9130 10 <sup>-4</sup>	cm <sup>3</sup> /g K
b3m	1544,8324	1768,0000	bar
b4m	6,1429 10 <sup>-3</sup>	4,0050 10 <sup>-3</sup>	1/K
b1s	0,7524	0,9371	cm <sup>3</sup> /g
b2s	3,4118 10 <sup>-4</sup>	2,8170 10 <sup>-4</sup>	cm <sup>3</sup> /g K
b3s	2740,8538	2413,0000	bar
b4s	4,5200 10 <sup>-3</sup>	3,3950 10 <sup>-3</sup>	1/K
b5	166,6789	96,0000	°C
b6	4,2713 10 <sup>-3</sup>	0,0280	K/bar
b7	0,0884	-	cm <sup>3</sup> /g
b8	0,0795	-	1/K
b9	4,9733 10 <sup>-4</sup>	-	1/bar

**Tabelle A.5:** Specific heat  $C_p$  as function of Temperature

Temperature (°C)	Hostaform C 9021	Luran S 777 K
	$C_p$ (J/kg K)	$C_p$ (J/kg K)
51,00	1389,0	
85,00	2474,0	
88,00	2307,0	
114,00	2522,0	
124,00	3003,0	
129,00	4160,0	
133,00	9700,0	
138,00	18090,0	
143,00	3706,0	
144,00	2213,0	
145,00	2082,0	
210,00	2168,0	
51,00		1352,8
70,00		1446,8
86,00		1538,0
93,00		1606,2
100,00		1717,8
107,00		1842,5
114,00		1893,3
140,00		1969,9
170,00		2047,1
200,00		2119,4
230,00		2179,9
260,00		2228,9

**Tabelle A.6:** No-Flow Properties

Coefficient	Hostaform C 9021	Luran S 777 K	Unit
K0	163,06	116,00	°C
K1	$4,2713 \cdot 10^{-3}$	0,02800	°C/bar

**Tabelle A.7:** Crystallization Weibull Coefficients

Coefficient	Hostaform C 9021	Luran S 777 K	Unit
Tu0	169,9487	-	°C
Tu1	4,2713 10 <sup>-3</sup>	-	°C/bar
Tu2	0,0000	-	°C/bar <sup>2</sup>
Tz	84,9618	-	°C
Kmax	303,8461	-	K/min
n	1,0000	-	
delta h	0,0000	-	kJ/kg

**Tabelle A.8:** Young's Modulus E as function of Temperature

Temperature (°C)	Hostaform C 9021	Luran S 777 K
	E (MPa)	E (MPa)
23	2650	
40	2100	
60	1500	
80	1050	
120	500	
140	400	
150	325	
10		2670
20		2610
30		2490
40		2370
50		2210
60		2050
70		1900
80		1700
90		1450
100		1100
110		750
120		400

**Tabelle A.9:** Poisson ratio  $\nu$  as function of Temperature

Temperature (°C)	<b>Hostaform C 9021</b>	<b>Luran S 777 K</b>
	Nu (-)	Nu (-)
23	0,4333	
40	0,4434	
60	0,4563	
80	0,4668	
120	0,4808	
140	0,4811	
150	0,4817	
10		0,4009
20		0,4006
30		0,4028
40		0,4051
50		0,4092
60		0,4136
70		0,4179
80		0,4247
90		0,4342
100		0,4488
110		0,4642
120		0,4818

Stahl / Aluminium

**Tabelle A.10:** Thermal conductivity lambda as function of Temperature

Temperature (°C)	Steel	AlSi7Mg
	Lambda (W/m K)	Lambda (W/m K)
1	46,97	
100	46,63	
200	45,29	
300	43,11	
400	40,35	
500	37,24	
1		151,00
100		152,00
200		154,00
300		153,00
400		157,00
500		169,00

**Tabelle A.11:** Specific heat Cp as function of Temperature

Temperature (°C)	Steel	AlSi7Mg
	Cp (J/kg K)	Cp (J/kg K)
1	422	
100	496	
200	544	
300	580	
400	621	
500	683	
1		870
100		898
200		941
400		1058
500		1203
542		1279

**Tabelle A.12:** Young's Modulus E as function of Temperature

Temperature (°C)	Steel E (MPa)	AlSi7Mg E (MPa)
1	211400	
50	210000	
100	206900	
150	203400	
200	199600	
250	195600	
300	191700	
350	187600	
400	183400	
500	174900	
1		71900
50		71000
100		69400
150		67700
200		66000
250		64100
300		62300
350		60100
400		58000

**Tabelle A.13:** Poisson ratio  $\nu$  as function of Temperature

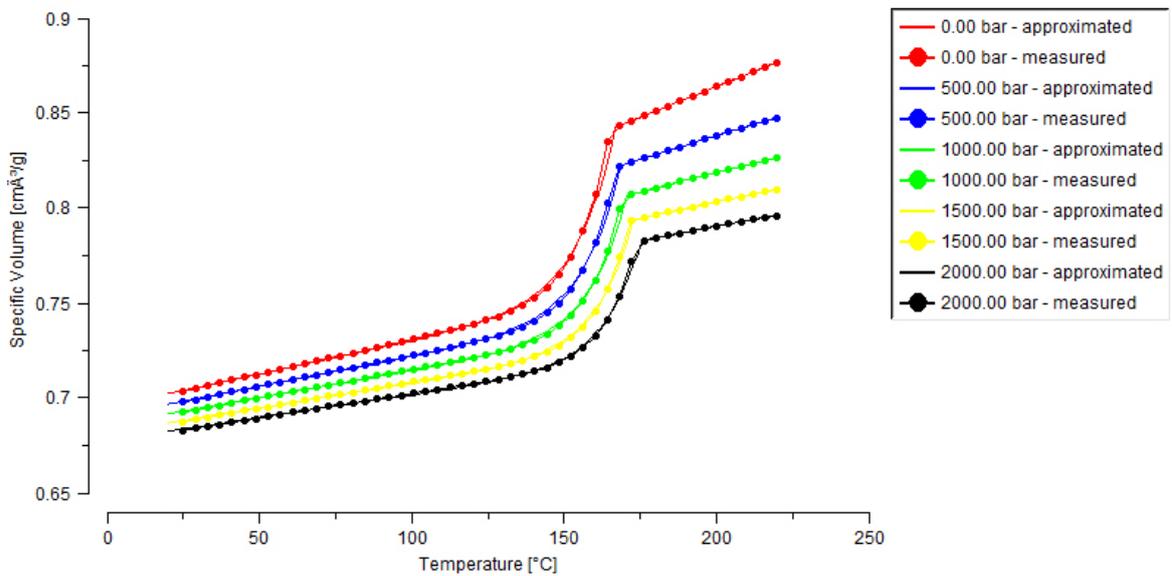
Temperature (°C)	Steel	AlSi7Mg
	Nu (-)	Nu (-)
1	0,2860	
100	0,2880	
150	0,2890	
200	0,2910	
250	0,2940	
300	0,2970	
350	0,3010	
400	0,3040	
500	0,3120	
1		0,3
2000		0,3

**Tabelle A.14:** Density  $\rho$  as function of Temperature

Temperature (°C)	Steel	AlSi7Mg
	Rho (g/cm <sup>3</sup> )	Rho (g/cm <sup>3</sup> )
1	7,85	
100	7,83	
200	7,80	
400	7,73	
600	7,66	
1		2,67
100		2,65
542		2,56

**Tabelle A.15:** Coefficient of thermal expansion alpha as function of Temperature

	<b>Steel</b>	<b>AlSi7Mg</b>
Temperature (°C)	Alpha (1/°C)	Alpha (1/°C)
1,00	$9,0233 \cdot 10^{-6}$	
99,75	$9,0233 \cdot 10^{-6}$	
100,25	$1,1950 \cdot 10^{-5}$	
199,75	$1,1950 \cdot 10^{-5}$	
200,25	$1,1437 \cdot 10^{-5}$	
399,75	$1,1437 \cdot 10^{-5}$	
400,25	$1,5831 \cdot 10^{-5}$	
599,75	$1,5831 \cdot 10^{-5}$	
1,00		$2,5348 \cdot 10^{-5}$
99,75		$2,5348 \cdot 10^{-5}$
100,25		$2,6208 \cdot 10^{-5}$
541,75		$2,6208 \cdot 10^{-5}$

**Abbildung A.11:** Hostaform C9021: Specific Volume as function of Temperature

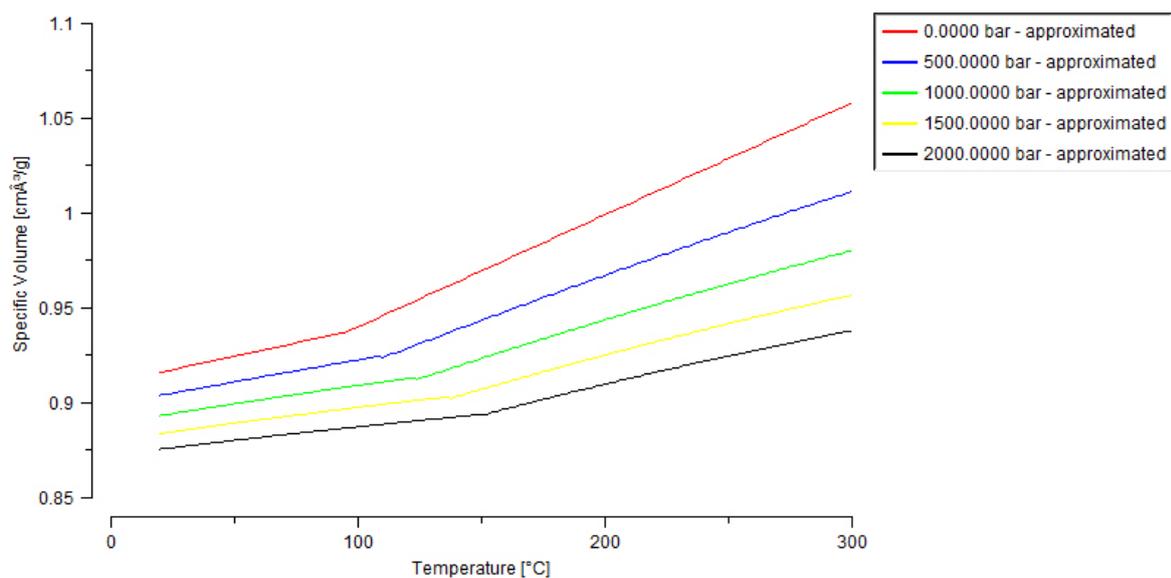


Abbildung A.12: Luran S 777 K: Specific Volume as function of Temperature

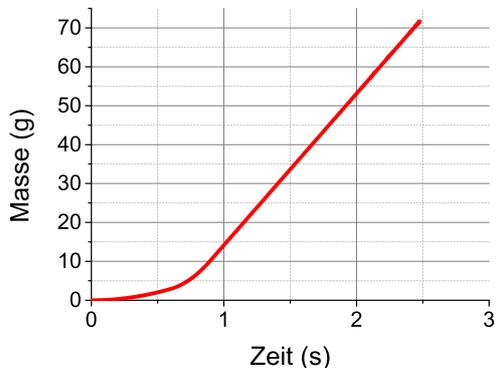
### A.3.2 Randbedingungen

Tabelle A.16: Vernetzungsparameter

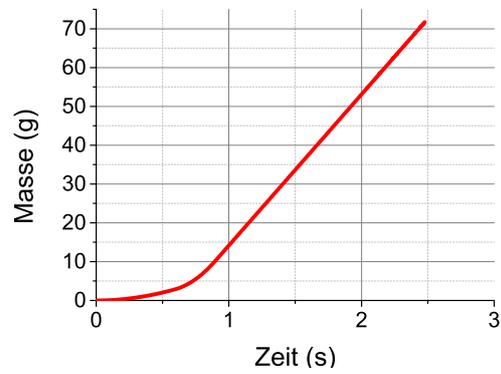
Komponente	Accuracy	Minimum wall thickness (mm)	Minimum element size (mm)	Smoothing	Ratio
Gehäusehälfte A	4,4,4	1, 1, 1	0,5, 0,5, 0,5	2,5	3,5
Gehäusehälfte B	4,4,4	1, 1, 1	0,5, 0,5, 0,5	2,5	3,5
Walze	4,4,4	0,8, 0,8, 8	0,4, 0,4, 4	2,5	3,5
BOV-Verschlusspl.	4,4,4	0,6, 0,6, 0,6	0,3, 0,3, 0,3	2,0	3,0

## A.3.3 Ergebnisse

## Gehäusehälfte A

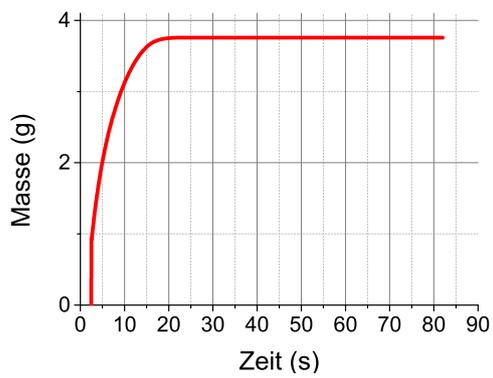


(a) Stahlwerkzeug

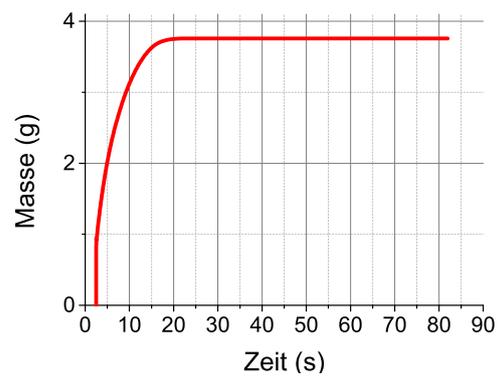


(b) Aluminiumwerkzeug

Abbildung A.13: Gehäusehälfte A: Eingespritzte Masse

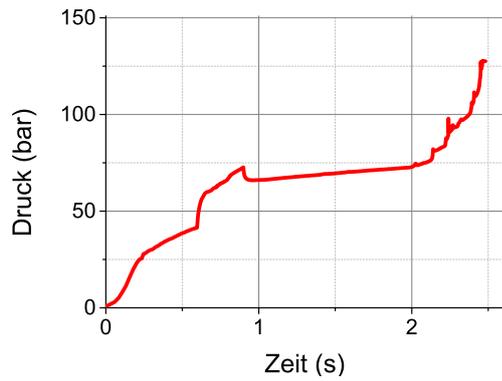


(a) Stahlwerkzeug

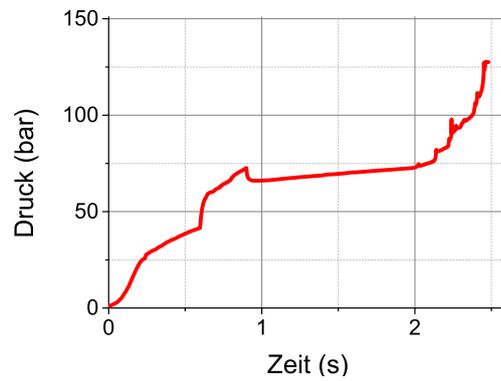


(b) Aluminiumwerkzeug

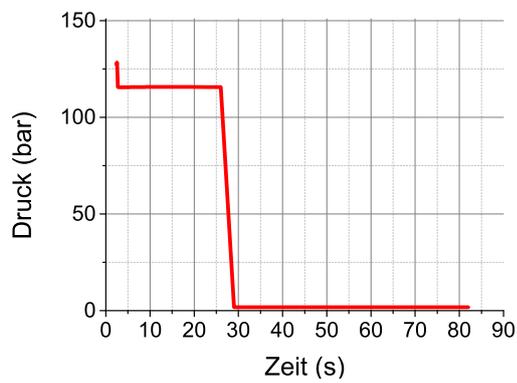
Abbildung A.14: Gehäusehälfte A: Nachgedrückte Masse



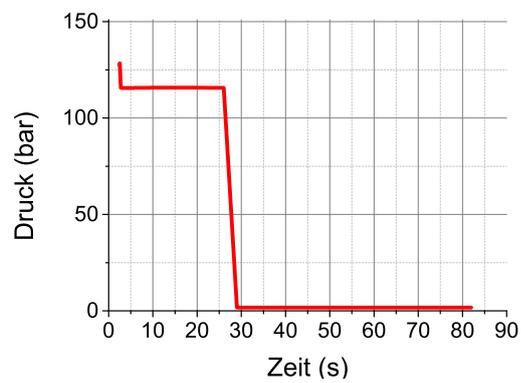
(a) Stahlwerkzeug



(b) Aluminiumwerkzeug

**Abbildung A.15:** Gehäusehälfte A: Einspritzdruck

(a) Stahlwerkzeug



(b) Aluminiumwerkzeug

**Abbildung A.16:** Gehäusehälfte A: Nachdruck

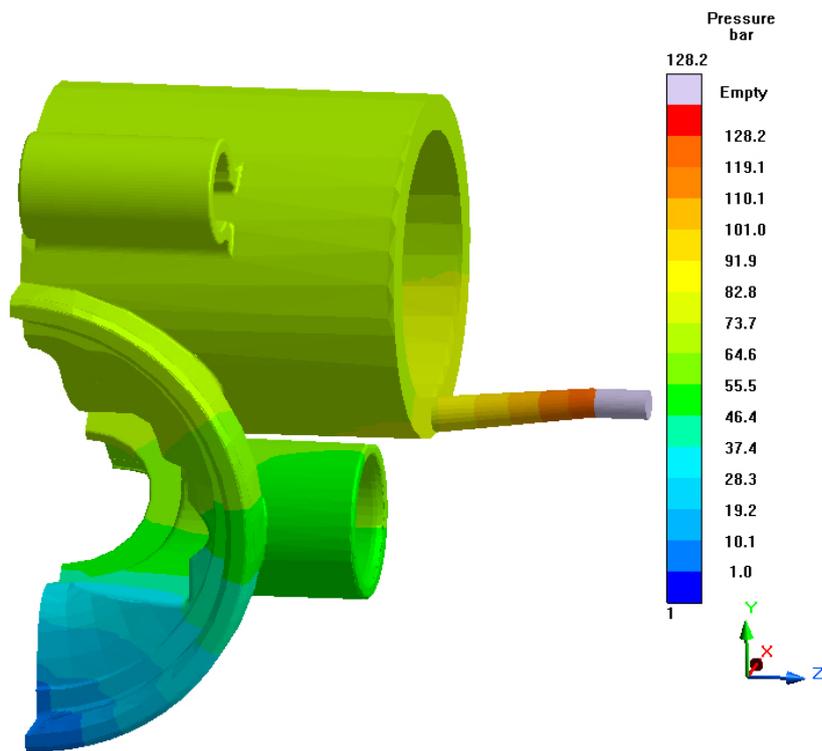


Abbildung A.17: Gehäusehälfte A: Druckverbrauch am Ende der Formfüllung.

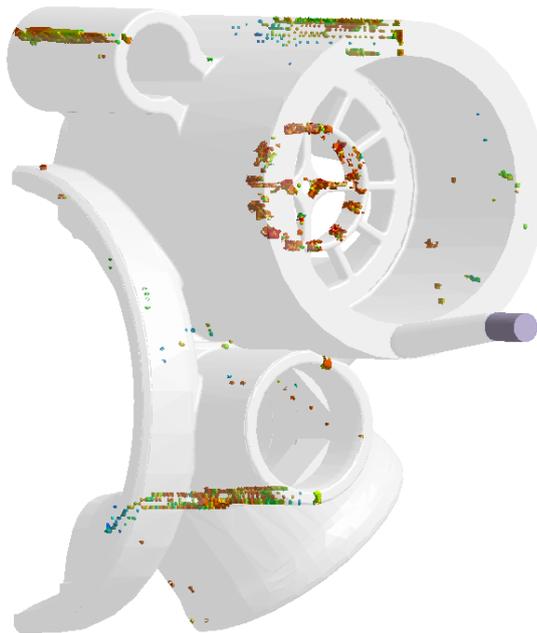


Abbildung A.18: Gehäusehälfte A: Bindenähte.

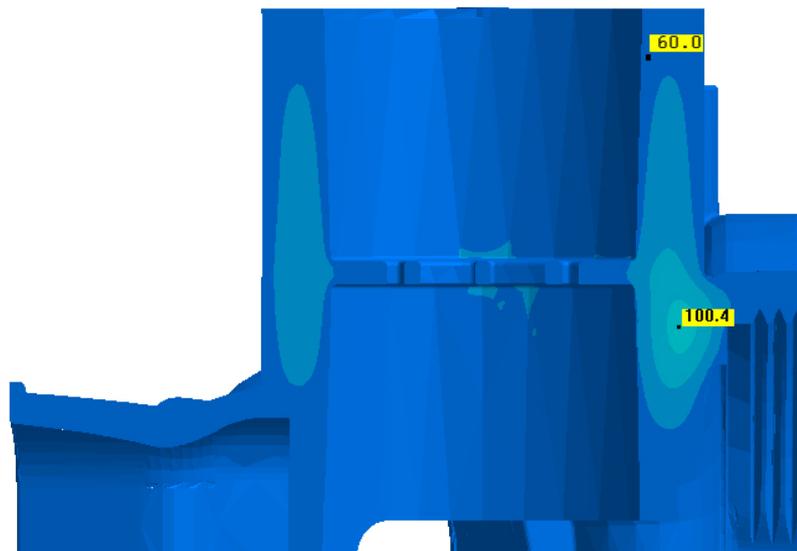


Abbildung A.19: Gehäusehälfte A: Temperatur im Inneren bei Entformung.

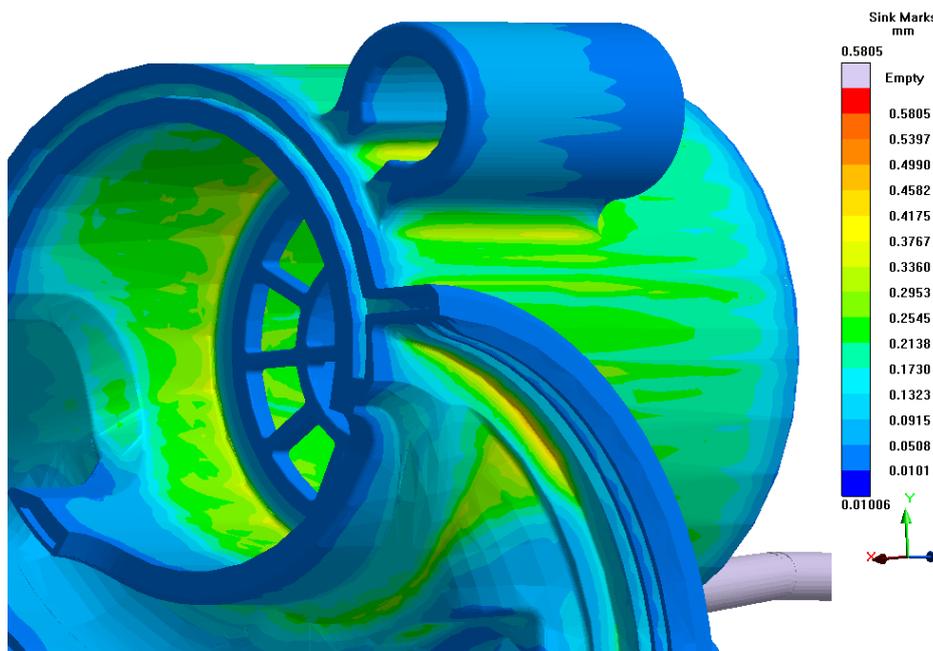


Abbildung A.20: Gehäusehälfte A: Einfallstellen.

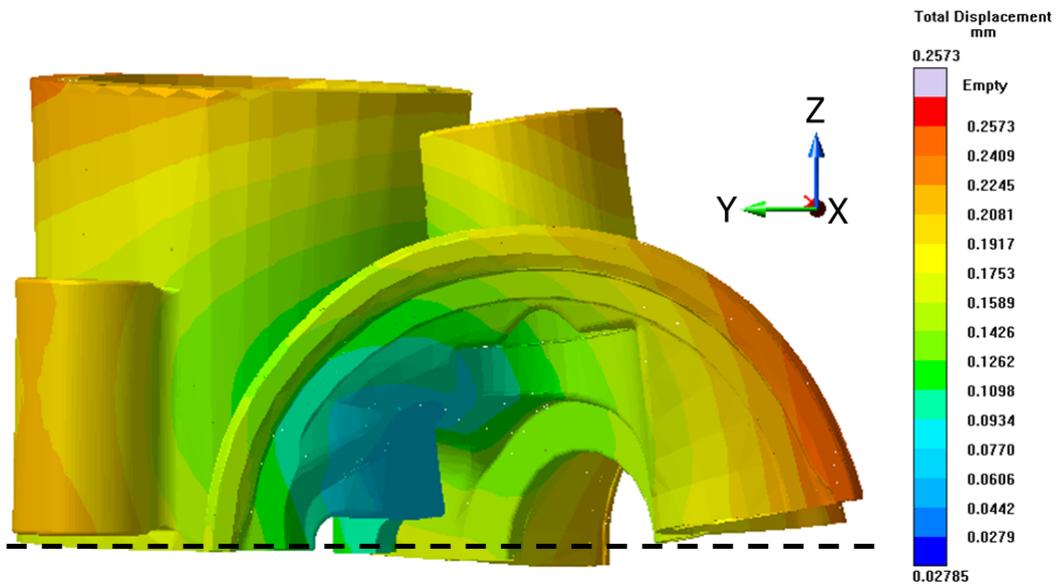


Abbildung A.21: Gehäusehälfte A: Verschiebung in Z-Richtung (50-fache Skalierung).

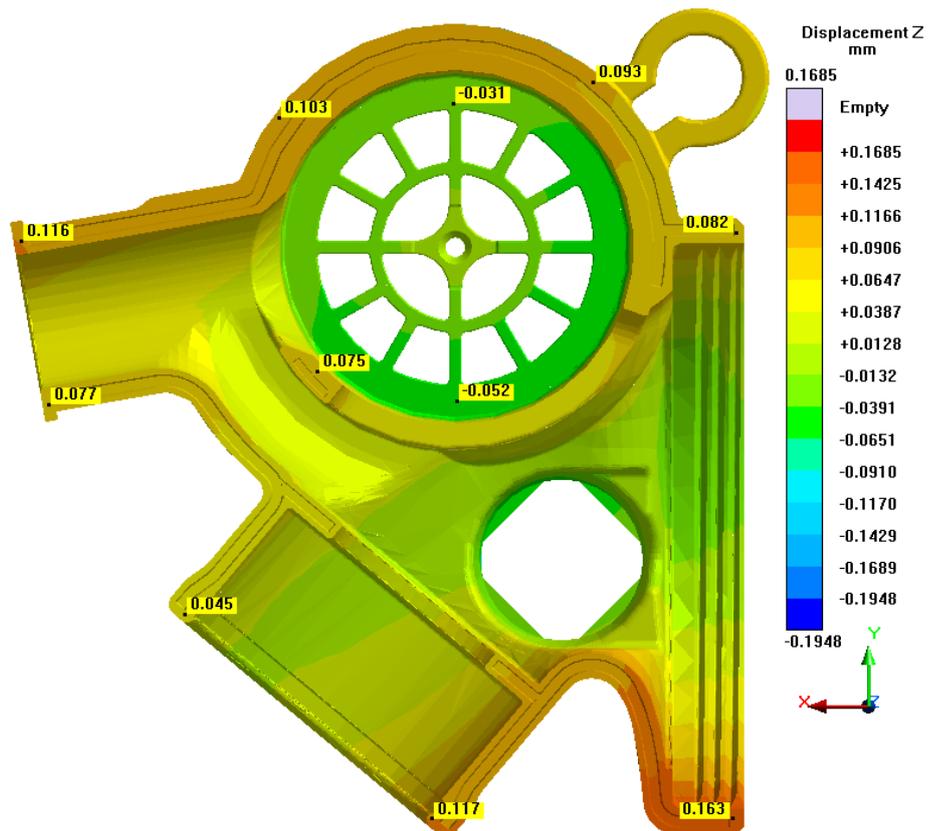
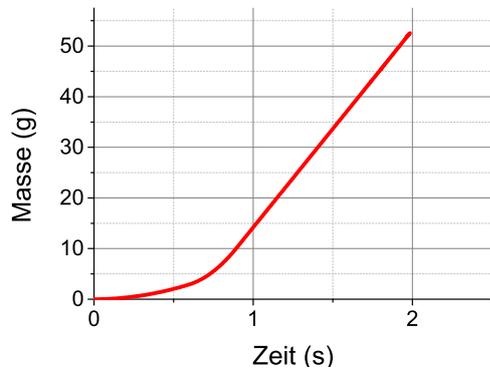
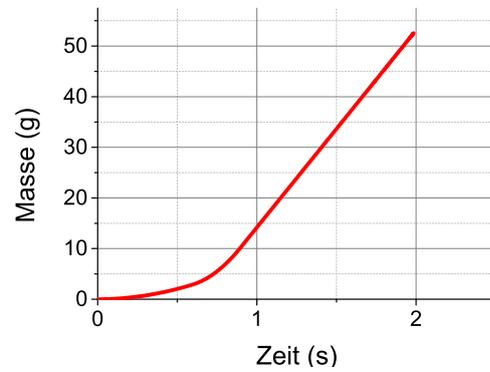


Abbildung A.22: Gehäusehälfte A: Verschiebung in Z-Richtung.

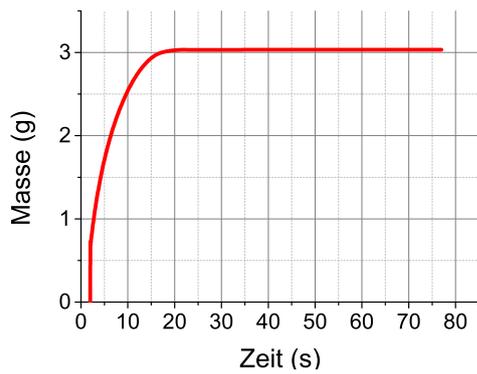
## Gehäusehälfte B



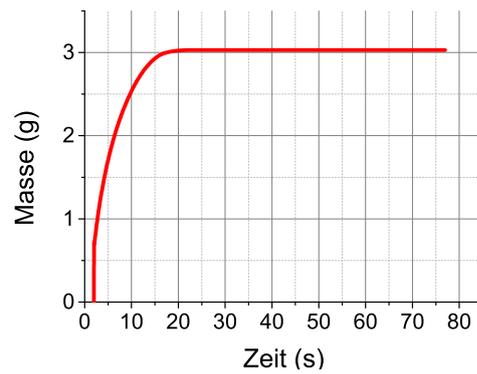
(a) Stahlwerkzeug



(b) Aluminiumwerkzeug

**Abbildung A.23:** Gehäusehälfte B: Eingespritzte Masse

(a) Stahlwerkzeug



(b) Aluminiumwerkzeug

**Abbildung A.24:** Gehäusehälfte B: Nachgedrückte Masse

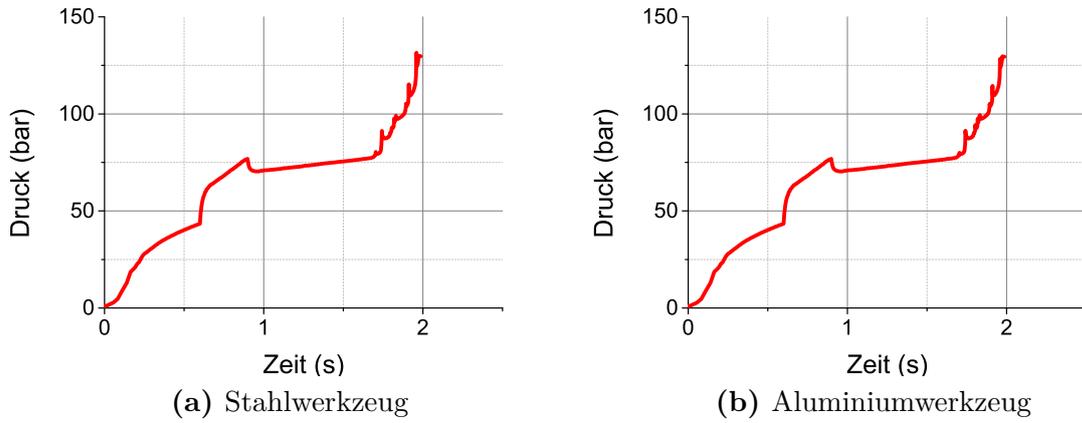


Abbildung A.25: Gehäusehälfte B: Einspritzdruck

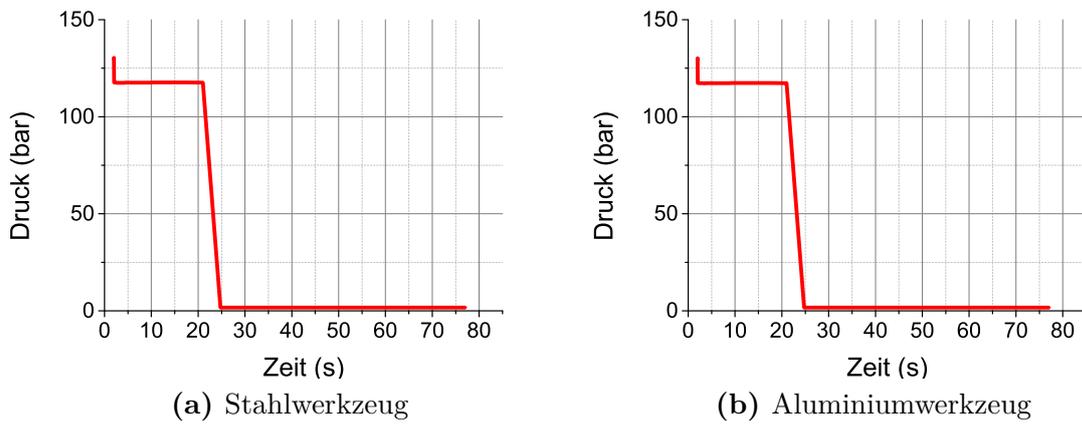


Abbildung A.26: Gehäusehälfte B: Nachdruck

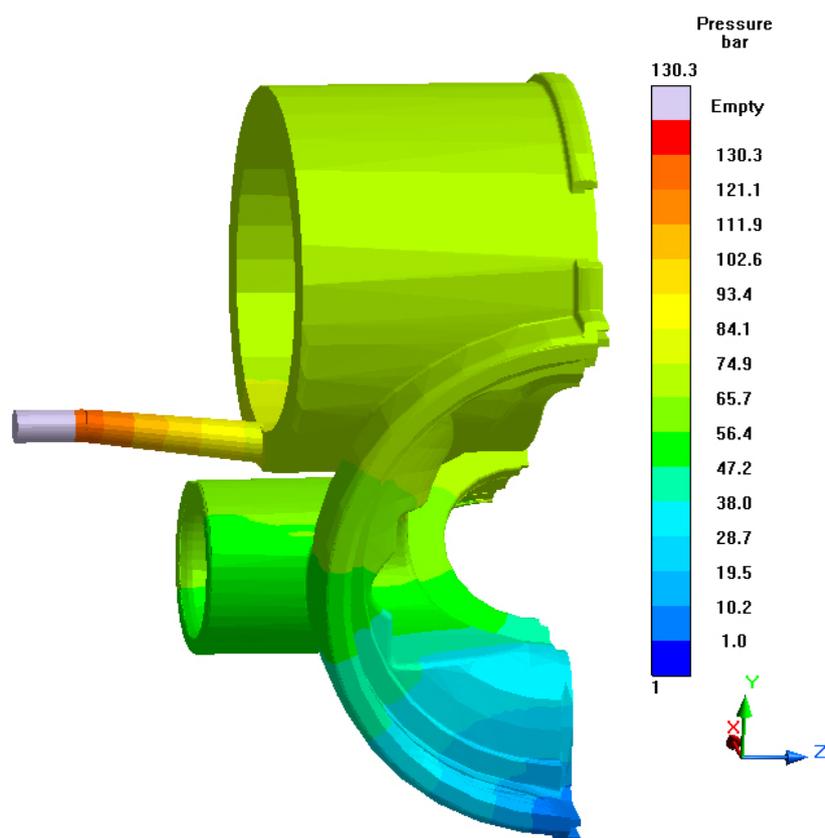


Abbildung A.27: Gehäusehälfte B: Druckverbrauch am Ende der Formfüllung.

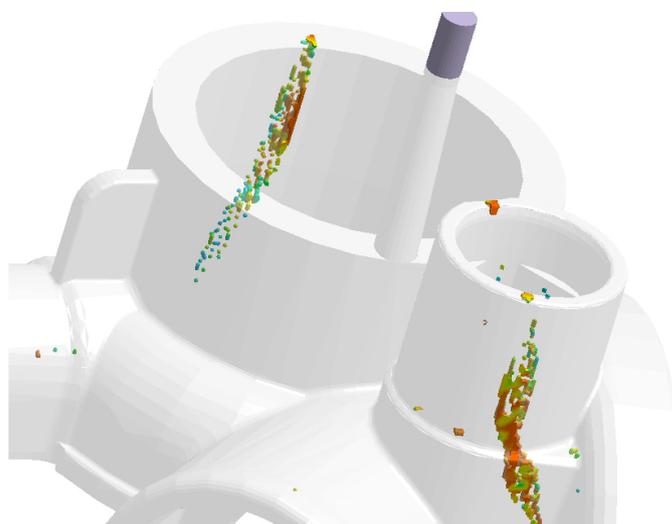


Abbildung A.28: Gehäusehälfte B: Bindenähte.

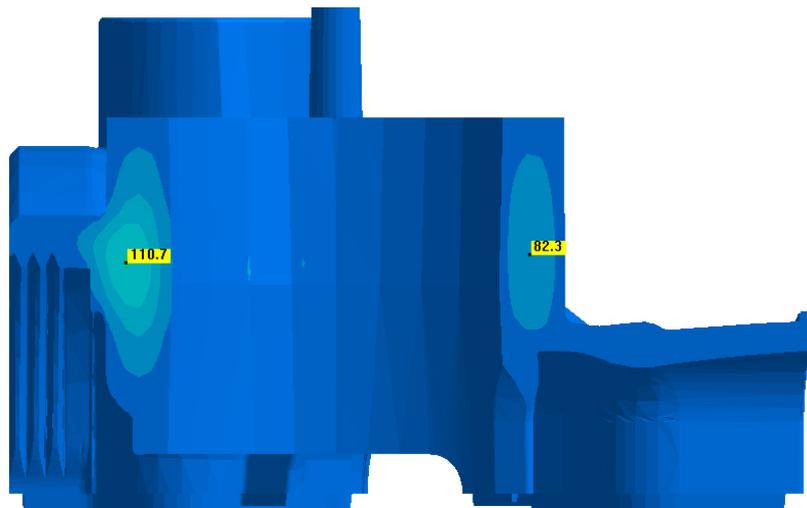


Abbildung A.29: Gehäusehälfte B: Temperatur im Inneren bei Entformung.

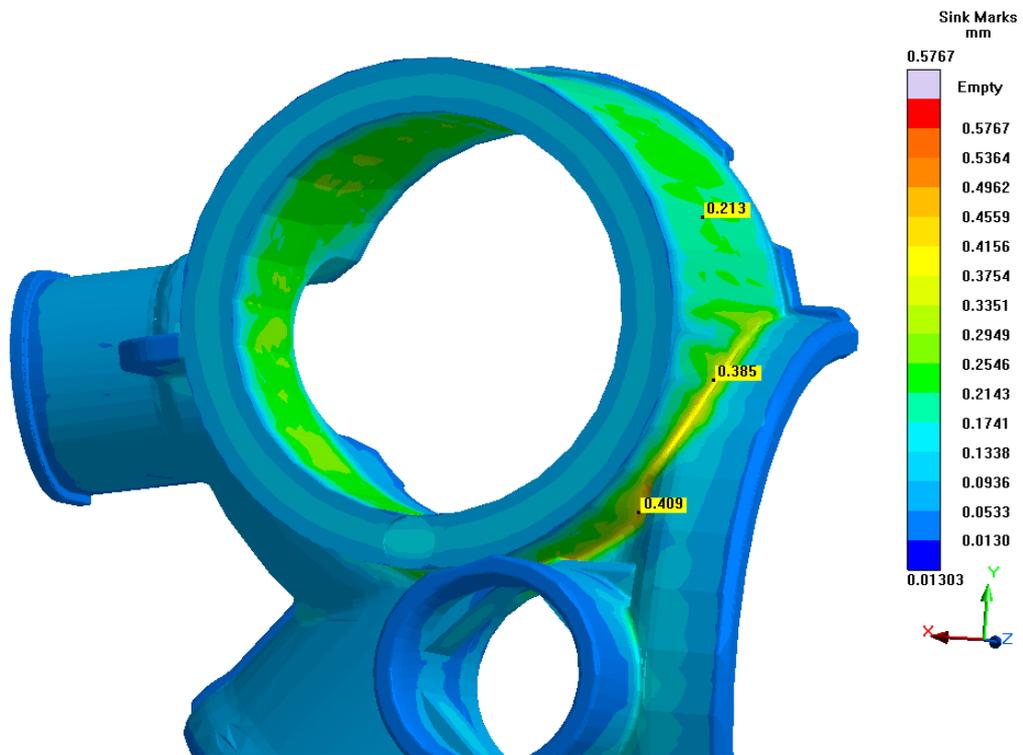


Abbildung A.30: Gehäusehälfte B: Einfallstellen.

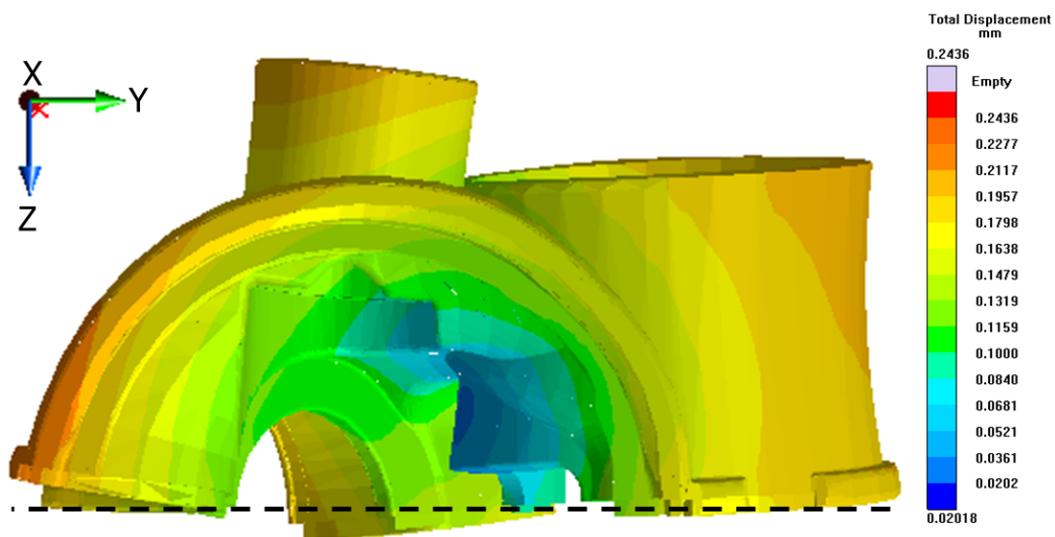


Abbildung A.31: Gehäusehälfte B: Verschiebung in Z-Richtung (50-fache Skalierung).

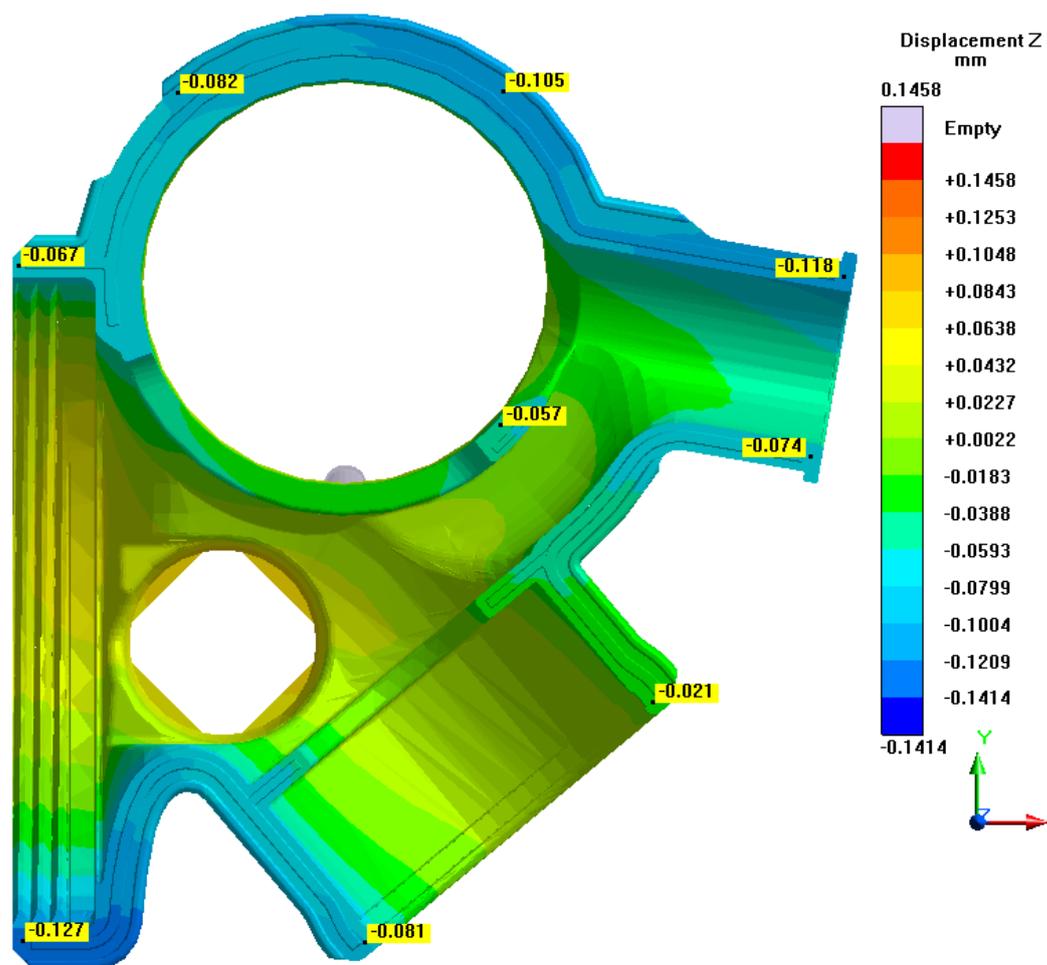
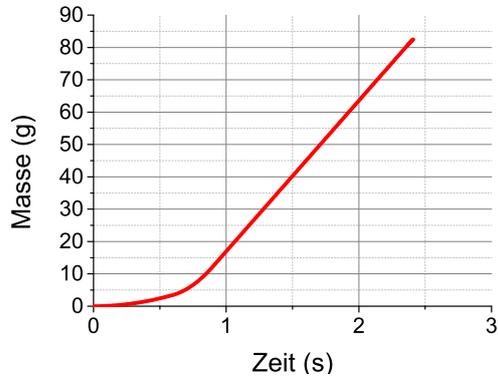
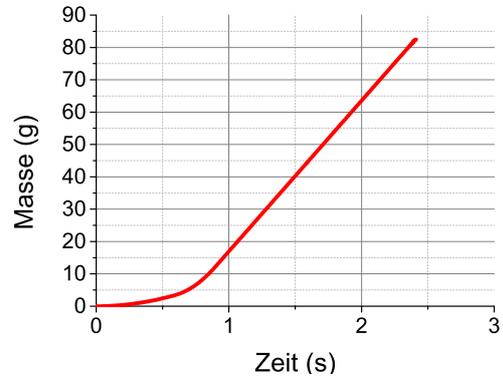


Abbildung A.32: Gehäusehälfte B: Verschiebung in Z-Richtung.

Walze

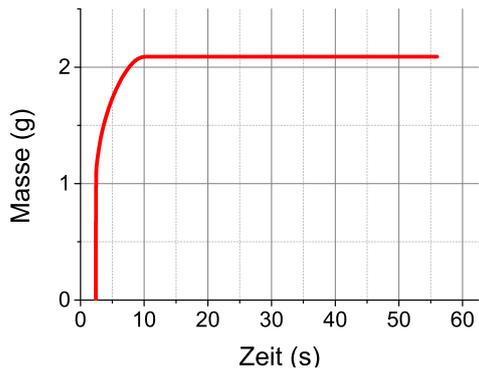


(a) Stahlwerkzeug

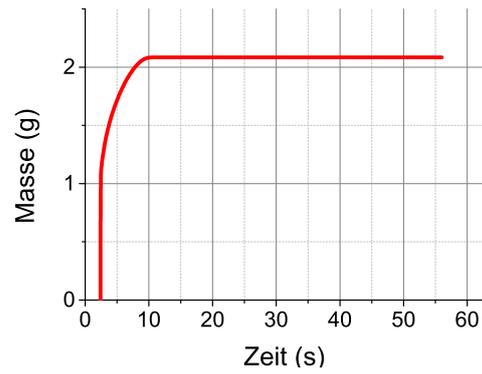


(b) Aluminiumwerkzeug

Abbildung A.33: Walze: Eingespritzte Masse



(a) Stahlwerkzeug



(b) Aluminiumwerkzeug

Abbildung A.34: Walze: Nachgedrückte Masse

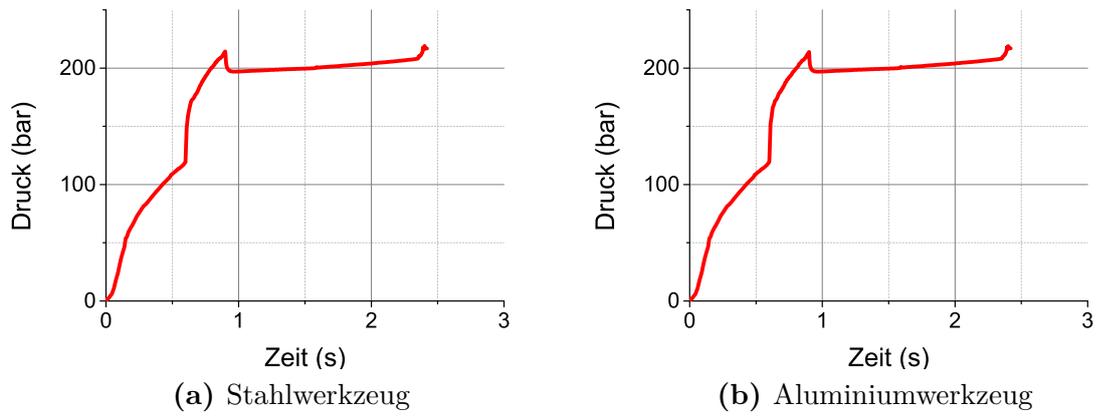


Abbildung A.35: Walze: Einspritzdruck

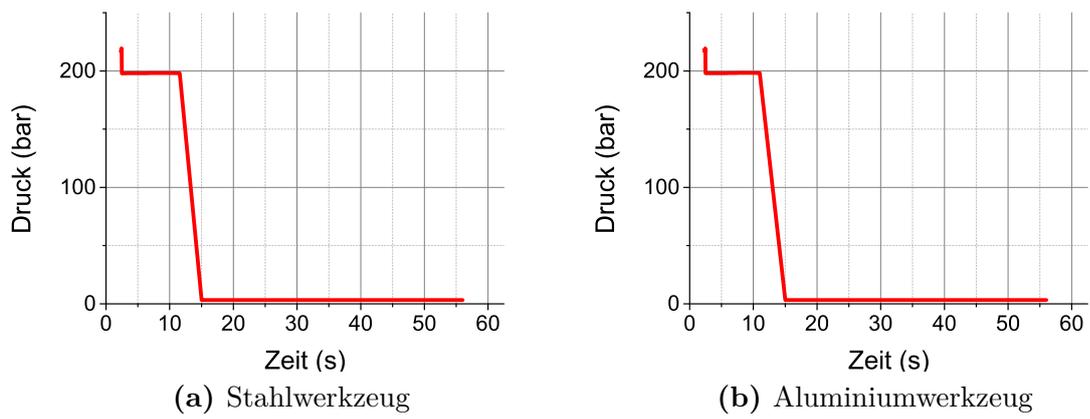


Abbildung A.36: Walze: Nachdruck

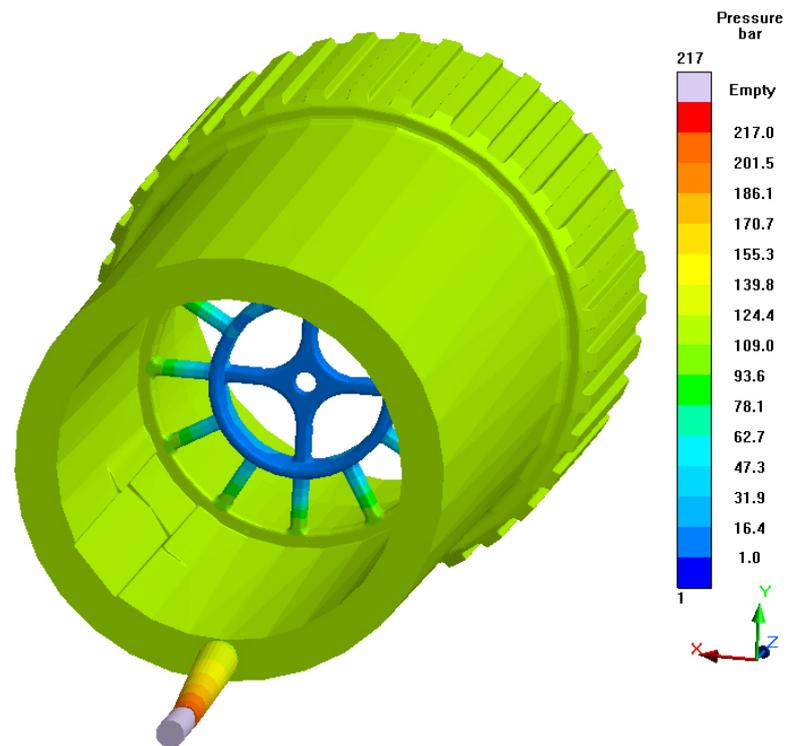


Abbildung A.37: Walze: Druckverbrauch am Ende der Formfüllung.

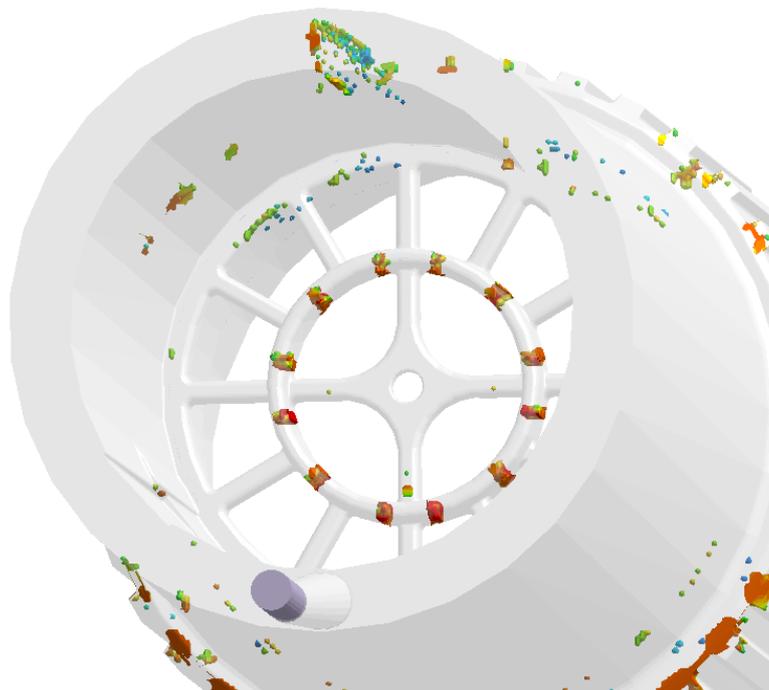


Abbildung A.38: Walze: Bindenähte.

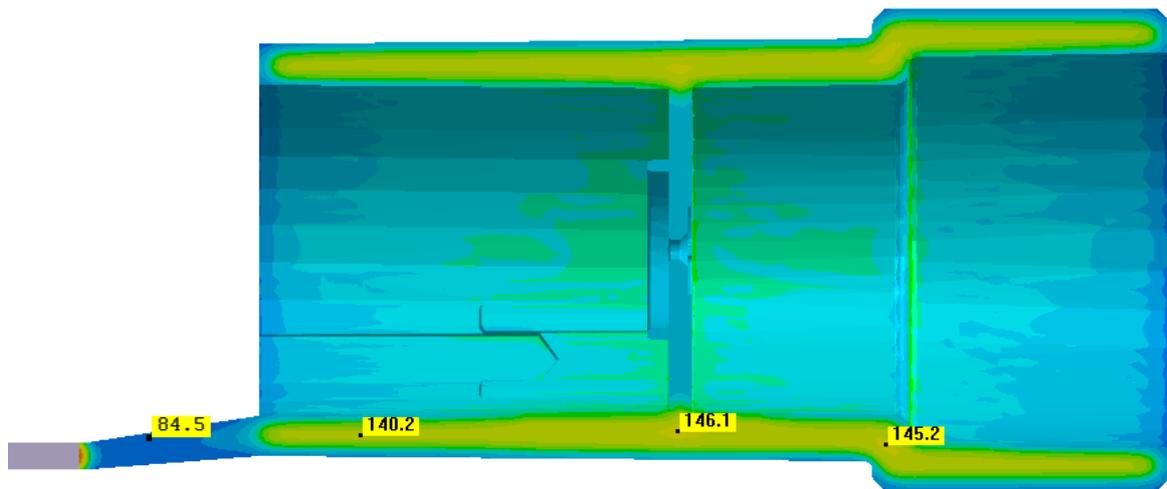


Abbildung A.39: Walze: Temperatur im Inneren bei Entformung.

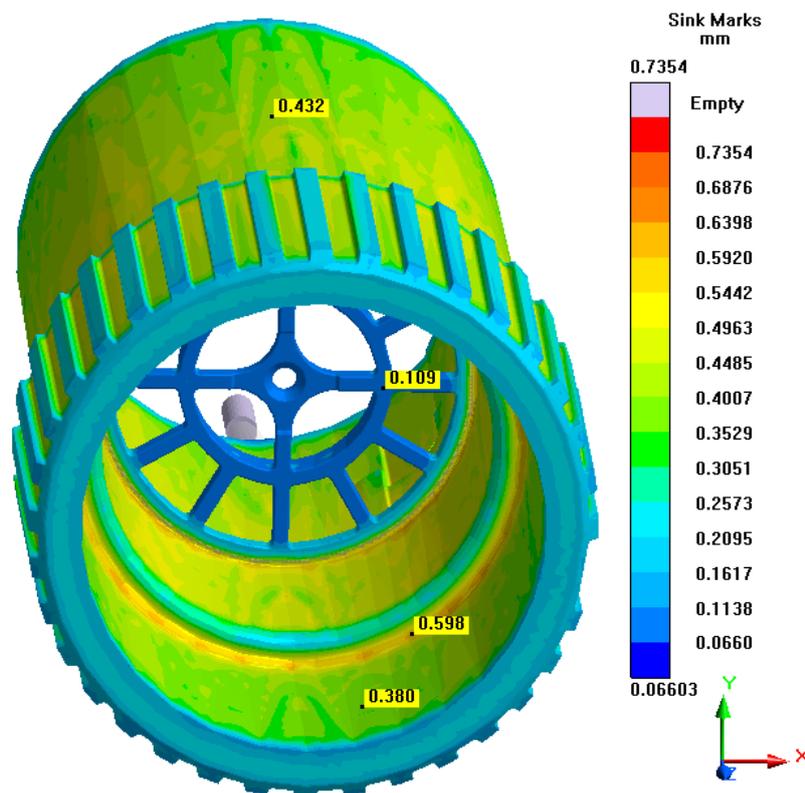


Abbildung A.40: Walze: Einfallstellen.

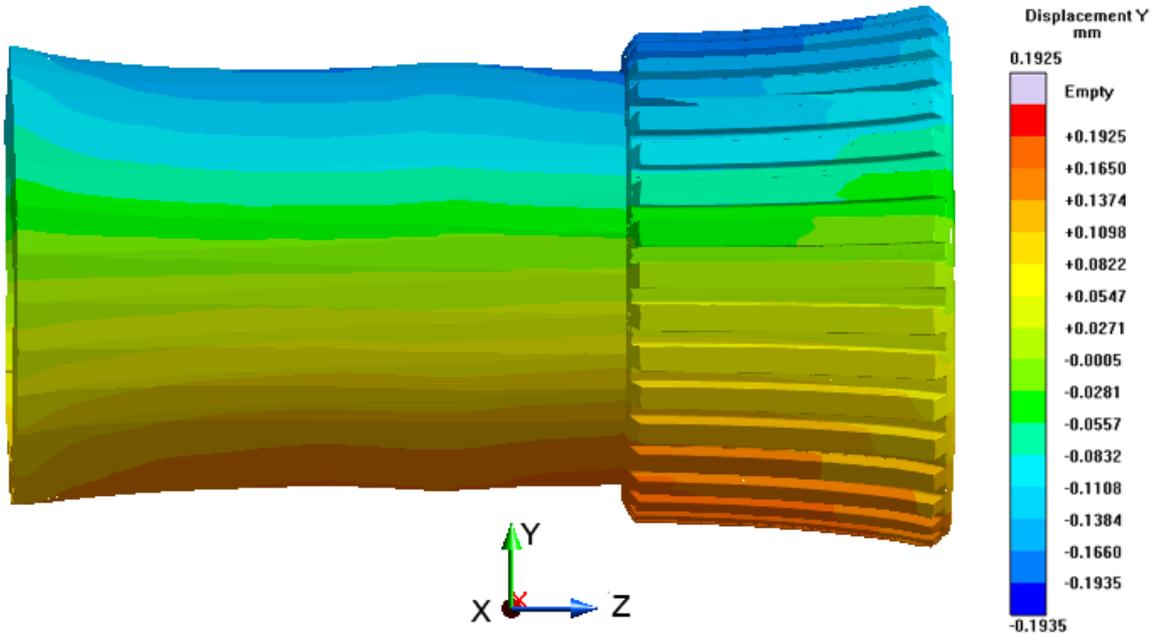


Abbildung A.41: Walze: Verschiebung in Y-Richtung (50-fache Skalierung).

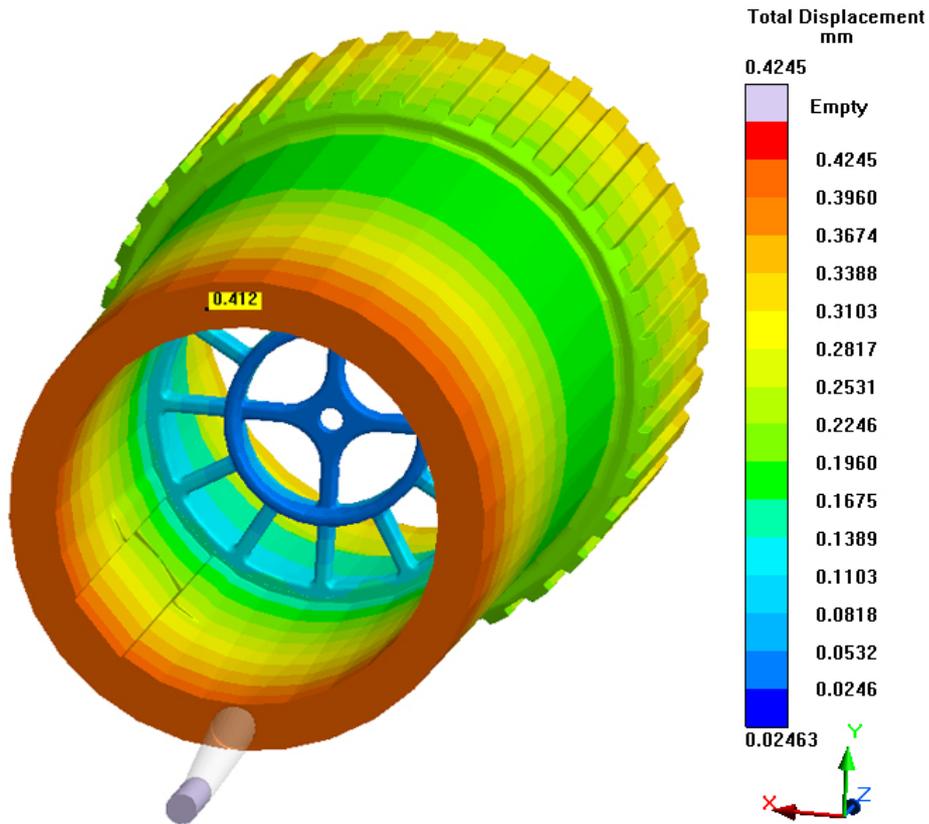
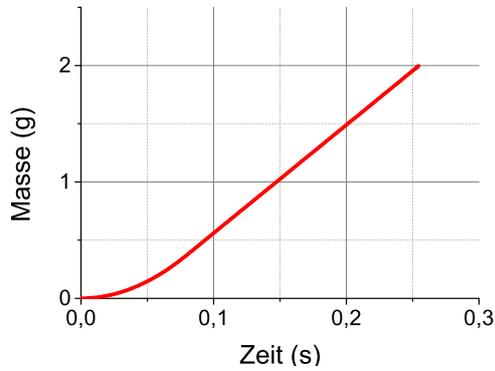
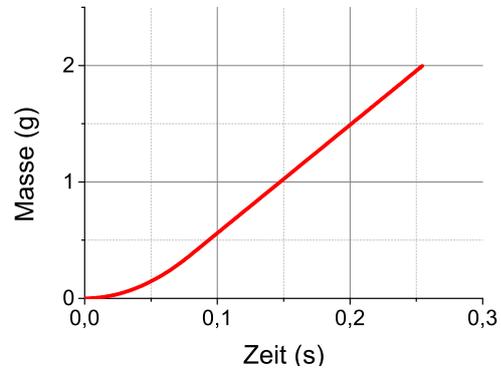


Abbildung A.42: Walze: Totale Verschiebung (50-fache Skalierung).

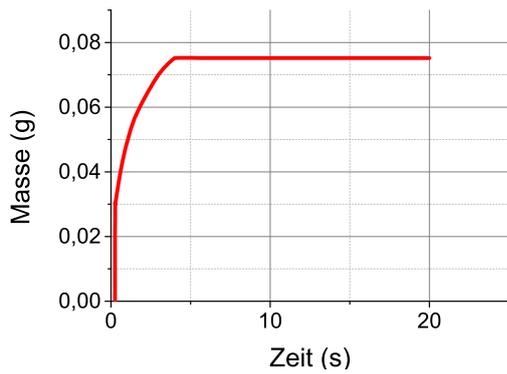
## BOV-Verschussplatte



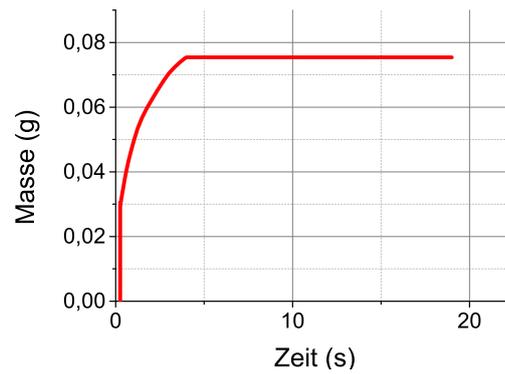
(a) Stahlwerkzeug



(b) Aluminiumwerkzeug

**Abbildung A.43:** BOV-Verschussplatte: Eingespritzte Masse

(a) Stahlwerkzeug



(b) Aluminiumwerkzeug

**Abbildung A.44:** BOV-Verschussplatte: Nachgedrückte Masse

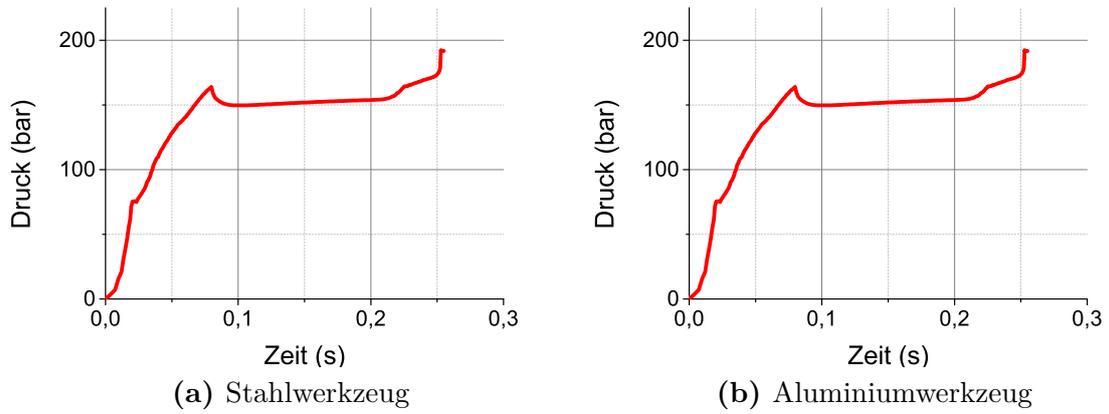


Abbildung A.45: BOV-Verschlußplatte: Einspritzdruck

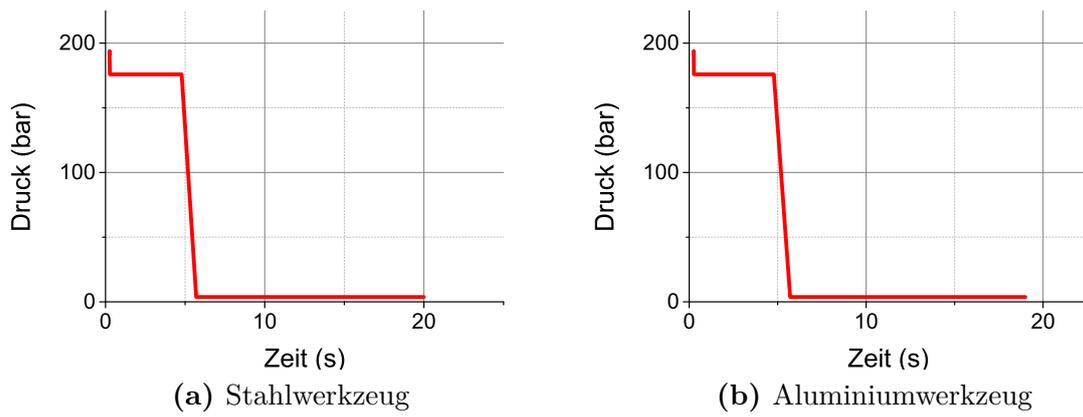


Abbildung A.46: BOV-Verschlußplatte: Nachdruck

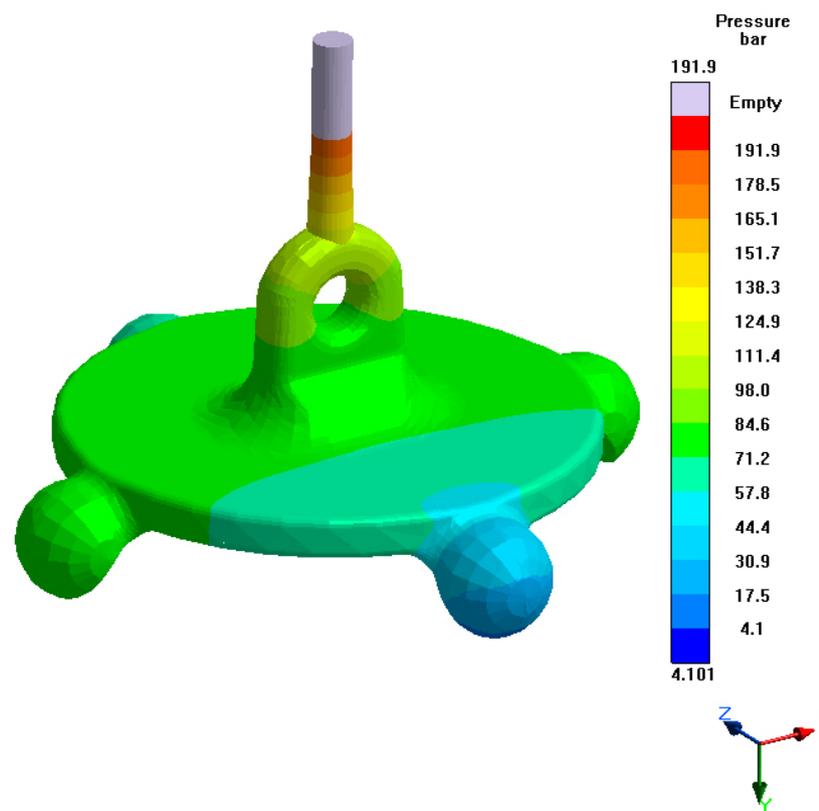


Abbildung A.47: BOV-Verschlussplatte: Druckverbrauch am Ende der Formfüllung.

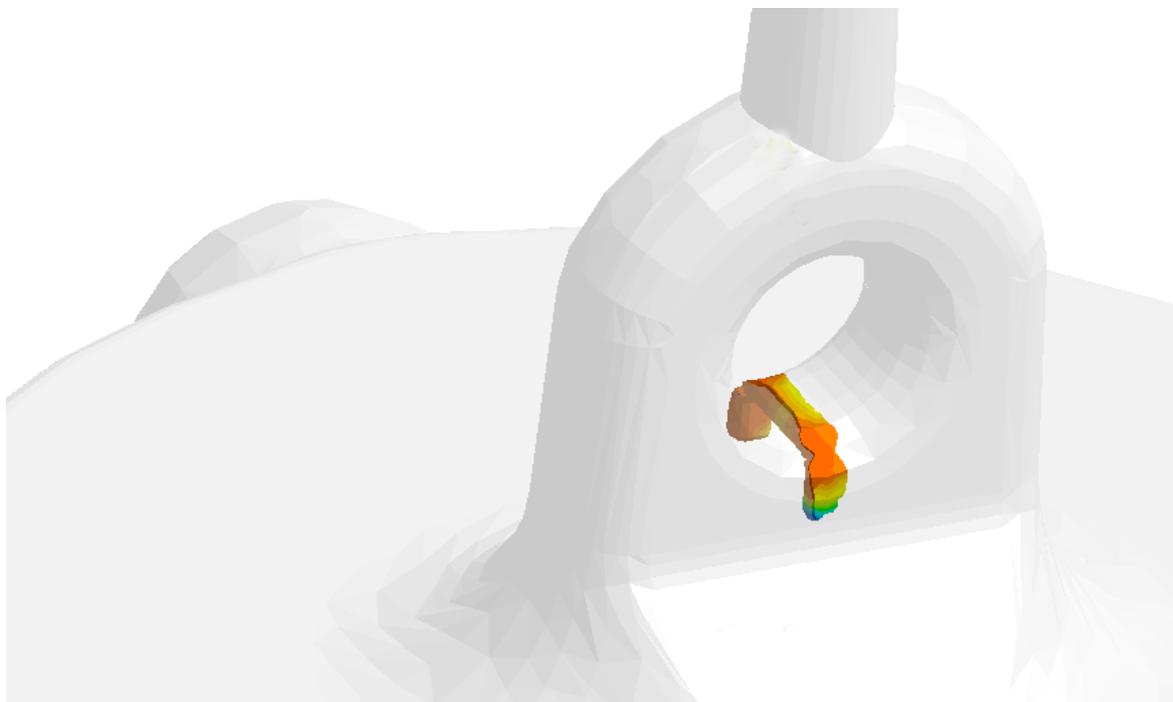


Abbildung A.48: BOV-Verschlussplatte: Bindenähte.

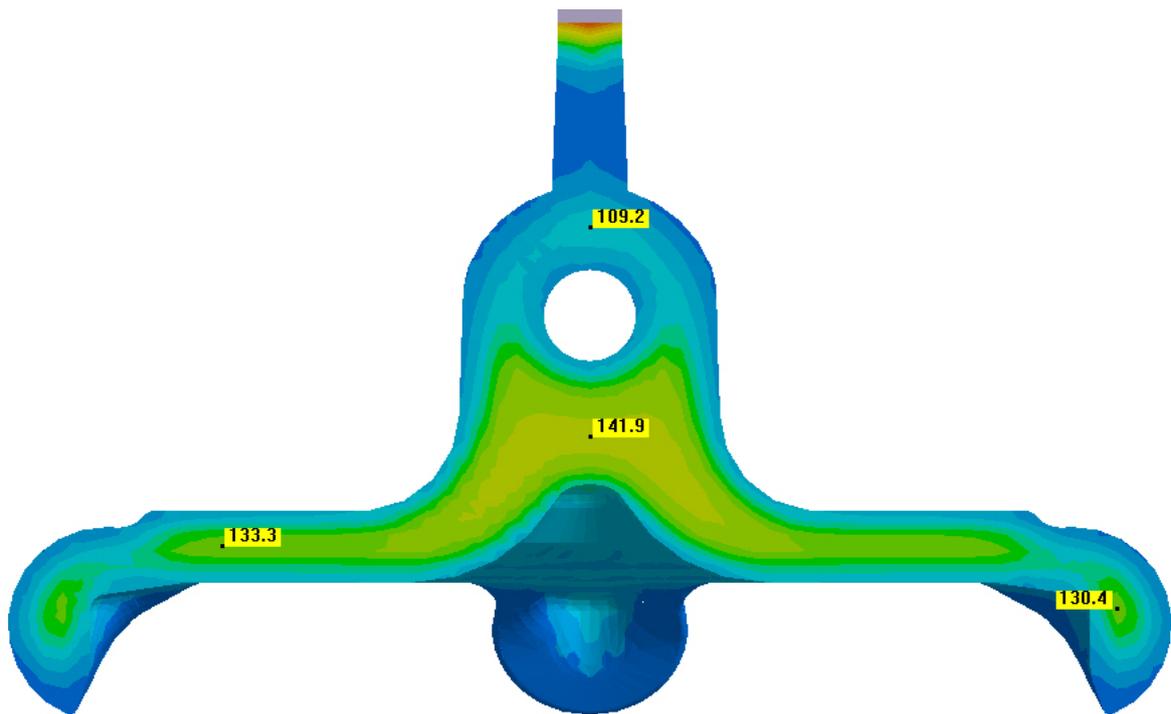


Abbildung A.49: BOV-Verschussplatte: Temperatur im Inneren bei Entformung.

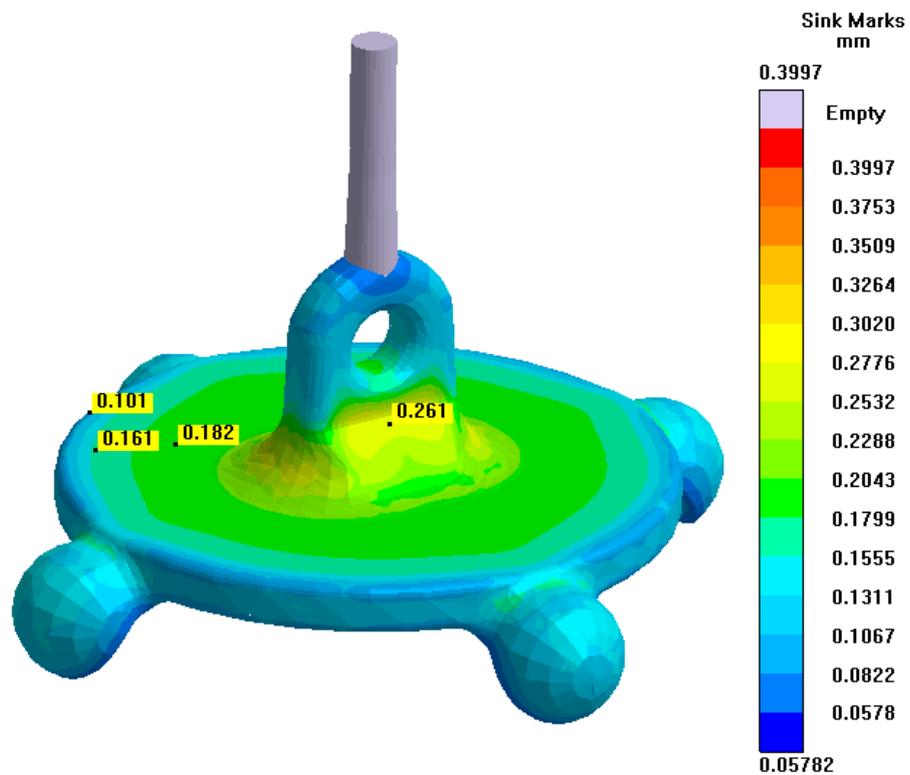


Abbildung A.50: BOV-Verschussplatte: Einfallstellen.

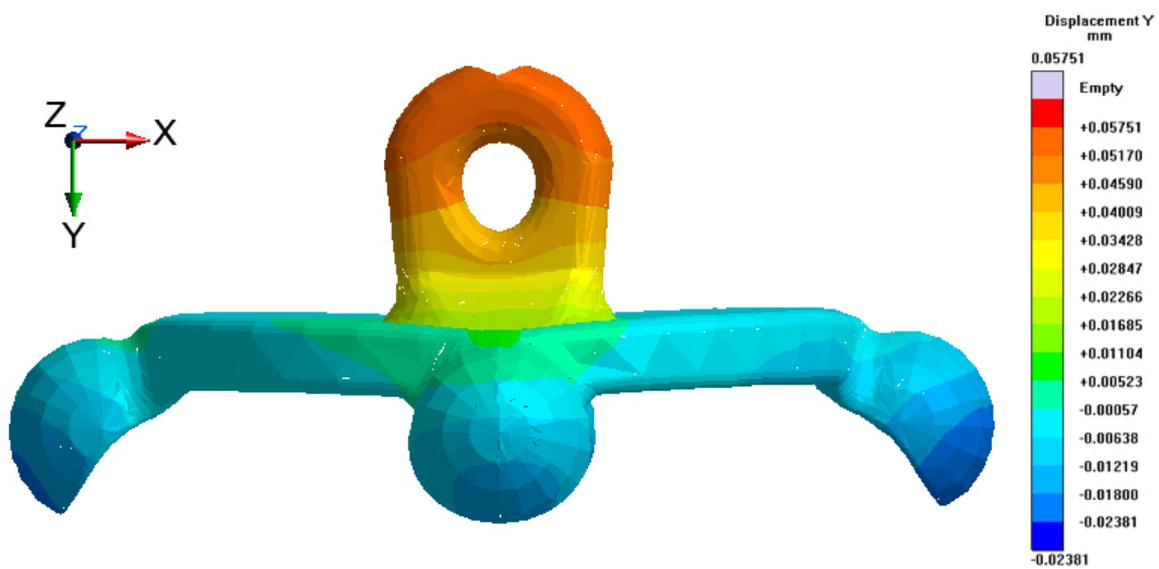


Abbildung A.51: BOV-Verschussplatte: Verschiebung in Y-Richtung (50-fache Skalierung).

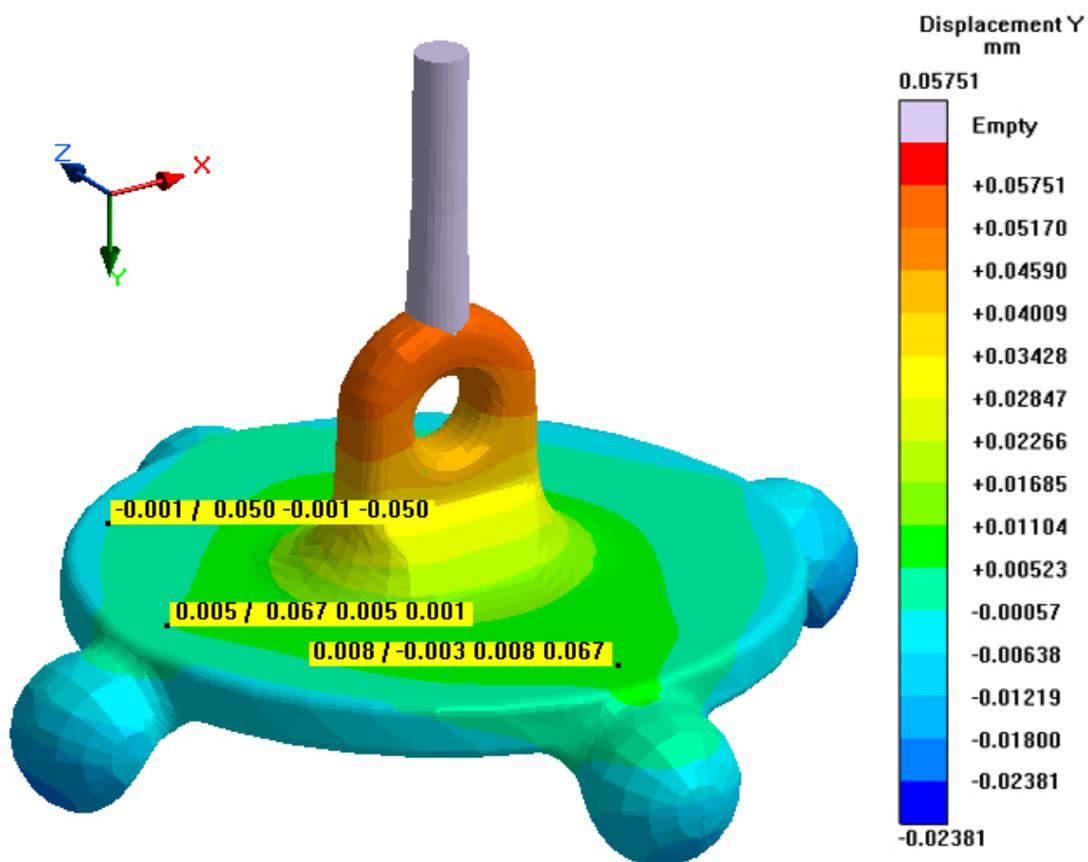


Abbildung A.52: BOV-Verschussplatte: Verschiebung in Y-Richtung.