

Entwicklung und konstruktive Umsetzung serientauglicher Werkzeuglösungen für die In-situ-Polymerisation von Caprolactam zur Herstellung faserverstärkter Thermoplastbauteile

eingereichte

Masterarbeit

**am Lehrstuhl für Spritzgießen von Kunststoffen
Montanuniversität Leoben**

von

Gerald Schöfer BSc

unter Mithilfe der
Schöfer GmbH



Betreuung: Ass.Prof. Dr. Gerald R. Berger
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Walter Friesenbichler

Begutachtung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Walter Friesenbichler
Ass.Prof. Dr. Gerald R. Berger

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 un-erlaubten Hilfsmittel bedient habe.

09. November 2016

Gerald Schöfer BSc
Matrikelnummer: 9935254

Kurzfassung

Die In-situ-Polymerisation von Caprolactam im Spritzgusswerkzeug hat das Potential, großserientauglich die Herstellung von gewebeverstärkten Leichtbauteilen mit komplexen Geometrien zu ermöglichen. Hierbei werden die Gewebestrukturen aus Glasfaser, Carbonfaser oder ähnlichem mit niedrigviskosem Caprolactam in Verbindung mit Aktivatoren und Katalysatoren sowie Additiven infiltriert, welche anschließend direkt im Werkzeug zu PA6 polymerisieren. Bedingt durch die resultierende thermoplastische Matrix können im Anschluss an die Polymerisation sowohl die aus der Thermoplastverarbeitung bekannten Verform- und Schweißvorgänge, als auch Spritzguss ohne weitere Vorbehandlung angeschlossen werden. Zudem ermöglicht die thermoplastische Matrix ein Werkstoffrecycling.

Bedingt durch die äußerst geringe Viskosität des Caprolactams und der erforderlichen Additive sind die im herkömmlichen Spritzguss üblichen Ausführungsdetails zur Werkzeuggestaltung nicht ausreichend. Die aus der ebenfalls bekannten Duroplastverarbeitung (RIM—Reaction Injection Moulding, RTM—Resin Transfer Moulding) bekannten Lösungen sind zwar grundsätzlich technisch geeignet, entsprechen aber vor allem hinsichtlich möglicher Prozesszeiten und Automatisierungsgrade nicht den Ansprüchen der Großserienfertigung.

Ziel der Masterarbeit war es, serientaugliche Werkzeugkomponenten auszulegen, zu optimieren und auf ihre Serientauglichkeit zu verifizieren. Spezielles Augenmerk lag dabei auf der werkzeugintegrierten Mischeinheit, der Werkzeugabdichtung in der Trennebene, der Ausführung beweglicher Elemente im Werkzeug, sowie geeigneter Temperiersysteme zur Gewährleistung gleichmäßiger Polymerisation bei gleichzeitig ausreichender thermischer Trennung zum Materialförderbereich. Ferner wurden prozessübergreifende Aspekte für einen serientauglichen und wirtschaftlichen Prozess im Zuge eines Messeprojektes für die K2016 in Düsseldorf untersucht.

Abstract

In-situ-polymerization of caprolactam inside an injection mould has the potential to enable production of complex fibre-reinforced plastic lightweight components in high quantities. Glassfibre, carbonfibre or other fibre structures are wetted with very low viscous caprolactam combined with activator, catalyst and additives, a mixture which starts polymerization immediately inside the heated mould.

Due to the resulting thermoplastic polyamide, it is possible to add succeeding process steps, such as thermoforming, welding, or injection moulding. Furthermore, the thermoplastic matrix is recyclable.

Unfortunately, common injection mould design is insufficient due to the very low viscosity of Caprolactam and its additives. Solutions known from thermoset processing (RIM-reaction injection moulding or RTM-resin transfer moulding) seem to be suitable from a technical point of view, however those do not meet the expectations for cycle time and feasibility of fully-automatic processes for serial production of large volumes.

The scope of this master thesis has been to design, modify and verify mould components which fully meet serial production demands. Therefore, details for mixing heads, sealing of the split line and other moving elements as well as options for thermal control of the mould have been addressed. Finally, a complete process for serial production has been established and shown during the K2016 show in Düsseldorf, Germany.

Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. W. Friesenbichler, Leiter des Lehrstuhls für Spritzgießen von Kunststoffen, für die jahrelange wissenschaftliche und persönliche Begleitung meines Studiums und der Übernahme der Beurteilung dieser Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerald R. Berger für die fachliche Unterstützung zur Durchführung dieser Arbeit und die kritische Durchsicht. Aber auch für die jahrelange Motivation und Unterstützung, mein Studium zu Ende zu führen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Lorenz Reith für die äußerst kompetenten und lehrreichen Hinweise bezüglich der Anlagen- und Materialaspekte und die kritische Diskussion der Werkzeugentwicklung aus Sicht des Anlagenherstellers und Prozessingenieurs.

Weiteres gilt mein Dank Gerhard Speneder und Ing. Stefan Aistleitner für die kollegiale Unterstützung und die konstruktiven Detailarbeiten, welche wesentlich für die erfolgreiche Projektumsetzung waren.

Ohne Beteiligung der Unternehmen Schöfer GmbH, Engel Austria GmbH, Lanxess Deutschland GmbH, Günther Heißkanaltechnik GmbH und formquadrat GmbH sowie dem Institut für Polymer-Spritzgießtechnik und Prozessautomatisierung an der Johannes Kepler Universität wäre die erfolgreiche Umsetzung des K2016 Messeprojektes, welches die Grundlage für meine Masterarbeit darstellte, nicht möglich gewesen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht, aber auch im Unternehmen alle Zeit das Vertrauen zur Mitgestaltung gegeben haben. Ohne das Verständnis und die langjährige Unterstützung meiner Gattin Gabriele wäre ein Abschluss nicht mehr möglich geworden.

Im Speziellen möchte ich aber meine Arbeit meinen über alles geliebten Söhnen Florian, Simon und Alexander widmen, die sicherlich oftmals durch die auch mit meinem Studium verbundene Mehrfachbelastung nicht die Zeit von mir erhalten haben, die sie sich als Kinder von ihrem Vater erwarten hätten dürfen.

Pabneukirchen am 09. November 2016

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	8
2. STAND DER TECHNIK	14
2.1. Materialeigenschaften und Prozessanforderungen	14
2.2. Anlagentechnik zur Plastifizierung	18
2.2.1. Schneckenplastifizierung	18
2.2.2. Behälterplastifizierung	19
2.3. Werkzeugtechnik.....	21
2.4. Mischsysteme	25
3. UMSETZUNG	29
3.1. Werkzeugintegriertes Mischsystem.....	29
3.1.1. Ausgangssituation	29
3.1.2. Konzept	32
3.1.3. Spezifikationen der Rahmenbedingungen	33
3.1.4. Potentielle Düsensysteme	33
3.1.5. Modifizierte Ausführung des Nadelverschlussystem	37
3.1.6. Geometrieentwurf	39
3.1.7. Simulation des Mischvorganges	42
3.1.8. Umsetzung im Plattenwerkzeug.....	49
3.1.9. Prozessversuche mit dem Plattenwerkzeug und Auswertung	55
3.1.9.1. Systematischer Dichtheitstest	55
3.1.9.2. Ansprechverhalten der Düsenansteuerung.....	56
3.1.9.3. Ermittlung der Austragsleistung vs. Massedruck.....	56
3.1.9.4. Druckvariation durch Reduktion des Düsenhubes.....	57
3.1.10. Aus dem Plattenwerkzeug abgeleitetes Optimierungspotential.....	59
3.1.11. Richtlinien für eine Serienumsetzung	59
3.1.12. Patentausarbeitung	60
3.1.13. Umsetzung im Messewerkzeug für die K2016 in Düsseldorf.....	60
3.1.14. Verifizierung.....	62
3.2. Ausführung der Werkzeugabdichtung in der Trennebene	64
3.2.1. Ausgangssituation	64
3.2.2. Lösungskonzept	68
3.2.3. Werkstofftests	69
3.2.3.1. Extraktionstest	70
3.2.3.2. Reaktivtest	70
3.2.3.3. Auswertung	70
3.2.4. Geometrieauslegung der Dichtebene und Ausführung der Einbausituation.....	73
3.2.5. Richtlinien für die Serienumsetzung	76
3.2.6. Umsetzung im Messewerkzeug	77

3.2.7.	Verifizierung durch Spritzversuche	79
3.3.	Ausführung Caprolactam berührender beweglicher Werkzeugelemente	80
3.3.1.	Ausgangssituation	80
3.3.2.	Lösungskonzept	82
3.3.2.1.	Murseal® Aufsatzkopf auf zylindrischen Metallauswerfer	83
3.3.2.2.	Kunststoff-Pulverbeschichtung zylindrischer Metallauswerfer	83
3.3.3.	Materialtests	84
3.3.4.	Richtlinien für die Dichtung beweglicher Werkzeugelemente	84
3.3.5.	Umsetzung im Messewerkzeug für die K2016 in Düsseldorf.....	85
3.3.6.	Verifizierung durch Spritzversuche.....	85
3.4.	Ausführung der Temperierung.....	86
3.4.1.	Ausgangssituation	86
3.4.2.	Umsetzung im Messewerkzeug	86
3.5.	Begleitende Themen der Messeprojektumsetzung	88
3.5.1.	Bauteilgestaltung.....	88
3.5.2.	Designphase	90
3.5.3.	Werkzeugkonstruktionsphase	100
3.5.4.	Fertigungstechnische Umsetzung und Abstimmung.....	103
3.5.5.	Erste werkzeugfallende Bauteile	105
3.5.6.	Erste Bauteilfestigkeitstests.....	106
4.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	107
5.	LITERATURVERZEICHNIS.....	109
6.	ANHANG.....	111
6.1.	Begriffe und Abkürzungen.....	111
6.2.	Industrie- und Forschungspartner	111
6.3.	Zeitplan des Entwicklungsprojektes.....	112
6.4.	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	113

1. Einleitung und Zielsetzung

Nachhaltiger weltweiter Wohlstand wird zukünftig nur möglich sein, wenn trotz steigender Weltbevölkerung die begrenzt verfügbaren Ressourcen verantwortungsvoll und somit effizienter als bisher eingesetzt werden.

Das Beispiel der Mobilität zeigt, dass neben der Entwicklung sparsamer Antriebssysteme die Reduktion der bewegten Massen bei gleichzeitigem Erhalt von Sicherheit und Komfort ein wesentlicher Schlüssel ist. Konsequenter Leichtbau wird somit wichtiger denn je, um dies trotz steigender Ansprüche und Komplexität zu ermöglichen. Schon heute weist der Markt für hochfeste kohlefaserverstärkte Kunststoffe mit 17 % p.a. ein solides Wachstum auf [1].

Bisher waren vor allem Weltraum- und Luftfahrt, sowie Hochleistungs- und Motorsport Wachstumstreiber. Aber auch in den Bereichen Windenergie und Maschinenbau ist neben der Automobilbranche unter bestimmten Voraussetzungen noch mit merklich steigendem Bedarf zu rechnen.

Die bisher üblichen Materialien und Fertigungstechnologien, wie etwa die Herstellung von zum Beispiel CFK-Strukturen mit Epoxidharz-Matrix oder Magnesiumdruckguss, sind trotz stetiger und merklicher Entwicklungen nach wie vor erheblich zu teuer oder auch wegen ihrer zum Teil geringen Produktivität nicht massentauglich. Somit ist für ein tatsächliches Marktwachstum die erhebliche Reduktion der Bauteilkosten sowie eine damit erforderliche Industrialisierung der Herstellprozesse verbunden. Vorausgesetzt entsprechender Prozessverbesserungen ist dies auch möglich. Angesichts des derzeit noch kleinen Marktes für Composite-Produkte setzen die meisten Hersteller auf eine Anpassung beziehungsweise Weiterentwicklung vorhandener Technologien und Produkte. Jedoch scheint der Aufbau neuer Prozessketten durch die Kombination der Maschinen- und der Prozesstechnik verschiedener Disziplinen, wie der Kunststofftechnik, der Textiltechnik und der Automatisierungstechnik in unternehmensübergreifenden Kooperationen vielversprechender [1].

Beispielhaft für eine erforderliche Neuausrichtung sei das für die Serienfertigung von Weißware, Elektrogeräte und Automobilkomponenten schon seit Jahrzehnten umfangreich genutzte Spritzgussverfahren von Thermoplasten erwähnt. Dieses weist einerseits zwar eine merklich bessere Produktivität und Automatisierbarkeit als die bisher teilautomatisierten RTM- und Formpressverfahren auf, jedoch ist das Verfahren andererseits bedingt durch die, den hohen Molmassen geschuldeten, hohen Schmelzeviskositäten nicht in der Lage, Fasergewebe-Strukturen ausreichend zu infiltrieren und somit einen ausreichenden Faser-Matrix-Verbund zu gewährleisten.

Die übliche Verarbeitung von kurz- aber auch von langfaserverstärkten Thermoplasten im Spritzgussverfahren ermöglicht faserlängenbedingt nur die Herstellung von Bauteilen mit sehr begrenzten Festigkeiten. Auch haben die Bauteilgeometrie, die Werkzeuggestaltung und die Prozessführung erheblichen Einfluss auf die Isotropie und somit auch auf die tatsächlich erzielbaren Werkstoff- und Bauteileigenschaften. Dies erschwert erheblich die Substitution bestehender Werkstofflösungen, da meist ein umfangreiches werkstoffgerechtes Bauteilredesign unvermeidbar ist.

Abbildung 1 zeigt einen auszugsweisen Überblick verschiedener am Markt verfügbarer Fertigungsverfahren in Bezug auf die möglichen Eigenschaften und die wirtschaftlichen Randbedingungen.

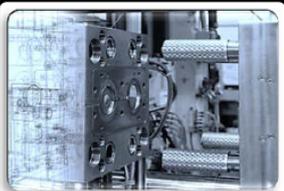
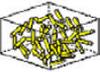
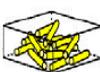
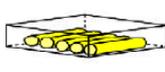
Fertigungsverfahren	 Spritzgießen	 Fließpressen Faserspritzen	 Flüssigimprägnier- verfahren
Charakteristische Eigenschaften	Kurzfasern	Langfasern	Endlosfasern
Faserorientierung	niedrig 	niedrig 	hoch 
Erreichbare Stückzahlen	> 200.000/a	< 150.000/a	< 20.000 /a
Mechanische Eigenschaften	niedrig	mittel	hoch

Abbildung 1: Vergleich verschiedener Verfahren zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffbauteile [2].

Die Flüssigimprägnierverfahren mit duromeren Matrixmaterialien eignen sich besonders zur Herstellung großflächiger endlosfaserverstärkter Bauteile, auch in komplexen dreidimensionalen Geometrien. Die derzeit verfügbaren Materialien, die Anlagen-, die Werkzeug- und die Prozesstechnik schließen aber mit heutigem Stand der Technik eine merkliche Produktivitätssteigerung und somit auch eine Kostensenkung aus. Auch die Tatsache, dass der Markt nach Baugruppen verlangt, welche neben der Versteifungsstruktur auch Befestigungslösungen beinhalten müssen, stellt für duroplastische Verbundbauteile, bedingt durch die geringe Auswahl spezieller und meist aufwendiger Fügeverfahren, eine große Herausforderung dar.

Alternative Entwicklungen, um Endlosfasern mit Thermoplasten zu verbinden, wie die Thermoplastpultrusion, die Pulverimprägnierung, das Verweben von Thermoplastfäden in Verstärkungsfasermatten, das Verpressen von Thermoplastfolien zwischen Verstärkungsfasermatten oder auch das Ce-Preg[®] Verfahren [3] ermöglichen, über Aufschmelzprozesse für den Faserverbund ausreichend Thermoplastmatrix als Alternative zu Duromeren zwischen Endlosfasern einzubringen. Dennoch bleibt sowohl die zu erzielende Oberflächenqualität als auch Benetzung der Fasern ohne zusätzliche Konsolidierung limitiert, da schmelzeviskositätsbedingt nur begrenzte Homogenität bei der Herstellung dieser Halbzeuge zu erzielen ist. Die somit hergestellten sogenannten „Organobleche“ sind auch, begründet durch die meist nachfolgend notwendigen Zwischenfertigungsschritte, wie zum Beispiel erneutes Vorwärmen des Halbzeuges und Thermoformen, energie- und somit kostenintensiv. Durch den, durch das Halbzeug vorgegebenen und in seiner Variantenvielfalt eingeschränkten Lageraufbau, ist die belastungs- und somit auch gewichtsoptimierte Bauteilgestaltung begrenzt.

Ebenfalls laufen Entwicklungen in Form von Organoblech- und Tapelege-Kombinationen [4]. Eine Verformung im Matrix-Faserverbund bleibt aber dennoch technisch als auch geometrisch limitiert und energieintensiv. Jedoch ist als wesentlicher Vorteil anzumerken, dass die thermoplastische Matrix eine Vielzahl effizienter und technisch ausgereifter Folgeprozesse und somit die Realisierung komplexer Baugruppen ermöglicht.

Abbildung 2 zeigt den mit der Herstellung von Strukturbauteilen mit Organoblechen üblicherweise verbundenen Prozess, wobei hier schon die in das Spritzgusswerkzeug integrierte anspruchsvolle Variante des Thermoformens dargestellt wird.

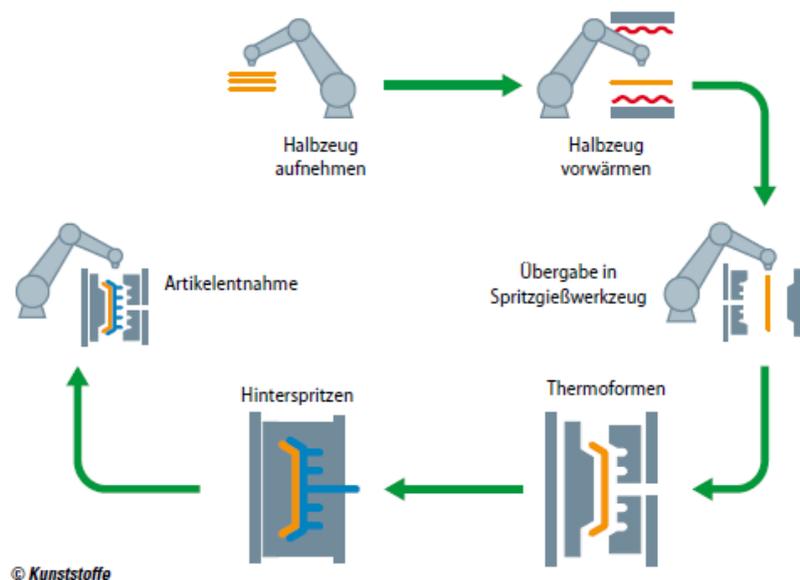


Abbildung 2: Die Herstellung von Bauteilen mit Organoblechen gliedert sich in sechs elementare Prozessschritte [5].

Eine Betrachtung, der bei der Verarbeitung äußerst geringen Viskositäten der Ausgangsmomere, der reaktiv herstellbaren Thermoplaste (Abbildung 3) legt nahe, analog der duroplastischen Reaktivtechnik die In-situ-Polymerisation von Thermoplasten, wie Polyamid 6, mittels anionischer Polymerisation von Caprolactam als Ausgangsmaterial zu nutzen. So wird es für die großserientaugliche Herstellung von endlosfaserverstärkten Hochleistungsfaserverbundkunststoffen möglich, die effiziente Thermoplastverarbeitung mit den bisher nur in der Duroplastverarbeitung erzielbaren Strukturfestigkeiten zu kombinieren. Darüber hinaus zeichnen sich Thermoplaste, im Vergleich zu Duroplasten, durch erhöhte Schlagzähigkeit und Elastizität aus. Auch der Aspekt des möglichen stofflichen Recyclings ist zu bedenken.

Umgekehrt dürfen aber auch werkstoffliche Nachteile der Thermoplaste, wie etwa höhere Kriechneigung, Hydrolyseempfindlichkeit oder beschränkte thermische und chemische Beständigkeit, nicht unberücksichtigt bleiben.

Das Verfahren würde sich ohne das Einlegen von Fasersystemen auch zur Herstellung von bisher nicht möglichen großflächigen und dennoch geometrisch komplexen thermoplastischen Dünnwandbauteilen eignen.

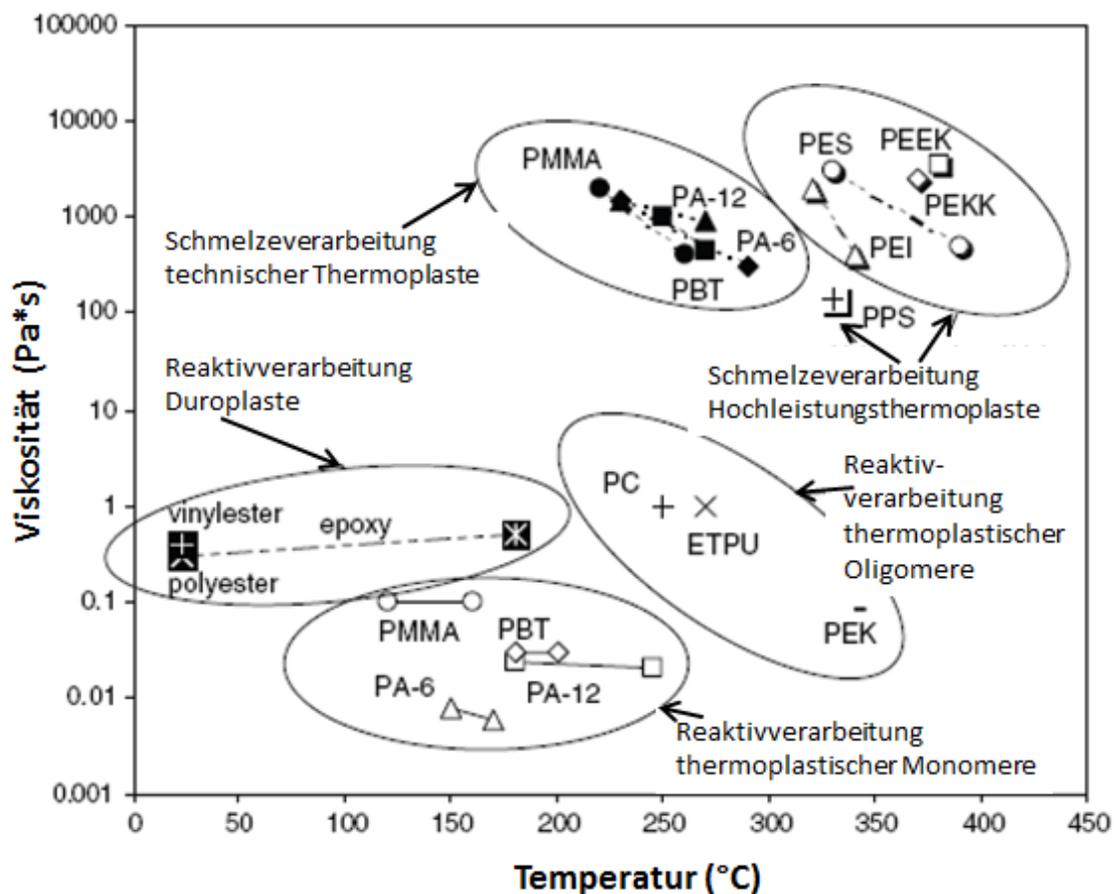


Abbildung 3: Vergleich der bei der jeweiligen Prozessführung möglichen Viskosität diverser Monomere, Oligomere und Polymere in Bezug auf die zur Verarbeitung erforderlichen Prozesstemperaturen [6].

Dokumentierte Vorteile des „thermoplastischen RTM-Verfahrens (T-RTM)“ sind [7], [8]:

- Eine geringe Viskosität ermöglicht hervorragende Infiltration und Benetzung auch sehr dichter Verstärkungsfaserstrukturen.
- Eine rasche Polymerisation und Kristallisation.
- Ein Prozessablauf bei geringen Temperaturen.
- Einen hohen Umsetzungsgrad.
- Geringere Zykluszeiten als bei der Duroplast-RIM-Technik.
- Thermoformbarkeit.
- Die Möglichkeit von Schweißungen.
- Die Möglichkeit von Materialrecycling.
- Die Bauteile können herkömmlichen Thermoplastspritzgussprozessen als Folgeprozess zugeführt werden.
- Es benötigt verglichen zur Spritzgusstechnik eine geringere Schließkraft, bedingt durch einen geringen Fülldruck.
- Ein geringer Energiebedarf.
- Kurze Zykluszeiten bei dickeren Bauteilen.
- Geringe Gesamtrohstoffkosten.

Führende Materialhersteller arbeiten angesichts dieses Potentials derzeit daran, dass die Ausgangsprodukte in modifizierter Form in ausreichender Menge und Variantenvielfalt in absehbarer Zeit zur Verfügung stehen. Da es sich hierbei im Wesentlichen um ähnliche Rohstoffe der Thermoplastgranulatherstellung handelt, sind für den wirtschaftlichen Erfolg des Gesamtprozesses erforderliche wettbewerbsfähige Rohstoffkosten möglich.

Parallel sind für eine großserientaugliche Umsetzung erforderliche Anlagenentwicklungen bei den Unternehmen Engel, Krauss Maffei und Hennecke in Publikationen [2], [7], [8], [9] veröffentlicht.

Die bisherigen Projektbeteiligungen der Firma Schöfer haben gezeigt, dass **beim In-situ-Polymerisieren von Monomeren zu Thermoplasten das Werkzeug nicht** wie bisher im herkömmlichen Thermoplast-Spritzguss **nur zur Bauteilabformung dient, sondern bedeutende Zusatzfunktionen** wie unter anderem das Mischen der Komponenten, das homogene Polymerisieren und das lagerichtige Fixieren der Gewebeverstärkung **unterstützen muss**.

Hierfür müssen in der Werkzeugtechnik noch folgende Themen detaillierter betrachtet werden:

1. Die Optimierung der Schnittstelle zwischen dem Mischsystem und dem formgebenden Werkzeug.
2. Die Sicherstellung der Dichtheit an der Werkzeugtrennung über mindestens mehrere tausend Zyklen.
3. Die Verfügbarkeit abgedichteter beweglicher Werkzeuelemente.
4. Die Optimierung des Temperiersystems für eine homogene Polymerisation.

Auf Basis vorangegangener Entwicklungsarbeiten wurde, von Engel und Schöfer gemeinsam, eine Vorentwicklung und im Folgenden für die K2016 in Düsseldorf, ein Messeprojekt, bestehend aus Anlage, Automatisierung und Werkzeugtechnik, zur Umsetzung freigegeben. Dabei sollten vorrangig Lösungen erarbeitet werden, welche die Serienreife der In-situ-Polymerisation von Caprolactam zur Herstellung endlosfaserverstärkter Strukturbauteile umfassend darzustellen vermögen, aber auch die Potentiale dieser Technologie aufzeigen.

Anhand einer Leichtbau-Schaufel soll gezeigt werden, dass das Bauteil durch die Kombination der In-situ-Technologie mit nachgeschaltetem Spritzguss über eine hervorragende Strukturfestigkeit verfügt und sowohl effizient als auch prozesssicher hergestellt werden kann.

Zielsetzungen der Masterarbeit waren daher:

- Mitwirkung an Entwurf, Simulation, Konstruktion und Test eines **werkzeugintegrierten Mischsystems**, an alternativen Werkzeugdichtlösungen für die Werkzeugtrennung als auch an beweglichen Elementen, sowie an Maßnahmen für den bedarfsgerechten Wärmehaushalt an Hand eines Testplatten-Werkzeugaufbaus.
- Mitwirkung am **Bauteildesign** des Messebauteils „Leichtbauschaufel“ hinsichtlich werkzeugrelevanter Details.
- Ausarbeitung eines **Werkzeugkonzepts** mit Schwerpunkt Integration des Mischsystem, sowie Elementen zur Abdichtung der Werkzeugtrennung als auch beweglicher Elemente unter Berücksichtigung verfügbarer Anlagen.
- Begleitung der **Konstruktion und Herstellung** des Messewerkzeugs.
- Begleitung der **Inbetriebnahme und Optimierung** des Messewerkzeugs in Abstimmung mit der Entwicklung der Anlagen- sowie Automatisierungstechnik als auch der Materialien.

2. Stand der Technik

2.1. Materialeigenschaften und Prozessanforderungen

Caprolactam, auch als ϵ -Caprolactam bezeichnet, welches als Ausgangsstoff verwendet wird, wird wie folgt beschrieben [10]:

- Aggregatzustand fest bei 1013 mbar und 20°C,
- Form: Schuppen,
- Farbe: weiß,
- brennbar,
- in Wasser leicht löslich und
- hygroskopisch.

Die anionische Polymerisation von Caprolactam ist seit 1940 bekannt [11] und zeichnet sich wie folgt aus:

- Ermöglicht hochmolekulares Polyamid 6.
- Die Umsetzungsreaktion erfolgt bei 130°C - 170°C.
- Der Reaktionumsatz erreicht innerhalb von 3 min – 60 min bis zu 99.3 %.
- Die Polymerisation und die Kristallisation erfolgen zeitgleich.
- Die Reaktion ist exotherm.

Die zu polymerisierende Mischung besteht aus Caprolactam, Katalysator und Aktivator (Abbildung 4 und Abbildung 5).

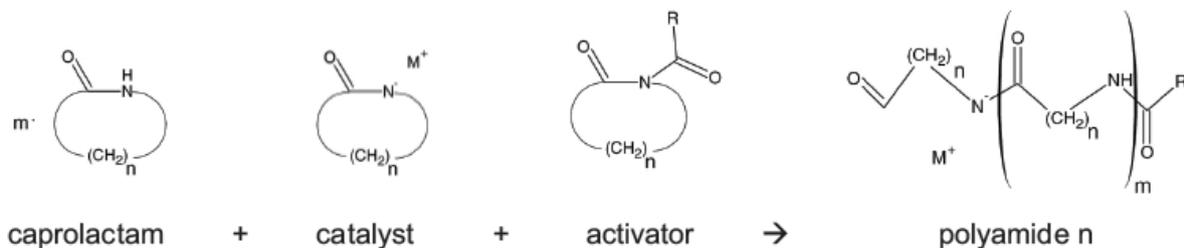


Abbildung 4: Einzelkomponenten der In-situ-Polymerisation zu Polyamid [12].



Abbildung 5: Links: LanXess AP Caprolactam Flakes; Mitte: Brüggemann Chemical Aktivator C20P; Rechts: Katalysator C10 [13].

Zur Verarbeitung von Caprolactam auf Spritzgussanlagen muss die Anlage mit einem speziellen Spritzaggregat versehen werden [13]. Die in Granulatform vorliegenden Ausgangsprodukte müssen darin auf mindestens 70°C (Schmelztemperatur) aufgeheizt werden, um für die Weiterverarbeitung ausreichend verflüssigt zu sein, aber die Polymerisationsreaktion noch nicht zu starten. Erschwerend ist die unterschiedliche Viskosität der Ausgangskomponenten (Abbildung 6). Dem wird mit einer Vorvermischung der Komponenten oder durch die Verwendung zwischenzeitlich verfügbarer „Cast Ready Mischungen“ entgegen gewirkt. Beispielsweise bietet Lanxess Energizing Chemistry Instant Blends der Typen Instant Blend Activate 1 57169949C und Instant Blend Catalyze 1 57169956C an, welche optimal aufeinander abgestimmt wurden. Somit erhält man zwei sehr ähnlich newtonsche Flüssigkeiten, welche dann vor Eintritt in die Werkzeugkavität in einer Mischkammer homogen vermischt werden können.

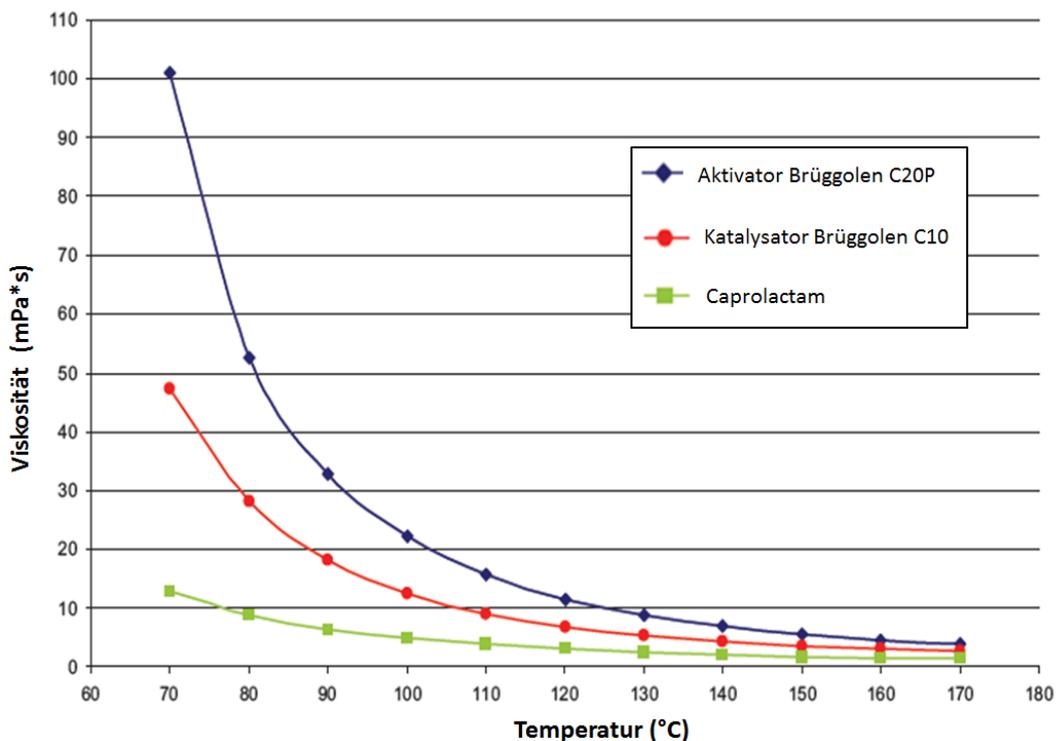


Abbildung 6: Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur für Caprolactam, Bruggolen Aktivator C20P und Katalysator C10 [13].

Wie auch aus anderen polymerisierenden Systemen bekannt und umfassend beschrieben [14], [15], wirkt sich eine Änderung der Mischungsverhältnisse sowohl auf die Schmelztemperatur als auch auf den Grad der erzielbaren Kristallinität aus. Wesentlicher hinsichtlich Produktivität ist aber der Aspekt der sich ändernden Reaktionszeit durch die Mischungszusammensetzung. Abbildung 7 zeigt die Reaktionskurven dreier Mischungen. Während die hochkonzentrierte Mischung bereits nach 100 s auspolymerisiert ist, ist dies bei der geringkonzentrierten Mischung erst nach 190 s der Fall.

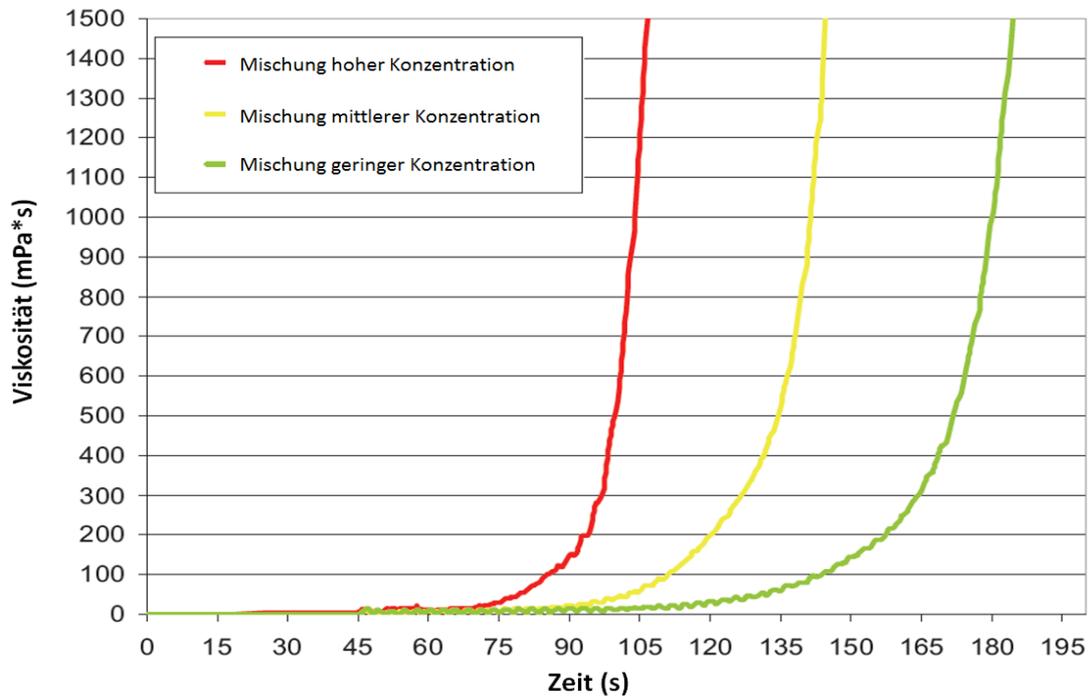


Abbildung 7: Einfluss unterschiedlicher Rezepturen auf die zeitliche Abhängigkeit der Viskosität [13].

Da die anionische Polymerisation, welche unmittelbar nach der Vermischung startet, exotherm ist, tritt auch ein deutlicher Temperaturanstieg im Werkzeug sehr unmittelbar auf (Abbildung 8).

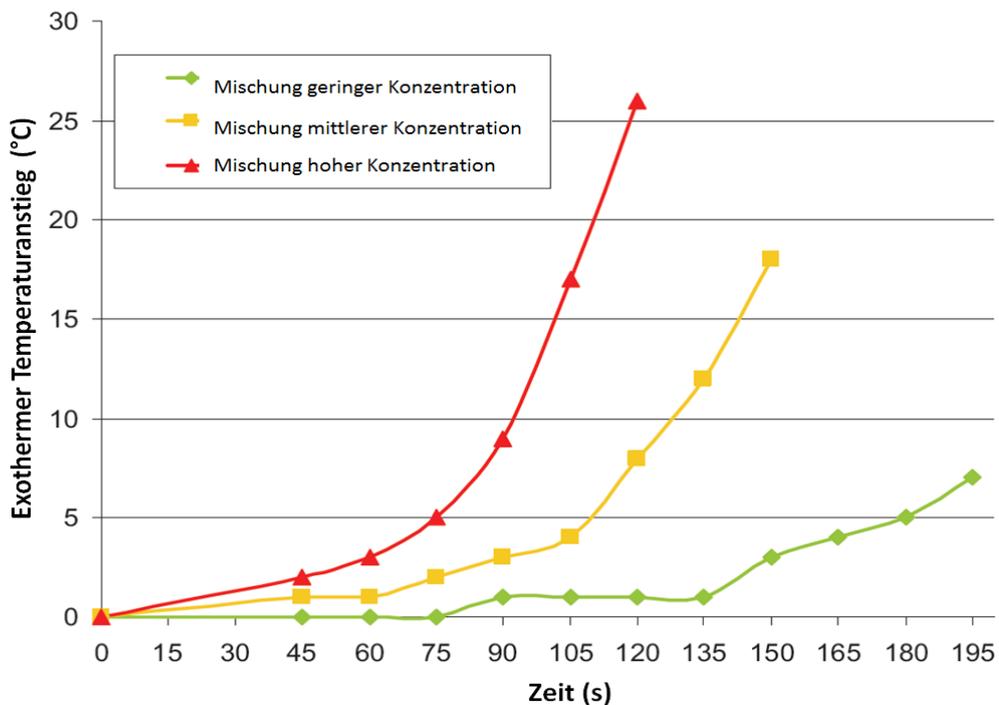


Abbildung 8: Einfluss der Rezeptur auf den Temperaturanstieg infolge von Polymerisation und Kristallisation [13].

RIM und SRIM von Caprolactam mit textilen Verstärkungen wurde zwar ab 1980 [16] gemäß Abbildung 9 weiterentwickelt, jedoch wird erst seit 2010 erfolgsversprechend an einer Anlagentechnik gearbeitet, welche den Prozess serientauglich machen könnte [13].

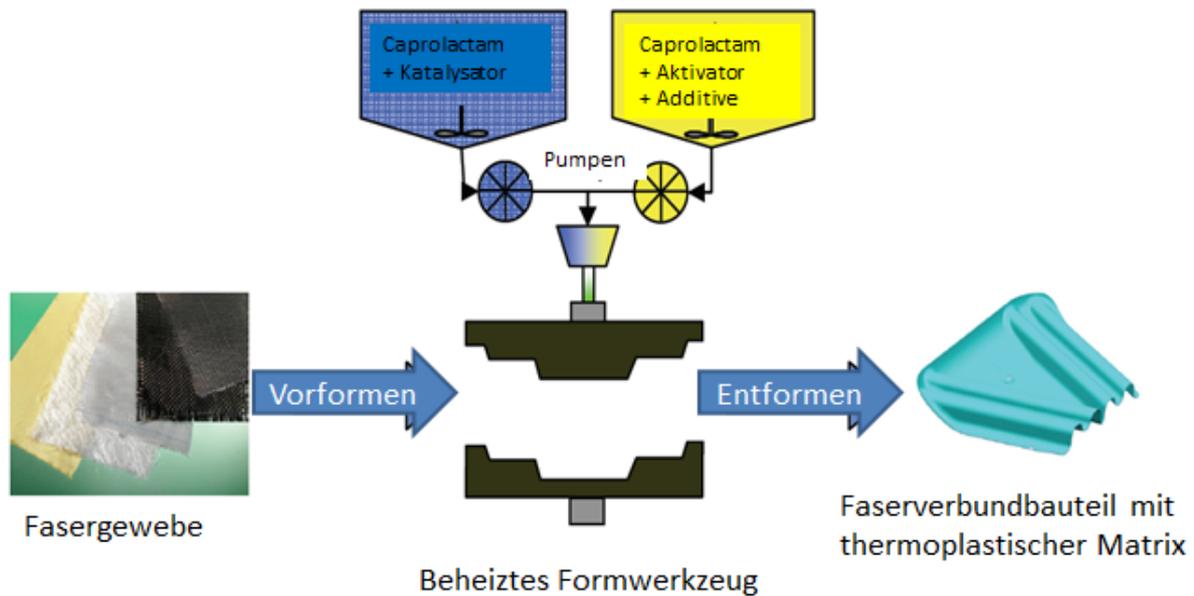


Abbildung 9: Prozessdarstellung von T-SRIM zur Herstellung endlosfaserverstärkter Bauteile mittels anionischer Polymerisation von Caprolactam [13].

Die Visualisierung des Prozesszyklus in Abbildung 10 verdeutlicht die Analogie zwischen dem RIM-Prozess und der Thermoplast-Spritzgusstechnik.

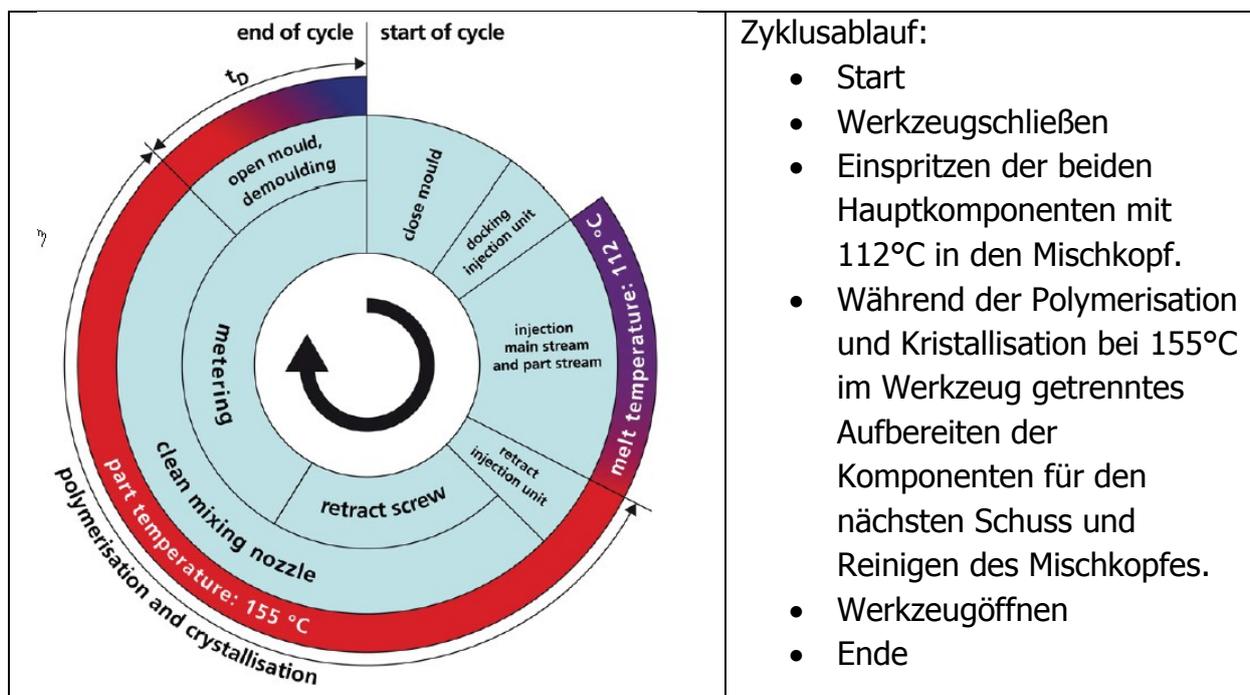
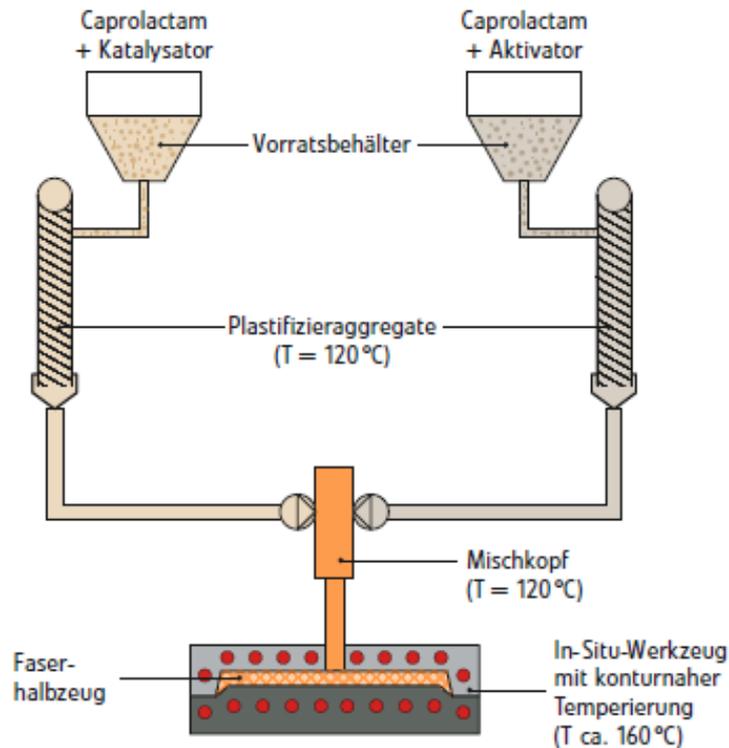


Abbildung 10: Zyklusdarstellung für die In-situ-Polymerisation von Caprolactam [13].

Als für den Prozess relevante Systemkomponenten können somit, wie auch in Abbildung 11 dargestellt, genannt werden:

- Zwei Plastifizieraggregate,
- Mischkopf und
- In-situ-Werkzeug.



© Kunststoffe

Abbildung 11: Darstellung des Zusammenhangs der prozessrelevanten Komponenten (Plastifizierung, Mischkopf, In-situ-Werkzeug) [2].

2.2. Anlagentechnik zur Plastifizierung

2.2.1. Schneckenplastifizierung

Zur Verarbeitung von Caprolactam hat die Firma Engel die Schließeinheit einer herkömmlichen Thermoplast-Spritzgussmaschine (Abbildung 12) mit zwei speziellen und neuartigen Plastifizieraggregaten ausgestattet [13]. Deren Aufgabe ist es, die Ausgangsstoffe (Caprolactam + Aktivator + Additive bzw. Caprolactam + Katalysator) getrennt und dem Schussvolumen entsprechend dosiert aufzuschmelzen und ähnlich einer Kolbendosierung über eine Schlauchverbindung der Mischkammer als niedrigviskose temperierte Flüssigkeiten unter Druck zuzuführen.

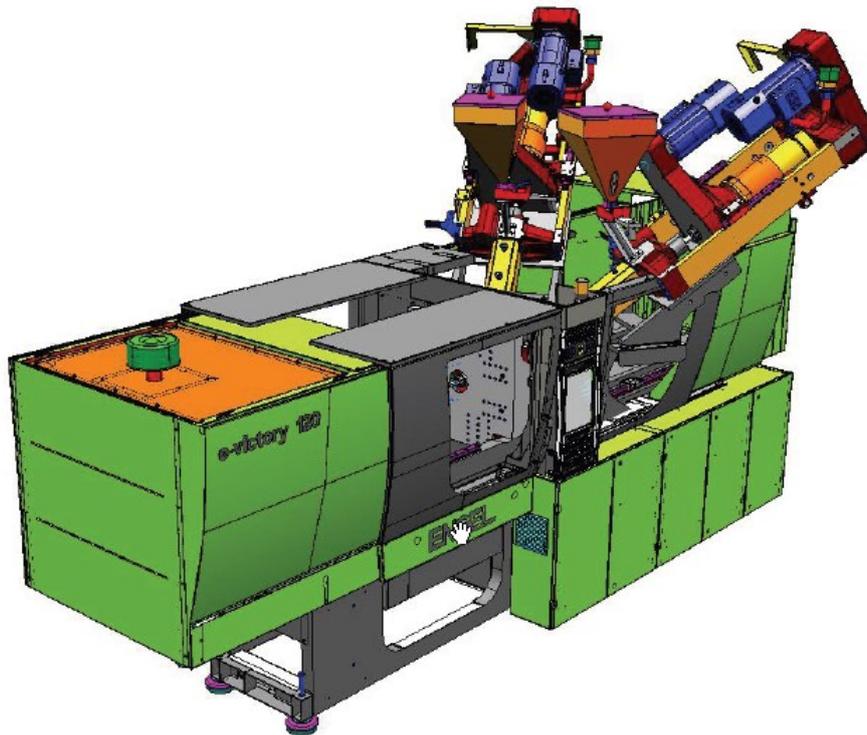


Abbildung 12: Prototyp einer ENGEL-Spritzgussmaschine e-victory 120 mit speziellen Spritzaggregaten zur Verarbeitung von Caprolactam, Aktivator und Katalysator als Ausgangsprodukte [13].

2.2.2. Behälterplastifizierung

Als Alternative haben Unternehmen wie Krauss Maffei und Hennecke ihre Hochdruckdosiereinheiten, welche unter Anderem aus der PUR HP-RTM Technik bekannt sind, geringfügig caprolactamfähig modifiziert. Dabei werden die Ausgangsstoffe (Caprolactam + Aktivator + Additive bzw. Caprolactam + Katalysator) ebenfalls getrennt, jedoch in großen Vorratsbehältern, aufgeschmolzen.

Vor jedem Misch- und Füllvorgang zirkulieren die Komponentenströme bereits im gewünschten Mengenverhältnis, sowie unter dem für die Injektion erforderlichen Druck. Der Wechsel von Kreislauf- auf Injektionsstellung erfolgt in Hochdruckinjektionsmischern mit zwangsgesteuerten Umschaltelementen. Alle für den einwandfreien und synchronen Komponenteneintritt in die Mischkammer verantwortlichen Schaltelemente werden zwangsweise mechanisch oder hydraulisch betätigt. Das in der Mischkammer verbleibende Reaktionsgemisch wird nach dem Füllvorgang durch Reinigungskolben ausgestoßen [17], [18].

Diese Reaktivanlagen, welche im Wesentlichen wie in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt, aus temperierten Arbeitsbehältern, Dosieraggregaten und einem

Mischkopf bestehen, werden zur Herstellung von Bauteilen mit Formenträgern verbunden und stellen somit gegebenenfalls eine Anlagenkombination mehrerer Hersteller dar.

Üblicherweise werden mit solchen Anlagen Polyurethane, Polyharnstoff, Polyester und Epoxydharze zu Formteilen verarbeitet, welche wie in Tabelle 1 ersichtlich, in ihrer Größenordnung vergleichbare Prozessparameter zur Verarbeitung erfordern.

Tabelle 1: Prozessparameter bei der Herstellung verschiedener Kunststoffe im RIM-Verfahren [18].

Kunststoff	Temperatur		t_s (s)	Q_p (kJ/mol)	U (kJ/mol)	Schwindung (%)
	T_0 (°C)	T_w (°C)				
Polyurethan	40	70	45	84	59	5
Polyharnstoff	40	70	30	84	13	5
Polycaproamid	100	130	150	42	88	10
Ungesättigte Polyester	25	150	60	67	126	20
Epoxydharz	60	130	150	126	67	5

Erläuterung: T_0 ist die für die Reaktion erforderliche Initialtemperatur; T_w ist die Werkzeugtemperatur; t_s ist die Reaktionszeit; Q_p ist die exotherme Wärme; U ist die notwendige Aktivierungsenergie

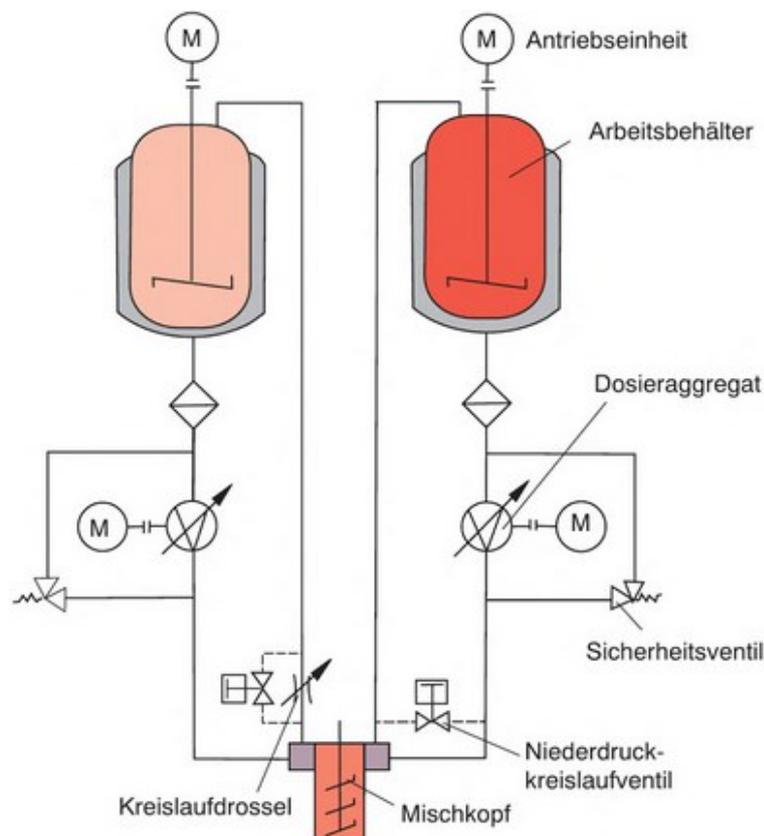


Abbildung 13: Fließschema einer HP-RTM Anlage (Kreislaufsystem) [19].



Abbildung 14: Hennecke Streamline – HP-RTM-Serienanlage zur Verarbeitung von PUR (ohne Formenträger) [20].

2.3. Werkzeugtechnik

Verglichen mit dem üblichen Thermoplast-Spritzguss sind einige besondere Details erforderlich, da eine vorgeheizte Flüssigkeit geringer Viskosität in eine auf ein höheres Niveau beheizte Kavität eingespritzt wird. Da auch die Polymerisation im Werkzeug nur in der erforderlichen Qualität erfolgt, wenn zu Beginn die für die Reaktion notwendige Wärme gleichmäßig zur Verfügung steht, erhält die Temperierung des Werkzeugs auch aus diesem Gesichtspunkt eine zentrale Bedeutung.

Zudem lässt der in der Einleitung beschriebene Vergleich der Viskositäten der Massen bei den jeweils möglichen Verarbeitungsbedingungen (ca. 100 Pa*s bei PA6 Spritzgusstypen verglichen mit 5 mPa*s von Caprolactam) die Notwendigkeit der differenteren, wesentlich präziseren Ausführung der Werkzeugtrennungen als auch jeglicher beweglicher Elemente, wie etwa Schieber, Auswerfer, Kerne etc. erwarten.

Selbst das unter erfahrenen Werkzeugmachern als kritisch bekannte LSR (Liquid Silicone Rubber) hat im Verarbeitungsbereich keine vergleichbar geringe Viskosität. Tabelle 2 fasst die wichtigsten Anforderungen an das Werkzeugdesign und die Werkzeugausführung zusammen.

Tabelle 2: Beschreibung der Anforderungen an das Werkzeugdesign bedingt durch Caprolactam [13].

Detail	Beschreibung
Die geometrische Gestaltung von Angussystem und Kavität ermöglicht einen optimalen Schmelzefluss.	Die Fließkanäle im Angussystem und die Kavität müssen so konstruiert werden, dass die niedrigviskose Schmelze die komplette Werkzeugkavität ohne Luft-einschlüsse füllen kann.
Werkzeugeheizung	Das Werkzeug muss möglichst exakt auf die Polymerisationstemperatur geheizt werden, um eine homogene Polymerisation in der gesamten Kavität zu ermöglichen und zudem ein PA6 mit hoher mittlerer Molmasse und möglichst enger Molmassenverteilung zu erlangen.
Leckagefreiheit	Das Werkzeug muss gegen Leckage des reaktiven dünnflüssigen Caprolactams abgedichtet sein, da es ansonsten zu Überspritzungen kommt.

Ferner haben die Versuche von Berg [13] bestätigt, dass eine Werkzeugfüllung von oben nach unten, auf Grund der nicht zu vernachlässigenden Schwerkraft, zu vermehrten Lufteinschlüssen führt. Daher ist eine Füllung vom tiefsten Punkt aus empfohlen.

Die äußerst geringe Viskosität erfordert eine für Spritzgusswerkzeuge spezielle Ausführung der Werkzeugtrennlinie, da sonst umfangreiche Überspritzungen auftreten und im Werkzeug kein reproduzierbarer Druckaufbau möglich ist. Andererseits führt ein perfekt dichtes Werkzeug zu mangelnder Entlüftung und somit zu Lufteinschlüssen, welche sowohl die optische Qualität der Bauteiloberfläche reduzieren aber auch erhebliche mechanische Schwachstellen erzeugen. Um diese zu vermeiden, ist eine Evakuierung oder zumindest ein Überlauf an der höchsten Stelle vorzusehen.

Bisher war es, wie in Abbildung 15 dargestellt, naheliegend, für die Werkzeugauslegung die Konstruktionsrichtlinien der RIM-Technologie anzuwenden. Diese sieht die Verwendung von Dichtschnüren als Standard vor, um eine entsprechende Abdichtung zu gewährleisten.

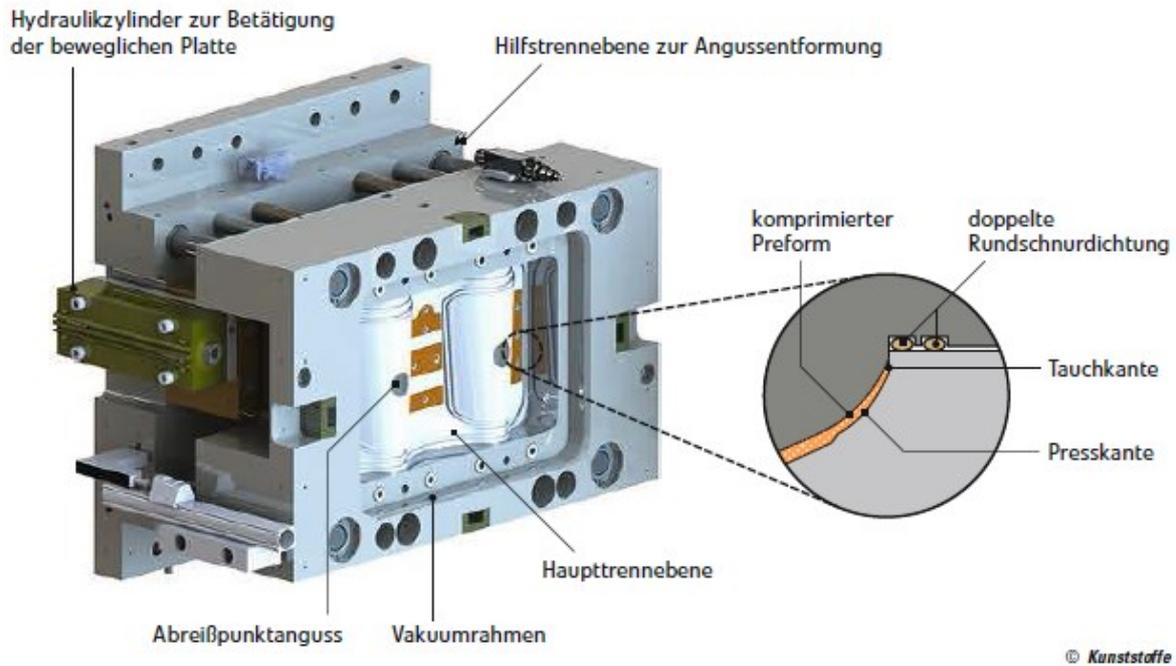


Abbildung 15: In-situ-Spritzgusswerkzeug mit integrierter Dichtungstechnik [2].

Die Auswahl geeigneter Dichtungsmaterialien für Caprolactam ist jedoch herausfordernd (Tabelle 3) [13] und gilt auch für die Ausführung der im Werkzeug erforderlichen Dichtungen:

Tabelle 3: Anforderungen an die Auswahl eines geeigneten Dichtungsmaterials für die Verarbeitung von Caprolactam am Beispiel einer Schnecken-dichtung [13].

Detail	Beschreibung
Temperaturbeständigkeit	Die Dichtung muss Umgebungstemperaturen von mindestens 125°C standhalten, ohne die Dichteigenschaften zu verlieren.
Chemische Beständigkeit	Die Dichtung muss der Aggressivität der Caprolactam- und Katalysator-Schmelze widerstehen, ohne geschädigt zu werden, da es ansonsten zu Rückströmungen kommt.
Reibung zur Schnecke	Die Dichtung muss in der Lage sein, an der Schnecke zu gleiten, ohne auf das Gleitverhalten merkbar Einfluss zu nehmen.
Chemische Inkompatibilität	Die Dichtung darf nicht mit dem Caprolactam oder dem Katalysator in chemische Reaktion treten.

Fortsetzung Tabelle 3:

Dauerbeständigkeit / Verschleißfestigkeit	Die Dichtung muss der axialen Bewegung während des Einspritzens standhalten, ohne rasch zu verschleifen. Die Wirksamkeit der Dichtung muss für eine lange Periode konstant bleiben.
Verbaubarkeit	Die Dichtung muss am Schneckenkörper oder am Gleitring verbau- und fixierbar sein.

Besonders kritisch ist, dass Caprolactam jeden Spalt der Auswerfer oder der Schieberpassungen füllt, wenn diese der herkömmlichen Spritzgusstechnik entsprechend hergestellt werden. Somit sind verbesserte dichtende Systeme zu wählen. Hier ist es naheliegend, Designrichtlinien aus dem LSR-Bereich zu übernehmen. Ein wesentlicher Unterschied hierbei ist aber die angestrebte Werkzeuggröße. Während LSR-Spritzguss in der Regel Mikropräzisionsbauteile im Fokus hat, zielt die In-situ-Polymerisation auf Leichtbauteile, d.h. in der Regel auf großflächige Strukturbauteile, ab. Das bedeutet, dass die im LSR-Werkzeugbau verwendeten Präzisionsverfahren zur Werkzeugherstellung nur eingeschränkt zur Verfügung stehen.

Zudem stellen die durch den Preform in das Werkzeug eingetragenen Fasern eine erhebliche Gefährdung hinsichtlich Abrasion und Druckstellen dar, womit die Dichtheit rasch leidet und die erforderliche Werkzeugstandzeit nicht zu gewährleisten ist. Selbst in der Werkzeuggrennung verbleibender Flit (Reste von Mikroüberspritzungen) stellt ein Problem bei den Folgezyklen dar, da Ablagerungen in der Werkzeuggrennung entweder ein vollständiges Schließen des Werkzeugs verhindern oder die Werkzeuggrennung durch Eindrücken der Trennfläche auf Dauer zerstören.

Um im gesamten Prozessverlauf ein entsprechendes Thermomanagement zu ermöglichen (am Beginn steht die Notwendigkeit der Aktivierung der Reaktion durch hohe Temperatur (Wärmezufuhr), gefolgt von der erforderlichen Abfuhr der Wärmeenergie der exothermen Reaktion, um abschließend die Entformungstemperatur zu erreichen) bedarf es auch eines entsprechenden Werkzeugtemperiersystems. Um homogene Bauteileigenschaften hinsichtlich Maßhaltigkeit aber auch Festigkeit zu erzielen, ist zudem eine homogene Werkzeugtemperatur sehr wichtig.

2.4. Mischsysteme

Zur Steigerung der Produktivität ist die Zykluszeit und somit vorrangig die zykluszeitbestimmende Reaktionszeit möglichst kurz zu halten. Daher sollte zur Verwendung hochreaktiver Systeme auch die Vermischung der Komponenten erst in unmittelbarer Nähe zur Kavität stattfinden, um die Injektionszeit zu reduzieren. Andernfalls kommt es bereits zur Polymerisation bevor die Bauteilfüllung abgeschlossen werden kann. Zudem ist das Material zwischen dem Mischkopf und dem Bauteil analog dem Thermoplastspritzguss-Kaltkanal zwar rezyklierbar, aber dennoch als Verschwendung zu betrachten, da auch hier eine Aufbereitung folgen muss.

Die für die In-situ-Polymerisation erforderlichen Werkzeugtemperaturen überschreiten die zulässigen Temperaturniveaus der RTM-Mischköpfe.

Somit ist die thermische Trennung zwischen warmer Komponentenzuführung und heißer Kavität auf engstem Raum erforderlich.

Zudem stellen diese komplexen Mischkopfbaugruppen in Kombination mit den erforderlichen Rahmenbedingungen einen erheblichen Platzbedarf dar, welcher in der Wahl der Anlagengröße relevant und somit kostentreibend sein kann.

Bisher wurden von der Firma Schöfer die aus der RTM-Technologie bekannten Mischköpfe ähnlich Abbildung 16 in geringfügig modifizierter Form verbaut.

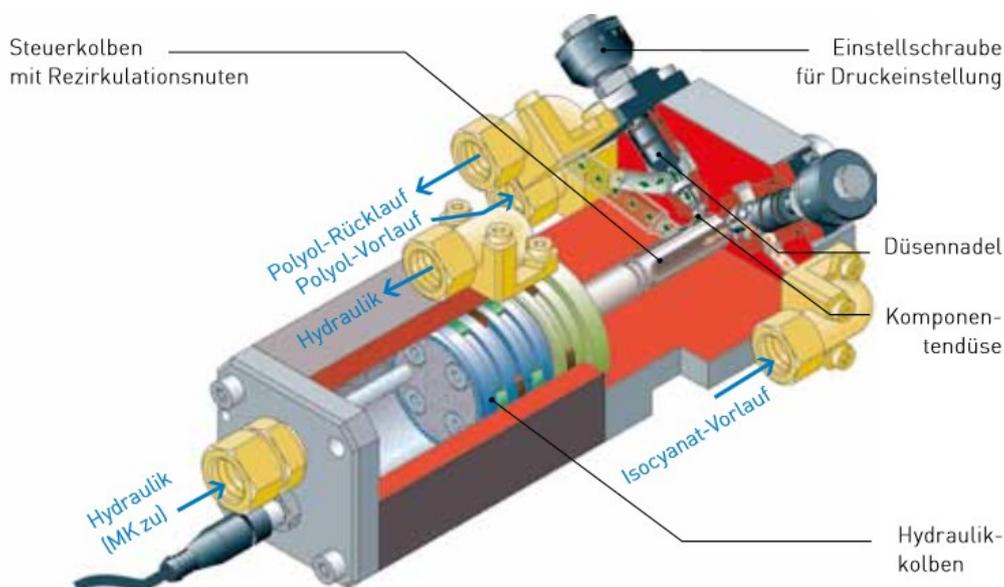


Abbildung 16: Schnittdarstellung eines PUR-Gegenstrommischkopfes [21].

Diese Systeme sind für den in Abbildung 13 dargestellten und im Kapitel 2.2.2 beschriebenen Kreislaufbetrieb konzipiert, um, wie zum Beispiel in der Polyurethan-Verarbeitung notwendig, die Ausgangskomponenten kontinuierlich zu homogenisieren und zu temperieren.

Das heißt, der Steuerkolben mit den Rezirkulationsnuten muss hydraulisch präzise bewegt werden, um zyklisch einen Teileschuss (Vermischung) freizugeben und dazwischen eine exakte Trennung der beiden Ausgangskomponenten (Caprolactam + Aktivator + Additive bzw. Caprolactam + Katalysator) für den Kreislaufbetrieb verlässlich zu gewährleisten. Zudem hat der Steuerkolben eine Ausräumfunktion der Mischkammer nach Abschluss der Teilefüllung, um für den nächsten Mischzyklus wieder eine gereinigte Mischkammer sicherzustellen.

Die Einstellung der Drücke erfolgt direkt am Mischkopf. Um zur Prozessoptimierung im laufenden Betrieb die Variation der Drücke zu ermöglichen, ist deshalb für den im Werkzeug verbauten Zustand eine entsprechende Zugänglichkeit zu erhalten.

Die grundsätzliche Funktionsweise und hierfür erforderliche Komplexität des Aufbaus eines Mischkopfes ist exemplarisch der Abbildung 17 zu entnehmen.

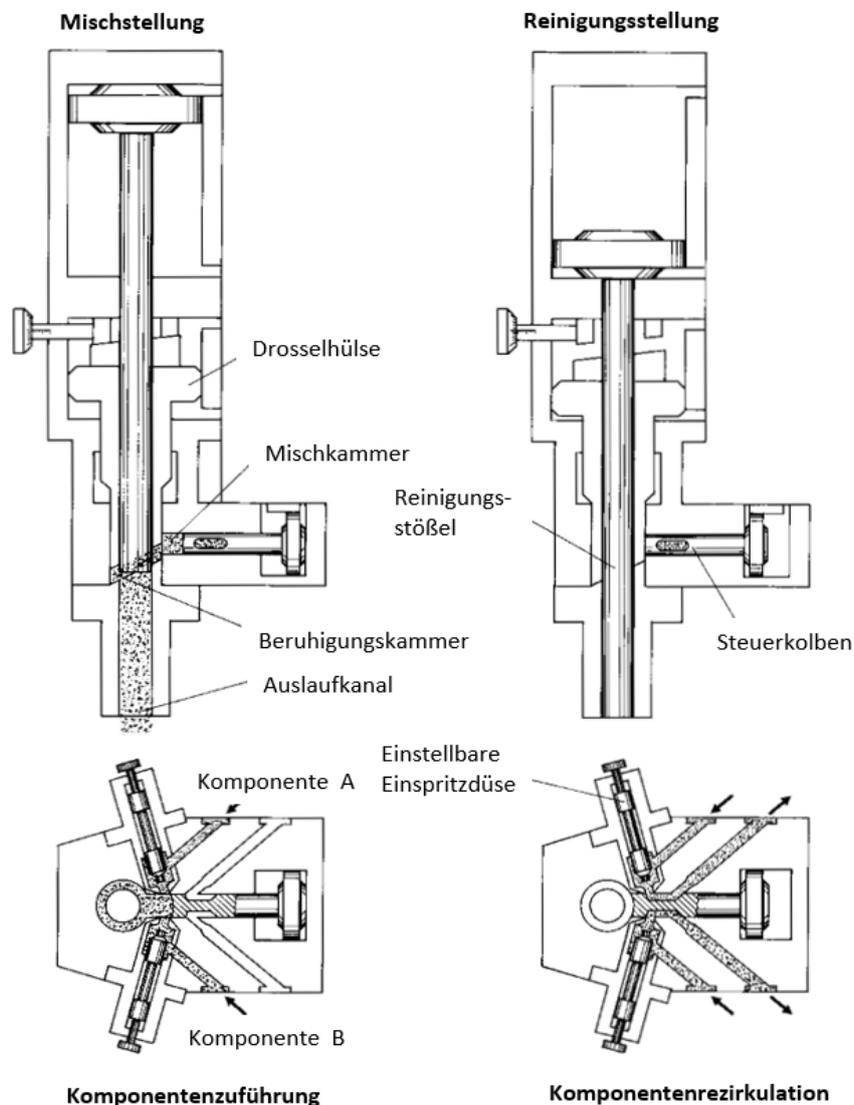


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Medienströme und Arbeitsstellungen eines Mischkopfes (Bauart Hennecke MX) [17].

Unter seriennahen Versuchsbedingungen mit Caprolactam zeigte sich dieses Konzept bei näherer Betrachtung aber als nur bedingt geeignet. Vermutlich werden die integrierten Hydraulikkomponenten den der Caprolactam-Verarbeitung entsprechend erhöhten Temperaturen und Systemdrücken nicht dauerhaft im Serienbetrieb standhalten. Gerade die bei faserverstärkten Bauteilen erforderlichen Systemdrücke von bis zu 200 bar erfordern in Kombination mit der geringen Viskosität des Caprolactams Toleranzen im Mikrometer-Bereich.

Entsprechend der erforderlichen Fertigungsaufwände sind Kosten solcher Systeme von ca. EUR 25.000,- nachvollziehbar und somit auch äußerst relevant für die Investitionskosten der Anlage.

Zudem ist eine kritische Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen festzustellen, da schon geringste Leckagen dazu führen, dass Restmaterial in der Mischkammer verbleibt und dort auspolymerisiert, was zu Problemen im Folgezyklus führt [22].

Konzeptvergleiche bei Engel mit und ohne Rezirkulation haben zudem gezeigt, dass sowohl die Energiebilanz besser ist, als auch das Material wesentlich homogener bleibt, wenn die Komponenten nur bedarfsgerecht aufgeschmolzen und zur Verfügung gestellt werden. Somit ist eine Rezirkulation nicht erforderlich, beziehungsweise scheint diese sogar nachteilig.

Die bisherige Integration geringfügig modifizierter Mischkopfsysteme ist mit der in der Thermoplast-Spritzgusstechnik üblichen Verwendung von fremdgefertigten Heißkanalsystemen vergleichbar, das Ausgangsmaterial schmelzflüssig möglichst nahe an das Bauteil heranzuführen. Jedoch ist der Mischkopf bei der RTM-Technik, im wesentlichen Unterschied zur Thermoplast-Spritzgusstechnik, als ein mittels Schlauch- und Kabelstränge verbundener Teil der Reaktivanlage und nicht als ein Teil des Werkzeugs zu betrachten.

Dies bedeutet aber auch, dass jeder Werkzeugwechsel an der Anlage mit dem Aufwand der Demontage und Montage des Mischkopfes verbunden ist. Ein entsprechend aufwändiges Unterfangen, sofern dieser, wie prozesstechnisch empfohlen, zudem platzsparend und angussreduzierend verbaut wurde.

Vorausgesetzt das Werkzeug und die Anlage können aufeinander abgestimmt angefertigt werden, kann zur Reduktion der erforderlichen Werkzeugeinbauhöhe der Anlage in der Aufspannplatte eine entsprechende Freistellung vorgesehen werden (Abbildung 18). Dies erhöht zwar einerseits merklich den verbliebenen Werkzeugöffnungshub, bedeutet aber andererseits einen noch schwierigeren Zugang zu den Anschlüssen und Einstellschrauben am Mischkopf.

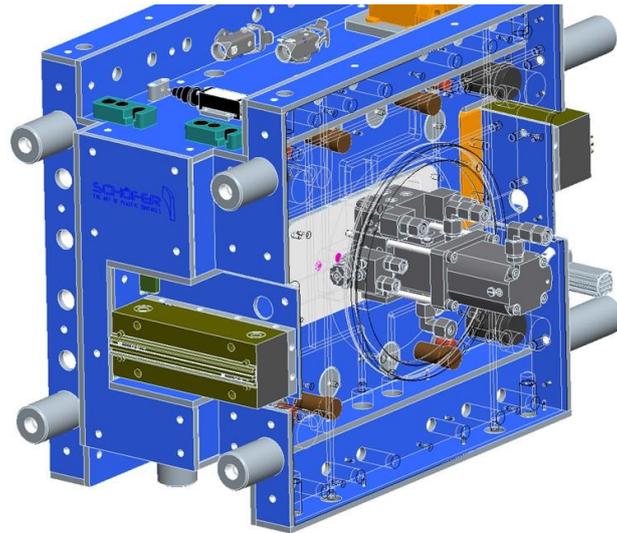


Abbildung 18: Darstellung der Einbausituation des Mischkopfes unter der Voraussetzung einer Freistellung in der Aufspannplatte.

Die zentrale Positionierung des Mischkopfes bedingt zudem eine weitere Einschränkung, den Mischkopf gegen die Umgebungswärme entsprechend abzuschirmen zu müssen. In diesem Fall ist für eine wie in Abbildung 19 ersichtliche Isolierung zu sorgen. Falls möglich ist die Isolierung um einen lokalen Kühlkörper zu ergänzen. Gleiches gilt für jedes weitere hydraulisch betätigte Element, beziehungsweise auch für die thermisch nicht ausreichend beständigen Sensorelemente. Zusammenfassend liegt es nahe, anstatt eines separaten Mischkopfes, die Mischkammer möglichst in das Werkzeug zu integrieren.



Abbildung 19: Abbildung der zentralen Einbausituation des Mischkopfes sowie der notwendigen Isoliermaßnahmen auch zum Schutz der Hydraulikkomponenten vor thermischer Überbelastung [2].

3. Umsetzung

In einer ersten Phase widmeten sich die Arbeitspakete der Evaluierung verschiedener Werkzeugdetails im Rahmen eines Plattenversuchswerkzeuges zu Test- und Optimierungszwecken. Anschließend wurde auf Basis der daraus erarbeiteten Richtlinien ein Messepräsentationsbauteil gestaltet und umgesetzt.

Das hierfür notwendige Werkzeug wurde dann gemeinsam mit parallel von den Projektpartnern entwickelten Material- und Anlagenlösungen abschließend im Rahmen der Messvorbereitungen verifiziert.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Entwicklungsschritte ist dieses Kapitel wie folgt gegliedert:

- Werkzeugintegriertes Mischsystem.
- Ausführung der Werkzeugabdichtung.
- Ausführung Caprolactam berührender beweglicher Werkzeulemente.
- Weitere werkzeugrelevante Bauteilauslegungsthemen.

Innerhalb dieser Themenblöcke wird die jeweilige Chronologie vom Entwicklungsstart bis zur Serienverifizierung dargestellt.

3.1. Werkzeugintegriertes Mischsystem

3.1.1. Ausgangssituation

In Kapitel 2.4 wurden umfangreich Anforderungen und Probleme mit bestehenden beziehungsweise geringfügig modifizierten HP-RTM-Mischköpfen beschrieben. Dabei wurde erläutert, dass unter der Voraussetzung, dass nicht mit Kreislaufanlagen gearbeitet wird, die Rücklaufleitungen entfallen können und somit auch die Ventiltechnik wesentlich simplifiziert werden kann. Eine platzsparendere Vermischung der Reaktivkomponenten erlaubt eine signifikante Verkleinerung des Mischsystems, um somit auch den Mischprozess noch näher an die Kavität heranzurücken.

Grundsätzliche Gespräche mit HP-RTM-Anlagenherstellern haben jedoch ergeben, dass aus kommerziellen Gründen ein Abrücken von der aktuellen Kreislaufanlagentechnik nicht angestrebt wird, und darum kein angepasster verkleinerter Mischkopf angeboten werden soll.

Das angebotene Stilllegen der Rücklaufleitung und ein Beibehalten der Ventiltechnik löst aber wesentliche Herausforderungen nicht.

Somit ist auch mit einer Systemüberarbeitung eine Entkoppelung des Mischsystems vom Anlagenhersteller verbunden. Die Aspekte, weiterhin eine eigenständige Baugruppe einzusetzen, und die bisherigen Bauformen und verwendeten Fertigungstechnologien zu berücksichtigen, lassen sowohl Maschinenbauunternehmen als auch Heißkanalhersteller als potentielle Lieferanten für ein neues Mischkonzept erscheinen.

Da aber auch in dieser Variante neue Partner zu integrieren sind, gilt es, ein grundlegendes Prozessverständnis aufzubauen und ein komplett neues System zu entwickeln. Unverändert bleibt, dass die für eine „Stand-alone“-Lösung erforderlichen Gehäusekomponenten Bauraum benötigen und Kosten verursachen. Zudem wird die Anzahl der für eine erfolgreiche Projektumsetzung benötigten Partner und somit auch die Schnittstellenkomplexität erhöht.

Daher stellt sich auch unter diesem Gesichtspunkt die Frage, ob eine vollständige Integration der Mischkammer als Bestandteil des Spritzgusswerkzeugs als vorteilhafter zu sehen ist. Entsprechend muss aber auch für ein jedes Werkzeug in ein eigenes Mischsystem investiert werden und der Verarbeiter wird mit einer werkzeugintegrierten Mischkammer auch intensiver an den Werkzeuglieferanten gekoppelt.

Um aber eine exakte Dosierung und somit Vermischung zu ermöglichen, bleibt die Notwendigkeit einer analog zu Thermoplast-Heißkanallösungen von der Anlage übernommenen Steuerung und Überwachung erhalten. Bevorzugt wird eine umfangreiche Regelung der im Mischsystem integrierten Ventilkomponenten und vorzugsweise auch der Temperierung in der Zuführung.

Die Unternehmen Engel und Schöfer haben sich nach intensiven Gesprächen im September 2014 in einem Projektvertrag grundsätzlich darauf geeinigt, ein werkzeugintegriertes Mischsystem in Verbindung mit einer Reaktivverarbeitungstechnik für die Verarbeitung von Caprolactam oder anderer monomerer Ausgangskomponenten partnerschaftlich zu entwickeln.

Seitens der Firma Schöfer wurde Gerald Schöfer als Projektverantwortlicher ernannt.

3.1.1.1. Anforderungen an ein neuartiges werkzeugintegriertes Mischsystem

Für eine erfolgreiche Projektumsetzung wurden folgende Punkte als wichtig erachtet:

- Eine kostengünstige Umsetzung, um die Technik auch unter kommerziellen Gesichtspunkten attraktiv zu gestalten.
- Ein möglichst standardisierter Aufbau, damit die Technik auch international zum Einsatz kommen kann.
- Eine kompakte Bauweise, um auch die erforderliche Anlagentechnik kompakt und somit kostengünstig zu halten.
- Eine leichte Reinigung, um eine möglichst hohen OEE (Overall Equipment Effectiveness) zu erhalten.
- Ein fester Einbau ins Werkzeug, weil ansonsten ein ständiger Umbau die Anlagenverfügbarkeit ebenfalls erheblich reduziert.
- Eine Auslegung auf zumindest 100 bar Werkzeuginnendruck, um auch eine entsprechende Schwindungskompensation durch Nachdruck zu ermöglichen.
- Die Düsen nicht unmittelbar gegenüberliegend anordnen oder die Eintrittswinkel schräg anstellen, da die Komponenten nicht in die jeweils gegenüberliegende Eintrittsöffnung eindringen dürfen.
- Ein mechanisch unterstütztes Ausräumen der Mischkammer sollte nicht notwendig sein. Die Mischkammer sollte analog zu einem Thermoplast-Kaltkanalzapfen mit entformt werden.
- Es dürfen keine Reste im Mischbereich verbleiben, da diese gegebenenfalls im folgenden Zyklus den Prozess oder die Bauteilqualität beeinträchtigen.
- Die Vermischung der reaktiven Komponenten in den Zuführleitungen ist mittels einer Rückflusssperre oder eines anderweitigen Verschlusssystems zu verhindern.
- Ein Materialaufbau (Aufpolymerisieren) ist zu verhindern oder durch eine entsprechend leicht durchführbare zyklische Reinigung zu entfernen.
- Die Mischgüte muss qualitativ der Güte von „Stand der Technik“-Mischköpfen entsprechen.
- Die Zuführung der Einzelkomponenten muss temperiert ausgeführt werden, um im Falle von Prozessunterbrechungen die Autopolymerisationsneigung zu verhindern.
- Hinterschnitte müssen vermieden werden, um das Risiko von prozessschädlichen Verunreinigungen zu reduzieren.

3.1.2. Konzept

Zu Beginn der Entwicklung standen die Definitionen des Arbeitsplans und der Verantwortlichkeiten zur Umsetzung eines vorerst in einem Plattenwerkzeug integrierten Mischsystems. Diese wurden wie in Tabelle 4 dargestellt, vereinbart.

Tabelle 4: Beschreibung der Aufgaben und der Verantwortlichkeiten in der Vorentwicklungsphase.

Aufgabe	Verantwortliches Unternehmen und verantwortlicher Mitarbeiter
Spezifikation prozesstechnischer Parameter/Rahmenbedingungen (Düsendurchmesser, Durchfluss, Vermischungs- und Prozessdruck...).	ENGEL (Gerhard Bäck)
Evaluierung und Auswahl potentieller Düsensysteme.	Schöfer (Gerald Schöfer)
Erarbeitung erster Geometrien für eine Mischkammer zur nachfolgenden strömungstechnischen Evaluierung, basierend auf fertigungstechnischen Gesichtspunkten.	Schöfer (Gerald Schöfer)
Strömungstechnische Evaluierung und Simulation sowie Optimierung der Geometrie.	ENGEL (Lorenz Reith)
Konstruktive- und fertigungstechnische Realisierung der werkzeugintegrierten Mischlösung.	Schöfer (Gerald Schöfer, Gerhard Speneder)
Prozesstechnische Versuche zu Funktionstests, Performance sowie Reproduzierbarkeit der erarbeiteten Mischlösung.	ENGEL (Lorenz Reith)
Vereinbarung der Weiterverwertung des Intellectual Property.	ENGEL/Schöfer (Peter Egger/Gerald Schöfer)

3.1.3. Spezifikationen der Rahmenbedingungen

Das Mischen von Caprolactam ist eine vergleichsweise einfache Aufgabe, da die Viskositäten der beiden zu mischenden Komponenten niedrig und ähnlich sind, die Volumenstromverhältnisse gleich sind und insgesamt eine niedrige Mischenergie erforderlich ist. Für die Mischsystemkonzeption wird von perfekt aufbereiteten Schmelzen ohne Füllstoffe ausgegangen, die thermisch und stofflich homogen von den Plastifizieraggregaten entsprechend dem vorgegebenen Volumenstromprofil gefördert werden [22].

Wesentlich für einen erfolgreichen Prozess ist die exakte und temperierte Dosierung der Komponenten beim Eintritt in die Mischkammer. Tabelle 5 zeigt die in diesem Zusammenhang definierten Prozesskenngößen.

Tabelle 5: Physikalische Prozessgrößen zur Prozessbeschreibung.

Physikalische Kenngröße	Wert
Arbeitsbereich Volumenstrom je Düse	1 - 60 cm ³ s ⁻¹
Düsendurchmesser Mischkammer-Eintritt	Varianten 0,8 und 0,6 mm
Temperaturbereich in den Düsen	120°C +/- 10°C
Maximale Verweilzeit der Einzelkomponenten in den Düsen	2h bei 120°C
Temperatur der umliegenden Kavität	bis max. 170°C
Maximaler Druck innerhalb der Düsen	150 bar
Minimale Viskosität der Komponenten	4 mPas

Zusätzlich gilt es zu beachten, dass kaum eine Elastomerdichtung im Kontakt mit Caprolactam dauerhaft beständig ist.

3.1.4. Potentielle Düsensysteme

Basierend auf den im Kapitel zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen erschien es naheliegend, für die Zuführung der Ausgangskomponenten zur Mischkammer die verfügbaren Kaltkanal-Systeme der LSR-Technologie in Betracht zu ziehen. Dennoch bleibt der wesentlichste Unterschied, dass das Kaltkanalsystem nicht, wie in Abbildung 20 dargestellt, zur direkten Bauteilspritzung dient, sondern nur der in zwei Kanälen getrennten temperierten Zuführung der Ausgangskomponenten zur prozessentscheidenden Mischkammer.

Wie in Abbildung 20 auch ersichtlich ist, verfügen solche Systeme über eine Wasserkühlung, welche sicherstellt, dass das im Verteilerkanal befindliche Material einerseits ausreichend temperiert werden kann, um flüssig zu bleiben. Aber andererseits und wesentlicher dagegen geschützt wird, durch die umliegenden heißen Werkzeugbestandteile überhitzt zu werden, sodass es zu einer Zersetzung oder Vernetzung im Düsenkanal kommt.

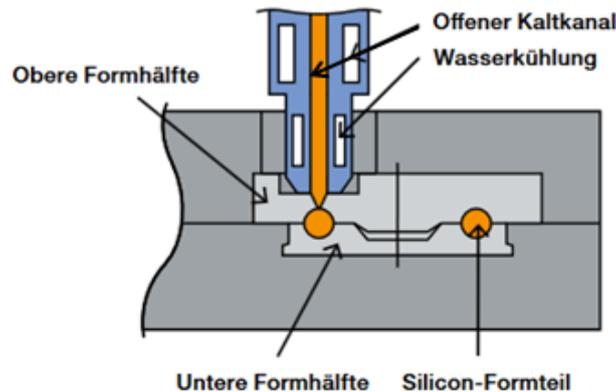


Abbildung 20: Schematische Darstellung einer für LSR konzipierten Kaltkanal-Lösung in offener Ausführung [23].

Da solche Systeme bereits standardmäßig in Nadelverschlussausführung verfügbar sind (Abbildung 21), ist somit eine Steuerung der Einspritzung in die nachgeschaltete Mischkammer gewährleistet.

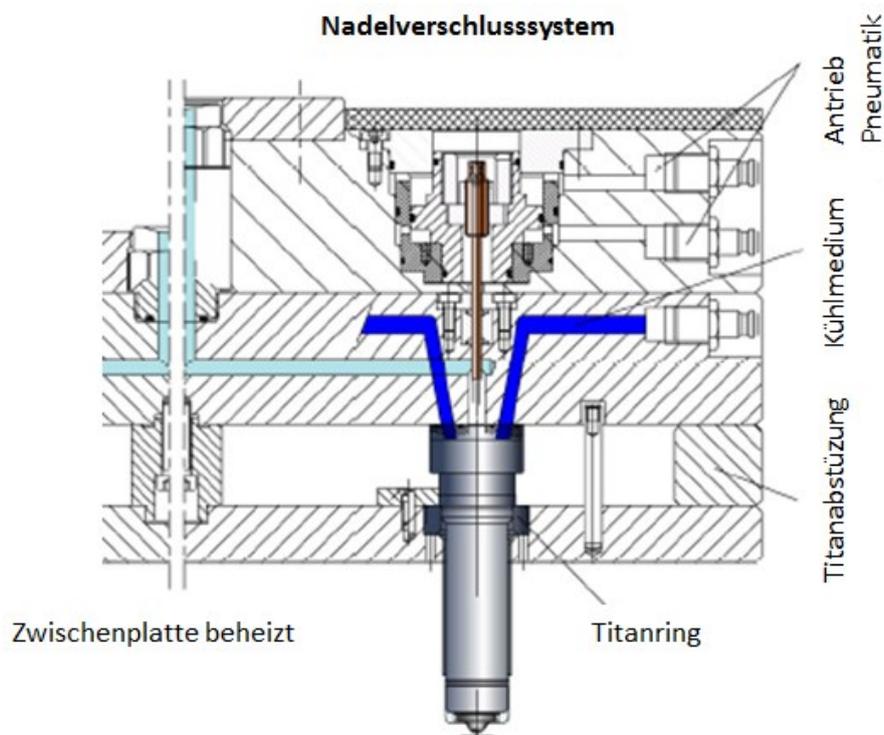


Abbildung 21: Schnittdarstellung eines pneumatisch betätigten Nadelverschlussystems einer für LSR konzipierten Kaltkanal-Lösung [24].

Die Betätigung der Nadel kann wahlweise hydraulisch, pneumatisch oder mittels Servoantrieb erfolgen.

Zwecks Auswahl der Betätigung der Verschlussnadeln waren folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Hydraulische Betätigung: Die Hydraulikölversorgung ist unter Umständen nicht über die Spritzgussmaschine möglich, da die maximal zulässige Öltemperatur der Spritzgussmaschine überschritten werden könnte.
- Servoelektrische Betätigung: Diese ist derzeit wegen der erforderlichen Regeltechnik noch teuer, wäre aber sehr präzise, vorausgesetzt die thermische Längenausdehnung der Nadeln wird entsprechend berücksichtigt. Zudem erlaubt die Nadelansteuerung eine nahezu beliebige Vorgabe der Öffnungs- und Schließprofile hinsichtlich Geschwindigkeiten und Positionierungen.
- Pneumatische Betätigung: Die Pneumatik erfordert im heißen Bereich starre Leitungen, ist aber derzeit die sauberste und günstigste Lösung, sofern die Betätigungskräfte ausreichend sind.
- Unabhängig von der Art der Betätigung wäre eine Positionsüberwachung, ob die Düse geschlossen ist, zum Beispiel mittels Hall-Sensor zur Prozessüberwachung wünschenswert.

Abbildung 22 zeigt den Bauraum, welchen eine servoelektrische Betätigung der Verschlussnadel der Düse in Anspruch nimmt.

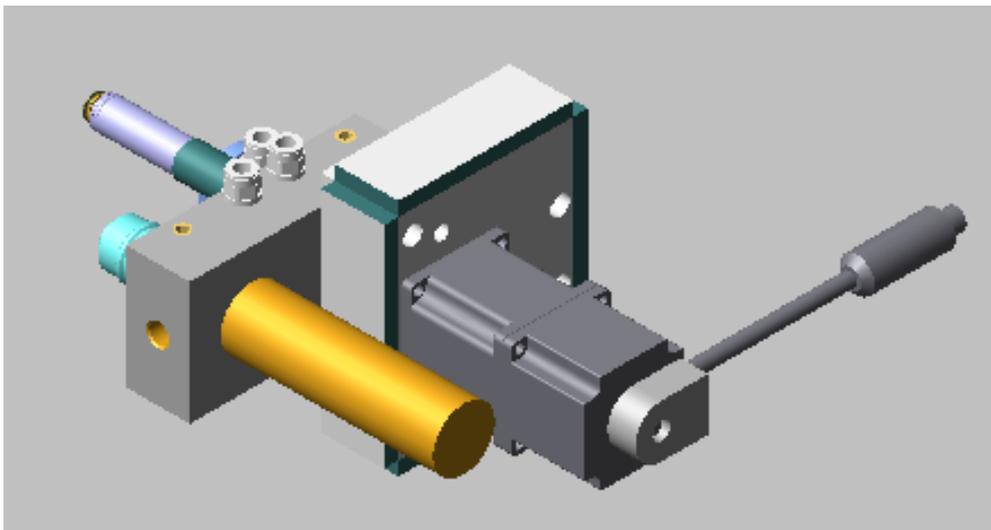


Abbildung 22: 3D-Darstellung eines servoelektrisch betätigten Nadelverschlussystems einer für LSR konzipierten Kaltkanal-Lösung [25].

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 23, dass eine Ausführung in pneumatischer Zylinderbetätigungsbauf orm wesentlich kompakter ausgeführt werden kann.

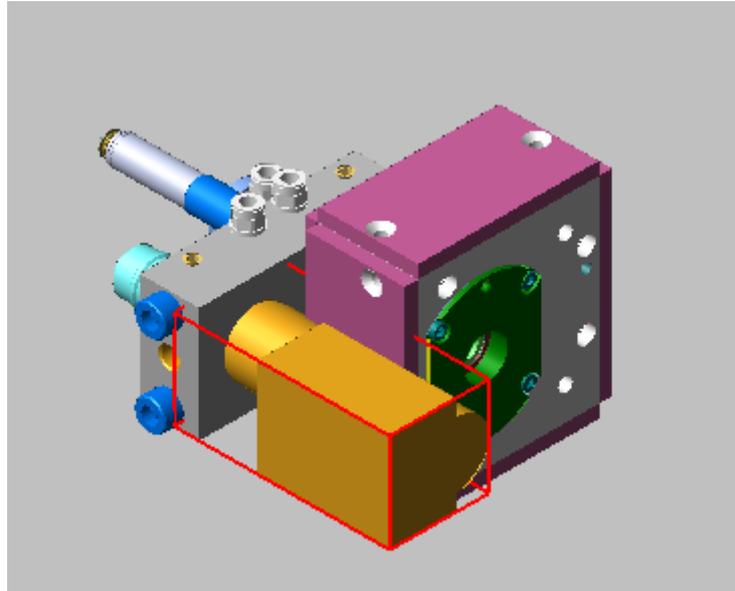


Abbildung 23: 3D-Darstellung eines pneumatisch betätigten Nadelverschlussystems einer für LSR konzipierten Kaltkanal-Lösung [25].

Entsprechend den Annahmen und nach entsprechender Recherche publizierter Informationen war dennoch anzunehmen, dass am Markt verfügbare Systeme die Anforderungen nicht gänzlich erfüllen und somit auch vom Lieferanten des Düsen-systems Entwicklungsarbeit zu leisten wäre. Die Unternehmensstruktur und -kultur der Firma Günther Heißkanaltechnik GmbH erschien hierfür nebst der umfangreichen Kompetenz hilfreich. Somit wurde entschieden, das pneumatisch betätigte System aus dem Haus Günther als Grundlage der weiteren Entwicklung eines Sonder-Kaltkanalsystems zu nutzen.

3.1.5. Modifizierte Ausführung des Nadelverschlussystem

Wie auch schon in den Arbeiten von Berg [13] und Lammert [26] beschrieben, stellt die chemische Beständigkeit gegenüber Caprolactam eine besondere Herausforderung dar. Aus diesem Grund erschien es jedenfalls erforderlich, die üblicherweise in LSR-Systemen verbauten Dichtungen auf ihre Beständigkeit im Kontakt mit Caprolactam zu prüfen.

Hierfür wurde das verwendete Dichtungsmaterial aus FKM (Fluorelastomer) einem Extraktionstest unterzogen. Zur einfacheren Beurteilung wurden anstatt komplexer Formdichtungen O-Ringe gleicher Zusammensetzung dem flüssigen Caprolactam bei etwa 120°C unter ständigem Rühren ausgesetzt und alle 30 min optisch und mechanisch auf etwaige Veränderungen kontrolliert. Nach 6 Stunden wurde der Versuch abgebrochen und nach dem Abkühlen ein Vergleich mit einer unbehandelten Probe durchgeführt.

Abbildung 24 rechts zeigt bei einem Standard-Dichtungswerkstoff den offensichtlichen Quelleffekt der Exposition in Caprolactam.

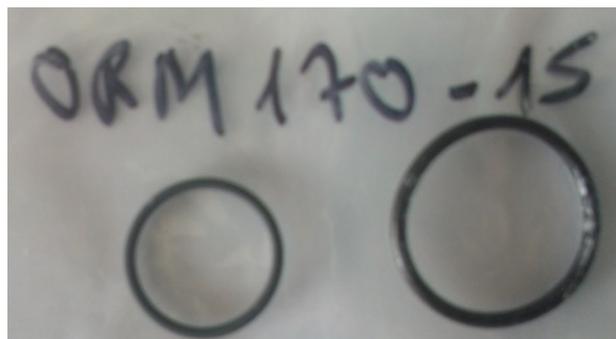


Abbildung 24: Fotos von O-Ringen der Type Normatec ORM 170-15 vor (links) und nach (rechts) der Lagerung in Caprolactam.

- Es ist ein sehr starker Quelleffekt zu beobachten.
- Es verbleibt kaum Elastizität im abgekühlten Zustand.
- Es kommt zu einer Massenzunahme von über 50 %.
- Eine mikroskopische Analyse offenbart sichtbare oberflächliche Porosität und leichten Abrieb, sowie Aufnahme von Caprolactam in den Poren.

Fazit: O-Ringe der Type Normatec ORM 170-15 aus Fluorelastomer sind für eine Anwendung unter Serienbedingungen nicht geeignet.

Daher ist ein alternativer Caprolactam-beständiger Werkstoff für die Dichtungen erforderlich.

Seitens Firma Engel wurde auf Basis eigener Entwicklungsarbeiten der Werkstoff Kalrez® von DuPont empfohlen und folglich als mögliche Alternative ebenfalls einem Eignungstest unterzogen (Abbildung 25).



Abbildung 25: Fotos von O-Ringen der Type DuPont Kalrez 7075 vor (links) und nach (rechts) der Lagerung in Caprolactam.

- Die Dichtung ist nach dem Abkühlen dimensionsstabil.
- Die Dichtung bleibt nach dem Abkühlen weiterhin elastisch.
- Es kommt zu einer Massenzunahme von unter 0,5 %.
- Eine mikroskopische Analyse offenbart keine oberflächliche Porosität und auch keinen Abrieb.

Fazit: O-Ringe der Type DuPont Kalrez 7075 sind potentiell für die Nutzung unter Serienbedingungen geeignet.

Neben der Notwendigkeit eines alternativen Dichtungswerkstoffs wurden folgende Maßnahmen bereits in einer ersten Phase als notwendig erachtet, und wie in Abbildung 26 zum Teil dargestellt umgesetzt:

- Die Verteilerplatte in geteilter Ausführung mit endlosen Dichtungen aus Kalrez ausführen.
- Die Dichtung der Verschlussnadel ebenfalls aus Kalrez hergestellt ausführen.
- Der Verteiler wird als Baugruppe auf die Formplatte mittels 4 x M10 auf Höhe Düsenkopf und Anschlussdüse verschraubt.
- Stichmaße wurden geändert.
- Das Einzelnadelventil wurde mit einer Endlagenabfrage versehen.
- Die Temperierung der Verteilerplatte wurde stirnseitig ausgeführt.

Zudem wurde seitens Firma Günther darauf hingewiesen, dass die Standardanschlussgewinde am Düsenkopf mit G1/8" ausgeführt werden und die Temperaturbeständigkeit der Anschlüsse dadurch nur 150 °C beträgt.

Die zulässige Temperatur liegt somit nur knapp über der erforderlichen Verarbeitungstemperatur. Da aber gerade anfangs eventuell des Öfteren Montagebeziehungsweise Demontearbeiten anfallen, wurde entschieden, die Standardanschlüsse zunächst einzusetzen, zumal diese mit der Schmelze nicht in Berührung kommen.

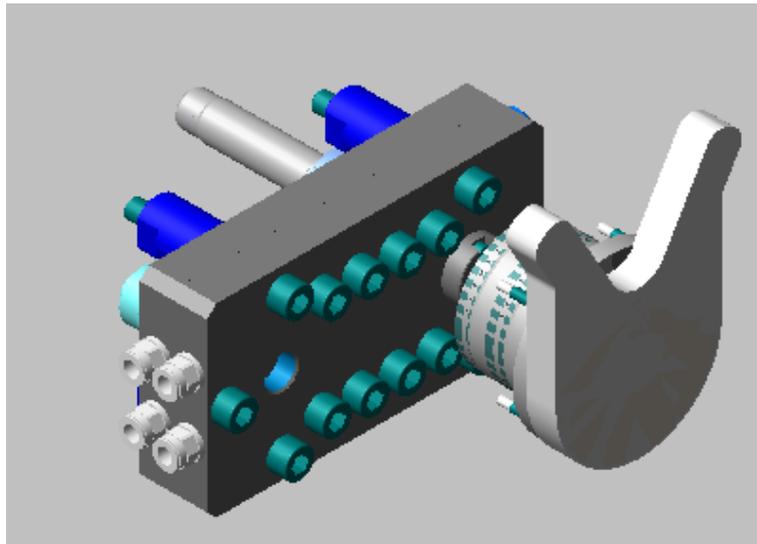


Abbildung 26: 3D-Darstellung des nach ersten Vorgaben überarbeiteten pneumatisch betriebenen Nadelverschlussystems E2-TS_00158 [27].

3.1.6. Geometrieentwurf

In der konstruktiven Entwurfsphase des werkzeugintegrierten Mischsystems wurden folgende Aspekte als prioritär betrachtet:

- Eine ausreichende Mischgüte muss gewährleistet werden.
- Die Ausführung muss den Ansprüchen einer robusten Prozessführung unter Serienbedingungen Genüge tun.
- Es ist eine möglichst kompakte Bauform anzustreben.
- Die fertigungstechnische Umsetzung muss kostengünstig möglich sein.
- Mit der Zielsetzung eines Kostenoptimums ist die Verwendung von Standard-Komponenten zu bevorzugen.

Um gleichzeitig eine ausreichende Mischgüte zu erzielen, aber auch um das wechselseitige direkte Eindringen der Komponenten in den jeweils anderen

Zuführkanal zu unterbinden, wurde in ersten Überlegungen das Konzept einer Wirbelkammer mit schräg und nicht gegenüberliegenden Einspritzventilen angedacht. Bei diesem Konzept wäre der Mischbereich im Vergleich zur Angussbuchse aber im Durchmesser wesentlich größer und eine zusätzliche Trennebene müsste eingeführt werden. Damit verbunden ist ein erhöhter konstruktiver und fertigungstechnischer Aufwand in der Werkzeugherstellung. Was aber noch wesentlich erscheint, ist das hohe Risiko von Verschmutzungen, verursacht durch die geometrisch bedingte große Oberfläche und möglicher Totvolumina.

Mehrere weitere Überarbeitungen führten zu den Varianten entsprechend Abbildung 27 bis Abbildung 29, welche ebenfalls über eine großzügige Mischkammer und einen, Richtung Austritt verjüngten Querschnitt, als Staulement verfügen.

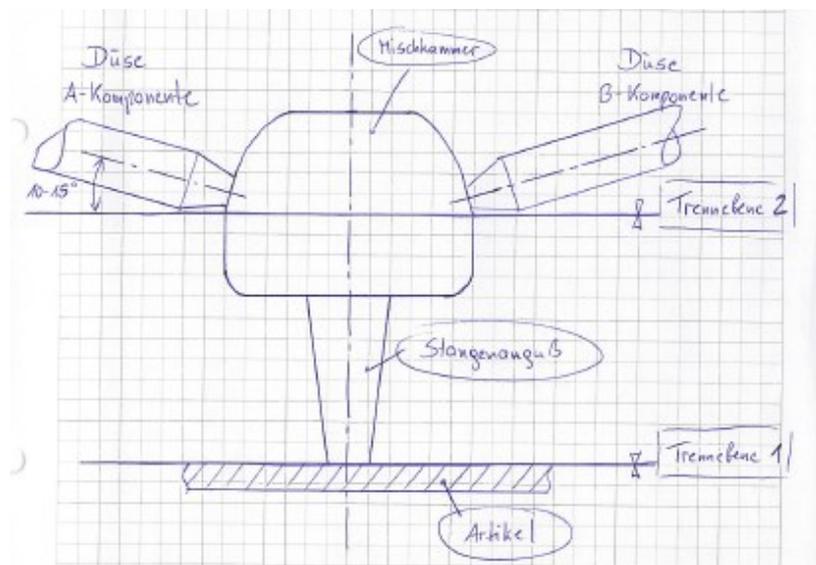


Abbildung 27: Entwurfsskizze zur schematischen Anordnung der Düsen und Ausführung der Mischkammer in einer 2-Trennebenen-Variante.

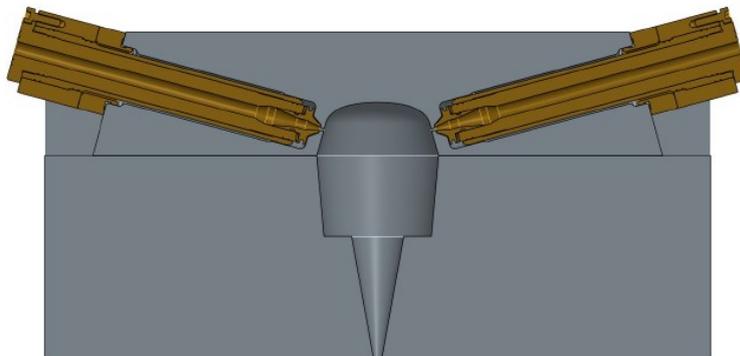


Abbildung 28: Dimensional angepasster Entwurf zur Plausibilisierung der Düseneinbausituation und Ausführung der Mischkammer in einer 2-Trennebenen-Variante.

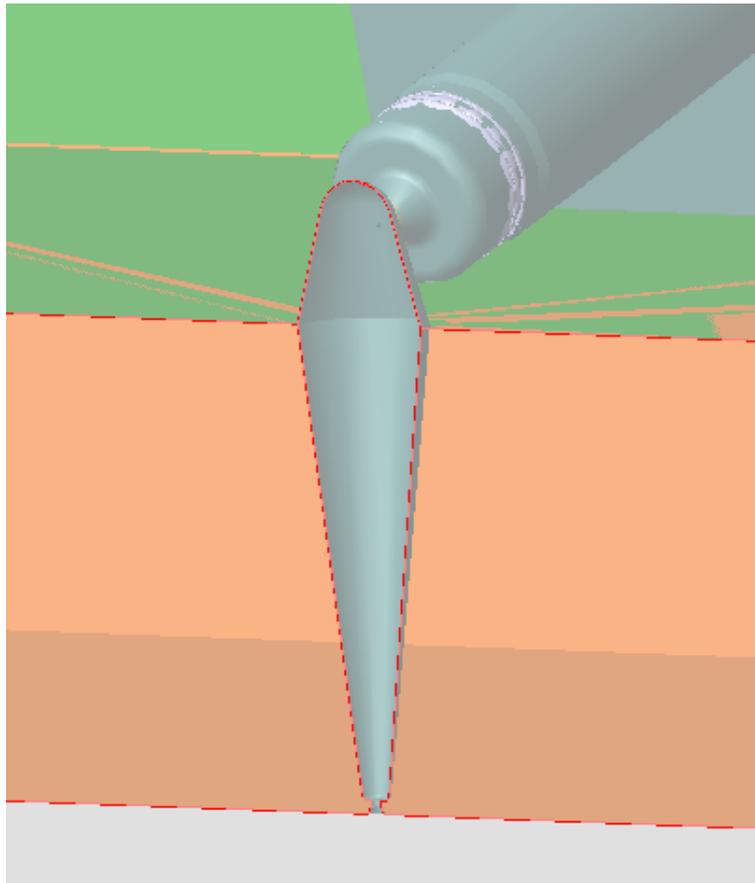


Abbildung 29: Entwurf mit deutlich reduzierter Mischkammer zur Verifikation der Düseineinbau-Situation und Ausführung der Mischkammer in einer 2-Trennebenen-Variante.

Die ursprünglichen Ansätze hatten die Annahme gemeinsam, dass die erforderliche Vermischungsenergie nur durch eine entsprechende Verwirbelung in einer Mischkammer mit nachgeschaltetem Rückstau vor Eintritt in eine Kavität eingebracht werden könnte.

Bei genauerem Studium der am Markt verfügbaren HP-RTM Mischköpfe stellt man fest, dass die Vermischung aber vorrangig durch einen Eintrag der Komponenten bei hoher Geschwindigkeit in Form von Freistrahlbildung erfolgt, welche beim frontalen Aufeinandertreffen der beiden Komponenten zu ausreichenden Turbulenzen führt. Diese werden im Austragsrohr in eine laminare Strömung übergeleitet [18].

Wissentlich der äußerst geringen Viskosität des Caprolactams und der durch die neue Anlagentechnik ermöglichten Volumenströme, wurde nach neuerlicher Überlegung vermutet, dass tendenziell eher der Abstand der Düseintritte zueinander und die Mischrohrlänge für die Mischqualität entscheidend sein würden. Eigentlich sollte auch eine Ausführung als konisches Rohr analog eines Kaltkanalzapfens ohne Wirbelkammer und Rückstauerelement reichen, um eine ausreichende Vermischung zu erzielen.

Dies hätte auch den Vorteil, dass somit die zuvor erforderliche zweite Trennebene obsolet wird. Was wiederum die Bauform kompakter macht und auch eine wesentlich kostengünstigere Umsetzung ermöglicht.

Diesen Überlegungen angepasst ist die in Abbildung 30 auf die wesentliche Mischgeometrie reduzierte dargestellte Variante. Diese sollte in der Simulation mit den Varianten gemäß Abbildung 28 und Abbildung 29 verglichen werden, um die für erste Versuchsaufbauten vorteilhafteste Umsetzungsvariante zu wählen.

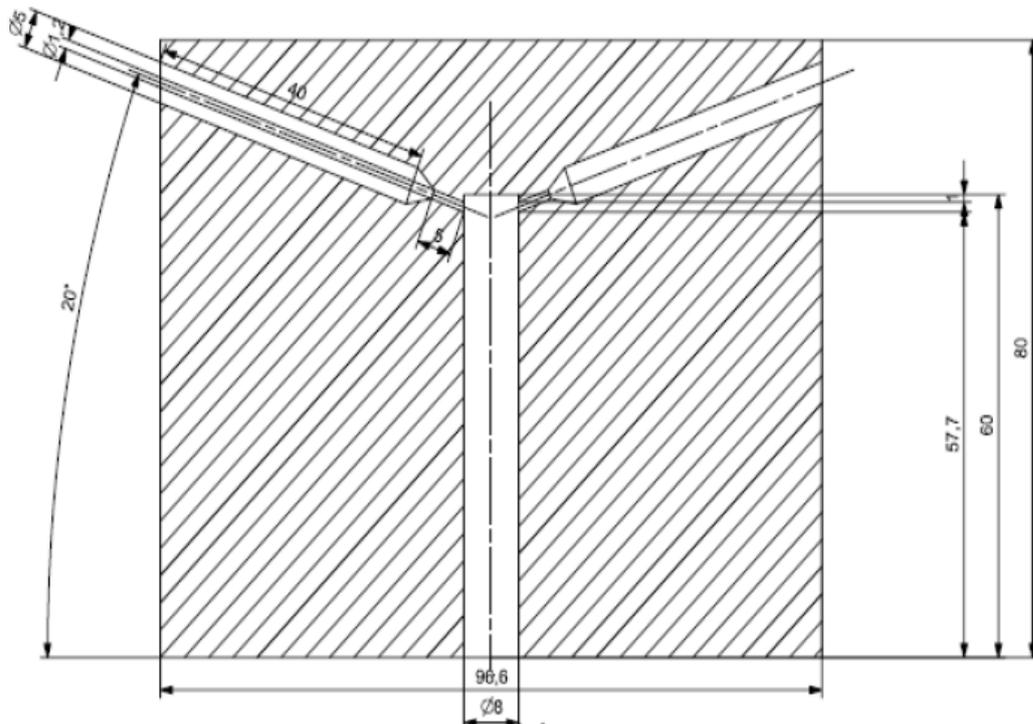


Abbildung 30: Alternativer Entwurf zur schematischen Anordnung der Düsen und Ausführung der Mischkammer in einer 1-fach-Trennebenen-Variante.

3.1.7. Simulation des Mischvorganges

Basierend auf den Geometrieentwürfen und den Prozessannahmen wurden am Institut für Polymer-Spritzgießtechnik und Prozessautomatisierung (IPIM) an der Johannes Kepler Universität in Linz umfangreiche Simulationen durchgeführt.

Am IPIM wurden bereits im Zuge wissenschaftlicher Arbeiten Modelle zur Beschreibung des Injektionsprozesses entwickelt. Hierfür wurden die grundlegenden Modelle der anionischen Polymerisation von Caprolactam in das Open-Source Programm OpenFOAM implementiert, um mittels CFD (Computational Fluid Dynamics, numerischer Strömungsmechanik) die komplexen Wechselwirkungen

zwischen Geometrie, Polymerisation, Produktionsparametern sowie Materialeigenschaften dreidimensional abzubilden [28].

Als Rahmenbedingungen für die Simulation wurden die in Tabelle 5 definierten Prozesskenngrößen und die in Abbildung 28, Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellten Geometrien herangezogen und hinsichtlich der zu erzielenden Homogenität der Vermischung ausgewertet.

Auf Basis von Erfahrungswerten am IPIM wurde die Variante gemäß Abbildung 28 aus dem Simulationsplan genommen, womit im Folgenden zwei Varianten untereinander und zudem mit einem „Stand der Technik“-Mischkopf verglichen wurden.

Im Ablauf wurden jeweils zwei Fälle simuliert, wobei zuerst mit einer offenen Düse gerechnet wurde, um die Mischgüte am Mischkammerauslass zu simulieren und im zweiten Fall der Auslass geschlossen wurde, um ein vollständig gefülltes Werkzeug nachzustellen. Zur Auswertung wurden die Geschwindigkeitsverteilung und die Tracerverteilungen in unterschiedlichen Abständen zum Mischkammereintrittspunkt dargestellt und analysiert [29].

Die Begutachtung der Geschwindigkeitsverteilung erlaubt hierbei Rückschlüsse auf das zu erwartende Strömungsverhalten. Die Tracerverteilung zeigt hingegen, wie rasch sich die beiden Komponenten gleichmäßig in der Mischkammer verteilen. In den folgenden Abbildungen sind die jeweiligen Eingangsströme jeweils rot und blau markiert, perfekte Homogenität zeigen die Bereiche in grün. Numerisch dargestellt entsprechen die Eingangsströme jeweils den Werten 0 und 1, womit sinngemäß eine perfekte Durchmischung durch den Wert 0,5 symbolisiert wird.

3.1.7.1. Variante 1

Bei einem Eingangsvolumenstrom von $15 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ je Düse von reinem Caprolactam bei 100°C erkennt man in Abbildung 31 vier Zonen, welche wie folgt beschrieben werden können:

- Zone 0: Freistrahlen, welche sich bedingt durch die geneigte Winkelpositionierung zu je einem Kegel aufweiten.
- Zone 1: Aufeinandertreffen der Freistrahlen (primäre Zone).
- Zone 2: Durchmischung in der Mischkammer oberhalb und unterhalb der Eintrittsöffnungen (sekundäre Zone).
- Zone 3: Durchmischung weiter stromabwärts (tertiäre Zone).

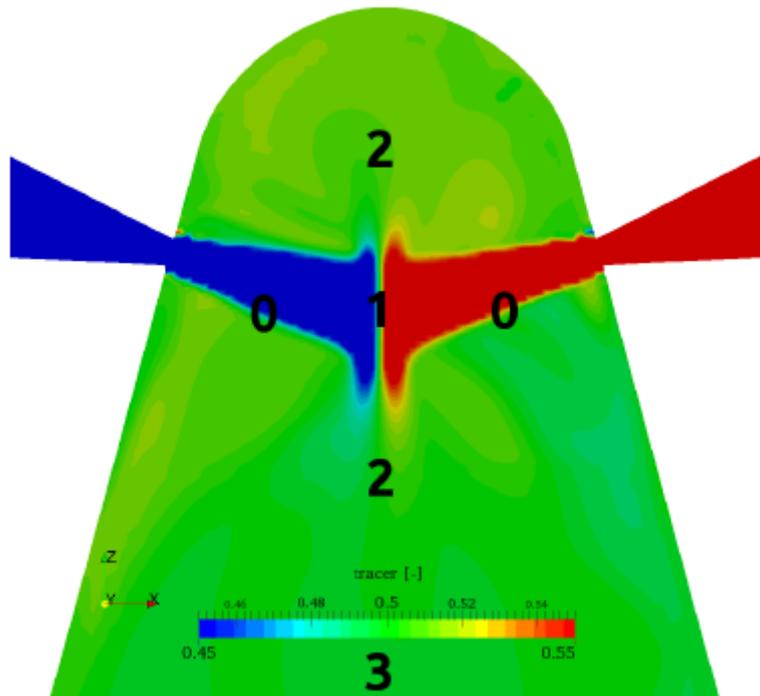


Abbildung 31: Grob skalierte Tracerverteilung im oberen Teil der Mischkammer [29].

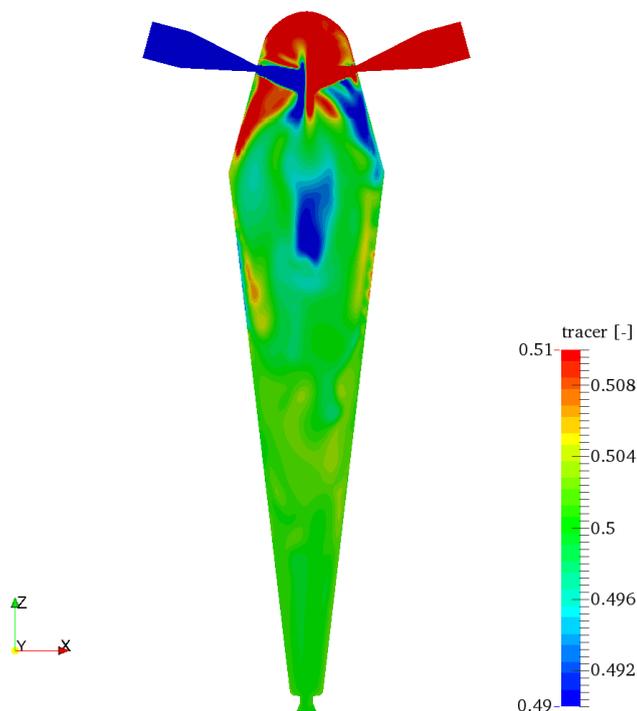


Abbildung 32: Fein skalierte Tracerverteilung der gesamten Mischkammer [29].

Wie die grafische Darstellung in Abbildung 32 bereits vermuten lässt, bestätigen die numerischen Werte und die Breite der Verteilung in Abbildung 33, dass die werkzeugintegrierte Mischkammer grundsätzlich eine hervorragende Durchmischung

erwarten lässt, welche sich mit der Mischkammerlänge noch verbessert. Ab einer Länge von ca. 30 mm ist die Verbesserung nicht mehr relevant.

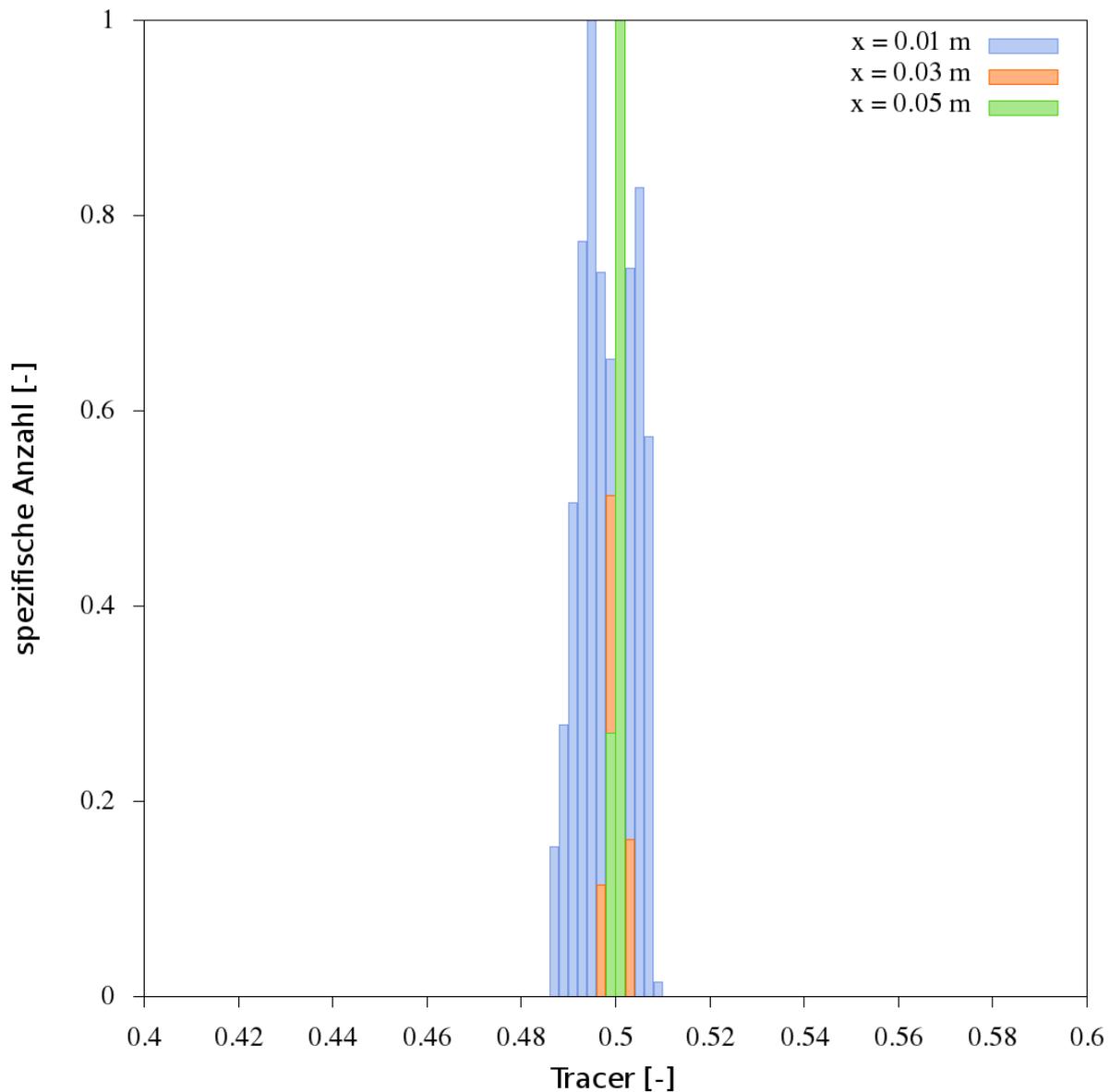


Abbildung 33: Zeitgemittelte Tracerverteilung auf drei ausgewählten Ebenen (Abstände zum Mischkammereintritt) für die integrierte Mischkammergeometrie gemäß Abbildung 29 [29].

Ein Vergleich mit den Simulationsergebnissen von Geometriannahmen am Markt verfügbarer Mischköpfe, dargestellt in Abbildung 34, bestätigt die bessere Mischgüte, beziehungsweise auch das Potential für kürzere Mischkammern. Somit wurde die Schlussfolgerung aus der Simulation abgeleitet, dass das Konzept der integrierten Mischkammer für die In-situ-Polymerisation von Caprolactam vielversprechend und in der Realität umsetzbar ist [29].

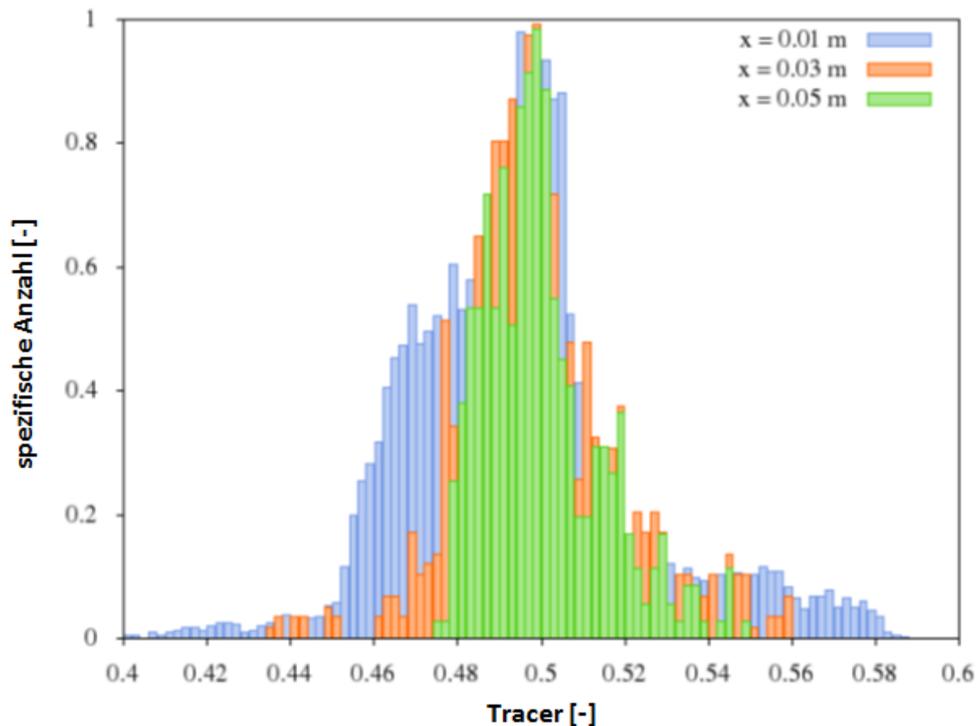


Abbildung 34: Zeitgemittelte Tracerverteilung auf drei ausgewählten Ebenen (Abstände zum Mischkammereintritt) für die Vergleichsgeometrie „Stand der Technik“ [29].

3.1.7.2. Variante 2

Für die in Abbildung 30 dargestellte reduzierte und somit merklich optimierte Variante wurden als Eingangsparameter für die Simulation zunächst folgende Parameter spezifiziert:

- Niedriger Volumenstrom: $5 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ pro Injektionsseite
- Hoher Volumenstrom: $25 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ pro Injektionsseite
- Medium: Caprolactam
- Mediumtemperatur: 120°C
- Viskosität: $10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

Ziel dieser Simulationen sollte auch sein, zunächst die geometrischen Verhältnisse (Eintrittswinkel, Abstände, Querschnitte...) zwischen Zuführbereich und Mischbereich zu verbessern und die Mischeffizienz bei verschiedenen Austragsgeschwindigkeiten beurteilen zu können [30].

Abbildung 35 zeigt, dass sich die Strömungen aus den jeweiligen Düsen gegenseitig ablenken. Die Strömungsfelder sind unabhängig vom Volumenstrom ähnlich und unterscheiden sich nur in der Höhe des Betrages.

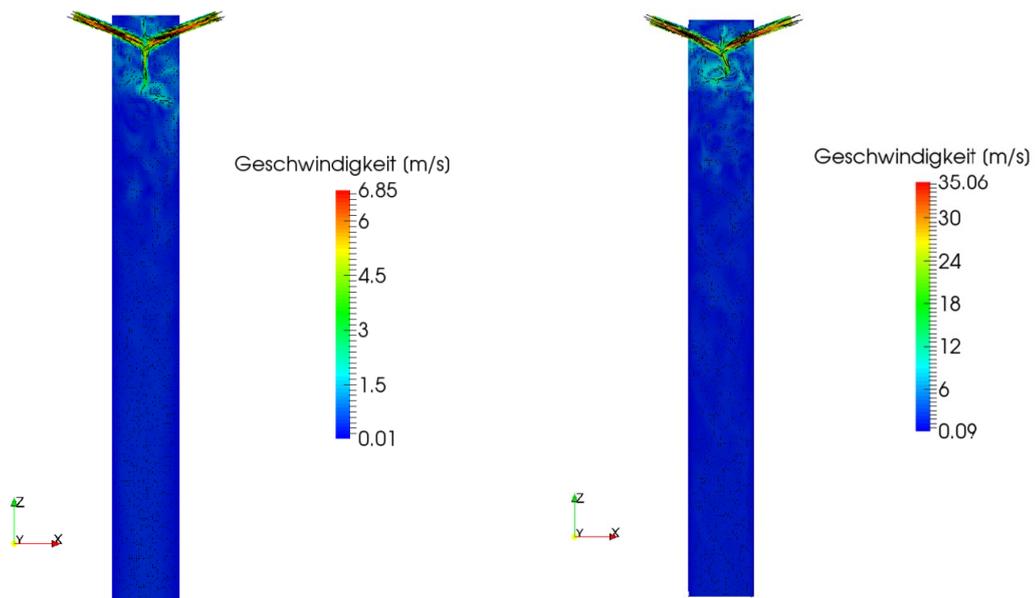


Abbildung 35: Geschwindigkeitsverteilung bei niedrigem und hohem Volumenstrom [30].

Auch bezüglich der Tracerverteilung zeigt sich ein nahezu volumenstrom-unabhängiges Ergebnis. Wie Abbildung 36 zeigt, ist selbst bei geringem Volumenstrom eine gute Durchmischung der Tracer, auch vergleichbar mit den Ergebnissen der Variante 1 im Auslassrohr, gegeben.

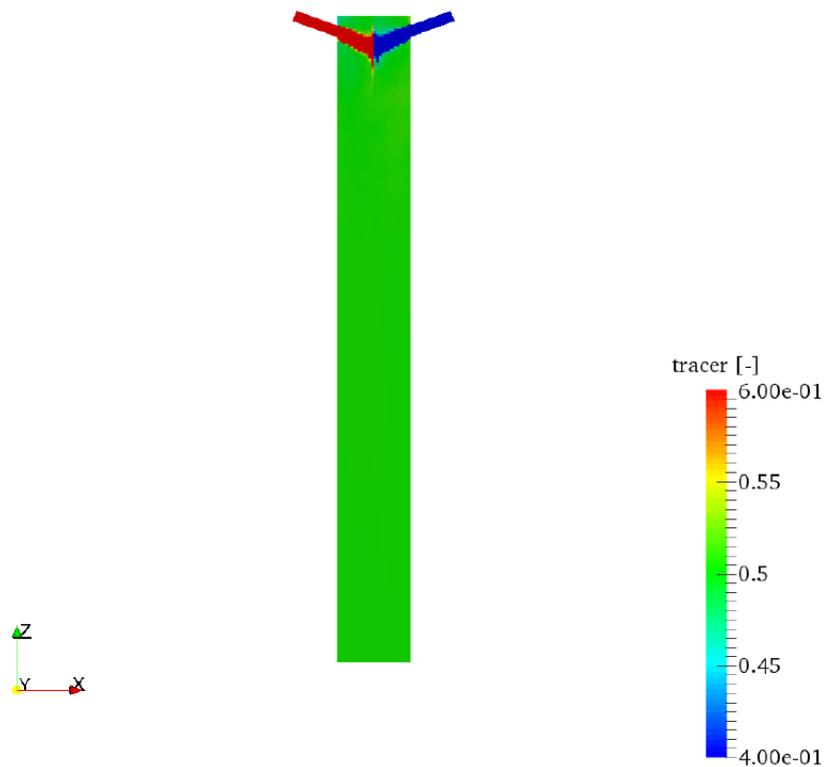


Abbildung 36: Gemittelte Tracerverteilung beim geringen Volumenstrom [30].

In Abbildung 37 ist dargestellt, wie sich die Verteilung der Tracer Partikel in Abhängigkeit von der Mischrohrlänge verhält. Wie zu erwarten führt eine Verlängerung des Mischrohrs zu einer Reduktion der Verteilungsbreite (Optimum). Auch ist bereits bei einer Mischrohrlänge von 50 mm ein absolutes Maximum (100 % Durchmischung) erreicht. Wie eingangs beschrieben ist die Reduktion des Angussvolumens eine vorrangige Zielsetzung, womit auch der notwendige Bauraum reduziert werden kann. Einer weiteren Reduktion der Mischrohrlänge steht vermutlich nicht der entscheidende Verlust der Mischqualität entgegen, sondern vielmehr die Notwendigkeit ausreichender Werkzeugstabilität und Herstellbarkeit.

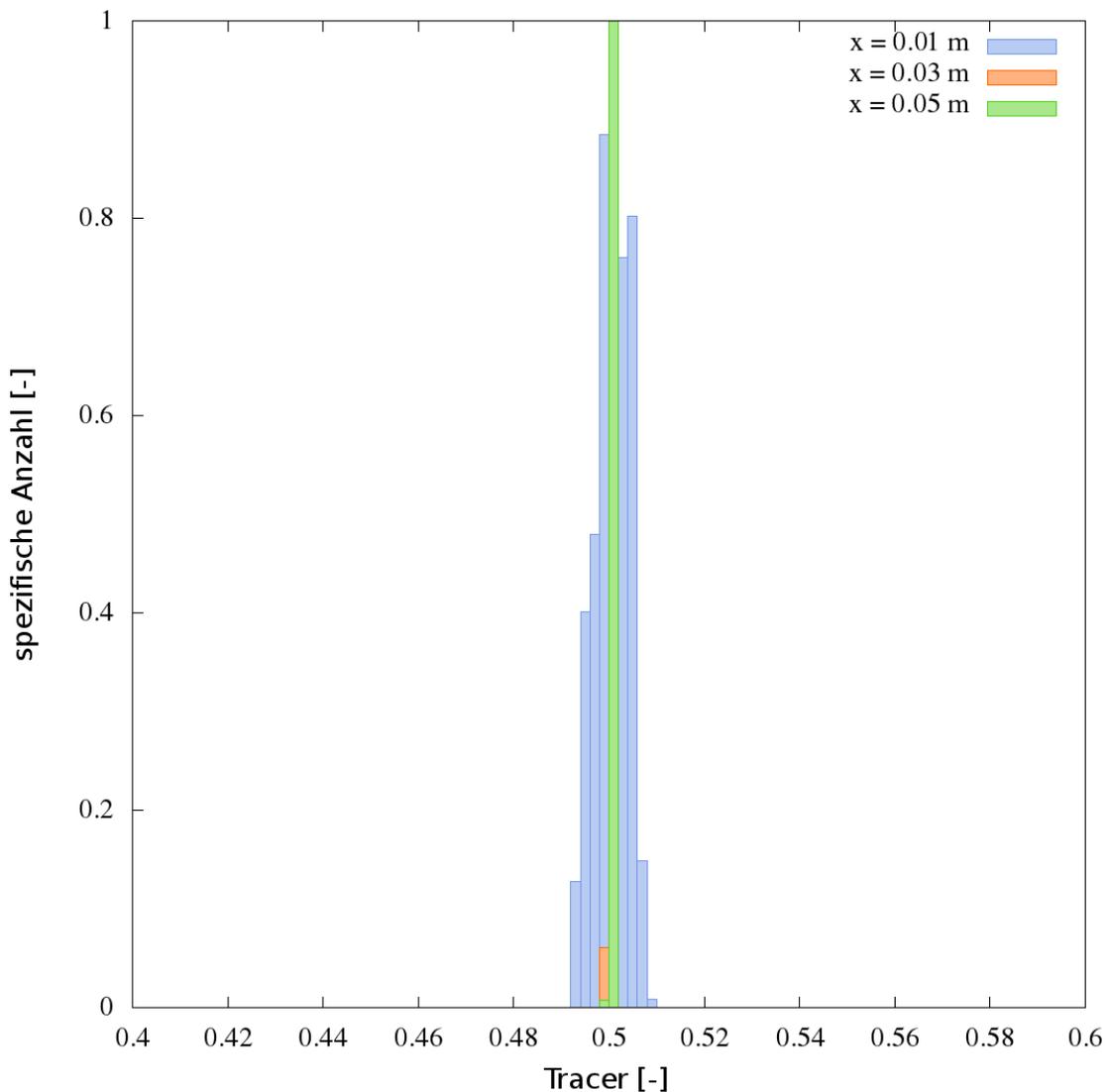


Abbildung 37: Homogenitätsverteilung in Abhängigkeit von der Düsenlänge für die Mischkammergeometrie laut Abbildung 30 [30].

Wie in Abbildung 36 und Abbildung 37 ersichtlich, konnten auch mit der fertigungstechnisch optimierten Mischkammergeometrie hervorragende Mischgüten in der Simulation dargestellt werden. Eine weitere Optimierung erschien daher vorerst nicht erforderlich.

3.1.8. Umsetzung im Plattenwerkzeug

Zur Verifizierung der Simulationsergebnisse wurde im Folgenden ein Plattenwerkzeug konstruiert, welches ein umfangreiches Testprogramm zur Überprüfung sowohl der Simulationsergebnisse als auch hinsichtlich der Eignung der gewählten Werkzeugkomponenten ermöglichen sollte.

Wesentliche Rahmenbedingungen, welche die Nutzung einer parallel in Entwicklung befindlichen ENGEL Spritzgießmaschine V-DUO 700 erlaubten waren:

- Werkzeug-Einbauhöhe: 350 mm - 950 mm
- Maximaler Plattenabstand: 1500 mm
- Maximale Aufspannfläche: 1000 mm * 1440 mm
- Minimale Aufspannfläche: 675 mm * 770 mm
- Maximales Werkzeug-Gewicht: 7 t

Um möglichst rasch zu ersten Erkenntnissen hinsichtlich der tatsächlich erzielbaren Mischqualitäten zu gelangen, wurde zu Beginn auf die Möglichkeit der Herstellung von Bauteilen verzichtet. Stattdessen wurde nur die Düsenseite hergestellt, um einen Materialaustrag darstellen zu können. Somit wurde vorerst nur das Mischsystem, bestehend aus Mischkammer und Düsensystemen umgesetzt. Der restliche Formaufbau diente einstweilen nur als Montageträger und Platzhalter für gegebenenfalls später folgende Ergänzungen.

Abbildung 38 zeigt das vorerst wesentlichste konstruktive Detail zur Ausarbeitung der Anlage- und der Dichtgeometrien.

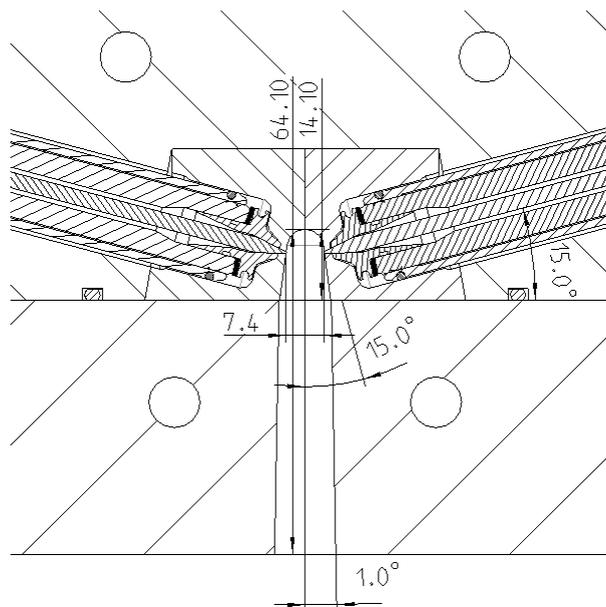


Abbildung 38: Dimensionale Detaildarstellung des Mischkammerbodens im Plattenwerkzeug auf Basis der Simulationsergebnisse.

Obwohl eine Reduktion des Mischkammerquerschnitts in Richtung des Bauteils auf Basis der Simulationsergebnisse nicht als notwendig erachtet wurde und somit die Angussbuchse in einem einteiligen Einsatz hätte gefertigt werden können, wurde diese im Plattenwerkzeug dennoch, wie in Abbildung 39 dargestellt, dreiteilig ausgeführt. Dies ermöglicht durch die verbleibende Option bei unzureichender Mischqualität, den Querschnitt jederzeit in Richtung des Bauteils verjüngen zu können und eine Reinigung durch entsprechende Demontagemöglichkeiten zu erleichtern. Zudem sind in der dargestellten Ausführung die Dichtsitze der Düsen im Werkzeugeinsatz fertigungstechnisch einfacher herzustellen, beziehungsweise auch bei Bedarf abzuändern.

Trotz der Reduktion der zur Angussentformung erforderlichen Anzahl der prozesswirksamen Trennebenen, zeigen die Abbildung 39 im Überblick und die Abbildung 40 im Detail, dass eine Vielzahl von Bereichen unmittelbar im Übergangsbereich zwischen den Düsen und der Mischkammer gegeben sind, die gegen das Eindringen beziehungsweise das Austreten des Caprolactams abgedichtet werden müssen. Im Speziellen sind dies die Übergänge zwischen:

- Der Düsenadel und dem Werkzeugeinsatz,
- dem Düsenkopf und dem Werkzeugeinsatz,
- dem Düsenschaft und dem Werkzeugeinsatz sowie
- den unterschiedlichen Werkzeugeinsätzen.

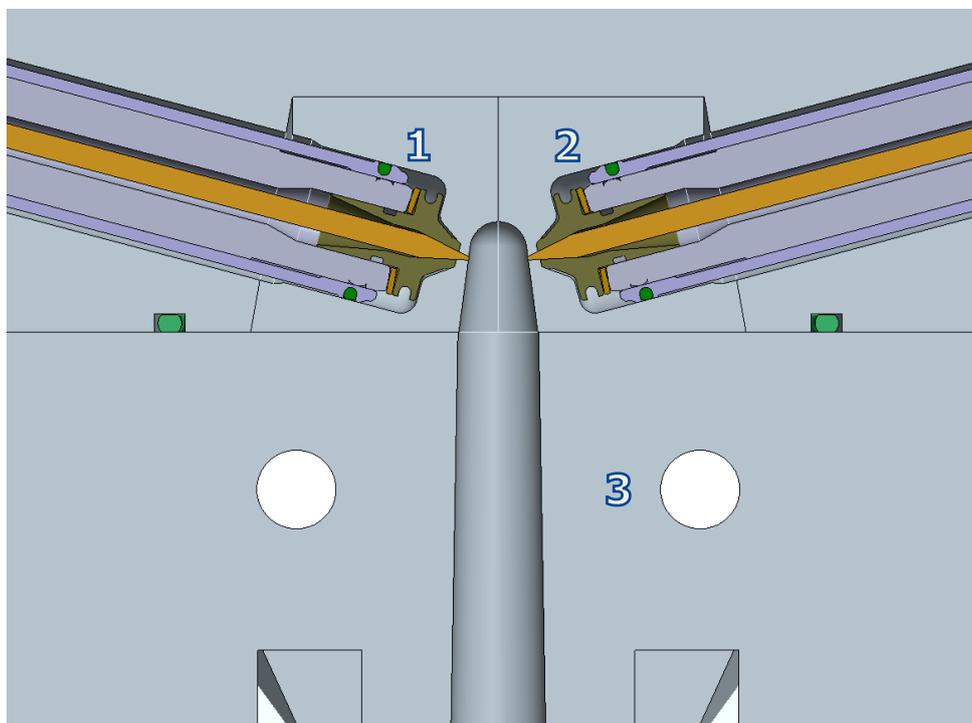


Abbildung 39: Schnittdarstellung der Dichtbereiche bei einer 3-teiligen Ausführung der Mischkammer.

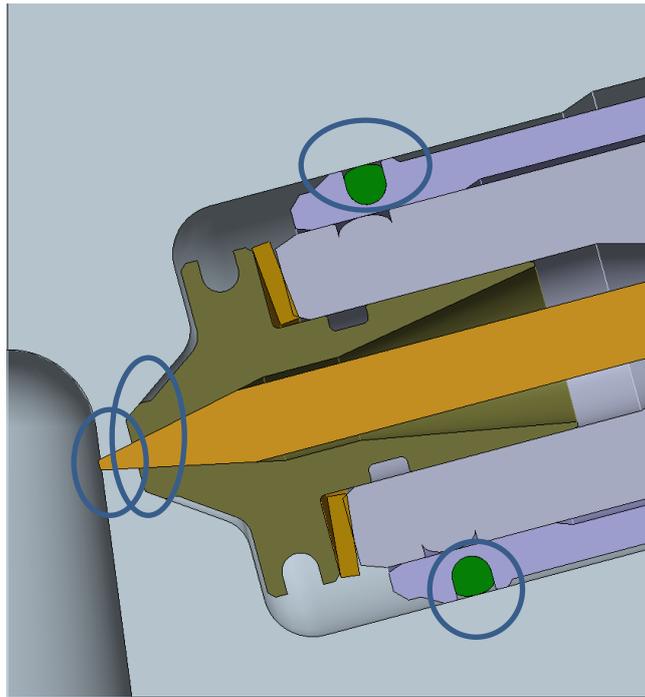


Abbildung 40: Detaildarstellung der Dichtbereiche zwischen Düsenkopf und Werkzeugeinsatz.

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, sind mit der Abdichtung einige Herausforderungen verbunden, wobei ein möglicher Austritt von Caprolactam im Mischkammerbereich in seinen Konsequenzen zu unterscheiden ist:

- Das Caprolactam tritt wiederholt ungehindert aus und polymerisiert nicht → umfangreiche Verunreinigungen und unzureichende Bauteilqualität wegen eines falschen Mischungsverhältnisses.
- Das Caprolactam füllt einmalig einen Hohlraum und polymerisiert nicht oder nicht vollständig → mögliche Korrosion und Verunreinigungen bei der Demontage.
- Das Caprolactam füllt einen Hohlraum und polymerisiert = Autoversiegelung → Demontageprobleme beziehungsweise bei beweglichen Elementen Hinderung jeglicher weiterer Bewegung. Auch besteht die Gefahr der Verunreinigung oder der Beschädigung von Werkzeulementen oder der Düsenadeln durch das Anhaften von Flit.

Selbst das unmittelbare Umfeld der Mischkammer hat eine Vielzahl an Anlageflächen, welche entsprechend Tabelle 6 abzudichten sind. Die Ausführung der Dichtfunktion kann dabei entweder als metallischer Sitz oder in Form eines elastomeren Dichtungsringes erfolgen. Bei Ausführung in Form eines metallischen Sitzes sind die Einhaltung der in Abbildung 41 vorgegebenen Toleranzen und Oberflächenqualitätsvorgaben wesentlich.

Tabelle 6: Herausforderungen der Abdichtung im Umfeld der Mischkammer und ihre Wechselwirkungen.

Bereich	Ausführung	Problem	Wirkung	Folgeschäden	Mögliche Maßnahme
Düsennadel/ Werkzeugeinsatz	Metallisch – konischer Sitz	Ablagerungen	Unzureichende Abdichtung	Unkontrollierter Materialaustritt und Nadelbruch	Zylindrischer Sitz - Ausräumfunktion
Düsenkopf/ Werkzeugeinsatz	Metallisch	Materialaustritt	Verriegelung	Demontageprobleme	Dichtring
Düsenschaft/ Werkzeugeinsatz	Dichtring	Materialaustritt	Verriegelung	Demontageproblem	Mehr Vorspannung
Werkzeugeinsatz1/ Werkzeugeinsatz2	Metallisch	Material- eintritt in Spalt	Verklebung	Keiner	Keine erforderlich
Werkzeugeinsatz2/ Werkzeugeinsatz3	Metallisch	Material- eintritt in Spalt	Verklebung	Keiner, solange die zweite Trennebene nicht benötigt wird	Dichtring

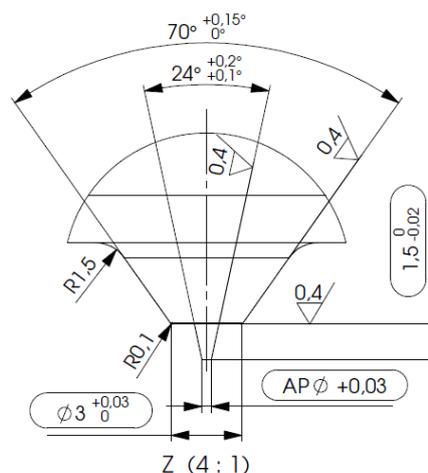


Abbildung 41: Ausführungsvorgaben der metallischen Dichtbereiche der Vorkammer [31].

Zusätzlich ist das Kaltkanalsystem in sich selbst ausreichend abzudichten, zum Beispiel der Eintritt der Nadeln in den Verteilerblock oder der Übergang vom Verteilerblock in die Düse (Abbildung 42). Sofern ein Austritt nur einmalig im Zuge der Inbetriebnahme stattfindet und dann zur Abdichtung beiträgt, ohne im Folgenden Verschleiß oder Korrosion zu verursachen, ist dieser zulässig.

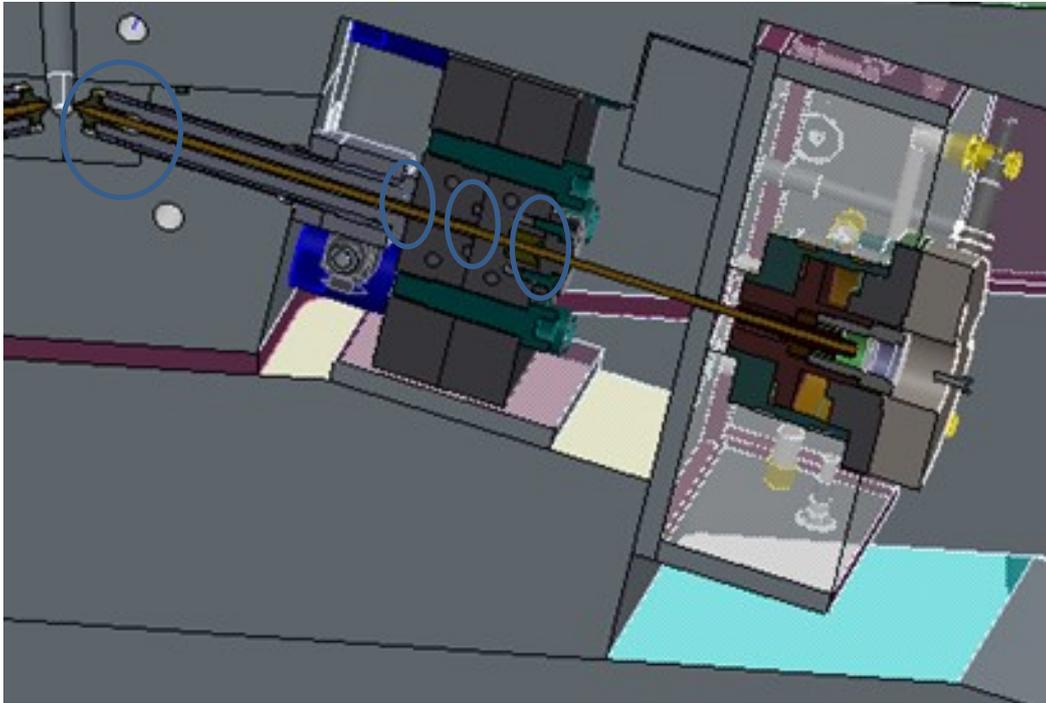


Abbildung 42: Detaildarstellung der Dichtbereiche durch den gesamten Düsenquerschnitt.

Abbildung 43 zeigt eine Darstellung der Anschlüsse für die pneumatische Nadelbetätigung, die elektronischen Sensoren für die Nadelpositionsabfrage, die Anschlüsse für die Temperierung des Verteilerblockes als auch der Düsen, sowie den Anschluss für die Zuführung der Komponenten. Es lassen sich auch die Herausforderungen hinsichtlich Bauraum und die damit verbundene potentielle Gefahr von Leckagen, die unmittelbar Auswirkungen zeigen würden, erkennen.

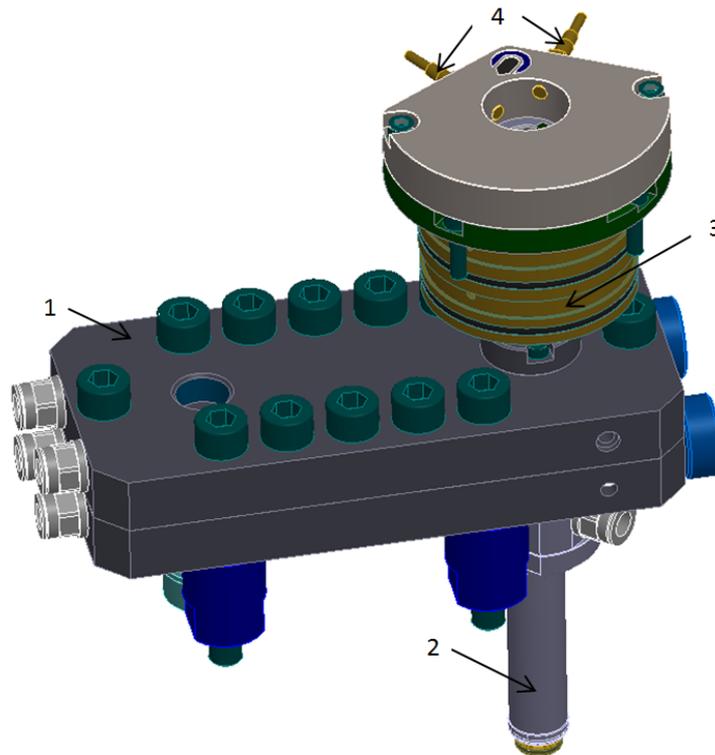


Abbildung 43: 3D-Darstellung des für Caprolactam modifizierten Kaltkanalsystems E3-TS_00158.01 bestehend aus Verteilerblock (Pos. 1), Düse (Pos. 2) und Nadelbetätigung (Pos. 3) mit Endlagenabfrage (Pos. 4) [32].

Abbildung 44 zeigt den fertiggestellten Plattenwerkzeug-Grundaufbau montiert auf einer ENGEL V-DUO 700 mit einer Anordnung der Mischkammer, in der der Materialaustritt zu Testzwecken nach unten erfolgen kann.



Abbildung 44: Foto des ersten Testaufbaus ohne montierte Medienleitungen.

3.1.9. Prozessversuche mit dem Plattenwerkzeug und deren Auswertung

Zur Verifizierung der grundsätzlichen Eignung der verbauten Komponenten wurde schrittweise vorgegangen.

3.1.9.1. Systematischer Dichtheitstest

Um die Dichtheit der eingesetzten Düsenkomponenten zu testen, wurden diese entsprechend dem in Tabelle 7 dargestellten Stufenplan beansprucht. Hierfür wurden die Kaltkanalsysteme im gefüllten Zustand druckbeaufschlagt, indem die Verschlussdüsen geschlossen wurden und aggregatseitig ein definierter Druck aufgebracht wurde.

Während der Haltezeit wurde sowohl sensorisch der Druckabfall (Δp) erfasst (*Abbildung 45*) als auch visuell auf Dichtheit kontrolliert. Anschließend wurde das Material ausgespritzt, neu aufdosiert und der Zyklus der Prüfung wiederholt.

Tabelle 7: Versuchsplan für die stufenweise Prüfung der Dichtheit.

Stufe	Druckprobe (bar)	Haltezeit (s)	Zyklen
1	20	5	200
2	40	5	200
3	60	10	100
4	80	15	100
5	100	15	100
6	120	15	150
7	140	15	60
8	160	15	40

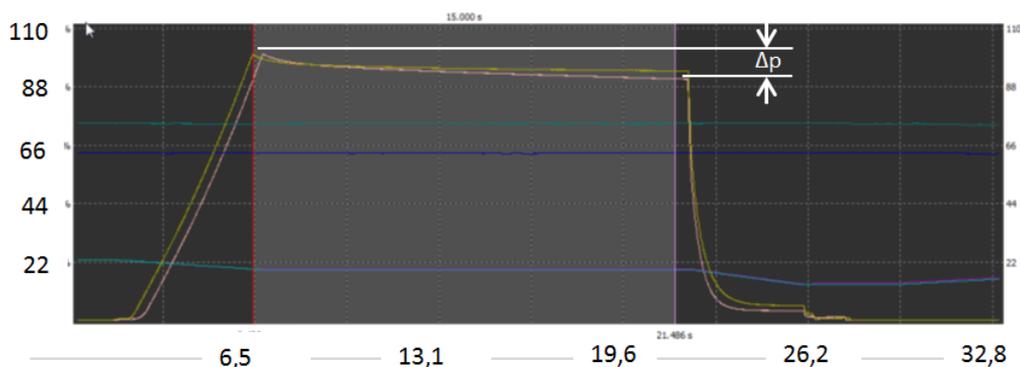


Abbildung 45: Screenshot des Prozessmonitors zur Visualisierung der Drucküberwachung der Spritzaggregate (Ordinate: Druck (bar); Abszisse: Zeit (s)).

Trotz des in Abbildung 45 wahrnehmbaren Druckabfalls konnte visuell am Werkzeug kein Materialaustritt festgestellt werden. Bei folgenden Tests im Hause Engel konnte systematisch nachgewiesen werden, dass der Druckabfall mit der Schlauchatmung im Bereich zwischen Spritzaggregat und Werkzeuganschlüssen zusammenhängt.

3.1.9.2. Ansprechverhalten der Düsenansteuerung

Da die erzielbare Polymerisationsqualität maßgeblich von den Mischungsverhältnissen abhängig ist, und diese wiederum von den präzisen Öffnungshüben der Ventile, wurde untersucht, inwiefern der an die Nadelbetätigungszyylinder angelegte pneumatische Druck relevant ist. Die Betätigungszyylinder wurden mit induktiven Wegsensoren ausgestattet, welche eine hochaufgelöste Auswertung der Nadelbewegung ermöglichen. Abbildung 46 zeigt wie erwartet, dass ein erhöhter Druck im Betätigungszyylinder, wenn auch nur geringfügig die Dauer (T1) der Düsenbewegung reduziert, aber das Ansprechverhalten (T2) merklich beschleunigt. Unterschiede im Ansprechverhalten der beiden Düsen wurden von Firma Engel softwaretechnisch durch eine Kompensationszeit gelöst, um auch sicherzustellen, dass die Ventilöffnung mit der Bewegung des Injektionskolbens abgestimmt ist und es zu keinen ungewollten Druckspitzen im System kommen kann.

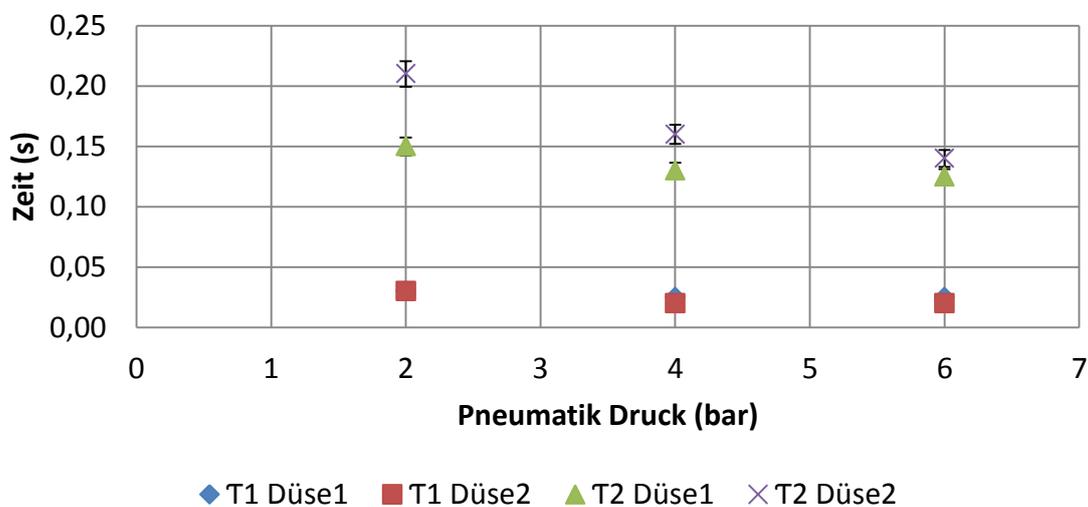


Abbildung 46: Darstellung der Abhängigkeit der Nadelbewegung vom Ansteuerdruck.

3.1.9.3. Ermittlung der Austragsleistung vs. Massedruck

Zur weiteren Beurteilung der Prozessfähigkeit der Systeme von Firma Günther wurde noch die Kennlinie ermittelt, welche den für eine spezifische Austragsleistung benötigten Druck darstellt. Hierfür wurden die Austragsmenge als Volumenstrom pro

Aggregatsseite und der Massedruck im jeweiligen Kolbenvorraum gemessen. Abbildung 47 zeigt diesen Zusammenhang.

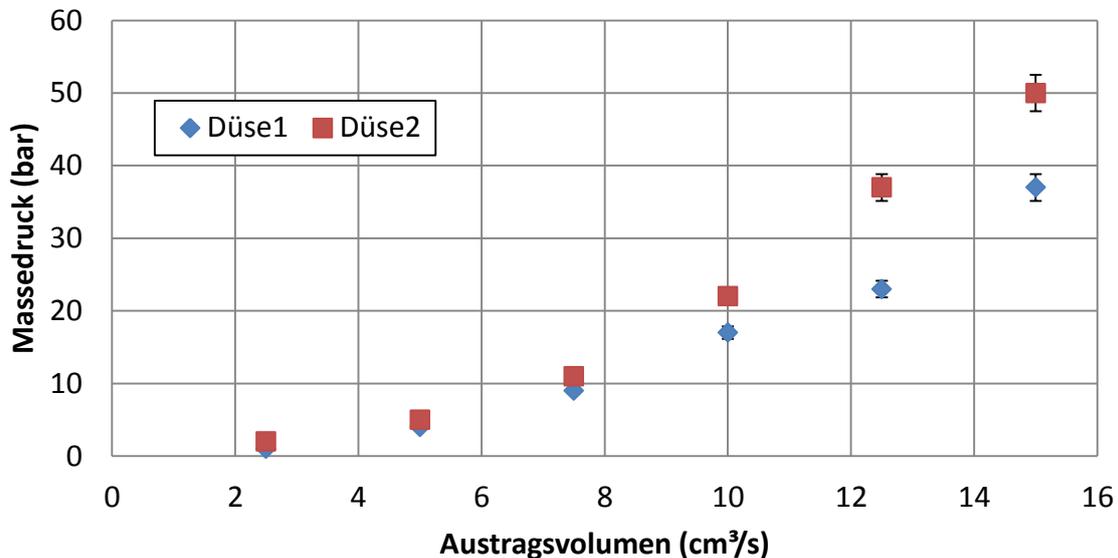


Abbildung 47: Darstellung der Abhängigkeit des Massedrucks vom vorgegebenen Austragsvolumen im Vergleich der beiden Düsen.

Grundsätzlich konnte eine ausreichende Austragsmenge mit akzeptablen Druckverlusten realisiert werden. Jedoch wurden, wie in Abbildung 47 ersichtlich, zwischen Düse 1 und Düse 2 bei größeren Austragsvolumen erheblich unterschiedliche Verläufe festgestellt. Kontrollmessungen haben ergeben, dass der Einfluss der Temperierung als auch der Düsengeometrie ausgeschlossen werden kann. Somit muss diese Abweichung durch die Fertigungstoleranzen in der Herstellung der Nadelverschlussfläche begründet sein.

3.1.9.4. Druckvariation durch Reduktion des Düsenhubes

In der ursprünglichen Bauweise lässt sich durch die Änderung des Düsenhubes bei identischem Volumenstrom keine Änderung des Massedruckes beim Ausspritzen erreichen, insbesondere, weil mechanisch in der Ursprungsausführung keine Hubverkürzung realisierbar ist.

In einem weiteren Test wurde daher versucht, den entsprechenden Druck auf einer Seite durch eine Hubveränderung derart zu variieren, dass daraus an beiden Aggregaten ein vergleichbarer Druckabfall beim Ausspritzen resultiert.

Als eine erste Variante wurde versucht, den Düsenhub mechanisch durch ein auf der Düsenrückseite angebrachtes Blockelement (Abbildung 48) zu begrenzen. Eine Variation der Begrenzung bedarf einer mechanischen Abstimmung der Bolzenlänge.

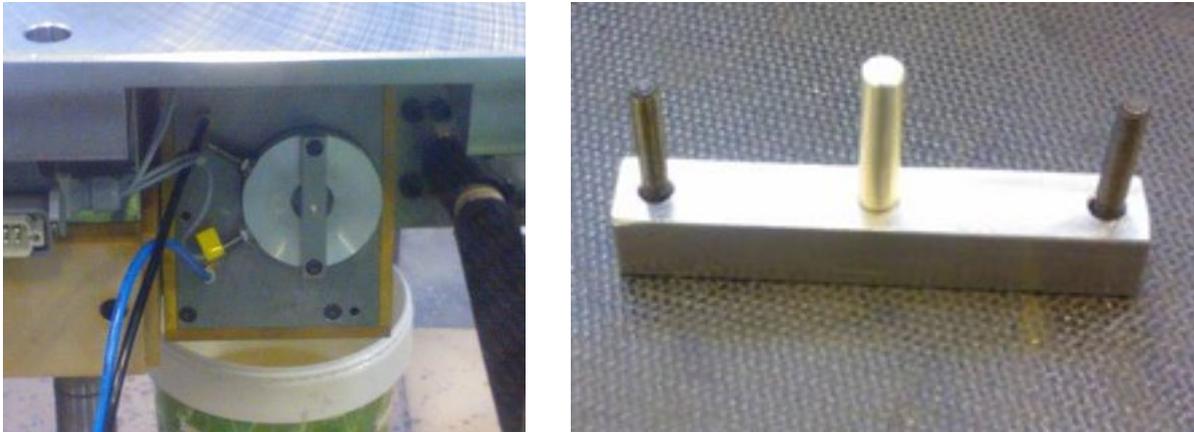


Abbildung 48: Am Nadelbetätigungszyylinder verbautes Blockelement mit zentralem Anschlagbolzen zur mechanischen Hubbegrenzung des Nadelhubs.

Wie in Abbildung 49 erkennbar, konnte mittels dieser einfachen mechanischen Maßnahme eine wesentliche Vereinheitlichung der Kennlinien erreicht werden, dennoch sollte die Hubverstellung zukünftig noch feinfühlicher und variabel erfolgen können.

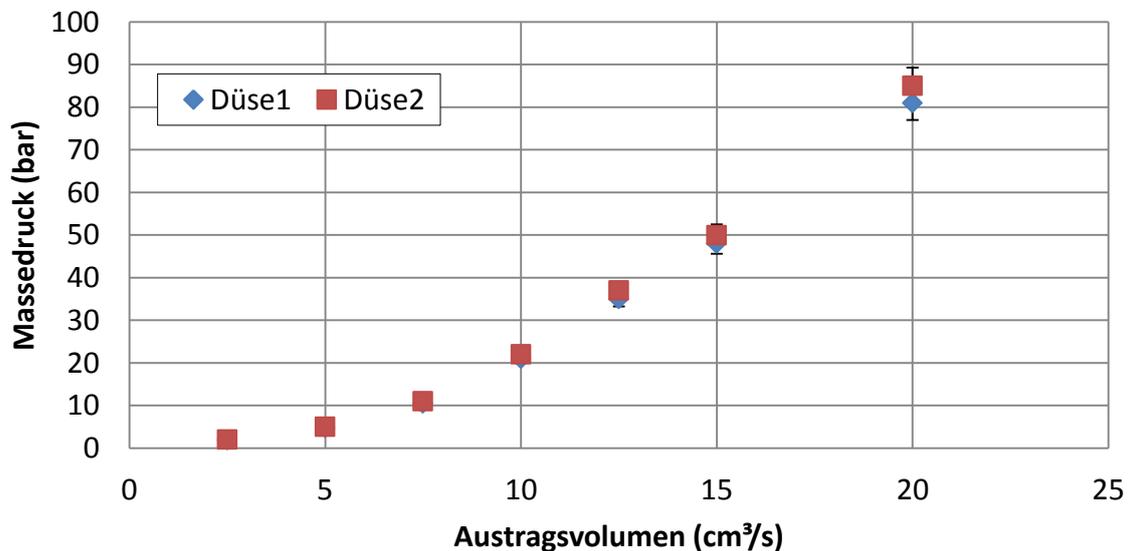


Abbildung 49: Darstellung der Abhängigkeit des Massedrucks vom Austragsvolumen im Vergleich der beiden Düsen nach erfolgreicher Variation des Düsenhubes.

3.1.10. Aus dem Plattenwerkzeug abgeleitetes Optimierungspotential

Trotz weitgehend vielversprechender Resultate sind bezüglich der unten beschriebenen Punkte noch weitere Tests und Überarbeitungen erforderlich:

- Durchführung von praxisnahen Langzeittests der chemischen Beständigkeit der Dichtungsringe im Mischsystem (Mischkammer und Zuführung).
- Sicherstellung der Zugänglichkeit und Reduktion der mit einem Dichtungswechsel verbundenen Montageaufwände.
- Sicherstellung der Verfügbarkeit von nicht geklebten Dichtungen.
- Ein Einstellen des Düsenhubs nicht mittels der induktiven Endschalter, sondern zwischenzeitlich mittels Anschlagbalken ermöglichen.
- Final sollte der Düsenhub über eine frei zugängliche variable Verschraubung oder durch die Nutzung servoelektrischer Antriebe einstellbar sein.
- Die Mischkammer-Geometrie sollte mit nochmals reduzierter Entformungsschräge versehen werden.

3.1.11. Richtlinien für eine Serienumsetzung

Aus den in den bisherigen Punkten beschriebenen Erkenntnissen lassen sich jedoch bereits folgende Richtlinien für eine potentiell erfolgreiche Umsetzung eines werkzeugintegrierten Mischsystems ableiten:

- Die Nadeldichtfläche sollte fein erodiert ausgeführt sein, um eine ausreichend präzise Dichtfläche zu gewährleisten.
- Dichtelemente in beweglichen Ebenen müssen elastisch und caprolactambeständig ausgeführt werden.
- Schäftungen beziehungsweise auch Verklebungen der Dichtringe sind nicht zulässig, da die Verklebung vom Caprolactam angelöst wird.
- Die Mischkammer sollte zwecks Reinigungsmöglichkeit und besserer Bearbeitbarkeit der Oberfläche zweiteilig ausgeführt werden.
- Die Düsen sollten in einer Winkelanordnung positioniert werden, um ein wechselseitiges Eindringen der Komponenten zu erschweren.
- Eine Füllung der Mischkammer entgegen der Schwerkraft führt zu besserer Materialqualität hinsichtlich der Anzahl von Lufteinschlüssen.
- Die Zugänglichkeit der Anschlüsse für die Pneumatik, die Kühlung, das Material und die Sensorik muss gegeben sein, um ein rasches und problemloses An- und Abschließen beim Rüsten zu ermöglichen.
- Für umfangreiche thermische Isolierung sorgen, um sowohl den Energiebedarf als auch die Verbrennungsgefahr für den Bediener zu reduzieren.

3.1.12. Patentausarbeitung

Wie auch zu Projektbeginn vereinbart, wurde entschieden, entsprechend der positiven Ergebnisse und der Zielsetzung, diese weiterzuentwickeln und kommerziell zu nutzen, die gemeinsame Arbeit wesentlich ihrer Neuartigkeit zeitnah vor der öffentlichen Präsentation patentrechtlich zu schützen.

Dementsprechend wurde im Sinne der Erfinder DI Dr. Lorenz Reith, Manuel Weissinger, Dr.-Ing. Norbert Müller, Gerhard Speneder und Gerald Schöfer die Patentanmeldung A-50695/2016 mit dem Titel „Verfahren zur Herstellung von Kunststoffbauteilen“ am 29.07.2016 eingereicht.

3.1.13. Umsetzung im Messewerkzeug für die K2016 in Düsseldorf

Entsprechend dem Kapitel 3.1.11 wurde das werkzeugintegrierte Mischsystem im Messewerkzeug zur Herstellung der Leichtbauschaufel (Abbildung 50) wie folgt umgesetzt:

- Merklich kompaktere Bauweise des Düsensystems.
- Verwendung von einteiligen, nicht geklebten, spezialangefertigten Dichtungsringen aus Kalrez.
- Konstruktion einer geänderten Mischkammer, gekennzeichnet durch eine Reduktion der Entformungsschräge, sowie einer Verkleinerung des Mischkammerdurchmessers.
- Ausführung der Mischkammer ist zweiteilig.
- Integration eines Auswerfers für die Mischkammer, um trotz der reduzierten Entformungsschräge den Angusszapfen jedenfalls entformen zu können.
- Füllung der Mischkammer von unten nach oben.

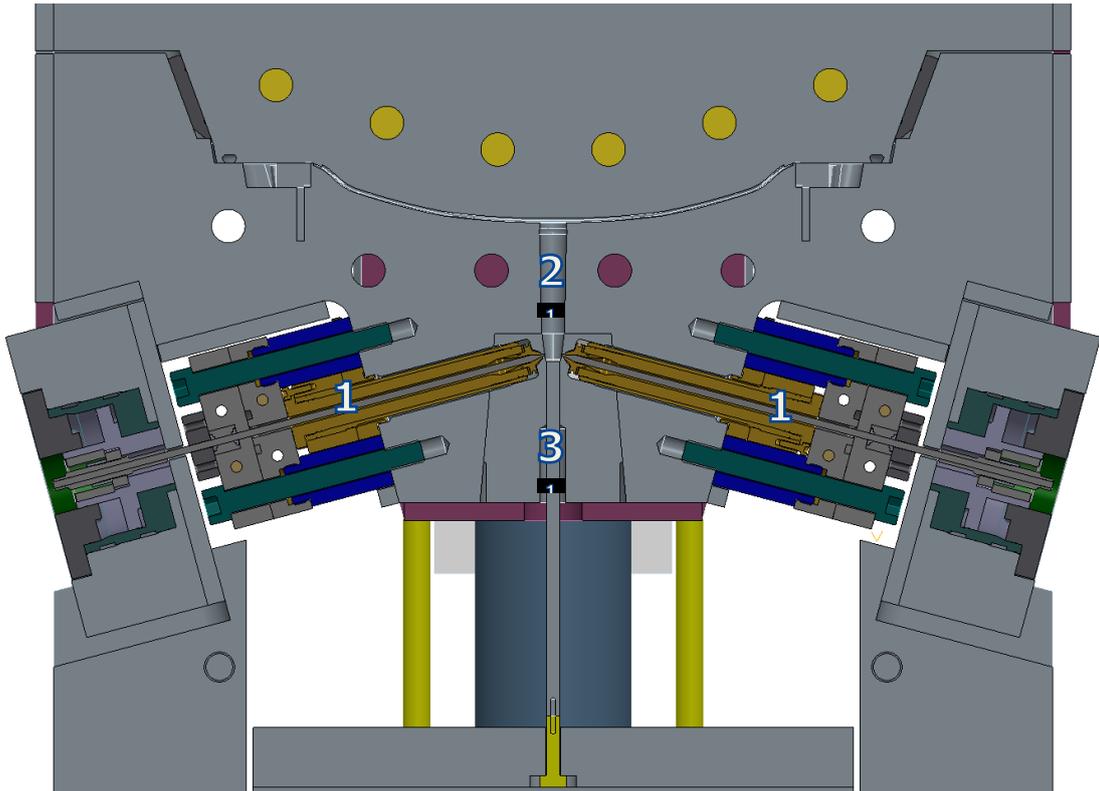


Abbildung 50: Schnittdarstellung des werkzeugintegrierten Mischsystems im Messeaufbau, bestehend aus kompakterem Düsensystem (Pos. 1), optimierter Mischkammer (Pos. 2) und Auswerfersystem in vertikaler Anordnung (Pos. 3).

Die kompakte Bauform des Kaltkanalsystems, die Anordnung der Anschlüsse für die Temperierung, die pneumatische Nadelbetätigung und die Komponentenzuführung (Abbildung 51) ermöglichen eine entsprechende Reduktion der Werkzeugeinbauhöhe.

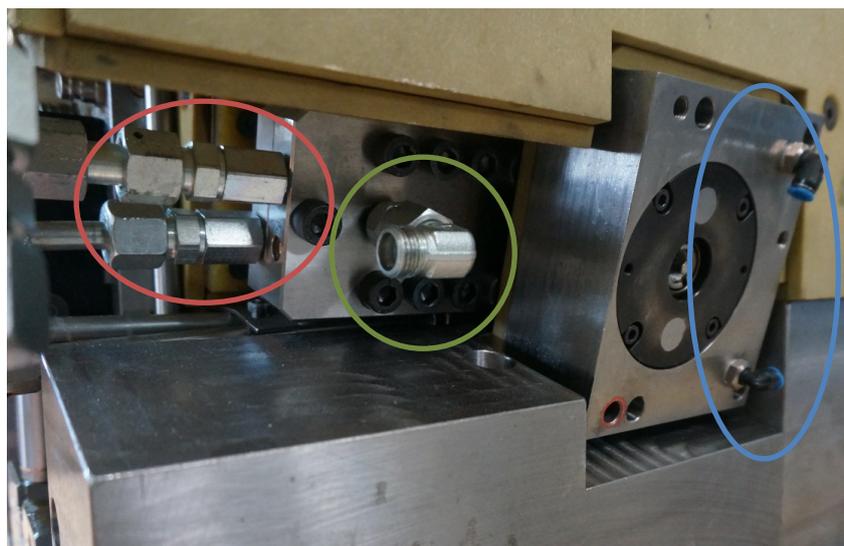


Abbildung 51: Foto des verbauten kompakteren Kaltkanalsystems und der Anschlüsse für Temperierung (rot), Material (grün) und Pneumatik (blau).

3.1.14. Verifizierung

Bereits die ersten Bemusterungen und die Begutachtung der resultierenden Bauteile haben bestätigt, dass die gewählte Ausführung hervorragende Resultate hinsichtlich der Mischgüte und Oberflächenqualität ermöglicht. Abbildung 52 zeigt zur Bestätigung die Oberfläche vom Angusszapfen und dem umliegenden Bereich, welche eine absolut homogene und blasenfreie Oberfläche aufweisen und sich rückstandlos und mit geringer Kraft aus dem Werkzeug entformen haben lassen.



Abbildung 52: Foto eines auspolymerisierten Angusszapfens in Werkzeuglage.

Eine mittels CT (Computer Tomographie) durchgeführte Untersuchung zeigt den Lagenaufbau und die durchgängige Infiltration und Polymerisation (Abbildung 53). Es ist keine Porosität erkennbar.

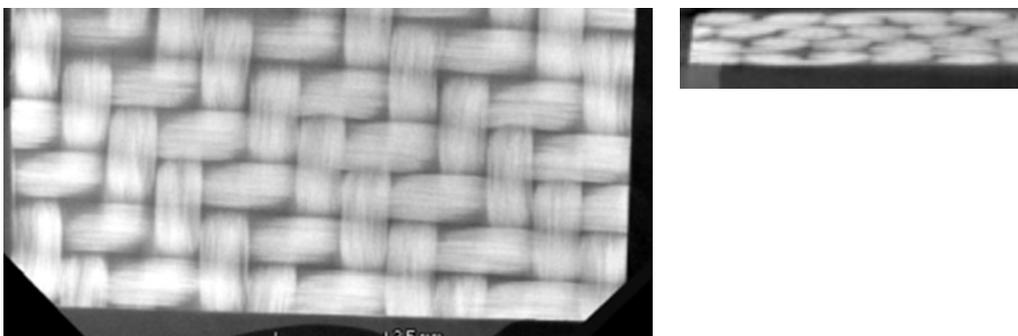


Abbildung 53: Horizontale und vertikale CT Schnittdarstellung einer aus einem Bauteil entnommenen Materialprobe.

Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen die ergänzend zur CT-Untersuchung durchgeführten Mikroskopieaufnahmen eines Querschnitts im Übergang vom In-situ-Polymerisat zum Spritzgussbereich, welche ebenfalls die exzellente Infiltration und auch die störungsfreie Verbindung erkennen lassen.

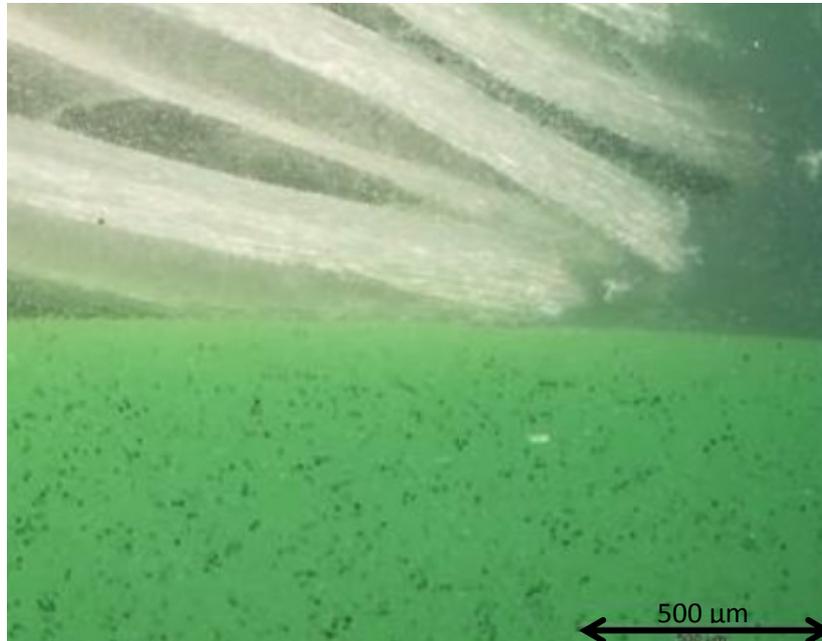


Abbildung 54: Mikroskopieaufnahme der Grenzfläche zwischen dem In-situ-PA6 mit endlos GF Gewebe (weiß) und dem PA6GF30 Kurzglasfaser-Spritzguss (grün).

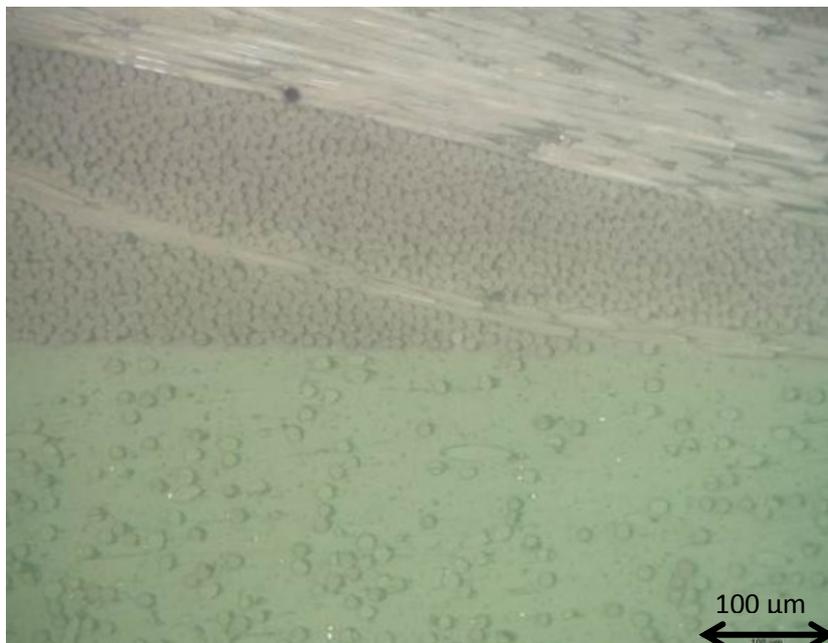


Abbildung 55: Mikroskopieaufnahme der Grenzfläche zwischen dem In-situ-PA6 mit endlos GF Gewebe (weiß) und dem PA6GF30 Kurzglasfaser-Spritzguss (grün).

3.2. Ausführung der Werkzeugabdichtung in der Trennebene

3.2.1. Ausgangssituation

Wie auch in Kapitel 2.3 ausführlich erläutert, ist es von prozentscheidender Bedeutung, die Werkzeugkavität und die damit direkt verbundenen Bereiche, wie zum Beispiel die Mischkammer, unter Berücksichtigung der zur Füllung notwendigen Drücke und der den Ausgangskomponenten geschuldeten niedrigen Viskosität entsprechend dicht auszuführen. Zudem haben Prozessversuche bestätigt, dass eine Evakuierung der Kavität vor Beginn der Bauteilfüllung die zu erzielende Bauteilqualität erheblich verbessert. Somit wurde auch dieser Aspekt in diesem Kapitel entsprechend ausführlich bearbeitet. Vorangegangene, von Firma Schöfer begleitete Projekte, wurden in den in Tabelle 8 beschriebenen Varianten umgesetzt und einer Bewertung unterzogen.

Tabelle 8: Ausführungsvarianten der Abdichtung in der Werkzeuggrennebene.

Ausführung	Beschreibung	Probleme	Vorteile
Metall/Metall Werkzeug- trennung	Analog der Spritz- gusstechnik wird die Trennlinie geschliffen.	Nur für ebene Trenn- ebenen umsetzbar; geringste Verunreinigung führt zu Leckagen.	Günstigste Variante.
Einlege- dichtschnur (kompakt)	Analog der HP- RTM Technik werden in die Trennebene elastische Dicht- schnüre eingelegt, welche bei Ver- pressung das Werkzeug abdichten.	Die Fixierung der Dichtung bei dreidimensional verlaufender Trennebene ist schwierig; mangelnde dauerhafte Beständigkeit der verfügbaren Dichtungs- werkstoffe gegenüber Caprolactam; notwendige häufige Reinigungs- und Wechselintervalle; Bauteile weisen jedenfalls zwischen dem Bauteil- abschluss und der Dichtung einen Grat auf.	Absolut dicht; unempfindlich gegen mechanische Beschädigung; günstig; austauschbar.

Einlege- dichtschnur (Seal Star)	In beinahe voller Länge aufblasbarer Schlauch, welcher sich der Geometrie lokal anpasst.	Die dauerhafte Beständigkeit der verfügbaren Dichtungswerkstoffe gegenüber Caprolactam ist fraglich; zusätzliche Dichtmaßnahmen im Bereich Anfang/Ende sind erforderlich.	Die Dichtheit wird überwacht.
Eine metallische Werkzeug-trennung dichtet auf einem Thermo-plast-Vor-spritzling	In einem dem In-situ-Prozess vorgelagerten Spritzgussprozess, wird ein Thermo-plastbauteil hergestellt. Dieser wird in das In-situ-Werkzeug eingelegt, wodurch dieser im Gesamtverbund sowohl zur Abdichtung dient als auch Funktionalitäten übernehmen kann.	Der Thermoplastbauteil muss vor der Injektion des Caprolactams auf Polymerisationstemperatur gebracht werden und absolut trocken sein, da ansonsten die Polymerisation gestört wird. Es braucht jedenfalls eine zweite Komponente, auch wenn kein funktionaler Vorteil gegeben ist.	Bei jedem Schuss wird eine neue Dichtung in Form des Vorspritzlings eingelegt. Die Dichtung kann in ihrer Form variiert werden und ist in der Herstellung absolut reproduzierbar.
Verpressen des Faser-Gewebes	Die eingelegten Fasergewebelagen werden im geschlossenen Werkzeug lokal soweit verdichtet, dass das Matrixmaterial nicht oder nur sehr erschwert zwischen die Fasern durchdringen kann.	Der Geweberandbeschnitt muss äußerst präzise ausgeführt werden. Eine zu große Verpressung führt zur Schädigung der metallischen Presskante. Die lokale Presskraft ist abhängig vom Winkel zur Hauptentformungsrichtung. Diese Lösung ist nicht vakuumdicht.	Es benötigt keine zusätzlichen Elemente zur Werkzeugabdichtung.

Abdichten mittels Tauchkanten.	Die Werkzeugtrennung wird in Form eines Rahmens ausgeführt, welcher nicht flächig aufliegt, sondern in die Kavität eintaucht.	Äußerst sensibel in der Auslegung; leicht zu beschädigen. Der Prägespalt ist durch die Wärmeausdehnung auch temperaturabhängig; nicht ausreichend dicht.	Der Prägehub ist nahezu beliebig variierbar.
Unterschiedliche Kombinationen der zuvor dargestellten Ausführungsvarianten.	Kombinationen der zuvor dargestellten Ausführungsvarianten.	Anspruchsvoller und teurer.	Keine nennenswerten Vorteile.

Abbildung 56, Abbildung 57 und Abbildung 58 zeigen unterschiedliche Ausführungsvarianten, welche zwar grundsätzlich geeignet erscheinen, aber in wesentlichen Details nicht überzeugen konnten.



Abbildung 56: Abdichtung mittels Thermoplastvorspritzling (schwarz).



Abbildung 57: Abdichtung mittels aufblasbarer Dichtschnur der Ausführung Seal Star (blau) [33].

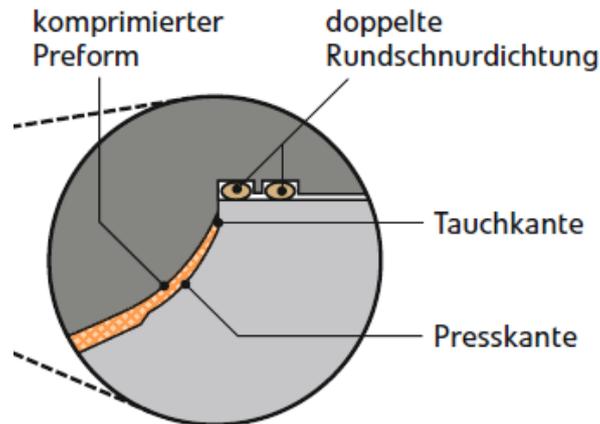


Abbildung 58: Kombination aus Runddichtschnur, mittels Presskante komprimiertem Preform und Tauchkante [2].

Zielsetzung war es daher, eine für das In-situ-Polymerisieren von Caprolactam neuartige Dichtungsvariante für die Werkzeugtrennebene zu entwickeln, welche folgende Aspekte erfüllen sollte:

- Möglichst unempfindlich gegen Beschädigungen durch Fasern.
- Auch für intensiv dreidimensional geformte Trennebenen geeignet.
- Eine Standzeit von mehreren tausend Zyklen.
- Im Bedarfsfall einfach und kostengünstig zu wechseln.
- Beständig gegenüber Caprolactam und die notwendigen Additive.
- Vakuumdicht.
- Abdichtung auch über einen gegebenenfalls erforderlichen positiven Prägehub.
- Lokal im Querschnitt zur Variation der Verpressung abzustimmen.
- Auch für höhere und variable Prozesstemperaturen geeignet.
- Darf die Polymerisation nicht stören.
- Erhalt der Dichtfunktion unabhängig von der Werkzeugtemperatur oder deren Änderung.

3.2.2. Lösungskonzept

Im Rahmen eines Entwicklungsprojektes der Firma Schöfer zur Evaluierung geeigneter Werkzeugwerkstoffe, die in der Verarbeitung von Polyurethanen das Anhaften des Polyurethans an der Werkzeugoberfläche unterbinden sollten, wurde auch der Werkstoff Murseal[®], der vom Unternehmen HASCO unter der Bezeichnung A4200 vertrieben wird, eingehenden Tests unterzogen.

Obwohl dieser polymere Werkstoff nicht für die ursprünglich angedachte Anwendung eingesetzt werden konnte, so war dennoch das Rückstellvermögen bemerkenswert, welches dieser Werkstoff aufweist.

Murseal[®] wurde ursprünglich mit der Zielsetzung, beim Umspritzen von Metallteilen oder von beschichteten, zum Beispiel lackierten, galvanisierten... Einlegeteilen unvermeidbare Maßabweichungen (0,1 mm bis 0,2 mm) auszugleichen, entwickelt. Somit können ohne Beschädigung der Bauteil- oder der Werkzeugoberfläche grat- und nacharbeitsfreie Bauteile hergestellt werden. Standfestigkeiten von 80.000 Zyklen ohne sichtbaren Verschleiß am Dichtelement auch bei der Verwendung von Werkstoffen, wie PA6 GF30, scheinen möglich [34].

Indem Murseal[®] einwandfrei und ähnlich üblicher Werkzeugeinsätze mechanisch bearbeitet werden kann, ist es ein optimaler Ersatzwerkstoff für den konventionellen Dichtbereich eines Werkzeugs [35], [34]. Diese Eigenschaftsbeschreibungen schienen in Bezug auf die in 3.2.1 beschriebenen Anforderungen für eine Lösung äußerst interessant und vielversprechend.

Abbildung 59 zeigt die für das ursprüngliche Einsatzgebiet angedachte vorteilhafte Anwendung solcher Einsätze.

Ein möglicher Lösungsansatz für die Abdichtung in der Trennebene war daher, eine geometrisch herkömmlich gestaltete Werkzeugtrennung kern- oder kavitätenseitig aus Murseal[®] und die andere Werkzeughälfte konventionell metallisch auszuführen. Durch den im Vergleich zu Stahl großen zulässigen elastischen Bereich, ist eine ausreichende Pressung bei gleichzeitiger Unempfindlichkeit gegen lokale Verformungen, durch zum Beispiel Fasern bedingt, zu erwarten. Somit wäre dies eine verlässliche und dauerhafte Abdichtung.



Abbildung 59: Exemplarischer Einsatz des roten Murseal[®] Werkstoffs um die Gratbildung zu verhindern [35].

Jedenfalls nachteilig und somit kritisch erscheinen die verhältnismäßig hohen Werkstoffkosten.

Wesentliche Fragen für den möglichen Einsatz bezüglich der chemischen Beständigkeit gegenüber Caprolactam oder dessen Einfluss auf die Polymerisation konnten aber auch vom Hersteller nicht beantwortet werden. Zudem ist in den technischen Unterlagen [34] eine maximale Werkzeugtemperatur von lediglich 80°C angegeben. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist mit 5×10^{-5} viermal größer als der von Stahl. Folglich waren vorausgehende Material- und Praxistests unbedingt erforderlich.

3.2.3. Werkstofftests

Obwohl Murseal[®] in wesentlichen Aspekten überzeugen konnte, wurden dennoch weitere Werkstoffe Beständigkeitstests unterzogen, um gegebenenfalls kostengünstigere Alternativen zu haben.

Es wurden daher folgende Werkstoffe vorausgewählt und einem Screening hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegenüber Caprolactam unterzogen:

Material 1: UHMWPE (Ultrahochmolekulares Polyethylen)

Material 2: PK (Polyketon)

Material 3: POM (Polyoxymethylen)

Material 4: MurSeal[®]

Die Materialien wurden hierfür je zwei unterschiedlichen Tests unterzogen:

- Extraktionstest und
- Reaktivtest.

3.2.3.1. Extraktionstest

Die zu testenden Materialien wurden in flüssigem Caprolactam bei etwa 120°C gelagert.

In etwa alle 30 Minuten wurde begutachtet, inwiefern es zur Verfärbung des Probekörpers gekommen ist. Nach acht Stunden wurde der Versuch jeweils abgebrochen und nach dem Abkühlen ein Vergleich mit einer unbehandelten Probe durchgeführt.

3.2.3.2. Reaktivtest

Ergänzend wurde ein Reaktionstest durchgeführt, bei welchem die auf 120°C vortemperierten reaktiven Komponenten (LanXess Instant-Blend Katalysator beziehungsweise Aktivator) in eine je auf 150°C temperierte Gussform gegossen wurden. Anschließend wurde die Güte des entstehenden PA6, sowie des Dichtungsmaterials nach der Polymerisation überprüft.

3.2.3.3. Auswertung

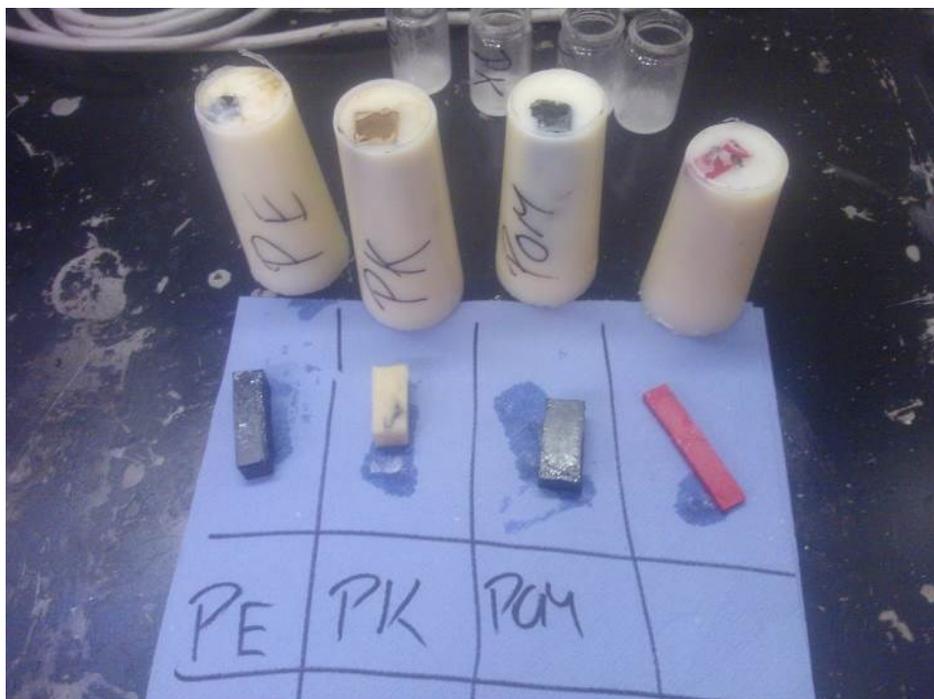


Abbildung 60: Probekörper aus UHMWPE/PK/POM/Murseal zur Auswertung nach entsprechender Extraktion (Vordergrund) und Reaktivtest (Hintergrund).

- **Material 1:** UHMWPE (Ultrahochmolekulares Polyethylen)



Abbildung 61: Foto des aus dem Gusspolyamid herausgelösten UHMWPE.

- Das Material wird nicht durch die reaktive Mischung angegriffen.
- Es kommt aber zu einer geringfügig spürbaren und sichtbaren Haftung an der Grenzfläche und somit zu einem leichten Stoffschluss.
- **Erfolgreicher Praxiseinsatz scheint bedingt möglich.**

- **Material 2:** PK (Polyketon)



Abbildung 62: Foto des im Gusspolyamid eingebetteten PK.

- Das Material wird während des Reaktionstests an den Grenzflächen deutlich angegriffen.
- Es kommt zu einem merklichen Stoffschluss.
- **Für den praktischen Einsatz ungeeignet.**

- **Material 3:** POM (Polyoxymethylen)



Abbildung 63: Foto des im Gusspolyamid eingebetteten POM.

- Das Material wird nicht durch die reaktive Mischung angegriffen.
- Aber es kommt zu einer starken Haftung an der Grenzfläche und zu einem deutlichen Stoffschluss.
- **Für den praktischen Einsatz ungeeignet.**

- **Material 4:** MurSeal®



Abbildung 64: Foto des im Gusspolyamid eingebetteten Murseal®.

- Das Material wird nicht durch die reaktive Mischung angegriffen.
- Im Vergleich zeigt es die geringste Haftung an der Grenzfläche und es kommt zu keinem Stoffschluss.
- **Für den Praxiseinsatz empfohlen.**

3.2.4. Geometrieauslegung der Dichtebene und Ausführung der Einbausituation

Nachdem die Materialtests bestätigt hatten, dass Murseal[®] mit Abstand die geeignetste Wahl darstellt und zudem eine ausreichende Beständigkeit zu erwarten war, galt es, grundsätzliche Überlegungen anzustellen, wie Murseal[®], bedingt durch die Werkstoffkosten, möglichst zweckmäßig und zudem sparsam eingesetzt werden könnte. Da das Material grundsätzlich für die Ausführung kleinflächiger Dichtmaßnahmen entwickelt wurde, sind bei richtliniengemäßem Einsatz das Volumen des benötigten Einsatzes und somit auch die Kosten überschaubar. Dem üblichen Bedarf entsprechend, sind im Standard von HASCO auch nur Blöcke bis zu 50 x 80 x 15 mm³ verfügbar.

Wie schon in Kapitel 1 beschrieben, soll aber die gegenständliche Entwicklung die Herstellung großflächiger Bauteile ermöglichen, was wiederum zwangsläufig mit entsprechend großen Werkzeugtrennebenen zusammenhängt. Überlegungen, somit als verbleibende Variable wenigstens den Querschnitt zu reduzieren, werden aber dadurch beschränkt, dass ein Mindestquerschnitt nicht unterschritten werden darf, um eine entsprechende Einspannung zur Bearbeitung weiterhin zu ermöglichen. Im Wissen um die für die Bauteilfüllung erforderlichen Schließkräfte und der daraus resultierenden Flächenpressung wurde eine erste Abschätzung der minimalen Werkzeugdichtfläche, hergestellt in Murseal[®] für das Plattenwerkzeug, auf Basis der Gleichungen (1) bis (3) sowie Tabelle 9 angestellt.

$$F = p \cdot A$$

Gleichung 1

$$A_d, F_{\min} = F / p_{\max}$$

Gleichung 2

$$b_d, F_{\min} = A_d, F_{\min} / l$$

Gleichung 3

Tabelle 9: Auslegung der erforderlichen Dichtfläche.

Physikalische Größe	Wert
Fülldruck (p)	Max. 100 bar
Projizierte Bauteilfläche (A)	200.000 mm ²
Benötigte Schließkraft (F)	2.000 kN
Maximal zulässige Flächenpressung (p _{max}) bei 120°C	62 N/mm ²
Resultierende minimal erforderliche Dichtfläche (A_d, F_{min})	32.258,1 mm²
Länge der Dichtfläche (l)	1.800 mm
Resultierende minimale Breite der erforderlichen Dichtfläche (b_d, F_{min})	17,92 mm

Zudem war eine entsprechende positionsgenaue aber auch gegebenenfalls reparaturfreundliche Befestigungsmöglichkeit im Werkzeug vorzusehen.

Abbildung 65 zeigt die schematische Fixierung der Dichtleiste mit der errechneten minimal erforderlichen Dichtbreite aus Murseal[®] mittels verschraubtem metallischem Keil. Durch die größere Ausdehnung im aufgeheizten Werkzeug wird das Material zusätzlich verspannt.

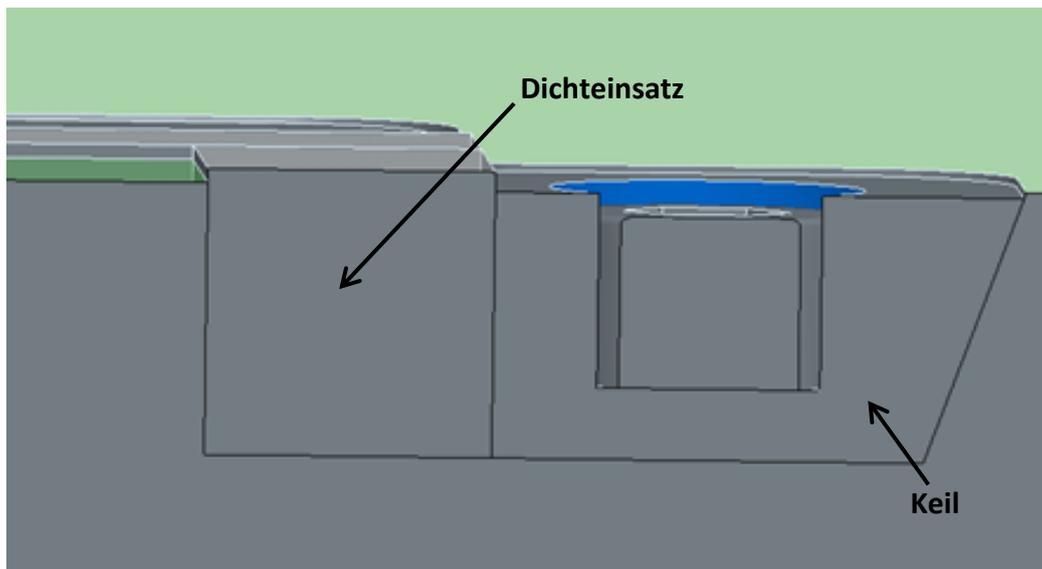


Abbildung 65: Schnittdarstellung des Murseal[®] Dichteinsatzes und der Fixierung im Werkzeug.

Trotz der Ausführung der Dichtfläche gemäß vorangegangener Berechnung kam es bei den ersten Praxisversuchen zu einem erheblichen Materialaustritt. Dieser wurde mangels alternativer Erklärungsmöglichkeiten als Folge unzureichender Abdichtung der Werkzeugtrennung interpretiert. Tuschiertests mit einer im Werkzeugbau üblichen Tuschiefarbe zeigten aber eine umlaufende Anlage zwischen Stahl und den Murseal[®] Bereichen.

Anstatt die Versuche aber mangels Erfolgs abubrechen, wurde entschieden, die Dichtfläche entgegen der Herstellerempfehlung und somit trotz des Risikos der Beschädigung analog zu den eigenen Erkenntnissen aus der PUR-Technik stufenweise zu reduzieren, um eine für die umlaufende Dichtfunktion erhöhte Komprimierung zu ermöglichen. Abbildung 66 zeigt die in ihrer Dichtbreite deutlich reduzierte abgestufte Variante.

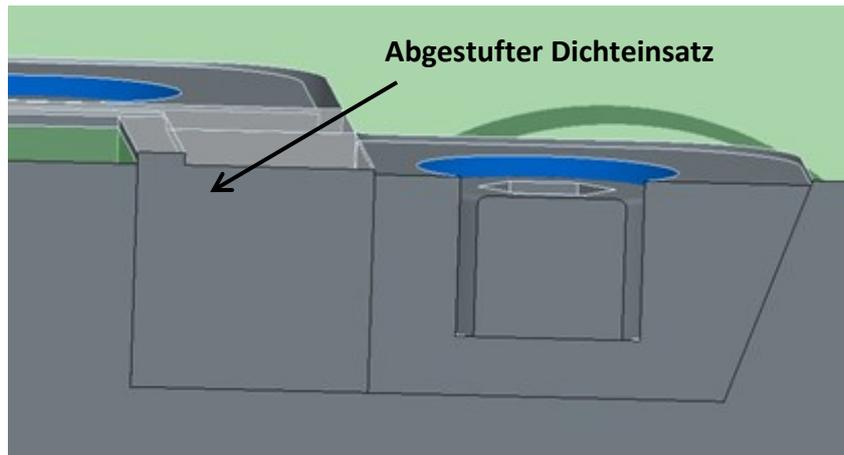


Abbildung 66: Schnittdarstellung des in seiner Dichtbreite reduzierten Murseal® Dichteinsatzes inklusive der Fixierung im Werkzeug.

Um in dieser Ausführungsvariante aber zu verhindern, dass es zu einer plastischen Verformung kommen kann, wurden umlaufend metallische Stützflächen eingebracht (Abbildung 67). Diese Anschlagflächen begrenzen den Verformungsweg mechanisch, beziehungsweise verhindern auch das Kippen des Werkzeugs, was ebenfalls zu einer Beschädigung der Trennebene führen könnte.

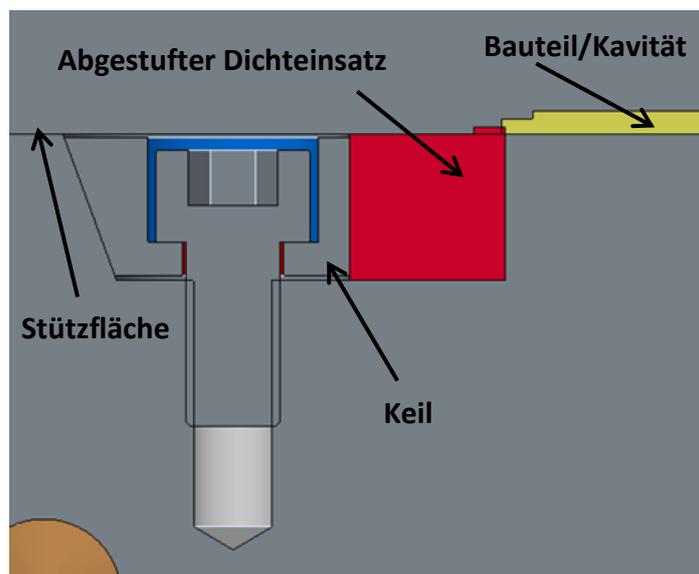


Abbildung 67: Schnittdarstellung der Funktionsweise und der Verbausituation des in der Dichtbreite deutlich reduzierten Einsatzes, inklusive der außenliegenden Stützflächen.

Interessanterweise wurde auch festgestellt, dass bei der Erstinjektion aufgetretene Leckagen durch Polymerisation des Caprolactams zur Abdichtung beitragen, wodurch bei den folgenden Zyklen keine oder nur deutlich reduzierte Leckagen auftraten. Dieses Phänomen wurde im Weiteren als Autoversiegelung bezeichnet.

3.2.5. Richtlinien für die Serienumsetzung

Aus Erkenntnissen der erfolgreichen Umsetzung des Plattenwerkzeugs wurden folgende Richtlinien abgeleitet:

- Murseal[®] ist eine für die Anwendung grundsätzlich geeignete Materialauswahl.
- Es benötigt aber eine abgestimmte Einsatzausführung zur Fixierung und ausreichenden Stabilisierung.
- Die Ausführung der Anlageflächenbreite und –höhe ist kritisch hinsichtlich ausreichender Verpressung zur Abdichtung einerseits und maximal zulässiger elastischer Verformung andererseits.
- Eine zu hohe Flächenpressung führt zu einer plastischen Verformung und somit zur Zerstörung.
- Ausreichend robuste metallische Anschlagflächen zur Begrenzung der maximalen Verpressung sind daher unbedingt erforderlich.

Trotz dieser vielversprechenden Erkenntnisse ist von einer uneingeschränkten Serieneinsatzfähigkeit noch nicht auszugehen, da noch folgende wesentlichen Punkte einer detaillierteren Betrachtung bedürfen:

- Das Ausmaß der Verschleißerscheinungen beziehungsweise der Beschädigungen bei mehreren tausend Zyklen ist noch ungeklärt.
- Die ausreichende dauerhafte chemische Beständigkeit ist unsicher, speziell die Änderung des Rückstellverhaltens und somit der Dichtheit ist in Abhängigkeit dauerhafter Exposition in Caprolactam bei erhöhten Temperaturen zu prüfen.
- Die Dauertemperaturbeständigkeit ist ungeklärt.
- Im Falle einer kurzen Lebensdauer ist die Wirtschaftlichkeit, bedingt durch die Kosten für das Material, die Bearbeitung und den Austausch fraglich.
- Somit sind gegebenenfalls die Servicefähigkeit, alternative Reparaturlösungen, wie etwa der Austausch oder das Unterlegen in Kombination mit einer Nachbearbeitung, erforderlich.
- Kompensationsmöglichkeiten der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei langen Dichtflächen sind vermutlich notwendig.

3.2.6. Umsetzung im Messewerkzeug

Da die Ausführung der Werkzeugtrennung in Form eines Wechseleinsatzes aus Murseal[®] trotz verbleibender Bedenken die serientauglichste Lösung darstellt, entschied man sich für die Verwendung von Murseal[®]-Einsätzen für das Messeprojekt. Abbildung 68 zeigt anschaulich die komplexe dreidimensionale Ausführung im Messewerkzeug.



Abbildung 68: Nutzung von Murseal[®] Einsätzen am gesamten Umfang der Werkzeugtrennung.

Zur zusätzlichen Absicherung der Evakuierung und gegen einen für das Umfeld schädlichen Materialaustritt, wurde die Trennebene zudem mit einer Dichtschnur, wie in Abbildung 69 ersichtlich, ausgestattet.

Abbildung 70 zeigt im Detail die Elemente der Kavitätenabdichtung der Kontur folgend (von links nach rechts):

- Metallische Abstützfläche
- Fixierelemente
- Murseal[®]-Einsatz
- Metallisches Formbild



Abbildung 69: Ausschließlich in Metall ausgeführten Kavität mit außenliegender zusätzlicher Vakuumdichtung.

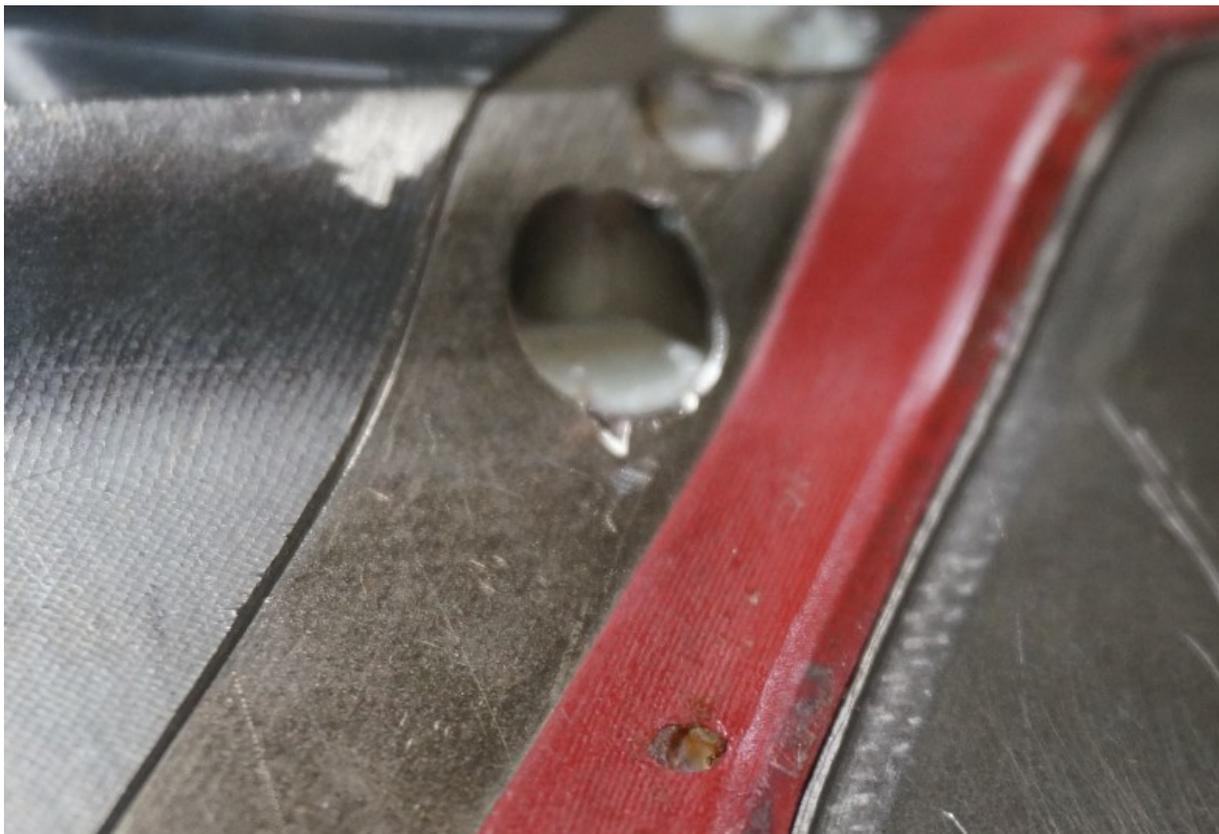


Abbildung 70: Detailaufnahme des in seiner Dichtbreite optimierten Murseal®-Dichteinsatzes inklusive der Fixierung im Werkzeug und der außenliegenden Abstützung.

Der Bauteilgröße und den in Kapitel 3.2.2 dargestellten Unterschieden der Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Stahlkavität und Dichteinsätzen aus Murseal[®] geschuldet, war es erforderlich, eine Vorhaltung in Form einer Dehnfuge, wie in Abbildung 71 ersichtlich, auszuführen. Dieser Spalt schließt sich beim Aufheizen des Werkzeugs auf die erforderliche Prozesstemperatur.



Abbildung 71: Erforderliche Dehnfuge im kalten Werkzeug.

3.2.7. Verifizierung durch Spritzversuche

Da in Abbildung 72 keinerlei Überspritzungen oder den Bauteil überragende Bereiche zwischen dem Bauteil und der angrenzenden Dichtfläche zu erkennen sind, welche nachgearbeitet hätten werden müssen, ist eindrucksvoll die Wirkungsweise des neu entwickelten Dichtungssystems belegt.



Abbildung 72: Foto der werkzeugfallenden Bauteilgeometrie.

3.3. Ausführung Caprolactam berührender beweglicher Werkzeugelemente

3.3.1. Ausgangssituation

Auch wenn der Fokus der herzustellenden Bauteile auf großflächigen Geometrien liegt, welche bedingt durch den sinngemäßen Einsatz von flächiger Endlosfaser-
verstärkung die Herstellung von schwer zu entformenden und nicht verstärkten
Rippen mittels In-situ-Polymerisation von Caprolactam nicht als sinnvoll erscheinen
lassen, so ist doch mit einem Aufschwinden der Bauteile auf den Werkzeugkern zu
rechnen. In Kombination mit der Anforderung zur Realisierung eines voll-
automatischen Prozesses ist notwendigerweise die Ausführung von Entformungs-
hilfssystemen verbunden. Die zur verlässlichen Bauteilentformung erforderlichen
Kräfte überfordern in der Regel die Möglichkeiten der Automatisierungstechnik,
weshalb Auswerfersysteme im Werkzeug zur Unterstützung notwendig sind.

In zukünftigen Projekten stellen auch Bauteilgeometrien mit Hinterschnitten eine
zusätzliche Aufgabenstellung dar. Hierfür bedarf es ebenfalls beweglicher Elemente,
wie Schieber, Backen, etc. im Werkzeug. Analog der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen
Ausgangssituation ist ähnlich der Werkzeugtrennebene jedes bewegte Element in der
Kavität ein potentiell Risiko für eine Leckage. Somit sind die Schlussflächen, welche
meist gleichzeitig auch Gleitflächen sind, in jedem Fall abzudichten. Diese Aufgaben-
stellung wird in der aktuellen Arbeit nicht weiter verfolgt, sondern soll in einem
Folgeprojekt abgehandelt werden.

Erschwerend kommt aber noch hinzu, dass nicht wie bei der Trennebene darauf ge-
setzt werden darf, dass auspolymerisiertes Caprolactam gegebenenfalls zu einer
Autoversiegelung eventuell verbliebener Spalte führen würde. Dieser Effekt würde
bei einem Auswerfer oder auch Schieber zwangsläufig zu einer Einschränkung oder
gar zu einer Störung der Funktion führen. Selbst wenn die Bewegungsfreiheit aus-
reichend erhalten bleibt, sorgt der bei der Bewegung freigesetzte Flit für Ver-
unreinigungen und Folgeprobleme, wie Verschleiß oder sogar Bruch.

Vorangegangene von Schöfer begleitete Projekte hatten ausschließlich die Aufgaben-
stellung der prozesssicheren Auswerferfunktion und wurden in den in Tabelle 10
beschriebenen und bewerteten Varianten umgesetzt.

Tabelle 10: Ausführungsvarianten der gegen den Austritt von Caprolactam dichten Auswerfer.

Ausführung	Beschreibung	Probleme	Vorteile
Zylindrischer Metallauswerfer	Analog der Thermoplast-spritzgusstechnik wird der Auswerfer in eine Spielpassung eingesetzt.	Nicht vakuumdicht; Caprolactam tritt ungehindert in den für die Bewegung erforderlichen Spalt ein und führt zur Verklebung; lässt keine reproduzierbare Prozessführung zu.	Günstigste und standardisierte Variante.
Zylindrischer Metallauswerfer mit O-Ring-Dichtung in der Bohrung	Knapp unterhalb der Formbildoberfläche wird ein O-Ring eingesetzt.	Es bleibt ein Ringspalt der sich mit Caprolactam füllt und zu Verunreinigungen führt. Die Beständigkeit des O-Rings ist fraglich.	Bedingt dicht, aber günstig.
Konische Metallauswerfer (Abbildung 73)	Analog der LSR-Werkzeugtechnik werden konische Sitze mit Nullspalt hergestellt.	Aufwendige und teure Herstellung und Abstimmung. Kleinste Verunreinigungen führen zum Verlust der Dichtheit. Verunreinigungen können bei zu hohen Auswerfer-Rückziehkräften zum Bruch der Auswerfer führen. Die thermische Längenausdehnung ist schwierig abzugleichen.	Bekannte Technik und zudem kein Beständigkeitsproblem.
Zylindrische Kunststoffauswerfer	Herstellung des Auswerfers aus z.B. Murseal [®]	Unzureichende Zugfestigkeit. Teuer.	Dicht.

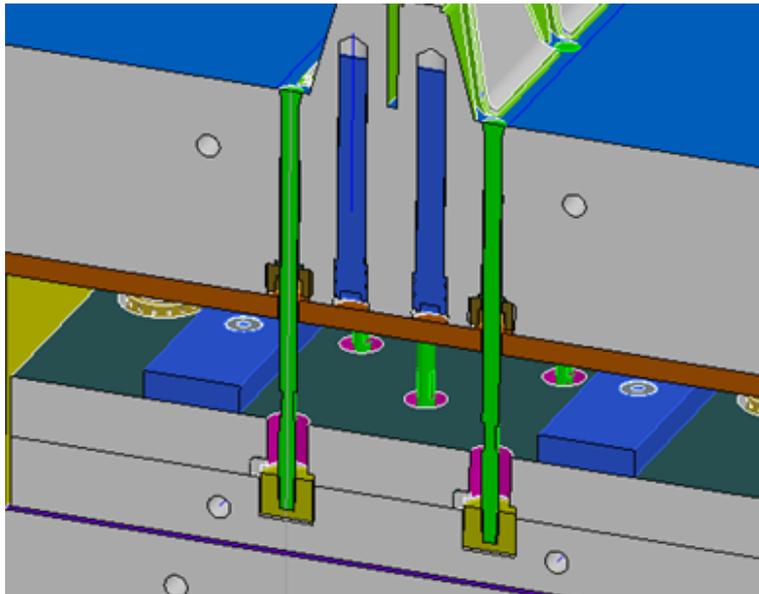


Abbildung 73: Schnittdarstellung einer Auswerferlösung mit konisch geformten metallischen Auswerferköpfen.

Auch bei den Auswerfersystemen wurde keine der bisherigen Optionen den Erwartungen für eine erfolgreiche Serienumsetzung gerecht.

Ziel sollte daher die Entwicklung einer Lösung sein, die:

- den Einsatz kostengünstiger Herstellungsverfahren zulässt,
- eine Standzeit von mehreren tausend Zyklen ermöglicht,
- im Bedarfsfall einfach und kostengünstig zu wechseln ist,
- beständig gegenüber Caprolactam und den notwendigen Additiven ist,
- vakuumdicht ist,
- auch für höhere Prozesstemperaturen geeignet ist,
- die Polymerisation nicht stört,
- unabhängig von der Werkzeugtemperatur oder deren Änderung dicht ist,
- selbstreinigend ist.

3.3.2. Lösungskonzept

Auf Basis der bisherigen Erfahrungen schien es sinnvoll und möglich, Hybridlösungen aus metallischem Träger und polymerer Dichtung weiterzuentwickeln, da diese bei entsprechender Kombination für eine sich selbstreinigende elastische Abdichtung direkt an der Kavitätenoberfläche sorgen, aber auch über eine ausreichende Festigkeit hinsichtlich Zug und Biegebeanspruchung verfügen.

Somit wurden die im folgenden Kapitel näher beschriebenen Varianten weiterverfolgt beziehungsweise zur Weiterentwicklung geplant.

3.3.2.1. Murseal® Aufsatzkopf auf zylindrischen Metallauswerfer

Im Wissen um die positiven Eigenschaften von Murseal® wird ein möglichst kleiner Kopf aus Murseal® auf einen zylindrischen Standard-Metallauswerfer, welcher herkömmlich im Werkzeug verbaut werden kann, aufgesetzt (Abbildung 74).

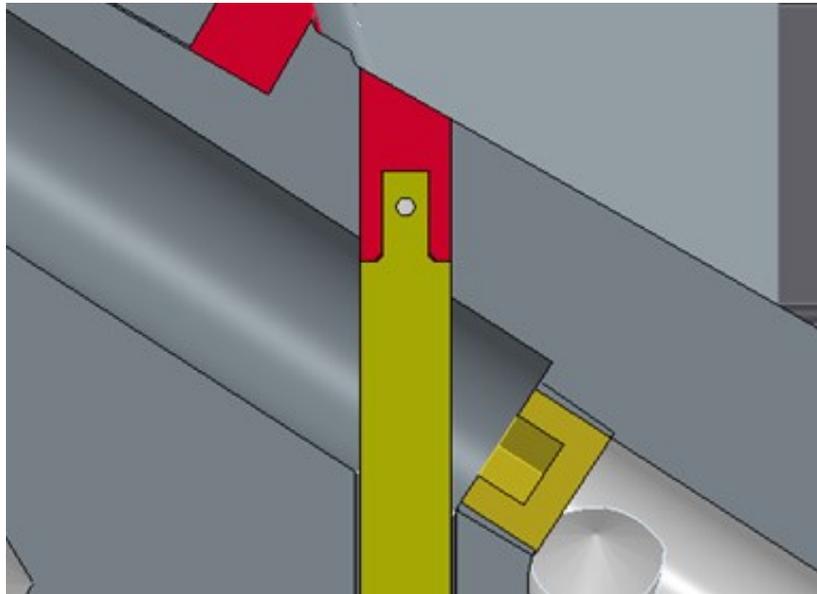


Abbildung 74: Schnittdarstellung einer Auswerferlösung mit einem aus Murseal hergestellten Auswerferkopf (rot).

Mit diesem Konzept wäre nicht nur ein möglichst sparsamer Einsatz des Werkstoffs sichergestellt, sondern auch eine optimale Reparatur- und Wartungssituation gegeben, da der Kopf wechselbar bleibt.

Diese Variante setzt aber auch eine ausreichende Baugröße zur fertigungstechnischen Umsetzung voraus.

3.3.2.2. Kunststoff-Pulverbeschichtung zylindrischer Metallauswerfer

Vorausgesetzt der Verfügbarkeit entsprechender Ausgangsprodukte erscheint es aber auch interessant, einen entsprechend mit Untermaß gefertigten zylindrischen Standard-Metallauswerfer lokal mit Kunststoffpulver zu beschichten und nachträglich auf Endmaß zu fertigen. Zuvor müssen aber weitere Recherchen hinsichtlich potentiell geeigneter und verfügbarer polymerer Materialien als auch Prozesse und Partner erfolgen. Erst dann kann dieser Ansatz weiterverfolgt werden. Entsprechend soll diese Möglichkeit in ein Folgeprojekt ausgelagert werden. Im Umkehrschluss könnte diese Umsetzungsvariante theoretisch, und natürlich auch vorausgesetzt entsprechend dimensionierter Anlagentechnik, zur Beschichtung der Werkzeugtrennung angedacht werden.

3.3.3. Materialtests

Grundsätzlich gelten die Ergebnisse analog Kapitel 3.2.3, wobei im praktischen Einsatz sicherlich das Quellverhalten relevanteren Einfluss auf die tatsächliche Eignung hat.

3.3.4. Richtlinien für die Dichtung beweglicher Werkzeugelemente

Aus den Erkenntnissen der erfolgreichen Umsetzung des Plattenwerkzeugs wurden folgende Richtlinien abgeleitet:

- Murseal® ist eine für die Anwendung grundsätzlich geeignete Materialauswahl.
- Die Befestigung des Dichtkopfes limitiert aber die mögliche Baugröße.
- Die Ausführung der Kopfhöhe ist kritisch hinsichtlich ausreichender Führungslänge einerseits und maximal zulässiger resultierender Reibkraft andererseits.
- Zu große Zugkräfte am Auswerferkopf führen zu plastischer Verformung und somit zur Zerstörung.
- Eine Montage des Kopfes mittels Schraubgewinde oder Passtift am metallischen Auswerfergrundkörper erlaubt einen raschen Wechsel, auch wenn das Werkzeug auf der Anlage montiert bleibt.

Trotz dieser vielversprechenden Erkenntnisse ist von einer uneingeschränkten Serieneinsatzfähigkeit noch nicht auszugehen, da noch folgende wesentliche Punkte einer detaillierteren Betrachtung bedürfen:

- Der zu erwartende Verschleiß nach mehreren tausend Zyklen ist ungeklärt.
- Die dauerhafte chemische Beständigkeit ist trotz grundlegender Tests fraglich. Speziell das Quellverhalten bei dauerhafter Exposition in Caprolactam bei erhöhten Temperaturen ist zu prüfen.
- Die Dauertemperaturbeständigkeit ist ungeklärt.
- Im Falle kürzerer Lebensdauer ist die Wirtschaftlichkeit, bedingt durch die Kosten für das Material, die Bearbeitung und den Austausch, fraglich.

3.3.5. Umsetzung im Messewerkzeug für die K2016 in Düsseldorf

Da die Ausführung der Auswerfer als Hybridlösung trotz verbleibender Bedenken die aus aktueller Sicht serientauglichste Lösung darstellt, wurde für den Einsatz dieser Variante für das Messeprojekt entschieden. Abbildung 75 zeigt die Ausführung eines Auswerfers im Bereich des Stiels im Messewerkzeug.



Abbildung 75: Auswerfer mit Murseal Auswerferkopf.

3.3.6. Verifizierung durch Spritzversuche

Abbildung 76 zeigt eine nur minimale Abzeichnung am fertigen Bauteil und bestätigt somit die hervorragende Dichtfunktion.



Abbildung 76: Foto der kaum wahrnehmbaren Abzeichnung des Auswerferkopfes am fertigen Bauteil.

3.4. Ausführung der Temperierung

3.4.1. Ausgangssituation

Dieser Masterarbeit vorangegangene Projekte haben gezeigt, dass im Falle der Prozesskombination von In-situ-Polymerisieren und Spritzgießen innerhalb eines Mehrkomponentenwerkzeuges (unabhängig, ob es sich dabei um ein Schiebetisch-, ein Drehteller- oder ein Wendepplattenwerkzeug handelt) die unterschiedlichen Niveaus der erforderlichen Werkzeugtemperaturen zu erheblichen Herausforderungen führen. Die bei unterschiedlichen Temperaturen der thermischen Wärmeausdehnung geschuldeten Maßabweichungen führen zwangsläufig bei dreidimensional geformten Trennebenen zu Dichtheitsproblemen und erfordern somit eine äußerst exakte dimensionale Abstimmung der Werkzeughälften.

Aber auch das für die In-situ-Polymerisation erforderliche Temperaturniveau ist oberhalb des für den Thermoplastspritzguss empfohlenen Levels für die Entformung.

Diese Herausforderungen sollten ursprünglich im Messeprojekt durch die Nutzung variothermer Temperiertechnik gelöst werden. Hierfür wurden zur Implementierung einer induktiven Werkzeugheizung mit dem Unternehmen RocTool S.A. informative Gespräche geführt.

Bedingt durch die Entscheidung zwei Einzelwerkzeuge auszuführen und dadurch die Nutzung einer bestehenden Anlage zu ermöglichen, und das Projekt wesentlich seiner anderweitigen komplexen Themen zu vereinfachen, bestand auch keine Notwendigkeit mehr, eine aufeinander abstimmbare dynamische Temperierung zu implementieren. Dem entsprechend erübrigte sich die Möglichkeit sich im Zuge dieser Masterarbeit mit komplexen Details der Temperierung zu beschäftigen.

3.4.2. Umsetzung im Messwerkzeug

Somit konnten die Temperierungen der beiden Einzelwerkzeuge mittels herkömmlicher isothermer Flüssigkeitstemperierung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus ausgeführt werden. Dabei wurde in einfachstem Ausmaß den jeweiligen Anforderungen der beiden Prozesse Rechnung getragen.

Begründet durch den Polymerisationsprozess ist die In-situ-Polymerisation der zykluszeitrelevante Prozess der beiden parallel stattfindenden Prozesse, womit der Optimierung der Kühlung des Spritzgusswerkzeug keine besondere Beachtung zu schenken war.

Die Kühlkanäle wurden daher ausschließlich nach fertigungstechnischen Gesichtspunkten zweckmäßig konstruiert und ausgeführt.

Im In-situ-Polymerisationswerkzeug hingegen galt es dennoch, die Temperierkanäle so zu positionieren, dass eine möglichst homogene Temperaturverteilung über die gesamte Bauteiloberfläche sichergestellt werden konnte. Dementsprechend wurden andere Details (wie zum Beispiel die Positionierung der Auswerfer oder auch der Werkzeugsensoren) untergeordnet.

Zudem galt es auch, auf eine ausreichende thermische Trennung der Materialzuführung und der Kavitätenoberflächen zu achten. Umfangreiche Isoliermaßnahmen an der Werkzeugoberfläche und in technisch kritischen Bereichen sorgen für eine entsprechende Energiebedarfsreduktion und ausreichenden Schutz der Anwendungstechniker vor Verbrennungen.

3.5. Begleitende Themen der Messeprojektumsetzung

3.5.1. Bauteilgestaltung

Um die Technologie des In-situ-Polymerisierens von Caprolactam im Werkzeug zur Herstellung endlosfaserverstärkter Leichtbauteile unter serienfähigen Prozessbedingungen einem breiten Fachpublikum präsentieren zu können, wurde die K2016 als weltweite Leitmesse Nummer 1 der kautschuk- und kunststoffverarbeitenden Industrie gewählt.

Gemeinsame Zielsetzung von Firma Engel und Firma Schöfer war es, einen vollständigen Prozess am Messestand der Fa. Engel live und vor Ort unter möglichst seriennahen Bedingungen zu präsentieren.

Obwohl die Automobilindustrie zukünftig vorrangig als potentielle Abnahmebranche zu werten ist, wurde nach ausführlicher Diskussion entschieden, ein non-automotives Bauteil als Demonstrator zu nutzen. Als hauptauschlaggebendes Argument galten mehrfach negative Erfahrungen in der Vergangenheit, die gezeigt haben, dass bei unzureichender vollständiger Betrachtung der Komplexität des gezeigten Bauteils und dessen Rahmenanforderungen rasch das Fachpublikum dazu neigt, die Bauteile nicht hinsichtlich der Vorzüge der eingesetzten Technologie zu bewerten, sondern viel mehr dazu tendiert, die vermeintlich unzureichende Ausführung des Bauteils zu kritisieren. Dies galt es unter allen Umständen zu vermeiden.

Somit blieben die Bereiche Freizeit und Sport als mögliche, die Technologie tragende, begeisterungsfähige Themengebiete. Wissentlich, dass unvermeidbar Bauteile an die Öffentlichkeit gelangen werden, und dem mit einem im Gebrauch befindlichen Sportartikel verbundenen Risikos einer klagbaren Verletzung während der Benutzung, fiel die Wahl auf eine äußerst kompakte Schaufel, welche bei möglichst geringem Gewicht ein Maximum an Steifigkeit bieten sollte. Eine Marktrecherche ergab, dass bei vergleichbaren Lawinenschaufeln 600 g - 800 g als Benchmark anzusetzen sind. Begreiflicherweise musste Vorgabe sein, dies nicht zu überschreiten.

Obwohl es nicht Zielsetzung war, eine Vermarktung in Betracht zu ziehen und somit eigentlich die Herstellungskosten irrelevant sind, so wurden doch marktübliche Preise von EUR 50-80,- inkl. MwSt. als Richtwert berücksichtigt. Um die Technik hier nicht der unnötigen Kritik zu hoher Kosten auszusetzen, wurde entgegen der maximal erzielbaren Performance entschieden, Glasfaser anstatt Kohlefaser einzusetzen und auf den Einsatz weitere Sondertechnologien, wie etwa Mehrkomponentenspritzguss oder Gasinnendrucktechnik, zu verzichten.

Auf Basis der Nutzung von Glasfasern wurde somit die in Tabelle 11 dargestellte Massenaufteilung als maximal zulässige Zielvorgabe erarbeitet.

Tabelle 11: Massenaufteilung des Messeobjektes Leichtbauschaufel.

Bestandteil	Volumen (cm ³)	Masse (g)
Reaktivteil gesamt	176	322
Davon PA6	97	116
Davon Glasfaser	79	206
Spritzgussteil aus PA6GF30	206	278
Optional metallischer Schaufelblattschutz	-	-
Gesamt	386	600

Eine weitere wesentliche Randbedingung war, dass das Unternehmen Engel die bereits für die Technologieentwicklung angefertigte V-DUO 700 mit horizontalem Schiebetisch auf der Messe präsentieren wollte. Abbildung 77 und Tabelle 12 zeigen und beschreiben die durch diese Vorgabe auferlegten dimensional und technischen Beschränkungen.

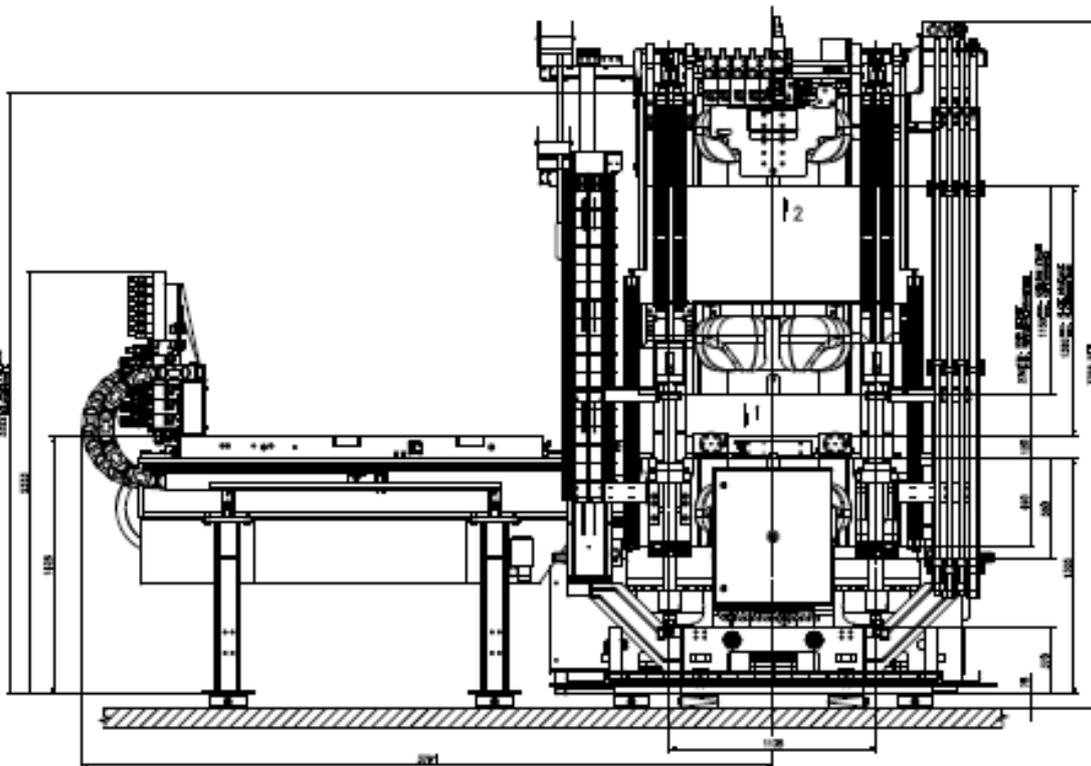


Abbildung 77: Layout (Aufriss) der verfügbaren Engel V-DUO 700 mit horizontalem Schiebetisch.

Tabelle 12: Technische Daten der verfügbaren Engel V-DUO 700.

Technische Daten		V-DUO 700
SCHLIESSEINHEIT		
Schließkraft	kN	7.000
Öffnungskraft mit Druckkissen brutto / netto *	kN	510 / 470
Öffnungskraft mit Eilgangzylinder brutto / netto *	kN	170 / 140
Öffnungshub	mm	1.150
Geschwindigkeit Öffnen/Schließen	mm/s	700 / 800
Präzisionshub **	mm	12-36
Präzisionsgeschwindigkeit Öffnen/Schließen	mm/s	4/20
Werkzeugeinbauhöhe min.	mm	350
Werkzeugeinbauhöhe max.	mm	950
Plattenabstand max.	mm	1.500
Werkzeugaufspannfläche	mm	1000 x 1440
Lichter Holmabstand	mm	1100 x 980
max. Werkzeuggewicht (max.1/2 auf BAP)	kg	7.000
Gewicht SLS	t	29
Höhe ab Oberkante Schiebetisch	mm	2.350
Gesamthöhe	mm	3.700
SCHIEBETISCH		
Verfahrweg	mm	2.000
Verfahrzeit (bei 50% Wkzg Gewicht)	s	4,5
SPRITZEINHEIT		Aggregat 5550
Gewicht SPR	to	10
Breite SPR	mm	2.300
Höhe SPR	mm	1.920

* brutto: ohne Werkzeuggewicht / netto: mit max. Werkzeuggewicht auf BAP

** abhängig von Werkzeughöhe

3.5.2. Designphase

Leichtbau ermöglicht Gewichtsreduktion und somit Dynamik, darf aber auch Designaspekten keinesfalls im Wege stehen. Gegenteilig soll er diese sogar mit neuen Optionen ermöglichen. Um diesem Anspruch Genüge zu tun, wurde das Designbüro form² aus Linz mit dem Bauteildesign beauftragt.

Im Team sollte gewährleistet werden, dass das Messeprojekt „Leichtbauschaukel“, sowohl technologisch als auch aus Sicht des Designs anspruchsvoll, überzeugend und begeisternd sein würde. Obwohl allen Beteiligten klar war, dass eine 1-zu-1-Substitution und somit Kopie einer am Markt befindlichen Kompaktschaukel weder Ziel sein durfte, noch durch abweichende Technologien möglich sein würde, dienten dennoch am Markt befindliche Produkte (exemplarisch Abbildung 78) hinsichtlich Robustheit und Ergonomie als Vorbild.

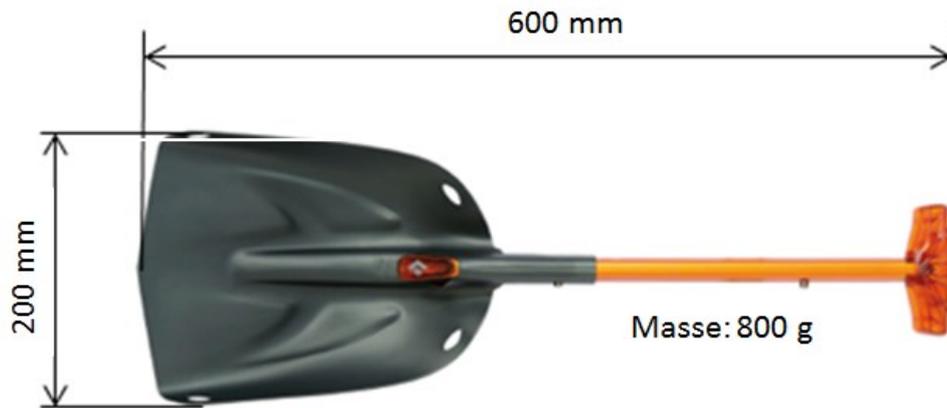


Abbildung 78: Beispiel einer am Markt verfügbaren kompakten und dennoch äußerst robusten Schaufel [36].

Engel, Schöfer und form² definierten im folgenden Verlauf des Projektes gemeinsam die wesentlichen Aspekte, wobei neben der zulässigen Bauteilgröße und der Robustheit natürlich auch Themen wie die Drapierfähigkeit des einzusetzenden Glasfasergewebes als auch die Werkzeugtechnik zu berücksichtigen waren. Abbildung 79 zeigt einen Auszug der ersten Interpretationen dieser Rahmenbedingungen.

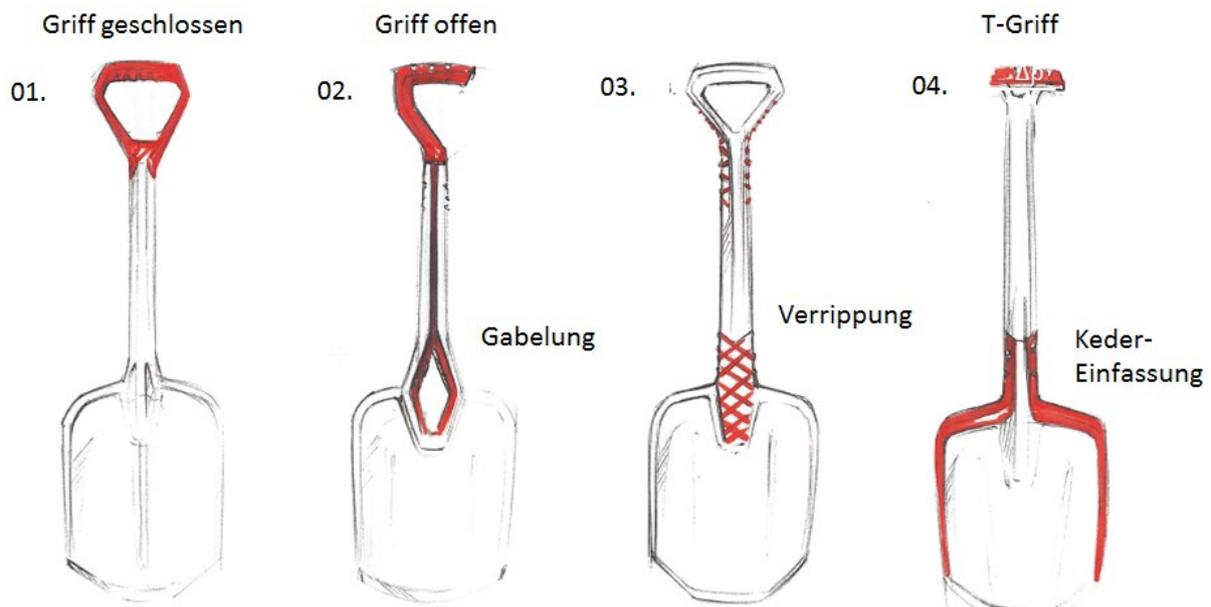


Abbildung 79: Erste Designskizzen möglicher Stiel/Griff-Kombinationen [36].

Diese ersten Entwürfe wurden fertigungstechnisch bewertet und nach ingenieurtechnischen Gesichtspunkten abgeändert. Daraus abgeleitet und somit als Basis erfolgsentscheidender Folgearbeiten entstand der in Abbildung 80 dargestellte Entwurf, der auch bereits die zwei Materialkomponenten in ihrer Aufteilung darstellt. Hellgrau der In-situ-Basisbauteil, in Rot der ergänzende Spritzgussbauteil. Am Schaufelblatt vorne ist schemenhaft die optionale metallische Schutzkante erkennbar.

Die dargestellte Rippenstruktur hatte in der Entwurfphase nicht den Anspruch, das Optimum für die Umsetzung darzustellen, sondern sollte die grundsätzliche Notwendigkeit der zusätzlichen Versteifung als auch den Erhalt eines geschlossenen Griffprofils andeuten.

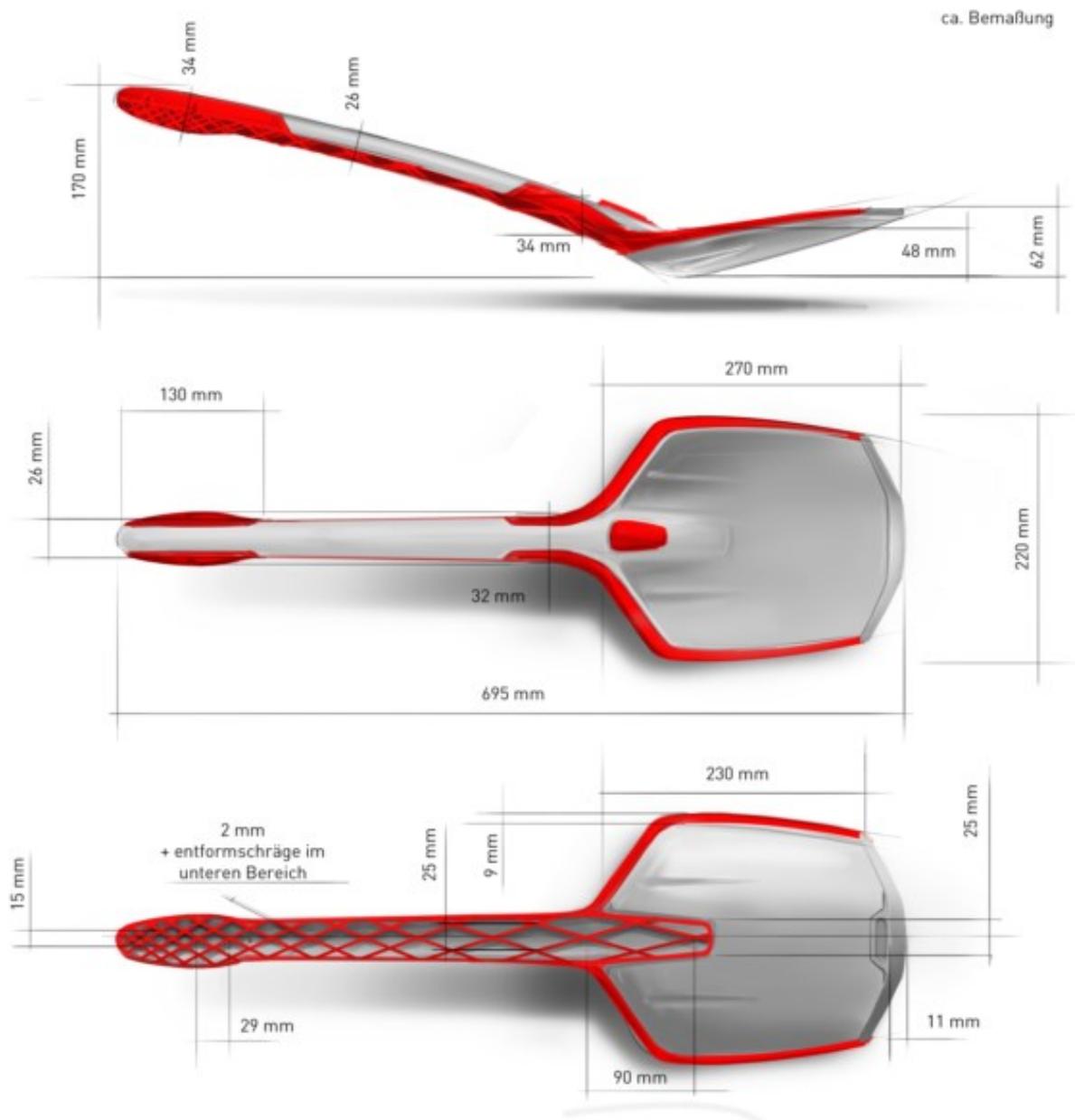


Abbildung 80: Überarbeitete und maßlich definierte Designskizze [37].

Zu diesem Zeitpunkt hatte dieser Entwurf nach wie vor nur Zeichnungs- und nicht Datenqualität, daher war eine qualifizierte Beurteilung der Drapierfähigkeit des Glasfasergewebes nicht möglich. Diese zu beurteilen war aber bereits in dieser frühen Projektphase absolut erforderlich. Aus zeitlichen Gründen wurde entschieden, vor der virtuellen Konstruktion und der Analyse von 3D-Daten das in Abbildung 81 erkennliche Papiermodell anzufertigen.



Abbildung 81: Papiermodell zur Visualisierung der für das Gewebe drapierrelevanten Übergänge zwischen Stiel und Schaufelblatt.

Wie Abbildung 82 zeigt, stellten die Übergänge eine enorme Herausforderung dar, welche in der Umsetzung durch eine Reduktion des Winkels zwischen dem Stiel und dem Schaufelblatt im Vergleich zum Ursprungsentwurf entschärft wurde.

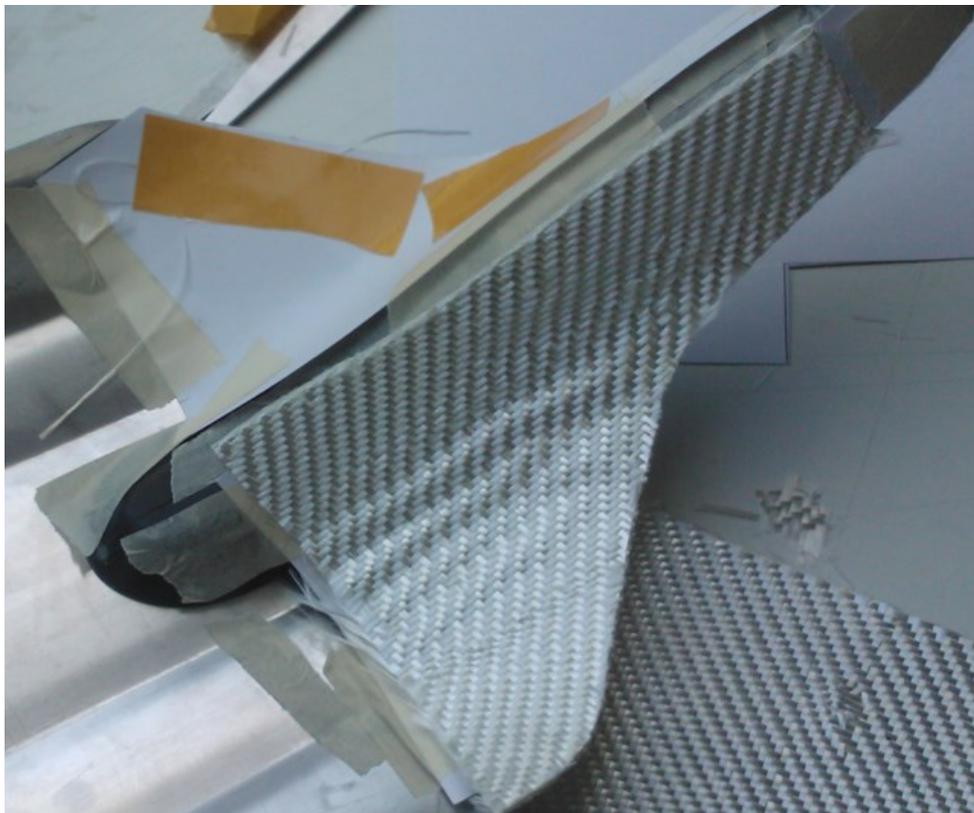


Abbildung 82: Drapierversuch an den Übergängen zwischen Stiel und Schaufelblatt.

Bauteil-Konstruktionsphase

Basierend auf den Entwürfen und den grundlegenden Vorversuchen wurden möglichst exakte dimensionale Vorgaben erstellt, mit welchen anschließend ein vollständiges Datenmodell konstruiert wurde. Dieses diente wiederum als Grundlage für die Detailanalysen, die Simulationen und die finale Bauteilkonstruktion. Abbildung 83 zeigt eine frühe Phase der globalen Entformungswinkeldefinition, während Abbildung 84 detailliert die systematische Analyse und Überarbeitung lokaler Herausforderungen der Umsetzbarkeit im Bereich des Schaufelblattes darstellt.

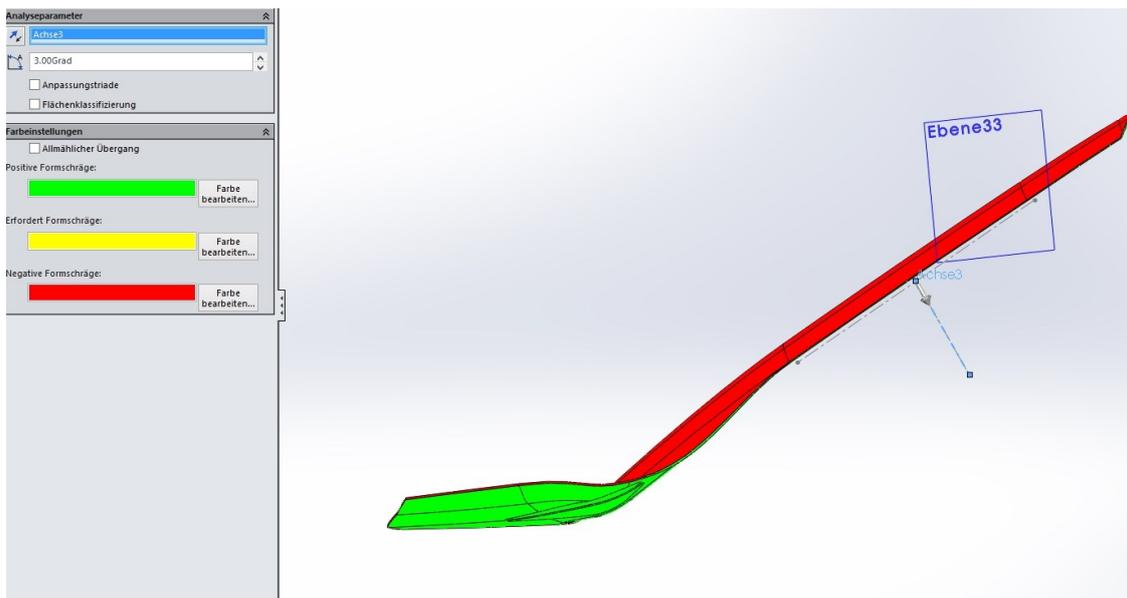


Abbildung 83: Globale Entformungswinkelanalyse zur Definition der Werkzeugtrennebenen.

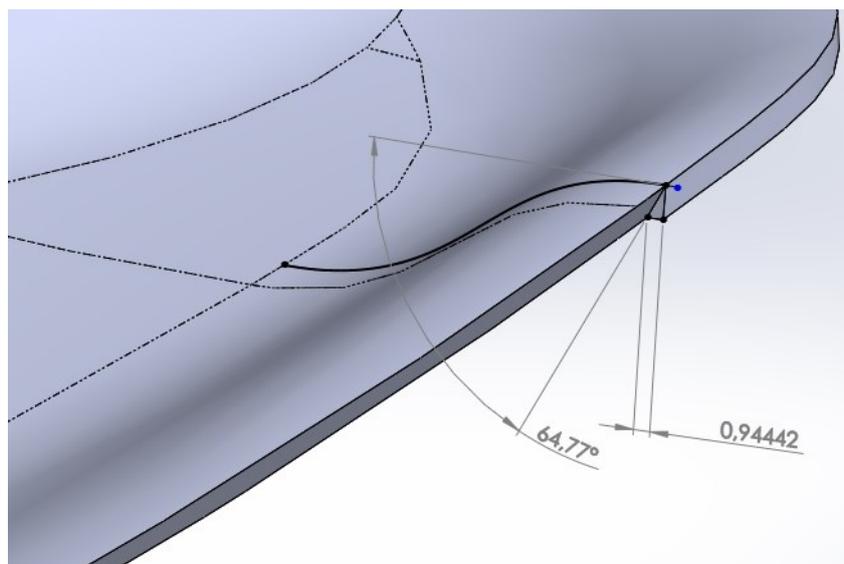


Abbildung 84: Lokale Anforderung zur Änderung der Bauteilgeometrie zwecks Sicherstellung der Entformbarkeit.

In Wechselwirkung auch mit den im folgenden beschriebenen Simulationsergebnissen, aber auch noch wesentlicher, mit den in den Kapiteln 3.1.11, 3.2.5 und 3.3.4 beschriebenen Richtlinien zur Ausführung des werkzeugintegrierten Mischsystems, der Abdichtung der Werkzeugtrennung als auch der beweglichen Elemente wurden die Bauteildaten weiterentwickelt. Abschließend wurde die in Abbildung 85 dargestellte Variante für die Werkzeugkonstruktion freigegeben.



Abbildung 85: 3D-Ansicht des zur Umsetzung freigegebenen Bauteil-Datensatzes.

Abbildung 86 zeigt im Detail die Einfassung des mittels In-situ-Polymerisation von Caprolactam hergestellten Schaufelblattes mit dem in Gelb dargestellten Thermoplastspritzguss. Die Spritzgusskomponente dient in Form der Rippen sowohl zur Versteifung des Stiels gegen Torsion, aber auch als Deckschicht zum Schutz der dünnen Faserverbundstrukturanten gegen in der Anwendung von außen einwirkende Kräfte.



Abbildung 86: Schnittdarstellung des zur Umsetzung freigegebenen Datensatzes.

Simulationen

Als Teil der Projektunterstützung und auf Basis umfangreicher Erfahrungen hinsichtlich von Verbundberechnungen wurden im Hause LanXess entsprechende Simulationen bezüglich Optimierung der Prozessführung und der erzielbaren Bauteilfestigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in der finalen Version der Bauteilkonstruktion sinngemäß berücksichtigt.

Festigkeitssimulation

Zur Simulation diente das FEA (Finite Elemente Analyse) Programm Abaqus in der Version 6.14 von Dassault Systems Simulia.

Begonnen wurde mit der Definition der Lastfälle, der Rahmenbedingungen und der Verbundfestigkeit, welche in Abbildung 87 dargestellt sind.

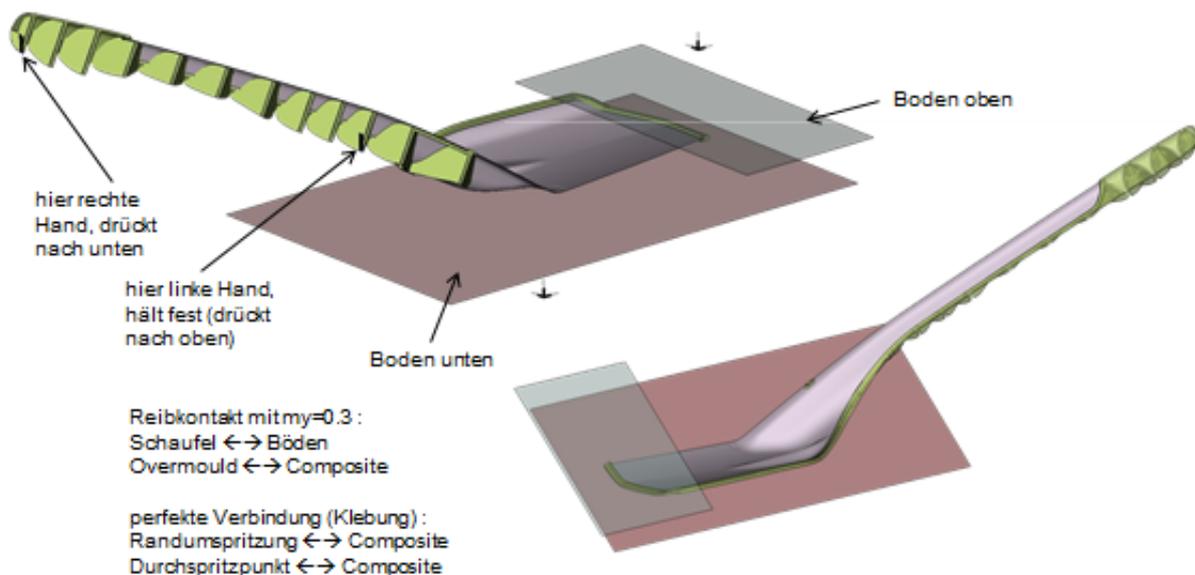


Abbildung 87: Darstellung der Annahmen der Simulationsrandbedingungen [38].

Ergänzt wurden diese Annahmen um die in Abbildung 88 ersichtliche Definition der verwendeten Materialien und ihrer Eigenschaften, als auch des zu erwartenden Verformungsverhaltens.

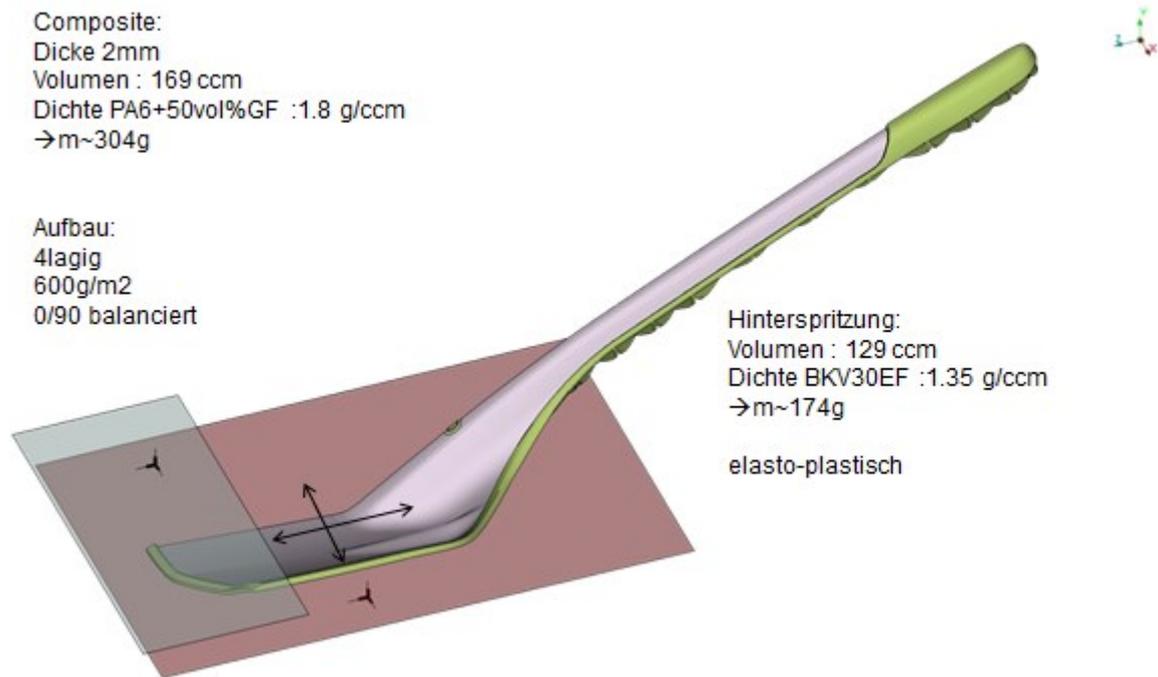


Abbildung 88: Definition der Materialannahmen inklusive des Verformungsverhaltens [38].

Es wurden die Lastfälle Zug, Biegung und Torsion berücksichtigt, die resultierenden Vergleichsspannungen mit den maximal zulässigen Spannungen abgeglichen und daraus eine Versagenswahrscheinlichkeit, wie in Abbildung 89 beispielhaft dargestellt, abgeleitet. Entsprechend den Simulationsergebnissen ist bei einer reinen Biegebelastung ein Versagen im Übergang vom Stiel zum Schaufelblatt zu erwarten.

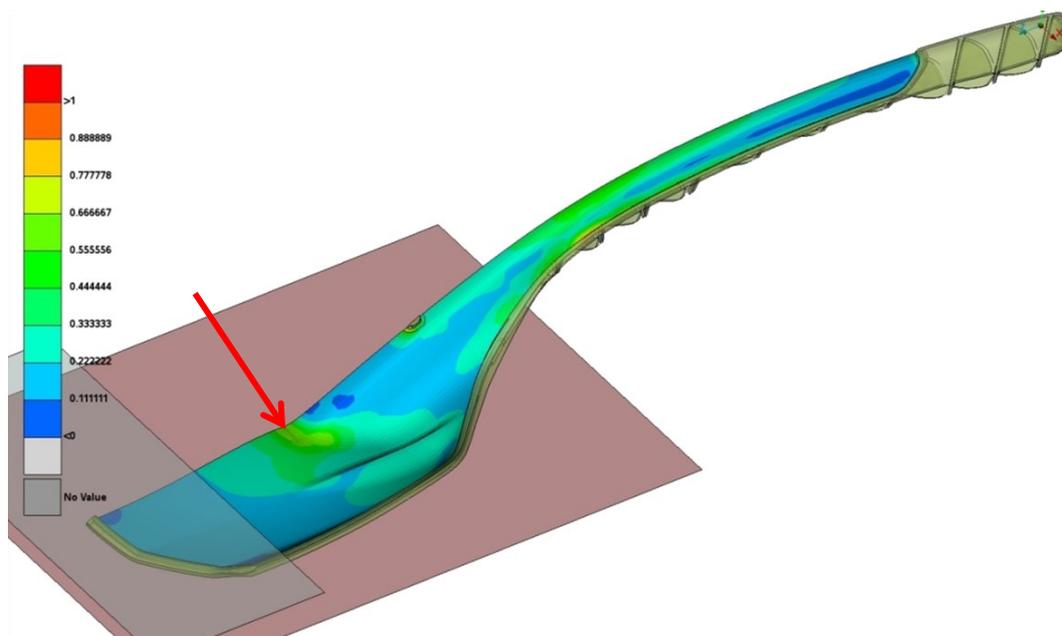


Abbildung 89: Darstellung der Versagenswahrscheinlichkeit bei reiner Biegebeanspruchung [38].

Die Abbildung 90 zeigt das errechnete Kraft/Verformungsdiagramm inklusive den, dem zu erwartenden Versagenseintreten, zugehörigen Belastungen und Verformungen.

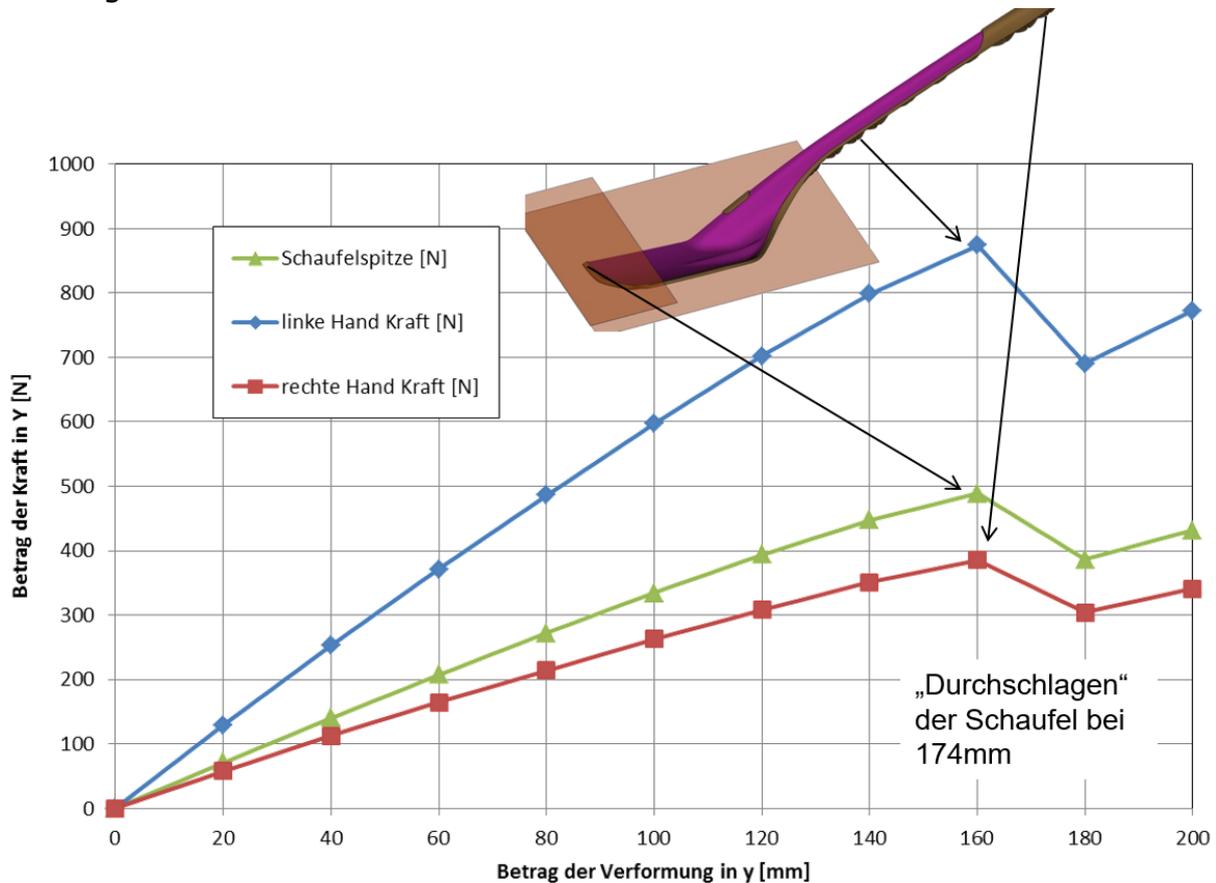


Abbildung 90: Kraft/Weg Verlauf bis zum Versagen bei 3-Punkt Biegebelastung [38].

Die dargestellten Werte lassen eine hinsichtlich Festigkeit ausreichend robuste Konstruktion erwarten, wenn auch die errechnete Verformung ein sehr weiches Biegeverhalten ausweist.

Basierend auf den Simulationsergebnissen wurden, wie exemplarisch in Abbildung 91 dargestellt, Empfehlungen zur Modifikation abgeleitet. So sollten Rippen in ihrer Position verändert und teilweise dicker ausgeführt werden. Auch wurden Rippen, mangels erwarteter ausreichender Anbindung, als unnötig identifiziert.

Vorausgesetzt einer positiven fertigungstechnischen Bewertung wurden diese Empfehlungen teilweise auch in die finale Bauteilkonstruktion übernommen.

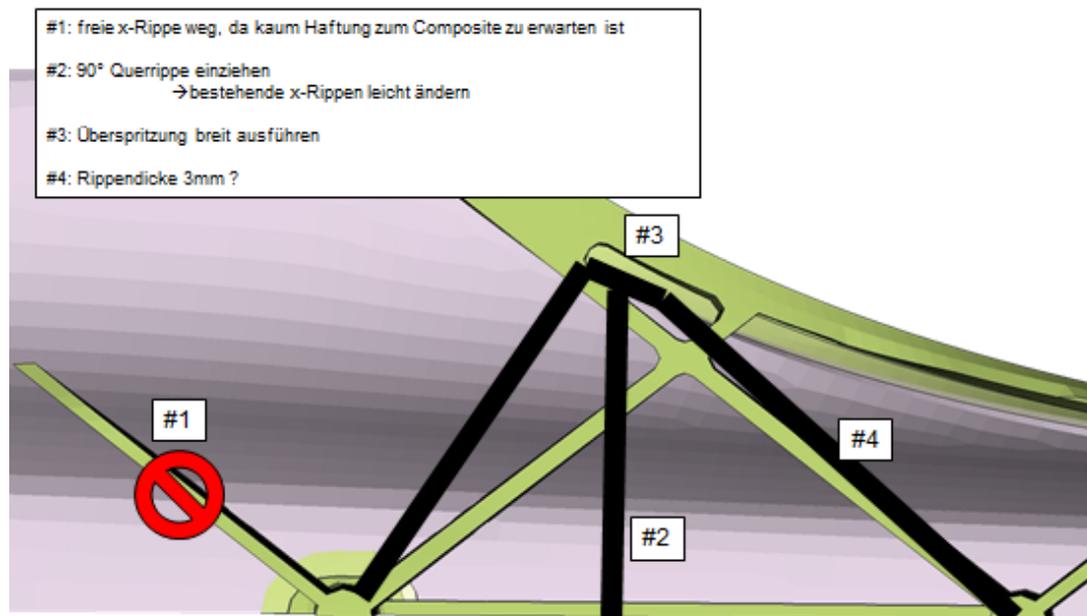


Abbildung 91: Darstellung der auf Basis der Simulation empfohlenen Modifikation der Versteifungsrippen (schwarz) [38].

Spritzguss-Prozesssimulation

Die mittels dem CAE (Computer Aided Engineering) Prozesssimulationsprogramm Moldflow Insight in der Version 6.1 von Autodesk durchgeführte Füllsimulation hat nach Rücksprache hinsichtlich der fertigungstechnischen Umsetzbarkeit im Werkzeug, die in Abbildung 92 dargestellte Anspritzpunktpositionierung bestätigt, wobei auch weitere positive Aspekte dieser Positionierung erkannt wurden.

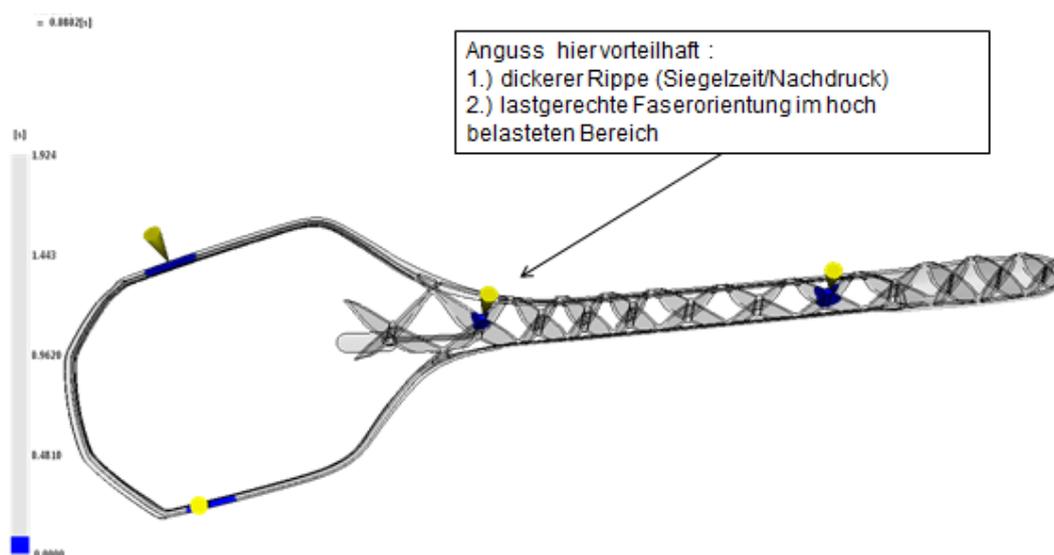


Abbildung 92: Darstellung der aus der Füllsimulation mit Moldflow Insight empfohlenen Lage der Anspritzpunkte [38].

3.5.3. Werkzeugkonstruktionsphase

Basierend auf den von form² zur Verfügung gestellten und zuvor in ihrer Entstehung beschriebenen Bauteildaten, den erläuterten Prozesssimulationsergebnissen, den in den vorangegangenen Kapiteln systematisch erarbeiteten Richtlinien und dem von Engel vorgegebenen Anlagenlayout (Abbildung 93) wurde ein Werkzeugkonzept für die Messeanlage erstellt und mittels dem CAD (Computer Aided Design) System PTC Creo konstruktiv umgesetzt.

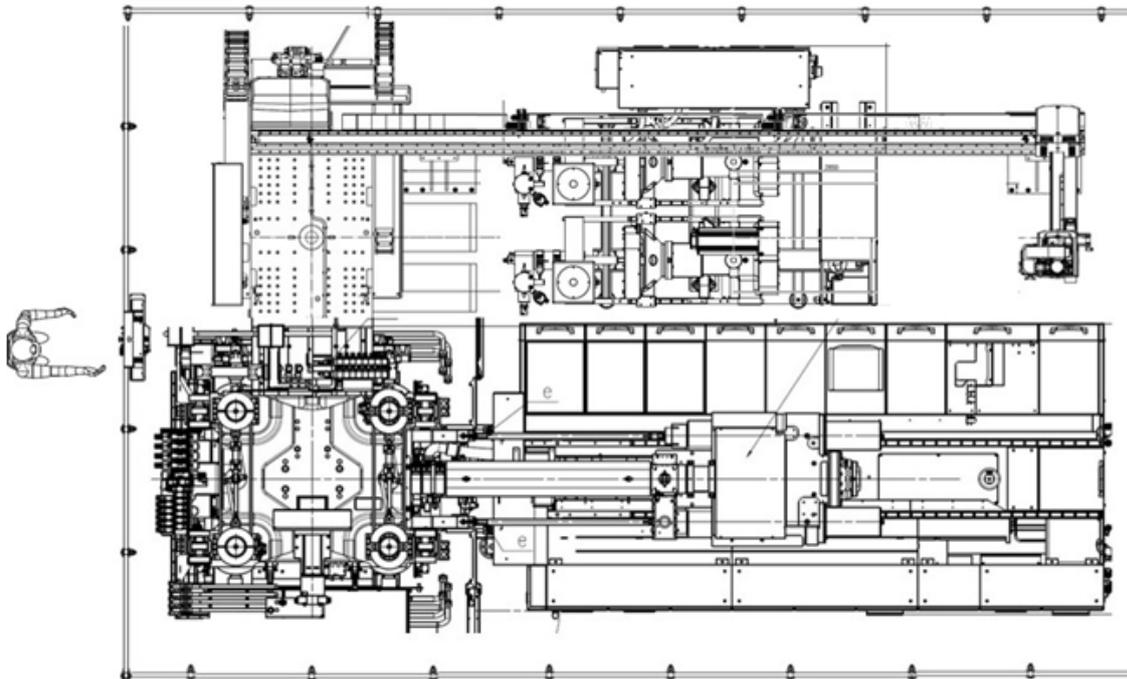


Abbildung 93: Ursprungslayout (Grundriss) der Messeanlage, bestehend aus einer vertikalen Schließeinheit mit horizontalem Schiebetisch mit zwei Endlagen, den beiden In-situ-Aggregaten, einem Spritzgussaggregat in L-Anordnung und einer Linearroboterautomatisierung.

Wie auch bereits in Kapitel 3.4.1. erläutert, wurde auf Grund des verfügbaren Anlagenkonzeptes und zur Komplexitätsreduktion des Projektes entschieden, zwei eigenständige Werkzeuge anstatt eines Kombinationswerkzeugs auszuführen.

Die in Abbildung 94 dargestellte zu einander versetzte Werkzeugpositionierung war erforderlich, um die Zugänglichkeit zu den beiden Komponentenzuführungen an beiden Seiten des In-situ-Werkzeugs trotz geringer räumlicher Reserven zu erhalten und eine Automatisierung mittels eines Linearroboters zu ermöglichen.

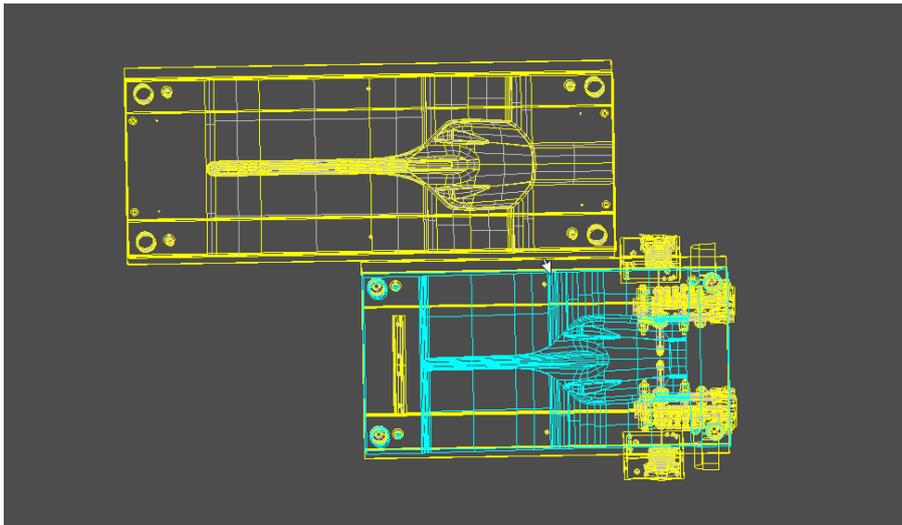


Abbildung 94: Zwecks optimierter Zugänglichkeit versetzte Werkzeuganordnung.

Die in Abbildung 95 ersichtliche horizontale L-Anordnung des Thermoplastspritzguss-Aggregates zur vertikalen Schließrichtung erforderte die Verwendung eines Heißkanalsystems mit Umlenkung in die Horizontale. Die Verbindung zwischen den In-situ-Aggregaten und den Düsen im Werkzeug erfolgt mittels Schläuchen, wodurch die räumliche Ausrichtung der Anschlüsse weitgehend frei erfolgen kann.

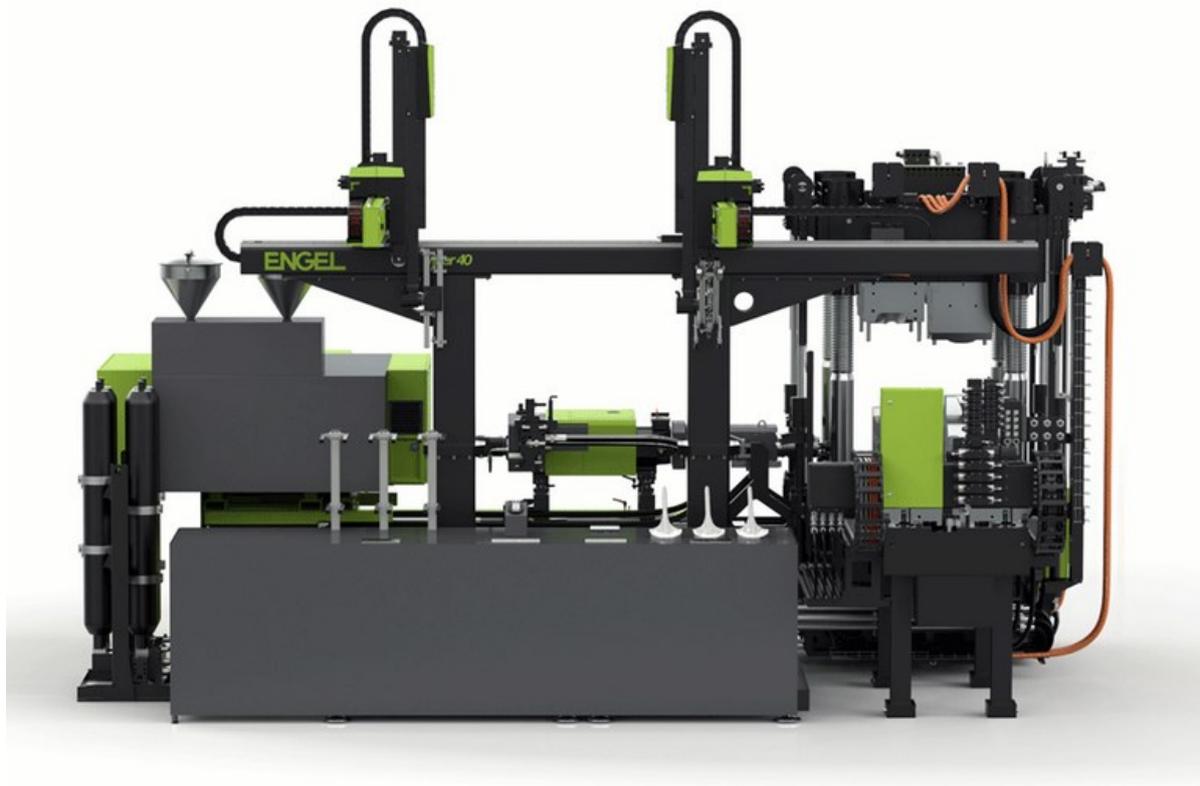


Abbildung 95: Fotorealistische Visualisierung der Engel V-DUO 700 Messeanlage.

Die Betätigung der Auswerfer erfolgt in beiden Werkzeugen mittels hydraulischer Zylinder. Abbildung 96 zeigt einen Schnitt durch die Kernseite des In-situ-Werkzeugs, inklusive dem Auswerfersystem, bestehend aus den Betätigungszylindern (Pos. 1), der Auswerferbrücke (Pos. 2) und den caprolactamfähig modifizierten Auswerfern (Pos. 3).

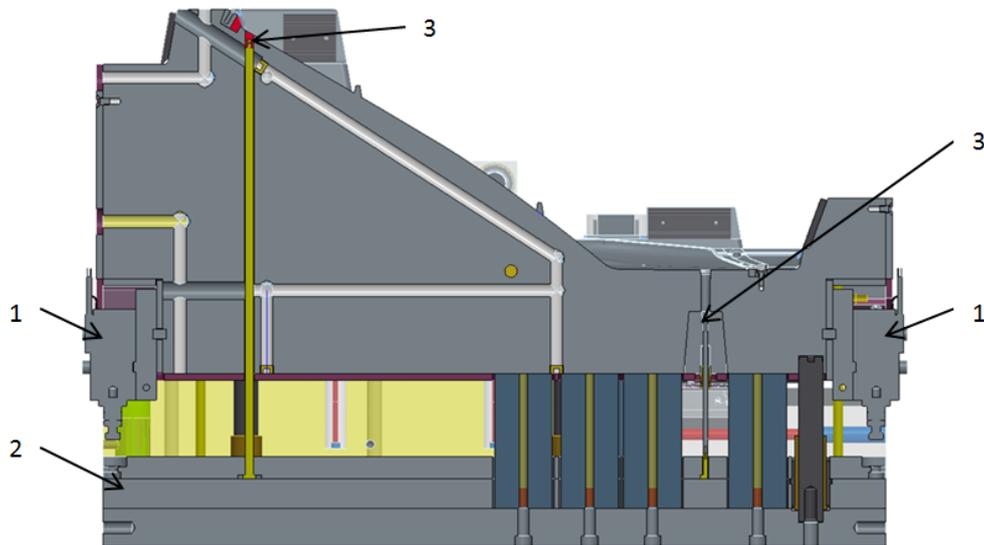


Abbildung 96: Schnittdarstellung des In-situ-Messewerkzeugs.

Dank zweier eigenständiger Werkzeuge konnte die räumliche Ausrichtung unabhängig und den jeweiligen Prozess- beziehungsweise den Geometrieanforderungen entsprechend ausgewählt werden. Folglich wurde das In-situ-Werkzeug zwecks Optimierung der Bauteilfüllung merklich steiler angeordnet und das Spritzgusswerkzeug nach der für die Festigkeit optimierten Rippenausrichtung flacher ausgeführt (Abbildung 97).



Abbildung 97: Fotorealistische Visualisierung der beiden nebeneinander angeordneten und in der Trennebenenlage abweichenden Messewerkzeuge.

3.5.4. Fertigungstechnische Umsetzung und Abstimmung

Die beiden Werkzeuge wurden entsprechend der Konstruktion gefertigt. Bedingt durch die bei Schöfer nicht verfügbare In-situ-Prozesstechnik als auch der speziellen Anordnung des Heißkanals für eine vertikale Schließeinheit, mussten sämtliche Werkzeugbemusterungen bei Firma Engel durchgeführt werden. Diesem Umstand geschuldet und wegen der zu erwartenden Projektkomplexität, bedurfte es umfangreicher Abstimmungsschleifen.

Grundlage für jegliche weitere systematische Abstimmung waren vorerst Bemusterungen des In-situ-Werkzeugs, bei denen der Preform zu Beginn manuell in das Werkzeug eingelegt wurde und Infiltrations- und Werkzeugdichtheitstests im Vordergrund gestanden sind. Dabei wurde unter anderem rasch festgestellt, dass das Bauteil beim Öffnen entgegen den Erwartungen leider nicht am Kern verblieben ist, sondern an der Kavitätenoberfläche anhaftete. Diesem Problem wurde erfolgreich gegengesteuert, indem die Oberfläche des Kerns mit einer rauen Struktur versehen wurde. Folglich hat sich aber gezeigt, dass nun die vorgesehenen Auswerfer zu wenig Kraft ausüben konnten, um das Bauteil vom Kern abzuheben. Um eine Prozessfähigkeit ohne den Einsatz von Trennmitteln zu gewährleisten, wurde die Struktur am Kern geringfügig reduziert und am Stielende ein zusätzlicher Auswerfer positioniert.

Die Abdichtung der Werkzeugtrennebene stellte trotz des dreidimensionalen Verlaufs vorerst kein Problem dar, und auch der eingesetzte Vakuumbaustein erfüllte seine Aufgabe ausreichend.

Die im Zuge dieser Abstimmungsversuche separat hergestellten Bauteile wurden im Folgenden ebenfalls manuell in das separat und mittig aufgespannte Spritzgusswerkzeug eingelegt und mit der Spritzgusskomponente versehen. Auch dies verlief mit Ausnahme einer geringfügigen Gratbildung zufriedenstellend.

Die entscheidenden Herausforderungen stellten sich aber erst ein, als die beiden Werkzeuge gleichzeitig und außermittig auf der Anlage gerüstet wurden. Somit mussten die Werkzeugeinbauhöhe, beziehungsweise die auf die Trennebene einwirkenden Kräfte aufeinander abgestimmt werden. Dies war besonders anspruchsvoll, da die jeweiligen Einleger Preform und In-situ-Bauteil in ihrer Varianz Einfluss auf den Werkzeugschluss haben. Das Ausmaß der Abweichung konnte auch die Plattenparallelitätsregelung der Anlage nicht ausgleichen.

Zudem verursachen die unterschiedlichen Temperaturniveaus beider Werkzeuge merklich unterschiedliche thermische Ausdehnungen. Dieser Effekt konnte nur sehr eingeschränkt in der Werkzeugkonstruktion berücksichtigt und somit vorgehalten

werden. Die umfangreichen Abstimmungsarbeiten waren erst unmittelbar an der Anlage möglich (Abbildung 98).



Abbildung 98: Finale Abstimmungsarbeiten an den Trennebenen.

Mit Inbetriebnahme der Automatisierung hat sich dann auch gezeigt, dass die ursprünglich auf einen Zentrierpin beschränkte Zentrierung und Fixierung des Preforms unzureichend sein würde, da der Preform trotz seiner Geometrie am Kern Spiel hatte und somit in seiner Position sehr variabel war. Dies erforderte, dass der Preform vorerst merklich gekürzt werden musste, um sicherzustellen, dass nicht wiederkehrend Glasfasern die Werkzeugtrennung gefährden konnten. Durch die Installation eines weiteren Pins konnte eine ausreichende Positionierung und Fixierung des Preforms gewährleistet werden. Dieser muss aber höher sein als der Lagenaufbau. Da der Preform vor seiner Konsolidierung im Werkzeug dicker als das Bauteil ist, muss auch der Pin entsprechend höher sein, andernfalls könnte es zu einer Quetschung des Preforms zwischen dem Pin und der Kavität kommen. Dies bedeutet aber auch, dass der Pin keinen flächigen Blindschluss haben darf, sondern in die Kavität eintauchen muss. Somit bedarf es auch hierfür einer entsprechenden Abdichtung (Abbildung 99).



Abbildung 99: Pin im Werkzeug zur Zentrierung des Preforms und gegenüberliegende abdichtende Buchse zur Aufnahme des Pins.

Wie in Abbildung 100 erkennbar, sind für die Inbetriebnahme des In-situ-Werkzeugs umfangreiche Verbindungen zwischen Werkzeug und Anlage herzustellen, zudem muss das Werkzeug auf die erforderliche Prozesstemperatur gebracht werden. Dementsprechend bedeutet jeder Abstimmungsaufwand am Werkzeug, welcher aus fertigungstechnischen oder aus Arbeitnehmerschutzgründen nicht am heißen Werkzeug erfolgen kann, oder die Nutzung entsprechender Werkzeugbaumaschinen erfordert, einen erheblichen Zeitaufwand.

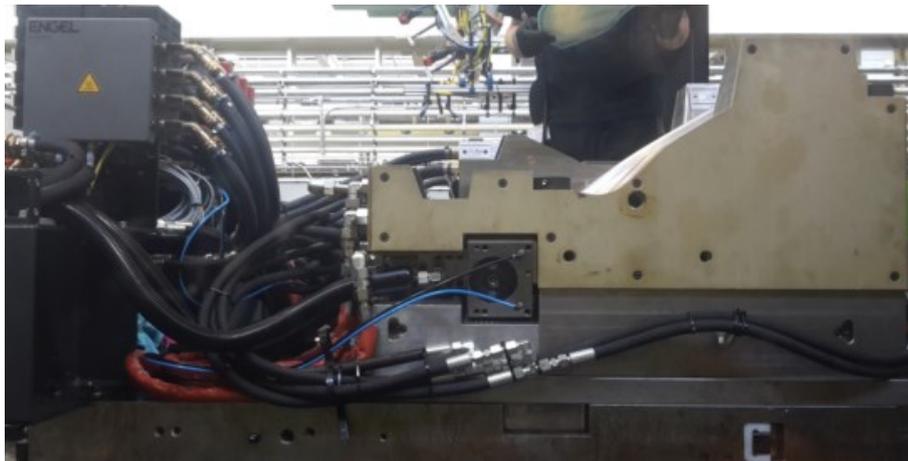


Abbildung 100: Am Schiebetisch montierte In-situ-Werkzeugkernseite.

3.5.5. Erste werkzeugfallende Bauteile

Trotz aller Herausforderungen konnten nahezu zeitgerecht erste werkzeugfallende Bauteile hergestellt werden, welche qualitativ den Erwartungen des Entwicklungsprojektes entsprachen. Auch konnte mit insgesamt 456 g die Gewichtszielvorgabe, selbst mit Glasfasergewebe erreicht werden. Ein erstes Referenzbauteil vergleichbarer Festigkeit in Kohlefasergewebe hatte nur 400 g.

Somit ist auch die optionale Metallkante zum Schutz des Schaufelblattes und ein ergänzendes TPE Bauteil im Griffbereich zur Erhöhung des Komforts aus Gewichtsgründen zulässig.



Abbildung 101: Die jeweils ersten werkzeugfallenden Bauteile.

3.5.6. Erste Bauteilfestigkeitstests

Erste Bauteiltests bestätigen das erwartete Werkstoff- und Bauteilverhalten unter Biegebelastung (Abbildung 102).

Eine genauere Analyse der möglichen Performance und deren Einflussgrößen soll in einem Folgeprojekt durchgeführt werden.

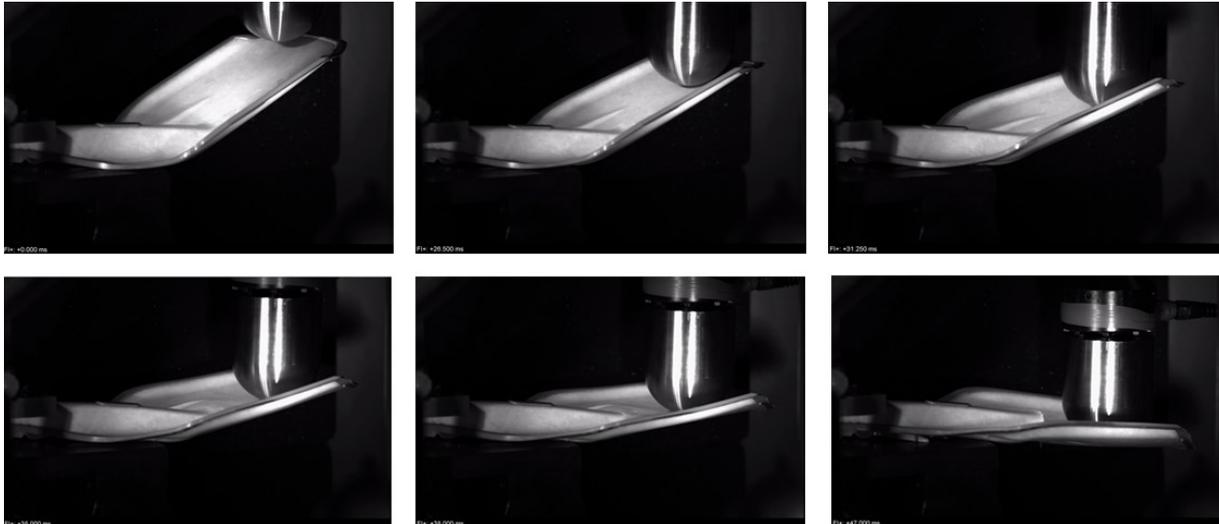


Abbildung 102: Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommene Bildfolge der Belastung des Schaufelblattes bis zum Bruch.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der aktuelle Trend zu energieeffizienter Mobilität geht auch einher mit einer merklichen Intensivierung der Aktivitäten, vornehmlich der Automobil OEM (Original Equipment Manufacturer), hinsichtlich der Entwicklung von Leichtbauelementen und -strukturen.

Da aber die derzeit verfügbaren kunststoffverarbeitenden Prozesse mehrheitlich den umfangreichen Erwartungen zur Herstellung nicht entsprechen, herrscht merkliches Interesse, sowohl an alternativen Verfahrenskombinationen als auch an neuen Verfahren. Nachfragegetrieben gibt es derzeit eine Vielzahl von Einzelinitiativen, bestehende Technologien weiterzuentwickeln, beispielsweise das Verfahren des In-situ-Polymerisierens von Caprolactam zu Polyamid 6 im Werkzeug.

Obwohl die Herstellung von Gusspolyamid Bauteilen grundsätzlich seit Jahrzehnten dem Stand der Technik entspricht, zeigen neueste Entwicklungen in der Anlagen- und der Prozesstechnik aktuell wesentliche Chancen für Spritzgusslösungen auf.

Eine dauerhafte Überleitung in Serienherstellungsprozesse für Leichtbauteile ist aber nur zu erwarten, wenn im Gesamtpaket sowohl Anlagentechnik, Rohmaterialherstellung und Werkzeugtechnik eine Serienfähigkeit zu wettbewerbsfähigen Bedingungen nachweisen können.

Diese Arbeit ist ein wesentlicher Teil dieses Paketes, welches für die Herstellung von faserverstärkten thermoplastischen Leichtbauteilen mittels In-situ-Polymerisation von Caprolactam erforderlich ist.

Diese umfasste:

- Den Entwurf, die Simulation, die Konstruktion und den erfolgreichen Test eines werkzeugintegrierten Mischsystems.
- Die Konzeptionierung, den Bau und die Inbetriebnahme eines Probepplattenwerkzeugs sowie eines seriennahen Versuchswerkzeugs für die Herstellung einer Leichtbauschaukel.
- Die Lösung besonderer Dichtheitsanforderungen durch das niedrig viskose Caprolactam an der Werkzeuggrenzebene und an den beweglichen Elementen (Auswerfer).
- Das Design beziehungsweise auch die Prozess- und die Festigkeitssimulation der Leichtbauschaukel.

Die dargestellten Ergebnisse und die parallel entwickelten und der Arbeit ebenfalls zu Grunde liegenden Entwicklungen der verfügbaren Materialien und Anlagentechnik zeigen nochmals erhebliche Fortschritte und haben somit merkliches Potential.

Erste Vorserienentwicklungsversuche im industriellen Maßstab im Auftrag der Systemlieferanten und der OEM's im automobilen Umfeld sind daher in naher Zukunft zu erwarten. Dennoch sind zuvor und parallel zu ersten seriennahen Umsetzungen noch umfangreiche systematische Versuche und Entwicklungen erforderlich, um den Prozess für die verschiedensten angedachten Anwendungen und die damit verbundenen Anforderungen optimal verstehen, simulieren und einsetzen zu können.

Hierfür bedurfte es im Rahmen dieser Arbeit und bedarf es in weiteren wissenschaftlichen Arbeiten intensiver Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen und den Forschungspartnern unterschiedlichster Disziplinen und Forschungsschwerpunkte.

5. Literaturverzeichnis

- [1] R. LÄSSIG, M. EISENHUT, A. MATHIAS, R. SCHULTE, F. K. T. PETERS und T. B. W. WALDMANN, „Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen,“ VDMA, 2012.
- [2] C. HOPMANN, A. NEUSS, M. WEBER, K. FISCHER, J. SCHILD, L. LINNEMANN, J. WUNDERLE, C. KARATZIAS und N. LAMMERT, „Funktionsintegrierter Leichtbau für die Großserienproduktion,“ *Kunststoffe 103*, pp. 134-139, 2013.
- [3] S. NEDEL, L. KROLL, J. GRÜNERT und H. HEINRICH, „Ressourcenschonende Herstellung unidirektional faserverstärkter thermoplastischer Halbzeuge und deren Verarbeitung,“ in *13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung*, Chemnitz, 2012.
- [4] C. BRECHER, A. KERMER-MEYER, M. DUBRATZ und M. EMONTS, „Thermoplastische Organobleche für die Großserie,“ *Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. ATZ 112, pp. 28-32, 2010.
- [5] J. MITZLER und S. FENSKE, „In wenigen Schritten zum Wunschgewicht,“ *Kunststoffe*, pp. 68-70, 03 2016.
- [6] K. RIJSWIJK und H. BERSEE, „Reactive processing of textile fibre-reinforced thermoplastic composites – An overview,“ Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Design and Production of Composite Structures, 2006.
- [7] N. BEYL, „Leichtbau macht Reaktionstechnik lebendig,“ *K-Zeitung, Ausgabe 14*, p. 4, 17 07 2015.
- [8] C. DORIAT, „Vernetzung nach Maß,“ *Kunststoffe*, p. 49, 08 2016.
- [9] mg, „K Zeitung Online,“ [Online]. Available: <http://www.k-zeitung.de/was-mit-pur-alles-geht/150/1085/90746/>. [Zugriff am 26 08 2016].
- [10] Unfallversicherung, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen gesetzlichen, „Gestis-Datenbank,“ [Online]. Available: http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de%2F013240.xml. [Zugriff am 05 07 2012].
- [11] P. SCHLACK, *Polymerizable Lactams*, Stuttgart, pp. 507-523.
- [12] L. BERG, D. GITTEL und R. CHAUDHARI, „Innovative Solutions for the Production of High Performance Composite Structures with Thermoplastic Matrix,“ in *Composite Europe*, Stuttgart, 2007.
- [13] L. BERG, „Process Development for the reactive injection moulding of Caprolactam intermediates,“ PhD thesis, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Fraunhofer ICT Band 50, 2011.
- [14] K. KIM, Y. Y. KIM, B. YOON und K. YOON, „Mechanism and Kinetics of Adiabatic Anionic Polymerization of Epsilon-Caprolactam, in the presence of various activators,“ *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 1347-1358, Volume 57.
- [15] K. V. RIJSWIJK, „Vacuum infusion technology for anionic polyamide-6 composites,“ PhD thesis, Technische Universität Delft, Delft, 2007.
- [16] P. WAGNER, „Verarbeitung von Caprolactam zu Polyamid Formteilen nach dem RIM Verfahren,“ *Kunststoffe*, pp. 588-590, 10 1983.
- [17] K. UHLIG, *Polyurethan Taschenbuch*, München: Carl Hanser Verlag, 2005.
- [18] V. BEGISHEV und A. MALKIN, *Reactive Processing of Polymers*, Ontario: ChemTec Publishing, 1999.
- [19] Baur, Brinkmann, Osswald, Rudolph und Schmachtenberg, *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*, München: Carl Hanser Verlag, 2013.

- [20] Hennecke, [Online]. Available: <http://www.hennecke.com/products/dosing/hp/streamline>. [Zugriff am 25 08 2016].
- [21] Krauss Maffei, [Online]. Available: <http://www.kraussmaffei.com/de/mischkoepfe.html>. [Zugriff am 25 08 2016].
- [22] G. BÄCK und L. REITH, *Besprechungsmemo Abstimmung In-Situ Mischsystem*, EMS BZ3 20G, 20.01.2014.
- [23] Wacker Chemie AG, „www.wacker.com,“ [Online]. Available: http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6709_DE.pdf. [Zugriff am 29 08 2016].
- [24] GÜNTHER Heißkanaltechnik GmbH, „Kaltkanaltechnik,“ Frankenberg, 2016.
- [25] GÜNTHER Heißkanaltechnik GmbH, „Spezialnadelverschlussystem,“ Frankenberg, 2015.
- [26] N. LAMMERT, „Entwicklung eines endlosfaserverstärkten in situ polymerisierten thermoplastischen Leichtbauteils und der erforderlichen Werkzeugtechnologie,“ Masterarbeit, RWTH Aachen, Aachen, 2013.
- [27] GÜNTHER Heißkanaltechnik GmbH, „Ausführung Kaltkanalsystem E2-TSD_00158,“ Frankenberg, 04-2015.
- [28] J. NAGY, G. STEINBICHLER, A. CONDE und L. REITH, „Mit Simulation schneller in die Anwendung,“ *Kunststoffe*, pp. 99-103, 03 2016.
- [29] J. NAGY und L. REITH, „20140701_AP1.TP1.7_Mischsystem,“ JKU IPIM, Linz, 2014.
- [30] L. REITH und J. NAGY, „Report No. 20150930_AP1_1.7_alternatives Mischkonzept_2,“ JKU IPIM, Linz, 2015.
- [31] GÜNTHER Heißkanaltechnik GmbH, „Ausführungsdetails der Vorkammer,“ Frankenberg, 2012.
- [32] GÜNTHER Heißkanaltechnik GmbH, „Ausführung Kaltkanalsystem E3-TSD_00158.01,“ Frankenberg, 05-2015.
- [33] Krauss Maffei, „www.kraussmaffei.com,“ 15 06 2016. [Online]. Available: <http://www.kraussmaffei.com/media/files/kmnews/de/PM-RPM-2016-06-SealStar-de.pdf>. [Zugriff am 07 09 2016].
- [34] HASCO Hasenclever GmbH + CoKG, „HASCO,“ [Online]. Available: <https://www.hasco.com/medias/A4200-PRO-DE-EN-FR.pdf>. [Zugriff am 08 09 2016].
- [35] C. PISCHEL, „Dicht sein ist Alles,“ *Plastverarbeiter*, pp. 60-61, 04 2006.
- [36] M. ZEPPEAUER, „In-Situ Schneeschaukel Präsentation,“ form², Linz, 2015.
- [37] D. WILHELM, „Concept Bemaßung,“ form², Linz, 2016.
- [38] J. KNAUP, „LXS HPM GPAD CES,“ LANXESS, 2016.
- [39] J. PRÖLL, „Entwurfsdaten In-Situ Schneeschaukel,“ form², Linz, 2016.

6. Anhang

6.1. Begriffe und Abkürzungen

In-situ	Lateinisch für "am Ort"
RIM	Reaction Injection Moulding
RTM	Resin Transfer Moulding
SRIM	Structural Reaction Injection Moulding
T-SRIM	Structural Reaction Injection Moulding mit thermoplastischer Matrix
PUR	Polyurethan
HP-RTM	High Pressure Resin Transfer Moulding
LSR	Liquid Silicone Rubber
CFD	Computational Fluid Dynamics
CT	Computer Tomographie
UHMWPE	Ultrahochmolekulares Polyethylen
PK	Polyketon
POM	Polyoxymethylen
PA6	Polyamid 6
OEM	Original Equipment Manufacturer
CF	Carbonfaser
GF	Glasfaser

6.2. Industrie- und Forschungspartner

Industrie- / Forschungspartner	Aufgabengebiet
Engel Austria GmbH; A-4311 Schwertberg	In-situ prozessfähige Spritzgussanlage mit Automatisierung
Schöfer GmbH, A-4311 Schwertberg	Werkzeugkonstruktion und Werkzeugbau
Lanxess Deutschland GmbH; D-41531 Dormagen	Rohmaterial für In-situ-Polymerisation und Spritzguss Füllsimulation FEM-Simulation
GÜNTHER Heisskanaltechnik GmbH; D-35066 Frankenberg	Caprolactam kompatibles temperiertes Naderverschlussystem
formquadrat GmbH; A-4020 Linz	Bauteildesign
<i>Institut für Polymer-Spritzgießtechnik und Prozessautomatisierung;</i> A-4040 Linz	CFD Simulation des Strömungsverhaltens des Caprolactams

6.3. Zeitplan des Entwicklungsprojektes

	Aug.15	Sep.15	Okt.15	Nov.15	Dez.15	Jän.16	Feb.16	Mär.16	Apr.16	Mai.16	Jun.16	Jul.16	Aug.16	Sep.16	Okt.16
Entwurf, Simulation und Konstruktion eines werkzeugintegrierten Mischsystems	■	■	■												
Bau und Test eines werkzeugintegrierten Mischsystems			■	■	■										
Entwicklung eines Bauteil- und Werkzeugkonzepts				■	■	■									
Bauteilkonstruktion						■	■								
Machbarkeitsanalyse							■								
Bauteildatenfinalisierung							■								
Werkzeugkonstruktion (Messewerkzeug)								■	■						
Werkzeugherstellung									■	■	■	■	■		
Prozessversuche												■	■	■	■
Prozessauswertungen												■	■	■	■
Bauteilanalyse													■	■	■
Prozessoptimierungen													■	■	■
Ergebnispräsentation															■
Abschluss der Masterarbeit															■

6.4. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

<i>Abbildung 1: Vergleich verschiedener Verfahren zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffbauteile [2].</i>	9
<i>Abbildung 2: Die Herstellung von Bauteilen mit Organoblechen gliedert sich in sechs elementare Prozessschritte [5].</i>	10
<i>Abbildung 3: Vergleich der bei der jeweiligen Prozessführung möglichen Viskosität diverser Monomere, Oligomere und Polymere in Bezug auf die zur Verarbeitung erforderlichen Prozesstemperaturen [6].</i>	11
<i>Abbildung 4: Einzelkomponenten der In-situ-Polymerisation zu Polyamid [12].</i>	14
<i>Abbildung 5: Links: LanXess AP Caprolactam Flakes; Mitte: Brüggemann Chemical Aktivator C20P; Rechts: Katalysator C10 [13].</i>	14
<i>Abbildung 6: Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur für Caprolactam, Brüggolen Aktivator C20P und Katalysator C10 [13].</i>	15
<i>Abbildung 7: Einfluss unterschiedlicher Rezepturen auf die zeitliche Abhängigkeit der Viskosität [13].</i>	16
<i>Abbildung 8: Einfluss der Rezeptur auf den Temperaturanstieg infolge von Polymerisation und Kristallisation [13].</i>	16
<i>Abbildung 9: Prozessdarstellung von T-SRIM zur Herstellung endlosfaserverstärkter Bauteile mittels anionischer Polymerisation von Caprolactam [13].</i>	17
<i>Abbildung 10: Zyklusdarstellung für die In-situ-Polymerisation von Caprolactam [13].</i>	17
<i>Abbildung 11: Darstellung des Zusammenhangs der prozessrelevanten Komponenten (Plastifizierung, Mischkopf, In-situ-Werkzeug) [2].</i>	18
<i>Abbildung 12: Prototyp einer ENGEL-Spritzgussmaschine e-victory 120 mit speziellen Spritzaggregaten zur Verarbeitung von Caprolactam, Aktivator und Katalysator als Ausgangsprodukte [13].</i>	19
<i>Abbildung 13: Fließschema einer HP-RTM Anlage (Kreislaufsystem) [19].</i>	20
<i>Abbildung 14: Hennecke Streamline – HP-RTM-Serienanlage zur Verarbeitung von PUR (ohne Formenträger) [20].</i>	21
<i>Abbildung 15: In-situ-Spritzgusswerkzeug mit integrierter Dichtungstechnik [2].</i>	23
<i>Abbildung 16: Schnittdarstellung eines PUR-Gegenstrommischkopfes [21].</i>	25
<i>Abbildung 17: Schematische Darstellung der Medienströme und Arbeitsstellungen eines Mischkopfes (Bauart Hennecke MX) [17].</i>	26
<i>Abbildung 18: Darstellung der Einbausituation des Mischkopfes unter der Voraussetzung einer Freistellung in der Aufspannplatte.</i>	28
<i>Abbildung 19: Abbildung der zentralen Einbausituation des Mischkopfes sowie der notwendigen Isoliermaßnahmen auch zum Schutz der Hydraulikkomponenten vor thermischer Überbelastung [2].</i>	28
<i>Abbildung 20: Schematische Darstellung einer für LSR konzipierten Kaltkanal-Lösung in offener Ausführung [23].</i>	34
<i>Abbildung 21: Schnittdarstellung eines pneumatisch betätigten Nadelverschlussystems einer für LSR konzipierten Kaltkanal-Lösung [24].</i>	34
<i>Abbildung 22: 3D-Darstellung eines servoelektrisch betätigten Nadelverschlussystems einer für LSR konzipierten Kaltkanal-Lösung [25].</i>	35
<i>Abbildung 23: 3D-Darstellung eines pneumatisch betätigten Nadelverschlussystems einer für LSR konzipierten Kaltkanal-Lösung [25].</i>	36
<i>Abbildung 24: Fotos von O-Ringen der Type Normatec ORM 170-15 vor (links) und nach (rechts) der Lagerung in Caprolactam.</i>	37

<i>Abbildung 25: Fotos von O-Ringen der Type DuPont Kalrez 7075 vor (links) und nach (rechts) der Lagerung in Caprolactam.</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 26: 3D-Darstellung des nach ersten Vorgaben überarbeiteten pneumatisch betätigten Nadelverschlussystems E2-TS_00158 [27].</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 27: Entwurfsskizze zur schematischen Anordnung der Düsen und Ausführung der Mischkammer in einer 2-Trennebenen-Variante.</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 28: Dimensional angepasster Entwurf zur Plausibilisierung der Düseneinbausituation und Ausführung der Mischkammer in einer 2-Trennebenen-Variante.</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 29: Entwurf mit deutlich reduzierter Mischkammer zur Verifikation der Düseneinbau-Situation und Ausführung der Mischkammer in einer 2-Trennebenen-Variante.</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 30: Alternativer Entwurf zur schematischen Anordnung der Düsen und Ausführung der Mischkammer in einer 1-fach-Trennebenen-Variante.</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 31: Grobskalierte Tracerverteilung im oberen Teil der Mischkammer [29].</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 32: Feinskalierte Tracerverteilung der gesamten Mischkammer [29].</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 33: Zeitgemittelte Tracerverteilung auf drei ausgewählten Ebenen (Abstände zum Mischkammereintritt) für die integrierte Mischkammergeometrie gemäß Abbildung 29 [29].</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 34: Zeitgemittelte Tracerverteilung auf drei ausgewählten Ebenen (Abstände zum Mischkammereintritt) für die Vergleichsgeometrie „Stand der Technik“ [29].</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 35: Geschwindigkeitsverteilung bei niedrigem und hohem Volumenstrom [30].</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 36: Gemittelte Tracerverteilung beim geringen Volumenstrom [30].</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 37: Homogenitätsverteilung in Abhängigkeit von der Düsenlänge für die Mischkammergeometrie laut Abbildung 30 [30].</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 38: Dimensionale Detaildarstellung des Mischkammerbodens im Plattenwerkzeug auf Basis der Simulationsergebnisse.</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 39: Schnittdarstellung der Dichtbereiche bei einer 3-teiligen Ausführung der Mischkammer.</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 40: Detaildarstellung der Dichtbereiche zwischen Düsenkopf und Werkzeugeinsatz.</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 41: Ausführungsvorgaben der metallischen Dichtbereiche der Vorkammer [31].</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 42: Detaildarstellung der Dichtbereiche durch den gesamten Düsenquerschnitt.</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 43: 3D-Darstellung des für Caprolactam modifizierten Kaltkanalsystems E3-TS_00158.01 bestehend aus Verteilerblock (Pos. 1), Düse (Pos. 2) und Nadelbetätigung (Pos. 3) mit Endlagenabfrage (Pos. 4) [32].</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 44: Foto des ersten Testaufbaus ohne montierte Medienleitungen.</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 45: Screenshot des Prozessmonitors zur Visualisierung der Drucküberwachung der Spritzaggregate (Ordinate: Druck (bar); Abszisse: Zeit (s)).</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 46: Darstellung der Abhängigkeit der Nadelbewegung vom Ansteuerdruck.</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 47: Darstellung der Abhängigkeit des Massedrucks vom vorgegebenen Austragsvolumen im Vergleich der beiden Düsen.</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 48: Am Nadelbetätigungszyylinder verbautes Blockelement mit zentralem Anschlagbolzen zur mechanischen Hubbegrenzung des Nadelhubs.</i>	<i>58</i>

<i>Abbildung 49: Darstellung der Abhängigkeit des Massedrucks vom Austragsvolumen im Vergleich der beiden Düsen nach erfolgreicher Variation des Düsenhubes.....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 50: Schnittdarstellung des werkzeugintegrierten Mischsystems im Messeaufbau, bestehend aus kompakterem Düsensystem (Pos. 1), optimierter Mischkammer (Pos. 2) und Auswerfersystem in vertikaler Anordnung (Pos. 3).</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 51: Foto des verbauten kompakteren Kaltkanalsystems und der Anschlüsse für Temperierung (rot), Material (grün) und Pneumatik (blau).....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 52: Foto eines auspolymerisierten Angusszapfens in Werkzeuglage.</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 53: Horizontale und vertikale CT Schnittdarstellung einer aus einem Bauteil entnommenen Materialprobe.....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 54: Mikroskopieaufnahme der Grenzfläche zwischen dem In-situ-PA6 mit endlos GF Gewebe (weiß) und dem PA6GF30 Kurzglasfaser-Spritzguss (grün).</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 55: Mikroskopieaufnahme der Grenzfläche zwischen dem In-situ-PA6 mit endlos GF Gewebe (weiß) und dem PA6GF30 Kurzglasfaser-Spritzguss (grün).</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 56: Abdichtung mittels Thermoplastvorspritzling (schwarz).</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 57: Abdichtung mittels aufblasbarer Dichtschnur der Ausführung Seal Star (blau) [33].....</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 58: Kombination aus Runddichtschnur, mittels Presskante komprimiertem Preform und Tauchkante [2].</i>	<i>67</i>
<i>Abbildung 59: Exemplarischer Einsatz des roten Murseal® Werkstoffs um die Gratbildung zu verhindern [35].</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 60: Probekörper aus UHMWPE/PK/POM/Murseal zur Auswertung nach entsprechender Extraktion (Vordergrund) und Reaktivtest (Hintergrund).....</i>	<i>70</i>
<i>Abbildung 61: Foto des aus dem Gusspolyamid herausgelösten UHMWPE.</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 62: Foto des im Gusspolyamid eingebetteten PK.....</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 63: Foto des im Gusspolyamid eingebetteten POM.....</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 64: Foto des im Gusspolyamid eingebetteten Murseal®.</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 65: Schnittdarstellung des Murseal® Dichteinsatzes und der Fixierung im Werkzeug.</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 66: Schnittdarstellung des in seiner Dichtbreite reduzierten Murseal® Dichteinsatzes inklusive der Fixierung im Werkzeug.....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 67: Schnittdarstellung der Funktionsweise und der Verbausituation des in der Dichtbreite deutlich reduzierten Einsatzes, inklusive der außenliegenden Stützflächen.....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 68: Nutzung von Murseal® Einsätzen am gesamten Umfang der Werkzeuggtrennung.</i>	<i>77</i>
<i>Abbildung 69: Ausschließlich in Metall ausgeführten Kavität mit außenliegender zusätzlicher Vakuumdichtung.</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 70: Detailaufnahme des in seiner Dichtbreite optimierten Murseal®-Dichteinsatzes inklusive der Fixierung im Werkzeug und der außenliegenden Abstützung.</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 71: Erforderliche Dehnfuge im kalten Werkzeug.</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 72: Foto der werkzeugfallenden Bauteilgeometrie.</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 73: Schnittdarstellung einer Auswerferlösung mit konisch geformten metallischen Auswerferköpfen.</i>	<i>82</i>
<i>Abbildung 74: Schnittdarstellung einer Auswerferlösung mit einem aus Murseal hergestellten Auswerferkopf (rot).</i>	<i>83</i>

<i>Abbildung 75: Auswerfer mit Murseal Auswerferkopf.</i>	<i>85</i>
<i>Abbildung 76: Foto der kaum wahrnehmbaren Abzeichnung des Auswerferkopfes am fertigen Bauteil.</i>	<i>85</i>
<i>Abbildung 77: Layout (Aufriss) der verfügbaren Engel V-DUO 700 mit horizontalem Schiebetisch.....</i>	<i>89</i>
<i>Abbildung 78: Beispiel einer am Markt verfügbaren kompakten und dennoch äußerst robusten Schaufel [36].</i>	<i>91</i>
<i>Abbildung 79: Erste Designskizzen möglicher Stiel/Griff-Kombinationen [36].</i>	<i>91</i>
<i>Abbildung 80: Überarbeitete und maßlich definierte Designskizze [37].</i>	<i>92</i>
<i>Abbildung 81: Papiermodell zur Visualisierung der für das Gewebe drapierrelevanten Übergänge zwischen Stiel und Schaufelblatt.</i>	<i>93</i>
<i>Abbildung 82: Drapierversuch an den Übergängen zwischen Stiel und Schaufelblatt.....</i>	<i>93</i>
<i>Abbildung 83: Globale Entformungswinkelanalyse zur Definition der Werkzeugtrennebenen.....</i>	<i>94</i>
<i>Abbildung 84: Lokale Anforderung zur Änderung der Bauteilgeometrie zwecks Sicherstellung der Entformbarkeit.</i>	<i>94</i>
<i>Abbildung 85: 3D-Ansicht des zur Umsetzung freigegebenen Bauteil-Datensatzes.</i>	<i>95</i>
<i>Abbildung 86: Schnittdarstellung des zur Umsetzung freigegebenen Datensatzes.....</i>	<i>95</i>
<i>Abbildung 87: Darstellung der Annahmen der Simulationsrandbedingungen [38].</i>	<i>96</i>
<i>Abbildung 88: Definition der Materialannahmen inklusive des Verformungsverhaltens [38].....</i>	<i>97</i>
<i>Abbildung 89: Darstellung der Versagenswahrscheinlichkeit bei reiner Biegebeanspruchung [38].</i>	<i>97</i>
<i>Abbildung 90: Kraft/Weg Verlauf bis zum Versagen bei 3-Punkt Biegebelastung [38].</i>	<i>98</i>
<i>Abbildung 91: Darstellung der auf Basis der Simulation empfohlenen Modifikation der Versteifungsrippen (schwarz) [38].</i>	<i>99</i>
<i>Abbildung 92: Darstellung der aus der Füllsimulation mit Moldflow Insight empfohlenen Lage der Anspritzpunkte [38].</i>	<i>99</i>
<i>Abbildung 93: Ursprungslayout (Grundriss) der Messeanlage, bestehend aus einer vertikalen Schließeinheit mit horizontalem Schiebetisch mit zwei Endlagen, den beiden In-situ-Aggregaten, einem Spritzgussaggregat in L-Anordnung und einer Linearroboterautomatisierung.</i>	<i>100</i>
<i>Abbildung 94: Zwecks optimierter Zugänglichkeit versetzte Werkzeuganordnung.</i>	<i>101</i>
<i>Abbildung 95: Fotorealistische Visualisierung der Engel V-DUO 700 Messeanlage.</i>	<i>101</i>
<i>Abbildung 96: Schnittdarstellung des In-situ-Messewerkzeugs.....</i>	<i>102</i>
<i>Abbildung 97: Fotorealistische Visualisierung der beiden nebeneinander an-geordneten und in der Trennebenenlage abweichenden Messe-werkzeuge.</i>	<i>102</i>
<i>Abbildung 98: Finale Abstimmungsarbeiten an den Trennebenen.</i>	<i>104</i>
<i>Abbildung 99: Pin im Werkzeug zur Zentrierung des Preforms und gegenüberliegende abdichtende Buchse zur Aufnahme des Pins.</i>	<i>104</i>
<i>Abbildung 100: Am Schiebetisch montierte In-situ-Werkzeugkernseite.</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 101: Die jeweils ersten werkzeugfallenden Bauteile.....</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 102: Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommene Bildfolge der Belastung des Schaufelblattes bis zum Bruch.</i>	<i>106</i>

<i>Tabelle 1: Prozessparameter bei der Herstellung verschiedener Kunststoffe im RIM-Verfahren [18].</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 2: Beschreibung der Anforderungen an das Werkzeugdesign bedingt durch Caprolactam [13].</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 3: Anforderungen an die Auswahl eines geeigneten Dichtungsmaterials für die Verarbeitung von Caprolactam am Beispiel einer Schnecken-dichtung [13].</i>	<i>23</i>
<i>Tabelle 4: Beschreibung der Aufgaben und der Verantwortlichkeiten in der Vorentwicklungsphase.</i>	<i>32</i>
<i>Tabelle 5: Physikalische Prozessgrößen zur Prozessbeschreibung.</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 6: Herausforderungen der Abdichtung im Umfeld der Mischkammer und ihre Wechselwirkungen.</i>	<i>52</i>
<i>Tabelle 7: Versuchsplan für die stufenweise Prüfung der Dichtheit.</i>	<i>55</i>
<i>Tabelle 8: Ausführungsvarianten der Abdichtung in der Werkzeugtrennebene.</i>	<i>64</i>
<i>Tabelle 9: Auslegung der erforderlichen Dichtfläche.</i>	<i>73</i>
<i>Tabelle 10: Ausführungsvarianten der gegen den Austritt von Caprolactam dichten Auswerfer.</i>	<i>81</i>
<i>Tabelle 11: Massenaufteilung des Messeobjektes Leichtbauschaufel.</i>	<i>89</i>
<i>Tabelle 12: Technische Daten der verfügbaren Engel V-DUO 700.</i>	<i>90</i>