

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20557 N

## Thema

Entwicklung eines neuartigen, generativ gefertigten Dornhalterwerkzeugs für die bindenahtfreie Extrusion von Kunststoffen

## Berichtszeitraum

01.04.2019 bis 31.03.2021

## Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

## Forschungseinrichtung(en)

Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen e.V.  
(gemeinnützig)

Seffenter Weg 201

D-52074 Aachen

Gefördert durch:



## **Kurzzusammenfassung**

Zur Herstellung von Rohren, Schläuchen und Vorformlingen beim Blasformen haben sich verschiedene Werkzeugtypen wie Wendelverteiler-, Siebkorb-, Pinolen- und Dornhalterwerkzeuge etabliert. Vor allem letztere zeichnen sich durch ihre gute Schmelzeverteilung und geringe Schererwärmung aus und sind nahezu betriebspunktunabhängig einsetzbar. Damit sind Dornhalterwerkzeuge bei der Verarbeitung von thermisch empfindlichen Materialien (z.B. Polyvinylchlorid (PVC)) unerlässlich. Nachteilig ist dagegen die Entstehung von Bindenähten, die optische und mechanische Schwachstellen im Produkt darstellen. Weitere Werkzeugkonzepte, wie der Wendelverteiler, sind dagegen aufgrund hoher Verweilzeiten für die Verarbeitung von thermisch empfindlichen Materialien ungeeignet. Dieses Vorhaben befasste sich daher am Beispiel der Rohrextrusion mit der Reduzierung des Bindenahteinflusses auf die Extrudateigenschaften.

Ziel des Forschungsvorhabens war daher die Erhöhung der Schmelzehomogenität in Dornhalterwerkzeugen bzw. die Reduzierung von Bindenahteffekten auf die mechanische Extrudatefestigkeit. Zunächst wurden neuartige Stege konzipiert, die in ihrem Design an statische Mischelemente angelehnt sind und Querströmungen bzw. Strömungsumlagerungen erzeugen. Mit Hilfe von Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen wurden die Stege hinsichtlich der resultierenden Bindenahtausprägung, Druckverluste, thermischen Homogenität und Verweilzeit bewertet. Die Bewertung basiert auf Bewertungskennzahlen, die teils der Literatur entnommen und teils bei Bedarf in diesem Vorhaben entwickelt wurden. Anhand der Simulationsergebnisse konnten zudem erste Steggestaltungshinweise abgeleitet werden. Vier neuartige Stegdesigns wurden mittels Selectivem Laser Melting (SLM) gefertigt und praktisch erprobt. Bei der Herstellung von Rohrproben unter Verwendung der neuartigen Stegdesigns erfolgte eine Analyse des Betriebsverhaltens. Anschließend wurden die Rohrproben mikroskopischen Analysen sowie mechanischen Ringsteifigkeits- und Berstprüfungen unterzogen. Hierbei hat sich gezeigt, dass mit Hilfe der neuartigen Stege das Zusammenfließen der Schmelzeströme hinter den Stegen dahingehend angepasst werden konnte, sodass sich der mechanische Einfluss aufgrund von Bindenähten auf das Endprodukt reduziert. So steigt die Innendruckbelastbarkeit um bis zu 40 % an. Mit der verbesserten Innendruckbelastbarkeit gehen allerdings höhere Druckverluste und damit steigender Energiebedarf bei der Herstellung einher. Der Druckverlust nimmt um bis zu 27 % zu. Durch die erhöhte Innendruckbelastbarkeit können jedoch zukünftig die Rohrwanddicken ohne Einbußen der mechanischen Festigkeit reduziert und damit Material eingespart werden. Dies wiederum verringert die Energiekosten des Aufschmelzvorgangs. Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

## **DANKSAGUNG**

Die nachfolgend beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 20557 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der vorliegende Bericht ist der Schlussbericht des Forschungsvorhabens.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurde von Lisa Leuchtenberger, M.Sc. erarbeitet und teilweise von Studierenden der RWTH Aachen in Form von Studienarbeiten niedergelegt. Eine Kurzfassung von jeder dieser Arbeiten befindet sich im Anhang. Diese Arbeiten sind nicht zur Veröffentlichung vorgesehen, können aber in der Bibliothek des Instituts für Kunststoffverarbeitung eingesehen werden. Eine Gesamtdarstellung des Themenkreises, zu dem dieses Forschungsvorhaben gehört, wird in einem technisch-wissenschaftlichen Bericht des Instituts für Kunststoffverarbeitung nach Abschluss der Arbeiten erfolgen. Dem Deutschen Bundestag, dem BMWi und der AiF-Mitgliedsvereinigung „Kunststoffverarbeitung“ gilt unser Dank. Darüber hinaus gilt unser Dank allen Firmen, die durch Bereitstellung von Kunststoffen, Maschinen und sonstigen Sachmitteln diese Arbeit unterstützt haben.

Danken möchten wir auch den Mitarbeitern der Fachbeiratsgruppe Extrusion, die durch Rat und Tat die Forschung unterstützt haben.

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>GRUNDLEGENDE ANSÄTZE ZUR VERRINGERUNG VON BINDENAHTEFFEKTEN DURCH STRÖMUNGSUMLAGERUNGEN .....</b>	<b>4</b>
3.1	Ergebnisse der Literaturrecherche zu Dornhalterstegen und statischen Mischelementen .. Fehler! Textmarke nicht definiert.	
<b>4</b>	<b>STEGKONZEPTIONIERUNG UND AUSGESTALTUNG.....</b>	<b>8</b>
4.1	Das Selektive Laser Melting (SLM).....	8
4.2	Gestaltung neuartiger Stege .....	9
<b>5</b>	<b>UNTERSUCHUNG DER NEUARTIGEN STEGDESIGNS ANHAND VON STRÖMUNGSSIMULATIONEN .....</b>	<b>12</b>
5.1	Simulation mit OpenFOAM .....	12
5.2	Simulationsergebnisse und Auswertung.....	15
5.3	Stegauswahl für die praktische Erprobung .....	22
5.4	Fertigung der neuartigen Stegeinsätze mittels Selektivem Laser Melting (SLM) .....	23
<b>6</b>	<b>PRAKTISCHE ERPROBUNG AUSGEWÄHLTER NEUARTIGER STEGGEOMETRIEN .....</b>	<b>24</b>
6.1	Versuchsaufbau .....	24
6.2	Druckverluste .....	25
6.3	Farbwechselverhalten .....	26
6.4	Untersuchung der additiv gefertigten Oberfläche auf das Betriebsverhalten der Stegdesigns ....	27
6.5	Mikroskopische Untersuchung der hergestellten Rohrproben .....	28
6.6	Mechanische Prüfung der extrudierten Rohrproben.....	29
<b>7</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK .....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG UND NUTZEN FÜR KMU .....</b>	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT .....</b>	<b>33</b>
9.1	Während der Laufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen .....	33
9.2	Nach der Laufzeit geplante Transfermaßnahmen.....	36
<b>10</b>	<b>NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN .....</b>	<b>37</b>
<b>11</b>	<b>EINSCHÄTZUNG DER REALISIERBARKEIT DES VORGESCHLAGENEN UND AKTUALISIERTEN TRANSFERKONZEPTS .....</b>	<b>37</b>
<b>12</b>	<b>EINSATZ VON GERÄTEN UND WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEM PERSONAL .....</b>	<b>39</b>
<b>13</b>	<b>ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....</b>	<b>40</b>
13.1	Formelzeichen.....	40
13.2	Indizes.....	41

---

<b>14</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>42</b>
<b>15</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>45</b>
15.1	Kurzzusammenfassung der durchgeführten Masterarbeit (M. Amberg) .....	45
15.2	Technische Zeichnungen des Dornhalterwerkzeugs .....	46

## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Deskriptoren: Dornhalter; Rohrextrusion; Simulation; Geometrieinfluss; Festigkeit

Schlagnworte: Bindenaht; Stegdesign; statische Mischelemente; OpenFOAM; Innendruckbelastbarkeit

Zur Herstellung von Rohren, Schläuchen und Vorformlingen beim Blasformen haben sich verschiedene Werkzeugtypen wie Wendelverteiler-, Siebkorb-, Pinolen- und Dornhalterwerkzeuge etabliert. Vor allem letztere zeichnen sich durch ihre gute Schmelzeverteilung und geringe Schererwärmung aus und sind nahezu betriebspunktunabhängig einsetzbar. Damit sind Dornhalterwerkzeuge bei der Verarbeitung von thermisch empfindlichen Materialien (z.B. Polyvinylchlorid (PVC)) unerlässlich. Nachteilig ist dagegen die Entstehung von Bindenähten, die optische und mechanische Schwachstellen im Produkt darstellen. Weitere Werkzeugkonzepte, wie der Wendelverteiler, sind dagegen aufgrund hoher Verweilzeiten für die Verarbeitung von thermisch empfindlichen Materialien ungeeignet. Dieses Vorhaben befasste sich daher am Beispiel der Rohrextrusion mit der Reduzierung des Bindenahteinflusses auf die Extrudateigenschaften.

Ziel des Forschungsvorhabens war daher die Erhöhung der Schmelzehomogenität in Dornhalterwerkzeugen bzw. die Reduzierung von Bindenahteffekten auf die mechanische Extrudatefestigkeit. Zunächst wurden neuartige Stege konzipiert, die in ihrem Design an statische Mischelemente angelehnt sind und Querströmungen bzw. Strömungsumlagerungen erzeugen. Mit Hilfe von Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen wurden die Stege hinsichtlich der resultierenden Bindenahtausprägung, Druckverluste, thermischen Homogenität und Verweilzeit bewertet. Die Bewertung basiert auf Bewertungskennzahlen, die teils der Literatur entnommen und teils bei Bedarf in diesem Vorhaben entwickelt wurden. Anhand der Simulationsergebnisse konnten zudem erste Steggestaltungshinweise abgeleitet werden. Vier neuartige Stegdesigns wurden mittels Selectivem Laser Melting (SLM) gefertigt und praktisch erprobt. Bei der Herstellung von Rohrproben unter Verwendung der neuartigen Stegdesigns erfolgte eine Analyse des Betriebsverhaltens. Anschließend wurden die Rohrproben mikroskopischen Analysen sowie mechanischen Ringsteifigkeits- und Berstprüfungen unterzogen. Hierbei hat sich gezeigt, dass mit Hilfe der neuartigen Stege das Zusammenfließen der Schmelzeströme hinter den Stegen dahingehend angepasst werden konnte, sodass sich die mechanische Schwächung aufgrund von Bindenähten auf das Endprodukt reduziert. So steigt die Innendruckbelastbarkeit um bis zu 40 % an. Mit der verbesserten Innendruckbelastbarkeit gehen allerdings höhere Druckverluste und damit steigender Energiebedarf bei der Herstellung

einher. Der Druckverlust nimmt um bis zu 27 % zu. Durch die erhöhte Innendruckbelastbarkeit können jedoch zukünftig die Rohrwanddicken ohne Einbußen der mechanischen Festigkeit reduziert und damit Material eingespart werden. Dies wiederum verringert die Energiekosten des Aufschmelzvorgangs.

## 2 EINLEITUNG

Zur Herstellung von Rohren, Schläuchen und Vorformlingen beim Blasformen haben sich verschiedene Werkzeugtypen wie Wendelverteiler-, Siebkorb-, Pinolen- und Dornhalterwerkzeuge etabliert [HM16]. Die jeweiligen Bauweisen bieten spezifische Vor- und Nachteile.

Dornhalterwerkzeuge verwenden einen zentral angeströmten Verdrängerkörper, um einen kreisringförmigen Schmelzestrom zu erzeugen. Der Verdrängerkörper wird mit Stegen in der Werkzeugmitte fixiert, an denen der Schmelzestrom in Teilströme aufgeteilt wird. Vorteil dieses Werkzeugkonzepts ist u.a. der sehr homogene Austrittsvolumenstrom, da die Fließwege überall gleich lang sind und somit auf allen Fließwegen nahezu gleiche Druckverluste auftreten. Zudem ist das Arbeitsverhalten betriebspunkt- und materialunabhängig [THG06]. Beim Umströmen des Stegbereichs treten allerdings zwei Effekte auf. Durch die Stege wird der Fließquerschnitt verringert, folglich findet eine lokale Beschleunigung der Schmelze statt. Gleichzeitig haftet die Schmelze an den Stegwänden. Die Kombination aus Wandhaftung und Schmelzebeschleunigung hat eine Ausrichtung der Makromolekülketten in Extrusionsrichtung zur Folge. Nach dem Umströmen der Stege werden die Teilströme erneut zusammengeführt, sodass hinter jedem Steg eine radial verlaufende Bindenaht entsteht. Bindenähte stellen optische und mechanische Schwachstellen im Extrudat dar.

Die Reduzierung von Bindenahteffekten auf die mechanische Extrudatfestigkeit unter Verwendung von Dornhalterwerkzeugen war daher ein zentraler Aspekt dieses Forschungsvorhabens. Zur strukturmechanisch günstigeren Bindenahtausformung sollten Querströmungen bzw. Strömungsumlagerungen erzielt werden. Dazu wurden neuartigen Stege konzipiert, die in ihrem Design an statische Mischelemente angelehnt sind. Um bei der Stegkonstruktion ein möglichst hohes Maß an Geometriefreiheit auszunutzen, war die Stegfertigung mittels additiver Fertigung im Selektiven Laser Melting (SLM) Verfahren vorgesehen. Im Anschluss an die Stegentwicklung erfolgte eine simulative Untersuchung der neuen Stegdesigns hinsichtlich der Bindenahtausprägung, des Druckverlusts, thermischen Homogenität, Verweilzeit und mechanischen Stegfestigkeit. Anhand der Untersuchungen ließen sich erste Gestaltungshinweise und vier geeignete Stegdesigns ermitteln, die gefertigt und praktisch erprobt wurden. Ergebnis ist die Analyse des Prozessverhaltens sowie die Herstellung von Rohrproben. Die Rohrproben wurden im Nachgang mikroskopischen Analysen und mechanischen Prüfungen unterzogen, um den tatsächlichen Stegeinfluss auf die Bindenahtausprägung zu analysieren.

### **3 GRUNDLEGENDE ANSÄTZE ZUR VERRINGERUNG VON BINDENAHTEFFEKTEN DURCH STRÖMUNGsumlagerungen**

Das vorliegende Forschungsvorhaben strebte eine Reduzierung der Bindenahteffekte auf die mechanische Extrudatfestigkeit mit Hilfe neuartiger Stegdesigns an. Ansatz war eine Neugestaltung der Stege angelehnt an statische Mischer, so dass die Bindenähte strukturmechanisch günstiger ausgeformt werden. Es sollte eine Umlagerung der Bindenahtschwachstellen erfolgen. Zur Entwicklung erster Stegkonzepte wurde in einem ersten Schritt eine Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Technik zu Dornhalterstegen und statischen Mischelementen durchgeführt. Basierend auf den Rechercheergebnissen wurden anschließend drei statische Mischergeometrien ausgewählt und an diese angelehnt neuartige Dornhalterstege konzipiert. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Literaturrecherche zusammengefasst, die als Grundlage zur Stegneugestaltung herangezogen wurden.

Ein Stegkonzept, welches bereits auf das Umlagern der aus dem Bindenahtbereich resultierenden Schwachstellen abzielt, sind spezielle Stegkonstruktionen wie z. B. versetzte Stege oder Verwischgewinde auf Dorn und/oder Mantel.

Versetzte Stege sind mit einem Mittelring versehen und verhindern die Ausbildung einer radial durchgängigen Bindenaht [THG06]. Sie bedürfen aber einer präzisen Auslegung, damit auf allen Fließwegen die gleichen mittleren Fließgeschwindigkeiten erreicht werden. Anderenfalls kann es zum partiellen Voreilen der Schmelze und dadurch zu Wanddickenschwankungen und optischen Oberflächendefekten kommen. Weiter werden große Druckverluste erzeugt, die mit starken Scherdeformationen einhergehen und bei schersensiblen Kunststoffen Kettenabbau verursachen können.

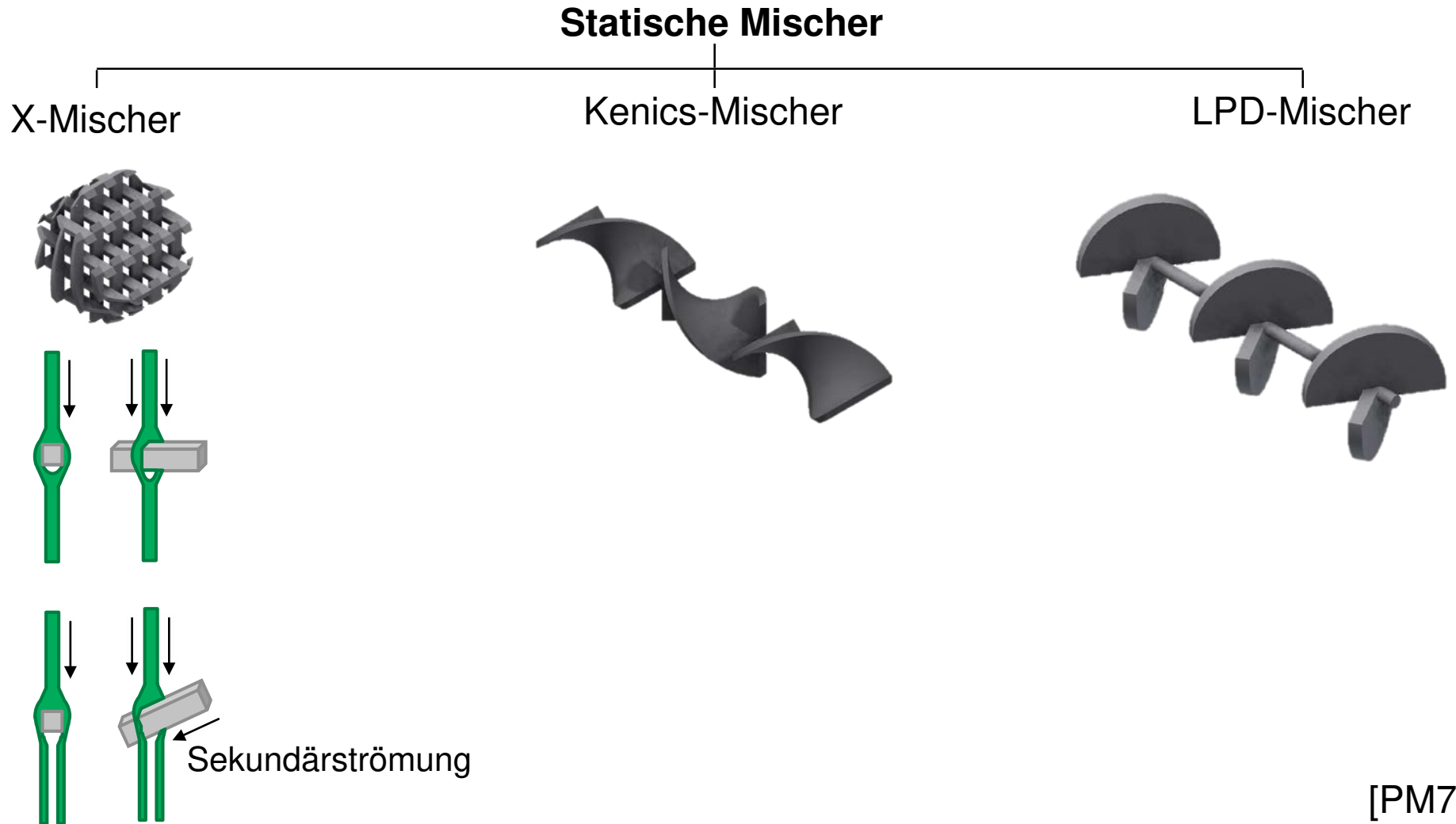
Verwischgewinde als weitere Möglichkeit zur Verringerung der Bindenahtschwächung erzeugen Zirkularströmungen und geben der Strömung so eine tangential Komponente, die zu einer breiten Verlagerung der Bindenaht über den Umfang führt. Wie bei Wendelverteilern beeinflusst ein Verwischgewinde die sonst sehr hohe Homogenität des Austrittsvolumenstroms und die erhöht die Werkzeugspülzeiten. Zudem sind Verwischgewinde anwendungsbedingt beim Blasformen nicht geeignet. Durch die Zirkularströmung wird eine Bindenahtrotation um die Extrudatachse hervorgerufen. So liegen Schwachstellen in den Bereichen, die hohe Verstreckgrade beim Aufblasvorgang erfahren. Es besteht die Gefahr des Aufreißen des Blasvorformlings.

Weitere konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten zur Bindenahtverlagerung sind im Patent EP 133 8401 [NN05] dargestellt. Hier werden tangentiale und strömungsoptimierte Stege vorgestellt, die die Verwendung eines Mittelrings überflüssig machen sollen. Strömungsumlagerungen werden jedoch nicht erzielt.

Ein anderer in der Blasfolienextrusion erforschter Ansatz, der dagegen auf Strömungsumlagerungen basiert, beschreibt *Groß*. Mit der Integration statischer Mischelemente in die Düse eines Extrusionsblaskopfes soll durch die Schmelzevermischung Bindenähte vermieden und die Austrittsvolumenstromverteilung verbessert werden [Gro15]. Dieser Ansatz kommt dem des vorliegenden Forschungsvorhabens bereits sehr nah, jedoch basierte *Groß*' Auslegung auf empirischem Erfahrungswissen. Daher wurden weitere Recherchen zu statischen Mischelementen und deren Auslegung durchgeführt.

Statische Mischelemente kommen in der Kunststoffverarbeitung zur thermischen und stofflichen Homogenisierung von Kunststoffschmelzen zum Einsatz. Die Montage der adaptiven Komponenten erfolgt zwischen Extruder und Extrusionswerkzeug [Man09]. Ein statischer Mischer besteht in der Regel aus einem Rohr, in dem gleichartige Mischelemente hintereinander angeordnet sind, die entweder einzeln oder in Gruppen zusammengefasst um 90° zueinander versetzt sind [PM79]. Diese Mischelemente bewirken, dass die Strömung mehrfach aufgeteilt und zusammengeführt wird, wodurch ein distributives Mischen der Schmelze erreicht wird. Gleichzeitig wird die Schmelze hohen Dehn- und Scherkräften ausgesetzt, sodass auch ein dispersives Mischen der Schmelze stattfindet. Genutzt wird dazu die Strömungsenergie der durchfließenden Fluide [Man09]. Statische Mischer weisen gegenüber dynamischen, d. h. rotierenden oder anderweitig bewegten Mischteilen, zahlreiche Vorteile auf. Hierzu zählen ein geringerer Bauraumbedarf, kürzere Verweilzeiten und geringere Investitionskosten [Man09, PM79]. Bei gleicher Baugröße weisen statische Mischer eine bessere Mischwirkung als dynamische Mischer auf, da eine höhere Relativgeschwindigkeit zwischen Schmelze und Mischer vorherrscht [Man09]. Aus diesem Grund ist der Einsatz von statischen Mixern in der Extrusion trotz des teilweise höheren Druckbedarfs bereits seit den 1960er Jahren sehr weit verbreitet [PM79]. Für hochviskose Fluide wie Kunststoffschmelze existiert eine Vielzahl an statischen Mischerbauformen, die je nach Hersteller variieren. Ihre Mischwirkung besteht aus dem wiederholten Aufteilen, Umlagern und Zusammenführen von Schmelzeströmen [Kra03, PM79]. In Abbildung 1 sind auf dem Markt etablierte X-Mischer, Low-Pressure Drop (LPD) Mischer und Kenics-Mischer dargestellt [Kra03, MSA12, PM79].

# Auf dem Markt etablierte statische Mischer



Die sogenannten X-Mischer bestehen aus einem Gerüst gegeneinander geneigter Stege, wodurch die Stege schräg von der Kunststoffschmelze angeströmt werden. Es entstehen Druckgradienten an der Stegunterseite, die eine Sekundärströmung hervorrufen (vgl. Abbildung 1). Die Sekundärströmung schiebt sich jeweils zwischen zwei Schmelzeströme, wodurch die Schmelze gemischt wird [PM79, Kra03]. Vorteilhaft sind insbesondere die kurzen Verweilzeiten sowie kleine Bauräume der X-Mischer. Zudem sind sie vergleichsweise kostengünstig und effektiv in ihrer Mischwirkung. Beispielsweise kann mit einem X-Mischer eine vergleichbare Mischwirkung erzielt werden, wie mit einem Kenics-Mischer bei 1/3 der Baulänge [Kra03]. Daher wurde das X-Mischerdesign bei der Stegkonzeptionierung (vgl. Kapitel 4) berücksichtigt.

Kenics-Mischer gehören dagegen zu den Wendelmischern, sie bestehen aus abwechselnd links- und rechtsgängigen Wendeln, deren Austrittskanten jeweils um  $90^\circ$  zueinander versetzt sind. Die Wendellänge beträgt in der Regel  $1-2 D$  [Kra03]. An jeder Eintrittskante eines Wendels wird der Fluidstrom in zwei Teilströme aufgeteilt. Anschließend werden die Teilströme um  $180^\circ$  umgelenkt wieder zusammengeführt und von der nächsten Wendelkante um  $90^\circ$  versetzt erneut aufgeteilt. Durch die wendelförmige Schmelzeführung tritt eine Rotation um den hydraulischen Mittelpunkt auf, was in Kombination mit dem wiederholten Aufteilen und Zusammenführen zur Dehnung und Durchmischung der Schmelze führt [MSA12]. Dieses Konzept zeichnet sich vor allem durch geringe Druckverluste aus. Da dieses Mischerdesign einen guten Kompromiss zwischen Druckverlust und Mischwirkung bietet, wurde es ebenfalls bei der Stegkonzeptionierung (vgl. Kapitel 4) berücksichtigt.

Ein drittes und weit verbreitetes Mischelement ist der LPD-Mischer. Dieser ist aus links- und rechtsläufigen halbelliptischen Platten aufgebaut, die sich in einem Winkel von  $90^\circ$  kreuzen [MSA12]. Der eingehende Fluidstrom wird an jeder Platte in zwei Strömungspfade aufgeteilt. Die sich kreuzenden Platten bewirken zudem eine Rotation der Strömung und damit in Kombination mit der Wandhaftung zu einer Dehnung und Durchmischung der Strömung. Eine mögliche Variation des LPD-Mischers, der sogenannte Low-Low-Pressure Drop (LLPD) Mischer, wird von *Kolmetz* und *Dwijayanti* beschrieben. Zur Erzielung geringerer Druckverluste ist beim LLPD-Mischer der Kreuzungswinkel von  $90^\circ$  auf  $120^\circ$  vergrößert [KD12]. Einsatz finden LPD- und LLPD-Mischer aufgrund der geringen Druckverluste beim Mischen laminarer Strömungen. Nachteilig ist das nicht vollständige Falten und Strecken, wodurch sich die Schnittstellen zweidimensional und weniger dreidimensional ausbilden [MSA12]. Aufgrund seiner geringen Druckverluste und akzeptablen Mischwirkung wurde der LPD-Mischer zur Gestaltung neuartiger Stege (vgl. Kapitel 4) herangezogen.

Weitere, weniger etablierte Mischergeometrien sind Multiflux-Mischer, Interfacial Surface Generator (ISG) Mischer und Hi-Mischer.

Bei Multiflux-Mischern wird der Schmelzestrom in jedem Mischelement durch eine Kanalwand im Fließkanal in zwei Teilströme aufgeteilt. Die Fließkanalquerschnitte beider Teilströme nehmen anschließend in entgegengesetzte Richtungen ab, sodass die Gesamtließkanalfläche halbiert wird. Anschließend werden beide Fließkanäle wieder um  $90^\circ$  versetzt auf die ursprüngliche Fließkanalfläche erweitert und zusammengeführt [Kra03, PM79].

Der ISG-Mischer stellt eine Weiterentwicklung des Multiflux-Mischers dar. Die Schmelze wird mit jedem Mischelement in vier Teilströme aufgeteilt. Dazu sind in jedem Mischelement vier Bohrungen vorgesehen, wobei die Bohrungsanordnung mit jedem Mischelement um  $90^\circ$  versetzt ist [Kra03].

Bei Hi-Mischern handelt es sich um eine Kombination aus ISG- und Kenics-Mischer. Hier sind je Mischelement zwei wendelförmige Schmelzebohrungen integriert. Bei einer Anordnung mehrerer Mischelemente, die um  $90^\circ$  versetzt angeordnet sind, wird der Produktström so aufgeteilt und umlagert. Durch die Umlagerung stellt sich zusätzlich ein Drehimpuls ein, der zur Mischwirkung beiträgt [Kra03].

Sowohl Multiflux-, ISG- als auch Hi-Mischer weisen vergleichsweise hohe Druckverluste auf [Kra03]. Da zusätzliche Druckverluste zu den Hauptkriterien der Stegeignungsbewertung zählen, konnten Multiflux-, ISG- und Hi-Mischer an dieser Stelle ausgeschlossen werden.

Auf Basis der Literaturrecherche wurden die etablierten Mischergeometrien X-Mischer, Kenics-Mischer und LPD-Mischer ausgewählt, um im weiteren Verlauf dieses Forschungsvorhabens neuartige Stegdornhalter zu entwickeln.

## 4 STEGKONZEPTIONIERUNG UND AUSGESTALTUNG

Angelehnt an die Literaturrecherche wurden erste neuartige Dornhalterstege auf Basis der etablierten Mischerkonzepte X-Mischer, Kenics-Mischer und LPD-Mischer konzeptioniert und zur nachfolgenden simulativen Untersuchung und Fertigung auskonstruiert.

### 4.1 Das Selektive Laser Melting (SLM)

Um bei der Steggestaltung ein Maximum an geometrischer Gestaltungsfreiheit nutzen zu können, war für die praktische Erprobung eine Stegfertigung mittels SLM-Verfahren vorgesehen. Das am Fraunhofer Institut für Lasertechnik (ILT) in Aachen entwickelte Verfahren ist ein pulverbettbasiertes generatives Fertigungsverfahren. Es bietet hohe geometrische Gestaltungsfreiheit und damit die Möglichkeit, komplexe Bauteile aus serienidentischen Werkstoffen wie bspw. Stählen, Titan-, Nickelbasis- und Aluminiumlegierungen herzustellen [Mei99]. *Schleifenbaum* gibt einen Überblick und eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens [Sch12]. Grundlegend gliedert sich der SLM-Prozess in drei sich wiederholende Prozessschritte: Materialauftrag, Materialverfestigung und Absenken der Bauteilplattform. Zunächst wird der Pulverwerkstoff als definierte Schicht aufgetragen. In einem weiteren Schritt wird Laserstrahlung entsprechend des zugrundeliegenden CAD-Modells in das Pulver eingebracht, sodass das Material durch Absorption der Laserstrahlung und deren Umsetzung in Wärme lokal aufschmilzt und anschließend erstarrt. Im Anschluss wird die Substratplatte mit dem Bauteil um eine Schichtdicke abgesenkt. Diese Schritte der Bauteilgenerierung werden solange wiederholt, bis ein dreidimensionales Bauteil erzeugt ist [PM11, Sch12]. Der schichtweise Aufbau ermöglicht es, mittels SLM-Verfahren komplexe Freiformflächen oder Strukturen zu generieren, die mit konventionellen Fertigungsverfahren wie Zerspanung oder Urformen nicht oder nur unter erheblichem Aufwand herstellbar sind.

Dieses Verfahren birgt verfahrensspezifische Gestaltungsrestriktionen, die bei der Stegkonstruktion Beachtung finden müssen [NN19a, NN19b]. Beispielsweise sollten nach Möglichkeit Stützstrukturen vermieden werden. Stützstrukturen stellen zusätzlich eingebrachtes Baumaterial dar, das ein Absinken von Bauteilelementen oder deren Verzug verhindert [BHS13]. Derartige Stützstrukturen bedürfen einer aufwändigen Nachbearbeitung, bei der die Entfernung des überschüssigen Materials erfolgt. Eingesetzt werden Stützstrukturen bei freien Überhängen  $> 1$  mm, bei Bauteilwänden, die in einem Winkel  $< 45^\circ$  zur Bauplattform aufgebaut werden oder bei Bohrungen mit einem Durchmesser von  $> 8$  mm, die

quer zur Baurichtung platziert sind. Hinsichtlich der Bohrungen könnten Stützstrukturen vermieden werden, in dem die Bohrungen in Baurichtung ausgerichtet sind. Zur Entfernung des überschüssigen Pulvermaterials sollten keine Totecken und Materialeinschlüsse durch Zusammenschmelzen zweier Konturen auftreten. Um das Zusammenschmelzen zweier Konturen zu verhindern, sind Abstände von  $> 1$  mm ausreichend.

Da der Laserstrahl, mit dem das Metallpulver geschmolzen wird, einen runden Querschnitt aufweist, ergeben sich weitere Restriktionen. Es sollten keine spitzwinkligen Bauteilkanten vorliegen. Bei möglichen  $90^\circ$  Außenkanten der zu fertigenden Bauteile bietet sich beispielsweise an, Fasen von  $45^\circ$  vorzusehen. Darüber hinaus gibt der Laserstrahldurchmesser die minimale Wandstärke vor, welcher im vorliegenden Fall 0,3 mm betrug.

Vier der neuartigen Stegdesigns wurden nach der Konstruktion und anschließenden simulativen Untersuchung praktisch erprobt. Zur Erprobung wurde ein modulares Dornhalterwerkzeug mit austauschbarem Stegbereich der G&G Extrusionstechnik GmbH, Schwerin beschafft, sodass die Steggestaltung passend zum vorliegenden Werkzeug erfolgte. Eine technische Zeichnung des Werkzeugs befindet sich im Anhang 15.2. Der Stegbereich des für die Polyolefinverarbeitung ausgelegten Werkzeugs hat eine Länge von 30 mm. Der Außenradius des Schmelzkanals im Stegbereich beträgt 55 mm, der Radius des Dorns 35 mm. Dieses Werkzeug ist zur Extrusion von Rohren mit einem Außendurchmesser von 32 mm und einer Wandstärke von 2 mm geeignet.

## 4.2 Gestaltung neuartiger Stege

Unter Berücksichtigung der Literaturrecherche (vgl. Kapitel 3), der Gestaltungsrestriktionen des SLM-Verfahrens (vgl. Kapitel 4.1) und der Dornhalterwerkzeuggeometrie (vgl. Anhang 15.2) wurden drei neuartige Basisstegkonzepte angelehnt an die am Markt etablierten Mischer ausgearbeitet.

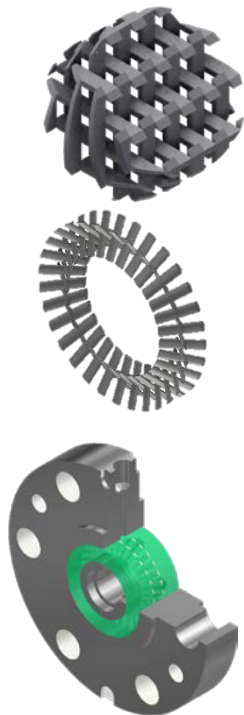
Das erste Konzept wurde aus der Geometrie des X-Mischers abgeleitet. Dazu wurden 21 Stegpaare (einreihig) in einem Winkel von  $80^\circ$  gegeneinander geneigt. Um Stagnationszonen zu vermeiden, wurde der Stegquerschnitt elliptisch bzw. kantenfrei gewählt (vgl. Abbildung 2). Anschließend erfolgte eine Variation des Basis-X-Stegdesigns in drei verschiedenen geometrischen Ausprägungen (vgl. Abbildung 3).

Da die auftretenden Druckverluste durch die Stegabstände laut Literatur beeinflusst werden [NN09, Kra03], wurde als erste geometrische Variation eine Anpassung der Steganzahl vorgenommen. Die erstellten Variationen mit 12, 15 und 21 Stegpaaren sind in Abbildung 3

# Design neuartiger Dornhalterstege nach dem Vorbild statischer Mischer

## Statische Mischer

X-Mischer



Kenics-Mischer

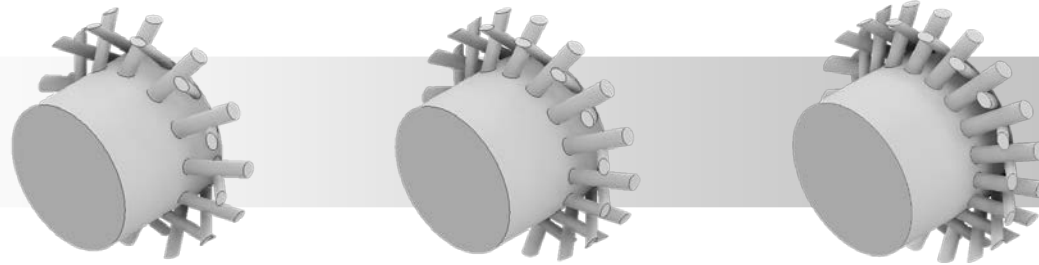


LPD-Mischer

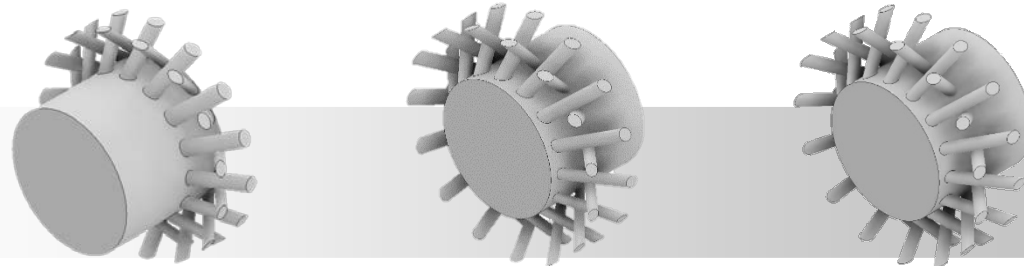


# Variation des X-Stegdesigns in drei geometrischen Ausprägungen

Steganzahl



Stegrotation



Fließrichtung → 



Ebenenanzahl

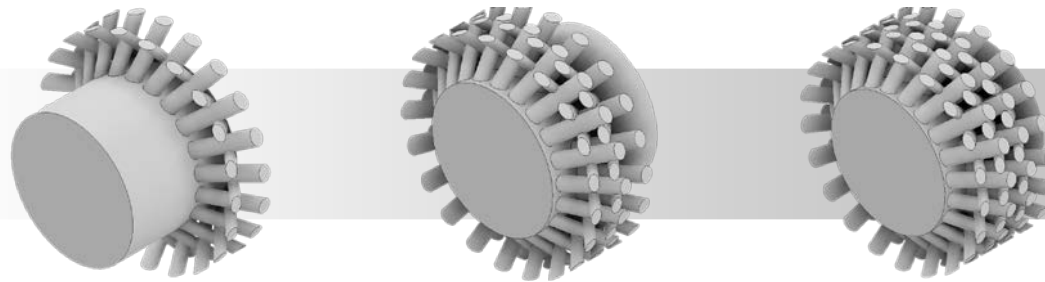


Abbildung 3



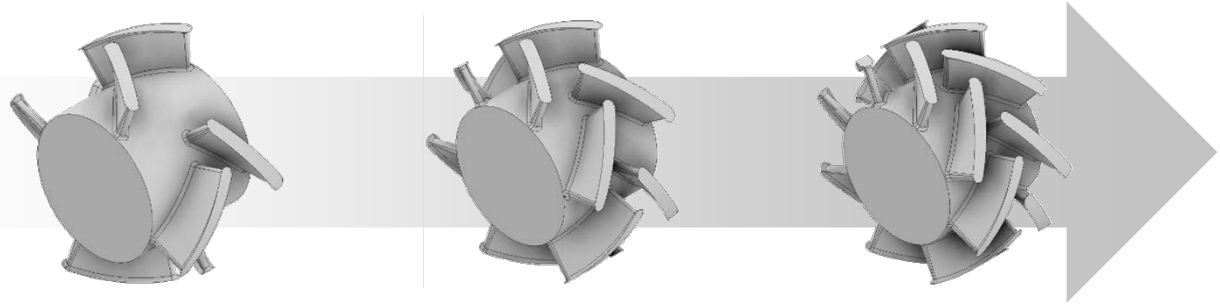
dargestellt. Eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung des Druckverlusts ist die Lage der Stege im Fließkanal. Da der Stegquerschnitt elliptisch ausgeformt ist, wurde als zweites Geometriemerkmal eine Stegrotation untersucht. Die Rotation erfolgt so, dass die Längsachse des Stegquerschnitts von der Lage in Fließrichtung ( $0^\circ$ ), über einen Winkel von  $45^\circ$  zur Extrusionsrichtung und zuletzt quer zur Extrusionsrichtung ( $90^\circ$ ) gedreht wird. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Mischwirkung ist dagegen mit zunehmender Anzahl an Mischelementen gegeben [PM79, Kra03]. Die Ebenenanzahl erhöht sich in der dritten Geometrievariation schrittweise von einer zu drei Ebenen.

Die zweite Basis-Stegvariante wurde nach Vorbild des Kenics-Mischers konzipiert (vgl. Abbildung 2). In der Regel weisen diese Wendel einen Verdrehwinkel von  $180^\circ$  auf. Da die Bauraumlänge auf 30 mm begrenzt ist, wurde der Verdrehwinkel auf  $72^\circ$  verringert. Eine Verringerung des Verdrehwinkels wurde bereits von *Galaktionov et al.* untersucht und kann sich als sinnvoll erweisen [GAPM03]. Das Optimum einer homogenen Verteilung der Schichtgrenzflächen stellt sich demnach bei einem Verdrehwinkel bei  $140^\circ - 150^\circ$  ein. Doch auch bei Verdrehwinkeln von unter  $140^\circ$  sind homogenere Verteilungen der Schichtgrenzflächen möglich als bei  $180^\circ$ . Das erstellte Basis-Stegdesign in Anlehnung an einen Kenics-Mischer wurde ebenfalls in verschiedenen Ausprägungen variiert (vgl. Abbildung 4). Die Variationen sind in Abbildung 4 dargestellt. Ähnlich wie beim X-Stegdesign wurde auch hier die Anzahl der Mischelemente, die Steganzahl und der Winkel zwischen Stegachse und Extrusionsrichtung variiert. Da bei der Stegrotation eine bauraumbedingte Verkürzung der Steglängen unumgänglich ist, ist eine konstruktiv bedingte Druckverlustverringerng zu erwarten.

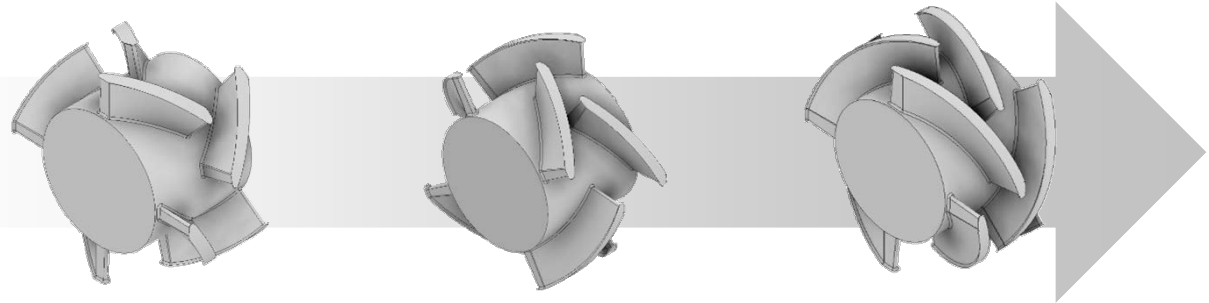
Das dritte entwickelte Stegdesign lehnt sich an den LPD-Mischer an und ist ebenfalls in Abbildung 2 dargestellt. Die gekreuzten halb elliptischen Platten des Mischerdesigns agieren nun als Stege und fixieren den Dorn in der Fließkanalmitte. Analog zum X- und Kenics-Stegdesign wurde eine Variation der Steganzahl vorgenommen. Zudem hat die Stegbreite nach *Pahl et al.* einen Einfluss auf die Mischwirkung [PM79]. Breitere Stege können eine höhere Mischwirkung bei gleichzeitig gesteigerten Druckverlusten erzielen. Demnach wurde eine Variation der Stegbreite in zwei Ausprägungen vorgenommen (vgl. Abbildung 5). Als erstes wurden die Stege über ihre gesamte Länge gleichmäßig von 2,5 mm, 5 mm auf 8 mm verbreitert. Als zweite Variation erfolgte eine einseitig konvexe Stegverbreiterung. Bei dieser Variation nimmt die Stegbreite vom Steganfang zur Stegmitte zu und zum Stegende hin wieder ab. Dazu wurde der Stegquerschnitt elliptisch umgestaltet und die Stegverbreiterung als einseitige Halbachsenverlängerung umgesetzt. Die LPD-Stegvariationen sind in Abbildung 5

# Variation des Kenics-Stegdesigns in drei geometrischen Ausprägungen

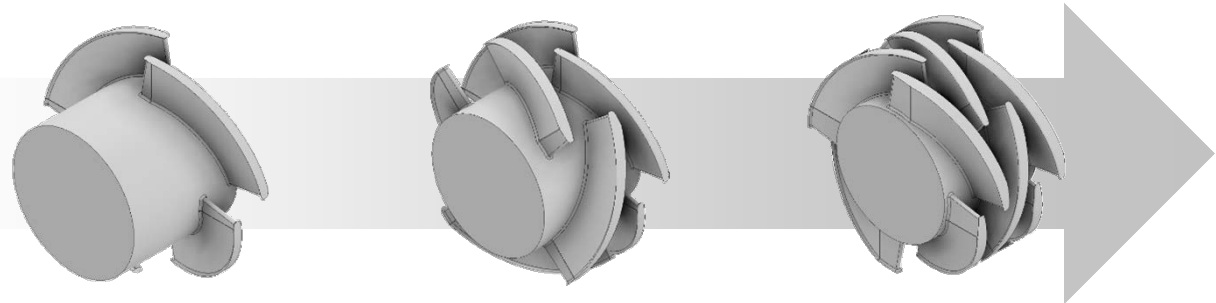
Steganzahl



Stegrotation

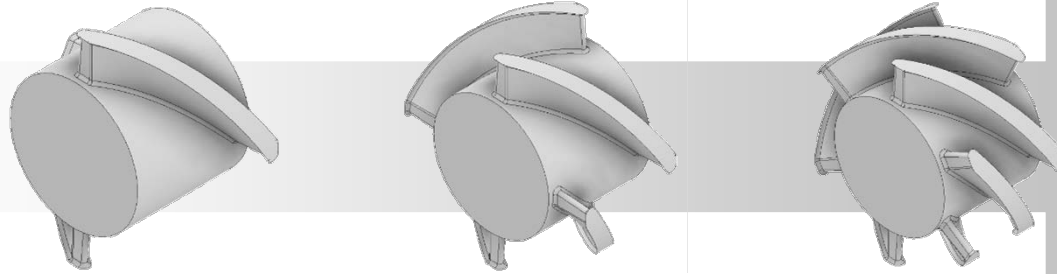


Ebenenanzahl

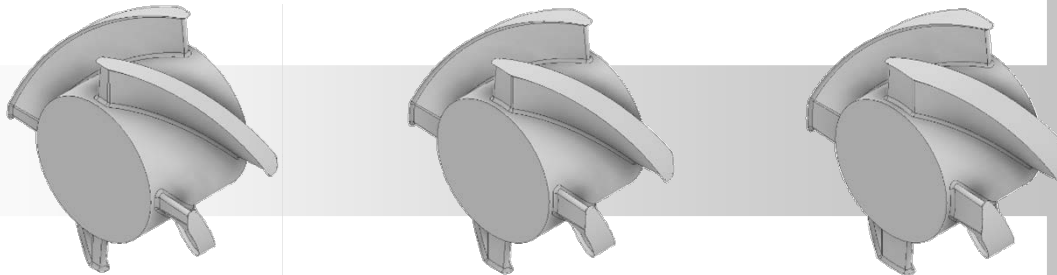


# Variation des LPD-Stegdesigns in drei geometrischen Ausprägungen

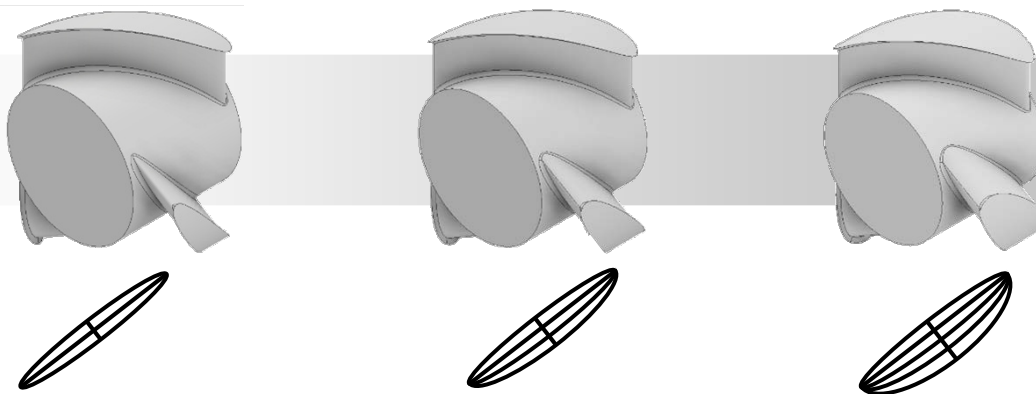
Steganzahl



Stegbreite beidseitig



Stegbreite einseitig



Ergänzung zur Vermeidung von Stagnationszonen



Abbildung 5

veranschaulicht. Bei den allen durchgeführten Geometrievariationen des LPD-Stegdesigns mussten die Stege bauraumbedingt eingekürzt werden. Da erste Simulationsergebnisse des Basis LPD-Stegdesigns Stagnationszonen hinter den Stegen und hohe Druckverluste zeigten, wurde an dieser Stelle noch eine vierte Geometrievariation in Form von Bohrungen vorgenommen. Dazu wurden die Basisstege mit zusätzlichen vier Bohrungen in zwei Varianten versehen (siehe Abbildung 5). Die Bohrungen der ersten Variante weisen einen Durchmesser von 3 mm und der zweiten Variante einen Durchmesser von 4 mm auf.

## 5 UNTERSUCHUNG DER NEUARTIGEN STEGDESIGNS ANHAND VON STRÖMUNGSSIMULATIONEN

Um die in Kapitel 4.2 entwickelten neuartigen Stegdesigns hinsichtlich ihres Einsatzverhaltes und den resultierenden Bindahtausprägungen zu untersuchen, wurden CFD - Simulationen mit der Software OpenFOAM (OpenFOAM Foundation Ltd., London, Vereinigtes Königreich) durchgeführt. Auf Basis der Simulationsergebnisse erfolgte eine Bewertung der Stege und die Auswahl zu fertiger Stegdesigns, die anschließend praktisch erprobt wurden.

### 5.1 Simulation mit OpenFOAM

OpenFOAM ist eine freie Software-Bibliothek, mit der sich komplexe strömungsmechanische Fragestellungen numerisch berechnen lassen. OpenFOAM ist in C++ geschrieben und steht abkürzend für Open Field Operation and Manipulation. Allgemein teilen sich CFD-Simulationen in den Präprozess, die Strömungslösung und den Postprozess [Sch13].

Der Präprozess stellt die Simulationsvorbereitung dar. In diesem Teilschritt werden zunächst die gewünschten Geometrien von Fluidkanal und Werkzeug in eine geeignete Software implementiert und die vorhandenen Grenzflächen zwischen Fluid und Werkzeug, Werkzeug und Umgebung sowie die Ein- und Austrittsflächen des Fluids bestimmt. Eine Möglichkeit dazu bietet die freie Software Blender (Blender Foundation, Amsterdam, Niederlande), die auch in diesem Vorhaben verwendet wurde. Anschließend erfolgt die Vernetzung der Geometrien, d.h. die Geometrien werden in kleinere Elemente wie beispielsweise Quader oder Tetraeder zerlegt. Die Vernetzung selbst kann über OpenFOAM realisiert werden. Der Vernetzungsprozess nimmt geometrieabhängig viel Rechenzeit in Anspruch. Um die Rechenzeit zu reduzieren, wurden verschiedene Vereinfachungen der Werkzeuggeometrie vorgenommen. Die zu simulierende Werkzeuggeometrie wurde auf den Stegbereich des modularen Dornhalterwerkzeugs begrenzt. Zudem wurden alle Bohrungen für Schrauben und Sensorik vernachlässigt.

Da in diesem Vorhaben viele verschiedene Steggeometrien bzw. Fließkanalgeometrien in die ansonsten gleichbleibende Werkzeuggeometrie integriert wurden, bietet sich an dieser Stelle die Verwendung der Immersed Boundary-Methode an. Eine Besonderheit dieses Ansatzes ist die Möglichkeit, die gesamte Simulation auf einem festen kartesischen Gitter durchzuführen. Benötigt wird dazu die zu simulierende Werkzeuggeometrie ohne Fließkanäle sowie der Fließkanal im stl-Format. Zunächst erfolgt die kartesische Vernetzung der Werkzeuggeometrie mit Hilfe des in OpenFOAM integrierten Netzgenerierers BlockMesh. Da die Oberfläche der

so vernetzten Werkzeuggeometrie aus würfelförmigen Elementen zusammengesetzt ist, besteht die Möglichkeit, die Oberfläche nachfolgend über die Operation SnappyHexMesh zu verfeinern. Der Befehl generiert automatisch dreidimensionale Oberflächennetze, die Hexaeder und Split-Hexaeder enthalten. Das Netz passt sich so annähernd an die Oberfläche an, indem das kartesische Netz iterativ verfeinert und das resultierende Split-Hex-Netz an die Oberfläche gemorphet wird [URL21a]. Die Werkzeuggeometrie besteht nach dem Vernetzungsprozess aus einem Gitter mit 2.354.867 Elementen. Allen Elementen wird zunächst ein sehr hoher Fließwiderstand zugewiesen. Dazu wird nach *Khadra et al.* die Momenterhaltungsgleichung mit einem Term erweitert, in den ein Proportionalitätsfaktor integriert ist. Der Proportionalitätsfaktor stellt den inversen Darcy Koeffizienten, das heißt die Permeabilität des Werkstoffs, dar [KAP+00]. Wird dieser Wert sehr hoch gewählt, im vorliegenden Fall mit beispielsweise 1.000.000.000, ist die Strömung des Fluides durch dieses Geometrievolumen unterdrückt. Die Berücksichtigung der Fließkanäle erfolgt anschließend über einen Abgleich mit der Fließkanalgeometrie. Dabei wird in allen Elementen des Werkzeuggitters, die sich innerhalb der Fließkanalgeometrie befinden, der Fließwiderstand herabgesetzt. In diesem Zustand kann die Berechnung des Schmelzeflusses durch alle Elemente mit einem geringen Fließwiderstand (Fließkanal) erfolgen. Die Elemente mit hohem Fließwiderstand (Werkzeug) blockieren die Strömung. Um genauere Rechenergebnisse zu generieren und die Steggeometrien in höherer Auflösung abbilden zu können, wurde im Vernetzungsprozess der Fließkanal- und Stegbereich in höherer Auflösung vernetzt. In Abbildung 6 ist das generierte Netz mit einem beispielhaftem Fließkanal dargestellt.

Im Anschluss an den Vernetzungsprozess erfolgte die Definition der Randbedingungen. Die Randbedingungen des Modells wurden in Übereinstimmung mit gängiger Praxis festgelegt [HP19, HY15, HP98, Wor98]. Ein eingeschwungener stationärer Zustand mit laminarer, wandhaftender und inkompressibler Strömung wurde betrachtet. Bei dem simulierten Material handelte es sich um ein Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) Hostalen GD 9550 F der Firma Basell Polyolefine GmbH, Wesseling. Der kombinierte Ansatz von Carreau und Williams, Landel und Ferry (WLF) beschreibt das strukturviskose, temperaturabhängige Materialverhalten und ist inklusive materialspezifischer Parameter in (Gleichung 5.1) beschrieben. Alle weiteren Materialparameter sind der Tabelle 5.1 zu entnehmen. Die druck- und temperaturabhängige Dichte wurde mithilfe von p-v-T-Messungen bestimmt. Die Dichte ist bei Drücken zwischen 0 und 200 bar bzw. Temperaturen zwischen 180 °C und 230 °C nahezu konstant. Die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität wurden der Literatur entnommen [HM16].

# Darstellung der Geometrievereinfachungen und Vernetzung

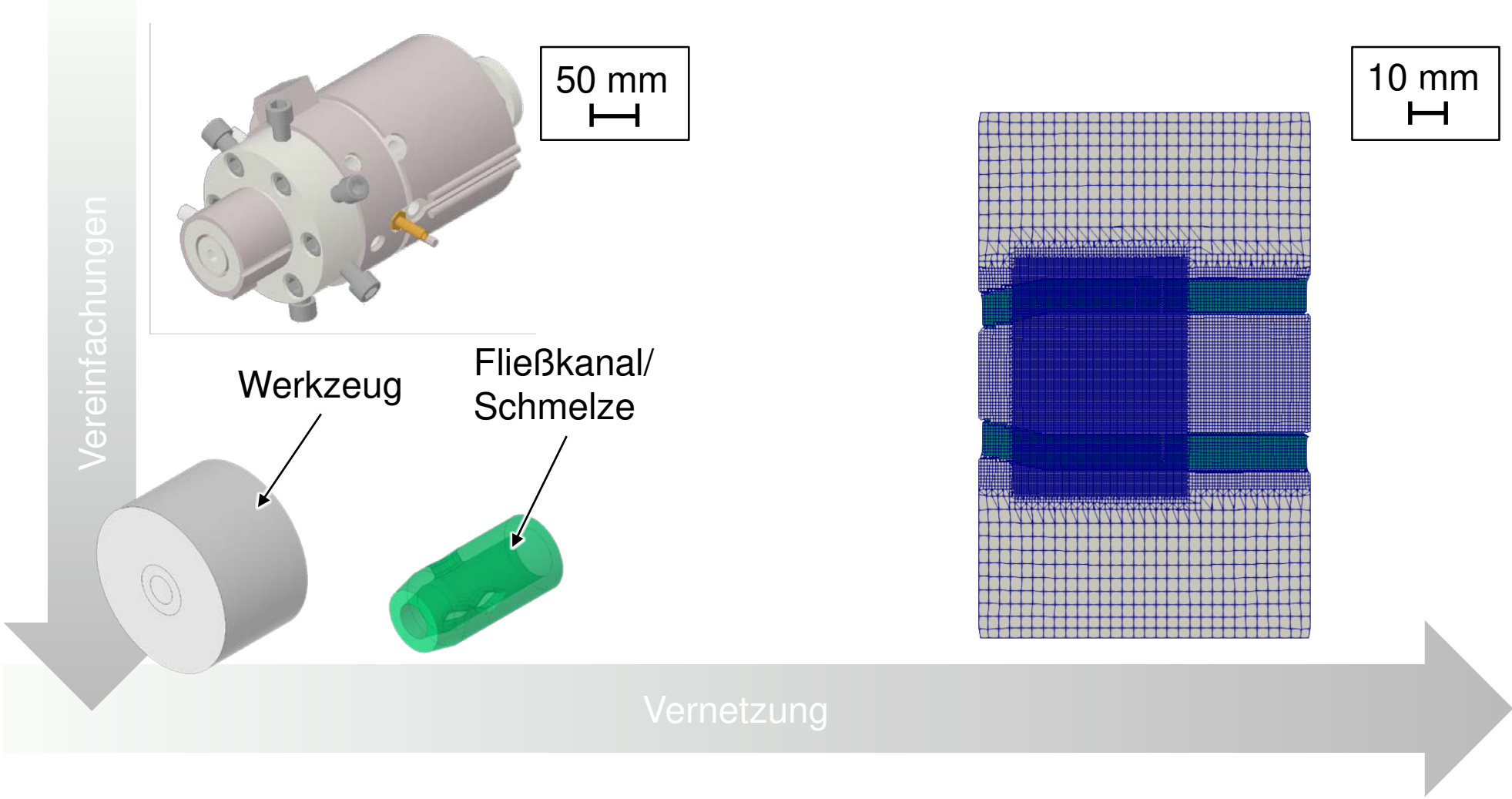


Abbildung 6

<b>Material</b>	<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]</b>	<b>Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]</b>
PE-HD Hostalen GD 9550 F	735,8	0,256	2,1
Werkzeugstahl 1.2378	-	39	-

Tabelle 5.1: Materialparameter

$$\eta = \frac{9472,83}{(1 + 0,1871 * \dot{\gamma})^{0,655}} \quad (\text{Gleichung 5.1})$$

Am Werkzeugeintritt wird ein Massestrom von 3 kg/h und eine homogene Schmelzeintrittstemperatur von 200 °C vorgegeben. Für die Temperierung der Werkzeugaußenflächen wurde eine konstante Temperatur von ebenfalls 200 °C definiert. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Schmelze und Werkzeug wurde von *Yesildag* übernommen und beträgt 0,247 W/(m\*K) [Yes17]. Da der simulierte Werkzeugabschnitt aus dem Gesamtwerkzeug herausgeschnitten ist, wurden die Stirnflächen der Simulationsgeometrie als adiabat angenommen. Die Randbedingungen sind in Abbildung 7 visualisiert. Zusätzlich zu den bisher genannten Randbedingungen berücksichtigt der ausgewählte Solver die auftretende Schererwärmung.

Im Lösungsprozess findet die tatsächliche CFD-Simulation in Form numerischer Berechnungen des strömungsmechanischen Problems statt. Dazu werden neben den definierten Randbedingungen die Massen-, Energie und Impulserhaltung sowie der Drallsatz genutzt. Anhand dieser Erhaltungssätze können Bilanzen für die einzelnen Kontrollräume, die durch das Rechengitter definiert werden, aufgestellt und gelöst werden [Küm07]. Das Ergebnis des CFD-Modells strebt gegen die exakte Lösung des mathematischen Modells. Der verbleibende Restfehler wird in Form eines Abbruchkriteriums vom Nutzer vorgegeben. In diesem Vorhaben wurden Restfehler von  $1 \cdot 10^{-6}$  für die Temperatur,  $1 \cdot 10^{-7}$  für den Druck und  $1 \cdot 10^{-8}$  für die Fließgeschwindigkeit vorgegeben.

Der letzte Teilschritt, der Postprozessor, beinhaltet die Auswertung und Visualisierung der Simulationsergebnisse. Dazu wurde die freie Software Paraview (Sandia National Laboratories, New Mexico, USA; Kitware Inc, New York, USA; Los Alamos National Laboratory, Indiana, USA) verwendet. Die zu untersuchenden Bewertungskriterien sind im Kapitel 154.2 beschrieben.

# Veranschaulichung der Simulationsrandbedingungen

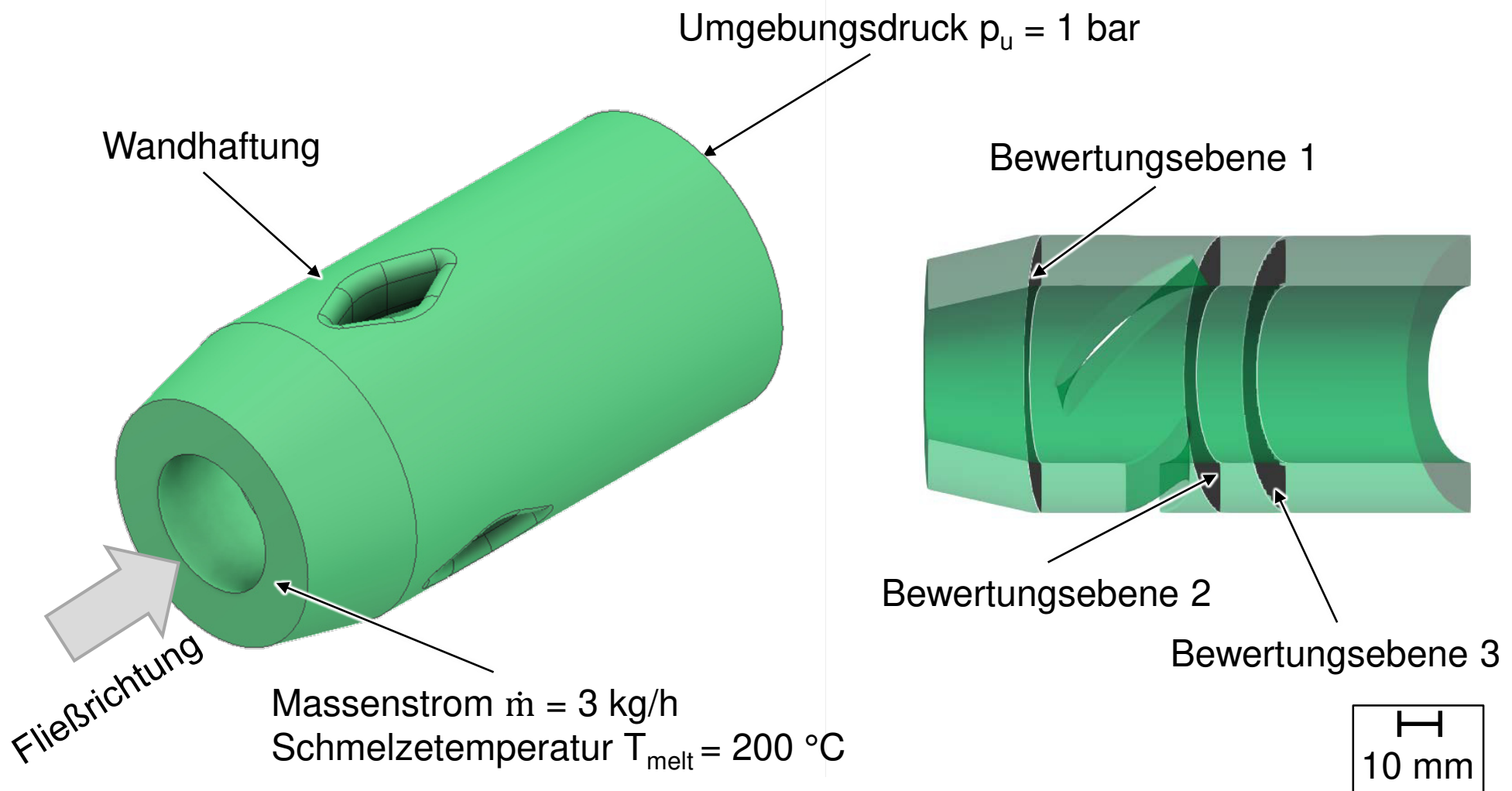


Abbildung 7



## 5.2 Simulationsergebnisse und Auswertung

Für die Auswertung der Simulationen wurden die Bindenahtausprägung, der Druckverlust, die thermische Schmelzeshomogenität, die Farbwechseldauer / Verweilzeit und die mechanische Stabilität der Stege bewertet.

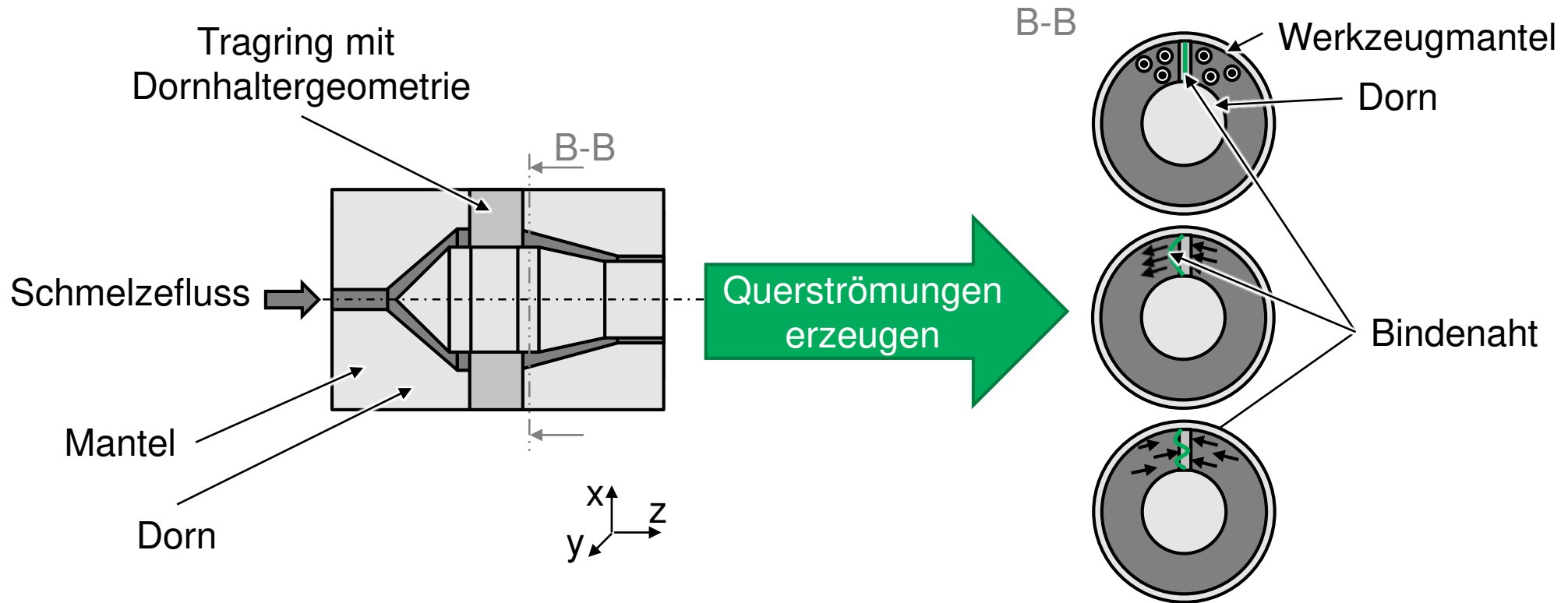
Wie in Kapitel 3 beschrieben, führt die Schmelzedeformation zu einer Orientierung der Kunststoffmoleküle und hat Bindenähte zur Folge. Zur Bewertung von Bindenahtfestigkeiten untersuchten *Huang et al.* die am Stegende auftretenden Schergeschwindigkeiten sowie Schub- und auch Dehnspannungen [HP98]. Nachteil der beschriebenen Bewertungsmethode ist allerdings, dass diese nicht generisch auf verschiedene Stegeometrien angewendet werden kann. Zur Bewertung muss bereits die Lage der Bindenähte im extrudierten Halbzeug bekannt sein. In diesem Vorhaben variiert die Bindenaht jedoch lokal in Abhängigkeit von der betrachteten Steg Ausführung. Daher war der Ansatz nach *Huang et al.* nicht praktikabel. Stattdessen wurde ein alternativer Bewertungsansatz entwickelt. Dieser basiert auf den Strömungsumlagerungen, die durch die neuartigen Stegdesigns erzielt werden. Treten hinter dem Stegbereich Strömungsumlagerungen auf, sind diese in Form von Fließgeschwindigkeiten quer zur Extrusionsrichtung messbar. In Kombination mit der Wandhaftung der Kunststoffschmelze können so Bindenähte strukturell günstiger verlagert werden (siehe Abbildung 8). Daher wurde in diesem Vorhaben ein neues auf Querströmungen basierendes Bewertungskriterium entwickelt. Betrachtet werden die Geschwindigkeitsvektoren in einer definierten Ebene (Bewertungsebene 2, vgl. Abbildung 7) hinter dem Stegbereich. Die Strömungsanteile senkrecht zur Extrusionsrichtung  $z$  werden aufsummiert und zum direkten Vergleich mit denen eines konventionellen Stegdesigns ins Verhältnis gesetzt (Gleichung 5.2).

$$Q = \frac{\sum(|w_{x, \text{stegdesign}}| + |w_{y, \text{stegdesign}}|)}{\sum(|w_{x, \text{konventionell}}| + |w_{y, \text{konventionell}}|)} \quad (\text{Gleichung 5.2})$$

Fällt die Kennzahl  $Q$  größer als 1 aus, werden mehr Querströmungen durch den betrachteten Stegdornhalter eingebracht als in der konventionellen Alternative. Ist die Kennzahl niedriger als 1, sind in der Referenz mehr Strömungen senkrecht zur Extrusionsrichtung vorhanden.

Der über den Stegbereich auftretende Druckverlust wurde zwischen den Bewertungsebenen 1 und 3 bewertet. Diese Ebenen entsprechen den Positionen der Drucksensoren im Dornhalterwerkzeug, sodass die Druckverluste mit denen der praktischen Erprobung verglichen werden können. Ähnlich zur Bindenahtbewertung wurde der ermittelte Druckverlust mit dem des konventionellen Stegdornhalters ins Verhältnis gesetzt (Gleichung 5.3). Um die Bewertung der Kennzahl  $\Delta p$  analog zur Kennzahl  $Q$  zu halten, ist das Verhältnis nun invers. So gilt für die Kennzahl  $\Delta p > 1$ , dass der Druckverlust des neuartigen Stegdesign im Vergleich zu

# Bewertung der Bindenahtausprägung anhand von Querströmungen



$$Q = \frac{\sum (|w_{x, \text{Stegdesign}}| + |w_{y, \text{Stegdesign}}|)}{\sum (|w_{x, \text{konventionell}}| + |w_{y, \text{konventionell}}|)}$$

konventionellen Stegen sinkt. Bei beiden Bewertungskriterien sind so Kennzahlen von  $> 1$  gewünscht.

$$\Delta p = \frac{\Delta p_{\text{konventionell}}}{\Delta p_{\text{Stegdesign}}} \quad (\text{Gleichung 5.3})$$

Zur Bewertung der thermischen Homogenität eines Mischelementes bildeten *Wolff et al.* eine Kennzahl  $e_{\text{thermal}}$  (Gleichung 5.4) [WM98].

$$e_{\text{thermal}} = \frac{\sigma_{\text{inlet}} - \sigma_{\text{outlet}}}{\sigma_{\text{inlet}}} \quad (\text{Gleichung 5.4})$$

$\sigma_{\text{inlet}}$  und  $\sigma_{\text{outlet}}$  stehen für die jeweils nach (Gleichung 5.5) berechnete thermische Homogenität am Ein- und Ausgang des Simulationsraumes mit  $A$  = Gesamtfläche,  $A_i$  = Zellfläche,  $v_i$  = Zelltemperatur,  $\bar{v}$  = mittlere Temperatur in der Untersuchungsebene.

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{A_i (v_i - \bar{v})^2}{A} \quad (\text{Gleichung 5.5})$$

Berechnet wird die Summe der quadratischen Temperaturunterschiede jeder Zelle (Bewertungsebene 1 und 2, vgl. Abbildung 7) zur mittleren Temperatur normiert auf die Zellfläche. Im Falle einer konstanten Temperatur in der Untersuchungsebene ist  $\sigma = 0$ , in allen anderen Fällen ist  $\sigma > 0$ . Ist  $e_{\text{thermal}}$  negativ, liegt eine im Vergleich zum eingehenden Temperaturprofil weniger homogene Temperaturverteilung am Ausgang vor. Das zwischen die beiden Untersuchungsebenen geschaltete Mischelement hat also potenziell einen negativen Einfluss auf die thermische Homogenität. Falls keine Veränderung in der Temperaturhomogenität berechnet oder gemessen wird, ist  $e_{\text{thermal}} = 0$ . Ist dagegen  $0 < e_{\text{thermal}} < 1$ , ist die thermische Homogenität der Temperatur am Ausgang besser als am Eingang. Im Sonderfall  $e_{\text{thermal}} = 1$  hat die Schmelze am Ausgang eine perfekt homogene Temperatur. Auch *Hopmann et al.* nutzten 2019 diesen Faktor für die Bewertung der Homogenität der Temperaturverteilung [HST+19].

Zur Bewertung der Verweilzeit wurde der Anteil der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Schmelze unterhalb einer bestimmten Schergeschwindigkeit herangezogen. Nach *Wortberg et al.* und *Burmann et al.* sollen in Extrusionswerkzeugen die Spül- und Materialwechselzeiten möglichst kurz sein, um eine hohe Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten [BW04, Wor98]. Dafür ist eine langanhaltende Anhaftung der Kunststoffschmelze an der Werkzeugwand durch ausreichend hohe Schergeschwindigkeiten zu vermeiden. Nach *Wortberg et al.* sollten die Schergeschwindigkeiten nicht niedriger als  $5 \text{ s}^{-1}$  und nicht höher als  $50 \text{ s}^{-1}$  liegen, damit akzeptable Spülzeiten erreicht werden. In manchen Anwendungen (beispielsweise für

niedrigviskose Schmelzen) kann die Obergrenze für die Schergeschwindigkeit bei etwa  $1000 \text{ s}^{-1}$  liegen [BW04, Wor98]. Für die Blasfolienextrusion geben *Limper et al.* hingegen maximal  $200 \text{ s}^{-1}$  an [Lim13]. Nach den Richtlinien zur Auslegung von Dornhalterwerkzeugen von *Michaeli et al.* sollte im speziellen Fall von PE-HD maximale Schergeschwindigkeiten von  $30 \text{ s}^{-1}$  nicht überschritten werden. Bei höheren Schergeschwindigkeiten besteht die Gefahr von Schmelzeinstabilitäten, die beispielsweise durch eine unzureichende Wandhaftung hervorgerufen werden. Im Gegensatz zu den Literaturwerten von *Limper et al.* und *Wortberg et al.* zeigten die Simulationsergebnisse des konventionellen Stegdornhalters maximale Schergeschwindigkeiten von  $3,5 \text{ s}^{-1}$ . Daher wurden zur Bewertung der Verweilzeit die Stegflächenanteile betrachtet, an denen Schergeschwindigkeiten von unter  $3,5 \text{ s}^{-1}$  nicht überschritten wurden. Die Kennzahl  $T$  setzt die entsprechenden Gesamtflächen ins Verhältnis (Gleichung 5.6).

$$T = \frac{A_{\text{konventionell}}}{A_{\text{Stegdesign}}} \quad (\text{Gleichung 5.6})$$

An den übrigen Stegflächen mit Schergeschwindigkeiten über  $3,5 \text{ s}^{-1}$  wird die Kunststoffschmelze vermehrt geschert und die Verweilzeit sinkt im Vergleich zum konventionellen Stegdesign.

Ein weiteres Bewertungskriterium bildete die mechanische Stegfestigkeit, die in Form einer Belastungsanalyse untersucht wurde. Dazu wurde das CAD-Programm Autodesk Inventor Professional der Firma Autodesk Inc., San Rafael, USA, verwendet. Es wurde eine Belastungssimulation nach der Finiten Elemente Methode (kurz: FEM) durchgeführt. Die Materialparameter wurden den Angaben aus dem Materialdatenblatt des in Kapitel 5.4 verwendeten Werkzeugstahls 1.2709 entnommen [NN20c]. Zur Durchführung der Belastungsanalyse war die Angabe von auftretenden Werkzeuginnendrücken beziehungsweise Druckverlusten notwendig. Die Belastungsanalyse wurden daher basierend auf den Ergebnissen der CFD - Simulationen erstellt. Vereinfacht wurden dazu die in den CFD-Simulationen ermittelten Druckverluste als Druckkraft auf die Stege in Strömungsrichtung vorgegeben. Der Druck in Extrusionsrichtung auf den Dorn entsprach dem maximal auftretenden Druck. In der Belastungsanalyse wurde die sogenannte Mises-Vergleichsspannung berechnet, die die Materialstreckgrenze nicht übersteigen darf. Dazu erfolgte ein Vergleich der berechneten Vergleichsspannung mit den im Zugversuch erhobenen Materialkennwerten. Als Sicherheitsfaktor wurden 80 % der Streckgrenze als kritischer Festigkeitswert angenommen. Damit sind bis zu 800 MPa für die in der Belastungsanalyse berechnete Mises-Vergleichsspannung zulässig.

Begonnen wurde mit einem Vergleich der erstellten Basisgeometrien. In Abbildung 9 sind die Geschwindigkeiten mittels Particle Tracking im Werkzeug abgebildet. Zu erkennen ist, dass

# Simulationsergebnisse: Vergleich der Basisgeometrien

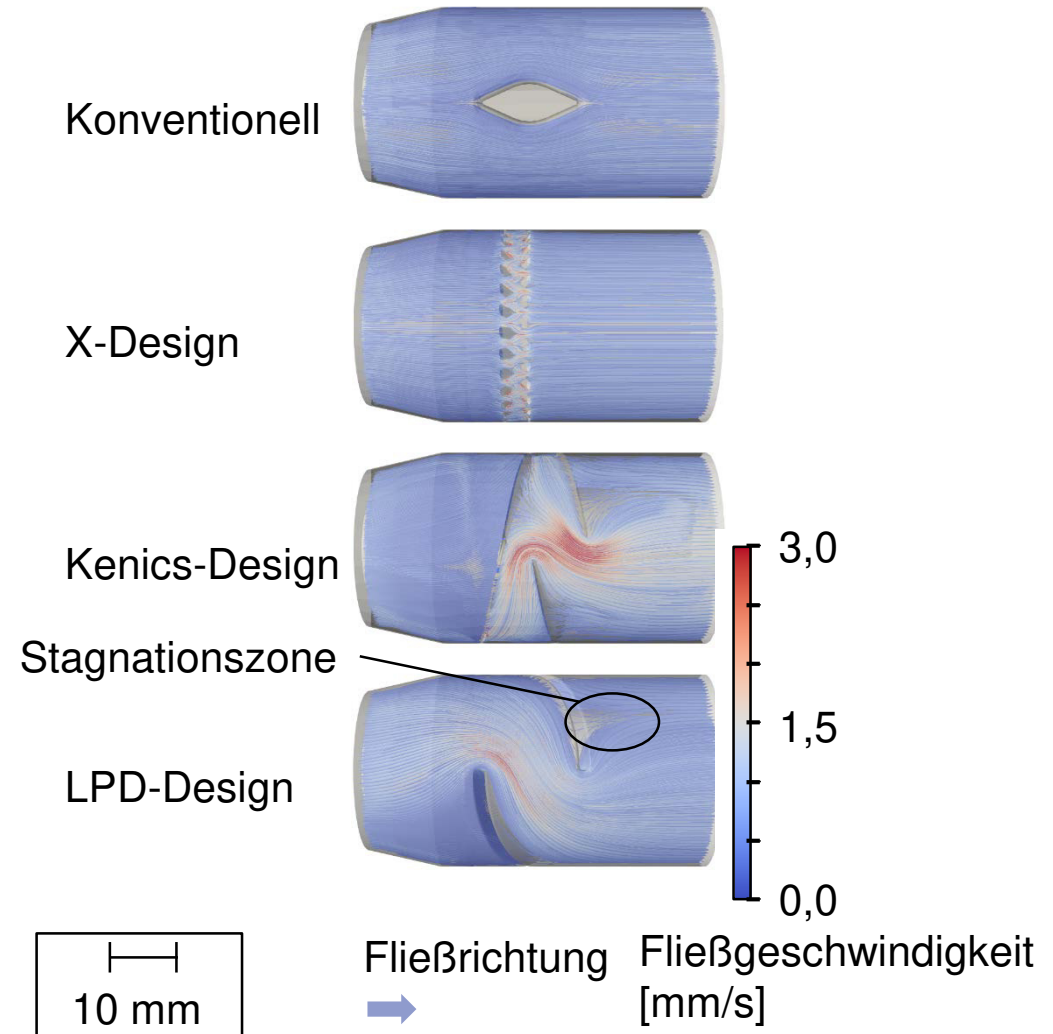
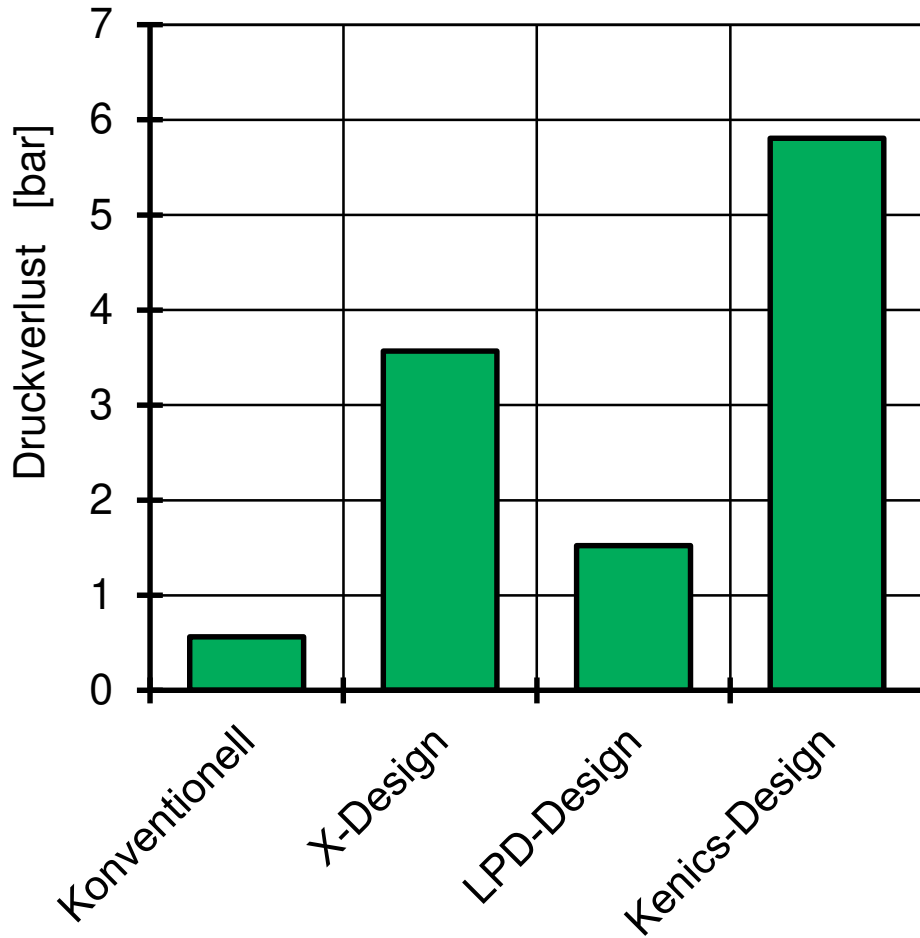


Abbildung 9

die Steggeometrie angelehnt an den X-Mischer im Vergleich zu den konventionellen Stegen geringere Querströmungen generiert. Dies spiegelt sich auch in den Querströmungskennzahlen wider. Das konventionelle Stegdesign erreicht eine Kennzahl von 1 das X-Stegdesign dagegen nur eine Kennzahl von 0,55. Bei dem Kenics- und LPD-Design dagegen sind die Querströmungsanteile mit 3,54 und 2,8 größer. Zu erkennen ist außerdem, dass die Schmelze im Stegbereich unterschiedlich starke Beschleunigungen erfährt. Durch die höheren Fließgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Wandhaftung an Mantel und Stegen wirken größere Scherraten auf das Material, dementsprechend werden größere Schubspannungen eingebracht. Dies kann für scherempfindliche Materialien kritisch sein und bringt zum anderen zusätzliche Scherwärme in das Material ein. Das lokal steigende Temperaturniveau kann materialabhängig zu Verfärbungen führen. Allerdings stieg das Temperaturniveau durch die neuen Stegdesigns nur leicht um etwa 1 °C. Neben Scherung und Scherwärme kann sich zudem eine Erhöhung der Verweilzeit negativ auf das Material auswirken. Im Vergleich zum konventionellen Stegdesign sind zusätzliche Stege vorhanden, die teilweise quer zur Strömungsrichtung angeordnet sind. Das führt zu längeren Fließwegen und damit tendenziell zu einer Erhöhung der Verweilzeit. Weiterhin resultiert eine Verringerung des Fließkanalquerschnitts in einer Erhöhung der Gesamtdruckverluste. Links in Abbildung 9 ist zu erkennen, dass sich die Druckverluste im Vergleich zum konventionelle Stegdesign um den Faktor 3 bis 10 vergrößern. Im Vergleich zu X- und Kenics-Design lieferte das LPD-Design bereits vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Querströmungserzeugung und bezüglich auftretender Druckverluste. An dieser Stelle war allerdings eine Optimierung der Stege zur Vermeidung von Stagnationszonen (vgl. Abbildung 5) notwendig. Die Stagnationszonen sind in Abbildung 9 gekennzeichnet.

### **Auswertung der CFD-Simulationsergebnisse auf Basis der X-Stegdesigns**

Im Anschluss an die simulative Untersuchung der Basisgeometrien, wurden die erarbeiteten Stegvariationen (Kapitel 4) analysiert.

Nachfolgend ist die Auswertung der Simulationsergebnisse für die X-Stegdesigns beschrieben. Dazu sind in Tabelle 5.2 die berechneten Bewertungskennzahlen über die verschiedenen Geometrievariationen aufgetragen. Alle X-Stegvarianten weisen eine Querströmungskennzahl von  $< 1$  auf. Demnach entstehen strukturmechanisch ungünstigere Bindenähte als beim konventionellen Design. Gleichzeitig treten mit zunehmender Steganzahl höhere Druckverluste auf, die im Falle von 21 Stegpaaren um 80 % höher ausfallen als bei den konventionellen Stegen. Durch die zunehmende Steganzahl wird der Fließquerschnitt für die Schmelze verringert und somit steigt der Fließwiderstand bzw. der Druckverlust. Aufgrund der Massenerhaltung nimmt gleichzeitig die mittlere Geschwindigkeit der Kunststoffschmelze im Stegbereich zu. In Kombination mit der Wandhaftung der Kunststoffschmelze sind daher

höhere Scherraten zu erwarten. Erwartungsgemäß wird dieser Effekt das Verweilzeitkriterium positiv beeinflussen (Gleichung 5.6), da der Stegflächenanteil  $A_{\text{stegdesign}}$  zunimmt. Durch den gegenläufigen Effekt der größeren Gesamtstegflächen bzw. Wandhaftung bleiben die Verweilzeiten allerdings auf einem vergleichbaren Niveau mit den konventionellen Stegen. Leicht fallende Tendenzen sind sichtbar. Mit zunehmender Scherrate bzw. Schererwärmung nimmt die thermische Homogenität ebenfalls ab ( $e_{\text{thermal}} = 0$  entspricht einer vollständig homogenen Temperaturverteilung). Die in der Bewertungsebene 2 hinter den Stegen (Abbildung 7) erfasste maximale Temperatur stieg um lediglich  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  an. Bei zunehmender Elementanzahl ist eine Steigerung der Querströmungsanteile zu erkennen, allerdings erreicht keine der Elementanzahlvarianten das Niveau der konventionellen Stege. Analog zur Variation der Steganzahl traten auch hier höhere Druckverluste und Verweilzeiten sowie eine abnehmende thermische Homogenität auf. Anders verhält es sich bei der Variation des Stegwinkels (Stegrotation in Fließrichtung). Durch die Stegrotation in Extrusionsrichtung nimmt der Druckverlust linear ab. Da bei dieser Variation jedoch nicht die Gesamtfläche der Stege verändert wird, scheinen die Verweilzeit und die Scherrate nicht signifikant beeinflusst zu werden. Die Beobachtung wird durch die Bewertungskennzahlen für die thermische Homogenität und die Verweilzeit gestützt. Die Querströmungsanteile nehmen bei einem Rotationswinkel von  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  dagegen ab. Die Stirnflächen der Stege sind bei dieser Variante geringer als bei  $90^\circ$  oder  $45^\circ$ . Das hat zur Folge, dass kaum eine Umverteilung der Kunststoffschmelze senkrecht zur Extrusionsrichtung auftritt.

Insgesamt kann mit keiner X-Stegvariation eine höhere Querströmungserzeugung erzielt werden als mit dem konventionellen Stegdesign.

Kennzahl	X-Variationen								
	Steganzahl			Ebenenanzahl			Rotationswinkel		
	[-]			[-]			[°]		
	12	15	21	1	2	3	0	45	90
<b>Q</b>	0,61	0,45	0,55	0,55	0,6	0,72	0,31	0,45	0,45
<b><math>\Delta P</math></b>	0,54	0,33	0,16	0,16	0,06	0,04	0,39	0,36	0,33
<b><math>E_{\text{th}}</math></b>	-0,29	-0,72	-1,56	-1,56	-1,55	-1,37	-0,65	-0,71	-0,72
<b>T</b>	0,92	0,91	0,88	0,88	0,81	0,75	0,91	0,91	0,91

Tabelle 5.2: Bewertungskennzahlen der X-Stegvarianten

### Auswertung der CFD-Simulationsergebnisse auf Basis der Kenics-Stegdesigns

Die Kenics-Stegvarianten scheinen dagegen besser als das X-Stegdesign geeignet zu sein. Die Bewertungskennzahlen der Kenics-Stege sind in Tabelle 5.3 aufgelistet und das für die Fertigung ausgewählte Design ist grau hinterlegt. So wird bei einer Anzahl von 4 Kenics-Stege die Querströmungskennzahl auf 1,99 und bei 6 Kenics-Stege auf 2,09 erhöht. Das entspricht in etwa einer Verdoppelung der Querströmungen im Vergleich zum konventionellen Stegdesign. Bei einer weiteren Steigerung der Steganzahl auf 8 nimmt die Querströmung dagegen wieder ab. So wird bei acht Kenics-Stege nur lediglich eine Bewertung von 1,87 erreicht. Ursächlich kann die starke Beschleunigung der Schmelze im Stegbereich sein. Demnach kann eine Änderung des Verhältnisses zwischen den Querströmungsgeschwindigkeiten und der Strömung vorliegen. Ein ähnlicher Effekt wurde bei zunehmender Elementanzahl sichtbar. Die Querströmungen nahmen von einem über zwei bis hin zu drei Stegelementen linear ab. Die übrigen Bewertungskriterien Druckverlust, thermische Homogenität und Verweilzeit der Steg- und Elementanzahlvariation weisen die gleichen Tendenzen auf wie die X-Stegvariationen.

Kennzahl	Kenics-Variationen								
	Steganzahl			Ebenenanzahl			Rotationswinkel		
	[-]			[-]			[°]		
	4	6	8	1	2	3	45	60	90
<b>Q</b>	1,99	2,09	1,87	3,27	3,11	2,97	2,86	2,36	2,07
<b><math>\Delta P</math></b>	0,61	0,4	0,27	0,34	0,16	0,06	0,18	0,4	0,51
<b><math>E_{th}</math></b>	-0,33	-0,86	-1,97	-1,63	-3,33	-2,75	-2,58	-1,12	-0,58
<b>T</b>	0,92	0,89	0,85	0,94	0,87	0,82	0,87	0,9	0,92

Tabelle 5.3: Bewertungskennzahlen der Kenics-Stegvarianten

Bei der Variation „Stegrotation“ wird deutlich, dass mit zunehmendem Rotationswinkel höherer Querströmungskennzahlen erreicht werden. Dies ist ebenfalls wie bei der X-Stegrotation mit der Vergrößerung angeströmten Stirnflächen zu begründen. Bei 90° Rotationswinkel liegen die Längsachsen der Stege nahezu quer zur Extrusionsrichtung. Dementsprechend erfolgt eine Verteilung der Schmelze senkrecht zur Extrusionsrichtung und die Querströmungsbewertung steigt. Gleichzeitig verringert sich aber auch der Fließquerschnitt, was höhere Druckverluste zur Folge hat. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Steglänge. Mit abnehmendem Rotationswinkel war eine bauraumbedingte Kürzung der Steglängen unumgänglich. Bei einem Rotationswinkel von 90° liegen die vergleichsweise größten Stegvolumina vor, die zu einem erhöhten Druckverlust beitragen. Hinsichtlich der Verweilzeiten treten bei dieser Geometrievariation die bereits beschriebenen gegenläufigen

Effekte einer erhöhten Scherrate gegenüber größeren Wandanhaftungsflächen auf. Ähnlich wie bei den X-Stegen nimmt so die thermische Homogenität mit zunehmenden Rotationswinkel ab. Die Verweilzeit ist kaum beeinflusst.

Insgesamt weisen die Kenics-Stegdesigns eine höhere Querströmungserzeugung auf als die konventionellen Stege. Dieser Vorteil geht allerdings mit gesteigerten Druckverlusten einher.

### Auswertung der CFD-Simulationsergebnisse auf Basis der LPD-Stegdesigns

Im Vergleich zu den konventionellen Stegdesigns kann mit allen untersuchten Varianten der LPD-Steganzahl eine höhere Querströmungskennzahl erzielt werden. Alle Kennzahlen sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst, die für die Fertigung ausgewählten Designs sind grau hinterlegt. Ähnlich wie bei der Variation der Kenics-Steganzahl ließ sich auch bei den LPD-Stegen ein Maximum an Querströmung bei einer definierten Steganzahl ermitteln. In diesem Fall tritt die maximale Querströmung bei einer Steganzahl von 4 auf. Im Vergleich zu den konventionellen Stegen hat sich der Querströmungsanteil um den Faktor 2,3 erhöht. Auch die übrigen Kennzahlen zur Bewertung von Druckverlusten, thermischer Homogenität und Verweilzeit stimmen mit den Tendenzen der Kenics-Steganzahlvariation überein.

Kennzahl	LPD-Variationen										
	Steganzahl			Stegbreite (konstant)			Stegbreite (einseitig konvex)			Bohrungen	
	[-]			[mm]			[mm]			[-]; [mm]	
	2	4	6	5	7,5	10	2,5	5	8	4; 3	4; 4
<b>Q</b>	1,93	2,34	2,3	2,34	2,52	2,74	2,26	2,52	2,81	2,56	2,24
<b><math>\Delta P</math></b>	0,79	0,51	0,33	0,51	0,44	0,38	0,85	1,07	1,83	0,39	0,41
<b><math>E_{th}</math></b>	-0,35	-0,45	-1,21	-0,45	-0,72	-1,12	-0,42	-0,52	-0,81	-1,23	-0,92
<b>T</b>	0,97	0,94	0,9	0,94	0,95	0,96	0,96	0,98	1	0,94	0,94

Tabelle 5.4: Bewertungskennzahlen der LPD-Stegvarianten

Bei der Stegverbreiterung spiegelt sich die in Pahl *et al.* beschriebene Korrelation zwischen Stegbreite und verbesserter Mischwirkung in der Querströmungskennzahl wider [PM79]. So steigt die Querströmungskennzahl bei einer konstanten Stegbreite von 10 mm auf knapp 2,8 an. Der Anstieg ist nahezu linear zur Stegbreite  $x$  und kann mit der (Gleichung 5.7) beschrieben werden.

$$Q(x) = 0,1998x + 2,1339 \quad (\text{Gleichung 5.7})$$

Bei der einseitig konvexen Stegverarbeitung ergibt sich ein ähnlicher Zusammenhang zur maximalen Stegbreite  $x_{\max}$ , allerdings wird deutlich, dass im Falle der konvexen Stegverbreiterung der Einfluss auf Querströmung zunimmt. So ergibt sich bei einer maximalen Stegbreite von 8 mm eine Querströmungskennzahl von 2,81, welche mit der konstanten Stegbreite von 10 mm vergleichbar ist. Da bei dieser Variante jedoch das Stegvolumen deutlich kleiner ausfällt, ist der Druckverlust um etwa 30 % geringer. Die Druckverlustzunahme bzw. Abnahme der Druckverlustkennzahl ist für die untersuchten Stegvarianten ebenfalls linear. An dieser Stelle konnte also eine Stegvariante mit ähnlicher Querströmungskennzahl bei geringerem Druckverlust entwickelt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Stegvariante ist die deutlich homogenere Temperaturverteilung, was durch die Kennzahl der thermischen Homogenität abgebildet wird. Insgesamt nimmt die thermische Homogenität jedoch mit zunehmender Stegbreite zu. Diese Beobachtung gilt gleichermaßen für die einseitig konvexe und für die konstante Stegverbreiterung. Die durch den geringeren Fließquerschnitt steigenden Scherraten bewirken darüber hinaus eine Abnahme der thermischen Homogenität. Die Verweilzeitbewertung lässt jedoch keine signifikante Beeinflussung erkennen.

Die Simulationsergebnisse der zusätzlich untersuchten LPD-Stege mit Bohrungen zur Vermeidung von Stagnationszonen sowie des Basisdesigns ohne Bohrungen sind ebenfalls in Tabelle 5.4 dargestellt. Mit zunehmendem Durchmesser der vier Bohrungen nehmen die Querströmung und der Druckverlust ab. Gleichzeitig verbessert sich die thermische Homogenität. Auf die Verweilzeiten konnte kein signifikanter Einfluss festgestellt werden.

### 5.3 Stegauswahl für die praktische Erprobung

Zusammengefasst geht aus den Bewertungskennzahlen (vgl. Tabelle 5.2 bis 5.4) hervor, dass die X-Stege im Vergleich zu den konventionellen Stegen weder einen Mehrwert hinsichtlich der Bindenahtausprägung, noch hinsichtlich des Druckverlusts bieten. Anders gestaltet sich die Bewertung der Kenics- und LPD-Stege. Mit allen untersuchten Varianten konnte eine Steigerung der Querschnitte teilweise bis um das 3-fache erzielt werden. Den guten Querströmungs- bzw. Bindenahtbewertungen steht allerdings immer ein größerer Druckverlust gegenüber. Bei der Auswahl der zu fertigenden Stegdesigns zur praktischen Erprobung waren Kompromisse daher unausweichlich. Wie im Abschnitt zu den LPD-Stege erläutert wurde, kann im direkten Vergleich zweier Stegdesigns teilweise ein Stegdesign deutlich favorisiert werden. Zudem scheint sich bei den Kenics- und LPD-Stege keine signifikante Verweilzeitzunahme einzustellen. Die thermische Homogenität wird teils deutlich vom Stegdesign beeinflusst. Allerdings konnten in den Simulationsergebnissen maximale

Temperaturanstiege von 0,11 °C ermittelt werden. Daher wird die thermische Homogenität bei der Stegauswahl für die praktische Erprobung als unkritisch eingestuft und insofern vernachlässigt. Die Belastungsanalysen ergaben darüber hinaus, dass alle Stegdesigns den simulierten Innendrücken inklusive Sicherheitsfaktor standhalten. Die Auswahl der zu fertigen Stegdesign erfolgt so ausschließlich abhängig von den Kennzahlen  $Q$  und  $P$ .

Für die praktische Erprobung wurden vier verschiedene Stegdesigns ausgewählt. Dabei handelte es sich um folgende Varianten:

- LPD - Stegvariante „Stegbreite einseitig konvex 8 mm“ (A)
- LPD - Stegvariante „Stegbreite konstant 7,5 mm (B)
- Kenics – Stegvariante „Rotation 45°“ (C)
- LPD - Stegvariante “Bohrungen 4 x 4mm“ (D)

#### **5.4 Fertigung der neuartigen Stegeinsätze mittels Selektivem Laser Melting (SLM)**

In Kapitel 5.3 wurden auf Basis der Simulationsergebnisse vier Dornhaltergeometrien ausgewählt. Diese Geometrien wurden hinsichtlich ihrer voraussichtlichen Bindenahtausprägung (Querströmung) und auftretenden Druckverlusten bewertet. Sie wurden in Tragringe integriert, die kompatibel zum modularen Dornhalterwerkzeug der Firma Elkamet Kunststofftechnik GmbH, Biedenkopf sind. Die gefertigten Tragringe sind Abbildung 10 dargestellt. Verwendet wurde der Werkzeugstahl 1.207 [NN20c]. Es konnte nachgewiesen werden, dass mittels SLM hergestellte Bauteile ca. 98 % der Festigkeit des Grundmaterials (Stahl) aufweisen [Sch12], was für die Werkzeugherstellung genügt.

Da das SLM-Verfahren Einschränkungen hinsichtlich der Geometrietreue und der Oberflächenqualität aufweist, erfolgte nach Rücksprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss die ebenfalls additive Fertigung einer fünften Stegeometrie, die der konventionellen Stegeometrie entspricht. So konnte eine Untersuchung der konventionellen Stege abhängig von der Herstellung (konventionell vs. additiv) erfolgen. Ziel war es, mögliche Einflüsse der rauen, additiv gefertigten Oberfläche auf die Verweilzeit zu ermitteln.

# Mittels Selectivem Laser Melting hergestellte neuartige Stegdesigns



Stegdesign A



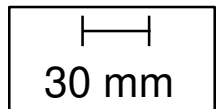
Stegdesign B



Stegdesign C



Stegdesign D



## 6 PRAKTISCHE ERPROBUNG AUSGEWÄHLTER NEUARTIGER STEGGEOMETRIEN

Im Anschluss an die simulative Untersuchung wurden die additive und spanend gefertigten konventionellen Stege sowie vier neuartige, additiv gefertigte Steggeometrien praktisch erprobt. Dazu wurden Extrusionsversuche im Labormaßstab vorgenommen und das Betriebsverhalten der Stege hinsichtlich Druckverlust und Spülverhalten analysiert. Um die tatsächliche Bindenahtausprägung bewerten zu können, wurden eine mikroskopische Untersuchung sowie eine Ringsteifigkeits- und Berstprüfung durchgeführt. In diesem Kapitel folgt zunächst eine Beschreibung des Versuchsaufbaus und des Betriebsverhaltens. Anschließend wird auf die mikroskopische und mechanische Extrudatprüfung eingegangen.

### 6.1 Versuchsaufbau

Zur praktischen Erprobung wurden zwei gängige Rohrtypen, ein PE-HD Vestolen A 6060 sowie ein Polypropylen (PP) 531 PH der Firma Sabic, Riad, Saudi-Arabien, untersucht [NN20a, NN20b]. Die Materialdaten dieser Rohrextrusionsmaterialien stimmen nicht mit den simulierten Materialdaten überein. Allerdings weisen Materialien mit ähnlicher Strukturviskosität, d.h. mit ähnlichem Carreau-Parameter  $C$ , bei einem relativen Vergleich der Stegdesigns gleiche Fließphänomene und identische Relationen der Druckverluste auf. Um die Carreau-Parameter  $C_{\text{Simulation}}$  und  $C_{\text{PP}}$  mit einander vergleichen zu können, wurde das  $C_{\text{PP}}$  mit einem Hochdruckkapillarrheometer (HKR) vom Typ Rheograph 2002 der Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, Buchen, bestimmt. Bei einem ermittelten  $C_{\text{PP}}$  von 0,786 sind folglich mit der Simulation vergleichbare Tendenzen hinsichtlich Druckverlust und anderen Fließphänomenen wie beispielsweise Spülzeiten zu erwarten (vgl. Kapitel 5.1:  $C_{\text{Simulation}} = 0,655$ ).

Das Kunststoffgranulat wurde mit einem Laborextruder (Brabender GmbH & Co. KG, Duisburg, Schneckendurchmesser  $D = 19$  mm, Länge der Dreizonenschnecke von  $25 D$ ) plastifiziert. Der eingestellte Durchsatz betrug wie in den Simulationen  $3$  kg/h. Der Extruder verfügt über drei Heizzonen, die in Fließrichtung aufsteigend nummeriert sind. Die thermischen Prozesseinstellungen für die Verarbeitung des PE-HD und des PP sind der Tabelle 6.1 zu entnehmen. An den Extruderaustritt wurde ein wärmeisolierter Messflansch montiert. Dieser war mit zwei eintauchenden Temperatursensoren ausgestattet, welche die Schmelztemperatur erfassten (Messfrequenz  $1 \text{ s}^{-1}$ ). Nach Passieren des Messflanschs gelangte die Kunststoffschmelze in das modulare Dornhalterwerkzeug. Es verfügt über drei Heizzonen bzw. Heizbänder.

	PE-HD [ °C]	PP [ °C]
<b>Extruder Heizzone 1</b>	180	180
<b>Extruder Heizzone 2</b>	190	190
<b>Extruder Heizzone 3</b>	190	200
<b>Werkzeug Heizband 1</b>	215	220
<b>Werkzeug Heizband 2</b>	215	220
<b>Werkzeug Heizband 3</b>	215	220

*Tabelle 6.1: Extruder- und Werkzeugtemperierung*

Zur Erprobung wurde je ein Tragrings in das modulare Dornhalterwerkzeug eingebaut. Das Werkzeug weist eine polierte Düsenlippe auf, sodass eine gute Oberflächenqualität des Extrudates gewährleistet ist. Jeweils vor und hinter dem Tragringsbereich waren Drucksensoren montiert, welche die vorliegenden Drücke aufzeichneten (Messfrequenz  $1 \text{ s}^{-1}$ ). Dies ermöglicht einen Vergleich der verschiedenen Stege hinsichtlich der auftretenden Druckverluste. Über eine Bohrung kann Stützluft mit etwa 1 bis 3 bar in den Stützluftkanal eingeleitet werden. Der Stützluftdruck wurde so eingestellt, dass die Formstabilität des Rohres am Auslass gewährleistet war. Nach dem Austritt aus dem Extrusionswerkzeug passierte das schmelzeförmige Extrudat einen Spalt von 2 bis 5 cm Breite, bevor es die Kalibratorstrecke erreichte. In der Kalibratorstrecke wurde die Schmelze durch fließendes Wasser mit einer Temperatur von etwa  $18 \text{ °C}$  gekühlt. Gleichzeitig wurde das Extrudat durch eine Vakuumpumpe (CT-200-S der Firma Gruber & CO Group GmbH, Pennebach) an die Kalibratorwand angelegt und so die Außengeometrie des Rohres kalibriert. Es folgte eine Kühlstrecke, auf der das formstabile Extrudat über freie Konvektion auf Raumtemperatur abkühlte. Mit einem Bandabzug (HO-06 der Firma Gruber & CO Group GmbH, Pennebach) wurde das Rohr mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von  $0,24 \text{ m/min}$  abgezogen. Durch diese Versuchsanordnung konnten Rohrproben mit etwa  $32 \text{ mm}$  Außendurchmesser und  $2 \text{ mm}$  Wanddicke hergestellt werden. Neben der Aufzeichnung der stegabhängigen Druckverluste wurden Farbwechselversuche zur Bewertung des Spülverhaltens durchgeführt. Die hergestellten Rohrproben wurden anschließend verschiedenen mechanischen Untersuchungen unterzogen. Die Ergebnisse der praktischen Erprobung hinsichtlich des Betriebsverhaltens (Druckverlust und Spülzeit) sind nachfolgend beschrieben.

## 6.2 Druckverluste

Zur Bewertung der Druckverluste sind in Abbildung 11 die stegabhängigen Druckverluste für die beiden untersuchten Materialien dargestellt. Die Unterschiede zwischen PE-HD und PP liegen in den unterschiedlichen Viskositäten begründet. Das PE-HD weist im Vergleich zum PP eine höhere Viskosität auf, was sich in den höheren Druckverlusten widerspiegelt.

# Praktische Erprobung: Gemessene Druckverluste

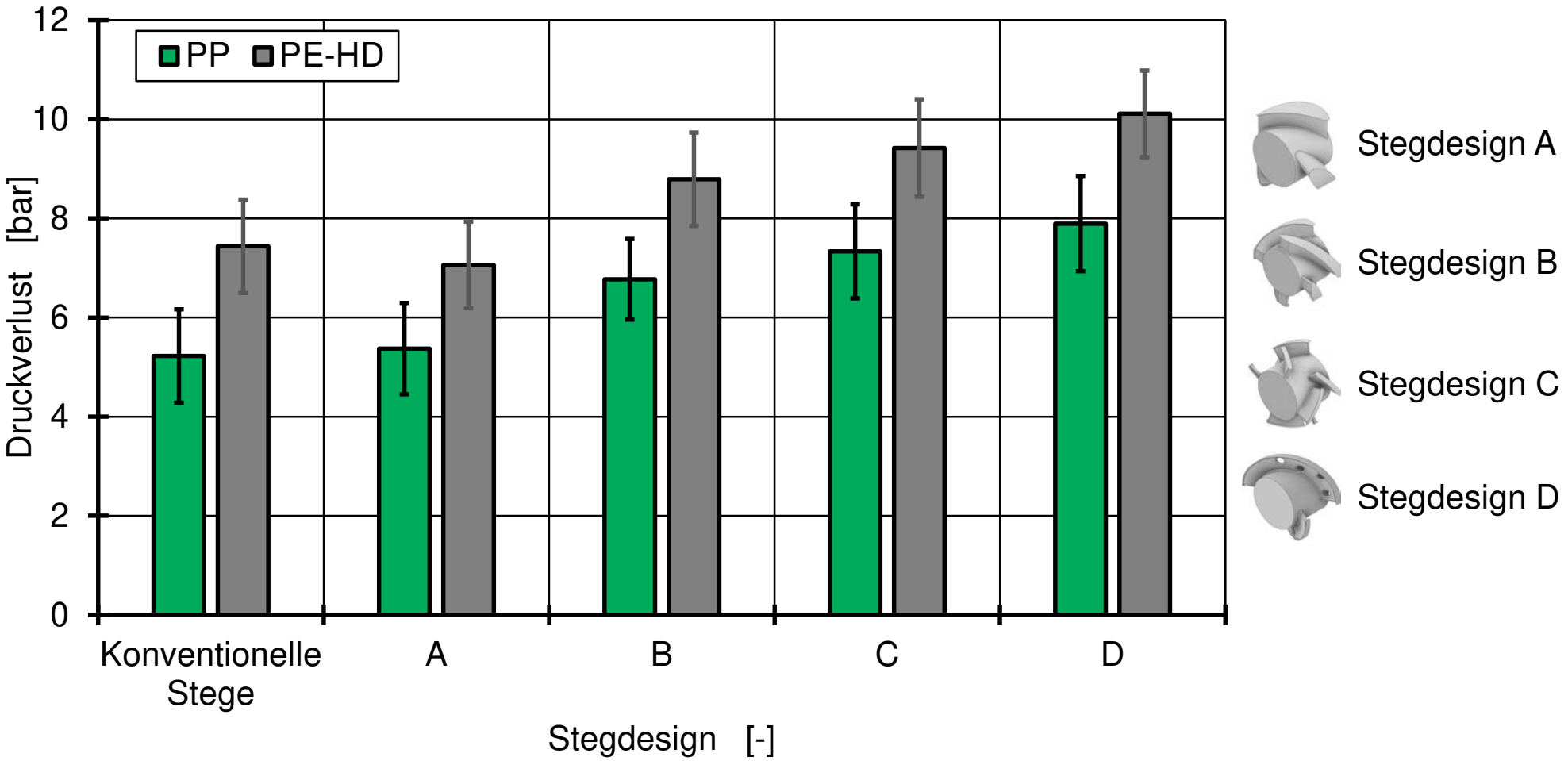


Abbildung 11



Wie erwartet, steigen die Druckverluste bei allen Stegdesigns im Vergleich zu den konventionellen Stegen. Da die zusätzlichen Druckverluste in Relation zu den konventionellen Stegen materialbedingt geringer ausfallen als in der Simulation, bleibt das Druckverlustniveau beim Stegdesign A mit dem des konventionellen Designs vergleichbar. Der maximale Druckverlust stellt sich beim Stegdesign D ein, was mit der simulativen Vorhersage übereinstimmt. Er beträgt etwa 10 bar, was im Vergleich zum konventionellen Stegdesign eine Steigerung von etwa 36 % darstellt. Die übrigen Trends der simulierten Druckverlustkennzahlen stimmen nur teilweise mit der Realität überein. Das Stegdesign C weist basierend auf den Simulationsergebnissen einen geringeren Druckverlust als das Stegdesign B auf. Entgegen der Simulationsergebnisse hat die praktische Erprobung jedoch gezeigt, dass die Druckverluste beim Stegdesign C größer sind als beim Stegdesign B. Die Zu- bzw. Abnahme der Druckverlustkennwerte sind bei einem Vergleich zwischen der Simulation (+0,07) und der praktischen Erprobung (-0,06) jedoch sehr gering (vgl. Abbildung 12).

Bei Einsatz der neuartigen Stegdesigns in der Industrie können die gestiegenen Werkzeugdruckverluste von bis zu 36 % mit höheren Extruderdrehzahlen kompensiert werden. Folglich sind höhere Energiekosten bei gleichbleibenden Produktionsgeschwindigkeiten zu erwarten.

### 6.3 Farbwechselfverhalten

Weiterführend wurde pro Stegdesign und Material ein Farbwechselfersuch durchgeführt. Der Extruder wurde für 15 min mit einer Mischung aus 97 Gew.-% des PE-HD beziehungsweise PP und 3 Gew.-% eines schwarzen Farbmasterbatches auf Rußbasis (Polyblak 7392, der Firma Lyondellbasell Industries ehem. A. Schulman Europe GmbH, Kerpen) gespeist. Anschließend wurde ein Wechsel auf 100 Gew.-% PE-HD beziehungsweise PP vorgenommen und alle fünf Minuten eine Probe für die anschließende Farbmessung entnommen. In einem Farbwechselfersuch für den konventionellen Stegdornhalter ist nach einer Versuchsdauer von 90 min für PE-D und 60 min für PP keine Bindenaht mehr sichtbar. Daher war die Dauer des Farbwechselfersuchs für HDPE auf 90 min und für PP auf 60 min begrenzt.

Um den Weißanteil des Rohres zu quantifizieren, wurde eine Messung der Remissionswerte mit einem Spektralphotometer der Firma ColorLite GmbH, Katlenburg-Lindau durchgeführt. Das Messgerät arbeitet nach dem Spektralverfahren und verwendet die Lichtart D65 bei einem Beobachtungswinkel von 10°. Alle Werte wurden kalibriert auf einen rein weißen Standard gemessen, welcher durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung zertifiziert ist. In einer Messung wurden Werte nach dem L\*a\*b Farbsystem nach der DIN EN ISO/CIE

# Druckverlustkennzahlen in Simulation und Praxis

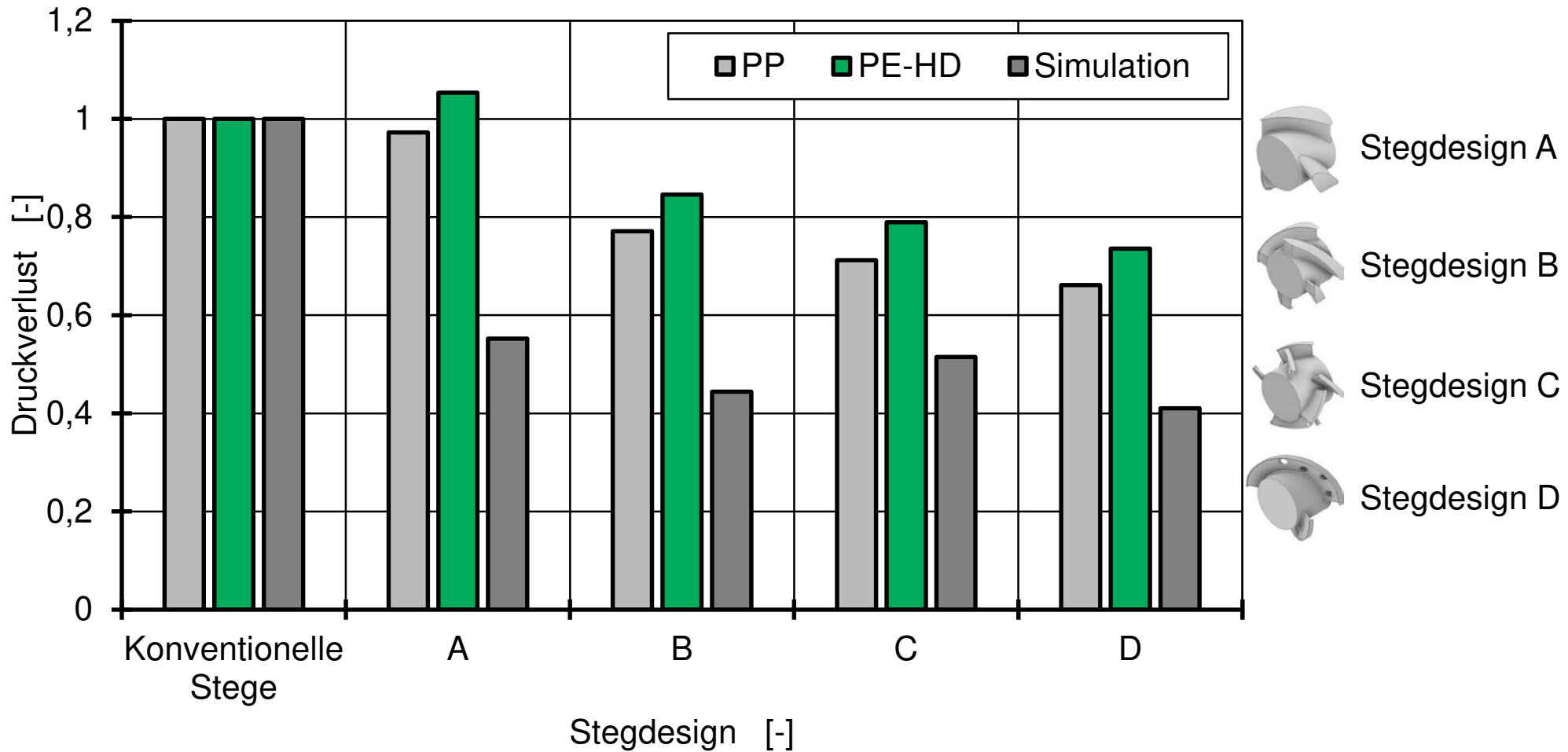


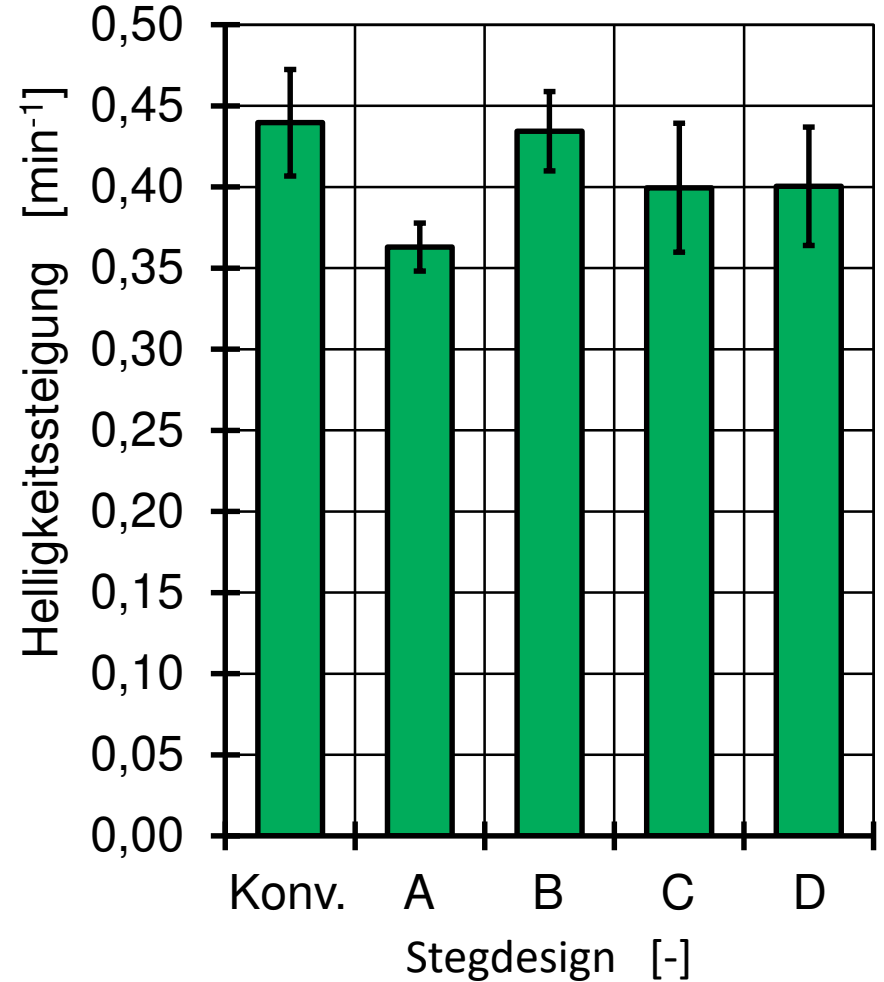
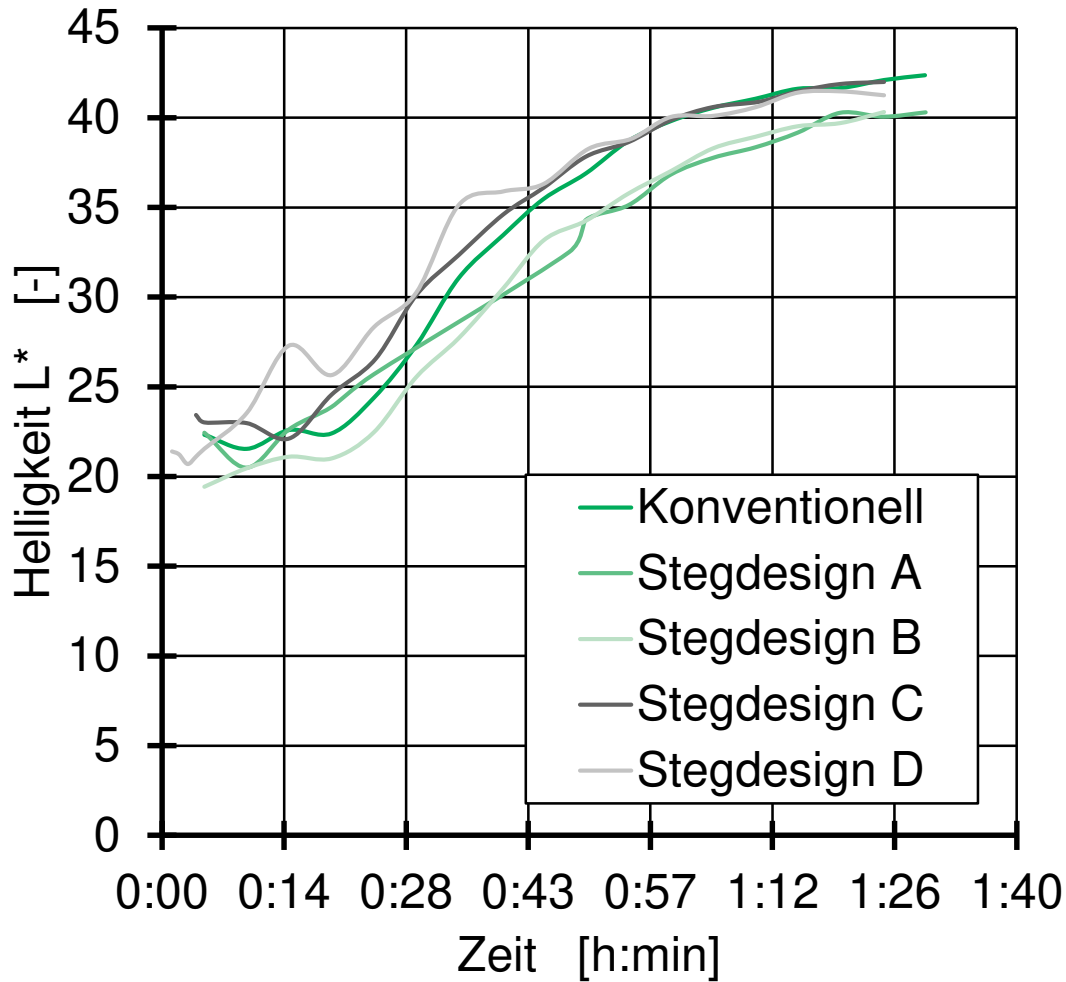
Abbildung 12

11664-4 [NN20d] ermittelt. Relevante Werte sind die CIELAB-Helligkeiten  $L^*$  (im Folgenden als Helligkeit bezeichnet). Ein Wert von 100 bedeutet, dass das Rohr rein weiß ist, hat die Helligkeit einen Wert von 0 ist das Rohr vollkommen schwarz. Der Messsensor wird auf die Probe abgesenkt, sodass Verfälschungen durch Umgebungslicht minimiert werden. Durch die Wandhaftung der Kunststoffschmelze an den Stegflächen verweilt die Schmelze an diesen Flächen länger als im umliegenden Fließkanal. Daher werden die Bindenahtbereiche bei einem Farbwechsel deutlich sichtbar. Mit fortschreitender Farbwechseldauer nimmt die Sichtbarkeit des Bindenahtbereichs jedoch wieder ab, da das Material nach und nach ausgespült wird. Für jede sichtbare Bindenaht auf einer Rohrprobe wurde die Messung der Helligkeit zehn Mal wiederholt und der Mittelwert gebildet. Beim Start des Farbwechselversuchs ist das Rohr schwarz, was in niedrigen Helligkeitswerten deutlich wird. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Helligkeitsmessungen am Beispiel der HD-PE Extrudate dargestellt. Der Helligkeitswert steigt mit zunehmender Entfärbung des Rohres, bevor ein Plateau erreicht wird, welches das farblose Rohr verdeutlicht. Mit Hilfe der Steigung zwischen den beiden Plateaus ist das Farbwechselverhalten der verschiedenen Stegdesigns vergleichbar. Zwischen der Farbwechseldauer und den Stegdesigns sind keine signifikanten Korrelationen sichtbar. Auch in den Simulationsergebnissen konnten keine signifikanten Verweilzeitunterschiede mit dem Verweilzeitbewertungskriterium T beobachtet werden.

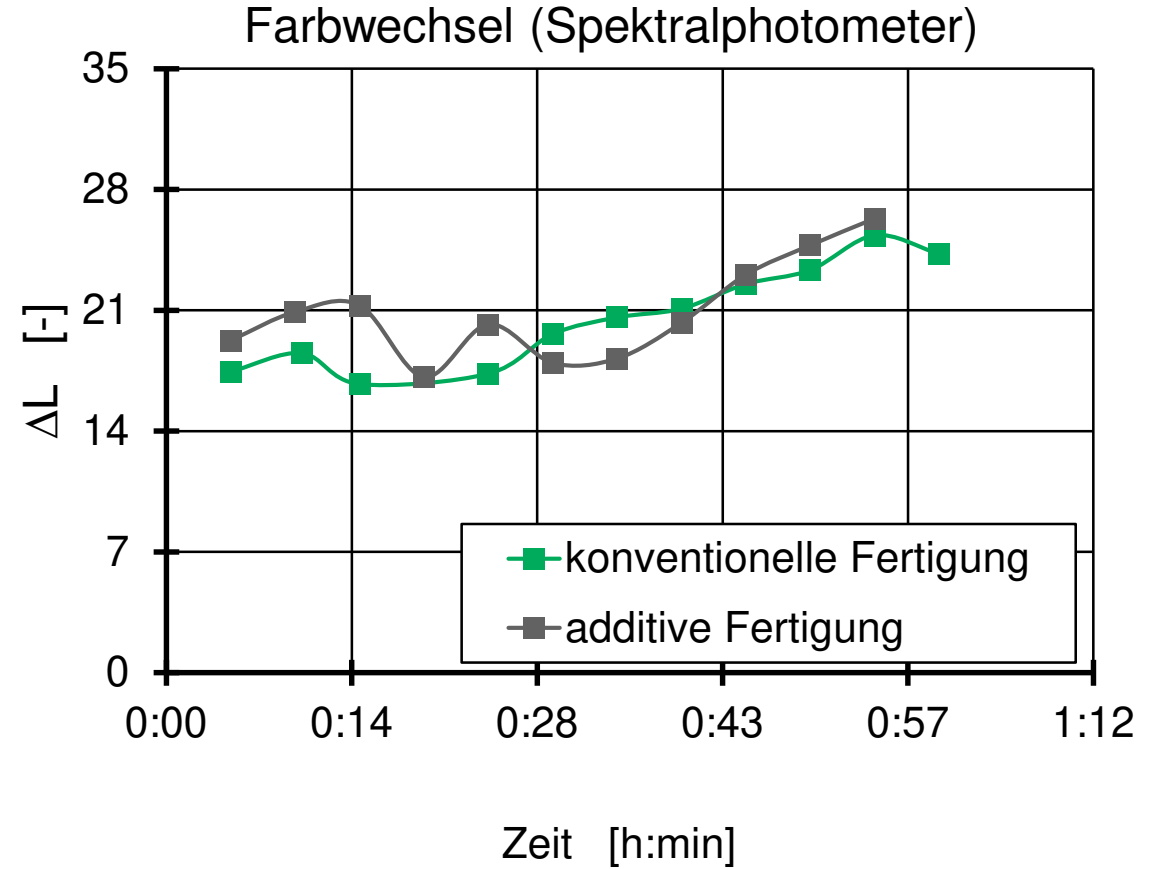
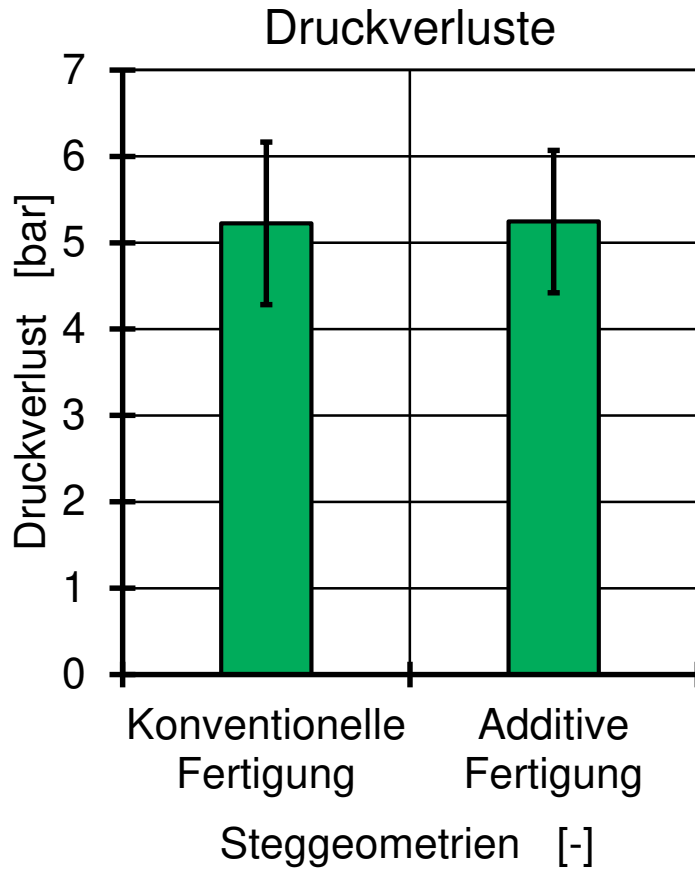
#### **6.4 Untersuchung der additiv gefertigten Oberfläche auf das Betriebsverhalten der Stegdesigns**

Additiv gefertigte Bauteiloberflächen weisen meist eine höhere Rauigkeit auf als mittels spanender Verfahren gefertigter Bauteile. Um mögliche Einflüsse der additiv gefertigten Oberfläche auf Druckverluste und Farbwechselzeit abschätzen zu können, wurde das konventionelle Stegdesign zweimal hergestellt. Die erste Variante ist im spanenden Herstellungsverfahren (Drehen und Fräsen) und die zweite im SLM-Verfahren gefertigt. Die Oberflächenrauigkeit der spanend hergestellten Stege weist einen  $R_a$  von 1,6 auf, die der additiv gefertigten Stege beträgt  $R_a = 7,7 \pm 0,95$ . Beide Varianten wurden praktisch erprobt. Die Untersuchung ergab, dass kein merklicher Einfluss der additiv gefertigten Oberfläche auf Druckverluste und Farbwechselvermögen vorliegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 veranschaulicht. Zu beachten ist, dass diese Ergebnisse auf Farbwechselzeiten von 90 min beruhen. Es ist nicht auszuschließen, dass sich nach langen Extrusionsdauern von mehreren Tagen oder Wochen Material an den Werkzeugwänden ablagert und im Falle rauer Oberflächen weniger gut ausgespült wird.

# Ergebnisse der Farbwertmessungen - HDPE



# Vergleich zwischen konventionell und additiv gefertigten Stegen



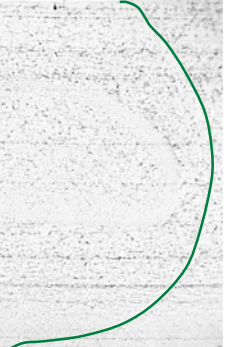
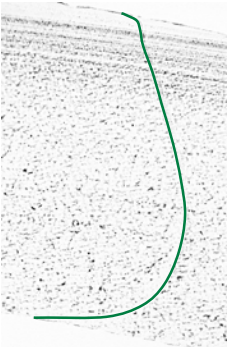
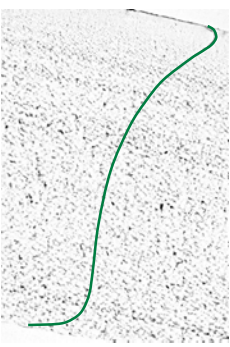
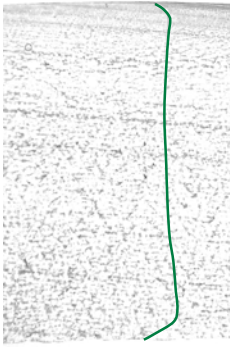
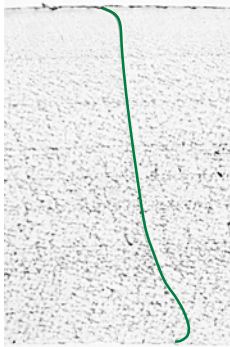
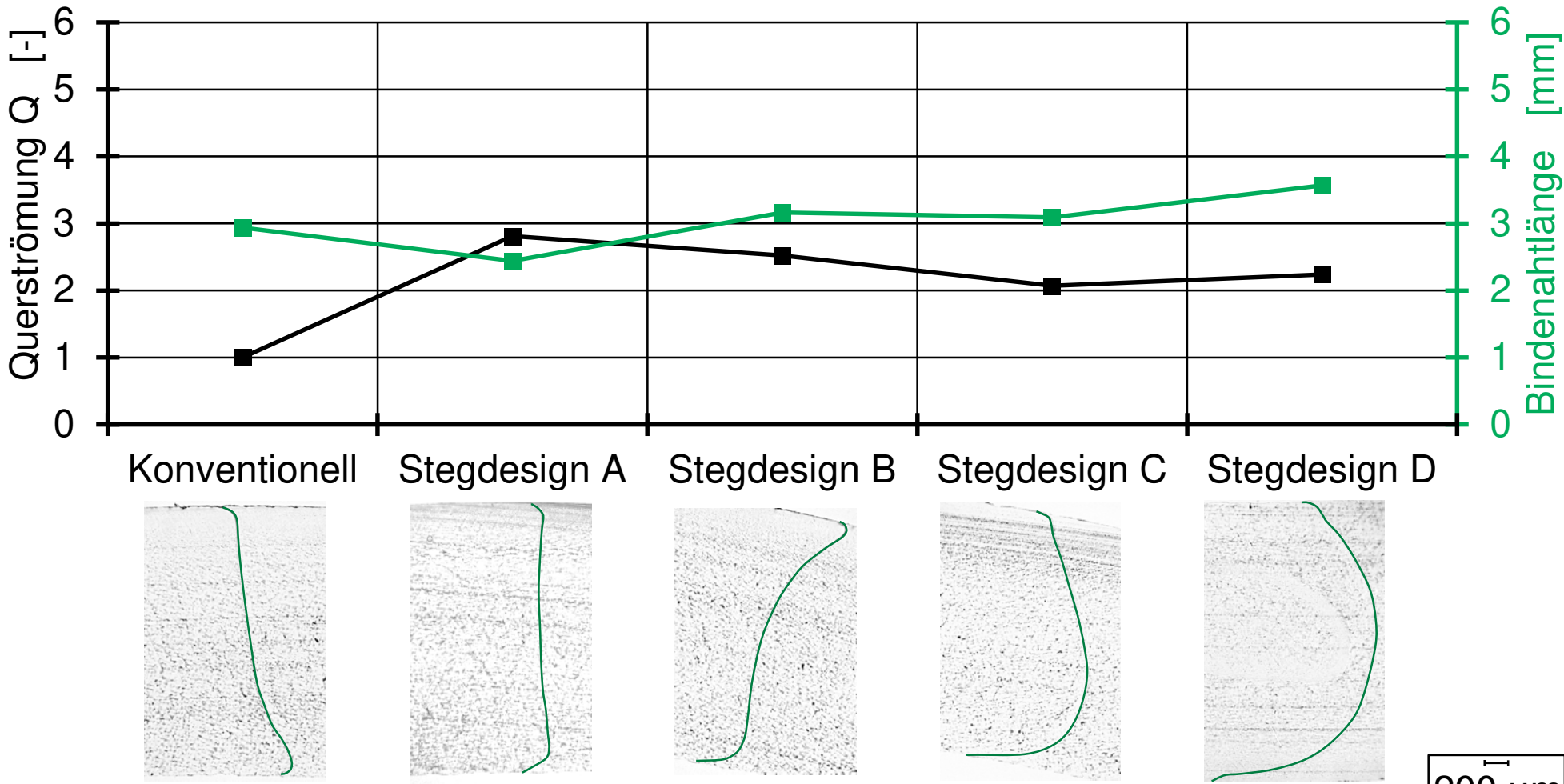
## 6.5 Mikroskopische Untersuchung der hergestellten Rohrproben

Ziel der mikroskopischen Untersuchungen war die Ermittlung der Bindenahtlage und -ausprägung. Dazu wurden mit einem Vibratom (Typ Microm HM 650V der Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, USA) Dünnschnitte mit einer Dicke von 20 µm angefertigt und mit einem Durchlichtmikroskop (Typ VHX 500 der Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg) bei 200-facher Vergrößerung digitale Bilder erstellt. Um die Bindenahtausprägung in Form der radialen Bindenahtlänge bewerten zu können, wurden die Bilder anschließend mit dem Bildverarbeitungsprogramm ImageJ (National Institute of Health, USA) ausgewertet (Abbildung 15). Der Bindenahtverlauf wurde jeweils mit einer grünen Linie verdeutlicht. Die gemessenen Bindenahtlängen sowie die aus den Simulationsergebnissen ermittelten Querströmungskennzahlen sind ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Das Diagramm veranschaulicht, dass die Querströmungskennzahlen zur Bewertung der Bindenahtausprägung nicht mit den gemessenen Bindenahtlängen korrelieren. Eine alleinige Betrachtung der Querströmungen zur Bindenahtbewertung scheint nicht ausreichend. Daher war eine Anpassung der Bindenahtbewertungskennzahl erforderlich. Ausgehend von der theoretischen Überlegung, dass Bindenähte dort entstehen, wo zwei Schmelzeströme zusammenfließen, also Querströmung auftritt, wurden nun weitere Einflussgrößen untersucht, die das Bindenahtmaterial auszeichnen. Weitere Einflüsse auf die Historie des Bindenahtmaterials sind Schergeschwindigkeiten, Dehnraten und Verweilzeiten. Da das verwendete Simulationsmodell keine Dehnströmungen berechnet, ist eine Möglichkeit, den Solver zu erweitern und Dehnströmungskoeffizienten zu ermitteln. Praktikabler war an dieser Stelle jedoch die zusätzliche Berücksichtigung der Verweilzeit nach (Gleichung 6.1).

$$B = \frac{Q_{Stegdesign}}{\sum((|w_{x, Stegdesign}| + |w_{y, Stegdesign}|) * t_{Stegdesign}^2)} \quad (\text{Gleichung 6.1})$$

Auf diese Weise konnte eine Kennzahl generiert werden, die mit den Bindenahtlängen der praktischen Untersuchung korreliert (siehe Abbildung 16). Da die Verifizierung dieses Kriteriums allein auf den fünf praktisch erprobten Stegdesigns beruht, sollten zukünftig ausführlichere Untersuchungen erfolgen. Sollte sich die Kennzahl B weiterhin als geeignet erweisen, die Bindenahtlänge vorherzusagen, kann die Kennzahl B als Optimierungsgröße in weiteren Arbeiten herangezogen werden. Nach den theoretischen Überlegungen aus Kapitel 5.2 hat die Umlagerung der Bindenähte eine Vergrößerung der Bindenahtflächen und damit eine

# Reale Bindenahtausprägung im Vergleich zur Bewertungskennzahl Q



200 μm

Abbildung 15

# Reale Bindenahtausprägung im Vergleich zur Bewertungskennzahl B

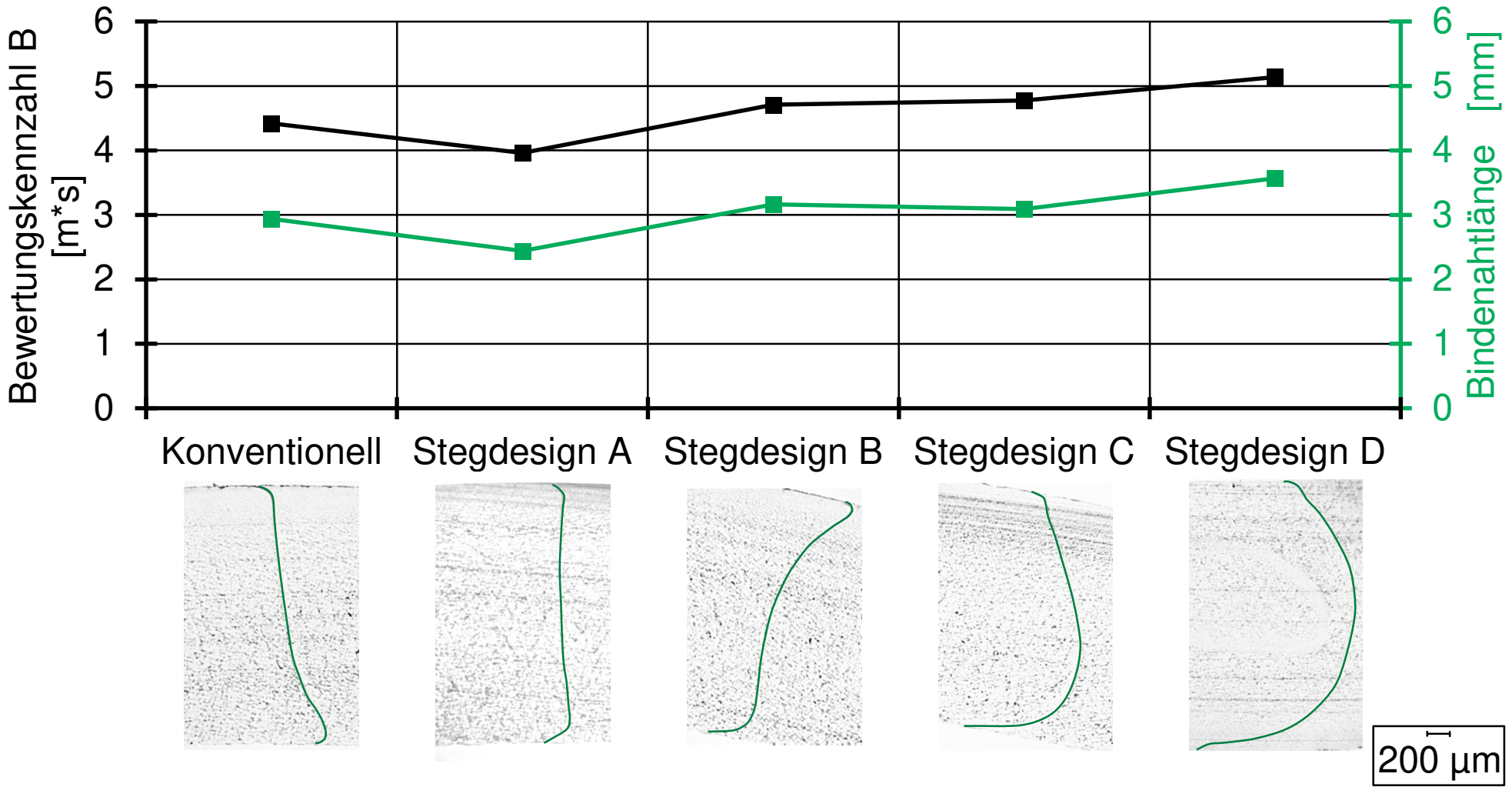


Abbildung 16

Erhöhung der mechanischen Festigkeiten zur Folge. Bei den Proben, die mit den Stegdesigns B, C und D hergestellt wurden, sind demnach höhere Festigkeiten zu erwarten.

## 6.6 Mechanische Prüfung der extrudierten Rohrproben

Um den Bindenahteinfluss auf die mechanischen Extrudateigenschaften zu untersuchen, wurden die Rohrproben nicht nur mikroskopisch, sondern auch mechanisch geprüft. Es erfolgten Ringsteifigkeits- und Berstdruckprüfungen, die weiterführend beschrieben sind.

### Ringsteifigkeitsprüfung

Neben der mikroskopischen Analyse erfolgten zudem zwei mechanische Extrudatprüfungen. Zunächst wurden die hergestellten Rohrproben einer Ringsteifigkeitsprüfung in Anlehnung an die EN ISO 9969:2016 [NN16] unterzogen. Diese Prüfung dient der Charakterisierung des Festigkeitsverhaltens von Kunststoffrohren in der Bau- Elektro- und Wasser/Abwasserindustrie [URL21b]. Die Ringsteifigkeit beschreibt den Widerstand eines Rohres gegen Verformung durch eine senkrecht einwirkende Kraft. Zur Bestimmung der Ringsteifigkeit wird eine Rohrprobe zwischen zwei Platten mit einer Vorspannkraft von 7,5 N eingespannt. Anschließend werden die Platten mit einer definierten Verfahrgeschwindigkeit von 2 mm/s zusammengefahren. Dabei wird die benötigte Kraft aufgezeichnet. Der Prüfaufbau ist rechts in Abbildung 17 schematisch dargestellt. Aus der Kraft [kN] bei einer Rohrverformung von 3 %, der mittleren Probenlänge L [mm] und der Verformung [mm] von 3 % kann nach (Gleichung 6.2) die Ringsteifigkeit ermittelt werden.

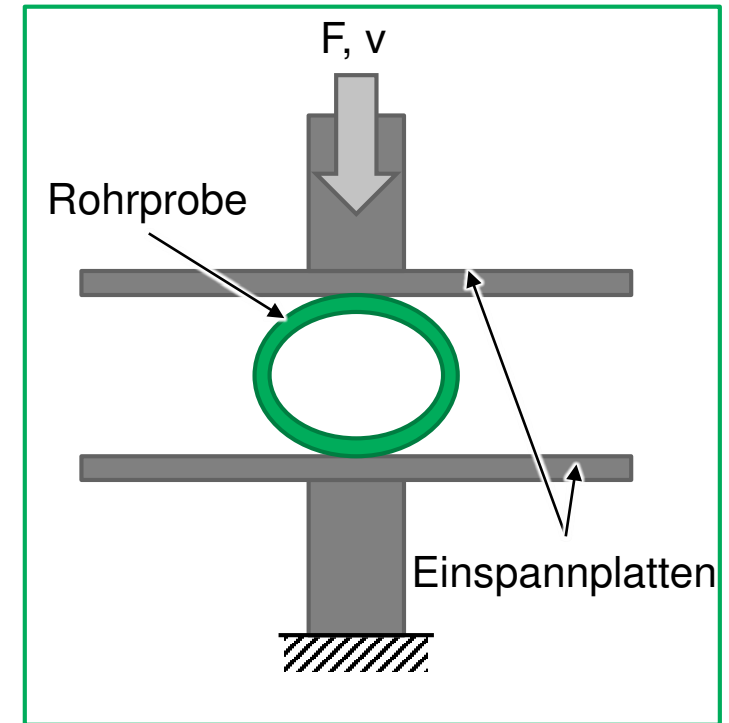
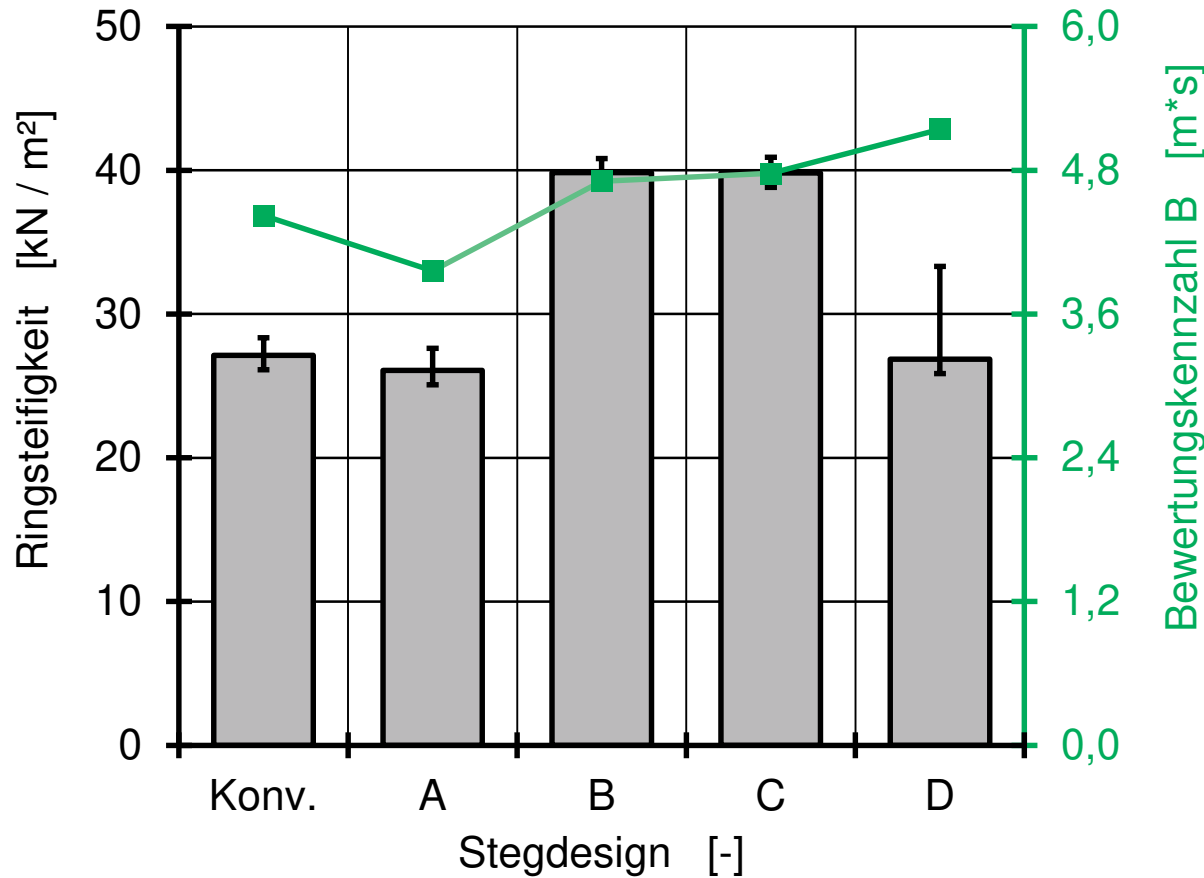
$$S_a = \left( 0,0186 + 0,025 \frac{y_a}{d_i} \right) \frac{F_a}{L_a * y_a} * 10^6 \quad (\text{Gleichung 6.2})$$

Es wurde eine Vierfachbestimmung jeder Probe durchgeführt. Die ermittelten Ringsteifigkeiten sind für das PE-HD in Abbildung 17 (links) veranschaulicht. Hier ist zu erkennen, dass die Ringsteifigkeiten der Stegdesigns B und C mit ca. 40 kN/m<sup>2</sup> deutlich oberhalb der Ringsteifigkeiten der weiteren Stegdesigns liegt. Diese liegen im Bereich zwischen 26 und 28 kN/m<sup>2</sup>. Eine Korrelation zur Querströmungskennzahl ist aufgrund der Stegdesigns A und D nicht gegeben.

### Berstdruckprüfung

Das Zeitstandverhalten wird neben der auf das Rohr einwirkenden Temperatur maßgeblich durch den Spannungszustand bestimmt, welcher sich durch den Rohrrinnendruck einstellt [URL21c]. Als zweite mechanische Prüfung wurden daher Berstdruckprüfungen in Anlehnung

# Ergebnisse der Ringsteifigkeitsprüfung angelehnt an EN ISO 9969:2016 (PE-HD)



Stegdesign A



Stegdesign B



Stegdesign C



Stegdesign D

an die DIN EN ISO 1402 [NN20e] durchgeführt. Bei dieser Prüfung wurden die Rohrproben auf eine Länge von 180 mm abgelängt und in einer speziell konstruierten Vorrichtung (Dunze GmbH, Hamburg) eingespannt. Anschließend wurde die Probe über einen Zeitraum zwischen 30 und 60 s bis zum Versagen mit Innendruck beaufschlagt. Dazu dosierte eine Pumpe einen definierten Wasservolumenstrom von 3 cm<sup>3</sup>/s.

In der Praxis wird der sich in Rohren einstellende dreiachsige Spannungszustand vereinfacht mit der sogenannten Kesselformel abgeschätzt [NN20f]. Unter Berücksichtigung der auftretenden Innendrucke  $p$ , des mittleren Rohrdurchmessers  $D_m$  sowie der Wanddicke  $e$  wird eine Vergleichsspannung  $\sigma_v$  berechnet. Zur Bestimmung, ob ein Rohr unter den auftretenden Innendrücker versagt, wird die Vergleichsspannung mit der materialabhängigen zulässigen Spannung inklusive Sicherheitsfaktor  $S$  abgeglichen.

$$\sigma_v = \frac{p * D_m}{2 * S * e} < \sigma_{zul} \quad (Gl. 6.6)$$

Die theoretischen Berstdrücke wurden unter Berücksichtigung der mittleren Wanddicken und Rohrdurchmesser der Proben nach der Kesselformel abgeschätzt. Die berechneten sowie die in der Prüfung ermittelten Berstdrücke sind in Abbildung 18 für die Rohrproben aus dem Versuchsmaterial PP aufgetragen. Sowohl bei den PP-Rohren als auch bei den PE-HD-Rohren kam es teilweise zu einem Bruch außerhalb der Bindenähte. Zusätzlich fällt auf, dass der Fehler der nach der Kesselformel ermittelte Berstdrücke etwa 5 - 7 bar beträgt. Die Stegdesigns B, C und D zeigen darüber hinaus keine deutlichen Steigerungen der Innendruckbelastbarkeit.

Bei der Untersuchung der PE-HD-Proben ergab sich dagegen ein deutlicheres Bild (vgl. Abbildung 19). Grund kann das unterschiedliche Relaxationsverhalten der beiden Materialien sein. Relaxiert das PP schneller als das PE-HD, nehmen Bindenahtschwächungen ab. Beim PE-HD wird deutlich, dass die Rohrproben, die mit den Stegdesigns B, C und D hergestellt wurden, deutlich größeren Innendrücker standhalten. So wird bei Stegdesign C ein Druckmaximum von etwa 56 bar erreicht, bevor die Probe versagt. Das entspricht einer Steigerung der Innendruckbelastbarkeit von ca. 40 % im Vergleich zum konventionellen Stegdesign. Nach Abschätzung mit der Kesselformel sind bei der vorliegenden Steigerung des Berstdrucks Wanddickenreduzierung von bis zu 32,9 % bei gleicher Innendruckbelastbarkeit möglich. Unter Annahme einer Produktionsgeschwindigkeit von 40 m/min bei den vorliegenden Rohrmaßen bedeutet dies ein Materialeinsparpotenzial von etwa 48,53 kg/h. Um die Ergebnisse der Berstdruckprüfungen in einen allgemein gültigen Kontext setzen zu können, müssen zusätzliche Versuche mit alternativen Materialien und auf Produktionslinien durchgeführt werden.

# Ergebnisse der Berstdruckprüfung angelehnt an DIN EN ISO 1402 (PP)

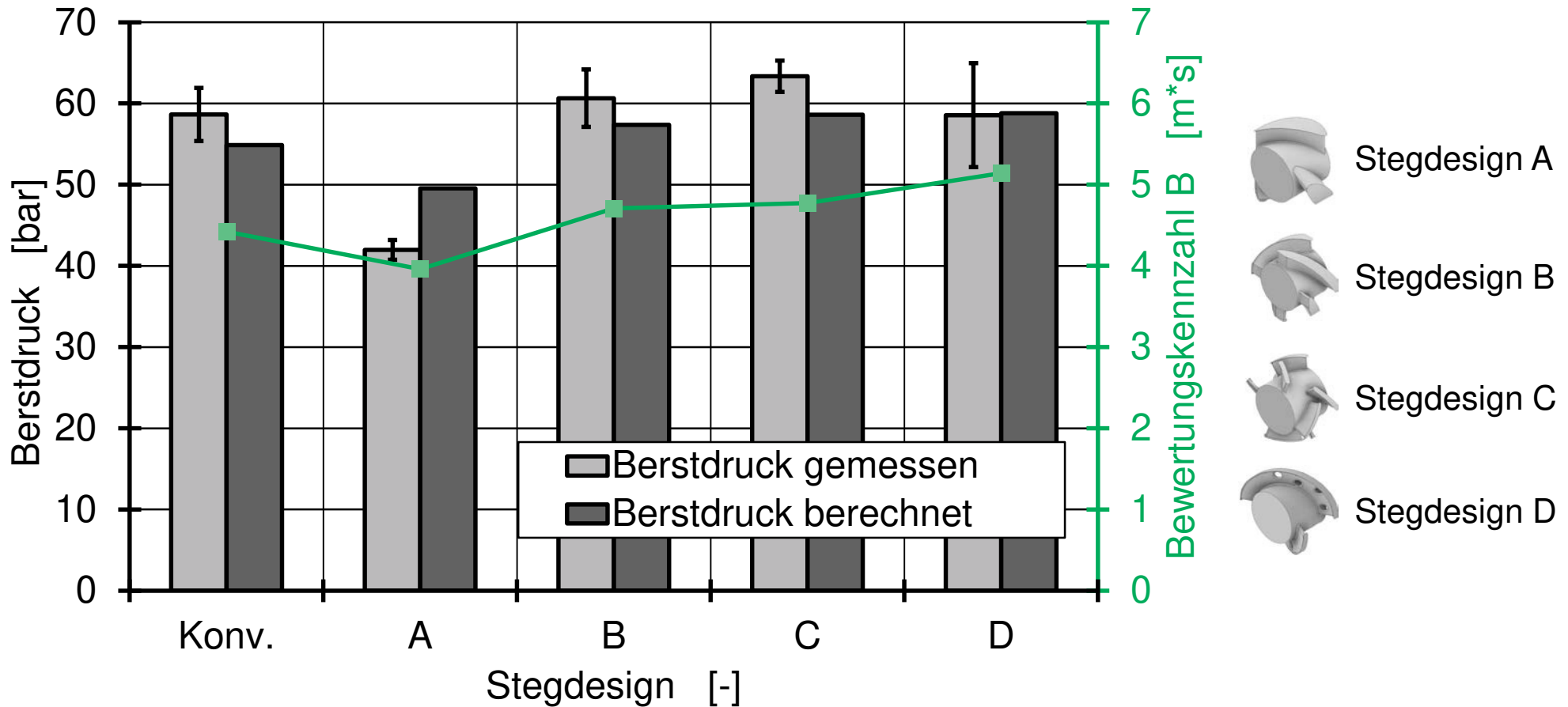
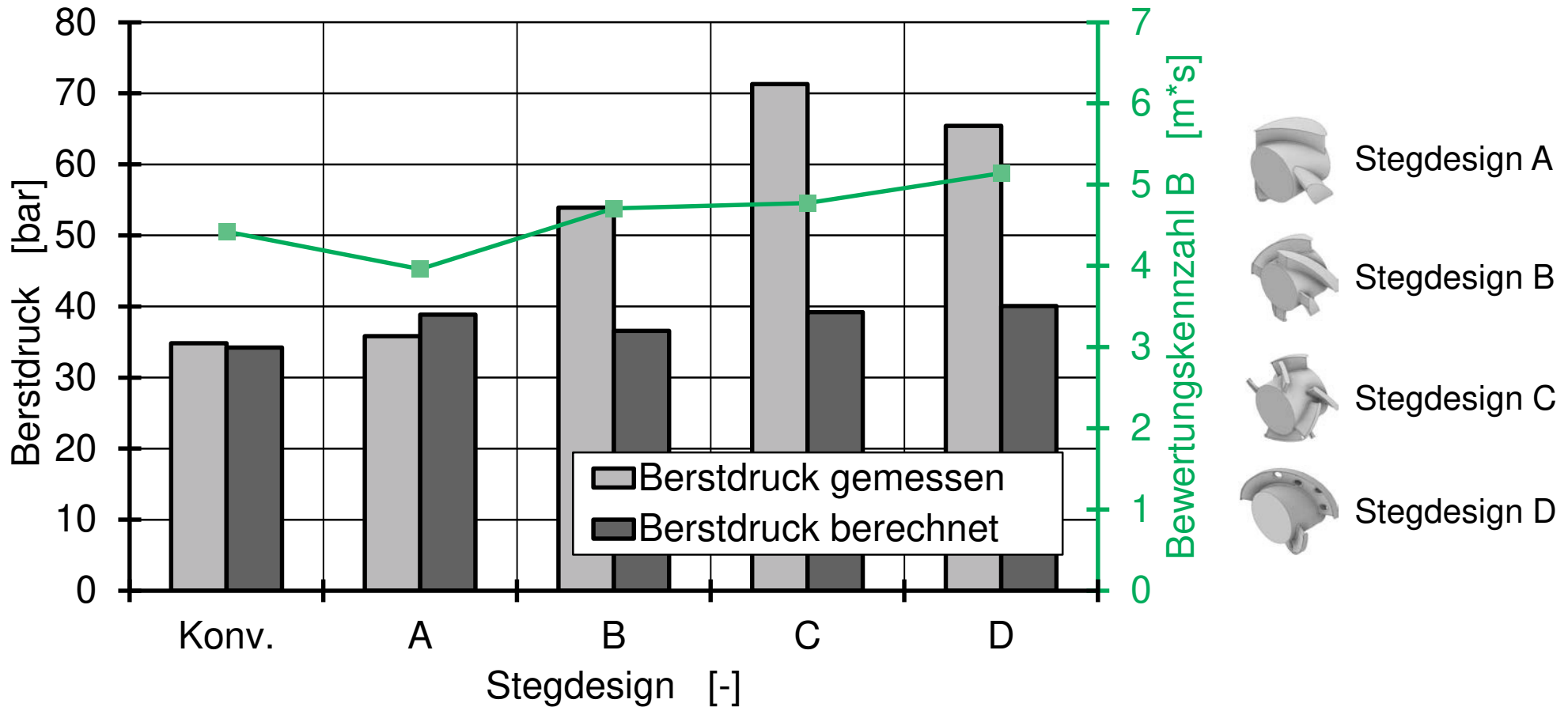


Abbildung 18

# Ergebnisse der Berstdruckprüfung angelehnt an DIN EN ISO 1402 (PE-HD)



## 7 FAZIT UND AUSBLICK

Ziel des Forschungsvorhabens war die Reduzierung von Bindenahteffekten bei der Rohrextrusion unter Einsatz von Dornhalterwerkzeugen. Dazu wurden zunächst neuartige Stege konzipiert, die in ihrem Design an statische Mischelemente angelehnt sind und Querströmungen bzw. Strömungsumlagerungen erzeugen. Vorbild waren X-Mischer, Kenics-Mischer und LPD-Mischer. Mit Hilfe von Computational Fluid Dynamics Simulationen wurden die Stege hinsichtlich der resultierenden Bindenahtausprägung, Druckverluste, thermischen Homogenität und Verweilzeit mit Hilfe von Bewertungskennzahlen verglichen. Eine in diesem Vorhaben entwickelte Kennzahl zur Bindenahtbewertung basiert auf den Strömungsumlagerungen, die durch die neuartigen Stegdesigns erzielt werden. Treten hinter dem Stegbereich Strömungsumlagerungen auf, sind diese in Form von Fließgeschwindigkeiten quer zur Extrusionsrichtung messbar. In Kombination mit der Wandhaftung der Kunststoffschmelze können so Bindenähte strukturmechanisch günstiger verlagert werden. Zur Analyse des Betriebsverhaltens der neuen Stege und zur Untersuchung der tatsächlichen Bindenahtausprägung wurden vier neuartige Stegdesigns mittels Selectivem Laser Melting (SLM) gefertigt und praktisch erprobt. Anschließend wurden die Rohrproben einer mikroskopischen Prüfung unterzogen. Die Prüfungen haben bestätigt, dass Strömungsumlagerungen und damit eine strukturmechanisch günstigere Ausprägung der Bindenähte erreicht werden kann. Allerdings war eine Anpassung der entwickelten Bindenahtkennzahl notwendig, da diese nicht mit den tatsächlich ermittelten Bindenahtlängen korrelierte. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Verweilzeiten konnte eine neue Kennzahl generiert werden, die mit den gemessenen Bindenähten korreliert. Da die Kennzahl lediglich anhand der fünf praktisch erprobten Stegdesigns überprüft werden konnte, sind an dieser Stelle weiterführende Untersuchungen sinnvoll. Nachfolgende Berstprüfungen haben gezeigt, dass mit Hilfe der neuartigen Stege das Zusammenfließen der Schmelzeströme hinter den Stegen dahingehend angepasst werden konnte, dass sich der mechanische Einfluss von Bindenähten auf das Endprodukt reduziert. So war bei dem untersuchten PE-HD eine Steigerung der Innendruckbelastbarkeit um bis zu 40 % möglich. Der verbesserten Innendruckbelastbarkeit stehen allerdings höhere Druckverluste und damit steigender Energiebedarf bei der Herstellung gegenüber. Der Druckverlust steigt um bis zu 27 % an. Durch die erhöhte Innendruckbelastbarkeit könnte zukünftig die Rohrwanddicken ohne Einbußen der mechanischen Festigkeit reduziert und damit Material in Höhe von 32,94 % eingespart werden. Dies wiederum verringert die Energiekosten für die Plastifizierung des Kunststoffes, sodass sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile zu erwarten sind.

## 8 WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG UND NUTZEN FÜR KMU

In Zeiten immer kürzerer Innovationszyklen und geringerer Chargengrößen ist es für den Verarbeiter von großer Bedeutung, möglichst zeit- und materialeffizient zu arbeiten. Diese Anforderungen beeinflussen entsprechend auch die Werkzeugauslegung und -fertigung.

Vor allem kleine und mittlere Unternehmen (kmU) verfügen oft nicht über die Mittel, zu untersuchen, welche thermischen und rheologischen Zustände in einem Werkzeug vorherrschen. So kann eine optimale Auslegung nur schwer gewährleistet werden. Durch die in diesem Forschungsvorhaben erarbeiteten neuartigen Stegdesigns können Bindenahteffekte auf die mechanische Extrudatfestigkeit reduziert und so insbesondere die Innendruckbelastbarkeit um etwa 40 % erhöht werden. Dadurch wird zwar nicht den optischen Fehlstellen des Extrudats entgegengewirkt, dieses Ergebnis bietet jedoch großes Potenzial für Materialeinsparungen. So könnte eine gleiche Innendruckbelastbarkeit bei etwa 32,94 % geringerem Materialeinsatz erreicht werden. Neben der Rohrextrusion ist eine Übertragung auf andere Branchen und Anwendungsfelder wie das Blasformen oder aber die Schlauchextrusion möglich. So kommt diese neue Werkzeugtechnik sowohl den Werkzeugbauern zu Gute, deren Werkzeuge sich von den Mitbewerbern differenzieren können, als auch den Verarbeitern, die durch Materialersparnis die Wirtschaftlichkeit des Prozesses steigern können. Sowohl Werkzeugbau als auch Extrusion von Rohrprodukten sind von kmU dominierte Marktsegmente. Damit trägt das Forschungsvorhaben insgesamt zur *Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von kmU* bei.

Unter Verwendung der neuartigen Dornhalterstege ist eine Materialeinsparung bei höheren Druckverlusten möglich. So kann der dominierende Produktionskostenfaktor „Materialkosten“ bei gleichbleibender Produktqualität gesenkt werden. Weiterhin wird durch die geringere Produktmasse auch der Energiebedarf bei der Weiterverarbeitung reduziert. Somit stellen die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeiteten neuartigen Dornhalterstege einen *Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz* dar.

## 9 PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

### 9.1 Während der Laufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen

Zahlreiche Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurden bereits durchgeführt bzw. sind noch vorgesehen und im Folgenden tabellarisch zusammengestellt.

<b>Projektbegleitender Ausschuss</b>	Zeitraumen: 20.05.2019, 25.08.2020, 23.03.2021
<p>Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens fanden drei Sitzungen mit intensiven Dialogen mit den Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses statt. Um einen breiten Transfer der Projektergebnisse zu erzielen, spiegelte der Ausschuss den potenziellen Nutzerkreis wider. Auf Basis dieses intensiven Dialogs konnten die Firmen das erworbene Wissen in ihre betriebliche Praxis übernehmen. Der projektbegleitende Ausschuss stellte die zahlreichen Akteure im Bereich dar, die an verbesserter Werkzeugtechnologie interessiert sind (u.a. Hersteller von Extrusionsmaschinen, und Extrusionsprodukten, Ingenieurbüros sowie Dienstleister und Werkzeugbauer). Die zentralen Ergebnisse der ersten Sitzung waren, die Festlegung der Versuchsmaterialien (PE-HD und PP) sowie die Nutzung der Simulationssoftware OpenFOAM. Die Simulationsmethodik fand die Zustimmung der erfahrenen Ingenieurbüros. Bei der zweiten Sitzung wurde ein vertiefter Dialog mit den Teilnehmern zum möglichen Einfluss der additiv gefertigten Werkzeugoberflächen auf Druckverluste und Farbwechselzeiten geführt. Das klassische Stegdesign soll daher sowohl in konventionell gefertigter als auch additiv gefertigter Ausführung praktisch erprobt werden. Anhand der aufgezeichneten Druckverluste und Farbwechselversuche kann das Betriebsverhalten additiv gefertigter Oberflächen differenziert werden. Bei der dritten Sitzung lag der Fokus neben der Diskussion der erzielten Ergebnisse auf der Fragestellung, ob möglicherweise eine Schmelzerotation und damit eine Umlagerung der Bindenähte um das Extrudat auftritt. Eine Rotation wirkt sich im Blasformprozess nachteilig auf die Produktqualität aus. Je nach Bindenahtlage reißt der Schmelzevorformling beim Aufblasvorgang oder die Bindenahtschwachstellen werden im Bauteil nicht lastgerecht verteilt. Weiterer Diskussionsgegenstand waren mögliche Langzeitversuche zur ausführlicheren Untersuchung des Farbwechselverhaltens.</p>	
<b>Ergebnispräsentation im Rahmen der Fachbeiratsgruppensitzung „Fachbeiratsgruppe Extrusion“ am IKV</b>	4.-5.11.2019  7.-9.12.2021

<p>Das Forschungsvorhaben wurde in den Sitzungen der Fachbeiratsgruppe Extrusion (4.-5.11.2019 und 7.-9.12.2021) der Fördervereinigung des IKV vorgestellt und mit dem potentiellen Nutzerkreis diskutiert. Der Teilnehmerkreis der Fachbeiratsgruppen umfasst ca. 300 Mitgliedsfirmen, von denen der wesentliche Teil klein- und mittelständisch strukturiert ist. Somit wurde der potenzielle Nutzerkreis des Vorhabens direkt angesprochen.</p>	
<b>Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft</b>	16.10.-23.10.2019
<p>Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden mit verschiedenen Dienstleistern, Ingenieurbüros, Anlagenherstellern und Anwendern im Dialog diskutiert. Dabei wurden Unternehmen auf der Kunststoffmesse K 2019 angesprochen, die zum potentiellen Nutzerkreis dieses Vorhabens gehören.</p>	
<b>Wissenschaftliche Publikationen</b>	2020
<p>HOPMANN, CH.; LEUCHTENBERGER, L.; SCHÖN, M.; FACKLAM, M.: Mit neuen Stegdesigns zu mehr Festigkeit in der Rohrextrusion. <i>Extrusion</i> (2020) 6, S. 22-25</p>	
<b>Hinweise in der Fachpresse</b>	kontinuierlich
<p>IKV-Presseverteiler für Pressemitteilungen und Fachartikel in über 40 Zeitschriften im Bereich Kunststofftechnik und Maschinenbau</p>	
<b>29. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik</b>	08.-11.09.2020
<p>Das Forschungsvorhaben wurde im Jahr 2020 im Rahmen des 30. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik in Aachen auf der Veranstaltungsplattform in einem Informationsvideo vorgestellt und diskutiert. Der Teilnehmerkreis umfasste ca. 800 Firmen, Wissenschaftler und Studierende. Ein wesentlicher Teil der Firmen ist klein- und mittelständisch strukturiert. Somit wird der potenzielle Nutzerkreis des Vorhabens direkt angesprochen.</p>	
<b>17. Duisburger Extrusionstagung</b>	17. – 19.03.2021
<p>Das Forschungsvorhaben wurde im Jahr 2021 im Rahmen der 17. Duisburger Extrusionstagung vorgestellt und diskutiert. Der Teilnehmerkreis umfasst ca. 50 Firmen, Wissenschaftler und Studierende. Ein wesentlicher Teil der Firmen ist klein- und mittelständisch strukturiert. Somit wird der potenzielle Nutzerkreis des Vorhabens direkt angesprochen.</p>	
<b>Akademische Lehre / Personaltransfer</b>	Während der Laufzeit
<p>An der Bearbeitung der Aufgabenstellung waren Studierende als Hilfskräfte beteiligt. Das erarbeitete Wissen konnten die Studierende später als junge Ingenieure in die betriebliche Praxis übernehmen. Die erarbeiteten Erkenntnisse flossen zusätzlich in Lehrveranstaltungen, wie</p>	

beispielsweise die Vorlesung und Übung „Kunststoffverarbeitung II“ und „Werkzeuge in der Kunststoffverarbeitung II“ ein und wurden auch auf diesem Wege Bestandteil der wissenschaftlichen Ausbildung junger Ingenieure.

Zusätzlich wurden Bachelor- und Masterarbeiten zu dem Themenkomplex angeboten.

Am 26.03.2021 wurde eine Masterarbeit, in der Teilaspekte des Forschungsvorhabens untersucht wurden, von Herrn M. Amberg am IKV abgeschlossen.

<b>Beratung von Unternehmen/ Workshop</b>	Während der Laufzeit
---	----------------------

Das im Rahmen dieses Vorhabens erarbeitete Wissen floss in die Beratungstätigkeiten des IKV ein.

Die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Erkenntnisse zur Bewertung von Bindenähten in der Extrusion konnten zur Beratung bei der Werkzeugauslegung herangezogen werden. Ebenfalls konnten die neuen Erkenntnisse in die Beratung zur Prozessführungs- und Störungsanalyse sowie Strömungssimulationen integriert werden.

## 9.2 Nach der Laufzeit geplante Transfermaßnahmen

<b>Wissenschaftliche Publikationen</b>	Q3 2021
Eine Abschlussveröffentlichung in der Zeitschrift „EXTRUSION“ (VM Verlag GmbH) ist in Arbeit, damit sollen sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientierte Leserkreise berücksichtigt werden.	
<b>Beratung von Unternehmen</b>	Nach Abschluss
Das im Rahmen dieses Vorhabens erarbeitete Wissen wird weiterhin in den Beratungstätigkeiten des IKV berücksichtigt.  Die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Erkenntnisse zum Einfluss neuartiger Stegdesigns auf die mechanischen Rohrfestigkeiten werden weiterhin mit Werkzeugbauern und Simulationssoftwareunternehmen diskutiert und ggf. weiterentwickelt. Ebenfalls können die gewonnenen Erkenntnisse in die Beratung zur Prozessführungs- und Störungsanalyse integriert werden.	
<b>Akademische Lehre / Personaltransfer</b>	Nach Abschluss
Die erarbeiteten Erkenntnisse fließen weiterhin in Lehrveranstaltungen, wie beispielsweise die Vorlesung und Übung „Kunststoffverarbeitung II“ und „Werkzeuge in der Kunststoffverarbeitung II“ ein und werden auch weiterhin auf diesem Wege Bestandteil der wissenschaftlichen Ausbildung junger Ingenieure.	
<b>Forschungsbericht</b>	1. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens
Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden in einem detaillierten und ausführlichen Forschungsbericht dokumentiert. Dieser Forschungsbericht wird interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt. Somit kann das erarbeitete Vorgehen und die gewonnenen Erkenntnisse von den Firmen in die betriebliche Praxis transferiert werden.	
<b>Dissertation</b>	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
Basierend auf den Ergebnissen ist eine Dissertation zum Thema Werkzeugauslegung in der Extrusion geplant.	
<b>Anschlussprojekte</b>	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
Es wird geprüft, ob mit einem Unternehmen ein ZIM-Projekt durchgeführt werden kann (Ansprache von mind. 5 Unternehmen).	

## **10 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN**

Ziel des Forschungsvorhabens war die Reduzierung von Bindenahteffekten bei der Rohrextrusion unter Einsatz von Dornhalterwerkzeugen. Bindenähte stellen mechanische und optische Schwachstellen im Extrudat dar. Daher wurden zunächst neuartige Stege konzipiert, die in ihrem Design an statische Mischelemente angelehnt sind und Strömungsumlagerungen erzeugen. Die Strömungsumlagerungen sollten eine strukturmechanisch günstigere Ausprägung der Bindenähte erzielen. Mit Hilfe von Computational Fluid Dynamics Simulationen (CFD-Simulationen) wurden die Stege hinsichtlich der resultierenden Bindenahtausprägung, Druckverluste, thermischen Homogenität und Verweilzeit bewertet. Die simulative Modellierung mit der Software OpenFOAM erlaubte Einsichten in die inneren Abläufe und Zustände des Dornhalterwerkzeugs, die in praktischen Versuchen so nicht zu erzielen waren. Die praktischen Versuche waren notwendig, um die Simulationsergebnisse sowie die Anwendbarkeit auf den industrierelevanten Prozess zu bewerten. Ohne weiterführende mikroskopische und mechanische Prüfungen der hergestellten Rohrproben wäre eine Bewertung der tatsächlichen Bindenahtausprägung nicht möglich gewesen. Es konnten Erkenntnisse gewonnen werden, die zukünftige Werkzeugauslegungen und die Prozessführung verbessern können. Eine Übertragung auf andere Anwendungsgebiete der Kunststofftechnik ist in jedem Fall möglich.

Der Umfang der geleisteten Arbeiten entspricht dem begutachteten und bewilligten Antrag und war angemessen und notwendig. Aufgrund von Verzögerungen in Arbeitspaket 3, wurden die Arbeitspakete 3 und 4 entgegen des Zeitplans zeitweise parallelisiert.

## **11 EINSCHÄTZUNG DER REALISIERBARKEIT DES VORGESCHLAGENEN UND AKTUALISIERTEN TRANSFERKONZEPTS**

Während der drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses, der Vorstellung der Ergebnisse auf Messen und Konferenzen (z. B. Fachbeiratsgruppensitzung des IKV, K-Messe 2019, IKV-Kunststoffkolloquium) und im direkten Kontakt mit Fachpersonal aus der Industrie war es möglich, den Projektfortschritt und die Projektergebnisse kontinuierlich zu verbreiten. Vertretern interessierter Industrieunternehmen konnten die Inhalte dadurch kommuniziert, sodass eine Diskussion möglich war. Durch Hinweise in der Fachpresse und eine (populär)-wissenschaftliche Veröffentlichung in der Fachzeitschrift „Extrusion“ konnte darüber hinaus ein breites Fachpublikum angesprochen werden. Da die Ergebnisse als Teil der Lehre, aber auch als Basis für studentische Arbeiten und Inhalt von studentischen Hilfstätigkeiten Ausbildung angehender Ingenieure eingeflossen sind, wurde Studierenden ein breites Wissen über die additive Fertigung mittels SLM sowie die numerische Auslegung von Fließkanälen zuteil.

Dank des breit aufgestellten Konzepts zum Wissenstransfer in die Praxis konnte somit das Ziel erreicht werden, die erarbeiteten Erkenntnisse einem breiten industriellen Nutzerkreis vorzustellen und als Grundlage für Weiterentwicklungsarbeiten in der betrieblichen Praxis verfügbar zu machen. Durch die oben benannten weiteren Transfermaßnahmen wird sichergestellt, dass auch nach Beendigung des Forschungsvorhabens die neuen Erkenntnisse der Industrie und der Wissenschaft verfügbar gemacht werden.

## **12 EINSATZ VON GERÄTEN UND WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEM PERSONAL**

Für die praktische Erprobung neuartiger Stegdesigns war in diesem Vorhaben ein geeignetes modular aufgebautes Dornhalterwerkzeug mit austauschbarem Stegbereich erforderlich. Hier wurde ein entsprechendes Werkzeug der Firma G&G Extrusionstechnik GmbH, Schwerin, beschafft. Zudem war die Fertigung der neuen Steggeometrien, die praktisch erprobt werden sollten, unumgänglich. Es wurden insgesamt fünf Stegdesigns mittels Selektivem Laser Melting bei der Firma Elkamet Kunststofftechnik GmbH, Biedenkopf, hergestellt. Die Stegdesigns wurden so konstruiert, dass sie mit dem modularen Dornhalterwerkzeug kompatibel sind.

Der zur Durchführung des Forschungsprojekts eingesetzte wissenschaftliche Mitarbeiter war für 24 Personenmonate erforderlich, um die um die wissenschaftlichen Fragestellungen zu erarbeiten, die Randbedingungen der Simulation festzulegen, um das Forschungsthema mit Vertretern aus der industriellen Praxis zu besprechen sowie um die im Laufe des Projekts durchgeführte studentische Arbeit zu betreuen. Für die Konstruktion der Versuchsstände, das Rüsten und Bedienen der Extrusionsanlagen, die Dokumentation der Versuchsergebnisse und die Durchführung der simulativen Untersuchungen war die Unterstützung durch studentische Hilfswissenschaftler für 48 Personenmonate notwendig.

## 13 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

Abkürzung	Bedeutung
CFD	Computational Fluid Dynamics
HKR	Hochdruckkapillarrheometer
ILT	Institut für Lasertechnik
ISG	Interfacial Surface Generatur
LPD	Low Pressure Drop
LLPD	Low Low Pressure Drop
SLM	Selectives Laser Melting
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PP	Polypropylen
PVC	Polyvnylchlorid

### 13.1 Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche
B	[m*s]	Bewertungskennzahl Bindenaht
C	[-]	Steigung im Strukturviskosen Bereich
D	[mm]	Durchmesser
e	[-]	Formfaktor Temperaturhomogenität
e	[m]	Wandstärke
F	[-]	Kraft
L	[mm]	Länge
p	[bar]	Druck
Q	[-]	Bewertungskennzahl Querströmung
S	[kN/m <sup>2</sup> ]	Ringsteifigkeit
t	[s]	Verweilzeit
T	[-]	Bewertungskennzahl Schererwärmung
T <sub>S</sub>	[K]	Standardtemperatur
w	[m/s]	Geschwindigkeit
y	[mm]	Verformung von 3,0 %
α <sub>T</sub>	[-]	Temperaturverschiebungsfaktor
γ̇	[s <sup>-1</sup> ]	Schergeschwindigkeit
σ	[-]	Kennzahl Temperaturhomogenität

$\eta$	[Pas]	Viskosität
$u$	[ °C]	Temperatur

### 13.2 Indizes

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
a	Probe a
i	Zählvariable
inlet	Am Einlass
konventionell	Größe des konventionellen Stegdornhalters
m	Mittlere
$\Delta p$	Druckverlust
outlet	Werkzeugaustritt
Querströmungen	Die Querströmungen betreffend
Stegdesign	Bezogen auf das Stegdesign
thermal	Die Temperatur betreffend
T	Temperatur
v	Vergleich
Verweilzeit	Die Verweilzeit betreffend
x	In x-Richtung
y	In y-Richtung
z	In z-Richtung

## 14 LITERATUR

- [BHS13] BERGER, U.; HARTMANN, A.; DIETMAR, S.: *Additive Fertigungsverfahren*. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2013
- [BW04] BURMANN, G.; WORTBERG, J.: Grundlagen und Strategien für die Auslegung von Extrusionswerkzeugen. *IKV-Seminar Auslegung von Schnecken und Werkzeugen in der Extrusion*. Aachen, 2004
- [Cat71] CATON, J. A.: Extrusion die design for blown film production. *Br. Plast* (1971) 4, S. 140-147
- [GAPM03] GALAKTIONOV, O.S; ANDERSON , P.D.; PETERS, G.W.M.; MEIJER , H. E. H.: Optimization of Kenics static mixers. *International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society*, (2013), S. 138
- [Gro15] GROß, H.: Neuartige Mischdüsen vermindern Schmelzeinhomogenitäten. *Extrusion* 21 (2015) 6, S. 36-37
- [HM16] HOPMANN, CH.; MICHAELI, W.: *Extrusion Dies for Plastics and Rubber - Design and Engineering Computations*. München, Carl Hanser Verlag, 2016
- [HP19] HOPMANN, CH.; POPRAWA, R.: Simulative Optimierung und generative Fertigung von statischen Mischern für die Extrusion von Kunststoffen, Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen, Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 18712 N, 2019
- [HP98] HUANG, Y.; PRENTICE, P.: Experimental study and computer simulation of the effect of spider shape on the weld-lines in extruded plastic pipe. *Polymer Engineering & Science* 38 (1998), S. 1506-1522.
- [HST+19] HOPMANN, C.; SCHÖN, M.; THEUNISSEN, M.; MEINERS, W.; SHEN, L.: Simulative evaluation of the optimization potential of additively manufactured static mixing elements for extrusion. *AIP Conference Proceedings* 2139 (2019), S. 020004-1-5
- [HY15] HOPMANN, CH.; YESILDAG, N.: Integrative Simulation des Temperatureinflusses in Vorverteiltern von Wendelverteilerwerkzeugen, Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen University, Schlussbericht zum IGF-Vorhaben 17645N, 2015
- [HYB+15] HOPMANN, CH.; YESILDAG, N.; BREMEN, S.; WISSENBACH, K.; MERKT, S.: Surface quality of profile extrusion dies manufactured by Selective Laser Melting. *RT eJournal - Forum für Rapid Technologie* 12 (2015)
- [KD12] KOLMETZ, K.; DWIJAYANTI, A.: Static Mixer Selection, Sizing and Troubleshooting, *Kolmetz Handbook Of Process Equipment Design*, 2012
- [Kle73] KLEINDIENST, U.: Fließmarkierungen durch Dornhalterstege beim Extrudieren von Kunststoffen. *Kunststoffe* 63 (1973) 7, S. 423-427
- [Kra03] KRAUME, M.: *Mischen und Rühren: Grundlagen und moderne Verfahren*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2003
- [Küm07] KÜMMEL, W.: *Technische Strömungsmechanik- Theorie und Praxis*. Wiesbaden: B.G. Teubner, 2007
- [Lim13] LIMPER, A.: *Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2013
- [Man09] MANAS-ZLOCZOWER, I.: *Mixing and compounding of polymers – Theory and Practice*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2009

- [Mei99] MEINERS, W.: *Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe*. RWTH Aachen, Dissertation, 1999 - ISBN: 3-8265-6571-1
- [MSA12] MEIJER, H. E.; SINGH, M. K.; ANDERSON, P. D.: On the performance of static mixers: A quantitative comparison. *Progress in Polymer Science* 37 (2012) 10, S. 1333–1349.
- [NN05] N.N.: *EP 133 8401: Extrusionsvorrichtung für Rohre wobei die Stegprofile der Dornhalter modifiziert sind*. Patentschrift, Europäisches Patentamt, 28.12.2005
- [NN09] N.N.: *Der neue statische Mischer – Perfektes Mischen bei minimalen Druckverlust*. Broschüre, Sulzer Chemtech GmbH, 2006
- [NN16] N.N.: *DIN EN ISO 9969: Thermoplastische Rohre - Bestimmung der Ringsteifigkeit*, Berlin: Beuth Verlag, 2016
- [NN19a] N.N.: *Konstruktionsempfehlungen für das selektive Laserschmelzen*. Protiq GmbH, 06.02.2021
- [NN19b] N.N.: *Konstruktionsempfehlungen für die additive Fertigung*. Protiq GmbH, 06.02.2021
- [NN20a] N.N.: *SABIC PP 531PH, PP HOMOPOLYMER*. Datenblatt, Sabic, Riad, 2020
- [NN20b] N.N.: *SABIC PE-HD Vestolen A 6060*. Datenblatt, Sabic, Riad, 2020
- [NN20c] N.N.: *Materialdatenblatt\_Laserschmelzen-DE*. Datenblatt, Protiq GmbH, 06.02.2021
- [NN20d] N.N.: *DIN EN ISO/CIE 11664-4: 2020-03, Farbmeterik\_- Teil\_4: CIE\_1976 L\*a\*b\* Farbraum (ISO/CIE\_11664-4:2019); Deutsche Fassung EN\_ISO/CIE\_11664-4:2019*, Beuth Verlag GmbH, Berlin:
- [NN20e] N.N.: *DIN EN ISO 1402: Gummi- und Kunststoffschläuche und Schlauchleitungen – Hydrostatische Prüfung*, Berlin: Beuth Verlag, 2020
- [NN20f] N.N.: *DIN 2413: Nahtlose Stahlrohre für öl- und wasserhydraulische Anlagen – Berechnungsgrundlage für Rohre und Rohrbögen bei schwellender Beanspruchung*, Berlin: Beuth Verlag, 2020
- [PM79] PAHL, M. H.; MUSCHELKNAUTZ, E.: Einsatz und Auslegung statischer Mischer. *Chemie Ingenieur Technik* 51 (1979) 5, S. 347–364.
- [PM11] POPRAWA, R.; MUSCHELKNAUTZ, E.: *Tailored Light 2*. Berlin: Springer Verlag, 2011, S. 257-259
- [THG06] THIELEN, M.; HARTWIG, K.; GUST, P.: *Blasformen von Kunststoff-Hohlkörpern*. München: Carl Hanser Verlag, 2006
- [URL21a] N.N.: *Mesh generation with the snappyHexMesh utility*. URL: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v6-snappyhexmesh/>, 25.05.21
- [URL21b] N.N.: *Ringsteifigkeitsprüfungen an Kunststoffrohren*. URL: <https://www.hegewald-peschke.de/produkte/universalpruefmaschinen/sonderpruefmaschinen/product-detail/pruefung-von-kunststoffrohren.html>, 25.05.2021
- [URL21c] N.N.: *Zeitstandverhalten unter Innendruck*. URL: <https://www.krv.de/wissen/zeitstandverhalten-unter-innendruck>, 25.05.2021
- [Sch12] SCHLEIFENBAUM, J.H.: *Verfahren und Maschine zur individualisierten Produktion mit High Power Selective Laser Melting*. RWTH Aachen, Dissertation, 2012 - ISBN: 978-3-8440-0689-6
- [Sch13] SCHWARZE, R.: *CFD-Modellierung- Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013

- 
- [WM98] WOLFF, T.; MICHALI, W.: Modeling of the Thermal Homogenising Effect of Cross-Hole Mixing Element for Single Stage Extrusion, *SOCIETY OF PLASTICS ENGINEERS INC*, 1998
- [Wor98] WORTBERG, J.: Neue Wendelverteiler-Werkzeuge. *Kunststoffe* 88 (1998) 2, S. 175–180.
- [Yes17] YESILDAG, N.: *Simulative Auslegung von thermisch-rheologisch homogenen Vorverteilern in Wendelverteilerwerkzeugen*. RWTH Aachen, Dissertation, 2017 - ISBN: 9783958861718

## 15 ANHANG

### 15.1 Kurzzusammenfassung der durchgeführten Masterarbeit (M. Amberg)

Deskriptoren: Dornhalter, Druckverlust, Mischen, Bindenaht, Simulation

Schlagworte: Dornhalterwerkzeug, Bindenahtreduktion, Strömungssimulation

Zur Extrusion von Kabelummantelungen, Rohren und anderen kreisringförmigen Halbzeugen wird unter anderem das Dornhalterwerkzeug genutzt. Die Schmelzeausformung erfolgt in diesem Werkzeug durch einen Dorn, welcher durch Stege im Werkzeugzentrum fixiert ist. Beim Umströmen der Stege bilden sich durch die Wandhaftung der Schmelze orientierte Bereiche aus, welche beim Zusammenfließen erhalten bleiben und als Bindenähte bezeichnet werden. Die Bindenähte verlaufen radial entlang des produzierten Rohres und stellen eine mechanische und optische Schwachstelle dar. Alternative Werkzeugkonzepte zur Herstellung kreisringförmiger Halbzeuge vermeiden Bindenähte, verhalten sich im Gegensatz zum Dornhalterwerkzeug jedoch nicht betriebspunktunabhängig. Darüber hinaus erreichen Dornhalterwerkzeuge eine gute Schmelzeverteilung bei vergleichsweise einfacher Geometrie. Um diese Vorteile zu nutzen, muss der Nachteil des Bindenahteinflusses reduziert werden. Durch neuartige Steggeometrien soll der Bindenahteffekt verhindert oder vermindert werden. Dazu sind bereits erste Dornhaltergeometrien angelehnt an statische Mischer aus der Literatur bekannt. Statische Mischer sind ein erprobtes Konzept zur Durchmischung der Kunststoffschmelze. Sie sind fest zwischen Extruderschnecke und Werkzeug geschaltet. Es werden Dornhaltergeometrien nach dem Prinzip dreier verbreiteter statischer Mischer betrachtet: SMX, Kenics-Mischer und LPD-Mischer. Die dort bereits entwickelten Stegkonzepte werden nun hinsichtlich verschiedener geometrischer Merkmale, unter anderem die Steganzahl, der Winkel der Stege und der Anzahl der Ebenen von Stegen hintereinander variiert und mittels CFD-Simulation untersucht. Die zentralen Randbedingungen der Simulation sind eine laminare, inkompressible, stationäre Strömung mit Wandhaftung. Als Viskositätsmodell wurde das Carreau-Modell mit WLF-Verschiebung eingesetzt. Zur Bewertung der Simulationsergebnisse wird ein Bewertungsmodell entwickelt, welches beispielsweise die Bewertungskriterien Druckverlust und Querströmungen berücksichtigt. Es stellt sich heraus, dass vor allem die Geometrien angelehnt an den LPD-Mischer gute Ergebnisse zeigen. In einem nächsten Schritt werden ausgewählte Geometrien mittels selektivem Laserschmelzen hergestellt und in Rohrextrusionsversuchen praktisch erprobt. Die Simulationsergebnisse werden im Wesentlichen bestätigt. Einige Geometrien zeigen für die Farbwechselzeit ähnliche Ergebnisse wie die konventionelle Referenz, weisen aber einen höheren Druckverlust auf. Des Weiteren kann durch den Einsatz der neuartigen Dornhaltergeometrien eine Veränderung des Bindenahtverlaufs von einem radialen Verlauf

(konventioneller Stegdornhalter) zu einem tangentialen Verlauf (neuartige Steggeometrie) erzielt werden.

### 15.2 Technische Zeichnungen des Dornhalterwerkzeugs

