

# Verfahrensentwicklung für Hohlstrukturen im thermoplastbasierten Faserverbundeichtbau

Dissertation

zur Erlangung des

Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät II  
Chemie, Physik und Mathematik

der Martin-Luther-Universität,  
Halle-Wittenberg

vorgelegt

von Herrn Lukas Mathias Klink

geb. am 27.12.1988 in Weinheim

- |               |   |
|---------------|---|
| 1. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. René Androsch (Martin-Luther Universität Halle Wittenberg) |
| 2. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Michel (Fraunhofer IMWS Halle)                |
| 3. Gutachter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann (TU Ilmenau)             |

Tag der Verteidigung : 25.11.2021

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als Doktorand bei der Volkswagen AG in der Abteilung „Technologie Kunststoff“ in den Jahren 2016 bis 2020 entstanden. An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich auf dem Weg zur erfolgreichen Fertigstellung dieser Dissertation begleitet haben und dabei sowohl einen Beitrag zu meiner persönlichen als auch fachlichen Weiterentwicklung geleistet haben.

Als erstes gilt mein Dank meinen Doktorvätern Prof. Dr.-Ing. René Androsch und Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Michel für die kontinuierliche Unterstützung, die kritischen Anmerkungen, die hilfreichen Hinweise und den Freiraum bei der Erstellung der Dissertation. Weiterhin möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann für die Übernahme des Drittgutachtens bedanken sowie bei Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Hahn für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Auf Unternehmensseite möchte ich mich bei meiner Betreuerin Dr. rer. nat. Dipl.-Ing. Wiebke Sophie Junior und meinem Betreuer Dr.-Ing. Peter Helmke bedanken. Zum einen für das entgegengebrachte Vertrauen sowie die gewährten Freiheiten und zum anderen für die Unterstützung, ohne die diese Arbeit so nicht möglich gewesen wäre. Mein weiterer Dank gilt Dipl. Ing. (FH) Tobias Kahmann, Marcus Pusch und Hans-Jürgen Knosalla, die mich bei der Umsetzung der praktischen Versuche und Analysen unterstützt haben. Meiner Mitdoktorandin Kirsten Beuscher (M.A.) und meinen Mitdoktoranden Johannes Albers (M.Sc.), Jan Teuwsen (M.Sc.) und Jochen Westhäuser (M.Sc.) möchte ich für die anregenden und motivierenden Gespräche sowie das Korrekturlesen danken. In diesem Sinne danke ich auch allen Studenten, die mit mir als Praktikanten und Masteranden ein Stück auf dem Weg dieses Promotionsvorhabens gegangen sind.

Ein besonderer Dank gilt dem Volkswagen Doktorandenkolleg, das wirklich größer ist als die Summe seiner Teile. Ohne die dort kennengelernten Doktoranden wären die dreieinhalb Jahre nicht zu dieser tollen Zeit geworden, als die sie mir in Erinnerung bleiben wird.

Zu guter Letzt bedanken ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für das Verständnis und das Zurückstecken in den vergangenen Jahren. Besonders sind hier meine Eltern Heike und Mathias hervorzuheben. Sie haben mich während meiner gesamten Ausbildungszeit und darüber hinaus unermüdlich unterstützt und damit einen sehr großen Anteil am Erfolg dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich meiner Partnerin Linda danken, die ich während dieser intensiven Zeit kennengelernt habe. Mit ihrer Unterstützung und ihrem großen Verständnis hat sie mir stets den Rücken gestärkt und die Zuversicht gegeben, die ein erfolgreiches Promotionsvorhaben so dringend braucht.

Danke.

Braunschweig im Dezember 2021

Lukas M. Klink

## Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit langfaserverstärktem Polypropylen, welches mittels Gasinjektionstechnik im Fließpressprozess (GasComp-Prozess) und Spritzgussprozess (GAIM-Prozess) verarbeitet wurde. Hierbei wurden pultrudiertes sowie ummanteltes Langfasergranulat mit je 30 und 40 Gew.-% Glasfasern betrachtet. Bei der Gasinjektionstechnik werden das sogenannte Short-Shot- und das Nebenkavitätsverfahren eingesetzt.

Das übergeordnete Ziel der Arbeit war es die Leichtbaupotenziale von Bauteilen, die mit der Gasinjektionstechnik in Verbindung mit langfaserverstärktem Polypropylen gefertigt werden, zu ermitteln und Anwendungsbereiche zu identifizieren. Hierfür war es zunächst notwendig den GasComp-Prozess (Gas Assisted Compression Molding) weiterzuentwickeln und optimale Prozessparameter zu detektieren. Des Weiteren sollten die einzelnen Granulat-, Prozess- und Verfahrenskombinationen charakterisiert werden. Dafür wurden unter anderem die Festigkeit, die Faserorientierung und die Porosität bestimmt. Zum direkten Vergleich wurde ein Werkzeugkonzept entwickelt, welches Versuchsbauteile sowohl mit dem GasComp- als auch mit dem GAIM-Prozess (Gas Assisted Injection Molding) fertigen kann und beide Verfahrensvarianten der Gasinjektionstechnik abbildet. Da es bisher nicht erprobt war, wurde zunächst der Nachweis erbracht, dass im GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren reproduzierbare Ergebnisse erzeugt werden können. Darauf folgten sowohl ein Prozess- und Verfahrensvergleich als auch Versuchsreihen mit systematischer Variation des Gasdruckprofils. Die dabei gefertigten Bauteile wurden mechanisch u.a. mittels Drei-Punkt-Biegung charakterisiert. Die Analyse der Mikrostruktur erfolgte mittels Schnittbildern, Computertomographie, Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Faserlängenanalysen. Im Fokus standen dabei die Faserorientierung und die Porosität in der Grenzschicht von Polymer und Gasblase.

Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass Bauteile aus dem GAIM-Prozess eine homogenere Gasblasengestalt bei gleichmäßiger Oberflächenstruktur und stärker ausgeprägter Faserorientierung in Fließrichtung aufweisen, als Bauteile aus dem GasComp-Prozess. Zum anderen erzielt das Nebenkavitätsverfahren niedrigere Restwanddicke, niedrigere Porosität und stärker ausgeprägte Faserorientierung als das Short-Shot-Verfahren. Darüber hinaus nimmt mit steigendem Glasfasergehalt das Volumen der Gasblase ab. Das größte Leichtbaupotenzial (bezogen auf die Biegefestigkeit) der analysierten Versuchsbauteile zeigen die, die im GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren und pultrudiertem Material (30 Gew.-% GF) gefertigt werden. Im Vergleich zu einem spritzgegossenen Vollkörper werden bei normierter Betrachtung über 50 % des Gewichts eingespart und die Biegefestigkeit um fast 20 % gesteigert. Die Analyse der Grenzschicht von Polymer und Gasblase zeigt, dass ein niedriger maximaler Gasdruck ( $P_{\max} = 20-40$  bar) mit einer Gasdruckabbauzeit ( $T_{\text{ab}}$ ) größer 0,1 s eine geringe Porosität erzeugt. Die Gestalt der Poren wird durch die Faserorientierung beeinflusst, sodass Ellipsoide entstehen. Außerdem wurden in der Grenzschicht mittels REM Crazing und freie Kristallisation nachgewiesen.

Damit wurden nicht nur neue Erkenntnisse über die Porosität bei der Gasinjektionstechnik für langfaserverstärkte Polymere gewonnen, sondern auch die Leichtbaupotenziale der Bauteile aufgezeigt und mögliche Anwendungsbereiche wie Türen und Klappen identifiziert.

## Abstract

This thesis deals with long fiber reinforced polypropylene, which was processed by Gas Injection Technology (GIT) in the compression molding process (Gas Assisted Compression Molding (GasComp)) and the injection molding process (Gas Assisted Injection Molding (GAIM)). Here pultruded and coated long fiber granulate with 30 and 40 % by weight glass fibers each were considered. The short shot and the secondary cavity method are used at GIT.

The aim of the work was to further develop the GasComp process and, among other things, to detect the strength, the fiber orientation (FO) and the porosity of the individual granulate, process and method combinations and to show possible lightweight construction potential. For this purpose, a tool concept was developed which can produce test components with both the GasComp and the GAIM process and which maps both GIT process variants. Subsequently, evidence was provided that reproducible results can be generated in the GasComp process with secondary cavity method, which had not been tested before. This was followed by a process and procedure comparison as well as series of tests with systematic variation of the gas pressure profile. The components produced were mechanically, among other things characterized by a three-point bend. The analysis of the microstructural properties was carried out using sectional images, computer tomography, scanning electron microscopy (SEM) and fiber length analyse. The focus was on the FO and the porosity in the boundary layer between polymer and gas pocket.

On the one hand, the results showed that components from the GAIM process have a more homogeneous gas pocket shape with a uniform surface structure and more pronounced FO in the direction of flow than components from the GasComp process. On the other hand, the secondary cavity method achieved a lower residual wall thickness (RWT), lower porosity and more pronounced FO than the short shot method. In addition, the volume of the gas pocket decreased with increasing glass fiber content and pultruded material, in conjunction with the GAIM process, enabled up to 50 % lower RWT than coated granules. This showed that the GAIM process with NKV and pultruded material (30 % by weight GF) enables a homogeneous gas bubble shape with a low RWD. In addition, this combination shows the greatest potential for lightweight construction (based on flexural strength) of the test components analyzed. The analysis of the boundary layer of polymer and gas bubble showed that a low maximum gas pressure ( $P_{\max} = 20\text{-}40$  bar) with a gas pressure reduction time ( $T_{\text{ab}}$ ) greater than 0.1 s produced a low porosity. The shape of the pores was influenced by the FO, so that ellipsoids were created. In the structure of the boundary layer, the phenomena crazing and free crystallization were detected by means of SEM.

In this way, new knowledge about the porosity in gas injection technology for long fiber reinforced polymers was gained and the lightweight construction potential of the process was demonstrated.

## **Disclaimer**

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen Aktiengesellschaft.

# Inhaltsverzeichnis

|  |      |
|--|------|
| Danksagung .....   | II   |
| Zusammenfassung .....  | III  |
| Abstract .....   | IV   |
| Disclaimer.....  | V    |
| Inhaltsverzeichnis .....   | VI   |
| Abkürzungsverzeichnis .....  | VIII |
| 1    Einleitung .....  | 1    |
| 2    Motivation und Zielsetzung.....                                   | 2    |
| 3    Stand der Technik .....   | 4    |
| 3.1    Faser-Kunststoff-Verbunde.....                                  | 4    |
| 3.1.1    Matrixwerkstoff Polypropylen .....                            | 4    |
| 3.1.2    Verstärkungsfasern aus Glas.....                              | 5    |
| 3.1.3    Kunststoffgranulate.....                                      | 5    |
| 3.1.4    Verstärkungswirkung .....                                     | 6    |
| 3.1.5    Versagensformen von Faser-Kunststoff-Verbunden .....          | 10   |
| 3.1.6    Faserschädigungsmechanismen .....                             | 12   |
| 3.1.7    Zusammenfassung: Faser-Kunststoff-Verbunde.....               | 16   |
| 3.2    Gasinjektionstechnik.....                                       | 17   |
| 3.2.1    Fließpressen mit Gasinjektionstechnik / GasComp-Prozess ..... | 18   |
| 3.2.2    Spritzguss mit Gasinjektionstechnik / GAIM-Prozess.....       | 19   |
| 3.2.3    Verfahrensvarianten der Gasinjektionstechnik .....            | 20   |
| 3.2.4    Gasblasenausbildung .....                                     | 21   |
| 3.2.5    Aufschäumen von GIT-Formteilen .....                          | 26   |
| 3.2.6    Zusammenfassung: Gasinjektionstechnik.....                    | 29   |
| 4    Wissenschaftliche Fragestellungen und Lösungsansätze.....         | 30   |
| 5    Materialien und Methoden .....                                    | 32   |
| 5.1    Langfasergranulate.....   | 32   |
| 5.2    Versuchsanlagen.....  | 32   |
| 5.3    Werkzeugkonzept.....  | 33   |
| 5.4    Technologieträger.....  | 34   |
| 5.5    Verarbeitungsprozesse und Verfahrensvarianten .....             | 35   |
| 5.6    Mechanische Analysemethoden .....                               | 36   |
| 5.7    Leichtbaupotenzial.....   | 39   |
| 5.8    Mikrostrukturelle Analysemethoden .....                         | 40   |

|     |   |       |
|-----|---|-------|
| 5.9 | Zusammenfassung: Materialien und Methoden .....           | 43    |
| 6   | Machbarkeitsstudie – Definition des Prozessfensters ..... | 44    |
| 6.1 | GasComp-Prozess .....                                     | 44    |
| 6.2 | GAIM-Prozess .....  | 49    |
| 6.3 | Zusammenfassung der Machbarkeitsstudie.....               | 51    |
| 7   | Versuchsdurchführung .....                                | 52    |
| 7.1 | Prozess- und Verfahrensstudie.....                        | 52    |
| 7.2 | Materialstudien .....                                     | 52    |
| 7.3 | Parameterstudien zum Aufschäumen der Grenzschicht.....    | 53    |
| 7.4 | Zusammenfassung Versuchsdurchführung.....                 | 54    |
| 8   | Ergebnisse .....  | 55    |
| 8.1 | Hohlraumausformung .....                                  | 55    |
| 8.2 | Mechanische Analysen.....                                 | 59    |
| 8.3 | Strukturanalyse.....                                      | 64    |
| 9   | Interpretation und Diskussion der Ergebnisse .....        | 79    |
| 9.1 | Hohlraumausformung .....                                  | 79    |
| 9.2 | Mechanische Analysen.....                                 | 81    |
| 9.3 | Strukturanalyse.....                                      | 83    |
| 9.4 | Leichtbaupotenzial.....                                   | 100   |
| 10  | Fazit und Ausblick .....                                  | 103   |
| 11  | Abbildungsverzeichnis.....                                | IX    |
| 12  | Tabellenverzeichnis.....                                  | XVII  |
| 13  | Literaturverzeichnis .....                                | XVIII |
| 14  | Anhang.....   | XXV   |
|     | Erfindungs- und Patentanmeldungen.....                    |       |
|     | Publikationen / Konferenzbeiträge .....                   |       |
|     | Übersicht betreuter Abschlussarbeiten .....               |       |
|     | Lebenslauf .....  |       |
|     | Eigenständigkeitserklärung.....                           |       |

## Abkürzungsverzeichnis

|         |  |
|---------|--|
| D-LFT   | Direktverarbeiteter Langfaserthermoplast |
| FKV     | Faser-Kunststoff-Verbund                 |
| FLP     | Fließpressprozess                        |
| GAIM    | Gas Assisted Injection Molding           |
| GasComp | Gas Assisted Compression Molding         |
| GIT     | Gasinjektionstechnik                     |
| GF      | Glasfaser                                |
| GMT     | Glasmattenverstärkte Thermoplaste        |
| $l_c$   | Kritische Faserlänge                     |
| KGF     | Kurzglasfaser                            |
| LGF     | Langglasfaser                            |
| PP      | Polypropylen                             |
| PS      | Polystyrol                               |
| SG      | Spritzgussprozess                        |

# 1 Einleitung

Die gesetzlichen Vorgaben zu den CO<sub>2</sub>-Grenzwerten bei PKW sind seit Jahren eine Triebfeder für Innovationen in der Fahrzeugentwicklung. Hierbei steht die Automobilindustrie im Spannungsfeld steigender Komfort- und Sicherheitsansprüche und den damit einhergehenden steigenden Fahrzeuggewichten, aus denen ein höherer CO<sub>2</sub>-Ausstoß resultiert (Friedrich 2017). Bis zum Jahr 2030 muss der durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß einer PKW-Herstellerflotte von 95 g/km im Jahr 2020 auf unter 60 g/km sinken (EU-Verordnung 2019/631). Ferner wird das Ziel verfolgt, den gesamten Carbon-Footprint eines Fahrzeugs über den Produktentstehungs- und Lebenszyklus zu minimieren. Um dieses Ziel zu erreichen, haben sich zwei Strategien etabliert, bei denen der Leichtbau eine entscheidende Rolle spielt.

Im Bereich der konventionellen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren gibt es mehrere Stell-schrauben, um den Kraftstoffverbrauch und damit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren. Neben der Minderung des Luftwiderstands bietet die Reduzierung der gewichtsabhängigen Roll-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstände weitere Möglichkeiten (Siebenpfeiffer 2014). Hierbei kommt der Gewichtseinsparung eine tragende Rolle zu. Dieses Potenzial wurde in der Vergangenheit teilweise genutzt, jedoch häufig aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Gänze ausgeschöpft. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ergibt sich je nach Kraftstoff (Diesel oder Benzin) und Prüfzyklus (NEFZ oder WLTP) bei einer Gewichtseinsparung von 100 kg eine Kraftstoffeinsparung von 0,3 bis 0,4 l pro 100 km (Siebenpfeiffer 2014). Dies entspricht einer CO<sub>2</sub>-Reduzierung von 8,3 g/km bei Benzin bzw. 9,3 g/km bei Diesel (DEKRA).

Um die zukünftigen Flottenziele zu erreichen, entwickeln nahezu alle Automobilhersteller batterieelektrische Fahrzeuge (BEV). Diese Fahrzeuge werden aktuell in die Berechnung der Flottenbilanz mit einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 0 g/km miteinbezogen, wodurch ein entscheidender Beitrag zum Erreichen der Flottenziele geleistet wird. Aber auch hier können durch Leichtbau Ressourcen geschont und die Reichweiten erhöht bzw. die notwendigen Batteriekapazitäten verringert werden. Speziell im urbanen Umfeld, welches das Haupteinsatzgebiet für BEV darstellen wird, können hierdurch Potenziale genutzt werden. Der Zusammenhang ist der gleiche wie bei konventionellen Fahrzeugen. Je weniger Masse beschleunigt werden muss, desto geringer sind die entstehenden Energieverluste. Bei einer Gewichtseinsparung von 100 kg kann bei gleicher Reichweite die Batteriekapazität um 4 % reduziert werden. Somit kann ein kleineres und damit leichteres Batteriesystem eingesetzt werden, wodurch der Effekt weiterverstärkt wird. Zudem kommt es in Folge der niedrigeren Batteriekapazität zu niedrigeren Herstellkosten, da weniger Ressourcen zur Herstellung der Batterie eingesetzt werden müssen. Schließlich wird auch die Ladezeit verkürzt (Hohmann, Hillebrecht, Schäfer 2018).

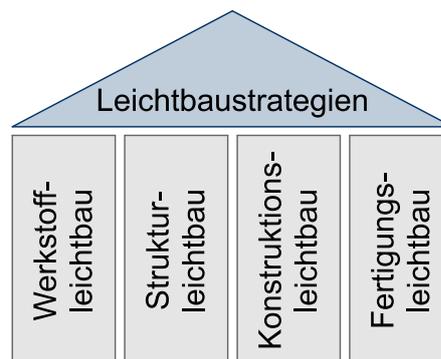
Des Weiteren besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Fahrdynamik und Leistungsgewicht eines Fahrzeugs (Trossbach, Borngräber, Ihlenfeldt 2014). Das Leistungsgewicht beschreibt das Verhältnis von Leistung zu Masse eines Fahrzeugs, wobei sich bei gleichbleibender Leistung eine geringere Fahrzeugmasse positiv auf die Fahrdynamik auswirkt (Maus 2019).

Dies alles sind Gründe dafür, den wirtschaftlichen und großserientauglichen Leichtbau weiterzuentwickeln, wobei die Faser-Verbund-Kunststoffe und deren Verarbeitungsverfahren eine

Schlüsselrolle einnehmen können. Speziell die Werkstoffkombination aus Polypropylen und Langglasfasern, weist bei einer niedrigen Dichte eine hohe Festigkeit auf und bieten hier großes Potenzial. Bei den Verarbeitungsverfahren rücken Sonderverfahren, wie beispielsweise das Spritzgießen mit Gasinjektionstechnik, in den Fokus. Diese ermöglichen es ressourcenschonend Leichtbaustrukturen zu fertigen und zu Material- und Strukturleichtbau zu kombinieren. Hierdurch werden perspektivisch Kunststoff-Metall-Hybride ersetzt werden können, so dass neben dem Leichtbauaspekt auch dem Gesichtspunkt der besseren Recyclingfähigkeit Rechnung getragen wird. Ein maßgeblicher auch energetischer Recyclingvorteil ist es keine aufwendige stoffliche Trennung vornehmen zu müssen (Domininghaus u. a. 2012; Johannaer, Michaeli 2004; Bürkle, Wobbe 2016; Michel 02.11.2016).

## 2 Motivation und Zielsetzung

Durch den Wandel zur Elektromobilität und der sich daraus ergebenden neuen Fahrzeugstruktur, bietet sich die Chance neue Leichtbaukonzepte von Anfang an zu integrieren. Durch die Kombination unterschiedlicher Leichtbaustrategien im Systemleichtbau, wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, der häufig eine Funktionsintegration beinhaltet (Nationale Plattform Elektromobilität Mai 2018). Abbildung 1 zeigt unterschiedliche Leichtbauansätze, die gemeinsam eine Leichtbaustrategie ergeben.



**Abbildung 1** Übersicht vier unterschiedlicher *Leichtbauansätze*, die gemeinsam eine *Leichtbaustrategie* ergeben.

Der Strukturleichtbau verbessert den Widerstand eines Bauteils bei werkstofflichen Anstrengungen gegen Biegung und Torsion. Dabei können bionische oder Leichtbau-Fachwerkstrukturen, sogenannte Isogrid-Strukturen, adaptiert werden (Wiedemann 2007; Klein, Gänsicke 2019). Beim Konstruktionsleichtbau wird der Fokus auf das gesamte Produkt gelegt. Dabei kann durch gezielte Funktionsintegration der Gesamtumfang einer Baugruppe reduziert werden, wodurch häufig eine Gewichtsreduktion realisiert werden kann. Ein Beispiel für den Werkstoffleichtbau ist die Substitution von Aluminium durch FKV, dieser Ansatz wird häufig in der Luftfahrtindustrie und zunehmend auch in der Automobilindustrie angewendet. Dabei weist der FKV eine höhere dichtebezogene Performance als das Aluminium auf (Henning, Moeller 2011).

Die vierte Säule des Leichtbaus ist der Fertigungsleichtbau. Hierbei werden häufig Sonderverfahren wie die Gasinjektionstechnik eingesetzt, die gegenüber Standardfertigungsverfahren

wie dem konventionellen Spritzguss- oder dem Fließpressprozess Vorteile bieten. Dabei werden durch eine gesteigerte Prozesskontrolle geringere Bauteiltoleranzen ermöglicht, wodurch der Konstruktionsleichtbau bei der Bauteilauslegung unterstützt wird.

Die Motivation hinter dieser Promotion besteht darin, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem geschlossene dünnwandige Profile gefertigt werden können, die höhere mechanische Bauteileigenschaften ermöglichen. Hierzu wird mittels Gasinjektionstechnik ein LFT-Material zu Hohlstrukturen ausgeformt mit dem Ziel Hohlraumausformung und Mikrostruktur durch angepasste Fertigungsparameter zu optimieren. Material- und Strukturleichtbau sollen mit einem hybriden Fertigungsverfahren so vereint werden, dass der Systemleichtbau ermöglicht wird. Durch die Kombination von Fließpressen und Gasinjektionstechnik, im sogenannten Gas-Comp-Prozess (Gas Assisted Compression Moulding) werden stabförmige Hohlstrukturen aus GFK gefertigt, deren Länge/Durchmesser-Verhältnis groß und deren Wandstärke möglichst gering ist. Auf diese Weise sollen hohe gewichtsspezifische Steifigkeiten und Festigkeiten erreicht werden.

Aufbauend auf den Literaturergebnissen (Brzeski 2009-07; Brzeski 2011; Goodship u. a. 2014) werden die Verfahrensvarianten Short-Shot und Nebenkavitätsverfahren weiterentwickelt und verglichen. Die gefertigten Versuchsbauteile werden im Hinblick auf ihre Mikrostruktur und ihre daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften untersucht. Zur Mikrostrukturanalyse werden Computertomographiescans hinsichtlich der Faserorientierung und der Porosität betrachtet und die Faserlängen analysiert, zudem wird die Grenzfläche von Gasblase und Polymer phänomenologisch betrachtet. Die Ermittlung mechanischer Kennwerte erfolgt mittels Biege- und Torsionsprüfung. Hierbei wird neben dem Einfluss der verschiedenen Prozess- und Verfahrensparameter auch der Einfluss unterschiedlicher Granulattypen und Fasergewichtsanteile untersucht. Ferner wird ein Vergleich zwischen der Standard-GIT und dem GasComp-Verfahren durchgeführt, da sich die Schergeschwindigkeiten im Polymer in Abhängigkeit der beiden Prozesse deutlich unterscheiden.

### 3 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen erläutert und der aktuelle Forschungsstand in den dafür relevanten Forschungsgebieten vorgestellt. Zunächst wird die Werkstoffgruppe der Faser-Kunststoff-Verbunde beschrieben. Anschließend wird die Gasinjektionstechnik vorgestellt, bevor auf die prozessspezifischen Besonderheiten von GAIM- und GasComp-Prozess eingegangen wird.

#### 3.1 Faser-Kunststoff-Verbunde

Verbundwerkstoffe sind Werkstoffe, bei denen mindestens zwei Komponenten miteinander kombiniert werden, die nicht ineinander lösbar sind (Henning, Moeller 2011). Zu den Verbundkunststoffen (engl. Composites), gehören auch die Faserverbundkunststoffe, die aus einer mit Fasern verstärkten Polymermatrix bestehen. Durch die Kombination der positiven Eigenschaften der jeweiligen Komponente, i.d.R. Verstärkungsfasern und Matrix, können die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffs verbessert und für den Anwendungsfall optimal abgestimmt werden (Domininghaus u. a. 2012; Henning, Moeller 2011; Witten 2014).

Die Matrix bettet die Fasern ein und hat die Aufgabe, die Lasten in die Fasern einzuleiten und zwischen den Fasern zu übertragen. Darüber hinaus stellt sie die äußere Gestalt des Bauteils sicher, gewährleistet die geometrische Lage der Fasern im Bauteil und schützt die Fasern vor äußeren Einflüssen (Henning, Moeller 2011). Neben den mechanischen Eigenschaften und der Dichte beeinflusst die Matrix sowohl das Kriech- und Relaxationsverhalten als auch das Brandverhalten des Verbundwerkstoffs. Daher ist die Auswahl des Matrixwerkstoffs genauso entscheidend für optimale Bauteileigenschaften wie die Auswahl der Fasern (Schürmann 2007).

Die Verstärkungsfasern (z. B. Glasfasern) weisen eine höhere Steifigkeit und Festigkeit als die Matrix auf. Neben der Erhöhung der mechanischen Kennwerte, können durch Verstärkungsfasern auch das Kriechverhalten, die Wärmeformbeständigkeit und die Verschleißfestigkeit von Verbundwerkstoffen verbessert werden. Somit werden die mechanischen und technischen Eigenschaften im Wesentlichen durch die Verstärkungsfasern bestimmt (Witten 2014; Henning, Moeller 2011; Neitzel, Mitschang, Breuer 2014).

##### 3.1.1 Matrixwerkstoff Polypropylen

Polypropylen ist der in der Automobilindustrie am häufigsten eingesetzte thermoplastische Werkstoff. Er weist einen großen Verarbeitungsbereich und gutes Recyclingpotenzial auf. Durch seine unvernetzte Struktur kann Polypropylen aufgeschmolzen und regeneriert werden (Neitzel, Mitschang, Breuer 2014). Polypropylen zeigt eine gute Chemikalienbeständigkeit, hat ein im Vergleich zu Duomer-Matrixsystemen zäheres Bruchverhalten und verfügt über einen hohen Delaminationswiderstand (Neitzel, Mitschang, Breuer 2014; Roos 2017; Schürmann 2007). Polypropylen zählt zu den teilkristallinen Thermoplasten und wird durch die Polymerisation von Propen gewonnen. Neben den genannten Vorteilen hat Polypropylen auch Nachteile im Vergleich zu Duomer-Matrixsystemen. Sein Elastizitätsmodul und seine Festigkeit sind niedriger und es weist eine höhere Verarbeitungsviskosität auf als Duomere. Dies führt

unter anderem zu Herausforderungen bei der Faserbenetzung (Ehrenstein 2006; Neitzel, Mitschang, Breuer 2014; Henning, Moeller 2011).

### 3.1.2 Verstärkungsfasern aus Glas

Glasfasern sind anorganische, synthetisch hergestellte Verstärkungsfasern, die aus einer Schmelze verschiedener Oxide als Netzwerkbildner und Netzwerkwandler entstehen (Neitzel, Mitschang, Breuer 2014). Der Begriff Textilglasfaser bezeichnet Glasfasern, die aus geschmolzenem Glas gesponnen werden und durch einen Rundquerschnitt und einen Nenndurchmesser von 5 bis 25  $\mu\text{m}$  gekennzeichnet sind. Durch die Variation der Abzugsgeschwindigkeit beim Spinnen kann der Durchmesser der Fasern eingestellt werden (Neitzel, Mitschang, Breuer 2014). Während des Herstellungsprozesses werden die Fasern mit einer Schlichte versehen, die aus Filmbildnern, einem Haftvermittler auf Silanbasis, Gleitmittel und Antistatika besteht. Die Schlichte und im Besonderen der Haftvermittler werden auf den Matrixwerkstoff angepasst, sodass eine optimale Faser-Matrix-Haftung ermöglicht wird. Darüber hinaus schützt die Schlichte die empfindliche Faser während des Verarbeitungsprozesses (Ehrenstein 2006; Henning, Moeller 2011; Neitzel, Mitschang, Breuer 2014).

Die hohen Zugfestigkeitswerte (2,4 GPa bei E-Glasfasern) und der hohe Zug-E-Modul (73 GPa bei E-Glasfasern) der Glasfasern sind auf die starken kovalenten Bindungen zwischen Silizium und Sauerstoff zurückzuführen (Henning, Moeller 2011; Schürmann 2007; Ehrenstein 2006). Zudem zeichnet die Glasfaser eine Bruchdehnung unterhalb von 5 % aus. Hierbei zeigen die Fasern ein nahezu linear-elastisches Verhalten (Ehrenstein 2011). Aufgrund ihrer amorphen Struktur sind Glasfasern isotrop, sodass die mechanischen Eigenschaften in Faserrichtung und quer dazu identisch sind (Ehrenstein 2006; Henning, Moeller 2011). Darüber hinaus weisen Glasfasern eine geringe Kriechneigung und Feuchtigkeitsaufnahme auf, sind unbrennbar, verfügen über einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und weisen bei Dauerbeanspruchungen bis 250 °C gleichbleibende mechanische Eigenschaften auf (Ehrenstein 2006; Henning, Moeller 2011; Baur u. a. 2013).

Es gibt unterschiedliche Glasfasertypen, die für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert sind. In der Automobilindustrie wird die sogenannte E-Glasfaser am häufigsten als Verstärkungsfaser für FKV eingesetzt. Dieser Fasertyp besteht aus alkalifreiem Glas, weist sehr gute elektrische Isolationseigenschaften auf, ist unempfindlich gegen Feuchtigkeit und zeichnet sich durch eine hohe Verfügbarkeit am Markt aus (Baur u. a. 2013; Menges u. a. 2014; Henning, Moeller 2011). Darüber hinaus zeichnen sich diese Fasern durch eine haftmittelhaltige Schlichte (auch Kunststoffschlichte genannt) aus, die direkt während des Faserherstellprozess aufgebracht wird. Die Schlichte schützt zum einen die Fasern während des Verarbeitungsprozess und dient als Haftvermittler zwischen Faser und Matrix. Die Bestandteile der Kunststoffschlichte sind drei Komponenten: Silan (5 bis 10 %), polymere Filmbildner (80 bis 90 %) und Hilfsmittel (5 bis 10 %) (Ehrenstein 2006).

### 3.1.3 Kunststoffgranulate

Kunststoffgranulat ist die typische Lieferform von thermoplastischen Kunststoffen der Rohstoffhersteller für die kunststoffverarbeitende Industrie.

Im Bereich der faserverstärkten Kunststoffgranulate wird zwischen Kurz- und Langfasergranulaten unterschieden (siehe Abbildung 2). Kurzfasergranulate weisen eine Ausgangsfaserlänge unter 0,2 bis 0,5 mm auf, Langfasergranulate haben Faserlängen von 5 mm bis zu 25 mm. Langfaserverstärkte Granulate sind eine Weiterentwicklung der kurzfaserverstärkten Granulate. Im Bereich der Langfasergranulate gibt es zwei unterschiedliche Verfahren zur Herstellung der Faser-Matrix-Systeme. Im Ummantelungsverfahren werden die Faserbündel mit Polymerschmelze umschlossen, sodass bei diesem Granulattyp erst im nachgelagerten Verarbeitungsprozess eine vollständige Imprägnierung der Faser erfolgt. Im Pultrusionsverfahren hingegen werden Faserbündel in ihre Filamente vereinzelt, mit Schmelze imprägniert und wieder zusammengeführt. Somit ist die Faser bereits im Granulat vollständig mit Polymer benetzt (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003).

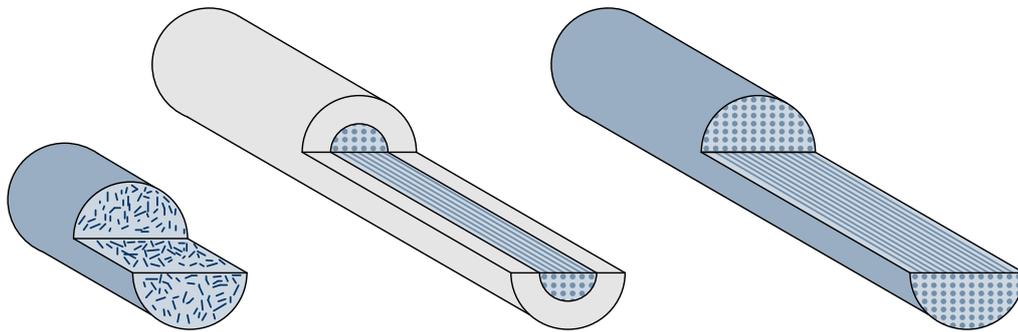


Abbildung 2 Überblick über unterschiedliche FKV Granulate: Kurzfasergranulat (Ausgangsfaserlänge von ~ 0,2 bis 0,4 mm) mit vollständig konsolidierten Fasern (links), Langfasergranulat Ausgangsfaserlänge von ~ 5 bis 25 mm) mit ummanteltem Glasfaserroving, bei dem nur die Randfasern des Rovings mit Polymer benetzt sind (Mitte) sowie pultrudiertes Langfasergranulat mit vollständig konsolidierten Fasern (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003).

### 3.1.4 Verstärkungswirkung

Die Eigenschaften eines Faserverbundwerkstoffs werden durch unterschiedliche Parameter wie dem Matrixwerkstoff, der Faserart, der Faser-Matrix-Haftung und der Faserstruktur beeinflusst (Ersch, Hopmann 2017; Henning, Moeller 2011; Brast 2001). Im Folgenden wird auf den Einfluss der Faserlänge bzw. des Aspektverhältnisses, des Fasergehalts und der Faserorientierung auf die mechanischen Eigenschaften eines FKV-Bauteils eingegangen.

#### Aspektverhältnis und Faserlänge

Fasern können ihre Verstärkungswirkung nur optimal in den Verbundwerkstoff einbringen, wenn die an der Matrix anliegenden mechanischen Belastungen auch auf die Faser übertragen werden. Die Krafteinleitung erfolgt über die Oberfläche der Faser, weshalb das Verhältnis von Faservolumen zu Faseroberfläche von entscheidender Bedeutung ist. Um eine optimale Kraftübertragung zu gewährleisten, muss bei einem gleichbleibenden Faservolumen das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen möglichst hoch sein (Bonnet 2009). Das Verhältnis aus Länge zu Durchmesser wird als Aspektverhältnis  $a$  bezeichnet (Gleichung 1):

$$a = \frac{l}{d} \quad (\text{Gl. 1})$$

Es gibt zwei Geometrien, die zu einem Maximum des Oberflächen/Volumen-Verhältnisses führen. Bei einer Platte ist das Aspektverhältnis  $a \ll 1$ , bei einer Faser ist  $a \gg 1$  (Bonnet 2009). Die tatsächlich im Bauteil erreichbare Faserlänge entscheidet maßgeblich über die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Mit zunehmender Faserlänge steigen bei optimaler Faser-Matrix-Haftung Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit bis zu einem Schwellwert an. Der Maximalwert der Steifigkeit für einen Faserdurchmesser von  $10 \mu\text{m}$  kann bereits bei einer Faserlänge von  $2 \text{ mm}$  erreicht werden. Bei einer Länge der Fasern von  $8$  bis  $10 \text{ mm}$  kann die maximale Festigkeit erreicht werden. Um die größtmögliche Schlagzähigkeit zu erreichen, werden Fasern von bis zu  $40 \text{ mm}$  benötigt, jedoch nimmt im Bereich von  $2$  bis  $20 \text{ mm}$  Faserlänge die Schlagzähigkeit am stärksten zu (vgl. Abbildung 3) (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003). Neben den besseren mechanischen Eigenschaften weisen langfaserverstärkte Bauteile im Vergleich zu kurzfaserverstärkten Bauteilen, bei gleichem Fasergewichtsanteil, Vorteile sowohl im statischen und dynamischen Langzeitverhalten als auch bei der Wärmeformbeständigkeit auf (Neitzel, Mitschang, Breuer 2014).

Um die mechanischen Eigenschaften des FKV bestmöglich nutzen zu können, ist eine bestimmte Faserlänge zu erreichen. Diese wird in der Literatur als kritische Faserlänge  $l_c$  bezeichnet (Metten, Cremer 2000; Bürkle, Siverding, Mitzler 2003). Die kritische Faserlänge hängt von der Faserbruchfestigkeit ( $\sigma_{BF}$ ), dem Faserdurchmesser ( $d_F$ ) und der Grenzflächen- bzw. Matrixschubfestigkeit ( $\tau_B$ ) ab und berechnet sich nach folgender Formel (Gl. 2):

$$l_c = \frac{\sigma_{BF} \cdot d_f}{\tau_B \cdot 2} \quad (\text{Gl. 2})$$

Erst wenn die Faserlänge den Wert von  $l_c$  überschreitet, kann eine hohe Verbundfestigkeit erreicht werden und die wirkenden Kräfte von der Matrix bestmöglich auf die Faser übertragen werden (Neitzel, Mitschang, Breuer 2014). Bei der Faser-Matrix-Kombination aus Polypropylen mit Glasfaser liegt die kritische Faserlänge im Bereich von  $1,3$  bis  $3,1 \text{ mm}$  (siehe Abbildung 3). Durch den Einsatz von Haftvermittlern im Polymer und optimierten Faserschichten kann die kritische Faserlänge auf einen Wert von  $0,9 \text{ mm}$  reduziert werden (Neitzel, Mitschang, Breuer 2014; V 2014; Witten 2014).

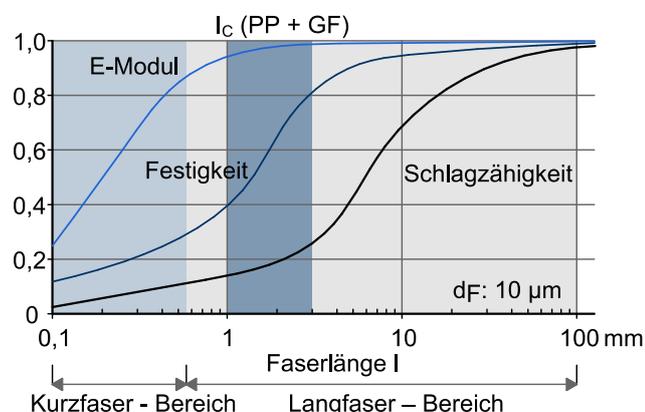


Abbildung 3 Exemplarische Darstellung der *mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit der Faserlänge* sowie Kennzeichnung der kritischen Faserlänge  $l_c$  und der Einteilung in Kurz- und Langfaser-Bereich (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003).

## Fasergehalt

Neben der Faserlänge werden die mechanischen Eigenschaften eines Faserverbundkunststoffs durch den Fasergehalt bestimmt. Der Fasergehalt kann zum einen als Faservolumengehalt  $\varphi$  oder zum anderen als Fasergewichtsgehalt  $\psi$  angegeben werden und kann nach Gleichung 3 berechnet werden. Der Faservolumengehalt beschreibt das Volumenverhältnis der Verstärkungskomponente zum Matrixmaterial (Menges u. a. 2014). Bei glasfaserverstärkten FKV kann mittels Veraschung der Polymermatrix der Gewichtsanteil bestimmt werden. Über die Dichte der Faser  $\rho_F$  und die der Matrix  $\rho_M$  kann der Fasergewichtsgehalt in den Faservolumengehalt umgerechnet werden (Menges u. a. 2014). Hierbei beschreibt  $V$  das Volumen und  $A$  die Querschnittsfläche der Faser bzw. des FKV.

$$\varphi = \frac{V_{Faser}}{V_{Verbund}} = \frac{A_F}{A_V} = \frac{1}{1 + \frac{1 - \psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_F}{\rho_M}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Der realisierbare Faservolumengehalt und die Faserlänge im Bauteil wird im Wesentlichen durch das Fertigungsverfahren bestimmt (Witten 2014; Hopmann, Michaeli 2015). Ab einem Fasergewichtsgehalt von mindestens 10 % wird der Werkstoff als FKV bezeichnet (Dominin-ghaus u. a. 2012; Henning, Moeller 2011). Eine eindeutige Verstärkungswirkung wird jedoch erst ab einem Fasergewichtsgehalt von 15 % erreicht, bei Fasergehalten von über 50 Gewichtsprozent kann es zu einer ungleichmäßigen Benetzung der Fasern kommen (Baur u. a. 2013).

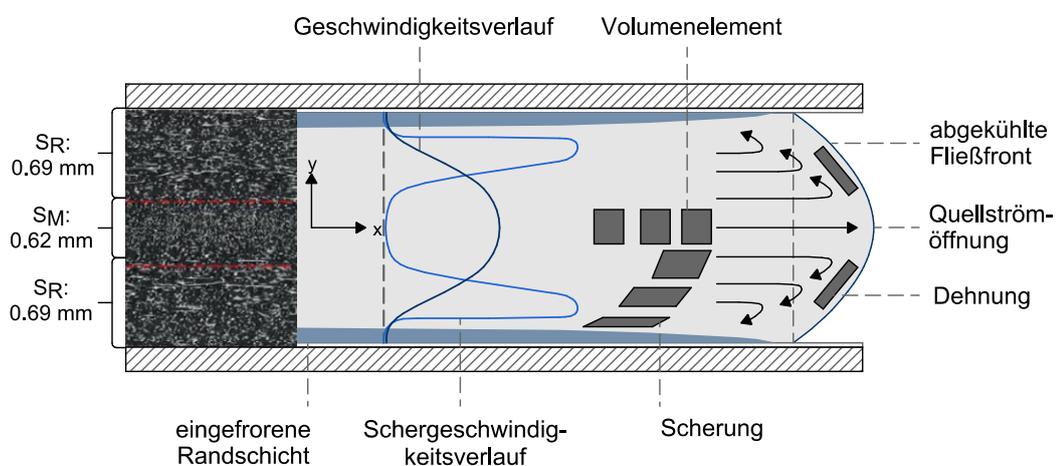
Bis zu einem Schwellwert von 40 Gewichtsprozent nehmen die Steifigkeitskennwerte einer langfaserverstärkten Pressmasse fast linear zu (Brast 2001). Die Biegefestigkeit steigt ebenfalls mit steigendem Fasergewichtsanteil an (Grellmann, Seidler 2015). Bei der Bruchspannung verhält es sich andersherum, hier sinkt mit steigendem Fasergehalt die Bruchspannung (Brast 2001; Witten 2014).

## Faserorientierung

Werden FVK im Spritzgussverfahren verarbeitet, so erfahren die Fasern in Abhängigkeit von Dehn- und Scherströmung eine unterschiedliche Orientierung. Die Fasern in den Randbereichen werden in Folge des Geschwindigkeitsgradienten in der Schmelze in Fließrichtung orientiert. Hingegen werden Fasern in der Querschnittsmitte durch eine Dehnströmung quer zu Fließrichtung ausgerichtet (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003; Teuwsen 15.02.2017; Goris, Osswald 2017). Neben dem Verarbeitungsverfahren bestimmen der Werkstoff, die Prozess- und Verfahrensparameter sowie Bauteilgeometrie die lokale Faserorientierung. Diese entscheidet maßgeblich über die resultierenden mechanischen Eigenschaften (Willems u. a.), da sich durch Unterschiede in der Faserorientierung anisotrope Verbundeigenschaften ergeben. So sind in Faserrichtung ( $0^\circ$ ) teilweise deutlich höhere mechanische Kennwerte zu erzielen als senkrecht ( $90^\circ$ ) zur Faserrichtung (Willems u. a.; Henning, Moeller 2011).

Auf Grund unterschiedlicher Strömungsverhältnisse über den Fließkanalquerschnitt (vgl. Abbildung 4) ergeben sich auch Bereiche unterschiedlicher Faserorientierung. Die Haupteffekte der Faserorientierung treten in der Rand- und Mittelschicht auf. Die Ausprägung der Faserorientierung wird u.a. von den Prozessparametern, dem Fasergehalt und der Faserlänge sowie

der Werkzeuggeometrie beeinflusst (Schröder 2018). Die starke Orientierung der Fasern der Randschicht wird durch den Geschwindigkeitsverlauf (Geschwindigkeitsgradient) hinter der Fließfront verursacht. Schergeschwindigkeit und Faserorientierung sind proportional zueinander, d.h. dort wo die Schergeschwindigkeit am höchsten ist, sind die Fasern am stärksten in Fließrichtung orientiert. Daraus lassen sich zwei Hauptbereiche der Faserorientierung im Bauteil identifizieren, deren prozentuale Verteilung bei der Bewertung der mechanischen Eigenschaften des FKV von Bedeutung ist (siehe Abbildung 4 links). Schröder hat diese Verteilung exemplarisch anhand einer 2 mm starken spritzgegossenen Platte aus Polybutylenterephthalat (PBT) GF 30 untersucht. Dabei zeigt er auf, dass der prozentuale Anteil der Orientierung in der Randschicht ( $S_R$ ) stärker zu gewichten ist als in der Mittelschicht ( $S_M$ ). Die Randschichten nehmen zwischen 60 bis 70 % des Formteilquerschnitts ein (Schröder 2018). Die prozentuale Verteilung hängt sowohl von der Wanddicke des Bauteils als auch von der Strukturviskosität des Polymers ab. Der Zusammenhang von Fasergehalt bzw. Faserlängen und dem strukturviskosen Verhalten von Polymerschmelzen wird in Abschnitt 3.2.4 erläutert. Mit zunehmender Strukturviskosität bildet sich ein stumpferes Fließgeschwindigkeitsprofil aus, wodurch es ebenfalls zu einer Änderung der Scherrate kommt. Die Maxima der Schergeschwindigkeit verlagern sich nach außen Richtung Werkzeugwand, wodurch sich in der Fließwegmitte ein breites Minimum ausbildet. In Folge dessen nimmt der Einfluss der Mittelschicht auf die mechanischen Eigenschaften zu. Im Gegensatz dazu vergrößert sich bei nur gering strukturviskosen Polymerschmelzen die Randschicht (Schröder 2018).



**Abbildung 4** CT-Aufnahmen der drei Schichten der Faserorientierung in einem Formteilquerschnitt mit 2 mm Wanddicke (links) und Strömungsvorgang einer Polymerschmelze im Spalt (rechts) (Schröder 2018)

Bei Kombinationstechnologien wie dem Spritzgießen und dem Fließpressen mit Gasinjektionstechnik ist ein weiterer Einfluss auf die Faserorientierung zu erkennen (siehe Abbildung 5). Dort sind insgesamt drei unterschiedliche Bereiche der Faserorientierung in der Restwandstärke zu finden.

Im Bereich nahe der Werkzeugwand [1] tritt eine schwache Faserorientierung in Fließrichtung auf, im mittleren Bereich [2] der Wanddicke liegen die Fasern stark in Fließrichtung orientiert vor. Der Bereich am Gaskanal [3] weist eine unregelmäßige Faserausrichtung auf mit einer leichten Tendenz zu einer Vorzugsorientierung in Gasflussrichtung (Zheng u. a. 2007).

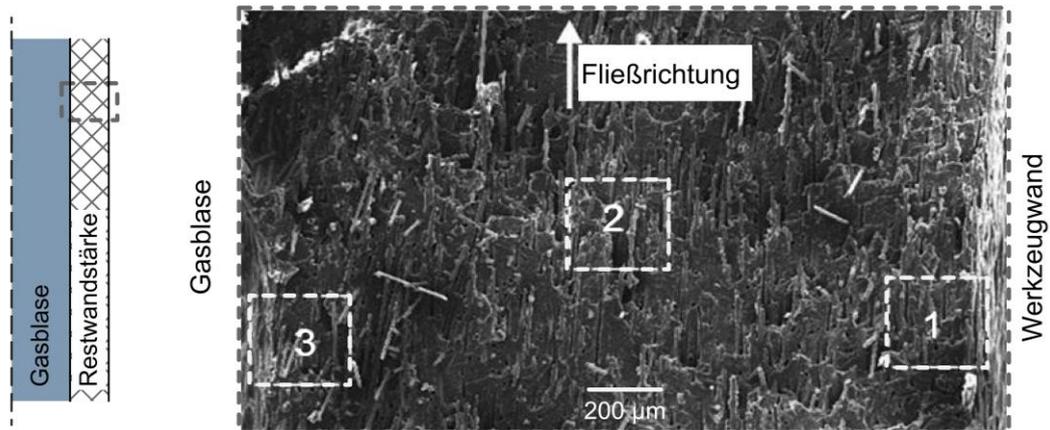


Abbildung 5 REM-Aufnahmen einer Bruchfläche eines kurzfaserverstärkten Bauteils, das im Spritzgussprozess mit Gasinjektionstechnik gefertigt wurde. Es zeigt drei unterschiedliche Bereiche der Faserorientierung in der Restwanddicke (Zheng u. a. 2007).

Allgemein gilt, dass sich längere Fasern unabhängig vom Verarbeitungsverfahren während der Verarbeitung weniger stark orientieren lassen als kürzere Fasern. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass längere Fasern stärker miteinander interagieren und eine Ausrichtung dadurch erschwert wird. Dies führt zu einer geringeren Anisotropie und mindert die Neigung zu Schwindung und Verzug (Henning, Moeller 2011).

### 3.1.5 Versagensformen von Faser-Kunststoff-Verbunden

Das Versagen von Faserverbundkunststoffen wird im Wesentlichen durch die Entstehung neuer Oberflächen und durch das Deformationsverhalten der Matrix charakterisiert. Im Hinblick auf Verstärkungswirkung von Fasern ist eine Orientierung parallel zur Belastungsrichtung anzustreben (Michler 1992).

Es kann zwischen folgenden Versagensformen (siehe Abbildung 6) unterschieden werden:

- Debonding (Faser-Matrix-Ablösung)
- Delamination (Abgleiten der Faser in der Ablöseregion (Riss umläuft Faser))
- Faser-Pull-Out (Faserauszug)
- Faserbruch
- Spröder oder duktiler Matrixbruch

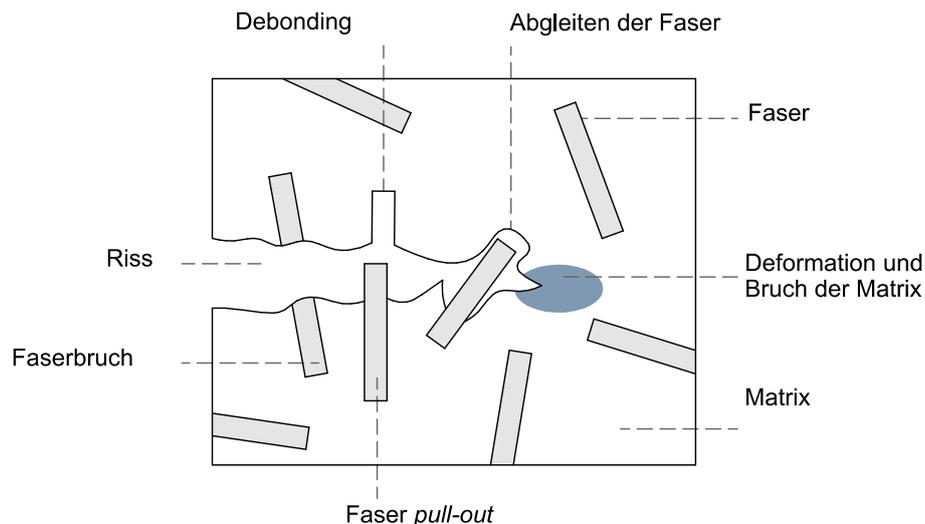


Abbildung 6 Schematische Darstellung der unterschiedlichen in Faserverbunden auftretenden Schädigungsmechanismen (Schoßig 2011).

In der Regel treten beim Versagen von Faserverbunden alle Versagensformen auf, sind jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Abhängig vom späteren Einsatzbereichs des Bauteils kann ein steiferes oder duktileres Werkstoffverhalten angestrebt werden.

Der *Matrixbruch* wird durch die Prüfbedingungen (Belastungsart, Temperatur) und die Faserorientierung beeinflusst (Michler 1992). In Abhängigkeit von Lastfall, Belastungsrichtung, Bauteilgeometrie und Art der Verstärkung treten andere (Haupt-) Versagensformen auf.

Die *Matrixdeformation* ist die typische Erstreaktion eines FKV auf eingebrachte Lasten. Durch den signifikanten Steifigkeitsunterschied zwischen Faser und Matrix kommt es am scharfkantigen Faserende zu lokalen Spannungsüberhöhungen. Dies führt zu Kleinbereichs-Fließvorgängen und Mikrorissen in der Matrix. Bei einer spröden Matrix führt dies entweder zum *Faser pull out* oder bei einer sehr geringen Matrixdeformation zum *Faserbruch*. Ist die Matrix hingegen eher duktil, so tritt *Debonding* und *Faser pull-out* durch lokale plastische Fließprozesse mit Hohlrumbildung als dominante Versagensform auf (Birr 2015; Schoßig 2011; Michler 1992).

*Faserbruch* wird erreicht, wenn bei makroskopischer Betrachtung der Verbund hohe Steifigkeits- und Festigkeitswerte aufweist. Voraussetzung hierfür ist, dass die Matrix ausreichend große Kräfte an die Faser übertragen kann, sodass die Faser zerreißt. Dafür muss eine ausreichend gute Faser-Matrix-Haftung gegeben sein und die Faser muss relativ dazu eine überkritische Länge aufweisen. Bei dieser Versagensform sind die höchste Bruchfestigkeit für einen FKV zu erwarten (Schoßig 2011; Birr 2015).

Der Faserauszug (Faser Pull-Out), das Herausziehen der Faser aus der Matrix, kann als Gegenteil des Faserbruchs angesehen werden, wenn man die Festigkeitswerte betrachtet. Somit ist diese Versagensform meist unerwünscht. Ursache für den Faser Pull-Out ist, dass die Matrix keine ausreichend hohen Kräfte an die Faser übertragen kann. Daher kommt es zum Versagen der Matrix in der Grenzschicht und die Faser löst sich aus einer Seite des Bruchs heraus und hinterlässt dort einen Kanal. Bei makroskopischer Betrachtung äußert sich diese Versagensform durch das Erreichen hoher Steifigkeiten bei niedrigen Festigkeiten. Jedoch entsteht beim Faser Pull-Out Reibung in dem sich bildenden Kanal, wodurch Energie umgesetzt wird. Dieser Effekt kann sich positiv bei schlagartiger Belastung auswirken, da es zu einer erhöhten

Energieaufnahme des FKV im Versagensfall kommt. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Faser möglichst weit aus einer Bruchhälfte gezogen wird, ohne dabei selbst zu brechen (Birr 2015). Bei allen Versagensformen sind die Kraftübertragung von Matrix zu Faser und die Faserlänge die entscheidenden Kriterien. Aus diesen beiden Aspekten leitet sich die unter 3.1.4 eingeführte kritische Faserlänge ab.

Die Krafterleitung von der Matrix in die Faser führt zu einer inhomogenen Verteilung der Schublast in der Grenzfläche. Die maximal übertragbare Kraft sowie die Versagensform hängen vom Zusammenspiel der Faser-Matrix-Haftung und der zur Verfügung stehenden Faser-oberfläche ab. Dieser Zusammenhang wird von Stelzer (2002) erläutert und baut auf den Ergebnissen der Forschungen von Cox (1952) sowie Kelly und Tyson (1965) auf. Abbildung 7 zeigt eine idealisierte Betrachtung, bei der in ein zylinderförmiges Matrixvolumen eine konzentrische zylinderförmige Faser eingebettet ist. Die Zugkrafterleitung erfolgt in Faserlängsrichtung über die kreisförmigen Endflächen des Matrixzylinders. Daraus resultiert eine Verformung des Systems, die zur dargestellten Spannungsverteilung führt.

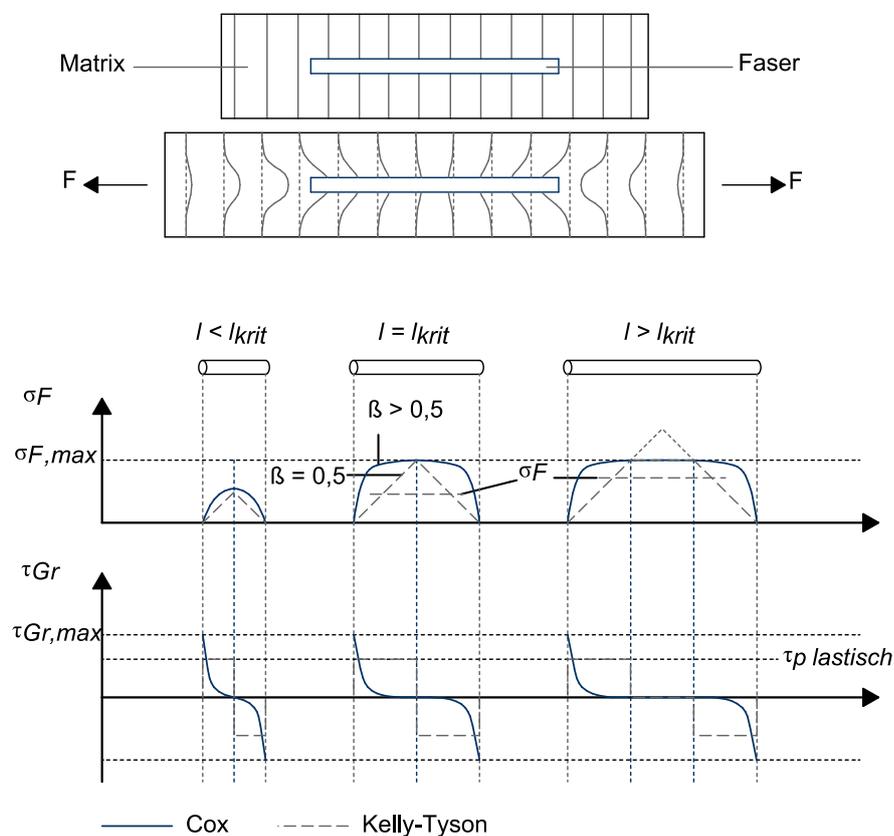


Abbildung 7 Spannungsverlauf des Grenzflächenschubs und Faserzugspannungsverlauf bei ideal elastisch (Cox) und ideal plastisch (Kelly-Tyson) angenommener Matrix (Kelly, Tyson 1965; Cox 1952).

### 3.1.6 Faserschädigungsmechanismen

Während der Verarbeitung faserverstärkter Polymerschmelzen kommt es teils zu einem starken Abbau der Faserlänge; dies ist insbesondere beim Spritzgießen zu beobachten. Die wesentlichen Einflussfaktoren für den Faserbruch sind die Verarbeitungsbedingungen, die Art und Beschaffenheit der Formmasse sowie die Geometrie der Plastifiziereinheit und des Werk-

zeugs bzw. des Heißkanalsystems (Thieltges 1991). Im gesamten Verarbeitungsprozess treten in Abhängigkeit der einzelnen Schneckenzonen die folgenden Faserbruchmechanismen auf (Brast 2001):

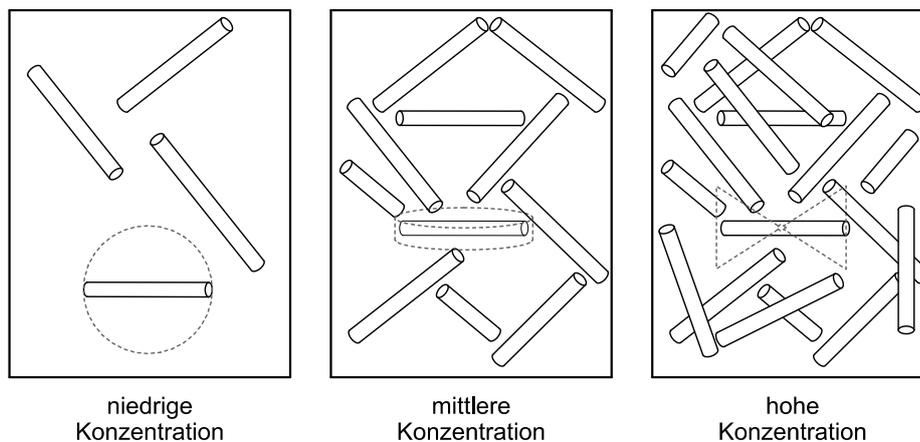
- Mechanische Zerkleinerung beim Befüllen der Plastifiziereinheit
- Reibung zwischen Fasern und Zylinderwand/Schneckensteg
- Schubbeanspruchung mit Knicken und Beugen der Fasern in der Schmelze
- Gegenseitige Behinderung der Fasern in Folge der Fließwegumlenkung und der damit verbundenen Schergeschwindigkeitserhöhung

Turkovich und Erwin (1983) haben die auf die Fasern wirkenden Kräfte in drei Gruppen untergliedert:

- Faser-Faser-Interaktion
- Faser-Polymer-Interaktion
- Faser-Maschinen-Interaktion.

### Faser-Faser-Interaktion

Die Faserkonzentration ist der entscheidende Faktor bei der Faserschädigung durch Faser-Faser-Interaktion. Dieser Effekt tritt auf, wenn die Fasern sich frei in der Schmelze bewegen können und ihre Schwerpunkte nahe beieinander liegen. Glasfaserverstärkte Polymerschmelzen lassen sich in drei Klassen einteilen: niedrig, mittel und hoch konzentriert.



**Abbildung 8** Schematische Darstellung der drei unterschiedlichen Stufen der *Faserkonzentration* in einer Polymerschmelze (Evans, Gibson 1986).

Thieltges (1991) beschreibt die Konzentrationsunterschiede so, dass bei niedrigen bzw. nicht kritischen Faserkonzentrationen der Abstand einer Faser zur nächsten größer ist als die Länge der Faser  $L_F$ . Somit können sich die Fasern frei bewegen und rotieren. Es kommt zu vernachlässigbaren Anzahl an Faserinteraktion. Für große Durchmesser/Längen-Verhältnisse bedeutet dies, dass die Faserkonzentration niedrig sein muss (Barbosa, Kenny 2000; Thieltges 1991; Folgar, Tucker 1984). Bei mittleren Faserkonzentrationen ist der Abstand zwischen den Fasern kürzer als deren Länge, aber größer als deren Durchmesser  $D_F$ . Die Faser-Faser-Interaktion beginnt, indem die Fasern nicht mehr rotieren, sondern sich nur noch eindimensional drehen können. Daher wird der Raum, in dem sich die Fasern frei bewegen können, als Scheibe angenommen (Folgar, Tucker 1984; Thieltges 1991). Werden hochkonzentrierte Po-

lymerschmelzen betrachtet, entspricht der Abstand der Fasern zueinander dem Faserdurchmesser  $D_F$ . Der Freiraum in dem sich die Faser nun noch bewegen kann, entspricht in etwa ihrem Volumen und ist in jede Raumrichtung beschränkt. Bei zu hohen Faserkonzentrationen verhält sich die faserverstärkte Polymerschmelze wie ein Festkörper. Bei der Verarbeitung können Faseragglomerate festgestellt werden (Barbosa, Kenny 2000; Thieltges 1991; Folgar, Tucker 1984).

Mit zunehmender Faserlänge nimmt das inverse Durchmesser/Längen-Verhältnis ab. Dies führt dazu, dass alle Polymerschmelzen mit sehr langen Fasern als hochkonzentrierte FVK betrachtet werden. PA66-GF30 weist einen Faservolumengehalt von ca. 16 % auf, PP-GF30 hat einen Faservolumengehalt von ca. 13 %. Daher gilt für kurzglasfaserverstärkte Polymere, dass sie eine unkritische Faserkonzentration aufweisen, wenn ihr Fasergewichtsanteil unter 30 % liegt, d.h. es kommt nur zu einer sehr geringen Anzahl an Faserinteraktionen (Rohde-Tibitanzl 2015; Folgar, Tucker 1984).

### **Faser-Polymer-Interaktion**

Faser-Polymer-Interaktion tritt grundsätzlich im gesamten Prozessverlauf auf, das heißt die Faser interagiert sowohl mit dem noch festem Kunststoffgranulat als auch mit der Kunststoffschmelze. Solange das Aufschmelzen des Polymers noch nicht angefangen hat, sind jedoch kaum Interaktionen zu beobachten. Da die Fasern in das Kunststoffgranulat eingebunden sind, beginnt die Faser-Polymer-Interaktion erst mit dem Aufschmelzen des Polymers. Hierzu wurden von Mittal und Gupta Ende der 1980er Jahre Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde das Augenmerk auf die Grenzfläche von Feststoff und Schmelze während des Aufschmelzvorgangs gelegt und der Zeitpunkt betrachtet, an dem ein Teil der Fasern noch im Granulat eingebettet ist und der andere Teil der Fasern im Schmelzfluss steht. Mit zunehmendem L/D-Verhältnis nehmen die auf die Faser wirkenden Kräfte stark zu, was zu einem Faserbruch im Anbindungspunkt an das Granulat führt. Erreicht der Schmelzefilm einen kritischen Wert, ist davon auszugehen, dass alle Fasern brechen (Mittal, Gupta, Sharma 1988).

In der Schmelze wirken hohe Spannungen, Druck- und Biegekräfte auf die Fasern ein. Diese werden durch die Rotation erzeugt und führen zum Faserbruch. Bei newtonscher Strömung treten vier Lastfälle (vgl. Abbildung 9) in der Interaktion mit dem Polymer auf, die die Faser beanspruchen (Thieltges 1991):

- a) Ein uneinheitliches Strömungsfeld senkrecht zur Faserachse führt zu Biegungen.
- b) Uneinheitliche Gradienten senkrecht zur Faserachse führen zu Torsionsmomenten.
- c) Gradienten entlang der Faserachse führen zu Zug- oder Druckkräften, wobei die Faser unter Druckbeanspruchung zum Knicken neigt.
- d) Scherung führt zu Rotation.

Untersuchungen haben gezeigt, dass Biege- (a) und Druckbeanspruchung (c) die Hauptgründe für Faserbruch sind (Forgacs, Mason 1959; Salinas, Pittman 1981). In laminaren Scherströmungen verursacht die axiale Geschwindigkeitskomponente eine axiale Druckkraft, die dazu senkrecht stehende Geschwindigkeitskomponente führt zu einer Drehbewegung. In

einem Winkel von  $45^\circ$  zur Strömungsrichtung der Schmelze wirkt die größtmögliche Druckkraft, was zu einer Beugung der Faser und schließlich zum Bruch führt.

Mit zunehmender Viskosität des Polymers steigt die Neigung der Faser zum Biegen und Knicken an. Allerdings führt eine höhere Viskosität auch zu einer schlechteren Vereinzelung der Faserbündel, was wiederum eine schlechtere Imprägnierung der Fasern mit sich bringt. Die Faserbündel haben eine höhere Knicksteifigkeit, wodurch die Fasern im Verarbeitungsprozess länger in ihrer Ursprungslänge bleiben als eine Einzelfaser (Salinas, Pittman 1981; Mittal, Gupta, Sharma 1988).



Abbildung 9 Die vier auf die Fasern wirkenden Lastfälle während des Plastifizierens in einer Plastifiziereinheit bzw. einem Extruder (Thieltges 1991).

### Faser-Maschinen-Interaktion

Im Übergangsbereich von Feststoff zu Schmelze kommt es zu einer starken Interaktion der Fasern mit den Maschinen- und Werkzeugwänden. Hierbei wirken die aus dem aufgeschmolzenen Granulat herausstehenden Fasern wie Mikroklingen. Dies führt sowohl zu abrasivem Verschleiß von Schnecke und Zylinderwand in diesem Bereich als auch zur Faserschädigung. Die Rückstromsperre zählt zu den Anlagenteilen, die den höchsten Verschleiß aufweisen. Aufgrund der dort auftretenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hohen Flächenpressungen ist hier ebenfalls mit Faserdegradation zu rechnen (Thieltges 1991).

Im Folgenden wird sowohl die Faserschädigung während des Plastifizierens als auch während des Durchströmens der Rückstromsperre näher beschrieben.

#### Faser-Maschinen-Interaktion bei der Plastifizierung

Die während der Verarbeitung von Langfasergranulaten auftretende Faserschädigung folgt einem komplexen Modell unterschiedlicher Faserbruchzustände (Rohde-Tibitanzl 2015; Wolf 1994; Thieltges 1991; Gupta u. a. 1989; Wolf 1996). Die Beschreibung dieser komplexen Modelle lässt sich in fünf Bereiche untergliedern, die im Folgenden aufgeführt sind und von der Einzugszone über die Kompressionszone bis zur Meteringzone (siehe Abbildung 10) führen.

1. Granulatbruch vor dem Aufschmelzen in der Einzugszone
2. Granulatinteraktion in der Einzugszone
3. Faserbruch im Spalt von Schneckensteg und Zylinderwand in der Kompressionszone
4. Faserbruch im Schmelzefilm zwischen Zylinderwand und Schnecke sowohl in der Einzugszone als auch der Meteringzone
5. Faserbruch durch Biegen, Knicken und Faser-Faser-Interaktion im Schmelzewirbel hauptsächlich in der Meteringzone

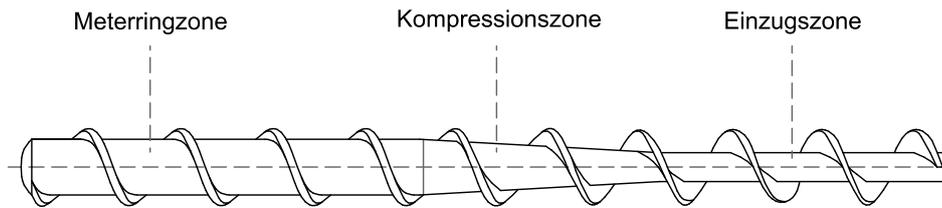


Abbildung 10 Schematische Darstellung einer Dreizonenschnecke mit Einzugs-, Kompressions- und Meteringzone (Johannaber, Michaeli 2004).

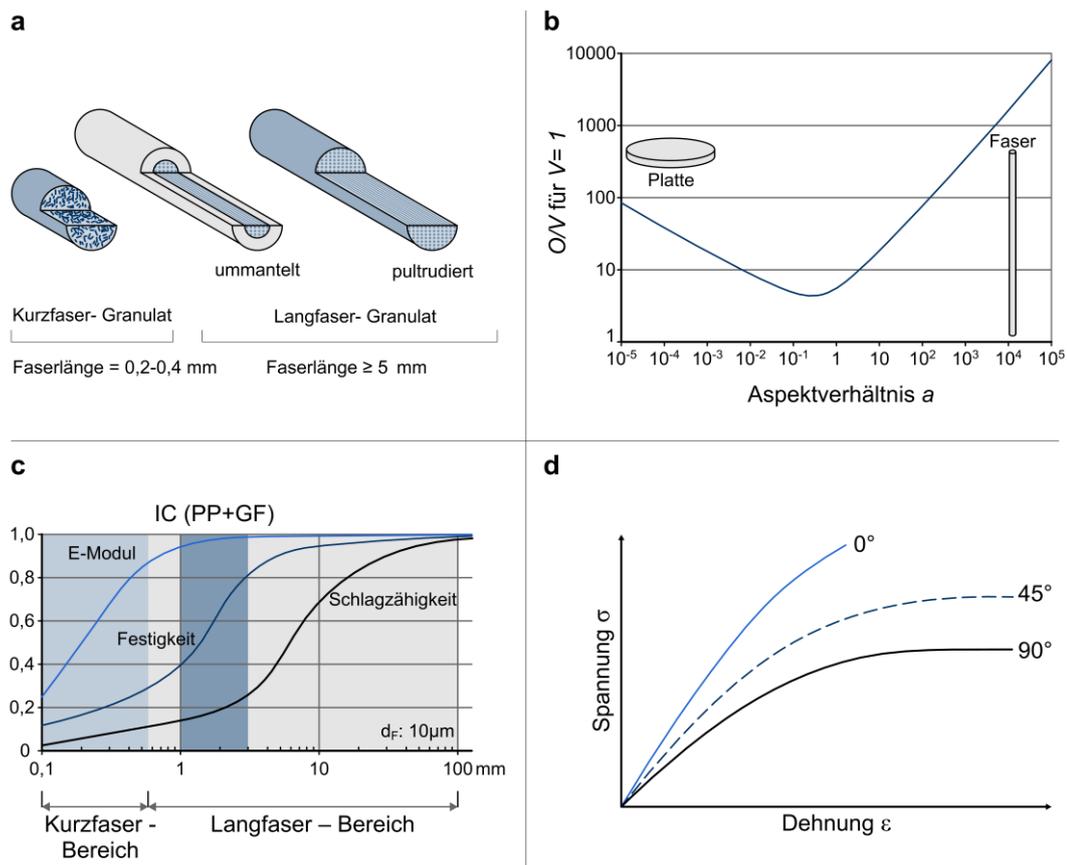
#### Faser-Maschinen-Interaktion beim Durchströmen der Rückstromsperre

Während des Plastifizierens in einem Spritzgussaggregat durchströmt die Schmelze auf ihrem Weg zur Düse eine Rückstromsperre. Diese Sperre sorgt dafür, dass die Schmelze beim Einspritzvorgang nicht zurück in die Schnecke strömen kann. Der Spalt der Rückstromsperre weist nur einen geringen Querschnitt auf, sodass auch hier die Fasern eingekürzt werden. Die dort auftretenden Effekte ähneln den zuvor beschriebenen Effekten der Faser-Maschinen-Interaktion bei der Plastifizierung im Spalt von Schneckensteg und Zylinderwand. Beim Einströmen der Schmelze in die Rückstromsperre kommt es hauptsächlich zum Faserbruch in Folge von Biegung (Wolf 1996; Schmid 1989).

### 3.1.7 Zusammenfassung: Faser-Kunststoff-Verbunde

Im vorangegangenen Unterkapitel werden die Faser-Kunststoff-Verbunde am Beispiel des Glasfaser verstärkten Polypropylens, der in der Automobilindustrie am häufigsten eingesetzten Faser-Matrix-Kombination, vorgestellt. Abbildung 11 zeigt eine resümierende Übersicht der Eigenschaften von FKV. Dabei werden die drei unterschiedlichen Granulatformen und -typen (Kurzglasfasergranulat, Langfasergranulat pultrudiert und ummantelt) beschrieben (siehe Abbildung 11 a). Darüber hinaus werden die Verstärkungswirkung der Fasern in Abhängigkeit von Aspektverhältnis, Fasergehalt und -länge sowie Faserorientierung beschrieben (siehe Abbildung 11 b bis d). Dabei ist zusammenfassend festzuhalten, dass mit steigendem L/D-Verhältnis die Verstärkungswirkung zunimmt. Das Gleiche gilt auch für einen steigenden Fasergehalt bis hin zu einem Grenzwert von ca. 60 Gew.-% Fasern. Um den FKV optimal einsetzen zu können, müssen die Fasern entsprechend des Lastfalls orientiert sein. Dabei ist das Fließverhalten entscheidend, da sich die Fasern ausschließlich in Fließrichtung orientieren (vgl. Abbildung 4). Wie Abbildung 3 beschreibt, gibt es eine Abhängigkeit der Faserlänge im Bauteil und den sich daraus ergebenden mechanischen Eigenschaften. Die Abhängigkeit besagt, dass bereits ab einer Faserlänge von 1 mm 90 % der maximalen Steifigkeit erreicht werden. Ab einer Faserlänge von ca. 5 mm werden 90 % der maximalen Festigkeit erreicht und ab ca. 20 mm Faserlänge erreicht die Schlagzähigkeit ebenfalls 90 % ihres maximalen Wertes.

Das Versagensverhalten von FKV lässt sich in fünf unterschiedliche Formen kategorisieren (vgl. Abbildung 6), wobei der Faserbruch bei einer Festigkeitsauslegung die erwünschte Versagensform darstellt. Während des Verarbeitungsprozesses kommt es zu einer Degradation der Faserlänge in Folge von Faser-Faser-, Faser-Polymer-, und Faser-Maschinen-Interaktionen. Dies hat zur Folge, dass die Fasern im Bauteil kürzer sind als anfangs im Granulat.



**Abbildung 11** Resümierende Übersicht der Eigenschaften von FKV mit: a) Einteilung in Kurz- und Langfasergranulat (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003); b) Darstellung des Aspektverhältnisses (Bonnet 2009); c) Übersicht der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Faserlänge am Beispiel von glasfaserverstärktem PP (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003); d) Einfluss der Faserorientierung auf die mechanischen Eigenschaften eines FKV (Willems u. a. 2018)

### 3.2 Gasinjektionstechnik

In den 1970er Jahren wurden in Deutschland und den USA von E. Mohrbach (DE2106546A1) und E. Friedrich (US4101617) die ersten Patente zur Herstellung von Hohlkörpern im Spritzgießverfahren mittels Gasinjektionstechnik (GIT) beantragt. In den darauffolgenden Jahrzehnten wurden zahlreiche weitere Patente angemeldet und das Verfahren bis zur Großserientauglichkeit weiterentwickelt, deren Patentschutz mittlerweile abgelaufen ist.

Für die Verarbeitung in der GIT sind prinzipiell alle thermoplastischen Kunststoffe geeignet (Heim 2016; Avery 2001; Moritzer 1997), PP zeigt allgemein eine gute Verarbeitbarkeit (Moritzer 1997; Avery 2001). Bei faserverstärkten Polymerwerkstoffen können durch die Gasinjektion allerdings Bereiche mit Faser-Matrix-Separation entstehen (Brzeski 2011). Dabei wird die Faser von der Matrix getrennt und es entstehen lokale Faseranhäufungen, wodurch inhomogene mechanische Eigenschaften im Bauteil resultieren. Als Prozessgas wird in der Regel Stickstoff eingesetzt, da dieser inert ist und eine hohe Verfügbarkeit besteht. Auch der Einsatz von Kohlendioxid oder eines Stickstoff-Wasser-Nebels ist vorzufinden, da diese Gase bzw. Fluide Vorteile bei der Bauteilkühlung bieten. Im Vergleich zu Stickstoff ist die Handhabung mit Kohlendioxid jedoch aufwendiger, da hier erweiterte Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden müssen. Der Einsatz von Wasser-Stickstoff-Nebel befindet sich zur Zeit noch in einem Forschungsstadium (Theunissen 2016; Moritzer 1997; Johannaber, Michaeli 2004).

Im folgenden Unterkapitel werden zunächst Verfahrensvarianten der Gasinjektionstechnik vorgestellt, es folgen die Prozesszyklen von Spritzguss und Fließpressen mit GIT. Abschließend werden die Randbedingungen der Gasblasenausbildung, das Phänomen des Aufschäumens und die mechanischen Eigenschaften von GIT-Bauteilen erläutert.

### 3.2.1 Fließpressen mit Gasinjektionstechnik / GasComp-Prozess

Anders als die Kombination aus Spritzguss und Gasinjektionstechnik ist der Verfahrenshybrid aus Fließpressen und Gasinjektionstechnik bisher kaum untersucht worden. Brzeski (2009-07) untersuchte im Rahmen seiner Forschungen erstmals die Kombination von Fließpressprozess und Gasinjektionstechnik und führte die Bezeichnung GasComp ein. GasComp ist die Abkürzung für Gas Assisted Compression Moulding. Ziel dieser Entwicklung war es, die Vorteile der Gasinjektionstechnik mit den Vorteilen des Fließpressens zu kombinieren und damit langfaserverstärkte Hohlstrukturen großserientauglich zu fertigen. Brzeski verwendete bei seinen Versuchsreihen den zuvor als Standard GIT beschriebenen Prozess, mit dem Unterschied, dass die Polymerschmelze nicht in die Kavität eingespritzt, sondern eingelegt wurde. Der Füllgrad der Kavität betrug zwischen 80-90 Vol-% Füllung. Verwendet wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Faserhalbzeuge und Plastifikate. Die Verarbeitung erfolgte mit den in Tabelle 2 aufgeführten Parametern:

**Tabelle 1** Verwendete langfaserverstärkte Materialien/Halbzeuge

|                          | GMT    | GMT    | D-LFT  | Recyceltes GMT |
|--------------------------|--------|--------|--------|----------------|
| Fasergehalt [Gewichts-%] | 40     | 34     | 23,6   | 11,8           |
| Faserlänge [mm]          | bis 25 | bis 25 | bis 25 | 10             |

**Tabelle 2** Verarbeitungsparameter Brzeski

| Verfahrensparameter | Verzögerungszeit [s] | Gasaufbauzeit [s] | Gasdruck [bar] | Werkzeugtemperatur [°C] | Verarbeitungstemperatur [°C] |
|---------------------|----------------------|-------------------|----------------|-------------------------|------------------------------|
| Wert                | 1; 2; 3              | 1; 2; 3; 4; 5     | 80; 120; 180   | 23; 50                  | 200; 230                     |

Im Rahmen der Versuche kamen zwei unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz: Zum einen ein Rippenwerkzeug, und zum anderen ein sogenanntes Sternwerkzeug. Der maximale Außendurchmesser der Hohlkörper betrug 25 mm (siehe Anhang).

Alle von Brzeski im GasComp-Prozess hergestellten Teile mit dem Werkstoff GMT beinhalten eine Form von Hohlraum. Die Lage und Größe der Hohlräume allerdings waren sehr ungleichmäßig und bei den meisten Formteilen traten Faser-Matrix-Separationen auf. Bei der Faser-Matrix-Separation entstehen lokal begrenzte Bereiche, in denen entweder besonders hohe oder eine sehr niedrige Faserkonzentration vorzufinden ist, sodass ein inhomogener Werkstoff vorliegt. Daher wurde das verwendete GMT als nicht geeignet für weitere wissenschaftliche Untersuchungen eingestuft.

Beruhend auf der Erkenntnis von Becker (1999), dass bei einem niedrigeren Fasergehalt besser ausgeprägte Hohlräume hergestellt werden können, wurden zwei weitere Materialien mit geringerem Faseranteil auf ihre Eignung zur Verarbeitung im GasComp-Prozess untersucht (Brzeski 2009-07). Dafür wurden rezyklierte GMT (Re-GMT) mit einer Faserlänge von 10 mm

und einem Fasergehalt von 11,8 %, und ein direktverarbeiteter Langfaserthermoplast (D-LFT) mit einem Fasergehalt von 23,6 % und Faserlängen bis zu 25 mm verwendet. Mit den Re-GMT konnten reproduzierbare Hohlräume mit glatter Oberfläche und verhältnismäßig homogenen Wandstärken hergestellt werden. Mit dem D-LFT konnten ebenfalls Hohlräume mit ähnlich großem Volumen wie mit dem Re-GMT erzielt werden, allerdings mit schlechterer Reproduzierbarkeit (vgl. Abbildung 12). Die Untersuchungen haben des Weiteren gezeigt, dass mit Fasern von einer Länge bis zu 10 mm und einem Gewichtsanteil von 10 % gleichmäßiger ausgeformte Hohlräume hergestellt werden können, als mit höheren Faserlängen und Gewichtsanteilen. Der GasComp-Prozess ermöglicht es, im Gegensatz zur herkömmlichen Spritzgussprozess mit GIT, Hohlstrukturen mit längeren Fasern herzustellen (Goodship u. a. 2014; Brzeski 2009-07; Brzeski 2011).

Im Rahmen seiner Untersuchungen betrachtete Brzeski weder die mechanischen Eigenschaften der im GasComp-P gefertigten Hohlstrukturen, noch untersuchte er das Phänomen des Aufschäumens.

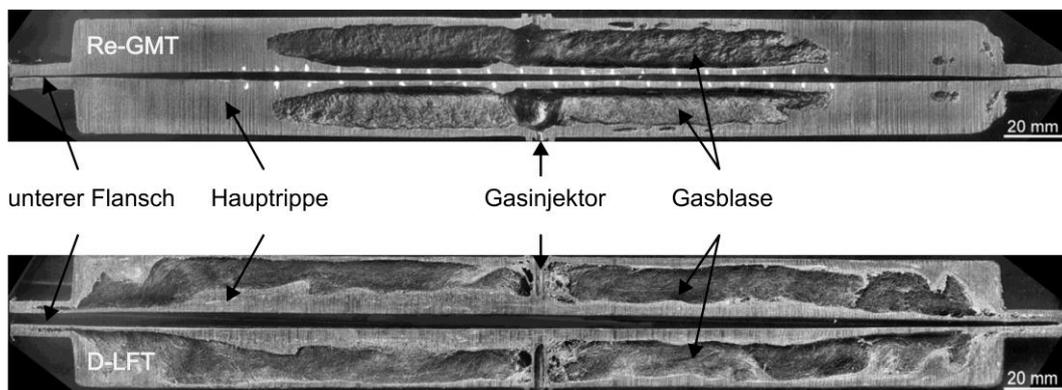


Abbildung 12 Vergleich der Hohlraumbildung bei Re-GMT (oben) und D-LFT (unten) am Beispiel von im GasComp-Prozess und dem Short-Shot-Verfahren gefertigten Versuchsbauteilen (Brzeski 2011).

### 3.2.2 Spritzguss mit Gasinjektionstechnik / GAIM-Prozess

Spritzgießen mit Gasinjektionstechnik (engl. Gas Assisted Injection Molding) ist ein Sonderverfahren auf Basis des Spritzgießens und seit den 1970er Jahren Stand der Technik. Im Vergleich zum konventionellen Spritzguss bietet die Gasinjektionstechnik technologische Vorteile wie die Reduktion von Einfallstellen und Formteilverzug. Darüber hinaus ermöglicht die Gasinjektionstechnik eine größere Gestaltungsfreiheit, sodass auch großvolumige Bauteile mit einer kurzen Zykluszeit realisiert werden können. Dies ist möglich, weil die effektive Wanddicke des Bauteils reduziert werden kann, da sich ein mit Gas gefüllter Hohlraum ausbildet.

Der Verfahrensablauf des Spritzguss mit Gasinjektionstechnik (siehe Anhang) entspricht im Wesentlichen dem des konventionellen Spritzguss. Der Unterschied ist, dass nachdem der Einspritzvorgang abgeschlossen ist, die Gasinjektion beginnt. Der Gasdruck, der dem Nachdruck beim konventionellen Spritzgießen entspricht, wirkt während der gesamten Kühlphase und wird nicht durch den Siegelpunkt bestimmt. Damit lassen sich sowohl die reduzierte Verzugsneigung als auch die kürzere Zykluszeit erklären. Das Formteil steht permanent im Kontakt mit der Kavität, wodurch eine optimale Kühlung gewährleistet ist. Erst unmittelbar vor dem Entformen wird der Gasdruck kontrolliert auf Atmosphärendruck abgebaut (Johannaber, Michaeli 2004).

### 3.2.3 Verfahrensvarianten der Gasinjektionstechnik

Die Gasinjektionstechnik ist ein Sonderverfahren im Bereich der Kunststoffverarbeitung, bei dem die endgültige Ausformung des Bauteils mittels eines Gases erfolgt. Somit können qualitativ hochwertige Kunststoffteile mit partiellen Hohlstrukturen gefertigt werden. Im Wesentlichen gibt es vier Verfahrensvarianten bei der Gasinjektionstechnik, wovon zwei im Folgenden vorgestellt werden. Sie sind in der Industrie am weitesten verbreitet und mit ihnen können sowohl gefüllte als auch ungefüllte sowie kurz- und langfaserverstärkte Polymere verarbeitet werden.

#### Short-Shot-Verfahren

Beim Short-Shot-Verfahren handelt es sich um die in der Literatur häufig als Standardverfahren bezeichnete Verfahrensvariante der Gasinjektionstechnik. Hierbei wird die Kavität, abhängig von den Randbedingungen, im Bereich von 50 bis 95 % volumetrisch mit Polymerschmelze gefüllt. Durch die Gasinjektion wird die Polymerschmelze an das Fließwegende gedrückt, wodurch die Kavität sukzessive volumetrisch gefüllt wird (siehe Abbildung 13 links). Eine simultane Injektion des Gases während des Einspritzvorgangs des Kunststoffs ist aufgrund der dabei auftretenden turbulenten Strömung nicht umsetzbar. Im Anschluss an die volumetrische Füllung der Kavität wird der Gasdruck aufrechterhalten und wirkt als Nachdruck. Hierbei herrscht über den gesamten Gaskanal der gleiche Druck. Erst wenn das Bauteil dimensionsstabil ist, wird der Druck abgebaut. Das Gas wird entweder in die Umgebung abgelassen oder kann teilweise (bis zu 90 %) rückgeführt werden (Menges, Michaeli, Mohren 2007; Eyerer, Elsner, Avery 2003; Potente, Rennefeld 1995).

#### Nebenkavitätsverfahren

Das Nebenkavitätsverfahren, auch Ausblasverfahren genannt, unterscheidet sich vom Standardverfahren dadurch, dass die Kavität nahezu vollständig gefüllt ist. Durch die Gasinjektion wird die Polymerschmelze in die Nebenkavität verdrängt. Die Nebenkavität wird in der Regel erst mit Beginn der Gasinjektion geöffnet und ist so ausgelegt, dass sie dem verdrängten Volumen entspricht. Dadurch bildet sich eine Gasblase aus, die Haupt- und Nebenkavität durchläuft, sodass der Nachdruck in beiden Kavitäten wirkt (vgl. Abbildung 13 rechts).

Das Nebenkavitätsverfahren bietet gegenüber dem Short-Shot-Verfahren unterschiedliche Vorteile. Beispielsweise werden in dieser Verfahrensvariante Umschaltmarkierungen, Glanzgradunterschiede und Einfallstellen vermieden, da die Kavität bereits zu Beginn des Prozessablaufs vollständig mit Polymerschmelze gefüllt ist. Dadurch wird die Werkzeugoberfläche reproduzierbar abgeformt. Ein weiterer Vorteil des Nebenkavitätsverfahrens ist es, dass keine Masseanhäufungen am Fließwegende auftreten (Menges, Michaeli, Mohren 2007; Eyerer, Elsner, Avery 2003). Es gibt jedoch auch Nachteile des Ausblasverfahrens. So steigt der Materialverbrauch durch das Ausblasen in die Nebenkavität und es kommt zu größeren Restwanddicken als im Standard GIT-Verfahren.

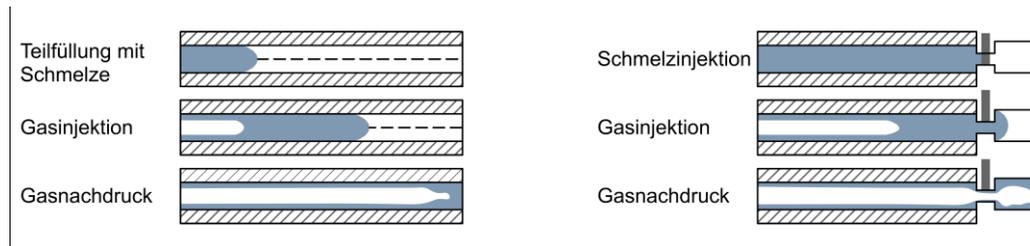


Abbildung 13 Schematische Darstellung der drei Stufen des Short-Shot-Verfahrens (links) und der des Nebenkehlungsverfahrens (rechts) (vgl. Menges, Michaeli, Mohren 2007).

### 3.2.4 Gasblasenausbildung

Die Qualität von Kunststoffbauteilen, die mittels Gasinjektionstechnik gefertigt werden, hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab, die in Abbildung 14 dargestellt sind. Der entscheidende Einflussfaktor ist die Gasblasenausbreitung und damit einhergehend die Restwanddickenverteilung im Bauteil.

Die durch GIT zu erzielenden Vorteile wie Zykluszeitreduktion und Materialeinsparung hängen ebenfalls von der Restwanddicke ab. Daher ist es sinnvoll, die sich ergebenden Wanddicken in axialer und radialer Richtung zu betrachten. Das Ziel ist eine homogene Wanddickenverteilung über das gesamte Bauteil.

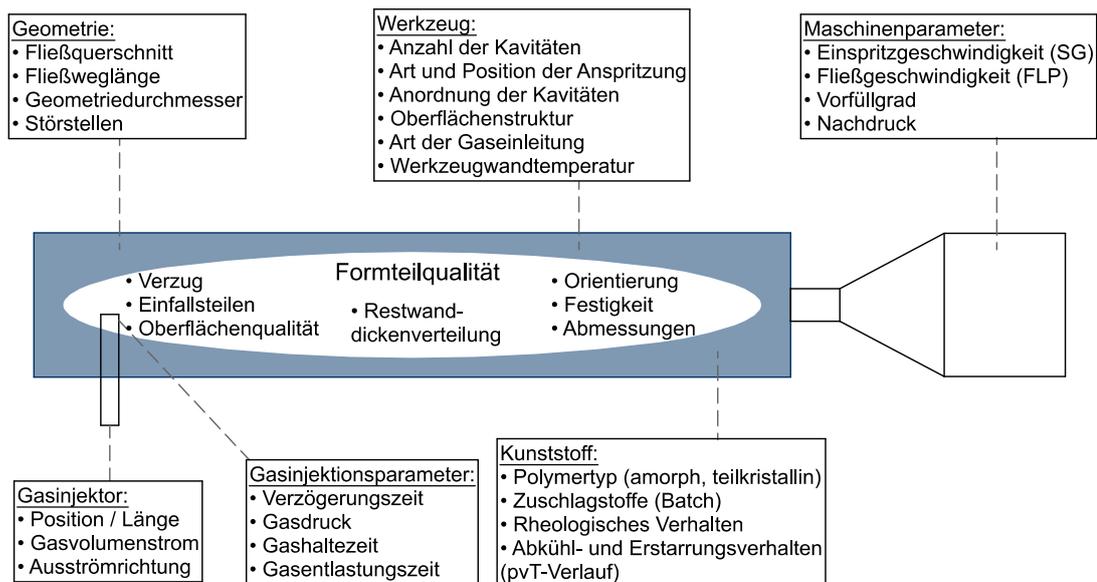


Abbildung 14 Übersicht und Gliederung der Einflussfaktoren auf die Formteilqualität von Kunststoffbauteilen bei der Gasinjektionstechnik (vgl. Schröder 1997).

#### Einfluss der Materialeigenschaften

Entscheidenden Einfluss auf die resultierende Restwanddicke haben die Materialeigenschaften. Hierbei sind im Besonderen die rheologischen und thermischen Stoffwerte relevant. Diese können nicht getrennt voneinander betrachtet werden, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Zu den thermischen Materialkennwerten zählt unter anderem die Temperaturleitfähigkeit. Die Abkühlfähigkeit eines Stoffes wird durch die effektive Temperaturleitfähigkeit ( $a_{\text{eff}}$ ) beschrieben, sodass diese als Bezugsgröße für die Restwanddickenausbildung herangezogen werden kann (Schröder 1997). Zu den weiteren Einflussgrößen zählen die rheologischen Material-

kennwerte Dehnviskosität und Scherviskosität. Die Untersuchungen von Lanvers (1993) haben gezeigt, dass eine steigende Scherviskosität die Gasblasenausbreitung negativ beeinflusst und zu größeren Wanddicken führt.

Schröder zeigt auf, dass es keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Schmelzeviskosität und Restwanddicke bei ungefüllten bzw. unverstärkten Polymeren bei Formteilen mit einem großen Strömungsquerschnitt gibt. Bei kleinen Strömungsquerschnitten und sehr niedrigen Gasdruckniveaus und bei gefüllten Polymeren ist mit einem Einfluss der Schmelzeviskosität auf die Restwanddicke zu rechnen, da ein ansteigender Strömungswiderstand zu einer langsameren Gasblasenausbreitung ( $p = const.$ ) führt. Diese Unterschiede lassen sich durch ungleiche Strömungsprofile erklären.

Wie anfangs bereits erwähnt, beschreibt die Ausprägung des strukturviskosen Verhaltens eines Polymers dessen Verarbeitungseigenschaften. Polyolefine weisen im schmelzeförmigen Zustand ein ausgeprägt strukturviskoses Verhalten auf. Von einem konstanten Bereich (Nullviskosität  $\eta_0$ ) bei niedrigen Schergeschwindigkeiten abgesehen, fällt mit steigender Schergeschwindigkeit die Viskosität ( $\eta = f(\dot{\gamma})$ ) ab (Ehrenstein 2011).

Schröder zeigt im Rahmen seiner Untersuchungen, dass die Gasblasenausbreitungsgeschwindigkeit die Schergeschwindigkeit des Polymers beeinflusst. Demnach weisen hochgefüllte Thermoplaste eine ausgeprägte Fließgrenze auf, wodurch bei der Initiierung des Gases eine niedrige Schergeschwindigkeit innerhalb des Polymers ergibt. Erst durch steigenden Druck und bei Überschreiten der Fließgrenze wird die Schmelze stark beschleunigt. Aufgrund dessen wird die Schmelze, die sich vor der Gasblasenfließfront befindet einer steigenden Scherbeanspruchung ( $\dot{\gamma} = f(V_s)$ ) ausgesetzt (Schröder 1997).

Abhängig von der Ausprägung der Strukturviskosität des Polymers nimmt mit steigender Scherrate die Viskosität ab. Dies bedeutet, dass die Scherspannung unterproportional mit der Scherrate wächst. Diese Korrelation führt dazu, dass diese beiden Größen gemeinsam betrachtet werden müssen. Bezogen auf die Gasinjektionstechnik bedeutet dies, dass mit steigender Fließfrontgeschwindigkeit mehr Schmelze von der Gasblase in Richtung Fließwegende verdrängt wird (Schröder 1997). Dies führt zu dem Schluss, dass Kunststoffschmelzen, die ein stark ausgeprägtes strukturviskoses Verhalten aufweisen, zu niedrigeren Restwanddicken neigen (Johannaber, Konejung 1995).

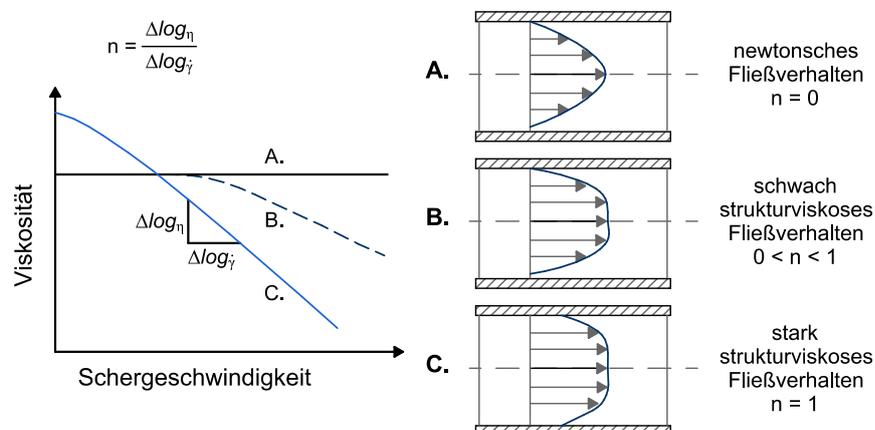
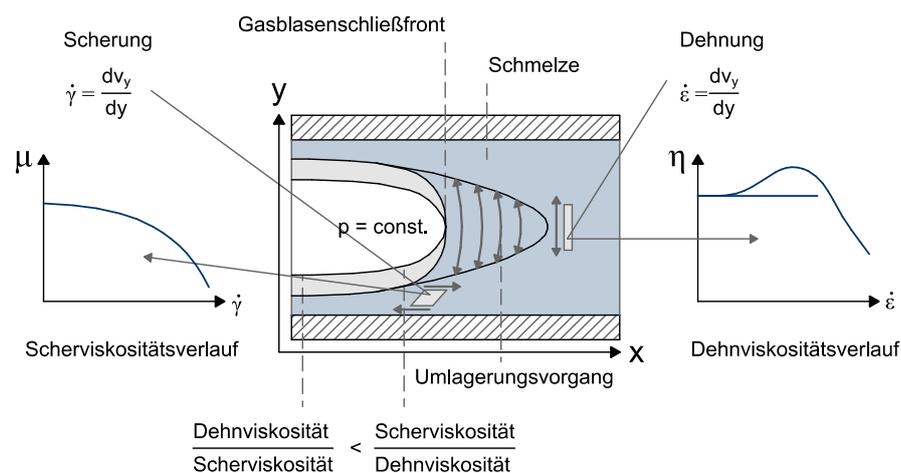


Abbildung 15 Qualitative Viskositätsverläufe und Strömungsprofile für unterschiedliche Fluide für ein ideal Newtonsches Fluid (A), ein schwach strukturviskoses Fluid (B) und ein stark strukturviskoses Fluid (C) (vgl. Schröder 1997).

Der direkte Zusammenhang zwischen Strukturviskosität und Strömungsverhalten wird von Schröder (1997) durch die Ausbildung unterschiedlicher Strömungsprofile beschrieben. In Abbildung 15 sind drei idealisierte qualitative Viskositätsverläufe und das entsprechende Strömungsprofil zu sehen. Ein ideales Newtonsches Fluid weist keinen Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Viskosität auf und zeigt eine parabelförmiges Strömungsprofil ( $n=0$ ). Strukturviskose Polymere ( $n=1$ ) weisen ein blockförmiges Strömungsprofil auf, während schwach strukturviskose Polymere ( $0 < n < 1$ ) zu abgeflachten parabelförmigen Strömungsprofilen neigen und ein Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Viskosität erkennbar ist.

Der Zusammenhang wird in Abbildung 16 verdeutlicht. Auf das Schmelzelement vor der Gasblase wirkt eine biaxiale Belastung, d.h. es treten Scher- und Dehnkräfte auf. Je höher die Dehnviskosität des Polymers ist, desto weniger Schmelze wird an der Gasblasenfront nach außen verdrängt.

Füllstoffe, wie zum Beispiel Glasfasern, erhöhen die Viskosität von Polymerschmelzen und beeinflussen daher deren Fließverhalten. Um dies zu beschreiben hat Geisbüsch ein Modell entwickelt, welches besagt, dass die Schergeschwindigkeit in gefüllten Polymerschmelzen um einen Faktor  $k$  höher ist als in ungefüllten. Die Glasfasern schwimmen in der Schmelze mit, ohne selbst geschert zu werden oder eine große Deformation zu erfahren. Stattdessen wird die Polymerschmelze zwischen den Fasern stärker geschert (Menges u. a. 2014).



**Abbildung 16 Schematische Darstellung des Einflusses der Dehn- und Scherviskosität auf die Strömungsvorgänge an der Gasblasenfließfront (vgl. Schröder 1997).**

Dass der Füllstoffanteil die Restwanddicke bei GIT beeinflusst, konnten sowohl Johannaber und Konejung (Johannaber, Konejung 1995), als auch Schröder (Schröder 1997) nachweisen. Schröder zeigte anhand von glasfaserverstärktem PA6 auf, dass die Restwanddicke um ca. 30 % reduziert wird, wenn statt ungefülltem PA6 ein PA6 mit 30 Gew.-% Glasfasern verwendet wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmendem Glasfasergehalt vermehrt Gleitebenen für die Hohlräumeausbildung entstehen. Hierdurch wird ein blockförmiges Strömungsprofil begünstigt, wodurch dünnere Restwanddicken resultieren (Johannaber, Konejung 1995). Das blockförmige Strömungsprofil sorgt auch dafür, dass die Fasern in einer Schicht innerhalb der eingefrorenen Randschicht eine starke Orientierung erfahren (vgl. Abbildung 15). Bei kompakten Bauteilen würde sich im Querschnitt nur eine kaum orientierte Schicht anschließen. Diese Schicht gibt es bei mit GIT hergestellten Bauteilen nicht, da sich dort der Hohlraum

befindet. Die Fasern orientieren sich entlang der Gasblase, sodass dies bei der Bauteilauslegung berücksichtigt werden muss. Denn nur Fasern, die in Belastungsrichtung orientiert sind, haben eine verstärkende Wirkung (Schröder 1997).

Becker hat herausgefunden, dass bei Fasergehalten über 30 Gew.-% und Faserlängen größer als 6 mm Bereiche mit Faseragglomerationen und rauer Oberflächenstruktur in der GIT unvermeidbar sind (Becker 1999).

### Einfluss der Formteilgeometrie

Grundsätzlich kann die Gasinjektionstechnik für unterschiedliche Formteilgeometrien genutzt werden. Diese lassen sich in drei Klassen kategorisieren (siehe Abbildung 17).

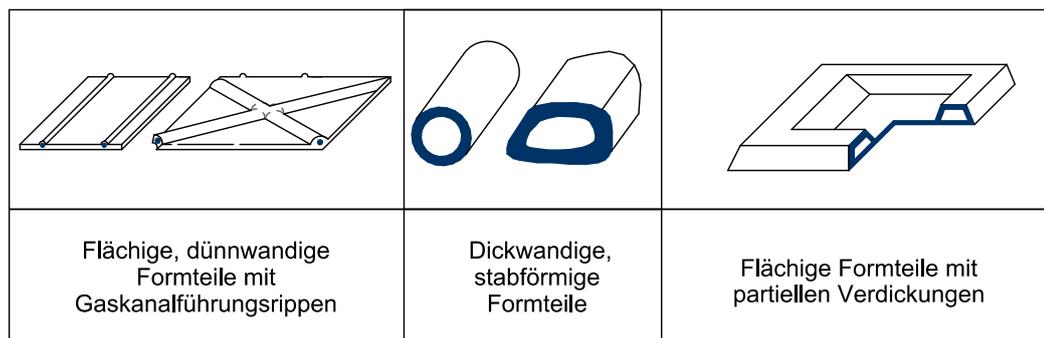


Abbildung 17 Übersicht der drei Geometrieklassifizierungen für die Gasinjektionstechnik, flächig, stabförmig und flächig mit partiellen Verdickungen (vgl. Eyerer, Elsner, Avery 2003) (LanversÇPotente, Heim, Rieder).

Die Gasinjektionstechnik eignet sich am besten für stabförmige Körper, sie wurde an dieser Formteilkategorie am weitesten untersucht. So untersuchte Schröder (1997) spritzgegossene stabförmige Bauteile und zeigte, dass die Gasblase in guter Näherung eine kreisrunde Strömungsform bildet und somit nicht exakt der Bauteilkontur folgt. Dies führt dazu, dass sich eine inhomogene Wanddickenverteilung einstellt. Dies ist insbesondere an Umlenkungspunkten der Schmelze und in den Eckbereichen rechteckiger Querschnitte zu beobachten.

Untersuchungen am IKV Aachen zeigten, dass die Gasblasen- bzw. Fließfrontgeschwindigkeit bei gleichbleibendem Gasdruck mit größer werdendem Strömungsquerschnitt sinkt (Michaeli, Roberts 1994). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei kleinen Strömungsquerschnitten die Gasblasen- bzw. Fließfrontgeschwindigkeit und somit auch die Schergeschwindigkeit steigen. Durch diese schergeschwindigkeitsinduzierte Viskositätsminderung sinkt der Fließwiderstand weiter und die Strömungsgeschwindigkeit steigt weiter an, was zu einer abnehmenden Restwanddicke führt. Bei den Untersuchungen von Schröder stellte sich bei glasfaserverstärkten Polymeren unabhängig vom Strömungsquerschnitt eine leicht schwankende Restwanddicke von 1,5 – 2 mm ein. Dies wird mit dem blockförmigen Strömungsprofil glasfasergefüllter Polymerschmelzen begründet (Schröder 1997).

### Einfluss der Verfahrensparameter auf Gasblasenausbildung bzw. Restwanddicke

#### Schmelztemperatur

Auch der Einfluss der Schmelztemperatur auf die Restwanddicke wurde von Schröder untersucht. Hierbei stand die Temperaturabhängigkeit der Viskosität im Blickfeld (Carreau 1972), da bei steigender Temperatur die Viskosität sinkt. Schröder zeigte bei seinen Untersuchungen,

dass die Schmelzetemperatur jedoch einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Restwanddicke hat (Schröder 1997).

#### Werkzeugwandtemperatur

Ein genauer Zusammenhang zwischen Werkzeugtemperatur und Gasblasenausbildung respektive Restwanddicke, konnte in mehreren Untersuchungen nicht konkret nachgewiesen werden. Erst in Verbindung mit dünnwandigen Formteilen und längeren Verzögerungszeiten kann ein Einfluss festgestellt werden. Hierbei zeigt sich bei niedrigen Werkzeugtemperaturen eine größere Restwanddicke als bei höheren Werkzeugtemperaturen (Moritzer 1997; Schröder 1997).

#### Gasverzögerungszeit

Die Gasverzögerungszeit beschreibt die Dauer, die zwischen (Vor-) Füllung der Kavität mit Schmelze und dem Beginn der Gasinjektion vergeht. Da die Schmelze über die Werkzeugwand Wärme abführt, bildet sich mit fortschreitender Zeit eine stärkere eingefrorene Randschicht aus. Daher ist die Gasverzögerungszeit eine entscheidende Einflussgröße für die Restwanddicke. Bei Bauteilen mit großen Querschnitten ist der Einfluss der Verzögerungszeit jedoch erst bei großen Verzögerungszeiten ( $t > 3$  s) messbar (Schröder 1997; Lanvers 1993; Heim 2016; Moritzer 1997; Moritzer 1997).

#### Massevolumen

Das Massevolumen, das sich zum Beginn der Gasinjektion in der Kavität befindet, hat entscheidenden Einfluss auf die Ausbreitung der Gasblase und deren Länge. Befindet sich zu wenig Masse in der Kavität, besteht die Gefahr eines Gaskdurchbruchs. Dabei durchbricht die Gasblase die Polymerschmelze und es kommt zu einem unkontrollierten Entweichen des Gases und es entsteht ein unvollständig ausgeformtes Bauteil. Ist zu viel Masse in der Kavität, so kann sich nur ein kurzer Gaskanal ausbilden. Daher muss das Massevolumen so gewählt werden, dass keiner der beiden Effekte auftritt. Um die Reproduzierbarkeit des Prozesses zu sichern, sind Dosierschwankungen beim Einspritzvorgang zu minimieren und ein Niveau von 0,2 – 0,5 % nicht zu überschreiten (Moritzer 1997).

#### Gasdruck

Der Gasdruck korreliert direkt mit der Fließfrontgeschwindigkeit der Gasblase, denn der Gasdruck ist die treibende Kraft des Massepolsters bei der volumetrischen Füllung der Kavität (Short-Shot-Verfahren) bzw. beim Ausblasen des Hohlraums (Nebenkavitätsverfahren). Wie zuvor beschrieben, kommt es hierbei zu einer Viskositätsminderung in Folge der hohen Schergeschwindigkeiten. Dies führt zu dünneren Restwanddicken. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieser Effekt bis zu einem geometrieabhängigen Grenzdruck auftritt und sich die Restwanddicke einem Grenzwert asymptotisch annähert (Schröder 1997; Moritzer 1997).

#### Gashaltezeit

Während der Gashaltezeit überträgt das injizierte Gas den Druck über die Fläche der Gasblase auf das Bauteil und sorgt so für den Nachdruck. Hierbei gibt es im Vergleich zum Nachdruck

beim Spritzgießen den Vorteil, dass dieser nicht durch den Siegelpunkt bestimmt wird, sondern beliebig lange aufrechterhalten werden kann. Somit sind Schwindungs- und Verzugsneigung stark gemindert. Durch die Schwindungskompensation bleibt das Formteil im Kontakt mit der Werkzeugwand, wodurch eine kontinuierliche Wärmeübertragung gegeben ist. Somit können kürzere Zykluszeiten realisiert werden (Moritzer 1997).

Der Einfluss der Gashaltezeit auf die Ausbreitung der Gasblase ist allerdings schwach. In geringem Maße werden die Restwanddicke, die Gasblasenlänge und somit das Gesamtvolumen der Gasblase beeinflusst. Bei großflächigen, dünnwandigen Bauteilen besteht bei hohem Gasdruck und langer Gashaltezeit das Risiko des Fingereffekts (siehe Abbildung 18). Dabei kommt es zu einer unkontrollierten Gasblasenausbreitung in flächige Bereiche, sodass es zu einer Minderung der mechanischen und optischen Eigenschaften kommt (Eyerer, Elsner, Avery 2003; Potente, Schäfers 2007; Moritzer 1997; Schröder 1997).

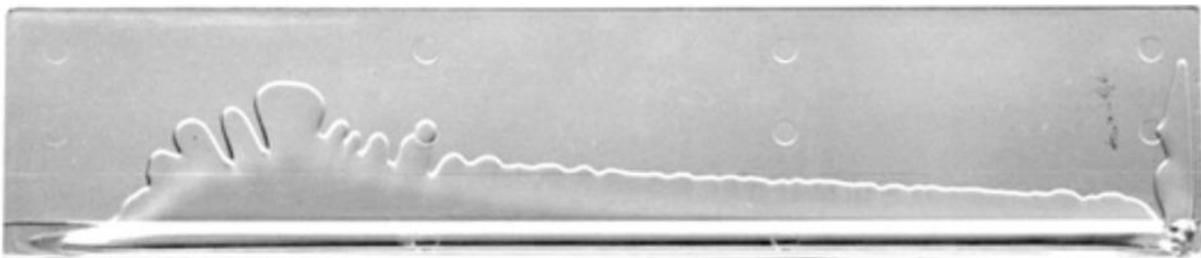


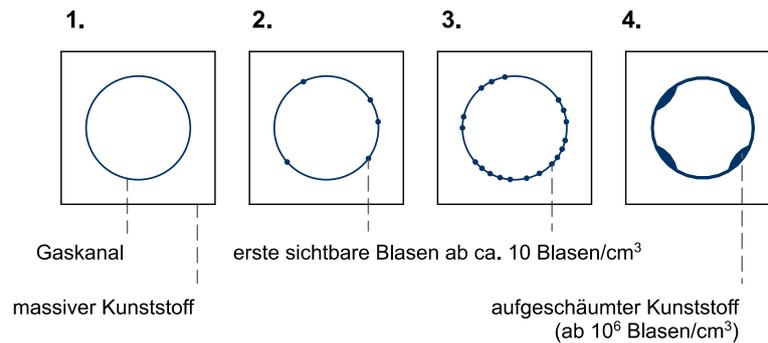
Abbildung 18 Darstellung des *Fingereffekts* bei einem flächigen im GIT-Verfahren gefertigten Bauteil aus transparentem Kunststoff (Schröder 1997).

#### Einfluss der Gravitation

Bei dünnwandigen Formteilen kann dieser Einfluss der Gravitation auf die Ausformung des Bauteils vernachlässigt werden, da die Gravitationskraft in der Regel deutlich kleiner ist als die weiteren auf die Polymerschmelze einwirkenden Kräfte. Bei stabförmigen Formteilen mit einem großen Fließwegquerschnitt strömt die Schmelze nahezu drucklos in die Kavität. Dabei kann es in Abhängigkeit von Fließquerschnitt und Schmelzeviskosität zu einem Einfluss der Gravitationskraft während der Vorfüllphase kommen, der für eine ungleichmäßige Formfüllung sorgt. Dies erschwert eine kontrollierbare und reproduzierbare Gasblasenausbreitung (Schröder 1997). Grundsätzlich gilt, dass die Kavität entgegen der Schwerkraft gefüllt werden sollte, da in diesem Fall die Gravitation dem Fließvorgang senkrecht entgegenwirkt, was zu einer besseren Reproduzierbarkeit führt. Insbesondere beim Nebenkavitätsverfahren ist dies zu berücksichtigen (Menges, Michaeli, Mohren 2007).

### 3.2.5 Aufschäumen von GIT-Formteilen

Das Aufschäumen von Polymerschmelzen, die im GIT-Spritzgussverfahren verarbeitet werden, wurde in zahlreichen Untersuchungen und Studien beobachtet (u.a. Hansen 1996; Lanvers 1993; Schröder 1997). Es wurde ein Zusammenhang zwischen Prozessbedingungen und Blasen- bzw. Schaumbildung nachgewiesen und eine Definition von Gasblasen und Schaum vorgenommen (siehe Abbildung 19). Bei weniger als  $10^6$  Blasen/cm<sup>3</sup> wird das Bauteil als blasenfrei bezeichnet, ab  $10^6$  Blasen/cm<sup>3</sup> gilt der Kunststoff in der Grenzschicht als aufgeschäumt (Moritzer 1997; Potente, Moritzer 1997).



**Abbildung 19 Klassifizierung und Lage der Blasen und Schaumbildung in einem GIT-Formteil von blasenfrei (links) bis aufgeschäumt (rechts) (vgl. Moritzer 1997).**

Das Aufschäumen der Polymerschmelze erfolgt im Wesentlichen während der Nachdruckphase/Gashaltezeit und der sich anschließenden Druckentlastung. Im Detail lässt sich das Schäumen durch folgende physikalische Phänomene erläutern.

- Lösungs- und Diffusionsvorgänge des inerten Gases in der Polymerschmelze während der Gasnachdruckphase.
- Blasen- bzw. Schaumbildung während der Druckentlastungsphase.

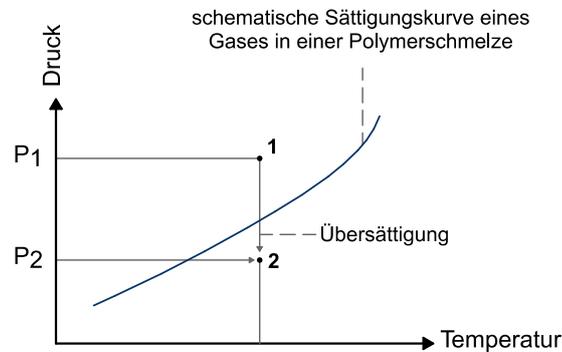
Diese beiden Vorgänge hängen hauptsächlich von folgenden Verfahrensparametern ab:

- Schmelztemperatur und Temperaturprofil im Polymer.
- Gasdruck.
- Gashaltezeit und Druckabbauzeit.
- Werkzeugtemperatur.
- Löslichkeitsvermögen des Polymers.

Die Wirkzusammenhänge lassen sich wie folgt erklären: Durch den hohen Gasdruck und den damit einhergehenden Konzentrationsanstieg diffundiert der Stickstoff während der Gashaltezeit in die Kunststoffwand ein und geht in Lösung. Mit steigendem Druck wird mehr Stickstoff in der Polymerschmelze gelöst und es kommt zu einer Übersättigung in der Grenzschicht. Während des anschließenden Druckabbaus bis auf Umgebungsniveau ist die Kunststoffschmelze nicht in der Lage, den über das Sättigungsniveau gelösten Stickstoff bei niedrigem Druck in Lösung zu halten. In der Regel erfolgt der Druckabbau jedoch schlagartig, sodass ein gleichmäßiges Diffundieren des Stickstoffs aus dem Polymer unmöglich ist. Sind zu diesem Zeitpunkt die Randbedingungen für die Blasen- bzw. Schaumbildung erfüllt, entsteht eine Blasen- bzw. Schaumstruktur (Moritzer 1997).

Unter der Voraussetzung, dass Stickstoff sich gegenüber dem verwendeten Polymer inert verhält, treten keine chemischen Wechselwirkungen auf. Daher kann das Zwei-Komponenten-System (Stickstoff/Polymer) als quasi überspanntes Ein-Komponenten-System betrachtet werden (Stewart 1970). Ist das Gas-Polymer-System oberhalb der Gleichgewichtsbedingung (Lösungsdruck bei einer bestimmten Temperatur), das heißt es liegt nur die flüssige Kunststoffphase vor, in der das Gas gelöst ist, so können kleine Blasen entstehen. Dieser Vorgang wird als Keimbildung bezeichnet. In Abbildung 20 wird ein Kunststoffvolumenelement oberhalb der Einfriertemperatur betrachtet und der Zusammenhang zwischen Gasdruck und Sättigungsniveau bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Im Punkt 1 ist eine bestimmte Menge

des Gases bei einem Druck  $p_1$  gelöst, sodass ein Sättigungszustand vorliegt. Wird nun der Druck isotherm auf das Druckniveau  $p_2$  gesenkt, kommt es zu einer Übersättigung. Als Konsequenz dieser Übersättigung kommt es zur Bildung von Blasen innerhalb des Volumenelements, sofern die Zustandsänderung so schnell erfolgt, dass kein Ausdiffundieren der Gasmoleküle möglich ist (Moritzer 1997).



**Abbildung 20** Schematische Darstellung zur *Bildung gasförmiger Keime* durch Übersättigung in Folge abrupten Druckabfalls (Nicolay 1976; Blander, Katz 1975).

Bei der Keimbildung wird zwischen der homogenen und der heterogenen Keimbildung unterschieden. Die homogene Keimbildung geht davon aus, dass sich die Keime der neuen Phase spontan in kleinen Hohlräumen bilden. Die Hohlräume werden durch thermische Dichtefluktuationen und intermolekulare Bewegungen erzeugt. Bei der heterogenen Keimbildung entstehen die Keime an der Grenzfläche zu einer festen Phase, wie beispielsweise Füll- oder Verstärkungsstoffen. Aus diesem Grund werden bei der heterogenen Keimbildung deutlich geringere Übersättigungsgrade zur Blasenbildung benötigt als bei der homogenen Keimbildung (Menges u. a. 2014; Moritzer 1997). Da im Rahmen dieser Dissertation ein Verfahren für faserverstärkte Polymere analysiert wird, fokussiert sich die weitere Betrachtung auf die heterogene Keimbildung. Sobald ein Zellkeim den kritischen Radius ( $R_{cr}$ ) erreicht hat, wächst er weiter. Keime die kleiner sind kollabieren durch die Oberflächenspannung. Der kritische Radius kann nach Gleichung 4 berechnet werden. Häufig liegt der Wert in einem Bereich von 200 bis 400 nm. Er hängt zum einen vom Druckunterschied zwischen Pore und Umgebung ( $\Delta P$ ) und zum anderen von der Oberflächenspannung zwischen Pore und der umgebenden Schmelze ( $\sigma_{lg}$ ) ab (Wong u. a. 2016; Altstädt, Mantey 2010).

$$R_{cr} = \frac{-2\sigma_{lg}}{\Delta P} \quad (\text{Gl. 4})$$

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch Füll- und Verstärkungsstoffe die Potenzi- alschwelle zur Bildung eines Keims auf ein deutlich geringeres Niveau verschoben wird und somit die Wahrscheinlichkeit der Blasen- bzw. Schaumbildung signifikant steigt. In Abbildung 21 sind die Energieniveaus für homogene und heterogene Keimbildung in Abhängigkeit vom Keimradius eingetragen. Aufgrund dessen, dass die heterogene Keimbildung energetisch günstiger ist, findet die bei vorhandenem Keimbildner bevorzugt statt. Unabhängig der Keimbildungsart existiert ein kritischer Radius (Werner 2019).

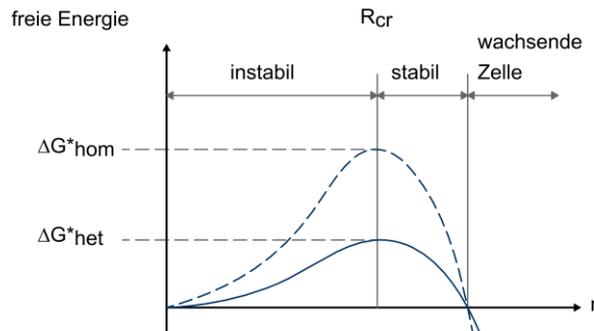


Abbildung 21 Schematische Darstellung der freien Energie von homogener und heterogener Keimbildung in Abhängigkeit des Keimradius (vgl. Altstädt, Mantey 2010).

Der Effekt des Aufschäumens beeinflusst die zu erzielenden mechanischen und optischen Eigenschaften. Blasenbehaftete oder aufgeschäumte Bauteile haben geringere mechanische Eigenschaften, da der Schaum zu erhöhter Kerbwirkung in diesen Bereichen führt (Moritzer 1997). Bei dem von Moritzer untersuchten Polycarbonat kam es bei Zugversuchen zu einer Minderung der Festigkeit von 15 %. Bei Biegeprüfungen versagten die aufgeschäumten Probekörper mit 5 % niedrigerer Festigkeit und bei Schlagzähigkeitsprüfungen kam es zu einer Minderung der Schlagzähigkeit von bis zu 50 %. Als Erklärung für die starke Minderung der Schlagzähigkeit führt Moritzer die Kerbwirkung der Blasen an. Bei einer Schlagbelastung schreitet der Riss vom blasenbehafteten Bereich zu den unaufgeschäumten Restwanddickenbereichen vor (Moritzer 1997). Daher ist es zwingend erforderlich, die Blasenbildung bei schlagbelasteten Bauteilen durch gezielte Prozessparameter vollständig zu verhindern. Ansonsten kann keine ausreichende Bauteilsicherheit gewährleistet werden.

### 3.2.6 Zusammenfassung: Gasinjektionstechnik

Die Gasinjektionstechnik wurde in den 1970er Jahren entwickelt und ermöglicht es, geschlossene Hohlprofile zu fertigen. Die zwei am häufigsten verwendeten Verfahrensvarianten sind das Short-Shot- und das Nebenkavitätsverfahren (vgl. Abbildung 13). Die Gasinjektionstechnik als ein Sonderverfahren des Spritzgießens ist in Kombination mit un- und kurzfaserverstärkten Polymeren bereits gut erforscht. Der Einsatz von LGF ist hingegen noch nicht untersucht worden. Die Verfahrenskombination aus Fließpressen und Gasinjektionstechnik wurde bisher nur rudimentär untersucht und hierbei lediglich das Short-Shot-Verfahren betrachtet.

Für die Ausbildung der Gasblase sind sechs übergeordnete Einflussgrößen zu nennen. Dies sind die Formteilgeometrie, das Werkzeug, die Maschinenparameter, der Gasinjektor, die Gasinjektionsparameter und der eingesetzte Kunststoff. Erst wenn diese Einflussgrößen aufeinander abgestimmt sind, entsteht eine homogene Gasblase, die es ermöglicht, die Potenziale der Gasinjektionstechnik zu nutzen.

Eine Besonderheit der Gasinjektionstechnik stellt das Aufschäumen der Grenzschicht von Polymer und Gasblase da. Hierbei kommt es zum Eindiffundieren des Gases in das Polymer wodurch es im Laufe des Prozesses zu Schaumbildung kommen kann. Dies gilt es zu verhindern, da die Schaumbildung zu einer Minderung der mechanischen Eigenschaften des Bauteils führt.

## 4 Wissenschaftliche Fragestellungen und Lösungsansätze

Die wissenschaftlichen Fragestellungen und Lösungsansätze werden im Folgenden in drei Kategorien untergliedert. Diese sind die Kategorie „Prozess- und Verfahrensentwicklung“, „mechanische und mikrostrukturelle Eigenschaften“ sowie „Leichtbaupotenziale und Anwendungsfelder“. Anhand dieser Untergliederung wird eine systematische Herangehensweise unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gesichtspunkte ermöglicht.

### **Prozess- und Verfahrensentwicklung**

Die bisher bekannten Erfahrungen zum GasComp-Prozess wurden im Rahmen der Dissertation von Brzeski (2011) erarbeitet und stellen eine erste Machbarkeitsstudie dar. Dabei zeigt Brzeski, dass mit einem hybriden Fertigungsprozess, bestehend aus Fließpressen und Gasinjektionstechnik, eine Verarbeitung von langfaserverstärktem Polypropylen grundsätzlich möglich ist. Seine Ergebnisse beziehen sich jedoch lediglich auf die Verfahrensvariante Short-Shot.

Daraus leiten sich folgende Fragestellungen ab:

- Wie kann der GasComp-Prozess auf LFT übertragen werden und welche verfahrenstechnischen Anpassungen sind aufgrund der geänderten Materialcharakteristik zu treffen?
- Worin unterscheiden sich im GasComp-Prozess gefertigte Versuchsbauteile von im GAIM-Prozess gefertigten Versuchsbauteilen hinsichtlich der Hohlraumausbildung, der Oberflächenanmutung und des Faserfüllgrads?

Zur Beantwortung dieser Fragen wird ein Werkzeug konstruiert, das sowohl im Fließpress- als auch im Spritzgussprozess mit Gasinjektionstechnik eingesetzt werden kann. Darüber hinaus können beide Verfahrensvarianten (Short-Shot- und Nebenkavitätsverfahren) abgebildet werden, wodurch ein Verfahrensvergleich ermöglicht wird. Die Gegenüberstellung erfolgt zunächst in einer Machbarkeitsstudie, an welche sich eine detaillierte Untersuchung anschließt. Sowohl die Machbarkeitsstudie als auch die Detailuntersuchungen werden anhand des gleichen Versuchsbauteils vorgenommen.

### **Mechanische und mikrostrukturelle Eigenschaften**

Brzeski weist im Ausblick seiner Dissertation darauf hin, dass es noch keine Erkenntnisse zum Einfluss des Bearbeitungsprozesses auf die mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften des Bauteils gibt. Schröder und Oelgart (Schröder 1997; Oelgarth 1997) haben hierzu Erkenntnisse im Bereich des Spritzgusses mit Gasinjektionstechnik publiziert. Dabei beschreiben sie ausschließlich die Mikrostruktur von un- und kurzfaserverstärkten Polymeren. Um die Potenziale des GasComp-Prozesses ermitteln und beschreiben zu können, gilt es folgende Fragestellungen zu beantworten und zu bewerten:

- Welche mechanischen Eigenschaften weisen Versuchsbauteile auf, die im GasComp-Prozess hergestellt werden und wie stellt sich der Vergleich zu im GAIM-Prozess gefertigten Bauteilen dar?
- Welchen Einfluss haben die Prozess- und Verfahrensvarianten auf die werkstofflichen Eigenschaften der Versuchsbauteile und gibt es einen Einfluss des Granulattyps?

Um Antworten auf die Forschungsfragen zu finden, werden systematische Untersuchungen in Form von Versuchsreihen durchgeführt. Dabei werden in einem ersten Schritt die Grenzen der Prozesse und Verfahrensvarianten ermittelt und somit die prozess- und verfahrensspezifischen Prozessfenster definiert. Anschließend werden im Rahmen von nachgelagerten Versuchsreihen Versuchsbauteile sowohl im GasComp- als auch im GAIM-Prozess mit unterschiedlichen Parametervariationen gefertigt. Dabei werden beide Granulattypen verarbeitet. Die so gefertigten unterschiedlichen Versuchsbauteile werden mechanisch mittels Biege- und Torsionsprüfung analysiert. Für die mikrostrukturellen Analysen werden Träger der gleichen Versuchsreihen mittels Computertomographie, REM und einer Faserlängenanalyse untersucht.

### **Leichtbaupotenziale und Anwendungsfelder**

In der Kunststoffverarbeitung werden standardmäßig klassische „Auf – Zu – Maschinen“ eingesetzt. Dieser Maschinentyp ermöglicht es nicht ohne Weiteres, Hohlstrukturen zu fertigen. Mittels aufwändiger Schiebertchnik ist dies in gewissen Grenzen möglich, dennoch werden bisher geschlossene, dünnwandige und faserverstärkte Profile mit großen Durchmessern ausschließlich im Extrusionsverfahren hergestellt. Dieser kontinuierliche Prozess bietet, anders als das Spritzgießen, keine Möglichkeit der Funktionsintegration, sodass auf diese Weise gefertigte Profile häufig als Halbzeuge verwendet werden. Eine Weiterverarbeitung der Halbzeuge als Einlegeteil im Spritzguss ist stark limitiert, da weder die Abdichtproblematik beim Einlegen noch das Kollabieren beim Umspritzen bisher gelöst sind. Daraus leiten sich folgende Fragen ab:

- Mit welcher der erprobten Kombinationen aus Prozess, Verfahrensvariante und Material können dünnwandige Hohlprofile mit einem großen Durchmesser gefertigt werden und welche Kombination bietet das größte Leichtbaupotenzial?
- Für welche potenziellen Bauteile ist diese Fertigungstechnologie geeignet und wie kann eine Funktionsintegration umgesetzt werden?
- Welche der erprobten Kombinationen ist für eine industrielle Großserienfertigung am ehesten geeignet?

Das Leichtbaupotenzial wird auf Basis des Massenbedarfs ermittelt, dieser wird durch die Werkstoffcharakteristik, die Bauteilgeometrie und den Lastfall beeinflusst. Um die Chancen einer Funktionsintegration zu ermitteln, wird die Geometrie des Technologieträgers so gewählt, dass diese in Teilen einer Bauteilgeometrie ähnelt. Durch Vorhalte, welche die Integration von Schweißpunkten, Klipsen und Domen ermöglichen, wird diesem Punkt Rechnung getragen. Eine Bewertung für einen möglichen Großserieneinsatz der Fertigungstechnologien erfolgt auf Basis der durch die Versuchsdurchführung gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen.

Durch zahlreiche Versuchsreihen wird in dieser Arbeit eine große Anzahl an möglichen Parametervariationen systematisch analysiert. Durch den Vergleich von GasComp-Prozess mit dem etablierten GAIM-Prozess, werden die Vor- und Nachteile der Prozesse aufgezeigt und deren Einordnung ermöglicht.

## 5 Materialien und Methoden

### 5.1 Langfasergranulate

Wie unter 3.1.3 beschrieben, gibt es zwei unterschiedliche Arten von Langfasergranulaten, die für den industriellen Einsatz zur Verfügung stehen. Nachfolgend werden diese als ummantelt (um) und pultrudiert (pu) bezeichnet und der Glasfasergehalt in Gewichtsprozent als Zahl angegeben. Neben der unterschiedlichen Vorkonsolidierung der Fasern im Granulat, unterscheiden sich die Langfasergranulate in ihrer Länge und somit auch in der Länge der darin enthaltenen Glasfasern. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wesentlichen Eigenschaften der beiden Granulattypen in Abhängigkeit des Glasfasergehalts.

**Tabelle 3 Übersicht Eigenschaften der Langfasergranulate**

| Granulattyp                  | Pultrudiert     |                 | Ummantelt       |                 |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                              | 30 <sup>1</sup> | 40 <sup>2</sup> | 30 <sup>3</sup> | 40 <sup>4</sup> |
| Glasfasergehalt [Gewichts-%] | 30 <sup>1</sup> | 40 <sup>2</sup> | 30 <sup>3</sup> | 40 <sup>4</sup> |
| Granulat-/Faserlänge [mm]    | 11              | 11              | 15              | 15              |
| Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]  | 1120            | 1210            | 1120            | 1220            |
| Zug-Modul [MPa]              | 7000            | 9200            | 6600            | 8300            |
| Biegemodul bei 23°C [MPa]    | 7000            | 9000            | 5900            | 7850            |
| Verarbeitungstemperatur [°C] | 230-270         | 230-270         | 220-280         | 220-280         |

<sup>1</sup> Pultrudiert 30 Gew.-% GF (CELSTRAN® PP-GF0453 P10/10 – PP-GF30)

<sup>2</sup> Pultrudiert 40 Gew.-% GF (CELSTRAN® PP-GF0453 BLACK – PP-GF40)

<sup>3</sup> Ummantelt 30 Gew.-% GF (SABIC® STAMAX™ 30YM240E)

<sup>4</sup> Ummantelt 40 Gew.-% GF (SABIC® STAMAX™ 40YM240E)

### 5.2 Versuchsanlagen

In diesem Abschnitt werden die für die Versuche eingesetzten Anlagen vorgestellt und die notwendigen Spezifikationen beschrieben.

#### Aufbau der Fließpressanlage

Bei der für die Versuche verwendeten Anlage handelt es sich um eine Technikumsanlage, die für den GasComp-Prozess modifiziert wurde. Der Aufbau der Anlage besteht aus der Presseneinheit und der daran gekoppelten Plastifiziereinheit. Bei der Schließeinheit handelt es sich um eine hydraulische Vertikalpresse (R+S GmbH, Bocholt, Deutschland) mit einer Zuhaltkraft von 2000 kN. Bei der verwendete Plastifiziereinheit (Multi-plug 80 L– Version, Sumitomo (SHI) Demag GmbH, Schwaig, Deutschland) ist eine 3-Zonen-Standard-Schnecke (Schnecken-durchmesser vom 60 mm) mit Rückstromsperre verbaut. Die Anlagensteuerung wurde so angepasst, dass ein zeitabhängiges Plastifizieren möglich ist und die Plastifiziereinheit somit wie ein Einschneckenextruder betrieben werden kann. Der Düsendurchmesser beträgt 6 mm.

#### Aufbau der Spritzgussanlage

Für die Spritzgussversuche wird eine hydraulische Spritzgussanlage (Allrounder 820 S 4000-2100, ARBURG Holding GmbH + Co. KG, Loßburg, Deutschland) verwendet. Hier ist ebenfalls eine 3-Zonen-Standard-Schnecke mit Rückstromsperre und einem 60 mm Durchmesser verbaut. Die Schließkraft beträgt 4000 kN.

### Aufbau der Gasinjektionseinheit

Die Gasinjektionseinheit besteht im Wesentlichen aus einem Kompressor mit Druckspeicher (VERTICUS, BAUER KOMPRESSOREN GmbH, München, Deutschland), der den Stickstoff auf bis zu 320 bar verdichtet und zwischenspeichert sowie einer Regeleinheit (Compact Gasregelgerät Typ 2V-B0; Stieler Kunststoff Service GmbH, Goslar, Deutschland). Mittels der Regeleinheit werden der Maximaldruck, der Druckverlauf, die Aufbau- und Abbauzeit sowie die Haltezeit und damit das Gasdruckprofil gesteuert. Es können Gasdruckprofile mit bis zu vier unterschiedlichen Druckrampen eingestellt werden. Sowohl für die Versuche mit dem Gas-Comp-Prozess als auch für die Versuche mit dem GAIM-Prozess wird die gleiche Gasinjektionseinheit verwendet.

### 5.3 Werkzeugkonzept

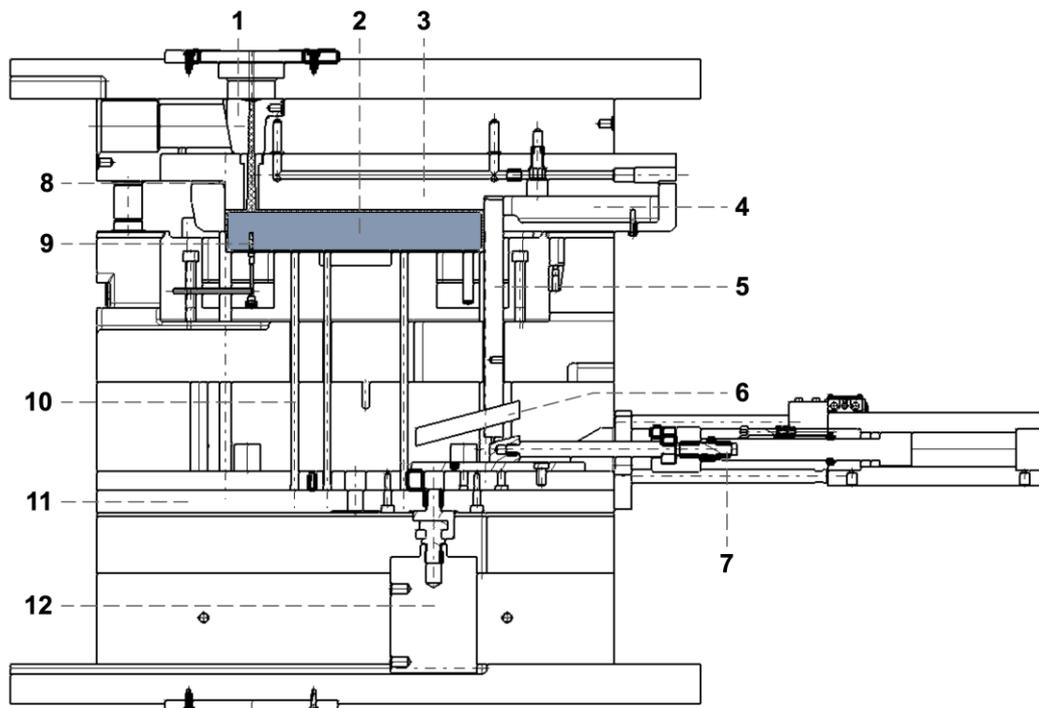
Abbildung 22 zeigt den Aufbau des hybriden Versuchswerkzeugs mit Tauchkante. Beim Fließpressverfahren wird das schmelzflüssige Polymer in die Matrize eingelegt. Wird das Werkzeug geschlossen, taucht der Stempel mit seiner Tauchkante ein. Dadurch nimmt das entstehende Bauteil die Innenform der Matrize an (Dietrich 2018).

Neben dem Fließpressen kann das Werkzeug auch zum Spritzgießen verwendet werden. Es verfügt über eine Angussbuchse mit einem Strangangusssystem. Anders als bei typischen Spritzgusswerkzeugen gibt es keine Trennebene auf der die beiden Werkzeughälften abdichten. Stempel und Tauchkante sind exakt tuschiert, sodass diese mit einem minimal möglichen Spalt ein Austreten der Schmelze beim Spritzgießen verhindern.

Hinsichtlich der Gasinjektionstechnik kann das Werkzeug dank eines hydraulisch betätigten Schiebers, der eine Nebenkavität freigibt bzw. abtrennt, sowohl für das Short-Shot- als auch für das Nebenkavitätsverfahren verwendet werden. Das Volumen der Nebenkavität ist so gewählt, dass theoretisch bis zu  $2/3$ , des Volumens der Hauptkavität verdrängt werden können. Der Schieber wird über eine Keil-Kinematik betätigt, die Spalthöhe der Öffnung zur Nebenkavität wird über einen mechanischen Anschlag eingestellt und beträgt 2 mm. Neben dem Schieber wird auch die Auswerferplatte über einen Hydraulikzylinder angesteuert.

Die Gasinjektion erfolgt über einen im Werkzeug verbauten Injektor, der sich gegenüber dem Anguss befindet und damit maximal weit von der Nebenkavität entfernt liegt. Da es sich um einen feststehenden Injektor handelt, ist dieser in Entformungsrichtung eingebracht. Andernfalls würde ein Hinterschnitt entstehen, d.h. eine Geometrie die nicht entformt werden kann.

Auf Grund des Anlagenaufbaus variiert die Einbaulage des Werkzeugs zwischen den Fließpress- und Spritzgussversuchen. Wegen des vertikalen Hubs der Presse wird das Werkzeug für das Fließpressen entsprechend vertikal eingebaut. Dies erleichtert das Einlegen des Plastifikats erheblich. Bei den Spritzgussversuchen wird das Werkzeug auf der Spritzgussmaschine mit horizontaler Schließeinheit so gerüstet, dass sowohl Gasinjektor als auch Anspritzpunkt an der tiefsten Stelle liegen. Das verhindert ein schwerkraftinduziertes Fließen der Schmelze während des Einspritzvorgangs.



- |  |  |
|--|--|
| 1 Angussbuchse – min. Ø 5 mm   | 7 Hydraulikzylinder für die Steuerung des Sperrschiebers |
| 2 Matrize / Kavität mit Formteil (mit Stranganguss beim Spritzgussprozess) | 8 Tauchkante   |
| 3 Stempel  | 9 Gasinjektor  |
| 4 Nebenkavität Volumen: 416 cm <sup>3</sup>                                | 10 Auswerferstifte                                       |
| 5 Sperrschieber  | 11 Auswerferplatte                                       |
| 6 Keilkinematik für Sperrschieber  | 12 Hydraulikzylinder für Auswerfersystem                 |

Abbildung 22 Schnittdarstellung des hybriden Versuchswerkzeugs mit Tauchkante (8) und Formteil (2) (blau hervorgehoben) sowie den weiteren Funktionsdetails.

## 5.4 Technologieträger

In Abhängigkeit des Lastfalls hängen die zu erzielenden mechanischen Kennwerte eines Bauteils neben dem Materialtyp auch von der Materialverteilung in der Querschnittsebene ab. Für die Lastfälle Druck und Torsion eignen sich stabförmige Hohlstrukturen am besten. Dies ist auf die Materialverteilung zurückzuführen, da die lasttragenden Bereiche möglichst weit von der neutralen Faser entfernt sind. Stabförmige Hohlstrukturen sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Länge ( $L$ ) stets groß gegenüber der Querschnittsabmessung ist. Dünnwandigkeit ist gegeben wenn eine relative Kleinheit der Wanddicke ( $t$ ) gegenüber den anderen Querschnittsabmessungen ( $d$ ) gegeben ist (Klein, Gänsicke 2019):

$$t \ll d \ll L \quad \text{bzw.} \quad t < (0,5 - 0,07) * d \quad (\text{Gl. 5})$$

Wird der Lastfall Biegung betrachtet, weisen die Querschnittsformen I-Profil und Rechteckhohlprofil höhere Flächenträgheitsmomente ( $I$ ) und Widerstandsmomente ( $W$ ) auf als ein Kreisquerschnitt. Dies liegt daran, dass der Bereich mit dem größten Abstand zur Biegeachse entscheidend ist. Wenn jedoch die Biegeachse im späteren Einsatzszenario nicht bekannt oder wechselnd ist, hat der Kreisquerschnitt den entscheidenden Vorteil, dass er keine Vorzugsbiegeachse hat (Trzesniowski 2014; Kunz, Lukic 2006; Klein, Gänsicke 2019).

Sowohl die Untersuchung des Fertigungsverfahrens als auch die mechanischen Prüfungen werden anhand eines Technologieträgers durchgeführt. Dieser wird aus den oben genannten Gründen so ausgelegt, dass seine Dimensionen einem stabförmigen Hohlkörper mit annähernd kreisrundem Querschnitt entsprechen. Der Technologieträger weist eine Länge von 300 mm bei einer Breite von 52 mm und einer Höhe von 50 mm auf. Die Höhe setzt sich aus einem Quader von 25 mm und einem halbierten Rundstab ( $d = 25$  mm) zusammen. Die Entformungsschrägen haben einen Winkel von  $4^\circ$ . Für einen Vollkörper ergibt sich ein Volumen von  $676 \text{ cm}^3$  (ohne Anguss) und ein axiales Flächenträgheitsmoment von  $413810 \text{ mm}^4$ . Für die Berechnung des Flächenträgheitsmoments werden die Entformungsschrägen vernachlässigt. Die Berechnung der Flächenträgheitsmomente für die einzelnen Hohlstrukturen kann erst nach Ermittlung der sich ergebenden tatsächlichen Querschnittsflächen erfolgen.

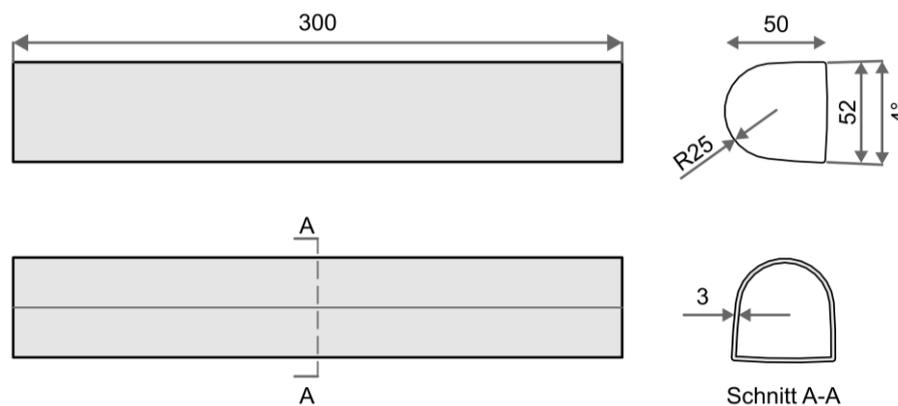


Abbildung 23 Technische Zeichnung des Technologieträgers mit Bemaßung (Länge ( $L$ ) = 300 mm; Querschnittsabmessungen ( $d$ ) = 50 mm und Wanddicke ( $t$ ) = 3 mm) und Schnittdarstellung als idealer Hohlkörper mit homogener Restwanddicke. Verarbeitungsprozesse und Verfahrensvarianten

## 5.5 Verarbeitungsprozesse und Verfahrensvarianten

Es werden sowohl die im Stand der Technik vorgestellten Verarbeitungsprozesse Fließpressen mit Gasinjektionstechnik (GasComp-Prozess) und Spritzguss mit Gasinjektionstechnik (GAIM-Prozess) als auch die Verfahrensvarianten Short-Shot und Nebenkavitätsverfahren so beschrieben, wie sie bei der Versuchsdurchführung angewendet werden.

### GasComp-Prozessschritte:

#### 1. Plastifizieren:

Das Plastifizieren erfolgt zeitabhängig, das heißt es wird kein Dosiervolumen vorgegeben, sondern eine Dosierzeit. Während dieses Zeitintervalls extrudiert die Plastifiziereinheit kontinuierlich Granulat, somit arbeitet die Einspritzeinheit als Einschneckenextruder. Aufgrund der offenen Düse ergibt sich kein Staudruck.

Der Strang wird ungeordnet in einem Auffangbehälter abgelegt, sodass ein Plastifikat aus mehreren Metern extrudiertem FKV entsteht. In Abhängigkeit von Granulattyp und angestrebtem Vorfüllgrad liegt die Dosierzeit im Bereich von 42 bis 92 Sekunden.

#### 2. Transfer des Plastifikats:

Nachdem der Plastifiziervorgang abgeschlossen ist, wird das Plastifikat unmittelbar in die Kavität überführt und mittels eines Stempels positioniert und vorverdichtet, sodass keine Masse über die Tauchkante in horizontaler Richtung hinausragt. Dies gilt es zu vermeiden, da es

sonst durch die Glasfasern zu stark abrasivem Verschleiß an der Tauchkante kommt. Der Transfer des Plastifikats samt Positionierung und Vorverdichtung benötigt rund 25 Sekunden.

### 3. Pressvorgang und Gasinjektion:

Sobald das Plastifikat positioniert ist, beginnt der Pressvorgang. Nachdem das Werkzeug geschlossen und die Presse verriegelt ist (Dauer ca. 20 Sekunden), kann die Gasinjektion gestartet werden. Hierbei besteht die Option eine Verzögerungszeit einzustellen. Nach Abschluss der Gasdruckhaltephase, die dem Nachdruck und der Kühlzeit entspricht und mit dem Abbau des Gasdrucks endet, wird die Presse geöffnet und der Träger mittels des hydraulischen Auswerfersystems entformt.

#### **GAIM-Prozessschritte:**

Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal zum konventionellen Spritzgussprozess wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Nachdruckphase durch die Gasdruckphase substituiert wird (vgl. 3.2.2). Eine detaillierte Ablaufbeschreibung der Prozesse ist im Anhang zu finden.

#### **Short-Shot-Verfahrensschritte**

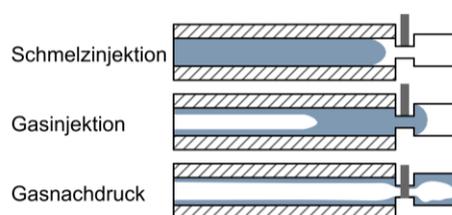
Die Verfahrensschritte entsprechen dem unter 3.2.3 beschriebenen Ablauf, sodass diese hier ohne detaillierte Beschreibung aufgeführt werden.

1. Teilfüllung der Kavität mit Polymerschmelze
2. Gasinjektion zur Ausformung des Bauteils
3. Gasnachdruckphase

#### **Nebenkavitätsverfahren – Verfahrensschritte**

Bei den Verfahrensschritten des Nebenkavitätsverfahrens kommt es zu einer Detailanpassung im Vergleich zu dem in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Ablauf.

1. Die Schmelzinjektion erfolgt bei geöffnetem Schieber zur Nebenkavität.
2. Die Gasinjektion folgt wie unter 3.2.3 beschrieben.
3. Bevor der Gasnachdruck einsetzt, wird der Gasdruck im System verringert und der Schieber zur Nebenkavität geschlossen. Somit wirkt der Nachdruck nur in der Hauptkavität. Dies ist der wesentliche Unterschied zu dem im Stand der Technik vorgestellten Verfahrensablauf (siehe Abbildung 24).



**Abbildung 24** *Angepasstes Nebenkavitätsverfahren mit geöffneter Nebenkavität während der Schmelzinjektion und abgetrennter Nebenkavität während der Gasnachdruckphase.*

## **5.6 Mechanische Analysemethoden**

In diesem Unterkapitel werden die drei Analysemethoden beschrieben, die zur Charakterisierung der Prüfkörper eingesetzt werden. Als quasistatische mechanische Prüfungen werden die Drei-Punkt-Biegeprüfung und die Torsionsprüfung durchgeführt.

### Drei-Punkt-Biegeprüfung

Mittels der Drei-Punkt-Biegeprüfung wird das Verhalten der FKV-Hohlstruktur unter Biegebelastung charakterisiert. Dieser Lastfall tritt häufig in der Praxis auf und ist daher von entscheidender Bedeutung bei der Bauteilauslegung (Grellmann, Seidler 2015).

Der Probekörper wird in einer Universalprüfmaschine entweder bis zum Bruch oder bis zu einem vorher definierten Verformungswert mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit verformt. Die Prüfkraft  $F$  wird über eine Kraftmessdose gemessen, die Durchbiegung ergibt sich aus dem Verfahrweg der Traverse (Frick, Stern 2017).

Die Spannungen und Dehnungen sind unter Annahme eines linear-elastischen Werkstoffverhaltens symmetrisch und linear über den Probekörperquerschnitt verteilt (Abbildung 25). In der Mitte des Prüfkörpers liegt die neutrale Faser, die frei von Spannungen und Dehnungen ist. Bei Hohlkörpern wird die resultierende Wanddicke zur Berechnung des Widerstandsmoments verwendet. Liegt Dünnwandigkeit vor, so kann die Vereinfachung getroffen werden, dass die Flächenträgheitsmomente für die Profilmittellinie formuliert werden und Terme der Wanddicke mit höherer Ordnung als eins vernachlässigt werden (Klein, Gänsicke 2019).

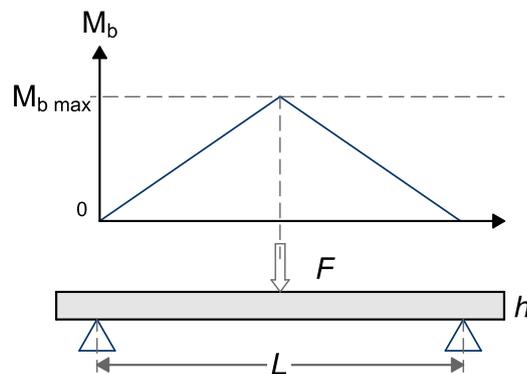


Abbildung 25 Schematische Darstellung des Biegemomentenverlaufs in einem symmetrischen Profil bei einer 3-Punkt-Biegung (Frick, Stern 2017).

Die maximale Zug- beziehungsweise Druckspannung tritt in der äußeren Randschicht der Probe auf. Die maximale Biegespannung  $\sigma_f$  berechnet sich im 3-Punkt-Biegeversuch für einen rechteckigen Biegestab aus dem maximalen Biegemoment in der Probenmitte  $M_b = F * L/4$  und dem Widerstandsmoment  $W_b = 2 * I/h$

$$\sigma_f = \frac{M_b}{W_b} = \frac{3 * F * L}{2 * b * h^2} \quad (\text{Gl. 6})$$

$F$  ist hier die Biegekraft,  $b$  die Breite und  $h$  die Dicke beziehungsweise Höhe der Probe.  $I$  kennzeichnet das axiale Flächenträgheitsmoment für den prismatischen Probekörper.

Die Randfaserdehnung  $\varepsilon_f$  errechnet sich für den 3-Punkt-Biegeversuch aus den gemessenen Durchbiegungen  $s$ , der Probendicke  $h$  sowie der Stützweite  $L$  (Frick, Stern 2017).

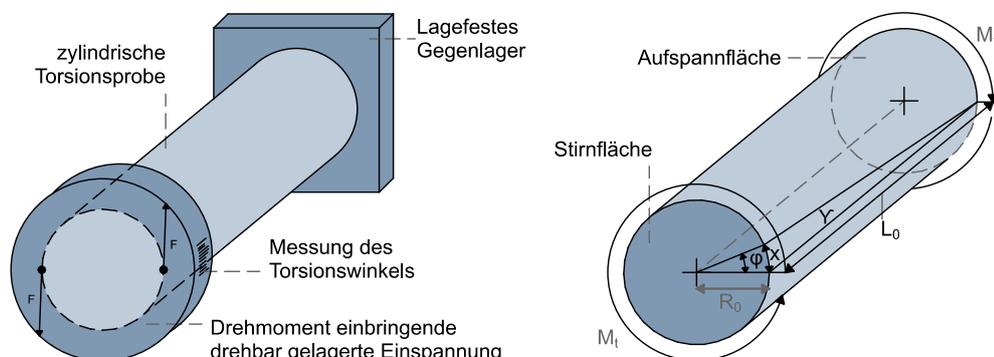
$$\varepsilon_f = \frac{6 * s * h}{L^2} \quad (\text{Gl. 7})$$

Die Bestimmung der Biegeeigenschaften erfolgt in Anlehnung an die DIN EN ISO 14125. Diese Norm beschreibt die Versuchsdurchführung für diskontinuierliche faserverstärkte Kunststoffe. Da es sich bei dem zu prüfenden Technologieträger um keinen Normprüfkörper handelt, wird zunächst die reine Biegekraft erfasst. In einem nachfolgenden Schritt werden die Querschnittsfläche und die Lage der Gasblase in der Bruchebene ermittelt. Aus diesen Geometriefaktoren wird das Flächenträgheitsmoment bestimmt und daraus die Biegespannung berechnet. Zur Berechnung des Widerstandsmoments wird der maximale senkrechte Abstand der Randfaser zur neutralen Faser mit 25 mm festgelegt.

Die Prüfungen werden mit einer Zwick Universalprüfmaschine (Z250SE; ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) unter quasistatischen Prüfbedingungen durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 10 mm/min.

### Torsionsprüfung

Die Ermittlung eines Werkstoffkennwerts über Torsionsversuche ist eher unüblich, da der Geometriefaktor über die Torsionsachse einen großen Einfluss auf den Prüfkörper hat. Eine Ausnahme stellt hier die dynamisch-mechanische Analyse dar, bei der ein genormter Prüfkörper mittels Torsion geprüft werden kann. Bei der Prüfung von Bauteilen lassen sich somit ausschließlich Bauteile mit denselben Abmessungen vergleichen oder solche, bei denen die gleichen Kräfte angreifen. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 26 für eine zylindrische Torsionsprobe dargestellt. Eine Seite der Probe wird fest eingespannt und auf der anderen Seite der Probe wird ein Drehmoment über eine drehbar gelagerte Einspannung aufgebracht (Frick, Stern 2017).



**Abbildung 26** Prinzipieller Aufbau eines *Torsionsversuchs* (links) mit Festlager und Drehmoment einbringender Einspannung. Darstellung des aufgebrachten Torsionsmoments  $M_t$  (rechts) und der *Verdrillung* der Torsionsprobe (vgl. Frick, Stern 2017).

Die Torsionsprobe wird mittels eines von außen aufgetragenen und stetig ansteigenden Torsionsmoments  $M_t$  bis zu einer bestimmten Verformung oder zum Versagen verformt. Während der fortschreitenden Verformung drehen sich die Querschnitte der Probe um die Probenlängsachse. Hierdurch geht eine anfangs axial verlaufende Mantellinie der Probe in eine Schraubenlinie konstanter Steigung über. Die Stirnfläche, die den Abstand  $L_0$  von der Aufspannfläche aufweist, wird gegenüber dieser um den Torsionswinkel  $\varphi$  verdreht. Ein auf dem Stirnflächenumfang liegender Punkt wird um die Strecke  $x$  verschoben und eine anfangs axial laufende Mantellinie um den Schiebewinkel  $\gamma$  geschert. Das Torsionsmoment  $M_t$  wird in Abhängigkeit des Torsionswinkels  $\varphi$  aufgezeichnet.

Die maximale Torsions- bzw. Schubspannung  $\tau_R$  steigt aufgrund des radienunabhängigen Torsionswinkels  $\varphi$  mit zunehmendem Radius  $r$  linear an, sodass am Probenrand ihr Maximum erreicht wird. Die Berechnung erfolgt unter Verwendung des polaren Flächenträgheitsmoments  $I_p$  und des Torsionsmoments  $M_t$  nach der Gleichung:

$$\tau_R = \frac{M_t}{I_p} \quad (\text{Gl. 8})$$

Bei nicht rotationssymmetrischen geschlossenen Profilen, die beidseitig eingespannt sind, kann es im Zuge der Torsionsprüfung zu einer Verwölbung kommen, die eine Verformung des Profils in Trägerlängachse darstellt. Dadurch liegt der zuvor unverformte ebene Querschnitt nach der Verformung nicht mehr in einer Ebene. Diese Art der Torsion wird als „Saint-Venant-sche Torsion“ benannt. Als wölbfrei können alle polygonen Profile mit konstanter Wanddicke angesehen werden, die einen Inkreis aufweisen, der alle Wandabschnitte in der Profilmittellinie tangiert. Ein solcher Inkreis existiert, wenn die Winkelhalbierenden der Innenwinkel sich im Mittelpunkt des Inkreises schneiden (Linke, Nast 2015).

Die Torsionsprüfungen werden mit einer Zwick Zweiachs-Torsionsprüfmaschine (Z250SE mit Torsionsantrieb; ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) durchgeführt. Die maximale Biegekraft beträgt 250 kN und das maximal mögliche Drehmoment beläuft sich auf 2000 Nm. Dabei werden die Messsignale Kraft, Moment, axiale Kraft und Drehwinkel aufgenommen. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 45°/min. Die Hohlkörper werden an den Stirnflächen je 60 mm in den Spannbacken eingespannt, sodass sich eine freie Länge von 180 mm ergibt.

## 5.7 Leichtbaupotenzial

Bei der Werkstoffauswahl ist das Leichtbaupotenzial in vielen Anwendungsbereichen ein entscheidendes Kriterium. Dabei wird im modernen Leichtbau versucht mit FKV neue Anwendungen zu erschließen. Um einen zweckgerechten Werkstoffeinsatz zu ermöglichen, muss das Potenzial des Werkstoffs bekannt sein, sodass ein Vergleich unterschiedlicher Werkstoffe möglich ist. Dafür wurden quantifizierende Größen und Auswahlkriterien definiert. Im Folgenden werden die Gütekennzahl und die Leichtbaukennzahl als Auswahlkriterium vorgestellt.

### Normierte Gütekennzahl

Die normierte Gütekennzahl stellt eine Erweiterung der bezogenen Werkstoffeigenschaften wie dem spezifischen Volumen  $\left(\frac{1}{(g*\rho)}\right)$ , der spezifischen Festigkeit  $\left(\frac{E}{(g*\rho)}\right)$ , dem Stabilitätswiderstand  $\left(\frac{\sqrt{E}}{(g*\rho)}\right)$  und der Reißlänge  $\left(\frac{R_m}{(g*\rho)}\right)$  dar. Eine Normierung der Gütekennzahl gibt somit an, um wie viel ein geometrisch ähnliches Bauteil aus dem betrachteten Werkstoff leichter oder schwerer ist ( $<1$  = leichter,  $>1$  = schwerer). Damit kann mittels der normierten Gütekennzahl eine Zuordnung von Werkstoffen zu bestimmten Beanspruchungscharakteristika erfolgen, sodass eine schnelle Vorauswahl des Werkstoffs möglich ist (Klein, Gänsicke 2019).

### Leichtbaukennzahl

Um bei einer Werkstoffentscheidung die Belastung und die Geometrie realer zu erfassen wurde die Leichtbaukennzahl (LBK) eingeführt. Dabei stellt die LBK das Verhältnis zwischen der Gesamtlast  $F_G$ , die ein Werkstoff aufnehmen kann und Eigenlast  $F_E$  (Eigengewicht) dar.

$$LBK = \frac{F_G}{F_E} \quad (\text{Gl. 9})$$

Je größer der Wert der LBK wird desto besser ist der gewählte Werkstoff bei dem vorliegenden Belastungsfall für eine Leichtbaukonstruktion geeignet. Diese allgemeine Kennzahl kann auf unterschiedliche Belastungsfälle beispielsweise Zug und Biegung angewendet werden. Dabei wird für die Berechnung die Streck- bzw. Dehngrenze  $R_{p0,2/eH}$  als zulässigen Gesamtlast gewählt. Die Eigenlast bzw. Masse setzt sich aus der Länge  $L$ , der Querschnittsfläche  $A$ , der Dichte  $\rho$  und der Gewichtskonstanten  $g$  zusammen. Daraus folgt nach Klein für die Leichtbaukennzahl eines Biegebalkens mit Rechteckquerschnitt und mit zwei Stützen (Klein, Gänsicke 2019):

$$LBK_b = \frac{F_G}{F_E} = \frac{2}{3} * \frac{R_{p0,2/eH}}{(g * \rho) * L^2/h} \quad (\text{Gl. 10})$$

Durch die absolute Größe des Zahlenwerts, als Ergebnis der LBK-Berechnung, wird die Vorteilhaftigkeit einer speziellen Werkstoffauswahl für den Leichtbau geäußert.

## 5.8 Mikrostrukturelle Analysemethoden

In diesem Unterkapitel werden die drei Analysemethoden vorgestellt, mit deren Hilfe die Mikrostruktur der Technologieträger analysiert wird. Im Rahmen der Computertomographie-Analysen werden, sofern nicht explizit anders erwähnt, Bereiche in der Mitte des Trägers betrachtet, da diese bei der mechanischen Analyse am stärksten belastet werden.

### Faserlängenanalyse (FASEP®)

Die Bestimmung der Glasfaserlängenverteilung sowohl im Plastifikat als auch in den Probekörpern ist von großer Bedeutung um die Faserschädigung während des Verarbeitungsprozesses zu beurteilen. Im Besonderen wird hier der Fokus auf den Vergleich von Spritzguss- und Fließpressverfahren gelegt. Hierfür wird das FASEP®-System (FASEP® 3E Eco, IDM Systems, Darmstadt, Deutschland) verwendet. Dies ist eine Gesamtlösung zur Bestimmung der Faserlängen, mit der unterschiedlichste Faserarten (Glas, Carbon, Aramid) analysiert werden können (Stengler u. a.; Birr 2015).

Hierfür werden die FKV-Proben zunächst verascht. Der dabei entstehende Veraschungsrückstand wird zur Vereinzelnung in einer Suspension aus destilliertem Wasser, Essigsäure und Glycerin aufgeschwemmt. Die so erzeugte Fasersuspension wird auf mehrere Petrischalen verteilt. Die Petrischalen werden anschließend mit einem Dunkelfeld-Belichtungssystem gescannt. Mittels der auf Grauwerten basierenden Bildanalyse-Software des FASEP-Systems, wird automatisch eine Faserlängenanalyse durchgeführt, deren Ergebnis in einem Histogramm sowohl anzahl- als auch gewichtsgemittelt ausgegeben wird.

Der Einfluss der Faserlänge wird bei einer gewichtsgemittelten Betrachtung deutlicher, da hier bei der Berechnung eine stärkere Gewichtung längerer Fasern vorgenommen wird. Die Berechnung der anzahlgemittelten Faserlänge ( $L_n$ ) und der gewichtsgemittelten Faserlänge ( $L_p$ ) erfolgt mittels folgender Formeln (Canadian Association for Composites Structures and Materials 2013; Rohde-Tibitz 2015; Birr 2015; Goris u. a. 2018):

$$L_n = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i l_i)}{\sum_{i=1}^n (N_i)} \quad (\text{Gl. 11})$$

$$L_p = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i l_i^2)}{\sum_{i=1}^n (N_i l_i)} \quad (\text{Gl. 12})$$

Mit:  $N_i$  = Anzahl der Fasern pro Klasse  
 $l_i$  = Länge der Fasern der Klasse

Die prozentuale Faserkürzung ( $FKZ$ ) gibt an, um wieviel Prozent die Faser von ihrer Ausgangsfaserlänge ( $L_A$ ) während des Verarbeitungsprozess eingekürzt wird:

$$FKZ_{L_n} = 100 - \frac{L_n}{L_A/100} [\%] \quad (\text{Gl. 13})$$

$$FKZ_{L_p} = 100 - \frac{L_p}{L_A/100} [\%] \quad (\text{Gl. 14})$$

Mit:  $L_A$  = Ausgangsfaserlänge  
 $L_n$  = Anzahlgemittelte Faserlänge  
 $L_p$  = Gewichtsgemittelte Faserlänge

Die Analyse erfolgt anhand offener Plastifikate für den GasComp-Prozess und Anguss-Stücken für den Spritzgussprozess. Für die Analyse werden die in nachfolgender Tabelle 4 aufgeführten Einstellungen verwendet.

**Tabelle 4 Einstellungen FASEP®-Analyse**

| Poben-<br>größe | Ofentem-<br>peratur | Zusammensetzung<br>Suspension  | Suspens-<br>ionsvol. | Auflösung<br>Scanner | Anzahl<br>Graustu-<br>fen | Minimale<br>Objekt-<br>größe |
|-----------------|---------------------|--|----------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Ca.<br>10 cm    | 550 °C              | Dest. Wasser; 20-prozentige<br>Essigsäure; Glycerin; Verhält-<br>nis: 100:10:2 | 500 ml               | 9600 dpi             | 256                       | 5 µm                         |

### Computertomographie (CT)

Die Computertomografie ist ein bildgebendes zerstörungsfreies Verfahren, das auf der Röntgentomografie beruht und eine Volumenrekonstruktion nutzt. Dabei können unter anderem die Porosität und die Faserorientierungen analysiert werden. Die Analyse erfolgt in einem dreistufigen Prozess: Bildaufzeichnung, Rekonstruktion eines 3D-Modells und Auswertung des Mo-

dells (Willems u. a.; Frick, Stern 2017). Um Bilder aufnehmen zu können, muss die zu untersuchende Probe zwischen einer Röntgenquelle und einem Detektor positioniert werden. Die Röntgenquelle emittiert Röntgenstrahlen, die in Abhängigkeit der Dichte der Probe teilweise absorbiert werden. Das heißt je höher die Materialdichte, desto mehr Röntgenstrahlung wird absorbiert. Die nicht absorbierten Röntgenstrahlen treffen auf den Detektor, wodurch eine röntgenoskopische Projektion der Probe an einer bestimmten Position entsteht. Zur Erstellung einer 3D-Rekonstruktion der gesamten Probe benötigt der Einzelbild-Zusammensetzungsalgorithmus die Projektionen aus einer 180°-Drehung. Zur Verbesserung der Qualität wird in der Regel eine vollständige Drehung um 360° vorgenommen.

Die Detektion von Dichteunterschieden, die in verschiedenen Grauwerten sichtbar werden, erfolgt mit einer Auswertesoftware (VGSTUDIO MAX Version 3.3, Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Deutschland). Diese ermöglicht sowohl Rückschlüsse auf Fehlstellen wie Poren oder Lunker als auch die Bestimmung der Faserorientierung im FKV.

Die zu betrachtenden Volumen werden in VGSTUDIO MAX Version 3.3 mit der Methode des adaptiven Rechtecks extrahiert und deren Oberflächen geschlossen, sodass keine Überbewertung von mit der Oberfläche verbundenen Poren erfolgt. Sowohl bei der Porositäts- als auch bei der Faserorientierungsanalyse wird die Schwellwertmethode verwendet. Dabei werden Poren und Fasern auf Basis von Grauwertunterschieden bzw. Gradienten detektiert. Für die Faserorientierungsanalyse wird die Referenzorientierungsanalyse eingesetzt. Dabei wird über eine Farbcodierung die Abweichung der Fasern von einer Referenzrichtung im Bereich von 0° bis 90° angegeben.

Für die Faseranalyse werden CT-Scans mit einer Auflösung unter 10 µm benötigt, da sonst keine Separierung der Einzelfasern möglich ist; für die Porositätsanalyse reicht eine Auflösung von 25 µm aus. Die CT Analyse wird mit einem Mikrofokussystem (YXLON FF35 CT, YXLON International GmbH, Hamburg, Deutschland) durchgeführt.

Die Parameter der Scans sind in Tabelle 5 aufgeführt:

**Tabelle 5 Einstellungen CT Analyse**

| Spannung | Stromstärke | Geometrische Vergrößerung | Detektor       | Röhre                  | Projektionen | Integrationszeit |
|----------|-------------|---------------------------|----------------|------------------------|--------------|------------------|
| 105 kV   | 85 µA       | Variabel                  | 1782 x 2116 px | FXE Transmissionsröhre | 3856         | 1,17 s           |

### **Rasterelektronenmikroskopie (REM)**

Bei der REM scannt ein fokussierter Elektronenstrahl zeilenweise die Oberfläche der sich in einem Vakuum befindlichen Probe. Die Interaktion des Elektronenstrahls mit der Probenoberfläche erzeugt Signale, die elektronisch erfasst und verstärkt werden. Die aufgenommenen Signale werden als Grauwerte wiedergegeben (Michler, Baltá Calleja 2012). Sofern der zu untersuchende Bereich gleich bleibt, können über 100.000-fache Vergrößerungen erreicht werden. Mit Hilfe der REM wird eine phänomenologische Betrachtung der Grenzfläche von Gasblase und Polymer vorgenommen, um mögliche mikrostrukturelle Veränderungen zu identifizieren. Zudem wird eine Bruchbildanalyse angefertigt, deren Fokus auf der Versagensart und der Faser-Matrix-Haftung liegt. Für die Untersuchungen wird eine Platinbeschichtung auf die Proben aufgebracht. Die Grenzflächenanalyse erfolgt mit einem FEI Quanta FEG 650 –

ESEM (Thermo Fisher Scientific Corp., Waltham, Massachusetts, USA) bei einer Beschleunigungsspannung von 15 kV unter Nutzung des Sekundärelektronen-Signals. Für die Bruchflächenanalyse kommt ein ZEISS SUPRA 55 VP (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Deutschland) mit einer Beschleunigungsspannung von 3 kV unter Nutzung des Sekundärelektronen-Signals zum Einsatz.

## **5.9 Zusammenfassung: Materialien und Methoden**

Dieses Kapitel stellte die zur Durchführung der Versuche und Analysen notwendigen Materialien, Anlagen, Technologieträger, Prozesse, Verfahrensvarianten und Analysemethoden mit den verwendeten Einstellungen bzw. Parametern vor. Darüber hinaus werden zwei Möglichkeiten zur Berechnung bzw. Ausweisung von Leichtbaupotenzialen beschrieben.

Insbesondere das Werkzeug steht im Fokus des Kapitels, das so aufgebaut ist, dass sowohl Spritzguss- als auch Fließpressprozess abgebildet werden können und dabei die Erprobung beider Verfahrensvarianten möglich ist. Für das Nebenkavitätsverfahren wurde eine Anpassung beschrieben, die von dem im Stand der Technik beschriebenen Verfahren leicht abweicht. Für die Analysemethoden wurde die Vorgehensweise beschrieben und die zur Berechnung der Kennwerte notwendigen Formeln eingeführt.

## 6 Machbarkeitsstudie – Definition des Prozessfensters

In diesem Kapitel wird die Machbarkeitsstudie mit den analysierten Prozess- und Verfahrensparametern dargestellt, daraus Druckprofile abgeleitet und reproduzierbare Fehlerbilder beschrieben.

Untersucht werden sowohl der GasComp- als auch der GAIM-Prozess jeweils in Kombination mit dem Short-Shot- und dem Nebenkavitätsverfahren. Die Machbarkeitsstudie wird anhand eines pultrudierten Langfasergranulats mit 30 Gew.-% GF (Celstran® PP-GF30-0453 P10/10, Celanese Service Germany GmbH, Sulzbach (Taunus), Germany) durchgeführt.

### 6.1 GasComp-Prozess

Für die Untersuchungen in Kombination mit dem GasComp-Prozess werden folgende Parameter der Presseneinheit definiert:

- Masstemperatur: 240 °C
- Presskraft: 500 kN
- 90 % des Schließwegs werden im Eilgang mit 340 mm/s zurückgelegt
- Die letzten 10 % des Schließwegs (Eintauchen des Stempels in die Matrize) werden mit 20 mm/s zurückgelegt
- Werkzeugtemperatur: 30 °C

#### Short-Shot-Verfahren

Die variierten Parameter und deren oberer und unterer Grenzwert sind in Tabelle 6 dargestellt. Beim Short-Shot-Verfahren wird auf eine Verzögerungszeit verzichtet. Es wird eine systematische Parametervariation vorgenommen, sodass eine Abdeckung des sich ergebenden Versuchsraums sichergestellt ist.

**Tabelle 6 Prozess- und Parametergrenzen des Screenings**

| Parameter                | Minimal | Maximal |
|--------------------------|---------|---------|
| Vorfüllgrad [Gewichts-%] | 75      | 95      |
| Dosierzeit [s]           | 42      | 55      |
| Maximaldruck [bar]       | 10      | 180     |
| Druckaufbauzeit [s]      | 1       | 5       |
| Druckabbauzeit [s]       | 1       | 5       |
| Druckhaltezeit [s]       | 60      | 90      |

#### Reproduzierbare Fehlerbilder Short-Shot-Verfahren

Das Prozessfenster wird anhand von Rückschlüssen aus fehlerhaften Technologieträgern identifiziert. Die Fehlerbilder werden beschrieben, eine Ursache identifiziert und die im Bezug stehenden Parameter benannt.

Fehlerbild 1:

Abbildung 27 zeigt einen Hohlkörper, der beim Öffnen des Werkzeugs aufgeplatzt ist, da zum Zeitpunkt der Werkzeugöffnung der Innendruck des Hohlkörpers höher als die

Werkstofffestigkeit war. Die Gründe hierfür liegen in einer zu kurzen Kühlzeit, einer zu kurzen Abbauzeit und einem zu hohen Gasdruck.



Abbildung 27 Fehlerbild 1: *Aufgeplatzter Träger*

Fehlerbild 2:

Abbildung 28 zeigt einen Hohlkörper, bei dem die Gasblase vor dem Ausformen der Kavität durch den FKV durchgebrochen ist. Die Ursache für dieses Fehlerbild ist, dass die Gasblase die Schmelze verdrängt, bevor diese das Fließwegende erreicht hat. Dies ist auf einen zu hohen Gasdruck, einen zu niedrigen Vorfüllgrad oder aber zusätzlich bzw. alternativ auf ein ungünstiges Einlegen des Plastifikats in die Kavität zurückzuführen.



Abbildung 28 Fehlerbild 2: *Gasblasendurchbruch*

Fehlerbild 3:

Abbildung 29 zeigt einen Körper, der nicht vollständig ausgeformt ist. Die Ursache ist, dass der Gasdruck nicht ausreicht, um den Fließwiderstand der Schmelze zu überwinden. Dies kann an einem zu niedrigen Gasdruck liegen oder daran, dass das Plastifikat so eingelegt ist, dass der Gasinjektor nicht vollständig mit Schmelze bedeckt ist.



Abbildung 29 Fehlerbild 3: *Unvollständige Ausformung*

Fehlerbild 4:

Abbildung 30 zeigt einen vollständig ausgeformten Hohlkörper, der beim Entformen deformiert wurde, indem die Auswerferstifte eingedrungen sind. Ursächlich ist, dass die erstarrte Randschicht beim Betätigen der Auswerferstifte nicht fest genug ist, um der Punktlast zu widerstehen. Dies ist auf eine zu kurze Kühlzeit zurückzuführen. Da die Kühlzeit gleich der Druckhaltezeit ist, wird diese nicht als gesonderter Parameter aufgeführt.



Abbildung 30 Fehlerbild 4: *Einstechen der Auswerferstifte in den Probekörper*

Fehlerbild 5:

Bei diesem Fehlerbild kann zwar ein vollständig ausgeformter Träger gefertigt werden, jedoch kann der Gasdruck nicht über die gesamte Gashaltezeit aufrecht erhalten werden, sodass kein konstanter Nachdruck wirkt. Dies wird durch ein charakteristisches Pfeifen während der Gashaltezeit deutlich und zeigt sich am Träger durch eine mangelhafte Abdichtung des Gasinjektors (siehe Abbildung 31). Dadurch wird zum einen die Ausbildung der Gasblase im inneren des Bauteils behindert und zum anderen kann kein Gasdruck aufrechterhalten bleiben, sodass kein Gasnachdruck wirken kann. So gefertigte Träger sind nicht für weitere Untersuchungen geeignet, da diese nicht reproduzierbar sind und starke Schwankungen in der Gasblasenausbreitung aufweisen. Dieser Fehler tritt auf, wenn das Plastifikat den Injektor nicht richtig bedeckt, beziehungsweise wenn zum Zeitpunkt des Einlegens die Schmelze zu stark abgekühlt ist. Sie kann sich dann nicht mehr an die Geometrie des Injektors anpassen.

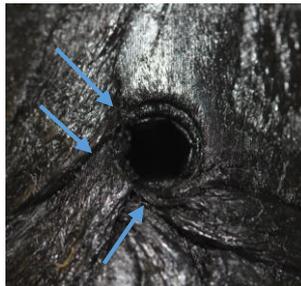


Abbildung 31 Fehlerbild 5: *Schmelze dichtet am Injektor nicht richtig ab*

### **Randbedingungen für fehlerfrei reproduzierbare Hohlkörper**

Ausgehend von den zuvor aufgeführten reproduzierbaren Fehlerbildern werden folgende Randbedingungen für das fehlerfreie Ausformen von Hohlkörpern abgeleitet:

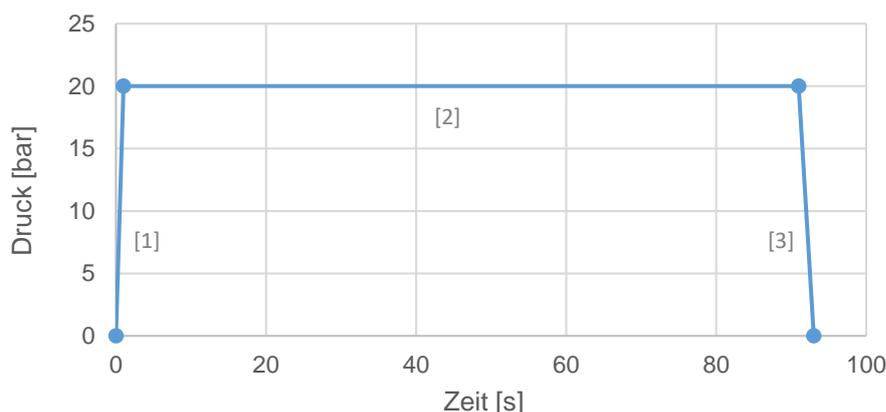
- Der Gasdruck muss ausreichen, um die Schmelze zu verdrängen. Er darf aber nicht so hoch sein, dass das Bauteil durch den Druck geschädigt wird.
- Die Gashaltezeit muss ausreichend lang wirken können, damit sich die Gasblase ausbilden kann.
- Die Gasdruckabbauzeit muss so bemessen sein, dass der Gasdruck im Inneren des Hohlkörpers abgebaut werden kann, sonst kommt es zu einem Bersten des Trägers beim Öffnen des Werkzeugs.
- Die Summe der Gasdruckzeit (Gasaufbau-, Gashalte-, Gasabbauzeit) muss lang genug sein, sodass der Hohlkörper formstabil ist und beim Entformen nicht zerstört wird.
- Der Vorfüllgrad muss hoch genug sein, sodass die Gasblase nicht durchbricht, aber der Leichtbauaspekt gewahrt bleibt.

### Ableitung des Gasdruckprofils

Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen ergibt sich ein optimiertes Druckprofil mit folgenden Parametern:

**Tabelle 7 Parameter des Gasdruckprofils im GasComp-Prozess mit Short-Shot-Verfahren**

| Verfahrensparameter | Druckaufbauzeit [s] | Maximaldruck [bar] | Druckhaltezeit [s] | Druckabbauzeit [s] |
|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Wert                | 1                   | 20                 | 90                 | 2                  |



**Abbildung 32 Gasdruckprofil des GasComp-Prozesses mit Short-Shot-Verfahren mit [1] Druckaufbau-, [2] Druckhalte- und [3] Druckabbauzeit sowie den dazugehörigen Druckniveaus.**

In Abbildung 32 ist Gasdruckprofil zu sehen. Der Gasdruck steigt innerhalb einer Sekunde auf 20 bar, wird für 90 Sekunden auf diesem Niveau gehalten und innerhalb von zwei Sekunden auf Umgebungsdruck abgebaut. Damit lassen sich in Kombination mit einem volumetrischen Vorfüllgrad von 80 % reproduzierbar Hohlkörperstrukturen herstellen. Somit ist im Vergleich zum Vollkörper eine Gewichtsersparnis von 20 % realisierbar.

### Nebenkavitätsverfahren

Anders als bei der Verfahrensvariante Short-Shot gibt es bisher für das Nebenkavitätsverfahren keine Erkenntnisse für die Umsetzbarkeit im GasComp-Prozess. Daher werden ähnliche Rahmenbedingungen angenommen wie sie beim Spritzguss im Nebenkavitätsverfahren angewendet werden. Beim Nebenkavitätsverfahren bietet sich ein zweistufiges Gasdruckprofil an. Zunächst muss durch einen hohen Druck die noch plastische Schmelze in die Nebenkavität verdrängt werden. Ist diese Stufe abgeschlossen, wird der Druck abgebaut und auf einem niedrigeren Druckniveau gehalten, bis die Restkühlzeit abgelaufen und der Druck auf Umgebungsniveau abgesunken ist. Unter diesen Prämissen ergeben sich die in Tabelle 8 aufgeführten Parameter und deren Minimal- und Maximalwerte. Innerhalb des sich daraus ergebenden Versuchsraums erfolgte ein Screening. Ausgehend von den Ergebnissen wird ein Gasdruckprofil abgeleitet, mit dem reproduzierbar fehlerfreie Hohlstrukturen gefertigt werden können.

**Tabelle 8 Parameter-Screening beim Gas-Comp Nebenkavitätsverfahren**

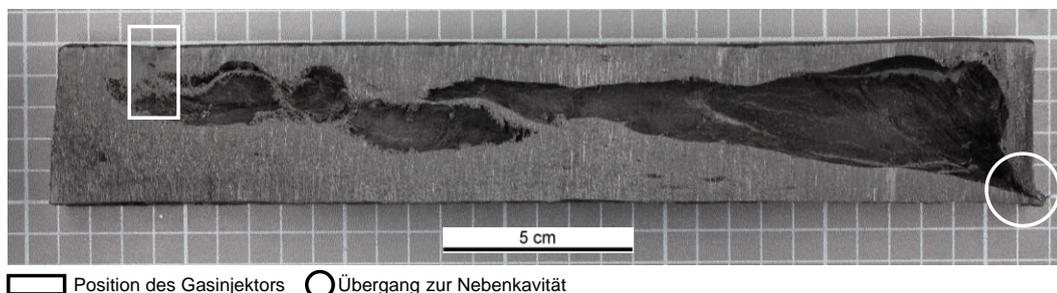
| Parameter                | Minimal | Maximal |
|--------------------------|---------|---------|
| Vorfüllgrad [Gewichts-%] | 95      | 100     |
| Dosierzeit [s]           | 55      | 62      |
| Maximaldruck [bar]       | 10      | 200     |
| Druckaufbauzeit [s]      | 1       | 5       |
| Druckhaltezeit 1 [s]     | 1       | 10      |
| Druckabbauzeit 1 [s]     | 1       | 5       |
| Haltedruck [bar]         | 10      | 50      |
| Druckhaltezeit 2 [s]     | 50      | 90      |
| Druckabbauzeit 2 [s]     | 2       | 5       |

### Reproduzierbare Fehlerbilder – Nebenkavitätsverfahren

Die Identifikation des Gasdruckprofils wird anhand von Rückschlüssen aus fehlerhaften Bauteilen geführt. Die Fehlerbilder werden beschrieben, eine Ursache identifiziert und daraus Erkenntnisse abgeleitet.

Fehlerbild 1:

Dieses Fehlerbild zeigt starke Schmelzeverwirbelungen in der Grenzschicht von Polymer und Gasblase. Dies ist auf einen zu schnellen Druckanstieg zurückzuführen. Durch ein zu schnelles Einströmen des Gases entsteht eine instabile Gasblasenfließfront, die zu einer ungleichmäßigen Grenzstruktur führt.



**Abbildung 33 Fehlerbild beim GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren: Verwirbelungen der Schmelze im Bereich der Gasblasenausbildung und einer daraus resultierenden inhomogenen Grenzschicht von Gasblase und Polymer.**

Fehlerbild 2:

Das Fehlerbild ist das gleich wie Fehlerbild 4 bei der Verfahrensvariante Short-Shot (siehe Abbildung 30). Hier dringen die Auswerferstifte in das Formteil ein, sodass die Restkühlzeit bzw. die zweite Druckhaltezeit nicht ausreichend lang war.

### Ableitung des Gasdruckprofils

Auf Basis dieser Erkenntnisse ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Parameter (Tabelle 9) für das Druckprofil.

Tabelle 9 Vorfüllgrad und Parameter des Gasdruckprofils für den GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren

| Parameter                | Wert |
|--------------------------|------|
| Vorfüllgrad [Gewichts-%] | 95   |
| Dosierzeit [s]           | 55   |
| Maximaldruck [bar]       | 70   |
| Druckaufbauzeit [s]      | 1    |
| Druckhaltezeit 1 [s]     | 5    |
| Druckabbauzeit 1 [s]     | 2    |
| Haltedruck [bar]         | 10   |
| Druckhaltezeit 2 [s]     | 70   |
| Druckabbauzeit 2 [s]     | 1    |

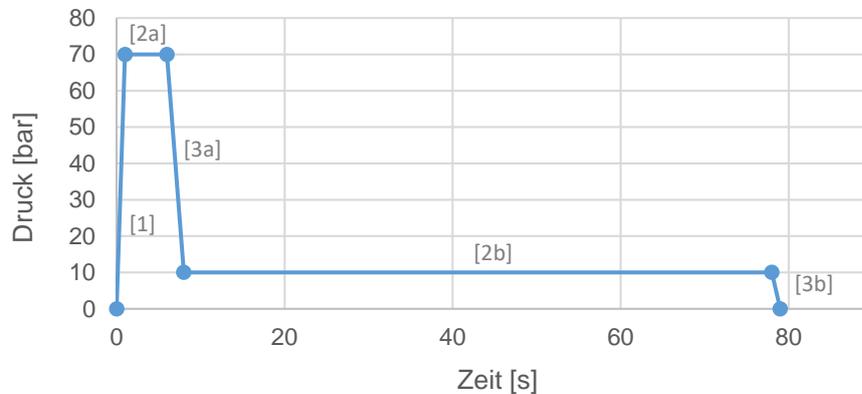


Abbildung 34 Gasdruckprofil des GasComp-Prozesses mit Nebenkavitätsverfahren mit [1] Druckaufbauzeit, zwei [2a/2b] Druckhalte- und zwei [3a/3b] Druckabbauzeiten sowie den dazugehörigen Druckniveaus.

Innerhalb von einer Sekunde wird ein Gasdruck von 70 bar aufgebaut und für 5 Sekunden gehalten. Anschließend wird der Druck innerhalb von zwei Sekunden auf 10 bar abgesenkt. Während der Absenkung wird die Nebenkavität über den hydraulischen Schieber von der Hauptkavität abgetrennt. Der Druck von 10 bar wird für 70 Sekunden aufrechterhalten, anschließend wird dieser innerhalb einer Sekunde auf Umgebungsniveau abgesenkt.

## 6.2 GAIM-Prozess

Für die Untersuchungen in Kombination mit dem GAIM-Prozess werden die in Tabelle 10 dargestellten Parameter der Spritzgussseinheit definiert:

Tabelle 10 Parameter der Spritzgussanlage für den GAIM-Prozess

| Parameter                       | Wert |
|---------------------------------|------|
| Massetemperatur [ °C]           | 240  |
| Staudruck [bar]                 | 50   |
| Schließkraft [kN]               | 2400 |
| Spritzdruck [bar]               | 1595 |
| Einspritzgeschwindigkeit [mm/s] | 53   |
| Werkzeugtemperatur [ °C]        | 30   |

### Short-Shot-Verfahren

Ausgehend von den im GasComp-Prozess gewonnenen Erkenntnissen hinsichtlich der notwendigen Randbedingungen für reproduzierbar fehlerfreie Träger, wurde beim GAIM-Prozess ein ähnliches Gasdruckprofil mit gleichen maximalen Druckniveaus und Abbauzeiten angewendet. Bei der Ermittlung des Vorfüllgrades wird das Ziel verfolgt einen leichten Träger mit langer und gleichmäßiger Gasblase zu fertigen. Um dieses Ziel bei gegebenem Gasdruckprofil zu erreichen, wird eine Variation des Vorfüllgrades vorgenommen.

Fehlerbilder:

Wie in Abbildung 35 zu sehen, bildet sich bei einem Vorfüllgrad von 80 % eine kurze Gasblase mit großem Durchmesser aus, die nicht bis zur Mitte des Trägers reicht. Durch eine Reduzierung des Vorfüllgrads in 10 % Schritten wird bei 50 % Vorfüllgrad ein Aufreißen des Trägers in dessen Mitte reproduzierbar hervorgerufen. Aus dieser Erkenntnis wird ein optimaler Vorfüllgrad von 60 % für das Short-Shot-Verfahren mit GAIM-Prozess abgeleitet.

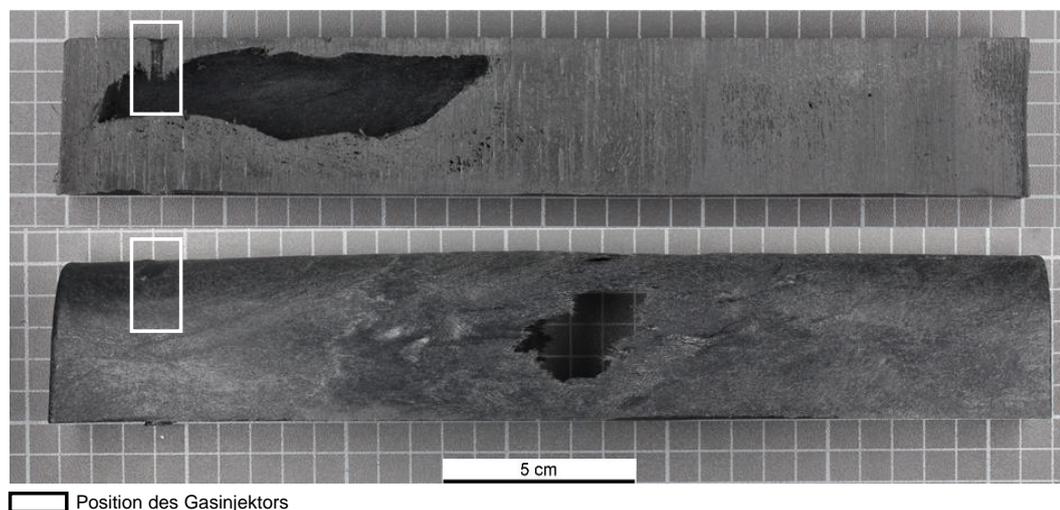


Abbildung 35 Darstellung der Fehlerbilder beim GAIM-Prozess mit Short-Shot-Verfahren. Kurz ausgebildete Gasblase bei großem Gasblasendurchmesser bei 80 % Vorfüllung (oben) und Durchbruch der Gasblase bzw. aufreißen des Trägers bei 50% Vorfüllung (unten).

Unter den oben genannten Randbedingungen ergeben sich folgende Parameter für das Gasdruckprofil (Tabelle 11). Da es vereinzelt zu einem ähnlichen Fehlerbild wie in Abbildung 28 gekommen ist, wird ein leichtes Abflachen der Druckanstiegs (siehe Abbildung 36) vorgenommen.

Tabelle 11 Vorfüllgrad und Parameter des Gasdruckprofils im GAIM-Prozess mit Short-Shot-Verfahren

| Parameter              | Wert |
|------------------------|------|
| Vorfüllgrad [%]        | 60   |
| 1. Druckaufbauzeit [s] | 5    |
| 1. Druckstufe [bar]    | 10   |
| 2. Druckaufbauzeit [s] | 15   |
| 2. Druckstufe [bar]    | 20   |
| Druckhaltezeit [s]     | 90   |
| Druckabbauzeit [s]     | 2    |

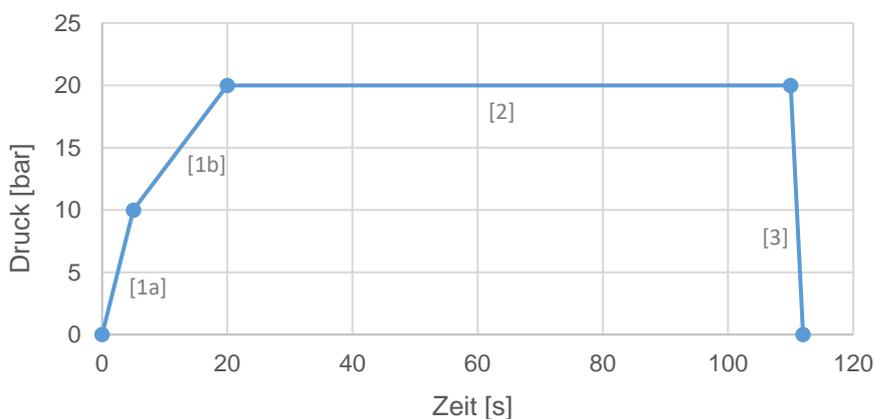


Abbildung 36 Gasdruckprofil des GAIM-Prozess mit Short-Shot-Verfahren mit einer zweistufigen Druckaufbauzeit [1a/1b], einer Druckhaltezeit [2] und einer Druckabbauzeit [3] sowie den dazugehörigen Druckniveaus.

### Nebenkavitätsverfahren

Hier zeigt das im GasComp-Prozess identifizierte Gasdruckprofil (Abbildung 34) in Verbindung mit einem Vorfüllgrad von 95 % eine hohe Reproduzierbarkeit und keine Fehlerbilder. Es wird daher übernommen.

## 6.3 Zusammenfassung der Machbarkeitsstudie

Insgesamt hat die Machbarkeitsstudie gezeigt, dass unter Berücksichtigung der definierten Randbedingungen sowohl der GasComp- als auch der GAIM-Prozess mit beiden Verfahrensvarianten der Gasinjektionstechnik umgesetzt werden kann. Beim Short-Shot-Verfahren können ähnliche Gasdruckprofile eingesetzt werden. Wird das Nebenkavitätsverfahren angewendet, kann unabhängig vom Prozess das gleiche Gasdruckprofil genutzt werden.

Die beschriebenen reproduzierbaren Fehlerbilder zeigen auf, welche Parameter diese verursachen. Sollten diese Fehlerbilder im Rahmen der weiteren Studien erneut auftreten, kann anhand dieser Erkenntnisse ein Lösungsansatz zur Fehlerbehebung abgeleitet werden.

Dabei ist zu beachten, dass für eine homogene Gasblasenausformung beim Short-Shot-Verfahren in Verbindung mit dem GasComp-Prozess eine Vorfüllung von 80 % notwendig ist und nicht unterschritten werden darf. Im GAIM-Prozess liegt der Wert der Vorfüllung für eine homogene Gasblase bei 60 %. Hierdurch werden erste prozess- und verfahrensabhängige Unterschiede hinsichtlich möglicher Gewichtersparnisse ersichtlich.

## 7 Versuchsdurchführung

Nach der Identifikation geeigneter prozess- und verfahrensspezifischer Parameter, werden in diesem Kapitel unterschiedliche Studien durchgeführt. Den Anfang bildet die *Prozess- und Verfahrensstudie*, in der die Träger für die mechanischen Prüfungen gefertigt werden. Es folgt die *Materialstudie*. Hierbei werden unterschiedliche Verarbeitungszustände und Granulate untersucht. Die abschließende Studie zielt auf das *Aufschäumen der Grenzschicht* von Polymer und Gasblase ab.

### 7.1 Prozess- und Verfahrensstudie

Ziel dieser Studie ist es, mögliche Prozess- und Verfahreneinflüsse auf die mechanischen Eigenschaften der Träger aus unterschiedlichen Materialien aufzuzeigen. Hierfür werden für jedes Material und jede der möglichen Prozess- und Verfahrenskombination 20 + 1 Träger gefertigt (siehe Tabelle 12). Davon werden je zehn Träger im 3-Punkt-Biegeversuch und zehn Träger im Torsionsversuch geprüft, zusätzlich wird ein Träger als Rückstellmuster gefertigt. Somit werden in Summe 480 Träger für die mechanischen Analysen gefertigt. Zudem wird von ausgewählten Versuchspunkten (\*) ein zusätzlicher Träger gefertigt und für weiterführende mikrostrukturelle Analysen bereitgestellt. Am Beispiel des GasComp-Prozesses und dem pultrudierten LGF mit 30 Gew.-% GF wird der Einfluss der Verfahrensvarianten auf die Porosität der Grenzschicht von Polymer und Gasblase untersucht. Die zur Fertigung der Träger verwendeten Prozess- und Verfahrensparameter entsprechen den in Kapitel 6 vorgestellten Parametern.

Tabelle 12 Übersicht der Prozess- und Verfahrensstudie

| Prozess                       | GasComp-Prozess |         |         |         | GAIM-Prozess |        |        |        |
|-------------------------------|-----------------|---------|---------|---------|--------------|--------|--------|--------|
|                               | pu 30           | pu 40   | um 30   | um 40   | pu 30        | pu 40  | um 30  | um 40  |
| <b>Vollkörper</b>             | 20 + 2*         | 20 + 2* | 20 + 2* | 20 + 2* | 20 + 2*      | 20 + 1 | 20 + 1 | 20 + 1 |
| <b>Short-Shot-Verfahren</b>   | 20 + 2*         | 20 + 2* | 20 + 1  | 20 + 1  | 20 + 2*      | 20 + 1 | 20 + 1 | 20 + 1 |
| <b>Nebenkavitätsverfahren</b> | 20 + 2*         | 20 + 1  | 20 + 1  | 20 + 1  | 20 + 2*      | 20 + 1 | 20 + 1 | 20 + 1 |

### 7.2 Materialstudien

Die Materialstudien gliedern sich in drei Kategorien. Ziel dieser Studien ist es die Porosität in Abhängigkeit unterschiedlicher materialspezifischer Einflussfaktoren zu ermitteln und daraus Erkenntnisse zu gewinnen. Die Ausprägung der Porosität und die Form der Poren können die Festigkeit von GIT-Formteil negativ beeinflussen. Daher ist ein Erkenntnisgewinn auf diesem Gebiet entscheidend, um potenzielle Anwendungsfälle zu identifizieren.

#### Vollkörper-Studie

Im Rahmen dieser Studie wird die Porosität der im Fließpressprozess gefertigten Vollkörper ermittelt. Dies liefert Erkenntnisse über eine Mindestporosität, der im GasComp-Prozess verarbeiteten Granulate. Hierzu wird je Granulattyp (siehe Tabelle 3) ein Vollträger auf seine Porosität hin untersucht.

### LGF-Granulatstudie

Ziel der LGF-Granulatstudie ist es einen möglichen Materialeinfluss auf die Porosität zu detektieren, der in Verbindung mit dem Gewichtsgehalts der Glasfasern oder deren Vorkonsolidierung steht. Hierfür wird auf Träger zurückgegriffen, die im GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren gefertigt werden. Als Versuchsmaterial werden die vier in Tabelle 3 vorgestellten Granulate eingesetzt.

### Material-Referenzstudie (Einfluss der Glasfaserlänge)

Im Rahmen dieser Material-Referenzstudie werden je zwei Träger aus Kurzfasergrenulat (PP 30 Gew.-% GF) und aus unverstärktem Polypropylen im GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren gefertigt und anschließend auf ihre Porosität untersucht. Die Ergebnisse werden mit den Ergebnissen des Langfasergrenulats (pultrudiert mit 30 Gew.-% und 40 Gew.-% GF), das im gleichen Prozess verarbeitet wurde, verglichen.

## 7.3 Parameterstudien zum Aufschäumen der Grenzschicht

Ausgehend von dem in Abbildung 32 dargestellten Druckprofil werden für den GasComp-Prozess in der Verfahrensvariante Short-Shot Parametervariationen vorgenommen (siehe Tabellen 13 bis 15). Die Versuche sind an die von Moritzer (1997) vorgenommenen Parameterstudien mit transparenten unverstärkten Polymeren im GIT-Spritzgussverfahren angelehnt. Ziel der Studien ist es, den Einfluss der einzelnen Parameter des Gasdruckprofils auf das Aufschäumen der Grenzschicht von FKV und Gasblase zu ermitteln. Es wird ein Vorfüllgrad von 80 % verwendet. Als Material wird das pultrudierte LGF mit 30 Gew.-% Glasfasern eingesetzt. Die Schmelzetemperatur beträgt bei allen Versuchsreihen 240 °C. Je Versuchspunkt werden zwei Hohlkörper gefertigt und anschließend die Porosität der Grenzschicht von Polymer und Gasblase untersucht.

### Maximaldruckstudie

Im Rahmen der Maximaldruckstudie wird der während der Haltezeit maximal herrschende Druck variiert. Die Parameter Vorfüllgrad, Massetemperatur, Druckaufbau- und Abbauezeit bleiben bei allen Versuchen gleich. Die nachfolgende Tabelle zeigt die gewählten maximalen Druckstufen.

**Tabelle 13 Parameter Maximaldruckstudie**

|                           |    |    |    |     |     |     |
|---------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|
| <b>Maximaldruck [bar]</b> | 10 | 20 | 40 | 100 | 200 | 300 |
|---------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|

### Druckabbauzeitstudie

Im Rahmen dieser Studie wird der Einfluss der Druckabbauzeit untersucht. Hier zeigt die nachfolgende Tabelle die Abstufung der Druckabbauzeit.

**Tabelle 14 Parameter Druckabbauzeitstudie**

|                           |     |   |   |   |   |    |
|---------------------------|-----|---|---|---|---|----|
| <b>Druckabbauzeit [s]</b> | 0,1 | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 |
|---------------------------|-----|---|---|---|---|----|

### Haltezeitstudie

Ziel dieser Studie ist es den Einfluss der Druckhaltezeit zu identifizieren. Dafür werden sechs Haltezeiten untersucht, die in Tabelle 15 aufgeführt sind.

**Tabelle 15 Parameter Haltezeitstudie**

|               |   |    |    |    |    |    |
|---------------|---|----|----|----|----|----|
| Haltezeit [s] | 5 | 10 | 15 | 25 | 50 | 90 |
|---------------|---|----|----|----|----|----|

## 7.4 Zusammenfassung Versuchsdurchführung

Im ersten Abschnitt werden die für die mechanischen Analysen notwendigen Träger im Rahmen eines Prozess- und Verfahrensvergleichs gefertigt. Der sich anschließende zweite Abschnitt befasst sich mit einem möglichen Einfluss der unterschiedlichen Granulate auf die mikrostrukturellen Eigenschaften der Träger. Die Parameterstudien, die den Abschluss des Kapitels bilden, dienen dazu aufzuzeigen, welche Parameter des Gasdruckprofils die Porosität der Grenzschicht von Polymer und Gasblase prägen.

## 8 Ergebnisse

### 8.1 Hohlraumausformung

Die Ausformung der unterschiedlichen Hohlräume wird anhand von Schnitten in Längs- und Querrichtung dargestellt. Dabei ist die Darstellung so gewählt, dass die Position des Gasinjektors bei jedem Versuchsbauteil in der linken oberen Ecke zu sehen ist. Bei Versuchsbauteilen die im Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurden, ist der Übergangsbereich von Haupt- zur Nebenkavität in der rechten unteren Ecke. Mittels der Querschnitte werden die Restwanddicke und das axiale Flächenträgheitsmoment in der Mitte des Trägers bestimmt. Die Schnitte in Längsrichtung ermöglichen eine Beschreibung der Gasblasenform.

#### **Gestalt der Gasblase**

In diesem Abschnitt werden die prozess- und verfahrensspezifischen Gasblasenformen am Beispiel von Trägern aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF dargestellt.

#### Short-Shot-Verfahren

Die Form der Gasblase (a), die mittels GasComp-Prozess in der Verfahrensvariante Short-Shot erzeugt wird, zeigt eine gleichmäßige Gasblase, die in ihrem Querschnitt kaum schwankt und sich am Ende leicht verjüngt (siehe Abbildung 37). Die Gasblase verläuft exzentrisch an der Seite des Trägers, die während des Fertigungsprozess die Unterseite darstellt. Am Fließwegende bildet sich ein deutliches Restmassepolster. Es liegt ein Vorfüllgrad von 80 % vor. Beim GAIM-Prozess mit der Verfahrensvariante Short-Shot bildet sich bei einem Vorfüllgrad von 80 % (b) eine deutlich kürzere Gasblase mit größerem Durchmesser als beim GasComp-Prozess. Dies hat zur Folge, dass sich die Gasblase nicht über die gesamte Längsachse erstreckt. Um dies zu erreichen ist ein Vorfüllgrad von 60 % notwendig (c). Hier bildet sich eine großvolumige Gasblase aus, die sich sowohl am Injektor (links) als auch am Fließwegende (rechts) verjüngt. In der Mitte des Trägers bildet sich eine weitestgehend homogene Kontur aus.

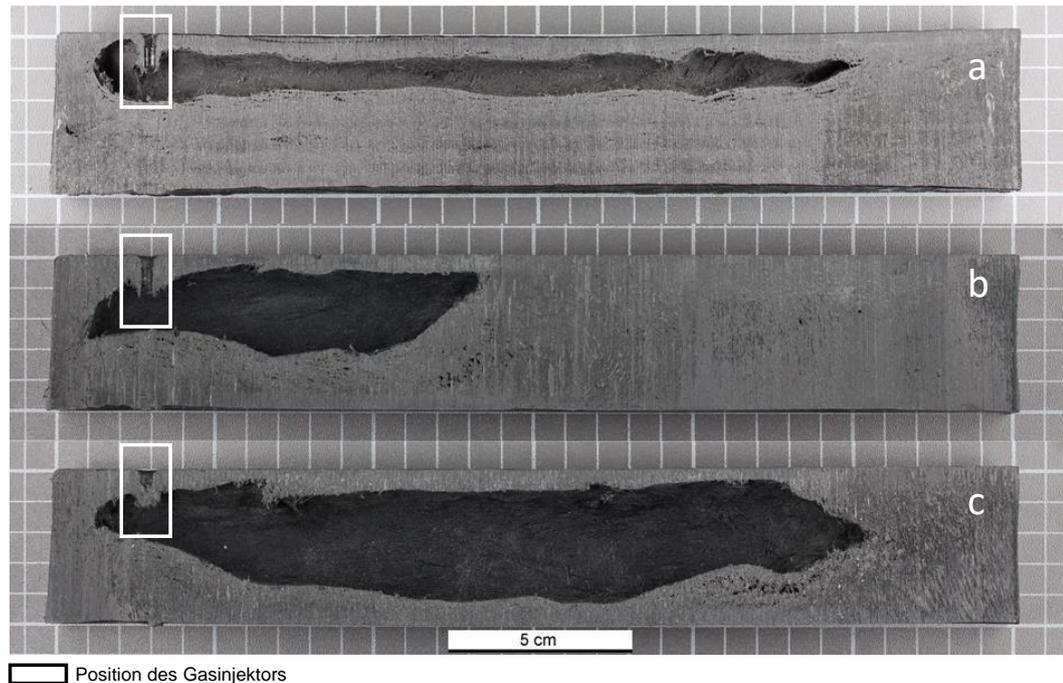
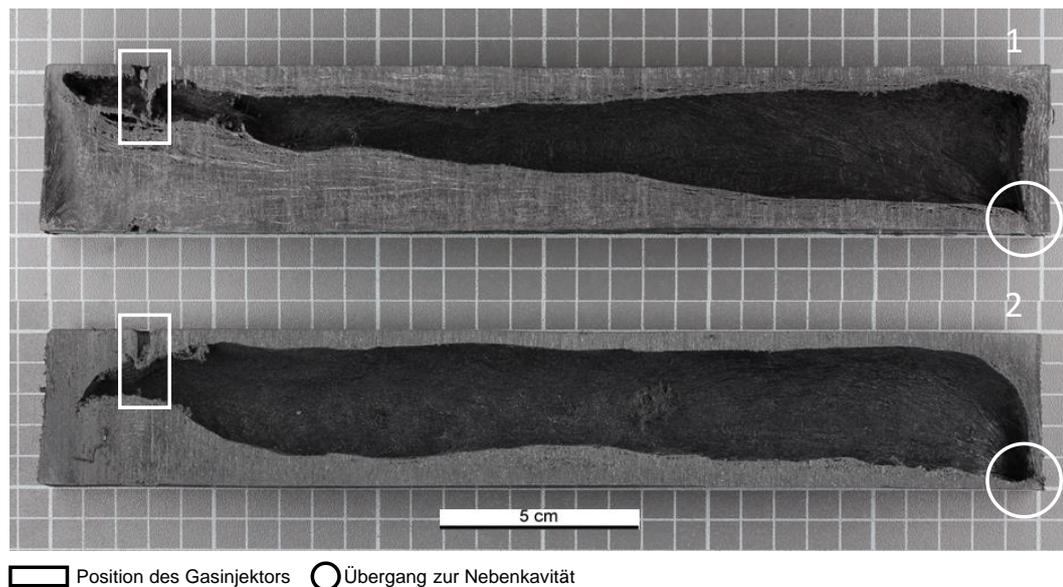


Abbildung 37 Ausformung der Gasblase sowie die resultierende Restwanddicke von je einem exemplarischen Versuchsbauteil, das im Short-Shot-Verfahren gefertigt wurde. (a) GasComp-Prozess mit 80 % Vorfüllung; (b) GAIM-Prozess mit 80% Vorfüllung; (c) GAIM-Prozess 60 % Vorfüllung

#### Nebenkavitätsverfahren

Im Nebenkavitätsverfahren ergibt sich unabhängig vom Verarbeitungsprozess eine großvolumige Gasblase (siehe Abbildung 38). Der Querschnitt dieser nimmt mit zunehmendem Fließweg zu. Das heißt je weiter die Gasblase vom Injektor (links) entfernt ist, desto größer ist der Querschnitt. Bei dem im GasComp-Prozess gefertigten Träger (1) zeigt sich dies durch ein nahezu lineares Abnehmen der Restwanddicke auf der gegenüberliegenden Seite des Injektors. Auf der Seite des Injektors stellt sich eine etwa gleichbleibende Wandstärke ein. Am Fließwegende (rechter unterer Bereich) zeichnet sich der Übergang zur Nebenkavität ab.

Der im GAIM-Prozess gefertigte Träger (2) zeigt nach ca. 5 cm des Gasausbreitungsweges eine geringere Wandstärke auf, die über die Längsachse annähernd konstant bleibt. Auch hier zeichnet sich der Übergang zur Nebenkavität ab – gegenüber der Öffnung zur Nebenkavität wird der rechte untere Bereich rund ausgeformt.



**Abbildung 38** Ausformung der Gasblasen sowie die sich ergebenden Restwanddicke von je einem exemplarischen Versuchsbauteil aus dem Nebenkavitätsverfahren. (1) *GasComp*-Prozess; (2) *GAIM*-Prozess

### Restwandstärke, Masse und axiales Flächenträgheitsmoment

In Abbildung 39 werden die prozess- und verfahrensspezifischen geometrischen Eigenschaften der mit den unterschiedlichen Granulaten gefertigten Träger dargestellt. Dazu zählen die Restwanddicke, das sich daraus ergebende axiale Flächenträgheitsmoment ( $I_a$ ) und die durchschnittliche Masse der Träger.

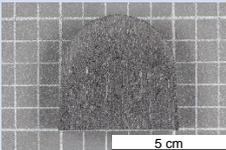
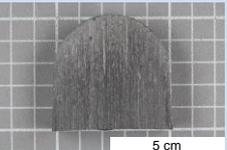
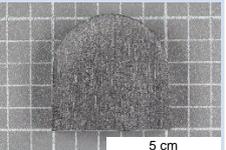
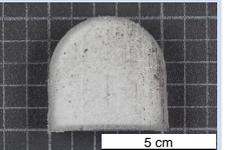
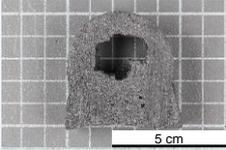
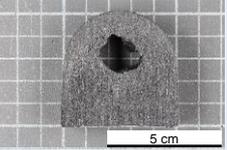
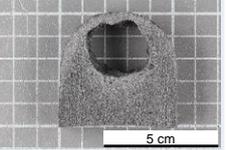
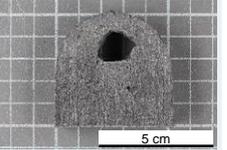
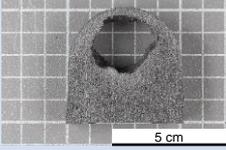
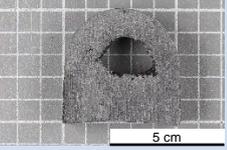
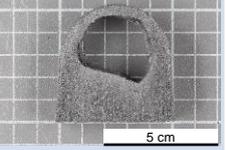
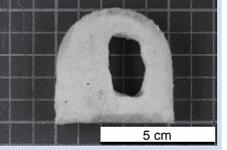
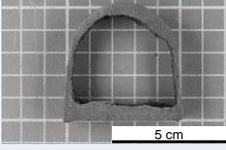
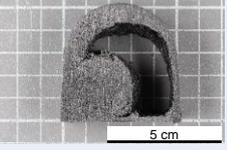
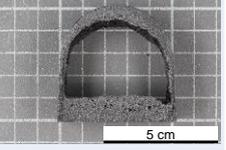
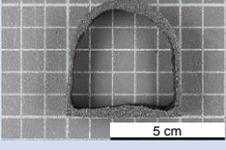
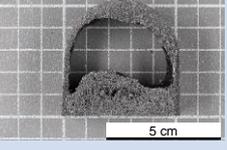
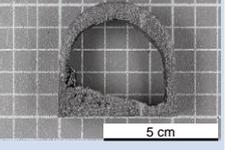
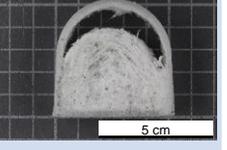
Die Querschnittsaufnahmen in Abbildung 39 stellen repräsentative Bilder aus der Mitte der Träger dar. Die Aufnahmen zeigen, dass sich unabhängig von Material und Glasfasergehalt im *GasComp*-Prozess in der Verfahrensvariante *Short-Shot* runde Gasblasen ausbilden, die exzentrisch in Richtung der Wölbung liegen. Der Durchmesser der Gasblase ist abhängig vom Glasfasergehalt, bei 30 Gew.-% GF können größere Gasblasendurchmesser realisiert werden als bei 40 Gew.-% GF.

In der Verfahrensvariante *Nebenkavitätsverfahren* ist die Gasblasengestalt ebenfalls rundlich, wobei auch hier mit höherem GF-Gehalt der Gasblasendurchmesser abnimmt.

Im *GAIM*-Prozess in der Verfahrensvariante *Short-Shot* bilden sich bei 30 Gew.-% GF konturnahe Gasblasen aus, die zu niedrigen Restwanddicken führen. Bei 40 Gew.-% GF bildet sich beim pultrudierten Material eine teilweise konturnahe Gasblase aus, jedoch bleibt hierbei eine nicht zu vernachlässigende Masseanhäufung im Gaskanal zurück. Das ummantelte Material (40 Gew.-% GF) ließ sich mit den gewählten Parametern nicht reproduzierbar verarbeiten. Im *GAIM*-Prozess in Kombination mit dem Nebenkavitätsverfahren bilden sich bei 30 Gew.-% GF ebenfalls großvolumige konturnahe Gasblasen aus. Hier ist die Restwanddicke des pultrudierten Materials gleichmäßiger als die des ummantelten Materials. Im Vergleich der Typen mit 40 Gew.-% GF bildet sich beim Träger aus pultrudiertem Material eine annähernd konturnahe Gasblase aus, deren Restwanddicke an den Flanken niedrig, am Radius und an der gegenüberliegenden Seite größer ist. Beim ummantelten Granulattyp bildet sich im Bereich der Rundung eine niedrige Restwandstärke mit konturnaher Gasblase aus. Der übrige Querschnitt wird von Material gefüllt. Sowohl beim pultrudierten als auch beim ummantelten Material ist

mit zunehmendem Glasfasergehalt eine weniger starke Ausprägung der konturnahen Gasblase zu erkennen. Diese Beobachtung ist beim ummantelten Material deutlicher zu erkennen, als es beim pultrudierten Material der Fall ist.

Der Wert des axialen Flächenträgheitsmoments nimmt mit abnehmender Restwanddicke ab, ebenso die ermittelte durchschnittliche Masse. Hier ist speziell bei den Vollkörpern der 10 %-ige Unterschied des Glasfaseranteils gut zu erkennen, der sich in der Masse der Träger wiederfindet.

| Prozess und Verfahrensvariante                 | pultrudiert<br>30 Gew.-% GF   | pultrudiert<br>40 Gew.-% GF   | ummantelt<br>30 Gew.-% GF  | ummantelt<br>40 Gew.-% GF   |
|--|---|---|--|---|
| Vollkörper<br>Spritzguss /<br>Fließpressen     | <br>$m_{ges} = 661 \text{ g}$<br>$I_a = 413810 \text{ mm}^4$   | <br>$m_{ges} = 724 \text{ g}$<br>$I_a = 413810 \text{ mm}^4$   | <br>$m_{ges} = 650 \text{ g}$<br>$I_a = 413810 \text{ mm}^4$   | <br>$m_{ges} = 715 \text{ g}$<br>$I_a = 413810 \text{ mm}^4$   |
| GasComp-Prozess<br>Short-Shot-<br>Verfahren*   | <br>$m_{ges} = 568 \text{ g}$<br>$I_a = 403370 \text{ mm}^4$  | <br>$m_{ges} = 621 \text{ g}$<br>$I_a = 408980 \text{ mm}^4$  | <br>$m_{ges} = 564 \text{ g}$<br>$I_a = 397460 \text{ mm}^4$  | <br>$m_{ges} = 637 \text{ g}$<br>$I_a = 412800 \text{ mm}^4$  |
| GasComp-Prozess<br>Nebenkavitäts-<br>verfahren | <br>$m_{ges} = 535 \text{ g}$<br>$I_a = 397530 \text{ mm}^4$ | <br>$m_{ges} = 601 \text{ g}$<br>$I_a = 410510 \text{ mm}^4$ | <br>$m_{ges} = 512 \text{ g}$<br>$I_a = 39640 \text{ mm}^4$  | <br>$m_{ges} = 600 \text{ g}$<br>$I_a = 409890 \text{ mm}^4$ |
| GAIM-Prozess<br>Short-Shot-<br>Verfahren**     | <br>$m_{ges} = 383 \text{ g}$<br>$I_a = 150980 \text{ mm}^4$ | <br>$m_{ges} = 482 \text{ g}$<br>$I_a = 297840 \text{ mm}^4$ | <br>$m_{ges} = 378 \text{ g}$<br>$I_a = 229540 \text{ mm}^4$ | nicht<br>reproduzierbar   |
| GAIM-Prozess<br>Nebenkavitäts-<br>verfahren    | <br>$m_{ges} = 310 \text{ g}$<br>$I_a = 150980 \text{ mm}^4$ | <br>$m_{ges} = 379 \text{ g}$<br>$I_a = 236640 \text{ mm}^4$ | <br>$m_{ges} = 312 \text{ g}$<br>$I_a = 238660 \text{ mm}^4$ | <br>$m_{ges} = 381 \text{ g}$<br>$I_a = 336910 \text{ mm}^4$ |

\* 80 % Formfüllung; \*\* 60 % Formfüllung;  $m_{ges}$  = Masse des gesamten Trägers;  $I_a$  = axiales Flächenträgheitsmoment

Abbildung 39 Übersicht der repräsentativen Restwanddicke, der durchschnittlichen Masse des Versuchsbauteils sowie des axialen Flächenträgheitsmoments mit exemplarischen Querschnittsbildern der untersuchten Prozess-, Verfahrens und Materialkombinationen.

## 8.2 Mechanische Analysen

### 3-Punkt-Biegeprüfung

Abbildung 40 zeigt die Position und Orientierung der Prüfkörper beim 3-Punkt-Biegeversuch. Der Prüfkörper ist entlang seiner Längsachse um  $90^\circ$  rotiert, da sich in Vorversuchen gezeigt hat, dass es bei anderer Positionierung (Radius an der Druckfinne oder Radius an den Auflagern) zu einem Eindringen am Träger kommt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die belastete Wandstärke aufgrund der Gasblasenposition zu gering ist und unmittelbar kollabiert. In den 3-Punkt-Biegeversuchen werden die Bruchkräfte ermittelt und anschließend können mit den in Abbildung 39 aufgeführten axialen Flächenträgheitsmomenten die maximalen Biegespannungen berechnet werden.

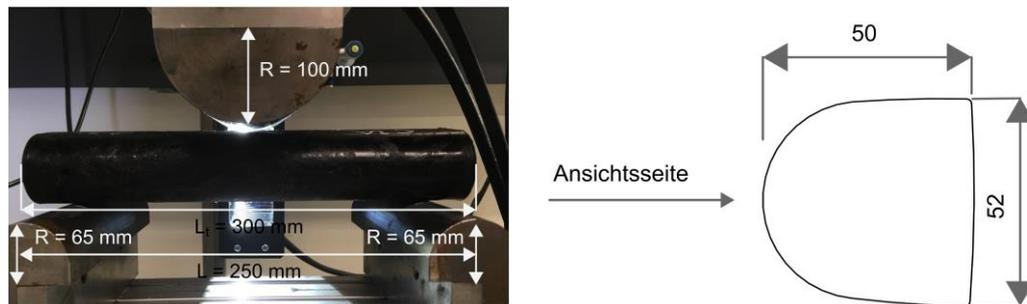
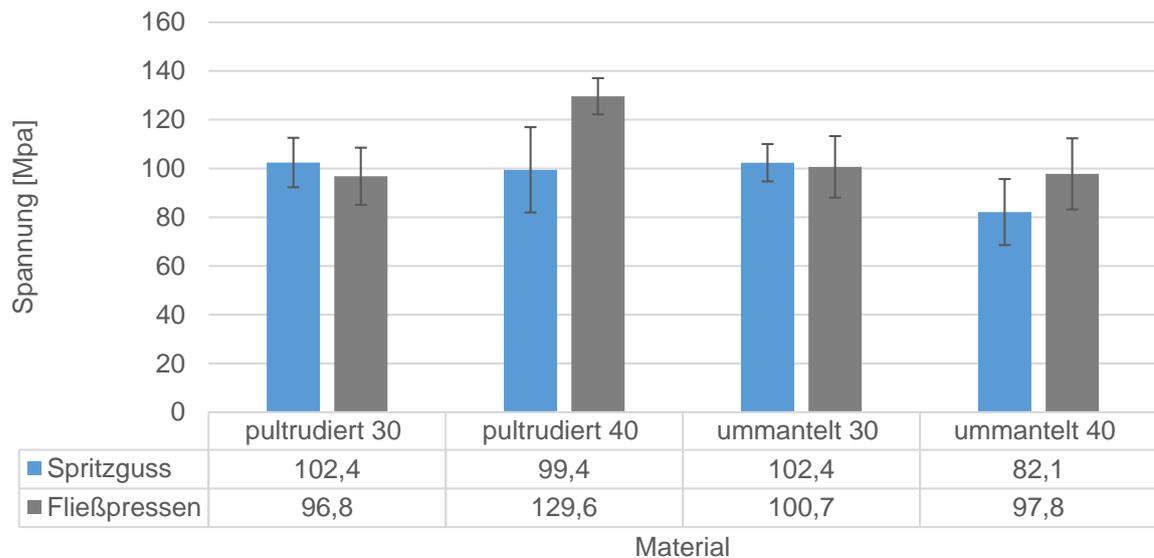


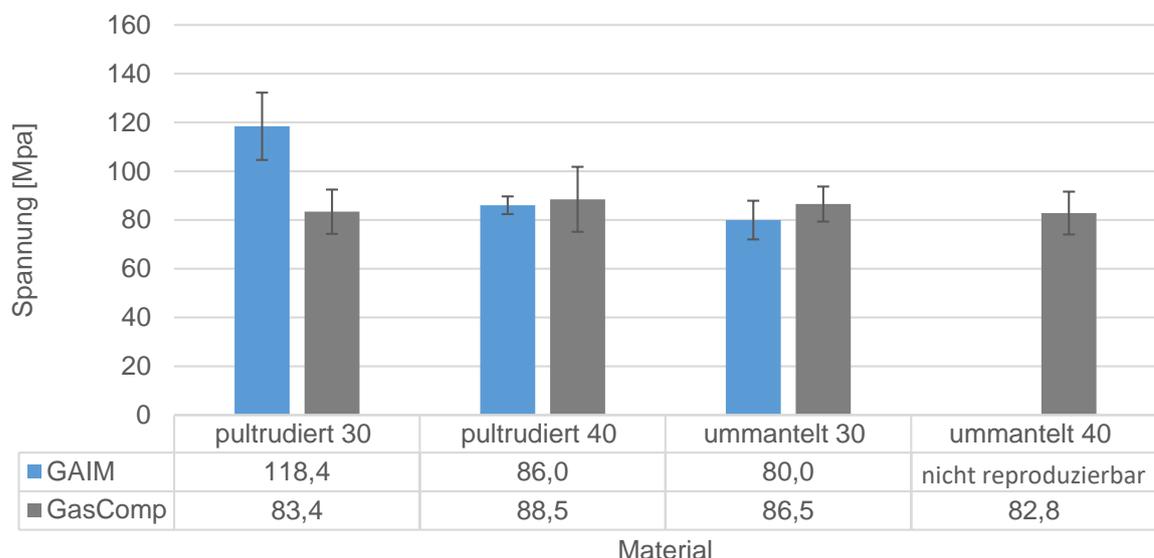
Abbildung 40 Versuchsaufbau der 3-Punkt-Biegeprüfung mit Bemaßung des Prüfstandsbaus (links) und der Prüflage des Versuchsbauteils (rechts).

Zunächst werden die Ergebnisse der Vollkörper, dann jene der im Short-Shot-Verfahren gefertigten Träger und abschließend die der im Nebenkavitätsverfahren hergestellten Träger beschrieben. Das Diagramm in Abbildung 41 zeigt die berechneten Biegespannungen der spritzgegossenen (blau) und fließgepressten (grau) Vollkörper. Im Vergleich der Materialien mit 30 Gew.-% GF zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Granulattypen oder den Verarbeitungsprozessen. Die Werte liegen im Bereich von 100 MPa. Die spritzgegossenen Proben weisen niedrigere Standardabweichungen auf als die fließgepressten Träger. Bei den Vollkörpern mit 40 Gew.-% GF zeigt sich ein heterogenes Bild. Hier sind zwischen beiden Granulattypen prozessbezogene Unterschiede zu sehen. Die im Fließpressprozess gefertigten Träger weisen höhere Festigkeiten auf als die spritzgegossenen Träger. Dabei liegt das pultrudierte Material mit Werten von 99,4 MPa (SG) und 129,6 MPa (FLP) über den Werten des ummantelten Materials, das Biegefestigkeiten von 82,1 MPa (SG) und 97,8 MPa (FLP) erreicht.



**Abbildung 41** Übersicht der durchschnittlichen Bruchspannung zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im Spritzguss- bzw. Fließpress-Prozess als Vollkörper gefertigt wurden.

In Abbildung 42 sind die Mittelwerte der maximalen Biegespannungen der im *Short-Shot-Verfahren* gefertigten Träger aufgetragen. Dabei ist zu beachten, dass beim *GasComp-Prozess* Träger mit 80 % Vorfüllung und beim *GAIM-Prozess* mit 60 % Vorfüllung gefertigt werden (vgl. 6.1). Das ummantelte Material mit 40 Gew.-% GF konnte mit den gewählten Parametern nicht im *GAIM-Prozess* verarbeitet werden. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass alle Träger unabhängig des Prozesses sowie des Glasfasergehalts und Granulattyps ähnliche Werte aufweisen. Einzig das im *GAIM* Prozess verarbeitete pultrudierte Material mit 30 Gew.-% GF weist mit einem Wert von 118,4 MPa einen deutlich höheren Mittelwert auf.



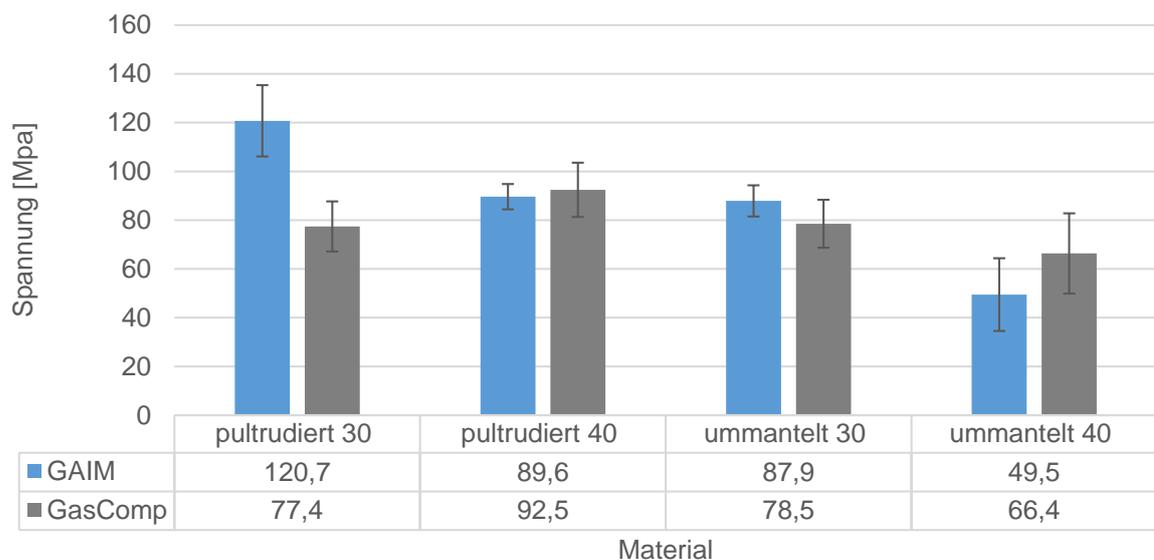
**Abbildung 42** Übersicht der durchschnittlichen Bruchspannung zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im *GAIM-* bzw. *GasComp-Prozess* mit dem *Short-Shot-Verfahren* gefertigt wurden.

Die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung für im Nebenkavitätsverfahren gefertigte Hohlkörper sind in Abbildung 43 dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass die maximalen Biegespannungen (120,7 MPa) bei im Spritzgussprozess gefertigten Trägern mit pultrudiertem Material und 30

Gew.-% GF erreicht werden. Wird das gleiche Material im GasComp-Prozess verarbeitet, werden Biegespannungen von 77,3 MPa ermittelt.

Die vier mittleren Säulen zeigen sowohl die Ergebnisse für das pultrudierte Material mit 40 Gew.-% GF als auch die des ummantelten Materials mit 30 Gew.-% GF. Hier liegen die Ergebnisse von GasComp- und GAIM-Prozess auf ähnlichem Niveau, wobei die Ergebnisse des pultrudierten Granulats mit 40 Gew.-% GF im Mittel leicht höhere Werte aufweisen.

Das ummantelte Material mit 40 Gew.-% GF fällt in diesem Vergleich deutlich ab. Sowohl die GasComp- als auch die GAIM-Träger weisen Biegefestigkeiten unter dem Niveau der anderen Materialien auf. Dabei liegt die mittlere Biegespannung der GAIM-Träger mit 49,4 MPa signifikant unter der von im GasComp gefertigten Trägern, die Mittelwerte von 66,4 MPa aufweisen.

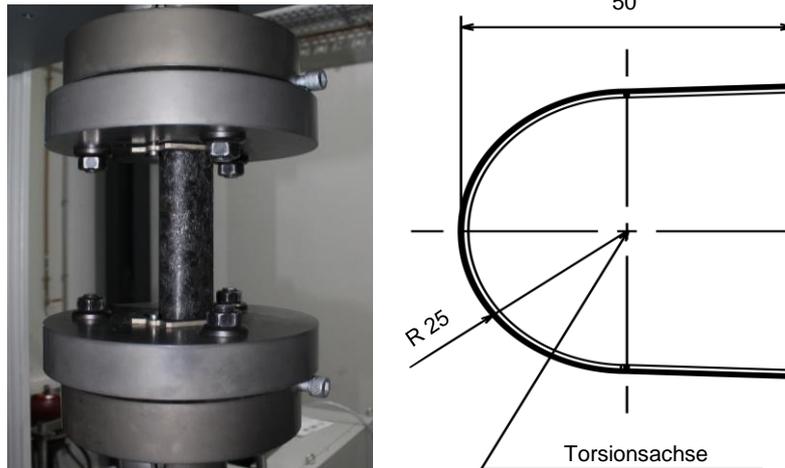


**Abbildung 43** Übersicht der durchschnittlichen Bruchspannung zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im GAIM- bzw. GasComp-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurden.

### Torsionsprüfung

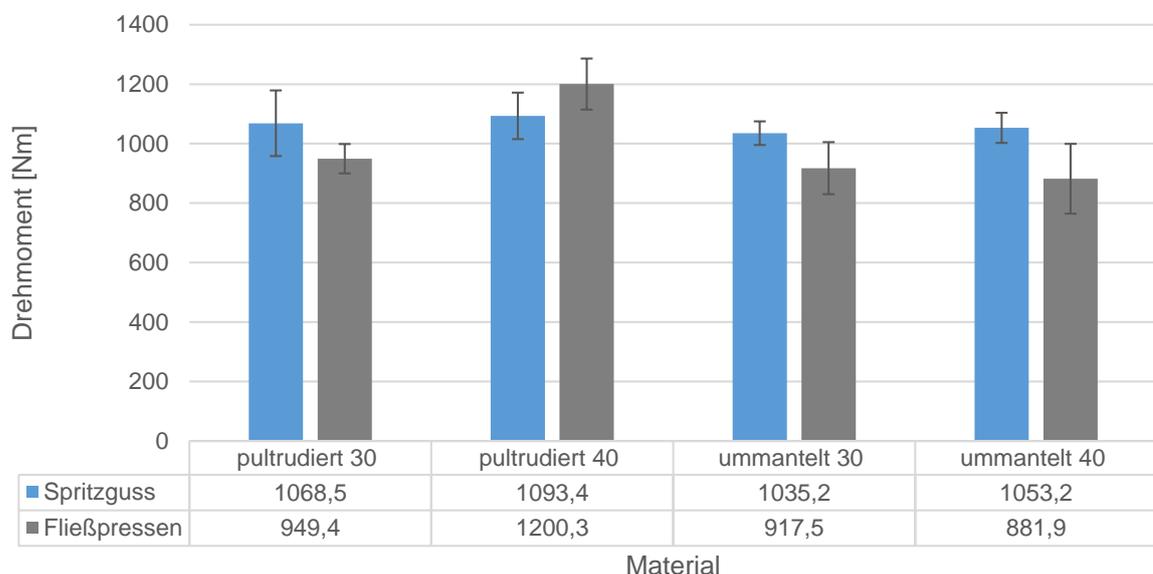
Wie in Kapitel 5.6 beschrieben, ist es nicht sinnvoll Materialkennwerte aus dem Torsionsversuch zu ermitteln, da diese Werte abhängig von Geometrie und Torsionsachse sind. Stattdessen können bauteilspezifische Kennwerte, wie beispielsweise das Drehmoment ermittelt und daraus Erkenntnisse abgeleitet werden. Wie in Abbildung 39 zu sehen, ist die Lage der Gasblase nicht exakt reproduzierbar, sodass die Auswertung der Ergebnisse auf Basis der ermittelten Drehmomente erfolgt.

Die nicht exakt reproduzierbare Gasblase führt auch zu Schwankungen in der Wanddicke, sodass der Masseschwerpunkt nicht gleich der Torsionsachse ist. Diese Abweichung ist jedoch als gering einzustufen, sodass das Wölbmoment gegenüber dem Widerstandsmoment auch als klein angesehen werden kann und daher im Folgenden zu vernachlässigen ist.



**Abbildung 44** Aufbau des Torsionsprüfstands (links) und Aufsicht auf die Stirnfläche eines Prüfkörpers mit eingezeichneter Torsionsachse (rechts)

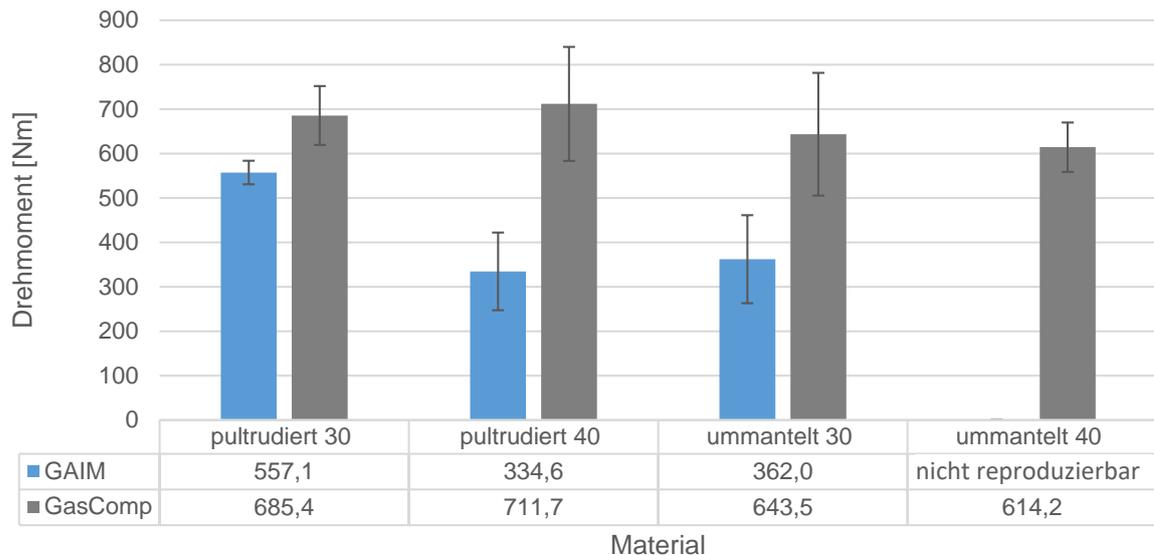
Die Ergebnisse der Torsionsprüfung der Vollkörper zeigen (siehe Abbildung 45), dass die im Spritzguss gefertigten Träger unabhängig von Material und Glasfasergehalt ähnliche Werte im Bereich von 1035 bis 1095 Nm aufzeigen. Bei den im Fließpressverfahren hergestellten Trägern ist das mittlere Drehmoment der Träger aus pultrudierten Material mit 40 Gew.-% GF höher, als das der Träger aus Granulat mit 30 Gew.-% GF. Bei den ummantelten Materialtypen ist kein Unterschied des mittleren Drehmoments bezogen auf den Glasfasergehalt zu erkennen; die Werte liegen auf dem Niveau des pultrudierten Materials mit 30 Gew.-% GF.



**Abbildung 45** Übersicht der durchschnittlichen Drehmomente zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im *Spritzguss-* bzw. *Fließpress-Prozess* als Vollkörper gefertigt wurden.

Bei den in Abbildung 46 gezeigten Werten ist zu beachten, dass beim GasComp-Prozess Träger mit 80 % Formfüllung und beim GAIM-Prozess mit 60 % Vorfüllung gefertigt wurden. In Abhängigkeit des Prozesses sind dies die reproduzierbaren Prüfkörper mit der geringsten Masse. Hier zeigen, mit Ausnahme der Versuchsbauteile aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im GasComp-Prozess gefertigten Träger im Mittel nahezu doppelt so hohe Drehmomente, wie die dem GAIM-Prozess zuzuordnenden Träger.

Bei den im GasComp-Prozess gefertigten Trägern zeigen sich bei der Torsionsprüfung, unabhängig von Granulattyp und Glasfasergehalt, ähnliche Werte. Zwar liegen die Werte der pultrudierten Granulattypen leicht über denen der ummantelten Typen, die Unterschiede liegen jedoch innerhalb der Standardabweichung. Für die im GAIM-Prozess gefertigten Träger zeigt sich das gleiche Bild, nur liegt hier das ummantelte Granulat leicht über den pultrudierten Granulaten. Ein Vergleich des Einflusses des Glasfasergehalts beim ummantelten Material ist nicht möglich, da sich das Material mit 40 Gew.-% nicht mit den vorgegebenen Parametern bei einem Vorfüllgrad von 60 % verarbeiten ließ.



**Abbildung 46** Übersicht der durchschnittlichen Drehmomente zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im GAIM- bzw. GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren gefertigt wurden.

Die Ergebnisse der Torsionsprüfung der im GasComp-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigten Träger zeigen bei allen Trägern ähnliche Werte im Bereich von 600 bis 700 Nm (siehe Abbildung 47). Bei den im GAIM-Prozess gefertigten Trägern zeigen sich unabhängig von Materialtyp und Fasergehalt Werte im Bereich von 327 bis 379 Nm. Die Standardabweichungen der im GAIM-Prozess gefertigten Träger ist bei allen Versuchsreihen gleich oder niedriger, als die der im GasComp-Prozess gefertigten Trägern. Ein kennzeichnender Einfluss von Materialtyp oder Fasergehalt kann nicht festgestellt werden.

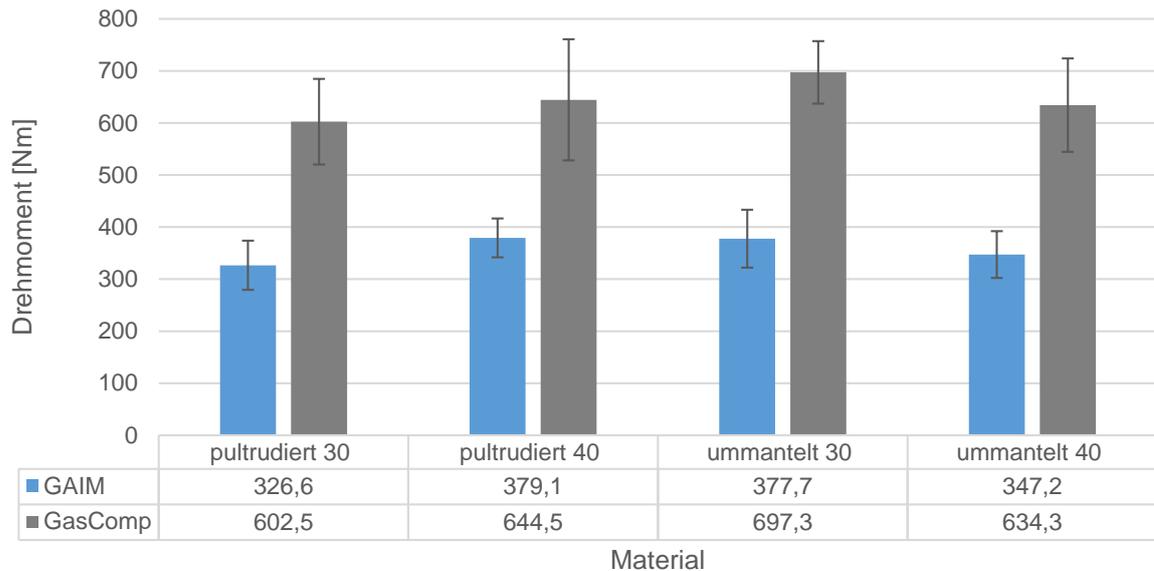


Abbildung 47 Übersicht der durchschnittlichen Drehmomente zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im GAIM- bzw. GasComp-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurden.

### 8.3 Strukturanalyse

Im Rahmen der Strukturanalyse werden zunächst auf makroskopischer Ebene die Oberflächen der Versuchsbauteile vorgestellt und anschließend die Verläufe der Bruchlinien bei den Lastfällen Biegung und Torsion betrachtet. Darauf folgt eine Bruchflächenanalyse, bevor die Grenzflächen von Polymer und Gasblase vorgestellt wird. Im Rahmen dessen wird ebenfalls die Faserbenetzung im Gaskanal betrachtet.

Auf mikrostruktureller Ebene werden sowohl die Ergebnisse der Faserlängen- und Faserorientierungsanalyse vorgestellt als auch die Ergebnisse der Porositätsanalyse dargestellt.

#### Oberflächenstruktur

Die sich ergebenden Oberflächen sind prozessabhängig. Die spritzgegossenen Träger weisen unabhängig von Granulattyp und Fasergehalt gleichmäßige Oberflächen auf (siehe Abbildung 48 rechts). Bei den im Fließpress- bzw. GasComp-Prozess gefertigten Trägern ist deutlich eine unebene Struktur mit länglichen Einkerbungen an der Oberfläche zu erkennen.

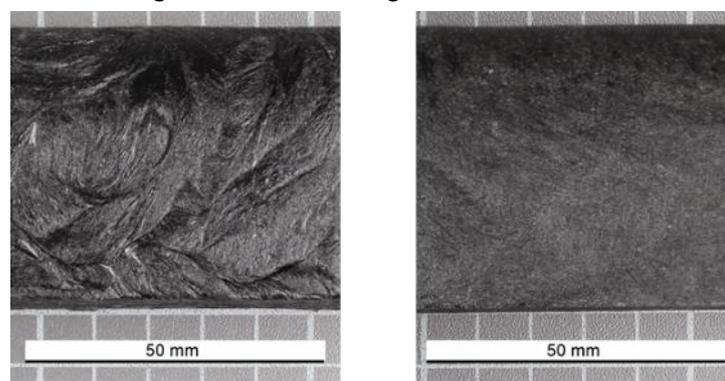


Abbildung 48 Oberflächenstrukturvergleich: unebene Strangstruktur mit länglichen Einkerbungen bei fließgepressten Trägern (links) und gleichmäßige Oberflächenstruktur bei spritzgegossenen Trägern (rechts)

Neben der Struktur der Oberfläche ist zu beobachten, dass es bei Versuchsträgern, die aus ummanteltem Granulat gefertigt werden, in Einzelfällen zu einer Abzeichnung von Faserbündel an der Oberfläche kommt (siehe Abbildung 49). Dies tritt unabhängig vom Verarbeitungsprozess oder der Verfahrensvariante auf.

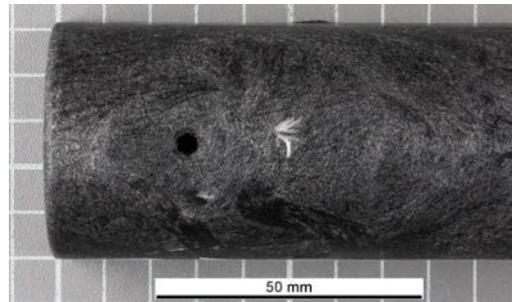


Abbildung 49 *Faserbündel an der Oberfläche eines Trägers aus ummanteltem Granulat, der im Spritzgussprozess gefertigt wurde.*

### Bruchbild

Anhand des Verlaufs der Bruchlinien werden Versagensbilder dokumentiert. Hierbei wird zwischen den Bruchbildern bei Drei-Punkt-Biegung und Torsion differenziert.

#### Drei-Punkt-Biegeprüfung

In Abbildung 50 sind exemplarisch zwei Verläufe von Bruchlinien zu sehen. Oben (a) ist der Bruchverlauf eines im GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren gefertigten Trägers zu sehen. Die untere Hälfte (b) der Abbildung zeigt den Verlauf der Bruchlinien eines GAIM-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigten Trägers. Beide abgebildeten Träger bestehen aus pultrudiertem Granulat mit 30 Gew.-% GF. Die Bruchlinien verlaufen in der Mitte der Träger, auf der gegenüberliegenden Seite der Druckfinne der 3-Punkt-Biegemaschine.

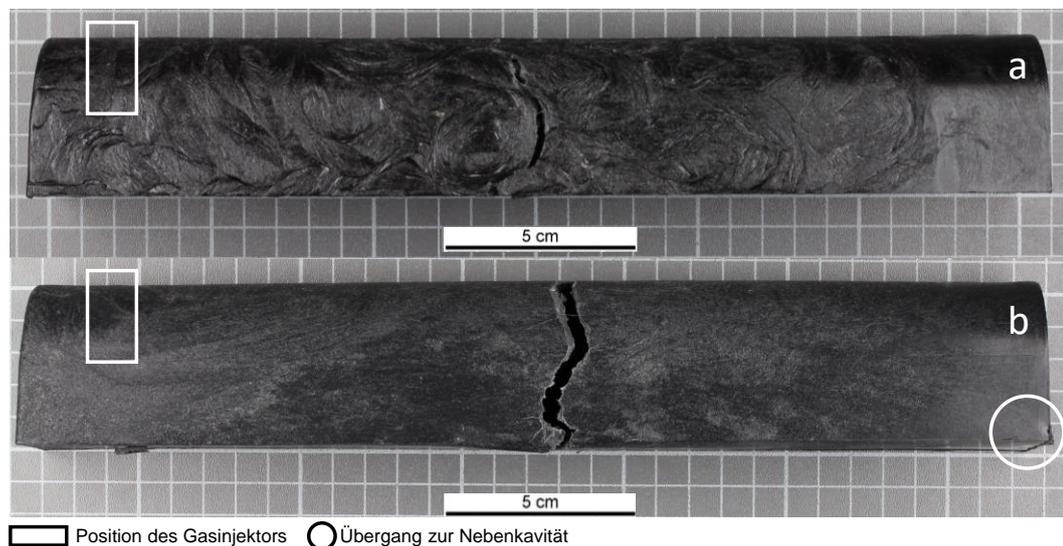


Abbildung 50 *Bruchverlauf bzw. Bruchlinie je eines Trägers aus der 3-Punkt-Biegeprüfung. Der obere Träger (a) wurde ein im GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren (20 bar Maximaldruck) gefertigt. Der untere Träger (b) wurde im GAIM-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigt. Es wurde jeweils das pultrudierte Material mit 30 Gew.-% GF verarbeitet.*

In Abbildung 51 ist eine Nahaufnahme der Bruchlinie des Trägers aus Abbildung 50 zu sehen, der im GasComp-Prozess gefertigt wurde. Die weißen Pfeile zeigen den Verlauf der Bruchkanten. Bei den in dieser Aufnahme zu sehenden Bruchflächen sind keine Glasfasern zu erkennen.

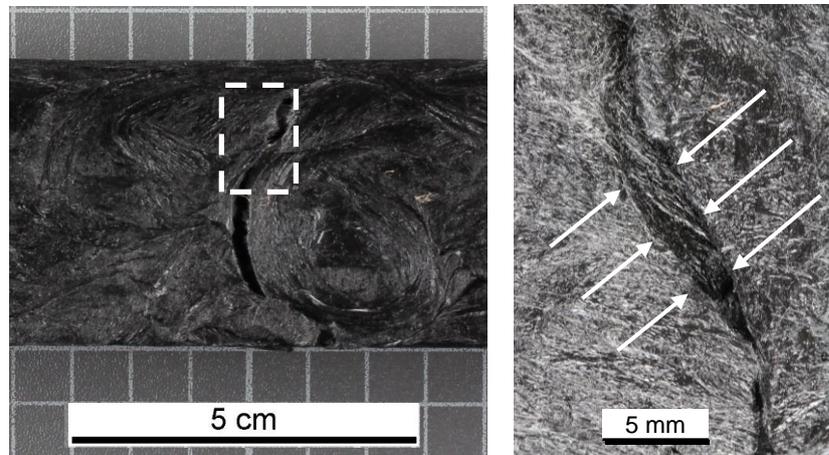


Abbildung 51 Übersichtsbild mit eingezeichnetem Fokusbereich der *Bruchlinie* (links) eines *Versuchsbauteils nach 3-Punkt-Biegung*. Versuchsbauteil aus pultrudiertem Granulat mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im GasComp-Prozess mit Short-Shot-Verfahren, makroskopische Aufnahme der Bruchlinie im Fokusbereich ohne freiliegende Fasern (rechts).

Abbildung 52 zeigt die Aufnahmen der Bruchflächen in 250-facher Vergrößerung eines Trägers, der im GasComp (links) und GAIM-Prozess (rechts) mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurde. In den Bildern ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen. In beiden Fällen ist sowohl Faser-Pull-Out als auch Faserbruch zu erkennen.

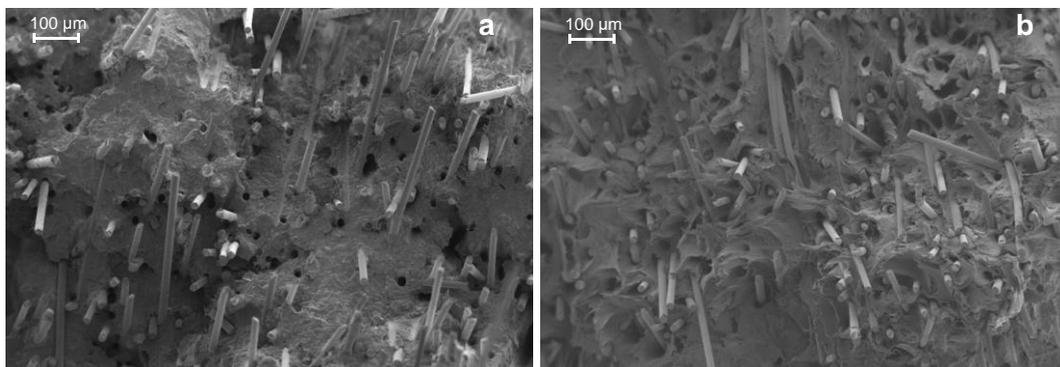


Abbildung 52 Bruchflächen nach 3-Punkt-Biegeprüfung von Trägern aus pultrudiertem Granulat mit 30 Gew.-% GF, die im *Nebenkavitätsverfahren* gefertigt wurden. *GasComp-Prozess* (a) *GAIM-Prozess* (b)

Bei 5000-facher Vergrößerung der Bruchfläche (Abbildung 53) zeigen sich weitere Details. Zum einen ist eine stark ausgeprägte Faser-Matrix-Haftung an der Grenzfläche zu erkennen. Diese ist sowohl durch eine raue Oberflächenstruktur an der Glasfaser als auch durch die Faser umschließende Matrix gekennzeichnet. Zum anderen weist das Polymer eine signifikante Struktur auf, die eine plastische Deformation der Matrix zeigt.

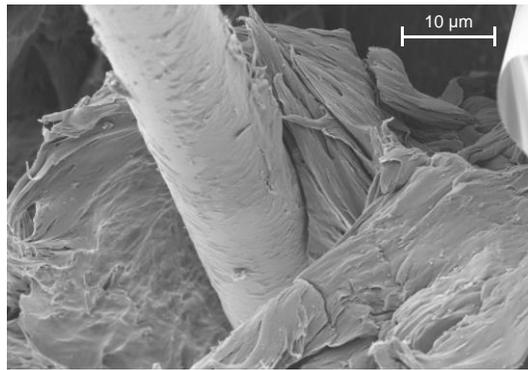


Abbildung 53 zeigt die Bruchfläche eines Versuchsbauteils aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren, nach 3-Punkt-Biegung bei 5000-facher Vergrößerung.

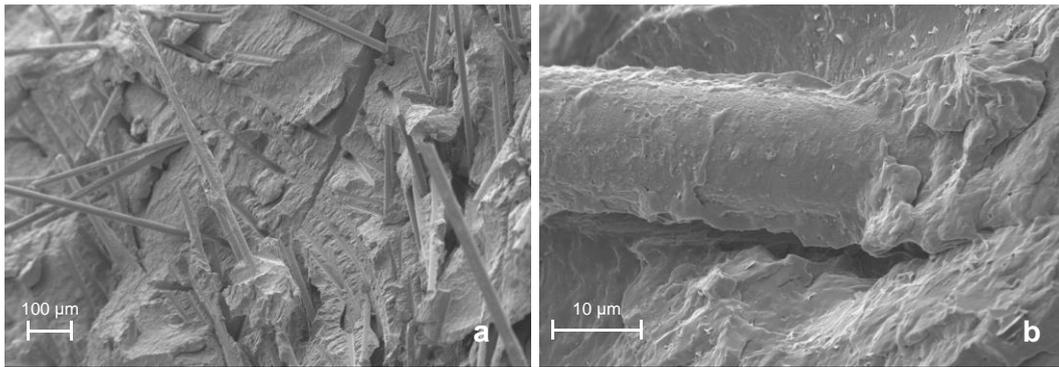
### Torsionsprüfung

In Abbildung 54 sind exemplarisch die Rissverläufe tordierter Proben zu sehen, die im GasComp-Prozess (a) und im GAIM-Prozess (b) gefertigt wurden. Die Risse verlaufen unabhängig vom Fertigungsprozess in einem Winkel von etwa 45° in der Probenmitte.

In Abbildung 55 (links) ist beispielhaft die Bruchfläche eines tordierten Trägers aus pultrudiertem Granulat aus der Versuchsreihe GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren in 250-facher Vergrößerung zu sehen. Hier zeigen sich zahlreiche freistehende Fasern, die aus der Bruchfläche herausstehen. Dabei ist auffallend, dass die Fasern nicht senkrecht aus der Bruchfläche hervorstehen, sondern annähernd in einem 45° Winkel zu dieser. Zudem sind Abdrücke von Fasern zu erkennen, die nicht mehr vorhanden sind, sodass sich hier ein Negativ abzeichnet. Unter 5000-facher Vergrößerung ist in Abbildung 55 (rechts) die gute Anbindung der Faser an die Matrix zu sehen. Weiterhin ist in dieser Aufnahme die Oberfläche des Polymers zu erkennen, die sich als rau und zerklüftet darstellt.



Abbildung 54 Rissverlauf nach Torsionsprüfung an zwei Versuchsbauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im GasComp-Prozess (a) und GAIM-Prozess (b) jeweils in Kombination mit dem Nebenkavitätsverfahren.



**Abbildung 55** Bruchfläche eines Versuchsbauteils nach Torsionsprüfung aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren. Darstellung bei 250-facher Vergrößerung (links) und 5000-facher Vergrößerung (rechts).

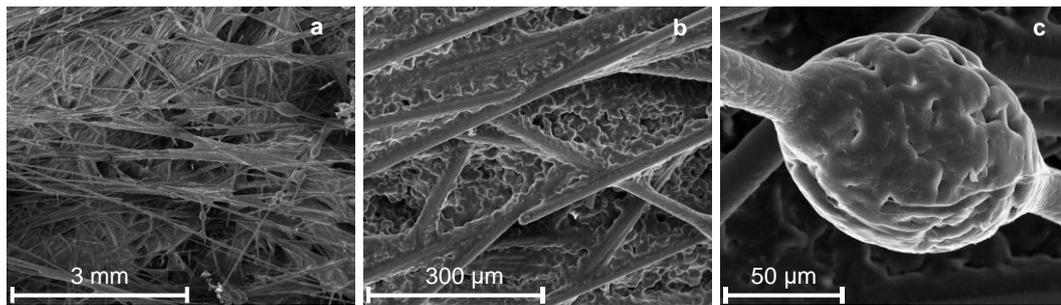
### Grenzflächenstruktur

Bei der Analyse der Grenzfläche von Polymer und Gasblase wird zwischen zwei Vergrößerungsstufen unterschieden. Auf der ersten Stufe wird bei bis zu 2000-facher Vergrößerung der Fokus auf die Glasfasern und deren Benetzung gelegt. In der zweiten Vergrößerungsstufe wird bei bis zu 15.000-facher Vergrößerung die Struktur des Polymers betrachtet.

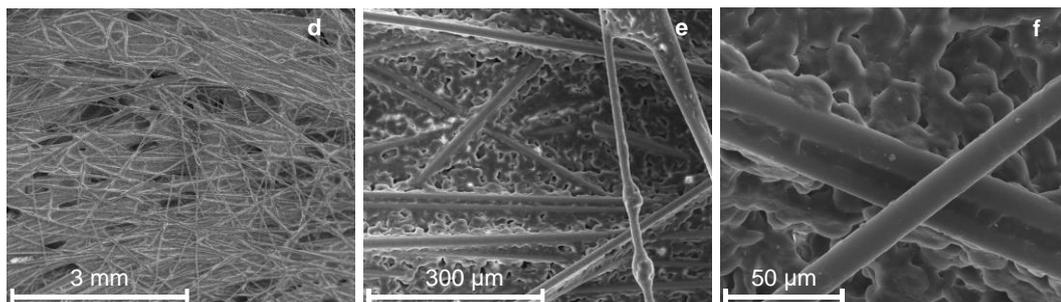
#### Grenzfläche Polymer und Gasblase – Glasfaser

In Abbildung 56 und Abbildung 57 sind sechs Aufnahmen der Grenzflächen zwischen Polymer und Gasblase zu sehen. Dabei zeigt Abbildung 56 Aufnahmen eines Trägers aus ummanteltem Granulat mit 30 Gew.-% GF, der im GasComp-Prozess und mit dem Short-Shot-Verfahren gefertigt wurde. In Abbildung 57 sind Aufnahmen eines Trägers abgebildet, der aus pultrudiertem Material mit ebenfalls 30 Gew.-% GF und im GasComp-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurde. Die Bilder *a* und *d* zeigen Übersichtsaufnahmen bei 50-facher Vergrößerung. Hier sind die Fasern gut zu erkennen, zeichnen sich gegenüber der Matrix deutlich ab und weisen eine Vorzugsrichtung bei ihrer Orientierung auf. Zudem sind in Bild *a* zahlreiche dunkle Bereiche zu erkennen, die der Elektronenstrahl nicht ausleuchtet, da diese im Schatten des Strahls liegen. Die Aufnahmen *b* und *e* zeigen Aufnahmen bei 500-facher Vergrößerung. Hier ist in beiden Fällen eine sehr gute Faser-Matrix-Haftung zu erkennen. Diese ist durch eine ausgeprägte Benetzung der Fasern mit Matrix gekennzeichnet, selbst bei freistehenden Fasern sind tropfenförmige Polymeransammlungen *e* an den Fasern zu erkennen. Die Aufnahmen *c* und *f* zeigen je eine Nahaufnahme bei 2000-facher Vergrößerung. Dabei ist eine tropfenförmige Polymeransammlung *c* sehr gut zu erkennen. In Aufnahme *f* sind sowohl eine freistehende Faser (Vordergrund) als auch zwei mit Matrix verbundenen Fasern (Hintergrund) zu sehen. Die verbundenen Fasern sind ebenfalls deutlich mit Polymer benetzt.

Aufgrund dieser und weiterer ähnlicher Aufnahmen ist festzuhalten, dass es unabhängig von Granulattyp und Verfahrensvariante im Wesentlichen zu einer ausgeprägten Faser-Matrix-Haftung kommt. Zusätzlich ist anzumerken, dass sich in der Grenzfläche von Gasblase und Versuchsbauteil die Glasfasern deutlich in der Matrix abzeichnen und dadurch eine zerklüftete Oberflächenstruktur entsteht.



**Abbildung 56** Faserbenetzung an der Grenzfläche von Gasblase und Polymer bei 50- (a), 500- (b) und 2000-facher (c) Vergrößerung. Die Aufnahmen zeigen ein Versuchsbauteil aus ummanteltem Granulat mit 30 Gew.-% GF, das im GasComp-Prozess mit Short-Shot-Verfahren hergestellt wurde.

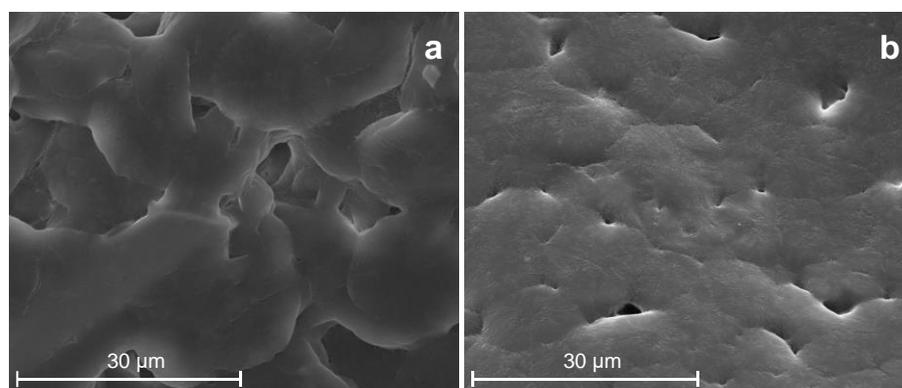


**Abbildung 57** Faserbenetzung an der Grenzfläche von Gasblase und Polymer bei 50- (d), 500- (e) und 2000-facher (f) Vergrößerung. Die Aufnahmen zeigen ein Versuchsbauteil aus pultrudiertem Granulat mit 30 Gew.-% GF, das im GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurde.

#### Grenzfläche Polymer und Gasblase – Polymer

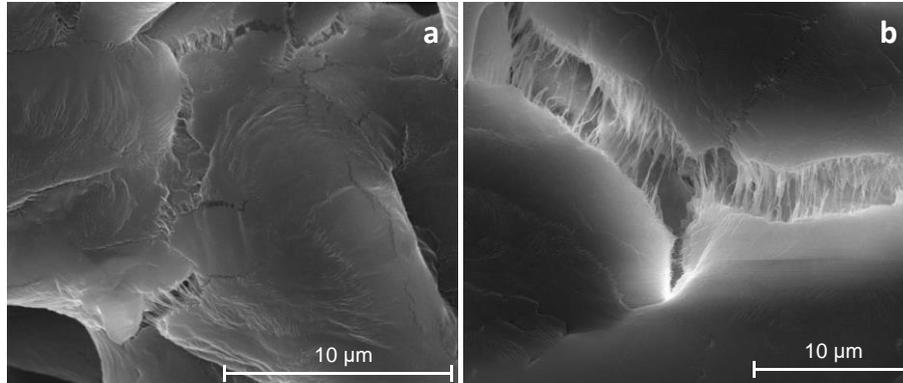
Für die Analyse der Polymerstruktur wird bei bis zu 15.000-facher Vergrößerung der Fokus auf Bereiche zwischen den Glasfasern gelegt, weshalb diese auf den Aufnahmen nicht zu sehen sind. Die Aufnahmen stammen von repräsentativen Versuchsbauteilen, die aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF gefertigt wurden.

Die in Abbildung 58 zu sehenden Grenzflächen zeigen je eine Aufnahme für die Verfahrensvariante Short-Shot (links) und das Nebenkavitätsverfahren (rechts) bei 5000-facher Vergrößerung. Hier zeigen sich verfahrensabhängig unterschiedliche Strukturen. Die Oberfläche (a), die sich durch das Short-Shot-Verfahren ergibt, wirkt inhomogen und offenporig. Es bilden sich rundliche Strukturen aus. Die Aufnahme (rechts) zeigt die Grenzfläche eines Trägers, der mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurde. Diese wirkt homogen, eben und weist wenig Porosität auf.



**Abbildung 58** Grenzfläche von Polymer und Gasblase bei 5.000-facher Vergrößerung, Versuchsbauteile aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im Short-Shot-Verfahren (a) und Nebenkavitätsverfahren (b).

Bei 15.000-facher bzw. 10.000-facher Vergrößerung werden weitere Details sichtbar (siehe Abbildung 59). Die linke der beiden Aufnahmen zeigt bei 15.000-facher Vergrößerung gewölbte Strukturen, in deren Tälern sich fadenförmige Filamente befinden. Bei der rechten Aufnahme sind bei 10.000-facher Vergrößerung weniger gewölbte Strukturen zu sehen, aber auch hier zeichnen sich deutlich fadenförmige Filamente ab.



**Abbildung 59 Grenzfläche von Polymer und Gasblase, Versuchsbauteile aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im Short-Shot-Verfahren (a), gezeigt bei 15.000-facher Vergrößerung und Nebenkavitätsverfahren (b) gezeigt bei 10.000-facher Vergrößerung.**

### Faserlängenanalyse

Die Faserlängenanalysen werden je nach Prozess entweder am Plastifikat beim Fließpressprozess (FLP) oder am Anguss beim Spritzgussprozess (SG) durchgeführt. Das folgende Diagramm (Abbildung 60) zeigt sowohl die gewichts- als auch die anzahlgemittelten Faserlängen. Ein Säulenpaar besteht je aus der gewichtsgemittelten ( $L_p$ , volle Säule) und anzahlgemittelten ( $L_n$ , schraffierte Säule) Faserlänge. Von links betrachtet sind die ersten vier Säulenpaare dem Fließpressprozess zuzuordnen, die darauffolgenden vier Säulenpaare sind dem Spritzgussprozess zugeordnet.

Bei allen Ergebnissen ist festzustellen, dass die Faserlänge während des Plastifiziervorgangs deutlich abnimmt. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Proben der Fließpressformmasse höhere gewichtsgemittelte Faserlängen aufweisen, als die Spritzgussteile. Hingegen zeigen die spritzgegossenen Proben höhere anzahlgemittelte Faserlängen. Zudem ist bei den Spritzgussproben kein Unterschied zwischen den Granulattypen zu erkennen.

Die Unterschiede zwischen anzahl- und gewichtsgemittelter Faserlänge ergeben sich aus den zugrunde liegenden Berechnungen (vgl. 5.8). Bei der gewichtsgemittelten Faserlänge werden schwerere und damit längere Fasern stärker gewichtet. Dies führt zu unterschiedlichen Ergebnissen.

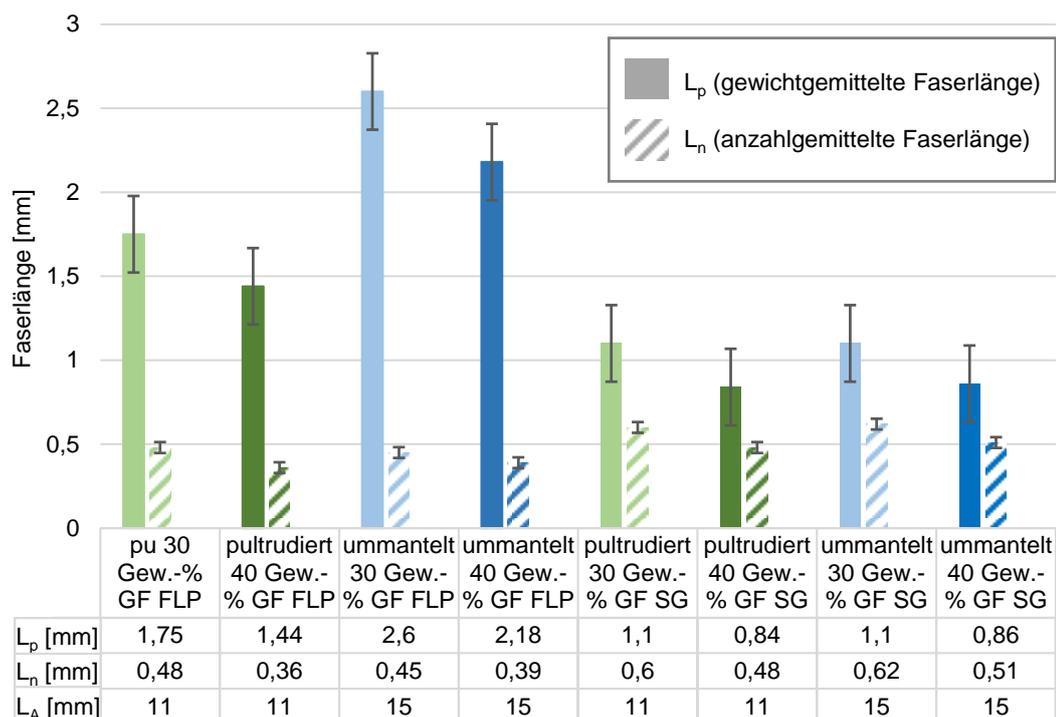


Abbildung 60 Darstellung der gewichtsgemittelten ( $L_p$ ), anzahlgemittelten ( $L_n$ ) und tabellarischen Darstellung Ausgangsfaserlängen ( $L_A$ ) in Abhängigkeit von Verarbeitungsprozess und Granulattyp

Weiterhin ist die Tendenz zu erkennen, dass niedrigere Fasergewichtsanteile zu längeren Fasern führen. Prozentual ist die Kürzung der Fasern bei höheren Ausgangsfaserlängen größer, dies ist sowohl bei der anzahl- als auch bei der gewichtsgemittelten Faserlänge zu beobachten (siehe Tabelle 16).

Außerdem scheinen bei ummantelten Glasfasern im Fließprozess signifikant höhere Glasfaserlängen zu resultieren, im Spritzgießprozess ist diese Tendenz dagegen kaum noch bis gar nicht zu erkennen.

Tabelle 16 Prozentuale Faserkürzung bei anzahl- (Gl. 13) und gewichtsgemittelter Faserlänge (Gl. 14) bezogen auf die Ausgangsfaserlänge in Abhängigkeit von Material und Verarbeitungsprozess

| Material                     | Faserkürzung in % bezogen auf $L_n$ | Faserkürzung in % bezogen auf $L_p$ |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| pultrudiert 30 Gew.-% GF FLP | 95,64                               | 84,09                               |
| pultrudiert 40 Gew.-% GF FLP | 96,73                               | 86,91                               |
| ummantelt 30 Gew.-% GF FLP   | 97,00                               | 82,67                               |
| ummantelt 40 Gew.-% GF FLP   | 97,40                               | 85,47                               |
| pultrudiert 30 Gew.-% GF SG  | 94,55                               | 90,00                               |
| pultrudiert 40 Gew.-% GF SG  | 95,64                               | 92,36                               |
| ummantelt 30 Gew.-% GF SG    | 95,87                               | 92,67                               |
| ummantelt 40 Gew.-% GF SG    | 96,60                               | 94,27                               |

### Faserorientierung

Für die Faserorientierungsanalyse wird die Methode der Referenzorientierung angewendet, wobei die Fließrichtung bzw. Gasausbreitungsrichtung die Referenzorientierung bildet (vgl. 5.8). Die dargestellten Ergebnisse (Tabelle 17) zeigen die Orientierung der Fasern von Trägern, die aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF gefertigt wurden.

Es wird sowohl zwischen den Prozessen GasComp und GAIM unterschieden, als auch eine Differenzierung der Verfahrensvarianten Short-Shot und Nebenkavitätsverfahren vorgenommen. Ferner werden die analysierten Proben in drei Bereiche eingeteilt, sodass eine feinere Bewertung ermöglicht wird. Der erste definierte Bereich liegt nahe der Werkzeugwand [1]. Der zweite Bereich stellt die Restwanddicke [2] dar, der dritte Bereich grenzt direkt an die Gasblase [3] bzw. liegt bei Vollkörpern der Bereich in der Mitte des Bauteilquerschnitts. Da es sich um eine qualitative Bewertung der Faserorientierung handelt, wird zur Darstellung der Ergebnisse eine Pfeil-Codierung verwendet, die Auskunft über die Orientierung gibt. Dabei zeigt ein horizontaler Pfeil (→) an, dass es quasi keine Vorzugsorientierung gibt und ein senkrechter Pfeil (↑) zeigte eine stark ausgeprägte Orientierung in Referenzrichtung an.

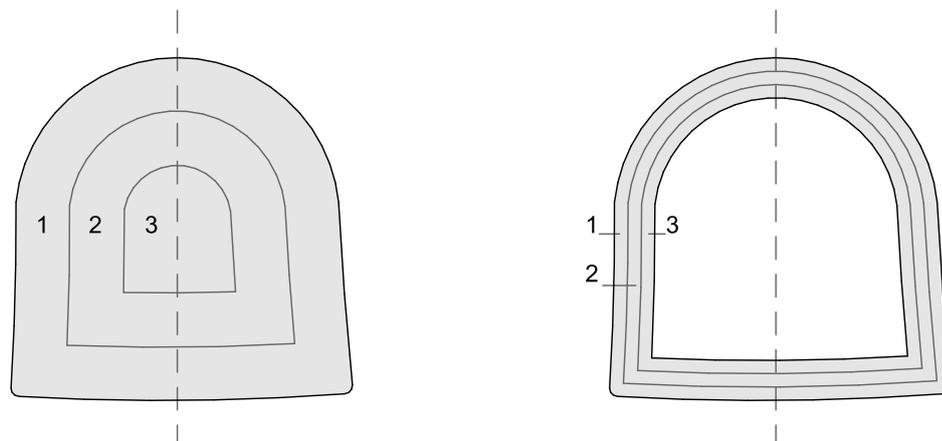


Abbildung 61 Schematische Darstellung der Analysebereiche zur Faserorientierung am Beispiel eines Vollkörpers (links) und eines Hohlkörpers (rechts).

Die Ergebnisse zeigen, dass im GasComp-Prozess in den Bereichen [1] und [2] quasi keine Vorzugsorientierung der Fasern zu erkennen ist. Im Bereich [3] ist in Abhängigkeit der Verfahrensvariante eine Zunahme der Faserorientierung in Referenzrichtung vorzufinden. So ist beim Vollkörper keine Veränderung zu den Bereichen [1] und [2] zu erkennen. Beim Short-Shot-Verfahren liegt eine leicht ausgeprägte Vorzugsorientierung in Referenzrichtung vor und beim Nebenkavitätsverfahren sind die Fasern in der Grenzschicht von Polymer und Gasblase stark in Fließ- bzw. Referenzrichtung orientiert.

Tabelle 17 Qualitative Ergebnisübersicht der Faserorientierungsanalyse für GasComp- und GAIM-Prozess sowohl bei Vollkörpern als auch bei Versuchsbauteilen aus dem Short-Shot- und dem Nebenkavitätsverfahren.

| Prozess/Verfahrensvariante | GasComp-Prozess |     |     | GAIM-Prozess |     |     |
|----------------------------|-----------------|-----|-----|--------------|-----|-----|
|                            | [1]             | [2] | [3] | [1]          | [2] | [3] |
| <b>Bereich</b>             |                 |     |     |              |     |     |
| Vollkörper                 | →               | →   | →   | ↑            | →   | →   |
| Short-Shot-Verfahren       | →               | →   | ↗   | ↑            | →   | ↗   |
| Nebenkavitätsverfahren     | →               | →   | ↑   | ↑            | ↗   | ↑   |

→ keine ausgeprägte Vorzugsorientierung in Referenzrichtung;

↗ mäßig ausgeprägte Vorzugsorientierung in Referenzrichtung;

↑ stark ausgeprägte Vorzugsorientierung in Referenzrichtung

Im GAIM-Prozess ist eine stärkere Orientierung der Fasern in Referenzrichtung zu erkennen. Dabei zeigt sich die gleiche Tendenz, die auch schon beim GasComp-Prozess zu beobachten ist. Ausgehend vom Vollkörper nimmt die Orientierung der Fasern in Referenzrichtung beim

Short-Shot-Verfahren zu und ist beim Nebenkavitätsverfahren am stärksten ausgebildet. Anders als beim GasComp-Prozess ist beim GAIM-Prozess die Orientierung der Fasern in Referenzrichtung im Bereich [1] stark ausgebildet. Die Veränderung der Faserorientierung im Bereich [3] zeigt die gleichen Tendenzen wie beim GasComp-Prozess.

### Porosität

Bei der Porositätsanalyse wurden Proben aus der Mitte der Technologieträger in Füllrichtung analysiert. Dieser Bereich weist bei den mechanischen Analysen die maximalen Spannungen auf, sodass aus der dort vorhandenen Mikrostruktur Rückschlüsse auf die Ergebnisse der mechanischen Prüfung gezogen werden können. Dabei wird die Porosität in Abhängigkeit der Ortskoordinate, also des Abstands vom Gaskanal, aufgezeichnet (siehe Abbildung 62). Zudem wird die Geometrie der Poren analysiert.

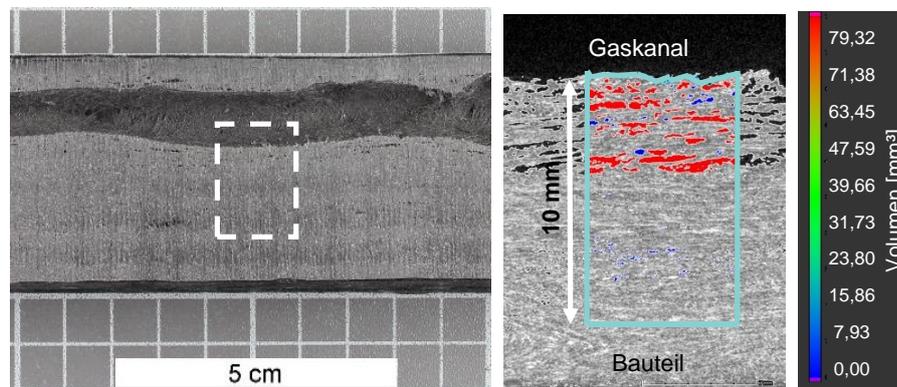


Abbildung 62 Darstellung der *Porositätsanalyse* am Beispiel eines Trägers aus der *Maximaldruckstudie* mit 20 bar Druck. Weiß umrahmt der Analysebereich des Versuchsbauteils(links). Analyse des Bereichs (rechts), der türkise Rahmen stellt die Region of Interest dar, Rot und Blau stellen die detektierten Poren dar, deren Volumen anhand der Skala einzuordnen ist.

### Geometrie der Poren

Die Poren weisen im Allgemeinen eine ähnliche geometrische Gestalt auf. Diese lässt sich näherungsweise als Ellipsoid beschreiben, bei dem eine deutlich größere Ausdehnung in Gasblasenausbreitungsrichtung und quer dazu zu erkennen ist, als dies senkrecht zur Gasblasenausbreitungsrichtung der Fall ist. In Abbildung 63 ist ein Schnittmodell dargestellt, das je einen Schnitt pro Achse zeigt, sodass zwei vertikale und ein horizontaler Schnitt zu sehen sind. Die Lage der Schnitte wird durch die Perspektive deutlich.

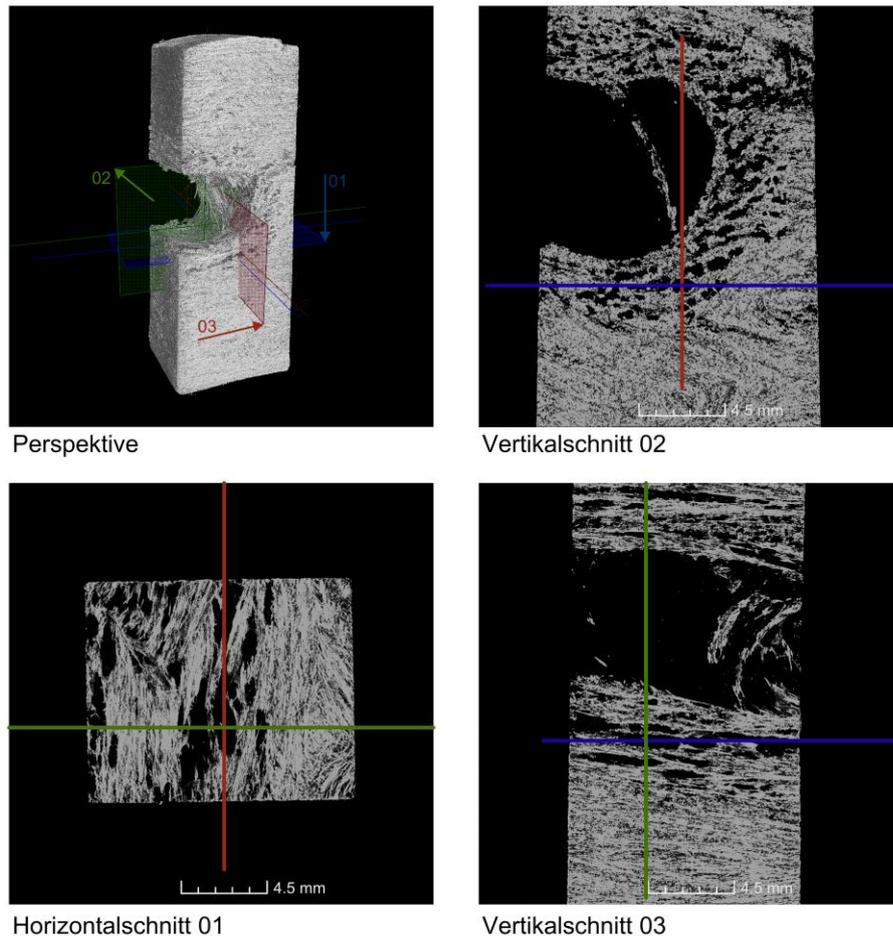


Abbildung 63 Darstellung der *Porengeometrie* mit Perspektive und drei Schnittdarstellungen am Beispiel eines CT-Scans des Bauteils aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, das im *GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren* gefertigt wurde.

## Materialstudien

### Vollkörper-Studie

Bei der Ermittlung der Porosität für den Vollkörper wird ein Volumenelement analysiert, das sich über den gesamten Querschnitt des Körpers erstreckt. Somit werden lokale Maxima nicht überrepräsentiert. Abbildung 64 zeigt den Verlauf der Porosität über den Querschnitt des Bauteils, welcher im Hintergrund des Diagramms liegt. Dabei ist zu erkennen, dass die lokalen maximalen Porositätswerte je nach Material zwischen 9,5 % (pultrudiert 30 Gew.-% GF) und ca. 6 % (ummantelte 40 Gew.-% GF) liegen. Der Verlauf der Porosität über die Ortskoordinate zeigt bei allen Materialien in erster Näherung einen ähnlichen qualitativen Verlauf mit anderen absoluten Werten. Die maximalen Werte werden in der Mitte des Trägers, im Bereich zwischen 25 und 35 mm, ermittelt.

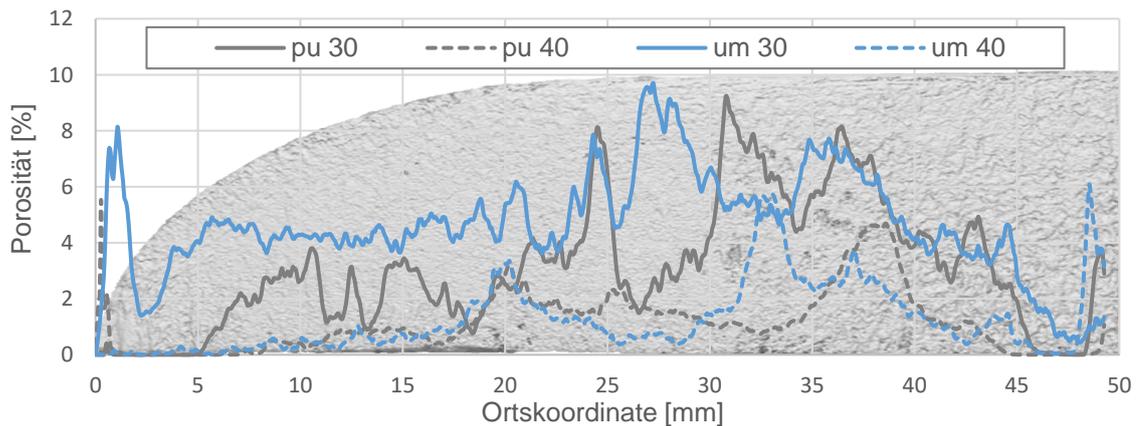


Abbildung 64 Porositätsverlauf über den Querschnitt am Beispiel von repräsentativen *Vollkörpern* aus den vier unterschiedlichen Granulattypen, die im Fließpressprozess hergestellt wurden.

### LGF-Granulatstudie

Mit Ausnahme der Vollkörperstudie, werden ausschließlich Hohlkörper betrachtet. Das Diagramm Abbildung 65 zeigt die Porositätsverläufe der unterschiedlichen Granulattypen und Glasfasergehalte entlang der Ortskoordinate (vgl. Analysebereich in Abbildung 62). Hierbei ist zu sehen, dass die Porositätskurven der beiden Granulate mit 30 Gew.-% GF quasi parallel verlaufen. Im Vergleich der beiden Kurven mit 40 Gew.-% GF weist die Kurve des pultrudierten Materials eine höhere maximale Porosität auf. Sie fällt nach ca. 4,5 mm auf einen Wert kleiner 10 % ab. Der Porositätsverlauf des ummantelten Materials mit 40 Gew.-% GF weist eine niedrigere maximale Porosität auf; hier fällt die Porosität bei ca. 6 mm unter die Schwelle von 10 % ab.

Die Kurven der Materialien mit 30 Gew.-% GF weisen beide bei 0,5 mm einen Maximalwert von über 50 % auf. Auch der weitere Kurvenverlauf ist bei beiden Materialien ähnlich, bei ca. 7 mm erreicht die Porosität bei beiden Kurven einen Wert nahe 0 %.

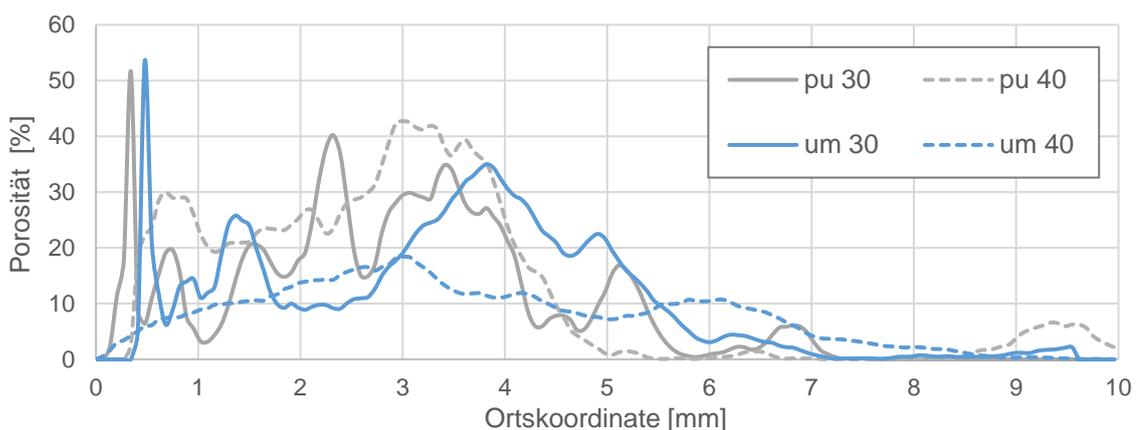


Abbildung 65 Die Ergebnisse der LGF-Granulatstudie zeigen den *Verlauf der Porosität* entlang der Ortskoordinate bei Versuchsbauteilen, die aus den vier untersuchten Granulattypen im *GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren* gefertigt wurden.

### Material-Referenzstudie

Die vier abgebildeten Kurven zeigen die unterschiedliche Porosität in Abhängigkeit des Materials. Dabei zeigt sich, dass die Langfasergranulate zu einer höheren Porosität führen als das Kurzglasfasergranulat. Das reine PP weist nahezu keine Porosität auf.

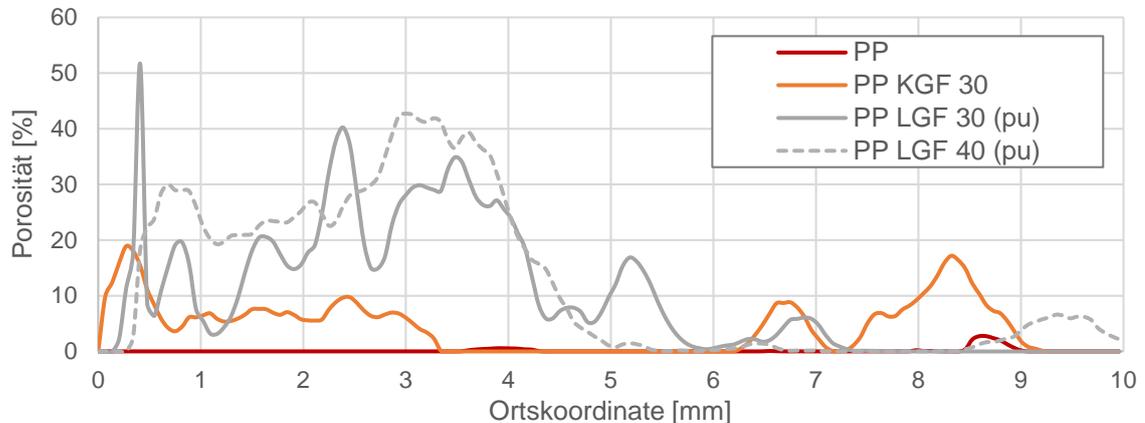


Abbildung 66 Die Ergebnisse der Porositätsanalyse der Material-Referenzstudie zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate von Versuchsbauteilen aus unverstärktem PP, PP KGF mit 30 Gew.-% GF und pultrudiertem PP LGF mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren gefertigt wurden.

### Vergleichsstudie Short-Shot- und Nebenkavitätsverfahren

Die beiden Kurven in Abbildung 67 zeigen den Verlauf der Porosität als Funktion des Abstands zur Gasblase. Hier ist bis zu einem Abstand von 6 mm zu erkennen, dass die Verfahrensvariante Short-Shot eine höhere Porosität als beim Nebenkavitätsverfahren zeigt. Ab einem Abstand von 6 mm von der Gasblase entfernt, gleichen sich die Kurven an und zeigen eine Porosität auf niedrigem Niveau.

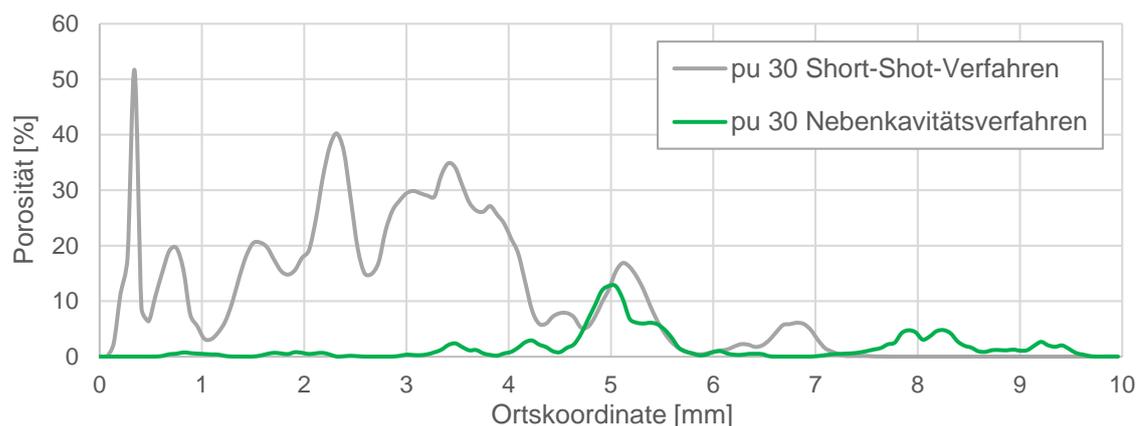


Abbildung 67 Die Ergebnisse der Verfahrensstudie zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate am Beispiel von Bauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im GasComp-Prozess mit Short-Shot- und Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurden.

### Parameterstudien zum Aufschäumen der Grenzschicht

Im Folgenden werden die Ergebnisse der im Abschnitt 7.3 beschriebenen Studien dargestellt.

#### Maximaldruckstudie

In Abbildung 68 ist die Porosität für unterschiedliche Druckstufen über der Ortskoordinate aufgetragen. Hier ist zu erkennen, dass bei einem Druck von 300 bar die höchsten Porositätswerte (bis zu 60,2 %) festgestellt werden und die Porosität am weitesten in das Material hineinreicht (über 10 mm). Niedrigere Druckniveaus führen zu geringeren maximalen Porositätswerten und zu kürzeren Eindringtiefen. Die Kurve bei 20 bar Maximaldruck zeigt im Bereich zwischen 0 bis 1 mm einen lokales Maximum und fügt sich ab der Ortskoordinate von 1 mm in den Verlauf der Kurven von 20 und 40 bar ein.

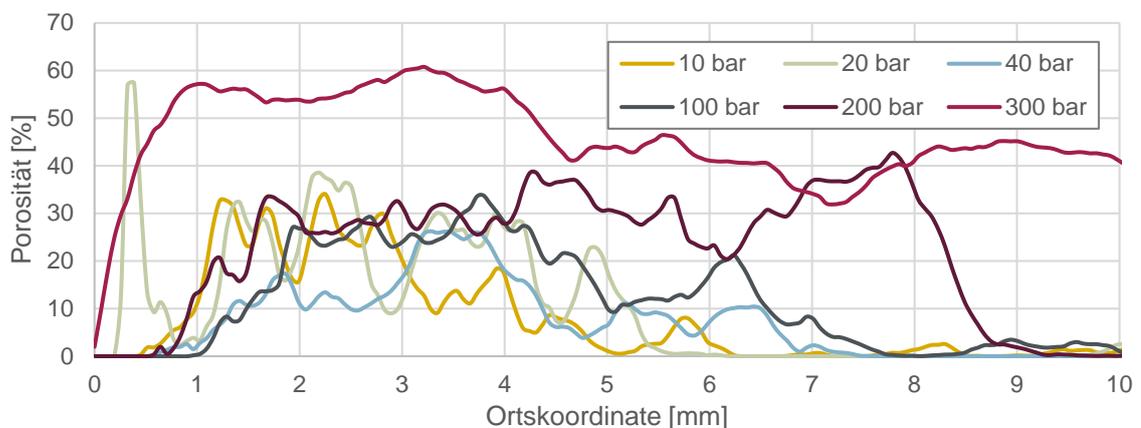


Abbildung 68 Die Ergebnisse der *Maximaldruckstudie* zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate am Beispiel von Bauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im *GasComp-Prozess* mit dem *Short-Shot-Verfahren* bei unterschiedlichen maximalen Druckniveaus gefertigt wurden.

#### Druckabbauzeitstudie

Die Abbildung 69 zeigt sechs unterschiedliche Porositätsverläufe in Abhängigkeit der Druckabbauzeit. Hier zeigt sich, dass bei einer Abbauzeit von 0,1 s Porositätswerte von über 60 % gemessen werden. Verlängert sich die Abbauzeit, so sinkt die Porosität ab. Bei einer Abbauzeit von 2 Sekunden ergibt sich im abgebildeten Diagramm das Porositätsminimum. Ab einer Ortskoordinate von 5 mm sinkt die ermittelte Porosität unabhängig der Abbauzeit auf Werte unter 20 %. Ein Einfluss der Abbauzeit auf die Ortskoordinate der Porosität ist nicht festzustellen.

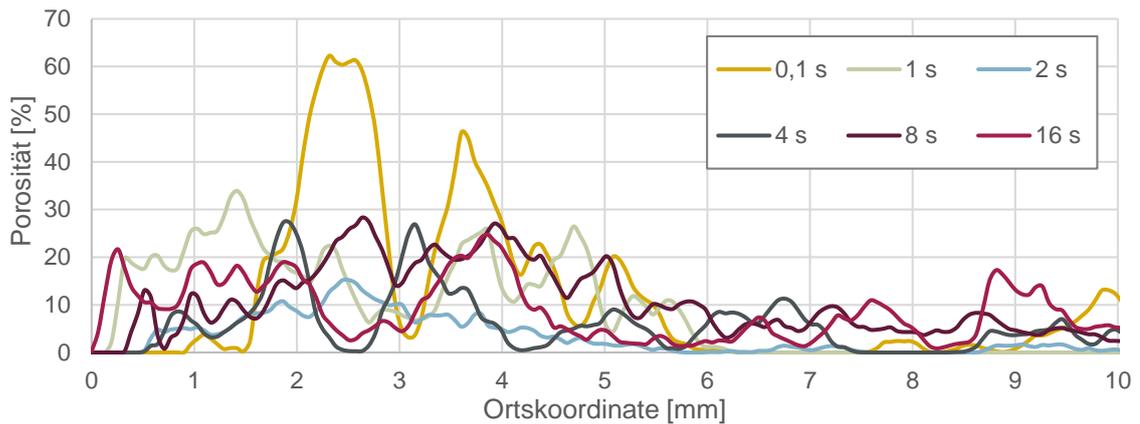


Abbildung 69 Die Ergebnisse der *Druckabbauzeitstudie* zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate am Beispiel von Bauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im *GasComp-Prozess* mit dem *Short-Shot-Verfahren* bei sechs unterschiedlichen *Druckabbauzeiten* gefertigt wurden.

### Haltezeitstudie

Unabhängig von der Haltezeit kommt es zu qualitativ ähnlichen Porositätsverläufen (siehe Abbildung 70). Bei Haltezeiten von 15, 25 und 50 Sekunden fällt auf, dass ab 4 mm die Porosität höher ist als bei den anderen betrachteten Haltezeiten. Ab einer Ortskoordinate von 6 mm sinkt die Porosität unabhängig der Haltezeit unter 10 % und steigt im weiteren Verlauf auch nicht wieder über diesen Wert an.

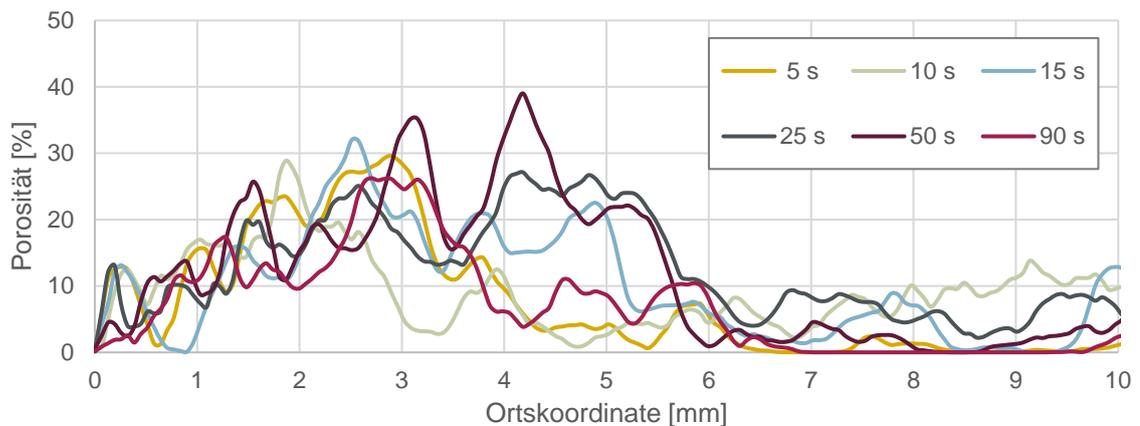


Abbildung 70 Die Ergebnisse der *Haltezeitstudie* zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate am Beispiel von Bauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im *GasComp-Prozess* mit dem *Short-Shot-Verfahren* bei sechs unterschiedlichen *Druckhaltezeiten* gefertigt wurden.

## 9 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die zuvor vorgestellten Ergebnisse sowohl interpretiert und diskutiert als auch miteinander in Bezug gesetzt, sodass eine kritische Betrachtung ermöglicht wird. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit der Ermittlung des Leichtbaupotenzials. Dabei werden die zuvor diskutierten Argumente nochmals gezielt unter dem Aspekt des Leichtbaus betrachtet.

### 9.1 Hohlraumausformung

Nachfolgend werden die in Abschnitt 8.1 vorgestellten Ergebnisse interpretiert und diskutiert. Dabei wird zunächst auf die Form der Gasblase in Abhängigkeit von Prozess und Verfahren eingegangen, bevor auf die Restwandstärke, das Flächenträgheitsmoment und die resultierende Masse eingegangen wird.

#### Gasblasenform – Short-Shot-Verfahren

Die Gasblasenform, die mittels GasComp-Prozess in der Verfahrensvariante Short-Shot erzeugt wird (siehe Abbildung 37), entspricht der in der Literatur beschriebenen Gestalt (Becker 1999; Hansen 1996; Moritzer 1997; Schröder 1997). Hier zeigt sich eine gleichmäßige Gasblase, die in ihrem Querschnitt kaum schwankt und am Ende eine leichte Tendenz zu einer Schwindungslanze aufweist (siehe Abbildung 37 a). Die von Schröder (1997) beschriebenen Ausspülungen an der dem Gasinjektor gegenüberliegenden Seite können nicht erkannt werden. Dies steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit der höheren Viskosität der Langfaserplastifikate im Vergleich zu unverstärkten oder mit Kurzglasfasern verstärkten Polymerschmelzen. Die vergleichsweise hohe Scherviskosität langfaserverstärkter Polymerschmelzen kann auch für die Erklärung der Gasblasenposition herangezogen werden, denn anders als in der Literatur beschrieben, kann kein Einfluss der Gravitation nachgewiesen werden. Diese Aussage beruht auf der Beobachtung, dass die Gasblase exzentrisch an der Unterseite des Trägers verläuft. Würde die Gravitation einen Einfluss haben, so wäre die Gasblase aufgrund der niedrigeren Dichte exzentrisch nach oben und nicht nach unten verschoben.

Durch die konstante Gasblasenlage bzw. Gasblasenposition im Träger ergeben sich entlang der Längsachse gleichmäßige, aber unterschiedliche Restwanddicken an Ober- und Unterseite (siehe Abbildung 37 a). Dies führt sowohl zu einem inhomogenen Schwindungsverhalten als auch zu inhomogenen mechanischen Eigenschaften. Die Tatsache, dass die Träger dennoch keinen Verzug aufweisen, ist auf die Langfaserverstärkung zurückzuführen, die der inhomogenen Schwindung entgegenwirkt (Henning, Moeller 2011).

#### Gasblasenform – Nebenkavitätsverfahren

Im Nebenkavitätsverfahren ergibt sich eine großvolumige Gasblasenform (Abbildung 38). Der Querschnitt der Gasblase nimmt mit zunehmendem Fließweg zu. Das heißt, je weiter die Gasblase vom Injektor entfernt ist, desto größer ist der Querschnitt.

Dies ist auf zwei von Schröder (1997) beschriebene Zusammenhänge zurückzuführen. Zum einen hängt die Gasblasenausbreitungsgeschwindigkeit vom Gegendruck, also der Restmasse vor der Gasblasenfließfront, ab und zum anderen nimmt mit zunehmender Gasblasenausbreitungsgeschwindigkeit das ausgespülte Volumen zu. Somit handelt es sich hier um ei-

nen sich selbstverstärkenden Effekt, der dazu führt, dass mit zunehmendem Gasblasenfließweg und abnehmendem Fließwiderstand der Durchmesser der Gasblase und damit das Volumen des Gaskanals größer wird. Hier sieht es aus, als ob es einen Grenzwert gibt, der beim GAIM-Prozess bereits nach ca. 5 cm Gasausbreitungsweg erreicht ist. Der Grenzwert kann in Verbindung mit der eingefrorenen Randschicht an der Werkzeugwand gebracht werden.

### **Restwanddicke, Flächenträgheitsmoment und Masse**

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass beim GasComp-Prozess maximal 25 % Masse eingespart werden kann. Hingegen sind beim GAIM-Prozess Gewichtseinsparungen von über 50 % möglich. Aus diesem Zusammenhang ist zu erkennen, dass im GAIM-Prozess, unabhängig der Verfahrensvariante, dünnere Restwanddicken realisiert werden können. Im Nebenkavitätsverfahren können sowohl im GAIM- als auch im GasComp-Prozess leichtere und dünnwandigere Hohlstrukturen gefertigt werden, als im Short-Shot-Verfahren. Dies steht im Gegensatz zu den in der Literatur beschriebenen Erkenntnissen, die sich auf unverstärkte und kurzfaserverstärkte Polymere beziehen. Diese besagen, dass mittels des Short-Shot-Verfahrens leichtere und dünnwandigere Bauteile hergestellt werden können. (Menges, Michaeli, Mohren 2007) Da es bisher kaum Erfahrungen zur Verarbeitung von LGF-Granulaten mittels GIT gibt, scheint der in der Literatur beschriebene Zusammenhang für die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Geometrie und die verwendeten Verfahren nicht zuzutreffen.

Wie in der Literatur beschrieben (Schröder 1997; Moritzer 1997; Lanvers 1993; Menges, Michaeli, Mohren 2007), strebt der Gasblasenquerschnitt an, dem stabförmigen Bauteilquerschnitt zu entsprechen. Dieses Bestreben spiegeln die gewonnenen Ergebnisse nicht pauschal wieder. Wie in Abschnitt 8.1 zu sehen, entstehen bei Vorfüllgraden von ca. 80 % runde, nicht dem Fließwegquerschnitt entsprechende Gasblasen. Dies gilt insbesondere für den GasComp-Prozess. Erst bei einem Vorfüllgrad unter 70 % nimmt der Gasblasenquerschnitt die Form des Fließwegquerschnitts an. Diese Aussage gilt für langfaserverstärkte Polymere mit einem Fasergehalt von 30 Gew.-%. Bei einem Fasergehalt von 40 Gew.-% kommt es zu einem ungleichmäßigen Gasblasenquerschnitt. Dies steht im Gegensatz zur Aussage Schröders (Schröder 1997), der seine Experimente mit kurzglasfaserverstärkten Materialien durchführte. Daraus leitete er die Aussage ab, dass mit zunehmendem Fasergehalt die Restwanddicke abnimmt. Aufgrund der hier gewonnenen Erkenntnisse wird eine Differenzierung zwischen Kurz- und Langfaserverstärkung notwendig.

Die unterschiedliche Gasblasengestalt und Restwanddicke im Vergleich von GasComp- und GAIM-Prozess, ist durch die inhomogene Zusammensetzung des eingelegten Plastifikats beim GasComp-Prozess zu erklären. Durch die undefinierte Ablage des extrudierten Polymers ergibt sich ein Plastifikat mit zahlreichen Bindenähten zwischen den Windungen des Strangs. Da sich das Gas stets den Weg des geringsten Widerstands sucht, sind diese Bindenähte Schwachstellen innerhalb des Plastifikats und geben damit die Ausbreitungsrichtung und die Gestalt der Gasblase vor. Somit ist die Gestalt der Gasblase weniger vom Gasdruckprofil als von der Struktur des Plastifikats abhängig. Dies hat zur Folge, dass sich statt einer großflächigen Gasblasenfließfront, eine Gasblase mit kleinem Durchmesser und großer Länge ausbildet. Hingegen bildet sich beim GAIM-Prozess in der Verfahrensvariante Short-Shot, bei gleichem Vorfüllgrad (siehe Abbildung 37) eine deutlich kürzere Gasblase mit größerem Durchmesser.

Durch die homogene Zusammensetzung der Schmelze kann sich hier ein blockförmiges Gasblasenströmungsprofil ausbilden, das entlang der Längsachse des Trägers für eine vergleichsweise homogene und niedrige Restwanddicke sorgt. Um im GAIM-Prozess eine vergleichbar lange Gasblase realisieren zu können, muss die Vorfüllung auf 60 % reduziert werden. Auf Grund des größeren Gasblasendurchmessers ergibt sich bei gleicher Gasblasenlänge wie beim GasComp-Prozess ein größeres Gasblasenvolumen, was zu einer Reduzierung des eingespritzten Schmelzevolumens führt.

Das axiale Flächenträgheitsmoment, welches für die Berechnung der Bruchspannung notwendig ist, wird maßgeblich von der Massenverteilung um die Biegeachse, in diesem Fall die Längsachse des Trägers, beeinflusst. Die daraus resultierende Restwanddicke geht in die Berechnung mit der vierten Potenz ein und ist daher ein entscheidender Faktor. Hier zeigt sich deutlich, dass Leichtbau im Spannungsfeld der mechanischen Eigenschaften steht. Würden ausschließlich die absoluten Werte betrachtet, dann wären Vollkörper dünnwandigen Hohlstrukturen überlegen. Die in Kapitel 9.4 ausgewiesenen Leichtbaupotenziale zeigen jedoch, dass bei einer spezifischen Betrachtung dieser Eindruck widerlegt wird.

## 9.2 Mechanische Analysen

Im Rahmen der Interpretation und Diskussion der Ergebnisse der mechanischen Prüfung werden der Bezug zu anderen Analysen hergestellt. Dabei wird im Besonderen auf den Aspekt der Faserorientierung eingegangen.

### Drei-Punkt-Biegeprüfung

Die Ergebnisse der Drei-Punkt-Biegeprüfung zeigen deutlich den Vorteil dünnwandiger Hohlstrukturen. Die Träger aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im GAIM-Prozess sowohl in der Verfahrensvariante Short-Shot als auch im Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurden, zeigen mit mittleren maximalen Biegespannungen von 118,4 MPa und 120,7 MPa nur leicht niedrigere Werte als der mittlere gemessene Höchstwert von 129,6 MPa bei fließgepressten Vollträgern aus pultrudiertem Material mit 40 Gew.-% GF. Wenn diese Ergebnisse in Verbindung zu den Ergebnissen der Faserorientierungsanalyse gebracht werden, bestätigt dies, dass mit steigender Faserorientierung eine zunehmende Anisotropie des FKV vorliegt. Durch eine lastgerechte Faserausrichtung führt dies zu einer Erhöhung der Biegefestigkeit.

Ein Einfluss der Faserlänge ist nur bei den im Spritzguss bzw. im GAIM-Prozess hergestellten Trägern zu erkennen. Hier kann festgestellt werden, dass eine höhere Faserlänge die Festigkeit stärker positiv beeinflusst, als ein um 10 % höherer Fasergehalt. Diese Aussage gilt sowohl für das pultrudierte als auch für das ummantelte Material. Dies ist möglicherweise auch darauf zurückzuführen, dass aufgrund des geringeren Fasergehalts mehr freies Volumen für die Faserorientierung zu Verfügung steht und die Fasern stärker in Fließ- bzw. Belastungsrichtung orientiert vorliegen. Hierbei ist interessant, dass das ummantelte Material trotz längerer Fasern (Abbildung 60) bei allen Trägervarianten niedrigere Festigkeiten aufweist. Dies kann zum einem im Zusammenhang mit einer lokal weniger stark ausgeprägten Faser-Matrix-Haftung bzw. einer unzureichenden Vereinzelung der Faserbündel stehen (siehe Abschnitt 9.3). Zum anderen kann es mit der kritischen Faserlänge (siehe 3.1.4) in Verbindung gebracht werden, die ebenfalls entscheidend von der Faser-Matrix-Kopplung abhängig ist. Diese hängt

im Wesentlichen vom Aspektverhältnis der Faser und der Schlichte ab. Beim pultrudierten Material scheint die kritische Faserlänge bereits erreicht zu sein, sodass die längeren Fasern des ummantelten Granulats für die Biegefestigkeit keinen positiven Einfluss mehr erzielen können.

Ein signifikanter Einfluss der in Abschnitt 9.2 beschriebenen verfahrensspezifischen Porosität auf die Biegefestigkeit kann nicht nachgewiesen werden. Dies ist plausibel, da die porösen Bereiche im Inneren des Trägers vorzufinden sind und damit nahe an der neutralen Faser liegen. Die maximale Biegespannung tritt in der Randschicht auf, die von der Porosität nicht beeinflusst wird.

Der Einfluss der Oberflächenqualität (siehe 9.2) auf die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung wird nicht ersichtlich. Durch die strukturiertere Oberfläche, der im GasComp-Prozess gefertigten Träger wäre hier ein Versagen bei niedrigeren Spannungen zu erwarten gewesen. Diese Vermutung ist darauf zurückzuführen, dass, wie bereits oben ausgeführt, die Randfasern bei Biegung am stärksten belastet werden und damit Vertiefungen in der Oberfläche durch Kerbwirkung zu lokalen Spannungsspitzen führen, die ein früheres Versagen hätten verursachen können.

### **Torsionsprüfung**

Sowohl die im Short-Shot-Verfahren als auch die im Nebenkavitätsverfahren mit dem GasComp-Prozess gefertigten Träger benötigen deutlich höhere Drehmomente zum Versagen, als die mit den gleichen Verfahren im GAIM-Prozess gefertigten Träger. Dazu können zwei Erklärungsansätze herangezogen werden. Auf makroskopischer Ebene sind dies die unterschiedlichen Restwandstärken. Versuchsbauteile die mit dem GasComp-Prozess gefertigt wurden, zeigen sowohl in Kombination mit dem Short-Shot- als auch mit Nebenkavitätsverfahren größere Restwandstärken als im GAIM-Prozess gefertigte Versuchsbauteile (siehe Abbildung 39). Somit ist die bei der Torsionsprüfung belastete Querschnittsfläche unterschiedlich groß und die größere Fläche der im GasComp-Prozess gefertigten Träger versagt bei höheren Drehmomenten. Diesen Zusammenhang von Querschnittsfläche und Versagenswert zeigen auch die Ergebnisse der tordierten Vollkörper. Hier liegen die gemessenen Drehmomente noch über den Werten der Träger aus dem Short-Shot-Verfahren. Die unterschiedlichen Werte von Spritzguss und Fließpressprozess schwanken im Bereich der Standardabweichung. Die Tendenz, dass die Versagenswerte der spritzgegossenen Träger in drei von vier Fällen über den Werten der fließgepressten Träger liegen, ist möglicherweise auf eine kompaktere und homogenere Struktur zurückzuführen. Die Versuchsbauteile aus dem Fließpressprozess weisen die beschriebene Strangstruktur und den damit verbundenen Bindenähten auf, welche bei den Versuchsbauteilen aus dem Spritzgussprozess nicht vorzufinden sind. Auf makroskopischer Ebene zeigt sich also, dass bei der reinen Betrachtung von gemessenen Kräften, wie dem Drehmoment, dünnwandige und damit leichte Strukturen keine Vorteile gegenüber massiveren Strukturen aufweisen.

Auf mikroskopischer Ebenen ist ein wesentlicher Faktor die in den Bauteilen vorzufindende Faserorientierung (siehe Abbildung 61). Für Torsionsbelastung weisen die im GAIM-Prozess gefertigten Träger eine ungünstige Faserorientierung auf, da die Fasern nicht in Belastungs-

richtung ( $45^\circ$  zur Längsachse des Trägers), sondern in Fließrichtung ( $0^\circ$  zur Längsachse) ausgerichtet sind. Hier zeigt sich der Nachteil anisotroper Bauteileigenschaften. Die im GasComp-Prozess gefertigten Träger weisen eine weitestgehend zufällige Faserorientierung auf, in deren Folge es zu quasi isotropen Bauteileigenschaften kommt. Die Isotropie führt dazu, dass diese Träger höhere Torsionskräfte aufnehmen können. Mit diesem Erklärungsansatz lassen sich auch die Ergebnisse der Vollkörper erläutern, bei denen kein signifikanter Einfluss des Prozesses zu erkennen ist. Bezogen auf den großen Bauteilquerschnitt nehmen die Randbereiche nur einen geringen Anteil der Querschnittsfläche ein. Diese Bereiche sind bei den spritzgegossenen Trägern die einzigen Bereiche, die eine Faserorientierung in Fließrichtung aufweisen. In Bezug auf den Bauteilquerschnitt überwiegen so, die zufällig orientierten und damit isotropen Bereiche. Dies ähnelt der zufallsorientierten Strangstruktur, wie sie bei den fließgepressten Trägern vorzufinden ist. Somit weisen die Vollkörper unabhängig des Fertigungsprozesses eine ähnliche absolute Faserorientierung auf, wodurch auch die geringen Abweichungen bei den Ergebnissen der Torsionsprüfung zu erklären sind.

Aufgrund der inhomogenen Wanddickenverteilung entlang der Längsachse mancher Träger, ist es nicht möglich einen weiteren signifikanten Einflussfaktor auf Basis der vorliegenden Ergebnisse zu erkennen. Somit können weder der Einfluss des Glasfasergehalts noch die Art des Granulats als Einflussfaktor aus- bzw. eingeschlossen werden.

### 9.3 Strukturanalyse

#### Oberflächen

Die auf Seite 64 vorgestellten unterschiedlichen Oberflächen sind auf die Verarbeitungsprozesse zurückzuführen. Die im Spritzguss gefertigten Träger weisen eine homogene Oberfläche auf, die auf die Quellströmung während der Formfüllung zurückzuführen ist. Die im Fließpressprozess gefertigten Körper weisen hingegen eine strukturierte Oberfläche auf. Diese lässt sich durch die Strangstruktur erklären, aus der sich das Plastifikat zusammensetzt. Aufgrund der niedrigen Schergeschwindigkeiten während des Pressprozesses und der Werkzeugtemperatur von  $30^\circ\text{C}$  kühlt die Außenhaut der Probekörper schneller ab und diese Struktur in den Randbereichen bleibt nahezu unverändert erhalten. Die strukturierte Oberfläche mit ihren Vertiefungen und der damit verbundenen Kerbwirkung sowie den dort lokal auftretenden Spannungsspitzen wäre auch eine mögliche Erklärung dafür, wenn die im GasComp-Prozess gefertigten Träger im 3-Punkt-Biege-Versuch niedrigere Festigkeiten aufweisen würden.

Die in Abbildung 49 dargestellten nicht dispergierten Faserbündel an der Oberfläche sind ausschließlich bei Trägern aus ummanteltem Granulat vorzufinden und sind unabhängig vom Verarbeitungsprozess. Dies ist auf eine unzureichende Dispersionszone der Plastifiziereinheit zurückzuführen. Eine Erhöhung des Staudrucks oder der Schneckendrehzahl beim Spritzgießen sollte zu einer besseren Dispersion und gegebenenfalls aber auch zu einer erhöhten Faserschädigung führen. Die nicht mit Schmelze konsolidierten Fasern stellen eine Schwächung des FKV dar, da es an den Grenzen von Polymer und Fasern zu lokalen Spannungsspitzen kommt. Dass diese nicht dispergierten Faserbündel nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Inneren des FKV vorzufinden sind hat Goris (Goris u. a. 2018) mittels CT-Analysen an spritzgegossenen Bauteilen nachweisen können (siehe Abbildung 71). Dies ist eine mögliche

Erklärung, weshalb die Träger aus ummanteltem Granulat niedrigere mechanische Eigenschaften aufweisen, als die aus pultrudiertem Material. Bei den pultrudierten Materialien steht durch die gute Faserbenetzung eine größere Grenzfläche zur Kraftübertragung zur Verfügung.

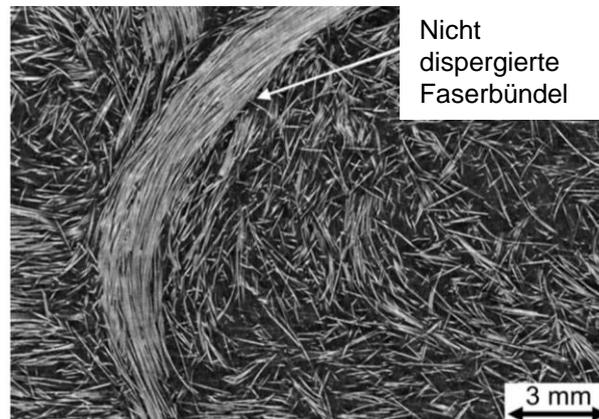


Abbildung 71 CT-Aufnahme von *nicht dispergierten Faserbündeln* am Beispiel spritzgegossener Bauteile aus ummanteltem Granulat mit 30 Gew.-% GF (Goris u. a. 2018).

### Bruchbilder – 3-Punkt-Biege-Prüfung

Die in Abbildung 50 gezeigten Bruchverläufe entsprechen der Erwartung, dass das Versagen an der der Druckfinne gegenüberliegenden Seite auftritt. Dort wirken die höchsten Normalspannungen, sodass an dieser Stelle eine Rissinitiierung zu erwarten ist. Der weitere Verlauf des Risses, des im GAIM-Prozess gefertigten Trägers, zeigt keine Besonderheiten.

Der im GasComp-Prozess gefertigte Träger wird aufgrund der zuvor beschriebenen Oberflächenstruktur in Abbildung 51 genauer betrachtet. Hier zeigt sich, dass der Riss entlang der Grenzfläche zweier Stränge verläuft. Dies wird durch das Fehlen von Fasern in der Bruchfläche deutlich, da vorhandene Fasern parallel zur Bruchfläche ausgerichtet sind. Durch die raue Oberflächenstruktur und die damit einhergehende Kerbwirkung wäre eine geringere Biegefestigkeit in Folge von kerbinduzierter Rissbildung zu erwarten gewesen. Diese Vermutung bestätigen die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung nicht, sodass dieser Effekt keinen signifikanten Einfluss hat.

Bei der Analyse der Bruchflächen zeigen sich bei 250-facher Vergrößerung keine Unterschiede bei Material, Prozess oder Verfahrensvariante. Wie zu erwarten sind die überwiegenden Versagensformen des FKV sowohl Faser Pull-Out als auch Faserbruch. Bei 5.000-facher Vergrößerung (vgl. Abbildung 53) ist eine stark ausgeprägte Faser-Matrix-Haftung zu erkennen, die durch eine stark mit Polymer benetzte Faser gekennzeichnet wird. Weiterhin kann durch das Bruchbild des Polymers als Duktilbruch beschrieben werden, bei dem eine plastische Deformation des Polymers zu erkennen ist, welche durch die Glasfasern beeinflusst wird (Pohl 2007).

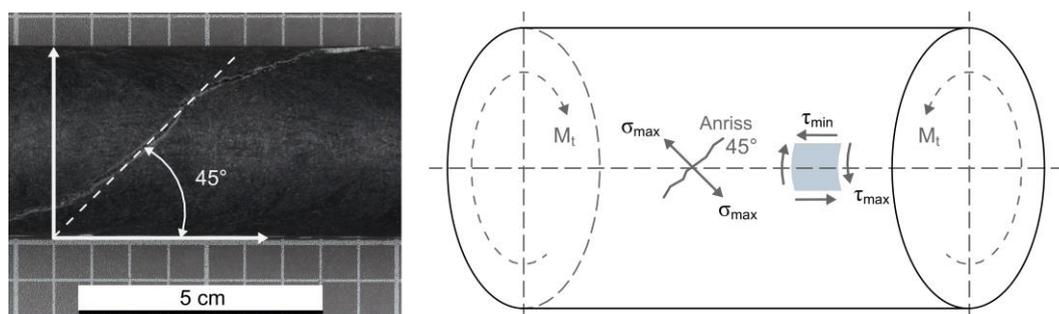
### Bruchbilder – Torsionsprüfung

Die zwei in Abbildung 54 gezeigten Bruchlinien eines im GasComp-Prozess und eines im GAIM-Prozess gefertigten Trägers zeigen keine prozess- oder verfahrensspezifischen Unterschiede. Der Riss verläuft in einem Winkel von ca. 45° zur Drehachse des Trägers (siehe Abbildung 72 links), was dem in der Literatur beschriebenen Versagensbild (Bürgel, Richard,

Riemer 2014) entspricht. Dies ist auf die anliegenden Kräfte bzw. Spannungen zurückzuführen, wie sie in Abbildung 72 (rechts) eingetragen sind.

Die Bilder der Bruchflächenanalyse lassen sich wie folgt interpretieren: Die Aufnahmen mit 250-facher Vergrößerung (Abbildung 55) zeigen zahlreiche lange, freiliegende Glasfasern, die in die Bruchfläche hineinragen und eine Vorzugsorientierung von ca. 45° zur Bruchfläche aufweisen. Dies ist auf die Faserorientierung während des Verarbeitungsprozesses zurückzuführen. Die Fasern werden, wie die Ergebnisse der Mikrostrukturanalyse zeigen, in Fließrichtung orientiert, sodass diese in dem beschriebenen 45° Gradwinkel aus der horizontalen Bruchfläche bzw. Bildebene herausstehen. Die Werkstoffanstrengung erfolgt daher in einem Winkel von 45 Grad zur Faserlängsachse, sodass ein für anisotrope Werkstoffe wie FKV, ungünstiger Lastfall vorliegt, in dessen Folge es zu einem Versagen unterhalb der für diesen Werkstoff möglichen Werte kommt.

Durch die für Torsionsbelastung ungünstige Faserorientierung kommt es zu diesem Bruchbild, bei dem weder Faserbruch noch Faser-Pull-Out zu erkennen sind. Stattdessen kommt es zu einem Abgleiten (Delamination) der Fasern aus der Matrix (vgl. 3.1.5), wodurch auch die Negative der abgeglittenen Fasern zu erklären sind.



**Abbildung 72 Winkel des Rissverlaufs in einem Versuchsträger aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren (links); Skizze eines torsionsbelasteten Zylinders mit eingezeichneten Maximalspannungen und resultierendem Risswinkel (rechts).**

Bei 5.000-facher Vergrößerung (vgl. Abbildung 56) zeigt sich eine sehr gut ausgeprägte Faser-Matrix-Haftung. Daraus lässt sich ableiten, dass es zu keinem Versagen in der Grenzfläche von Faser und Polymer kommt, sondern zu einem Versagen des Polymers nahe der Grenzfläche. Dies spricht für eine gute Kraftübertragung von der Polypropylen-Matrix auf die mit einer haftungsverbessernden Schichte behandelten Glasfasern. Die zu erkennende Struktur des Polymers in der Bruchfläche lässt sich als Spröbruch entlang der Sphärolithgrenzen interpretieren und steht damit im Einklang mit den in der Literatur beschriebenen Versagensbildern bei Torsionsbelastung.

### Grenzflächen

Die REM-Aufnahmen der Grenzfläche von Gasblase und Polymer in Abbildung 56 zeigen unabhängig von der Granulattyp nahezu gleiche Merkmale. Die sich auf den Übersichtsbildern (50-fache Vergrößerung) a und b gut abzeichnenden Glasfasern weisen eine Vorzugsorientierung vom Injektor weg auf, was auch der Ausbreitungsrichtung des Gases während der Gasinjektionsphase entspricht. Dabei ist die Orientierung der Probe aus dem Short-Shot-Verfahren weniger stark ausgeprägt als die der Probe des Nebenkavitätsverfahrens. Dies zeigt, dass

durch die gasblaseninduzierte Scherung des schmelzflüssigen FKV die Fasern in der Grenzschicht orientiert werden. Dies deckt sich mit den in Abschnitt 3.1.4 beschriebenen Erkenntnissen von Zheng (2007). Bei der Aufnahme des Nebenkavitätsverfahrens ist die Orientierung stärker ausgeprägt als bei Zheng, was durch die unterschiedlichen Verfahrensvarianten (Zheng: Short-Shot-Verfahren; vorliegende Aufnahmen: Nebenkavitätsverfahren) und die damit einhergehenden unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten zu erklären ist. Dabei gilt, dass mit steigender Schergeschwindigkeit die Ausrichtung der Fasern zunimmt.

Die sich deutlich abzeichnende Glasfaserstruktur ist auf eine Faser-Matrix-Separation in der Grenzschicht zurückzuführen. Durch den Gasdruck wird das schmelzflüssige Polymer von den Fasern separiert. Dabei wirken die Fasern wie ein Sieb, durch dessen Maschen das Polymer fließt. Durch die zahlreichen Kreuzungen der Glasfasern stellen diese eine Stützstruktur dar, die dem Gasdruck einen höheren Widerstand bietet als das noch flüssige Polymer. Da es dabei zu keinem Versagen der eigentlichen Faser-Matrix-Haftung kommt, zeigen sowohl die Aufnahmen *b* und *c* als auch *e* und *f*. Dort ist deutlich zu erkennen, dass die Fasern mit Polymer benetzt sind. Auffallend sind dabei die in den Aufnahmen *b*, *c* und *e* zu sehenden tropfenförmigen Polymeransammlungen an freistehenden Fasern. Diese können als Polymerreste betrachtet werden, die durch den Gasdruck nicht von den Fasern gelöst werden konnten.

Die im Vergleich von Short-Shot- und Nebenkavitätsverfahren auffallenden Unterschiede in der Grenzfläche werden durch die dunklen Bereiche der Aufnahmen *a* und *b* gekennzeichnet. Diese können als Vertiefungen in der Grenzschicht betrachtet werden und deuten auf eine höhere Porosität hin. Diese Vermutung steht im Einklang mit den Ergebnissen der Porositätsanalyse (vgl. 8.3) und bestätigt diese.

Zur Analyse der Polymerstruktur sind Vergrößerungen im Bereich von 5.000 bis 15.000 notwendig, so wie sie in Abbildung 58 und Abbildung 59 zu sehen sind. Die untersuchte Grenzfläche von Gasblase und Polymer der im GasComp-Prozess und im Short-Shot-Verfahren gefertigten Träger stellt zum Zeitpunkt der Kristallisation eine freie Oberfläche dar. An dieser Oberfläche herrschen aufgrund der geringen Wärmekapazität des Stickstoffs und der großen Restwanddicke über einen längeren Zeitraum quasi isotherme Bedingungen. Unter diesen Rahmenbedingungen können ausgeprägte Sphärolithe mit einem Durchmesser von 10 bis 20  $\mu\text{m}$  wachsen. Deren konvexe Kalotte ist teilweise sehr gut sichtbar. Abbildung 73 zeigt links eine Aufnahme, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist. Rechts ist eine Aufnahme von Egorov (2011; Michler, Baltá Calleja 2012) zu sehen, die zur Präparation geätzt wurde. Durch die Ätzung werden die Sphärolithe noch deutlicher sichtbar. Bedingt durch die Porosität der Oberfläche ist eine Ätzung der Proben nicht möglich, dennoch ist davon auszugehen, dass es sich bei den Strukturen um gewachsene Sphärolithe handelt.

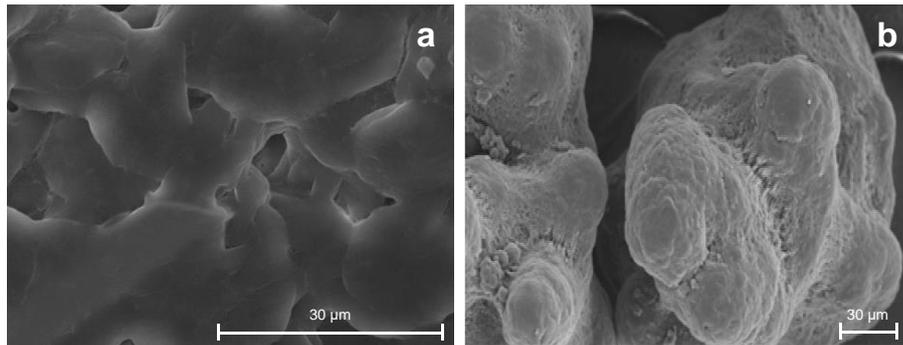


Abbildung 73 *Freie Kristallisation (a) an der Grenzfläche von Polymer und Gasblase, zu sehen an einer Aufnahme aus der Maximaldruckstudie bei 200 bar Maximaldruck. Referenzaufnahme (b) der freien Kristallisation mit geätzter Oberfläche aus (Michler, Baltá Calleja 2012; Egorov u. a. 2011).*

Die Polymergrenzfläche des im Nebenkavitätsverfahren gefertigten Trägers ist deutlich homogener. Dies ist auf eine schnelle Abkühlung der Oberfläche während der Gasinjektion bzw. Gaskühlung zurückzuführen. Dabei kühlt die Grenzfläche von Polymer und Gasblase so schnell ab, dass keine ausgeprägte freie Kristallisation möglich ist. In Folge dessen können sich nur deutlich kleinere Sphärolithe ausbilden. Die bei 10.000 bis 15.000-facher Vergrößerung zu sehenden fadenförmigen Filamente lassen sich als Fibrillen deuten und zeigen eine starke Ähnlichkeit mit der in der Literatur als *Crazing* beschriebenen mikrostrukturellen Schädigung (siehe Abbildung 74). *Crazes* stellen die kleinste Form der plastischen Deformation und damit eine erste strukturelle Schädigung des FKV dar. Die Fibrillen bilden sich zwischen den sphärolithischen Strukturen aus und entstehen wahrscheinlich im Zuge der fortschreitenden Kristallisation in der Restwanddicke. Durch die dabei einsetzende Schwindung ergibt sich eine mehrachsige Zugspannung an der Grenzfläche von FKV und Gasblase. Da diese Spannungen nicht abgebaut werden können, kommt es zum *Crazing*. Aufgrund der Schwindung in alle Raumrichtungen gibt es keine Vorzugsrichtung bei der Ausbildung der *Crazes*, auch ein signifikanter Einfluss der Restwanddicke kann nicht aufgezeigt werden. Da diese Schädigung an der inneren Oberfläche der Hohlstruktur vorliegt und damit nahe an der neutralen Faser, ist nicht mit einem Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des FKV in Folge der *Crazes* zu rechnen. Da davon auszugehen ist, dass das *Crazing* bei allen im Short-Shot-Verfahren gefertigten Probekörpern auftritt, kann anhand der Ergebnisse der mechanischen Analysen dieser Nachweis jedoch nicht erbracht werden.

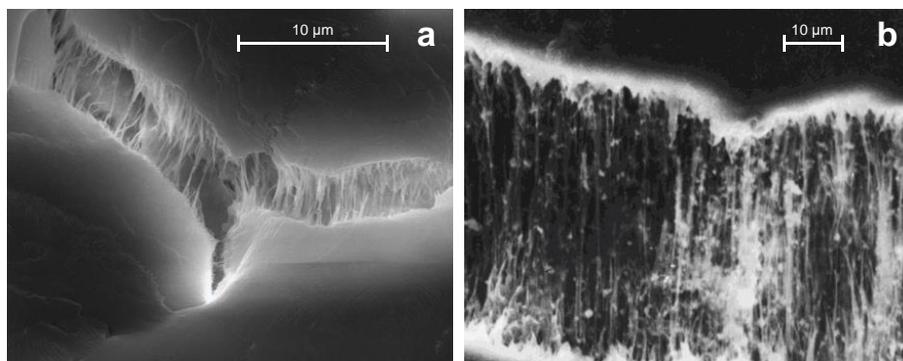


Abbildung 74 *Aufnahmen von Crazing bei einem Versuchsbauteil aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, verarbeitet im GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren (a), Referenzaufnahmen aus Literatur (b) (Michler, Baltá Calleja 2012).*

### Faserlängenanalyse

Im Fließpress- bzw. GasComp-Prozess können Bauteile mit wenigen langen Fasern gefertigt werden, dies zeigt sich durch die im Vergleich zum Spritzguss höheren gewichtsgemittelten Faserlängen. Sowohl im Spritzguss- als auch im Fließpressprozess weist das ummantelte Material höhere gewichtsgemittelte Faserlängen auf als das pultrudierte Material.

Die prozessbezogenen Faserlängenunterschiede lassen sich durch die unterschiedlichen Schergeschwindigkeitsniveaus erklären. Im Spritzgießen herrschen im Vergleich zum Fließpressen deutlich höhere Schergeschwindigkeiten durch den Einspritzvorgang. Dies führt zu einer starken dynamischen Belastung der Fasern, in deren Folge diese brechen (Thieltges 1991). Diese hohen Schergeschwindigkeiten führen zu einer breiteren Faserlängenverteilung. Dabei kann sowohl bei gewichts- als auch anzahlgemittelter Faserlänge im Bauteil kein Einfluss der Ausgangsfaserlänge festgestellt werden. Dies wird durch den Quotienten aus  $L_P/L_N$  deutlich (vgl. Tabelle 18). Je näher der Quotient an einem Wert von 1 liegt, desto schmaler ist die Faserverteilung und umso homogener ist die gasfaserverstärkte Polymerschmelze (Goris u. a. 2018).

Ein Einfluss auf die Faserlänge durch das Short-Shot- bzw. Nebenkavitätsverfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, ist aber auch als unwahrscheinlich einzuschätzen. Aufgrund des großen Bauteilquerschnitts von 50 mm und der einfachen Geometrie kommt es zu keiner Umlenkung der Schmelze bei der Formfüllung. Die während der Gasinjektion an der Gasblasenfließfront auftretende Scherung kann möglicherweise zu einem weiteren Abbau der Faserlänge führen. Dieser Faserlängenabbau ist jedoch als deutlich geringer einzuschätzen als der Faserlängenabbau während des Plastifiziervorgangs (Thieltges 1991; Brast 2001; Schemme 2011).

Die Faserlängenunterschiede in Abhängigkeit des Fasergehalts sind auf eine stärkere Faser-Faser-Interaktion zurückzuführen. Ein höherer Fasergewichtsanteil führt zu einer höheren Anzahl an Fasern, wodurch die Faserkonzentration zunimmt (vgl. Abbildung 8). In deren Folge wird der Freiraum, in dem sich die Fasern kollisionsfrei bewegen können, kleiner und es kommt zu verstärkter Faser-Faser-Interaktion, aus der Faserbrüche resultieren (Thieltges 1991).

Die auf den Granulattyp bezogenen Faserlängenunterschiede lassen sich durch eine höhere Viskosität des ummantelten Granulats erklären. Dadurch kommt es zu einer schlechteren Vereinzelung der Faserbündel, was wiederum eine schlechtere Imprägnierung der Fasern mit sich bringt. Die Faserbündel haben eine höhere Knicksteifigkeit, wodurch die Fasern im Verarbeitungsprozess länger in ihrer Ursprungslänge bleiben als eine Einzelfaser. Im Gegensatz dazu führt pultrudiertes Granulat zu einer homogenen Polymerschmelze mit vereinzelt und bestmöglich benetzten Fasern (Salinas, Pittman 1981; Mittal, Gupta, Sharma 1988). Abschließend kann gesagt werden, dass bei den hier vorliegenden Ergebnissen unabhängig von Granulattyp und Verarbeitungsprozess sowohl die anzahl- als auch die gewichtsgemittelte Faserlänge mit steigendem Fasergewichtsanteil abnimmt.

Tabelle 18 Übersicht gewichts- und anzahlgemittelter Faserlänge und deren Quotienten

| Granulattyp; Glasfasergehalt und Verarbeitungsprozess | $L_p$ [mm] | $L_n$ [mm] | $L_p/L_n$ |
|---|------------|------------|-----------|
| Pultrudiert 30 Gew.-% GF Fließpressen                 | 1,75       | 0,48       | 3,65      |
| Pultrudiert 40 Gew.-% GF Fließpressen                 | 1,44       | 0,36       | 4,00      |
| Ummantelt 30 Gew.-% GF Fließpressen                   | 2,6        | 0,45       | 5,78      |
| Ummantelt 40 Gew.-% GF Fließpressen                   | 2,18       | 0,39       | 5,59      |
| Pultrudiert 30 Gew.-% GF Spritzguss                   | 1,1        | 0,6        | 1,83      |
| Pultrudiert 40 Gew.-% GF Spritzguss                   | 0,84       | 0,48       | 1,75      |
| Ummantelt 30 Gew.-% GF Spritzguss                     | 1,1        | 0,62       | 1,77      |
| Ummantelt 40 Gew.-% GF Spritzguss                     | 0,86       | 0,51       | 1,69      |

### Faserorientierungsanalyse

In diesem Abschnitt werden die in Abbildung 61 vorgestellten Ergebnisse der Faserorientierungsanalyse interpretiert und diskutiert. Abgeschlossen wird dieser Abschnitt von einer Einordnung der Ergebnisse in den Gesamtkontext.

#### Fließpressprozess – Vollkörper

Die bezogen auf die Referenzrichtung schwache Faserorientierung ist auf die Strangstruktur des eingelegten Plastifikats zurückzuführen. Die lokal stark orientierten Bereiche zeigen die zufällig abgelegten Stränge. Durch die hundertprozentige Formfüllung kommt es zu keinem ausgeprägten Fließen der Plastifikats, sodass die Strangstruktur weitestgehend erhalten bleibt und durch den Einlegevorgang vordefiniert ist. Dies führt dazu, dass es keine Vorzugsorientierung gibt und quasi-isotrope mechanische Eigenschaften vorliegen.

#### GasComp-Prozess – Short-Shot-Verfahren

Auch hier ist die vorgefundene Faserorientierung stark von der Strangstruktur des Plastifikats geprägt. Sowohl im Bereich nahe der Werkzeugwand als auch im weiter innen liegenden Bereich sind die lokal stark orientierten Fasern der Strangstruktur zu erkennen, jedoch ist keine globale Faserorientierung zu erkennen (siehe Abbildung 61). Dadurch dass die Form nur zu 80 % gefüllt ist, kommt es im Vergleich zum Vollkörper zu einem leichten Fließen während des Pressens. Das reicht jedoch nicht aus um eine Orientierung der Fasern in Fließrichtung zu ermöglichen. Dies ist zum einen auf den kurzen möglichen Fließweg und zum anderen auf die niedrige Fließgeschwindigkeit zurückzuführen, die sich aus der Schließgeschwindigkeit der Presse ergibt.

In der Grenzschicht von FKV und Gasblase sind in Referenzrichtung orientierte Fasern festzustellen. Durch die gasblaseninduzierte Scherung des schmelzflüssigen FKV-Plastifikats kommt es in dieser Region zu einer mäßig ausgeprägten Ausrichtung der Fasern in Fließrichtung.

Die Detaildarstellung in Abbildung 75 zeigt das Ende des Gaskanals und die Reorientierung der Fasern. Fasern die senkrecht zur Fließrichtung orientiert sind, werden rot gekennzeichnet. Liegen die Fasern hingegen in einem Winkel von ca. 45° zur Referenzrichtung vor, werden sie

grün dargestellt. Bereiche in denen die Fasern in Fließrichtung orientiert sind, werden blau eingefärbt. Dieser blau eingefärbte Bereich stellt auch die Grenzschicht von FKV und Gasblase dar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die durch die Gasblase verdrängte Schmelze eine Art Quellströmung vor sich erzeugt, in deren Folge es zu der beschriebenen Umlagerung der Fasern kommt. Was sich durch die Dehnströmung an der Spitze der Fließfront und die Scherströmung in den Randbereichen der Fließfront erläutern lässt.

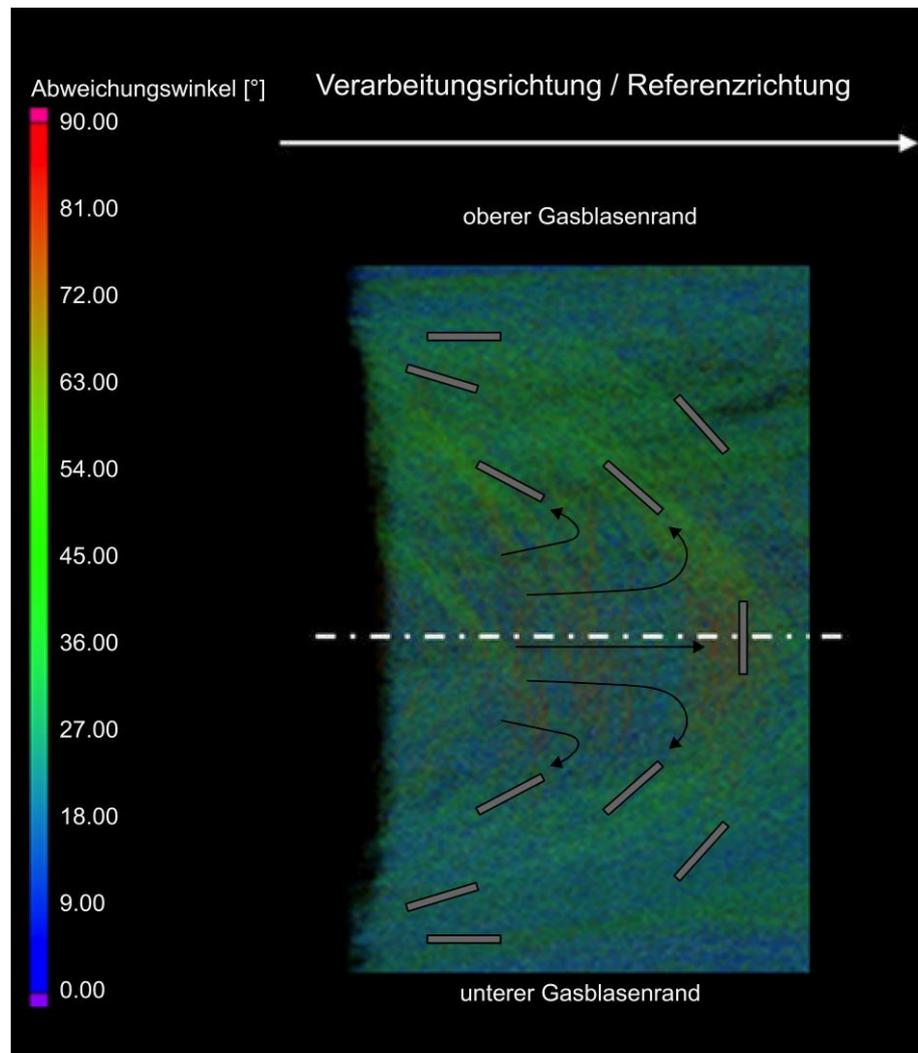


Abbildung 75 CT-Aufnahme mit Faserorientierungsanalyse durch Referenzrichtungsmethode und schematischer Einzeichnung der Reorientierung der Glasfasern an der Gasblasenfließfront durch Strömungsvorgänge und daraus resultierender Dehnung und Scherung.

#### GasComp-Prozess – Nebenkavitätsverfahren

Für das Nebenkavitätsverfahren ist die Kavität nahezu hundertprozentig volumetrisch gefüllt bevor die Gasinjektion beginnt. Somit liegt vor Beginn der Gasinjektion, wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, eine zufällige Strangstruktur vor.

Wie im Short-Shot-Verfahren bleibt beim Nebenkavitätsverfahren in den Bereichen nahe der Werkzeugwand und den angrenzenden Bereichen die Strangstruktur erhalten. Nahe des Gaskanals bildet sich eine orientierte Schicht aus. Diese Orientierung ist im Nebenkavitätsverfahren stärker ausgeprägt als im Short-Shot-Verfahren. Mögliche Gründe dafür sind sowohl der höhere Gasdruck (20 bar im Short-Shot-Verfahren; 70 bar im Nebenkavitätsverfahren) als

auch der geringere Gegendruck des Polymers. Durch die Öffnung zur Nebenkavität wird die Schmelze ausgespült und nicht wie beim Short-Shot-Verfahren komprimiert. Dies führt zu einer höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gasblase und zu höheren Schergeschwindigkeiten in den Grenzbereichen von FKV und Gasblase. In Folge dessen kommt es zu einer stärkeren Orientierung der Fasern in Fließrichtung. Weiterhin wird durch die deutlich niedrigere Porosität (vgl. Abbildung 67) die Faserorientierung nicht negativ beeinflusst. Da sich im Vergleich zum Short-Shot-Verfahren keine Poren in den Faserzwischenräumen bilden, können diese auch keinen Einfluss auf die Faserorientierung nehmen.

### Spritzgussprozess – Vollkörper

Die im Spritzgussprozess als Vollkörper gefertigten Träger zeigen die zu erwartende Faserorientierung. Der Bereich nahe der Werkzeugwand weist eine starke Orientierung der Fasern in Fließrichtung auf. Mit zunehmendem Abstand von der Werkzeugwand sinkt die Orientierung in Fließrichtung und es kommt zu einer Zufallsorientierung. Der Verlauf der Faserorientierung entspricht dem Verlauf der Schergeschwindigkeit wie er in Abbildung 4 für eine Quellströmung dargestellt ist. Bezogen auf den Bauteilquerschnitt ergibt sich so eine symmetrische Verteilung der Faserorientierung (vgl. Abbildung 4).

### GAIM-Prozess – Short-Shot-Verfahren

Wie zuvor bei der Verfahrensvariante Short-Shot im GasComp-Prozess, kommt es auch hier zu einer Überlagerung der Faserorientierung während der Formfüllung und Gasinjektion. Die sich während der Formfüllung einstellende stark in Fließrichtung ausgeprägte Orientierung der Fasern im werkzeugwandnahen Bereich bleibt erhalten. Durch den geringeren Vorfüllgrad von 60 % (80 % bei CasComp-Prozess) entstehen zwei Effekte: Zum einen ergibt sich aus dem niedrigeren Vorfüllgrad eine dünnere Restwandstärke, da das Volumen des Bauteils gleichbleibend ist. Und zum anderen kommt es zu einem stärker ausgeprägten Fließen in Folge der Gasinjektion, wodurch die Fasern in der Grenzschicht von Gasblase und FKV stärker in Fließrichtung orientiert werden. Daraus ergeben sich zwei Bereiche mit in Fließrichtung orientierten Fasern und ein Bereich dazwischen, in welchem die Fasern weniger stark orientiert sind. Wie stark die Ausprägung des Bereichs mit geringer oder regelloser Orientierung der Fasern ist, ist abhängig von der sich lokal einstellenden Restwanddicke.

### GAIM-Prozess – Nebenkavitätsverfahren

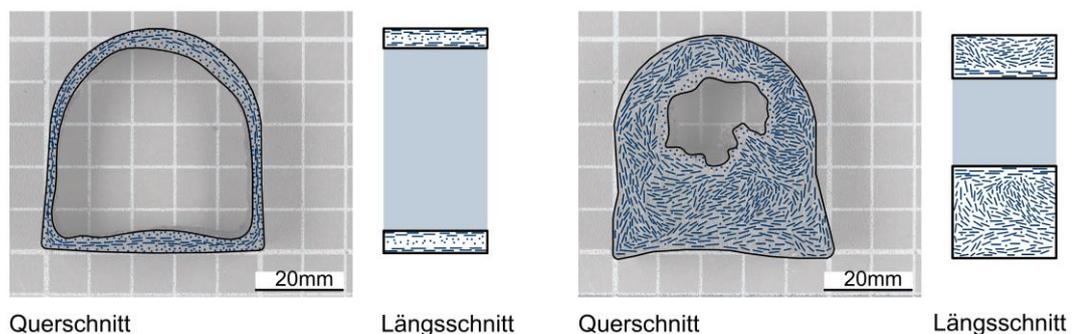
Hier zeigen die Ergebnisse auch eine Dreiteilung der orientierten Bereiche. In den Randbereichen tritt die spritzgusstypische starke Orientierung der Fasern in Fließrichtung auf. In der Grenzschicht von FKV und Gasblase sind die Fasern deutlich in Gasausbreitungsrichtung orientiert. Hierbei ist das gleiche Verhalten, wie bereits bei der Interpretation des GasComp-Prozess – Nebenkavitätsverfahren beschrieben, zu beobachten. Durch die höhere Gasblasenausbreitungsgeschwindigkeit kommt es zu einer starken Orientierung der Fasern in der Grenzschicht. Durch die homogene Struktur der Polymerschmelze im Vergleich zur Strangstruktur des GasComp-Prozesses, kann hier auch mehr schmelzeartiges Polymer in die Nebenkavität verdrängt werden. In dessen Folge ergibt sich ein niedrigeres Gewicht des Trägers bei

gleichem Volumen, was zu einer dünneren Restwanddicke führt. In dieser nun niedrigen Restwanddicke ist der Bereich zwischen den stark orientierten Grenzschichten kaum ausgebildet, sodass die Fasern dort auch einer Vorzugsorientierung in Fließrichtung unterliegen.

#### Zusammenfassung Faserorientierungsanalyse

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass der GAIM-Prozess eine stärkere Faserorientierung ermöglicht als der Gas-Comp-Prozess. Das Nebenkavitätsverfahren beeinflusst die Ausrichtung der Fasern stärker als das Short-Shot-Verfahren.

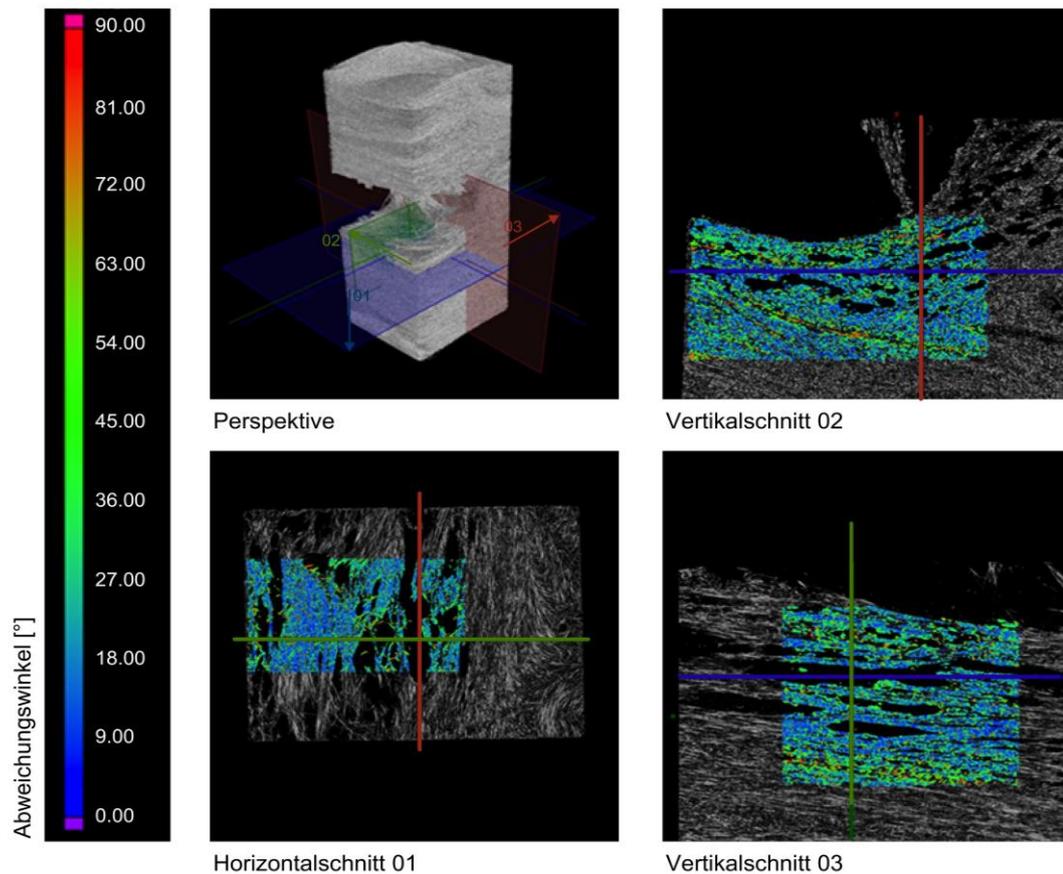
In Abbildung 76 ist schematisch die Faserorientierung über den Querschnitt zweier Träger zu sehen, die mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurden. Der linke Träger wurde im GAIM-Prozess hergestellt, der rechte im GasComp-Prozess. Hier zeigt sich deutlich die zuvor beschriebene Orientierung in Abhängigkeit des Prozesses. Bezogen auf die Restwandstärke liegen im linken Träger deutlich mehr Fasern in Fließrichtung vor als es der rechte Querschnitt zeigt. Dies führt zu einer ausgeprägten Anisotropie des linken Trägers.



**Abbildung 76** Schematische Darstellung der Faserorientierung in Abhängigkeit von Restwanddicke und Prozess am Beispiel des pultrudierten Materials mit 30 Gew.-% GF; GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren (links); GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren (rechts).

#### Geometrie der Poren

Wie in Abschnitt 8.2 und Abbildung 63 dargestellt, nehmen die Poren in der Grenzschicht eine ellipsoide Gestalt an. Diese Form lässt sich durch die Orientierung der Glasfasern erklären. In der Grenzschicht von Polymer und Gasblase bilden sich aufgrund des Schergeschwindigkeitsgradienten Gleitebenen aus, in denen die Fasern stark orientiert vorliegen (Oelgarth 1997). Tritt nun bei schnellem Gasdruckabbau eine Übersättigung auf, kommt es zur Porenbildung. Dabei strebt die sich bildende Pore aufgrund des günstigen Oberflächen/Volumen-Verhältnisses eine Kugelgeometrie an. Da das zur Porenbildung zur Verfügung stehende Volumen durch die orientierten Glasfasern eingegrenzt wird, ist die Ausbildung der Poren nur in zwei Ebenen möglich. Aufgrund dessen bildet sich statt einer idealen Kugel ein abgeflachter Ellipsoid aus, dessen Länge und Breite deutlich größer als seine Höhe ist. Dieses Modell lässt sich durch eine Überlagerung von Poren und Faserorientierungsanalyse bestätigen (siehe Abbildung 77). Es ist zu erkennen, dass um die ellipsoiden Poren die Fasern in Fließrichtung orientiert sind (Fließrichtung entspricht  $0^\circ$  Abweichungswinkel).



**Abbildung 77** CT-Aufnahme mit Faserorientierungsanalyse nach der Referenzorientierungsmethode in der Grenzschicht von Gasblase und Polymer am Beispiel eines Bauteils aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, das im GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren gefertigt wurde. Es zeigt den Einfluss der Faserorientierung auf die Form der Poren, die sich zwischen den Fasern als abgeflachter Ellipsoid ausbilden.

### Porosität

Die Interpretation und Diskussion der Ergebnisse der Porositätsanalysen werden in die Betrachtung der Materialstudien inklusive eines Vergleichs der Verfahrensvarianten sowie in die Parameterstudien zum Aufschäumen der Grenzschicht untergliedert.

#### Materialstudien – Vollkörper-Studie

Die Porositätsanalyse der Vollkörper zeigt, dass unabhängig von Granulattyp und Glasfasergehalt keine signifikanten Unterschiede zu erkennen sind. Bei allen vier untersuchten Proben ist die ermittelte Porosität in der Mitte des Trägers am höchsten. Dies ist auf zwei Faktoren zurückzuführen. Zum einen sind die Träger in den Randbereichen während des Pressvorgangs stärker verdichtet worden, sodass dort weniger Lufteinschlüsse, die sich aus dem Plastifizierungsvorgang ergeben, erhalten geblieben sind. Zum anderen ist davon auszugehen, dass aufgrund der Wandstärke von 50 mm der Träger zum Zeitpunkt der Entformung noch nicht vollständig ausgekühlt ist. Daraus lässt sich eine erhöhte Wahrscheinlichkeit zu Poren und Lunkern in Folge von Schwindung ableiten, die sich in den Ergebnissen wiederfinden lässt. Die hohen Fasergewichtsanteile wirken der Schwindung und damit der Bildung von Lunkern entgegen, sodass nur Fehlstellen von kleinem Volumen entstehen.

### Materialstudien – LGF-Granulatstudie

Die Ergebnisse der LGF-Granulatstudie liefern keinen Hinweis darauf, dass die Vorkonsolidierung der Fasern im Granulat oder der Glasfasergehalt einen Einfluss auf die Porosität haben könnten. Ab einem Abstand von 7 mm von der Grenze der Gasblase weisen alle analysierten Proben eine Porosität im Bereich der Vollkörper von ca. 5 % auf. Dies deutet darauf hin, dass das Gas nicht weiter eindiffundiert ist und die ab dort vorherrschende Porosität nicht auf die Gasinjektion zurückzuführen ist.

### Materialstudien – Referenzstudie

Die in Abbildung 66 dargestellten Kurven zeigen, dass sowohl das kurzfaserverstärkte als auch das unverstärkte PP eine geringere Porosität aufweisen als die Langfasergranulate. Dies lässt sich in Zusammenhang mit dem unter Abschnitt 3.2.5 beschriebenen Mechanismus der heterogenen Keimbildung erklären. Bei den Langfasergranulaten sind mehr Fasern vorzufinden, deren Länge ausreicht, um als Keimbildner zu fungieren. Aufgrund der häufigeren Überkreuzung der Fasern ist ein niedrigeres Energieniveau notwendig, um den kritischen Keimradius zu erreichen. Da die Porosität der LGF-Träger unabhängig vom Glasfasergehalt ähnlich stark ausgeprägt ist, kann davon ausgegangen werden, dass die für die heterogene Keimbildung notwendige Keimbildnergröße, respektive Faserlänge, in beiden Trägern vorliegt und damit unterhalb eines Werts von 0,36 mm (anzahlgemittelt) liegt (vgl. Ergebnisse Faserlängenanalyse 8.28.3). Diese Annahme wird durch die geringere Porosität der kurzfaserverstärkten PPs gestützt. Das kurzfaserverstärkte Granulat weist im Ausgangszustand eine Faserlänge von 0,2 bis 0,4 mm (vgl. 3.1.3) auf, wobei diese im Verarbeitungsprozess auf ca. 0,1 mm (anzahlgemittelt) (Willems u. a.) abgebaut wird, sodass nur noch eine geringe Anzahl an Fasern mit zur Keimbildung ausreichender Faserlänge vorliegt. Unter dieser Annahme ist es plausibel, dass das unverstärkte PP nahezu keine Porosität aufweist, da dort sehr wenige Keimbildner enthalten sind.

### Gegenüberstellung von Short-Shot- und Nebenkavitätsverfahren

Im Vergleich der Porosität der beiden unterschiedlichen Verfahrensvarianten ist festzustellen, dass unabhängig von Material und Glasfasergehalt beim Nebenkavitätsverfahren niedrigere Porositätswerte vorzufinden sind als in der Verfahrensvariante Short-Shot (vgl. Abbildung 67). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Verfahrensvariante Short-Shot die in 3.2.5 beschriebenen Effekte der Übersättigung und Diffusion auftreten (Moritzer 1997; Potente, Moritzer 1997). Diese Effekte sind hingegen beim Nebenkavitätsverfahren nicht zu beobachten. Bei der im Rahmen der zugrundeliegenden Versuche angewendeten Form des Nebenkavitätsverfahrens tritt ein Effekt auf, der sich aus der Größe der Nebenkavität ergibt. Das Verhältnis von Neben- zu Hauptkavität beträgt  $2/3$ . Da es mit keiner Parametervariation gelungen ist mehr als 55 % des Gesamtvolumens bzw. -masse in die Nebenkavität zu drücken, kommt es zu einer Unterfüllung der Nebenkavität und damit zu einem Durchbruch der Gasblase. Ab dem Zeitpunkt des Gasblasendurchbruchs in der Nebenkavität strömt der Stickstoff durch den ausgebildete Gaskanal. Dieser Gasstrom führt Wärme ab. Beim dem gewählten Gasdruckprofil (vgl. Abbildung 34) dauert dieser Kühlprozess fünf Sekunden. Während dieser Zeit tritt der Effekt der erzwungenen Konvektion an der Grenzfläche der Gasblase auf (Herwig, Moschallski

2014). Dies führt zu einem Phasenwechsel des Polymers vom flüssigen zum festen Aggregatzustand, in dessen Folge die Grenzschicht als versiegelt betrachtet werden kann.

Während der Gasdruckabbauphase (Übergang von Gaskühlung zu Gasnachdruck) wird mittels des hydraulischen Schiebers die Hauptkavität von der Nebenkavität getrennt, sodass in der anschließenden Nachdruckphase der Gasdruck von 10 bar in der Hauptkavität aufrechterhalten werden kann. Der zuvor erstarrte dünne Polymerfilm in der Grenzschicht stellt eine nicht permeable Sperrschicht da, in die der Stickstoff nicht eindiffundieren kann, sodass eine niedrigere Porosität erzielt werden kann. Die vier Verfahrensschritte des Nebenkavitätsverfahrens mit Kühlung sind in Abbildung 78 veranschaulicht. Somit ist es in der hier dargestellten Form des Nebenkavitätsverfahrens möglich, die Porosität deutlich zu verringern, niedrige Restwanddicken zu realisieren und die Kühlzeit zu senken.

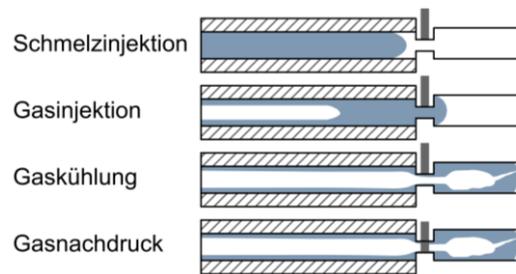


Abbildung 78 Die vier Verfahrensschritte beim Nebenkavitätsverfahren mit Gaskühlung

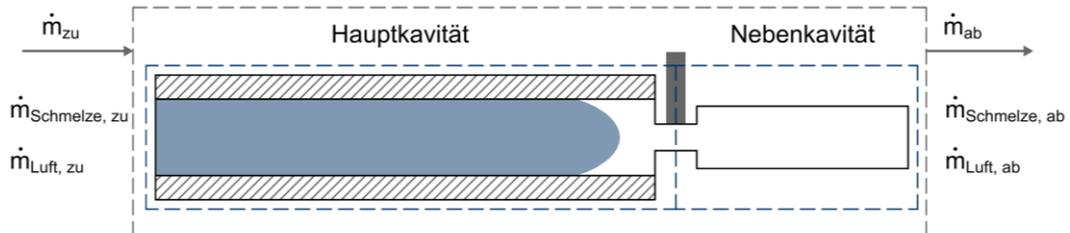
Die beschriebenen Effekte lassen sich mit Hilfe einer Massen- und Energiebilanz erläutern. Für die Massenbilanz werden die Verfahrensschritte „Schmelzinjektion“, „Gasinjektion“ und „Gaskühlung“ betrachtet. In Abbildung 79 bis Abbildung 81 sind die Massenbilanzen aufgeführt. Dabei zeigt sich, dass sich mit Beginn der Gaskühlung ein stationärer Zustand einstellt, bei dem der zugeführte Massenstrom des Gases gleich dem abgeführten ist. Sowohl bei der Schmelz- als auch der Gasinjektion wird dem Kontrollvolumen (Haupt- und Nebenkavität) Masse zugeführt.

Grundsätzlich setzt sich die Massenbilanz des Kontrollvolumens aus der Summe der zu- und abgeführten Massenströme zusammen (vgl. (Gl. 15)). Während der Schmelzinjektion setzt sich der Gesamtmassenstrom aus zwei einzelnen Massenströmen zusammen. Dies ist zum einen der Massenstrom der Schmelze ( $\dot{m}_{Schmelze}$ ) und zum anderen der Massenstrom der Luft ( $\dot{m}_{Luft}$ ). Während der Gasinjektion tritt neben den beiden gerade genannten Massenströmen zusätzlich der Massenstrom des Gases ( $\dot{m}_{Gas}$ ) auf. Während der Gaskühlung stellt sich ein stationärer Zustand ein, bei dem ausschließlich der Massenstrom des Gases ( $\dot{m}_{Gas}$ ) vorzufinden ist, da der Einspritzvorgang bzw. das Überführen der Schmelze von Haupt- in Nebenkavität abgeschlossen sind.

$$\frac{dM}{dt} = \sum_i \dot{m}_{i,zu} - \sum_i \dot{m}_{i,ab} \quad (\text{Gl. 15})$$

Unter den genannten Randbedingungen ergibt sich für den Verfahrensschritt „Schmelzinjektion“ die in Abbildung 79 zu sehende Massenbilanz ( $\frac{dM}{dt}$ ). Dabei ist zu erkennen, dass zum

Zeitpunkt der Schmelzinjektion lediglich der Massenstrom der Schmelze ( $\dot{m}_{Schmelze}$ ) dem Kontrollvolumen zugeführt wird und der Massenstrom der entweichenden Luft ( $\dot{m}_{Luft}$ ) abgeführt wird. Werden die Bilanzen der Haupt- ( $\frac{dM_{HK}}{dt}$ ) und Nebenkavität ( $\frac{dM_{NK}}{dt}$ ) als einzelne Kontrollvolumen betrachtet, so ergeben sich die unten aufgeführten Bilanzen. Hierbei ist zu beachten, dass der aus der Hauptkavität abgeführte Massenstrom ( $\dot{m}_{HK,Luft,ab}$ ) gleich dem der Nebenkavität zugeführten Massenstrom ( $\dot{m}_{NK,Luft,zu}$ ) ist.



$$\begin{array}{l} \text{Massebilanz} \\ \text{Gesamtkavität} \end{array} \quad \frac{dM}{dt} = \dot{m}_{Schmelze, zu} - \dot{m}_{Schmelze, ab} + \dot{m}_{Luft, zu} - \dot{m}_{Luft, ab}$$

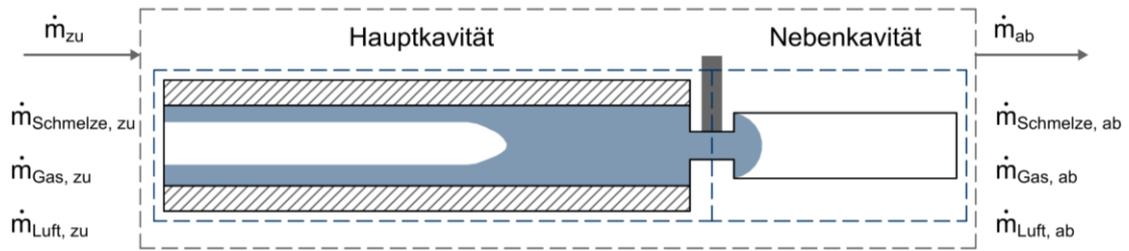
$$\begin{array}{l} \text{Massebilanz} \\ \text{Hauptkavität} \end{array} \quad \frac{dM_{HK}}{dt} = \dot{m}_{Schmelze, zu} - \dot{m}_{HK, Luft, ab}$$

$$\begin{array}{l} \text{Massebilanz} \\ \text{Nebenkavität} \end{array} \quad \frac{dM_{NK}}{dt} = \dot{m}_{NK, Luft, zu} - \dot{m}_{NK, Luft, ab}$$

$$\text{mit: } \dot{m}_{HK, Luft, ab} = \dot{m}_{NK, Luft, zu} \quad \dot{m}_{Schmelze, ab} = 0 \quad \dot{m}_{Luft, zu} = 0$$

Abbildung 79 Bilanzielle Darstellung der Massenbilanz des Nebenkavitätsverfahrens während der Schmelzinjektion mit Untergliederung in Gesamtkavität, Haupt- und Nebenkavität sowie eingetragenen Massenströmen  $\dot{m}_i$

In Abbildung 80 ist die Massenbilanz während der Gasinjektion zu sehen. Zum abgebildeten Zeitpunkt ist zu erkennen, dass der aus der Hauptkavität abgeführte Massenstrom lediglich aus Schmelze ( $\dot{m}_{HK,Schmelze,ab}$ ) besteht und vom Betrag dem zugeführten Massestrom der Nebenkavität ( $\dot{m}_{NK,Schmelze,zu}$ ) entspricht. Darüber hinaus ist der Abbildung zu entnehmen, dass sich der aus der Nebenkavität abgeführte Massestrom aus der verdrängten Luft zusammensetzt ( $\dot{m}_{NK,Luft,ab}$ ).



Massebilanz Gesamtkavität  $\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{\text{Schmelze, zu}} - \dot{m}_{\text{Schmelze, ab}} + \dot{m}_{\text{Gas, zu}} - \dot{m}_{\text{Gas, ab}} + \dot{m}_{\text{Luft, ab}}$

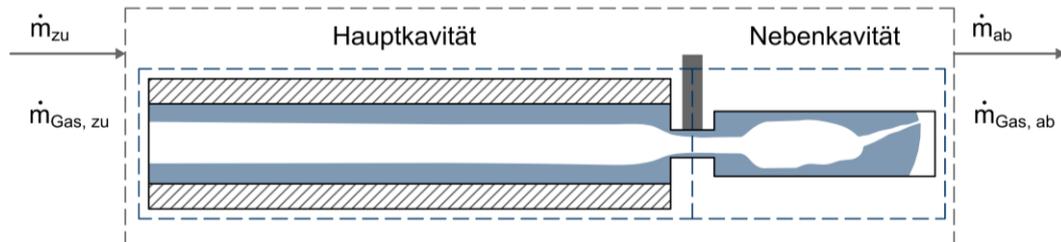
Massebilanz Hauptkavität  $\frac{dM_{\text{HK}}}{dt} = \dot{m}_{\text{Schmelze, zu}} + \dot{m}_{\text{Gas, zu}} - \dot{m}_{\text{HK, Schmelze, ab}}$

Massebilanz Nebenkavität  $\frac{dM_{\text{NK}}}{dt} = \dot{m}_{\text{NK, Schmelze, zu}} - \dot{m}_{\text{NK, Luft, ab}}$

mit:  $\dot{m}_{\text{HK, Schmelze, ab}} = \dot{m}_{\text{NK, Schmelze, zu}}$

Abbildung 80 Bilanzielle Darstellung der Massenbilanz des Nebenkavitätsverfahrens während der Gasinjektion mit Untergliederung in Gesamtkavität, Haupt- und Nebenkavität und eingetragenen Massenströmen  $\dot{m}_i$ .

In Abbildung 81 ist die Massenbilanz während der Gaskühlungsphase dargestellt. Hier zeigt sich, dass dem Kontrollvolumen nur Masse in Form des Prozessgases, im vorliegenden Fall Stickstoff, zu- und abgeführt wird. Die Zuführung von Polymerschmelze und Abführung der zuvor in der Kavität enthaltenen Luft ist zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen. Auch hier gilt, dass der aus der Hauptkavität abgeführte Massenstrom gleich dem zugeführten Massenstrom der Nebenkavität ist.



Massebilanz Gesamtkavität  $\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{\text{Gas, zu}} - \dot{m}_{\text{Gas, ab}}$

Massebilanz Hauptkavität  $\frac{dM_{\text{HK}}}{dt} = \dot{m}_{\text{Gas, zu}} - \dot{m}_{\text{HK, Gas, ab}}$

Massebilanz Nebenkavität  $\frac{dM_{\text{NK}}}{dt} = \dot{m}_{\text{NK, Gas, zu}} - \dot{m}_{\text{Gas, ab}}$

mit:  $\dot{m}_{\text{HK, Gas, ab}} = \dot{m}_{\text{NK, Gas, zu}}$

Abbildung 81 Bilanzielle Darstellung der Massenbilanz des Nebenkavitätsverfahrens während der Gaskühlungsphase mit Untergliederung in Gesamtkavität, Haupt- und Nebenkavität und eingetragenen Massenströmen  $\dot{m}_i$ .

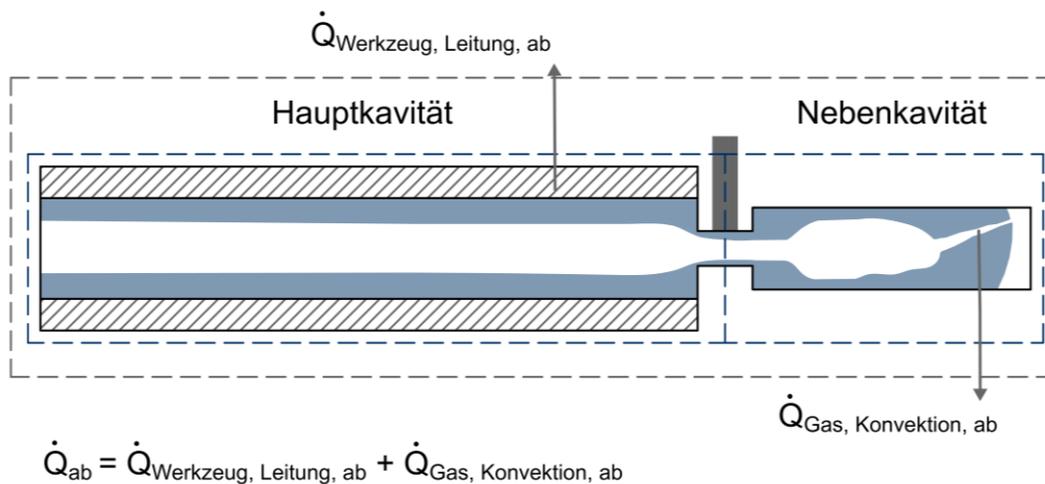
Somit entsteht im offenen System ein Gasstrom vom Injektor durch das Formteil bis in die Nebenkavität, wo das Gas unkontrolliert entweichen kann. Damit gibt das Kontrollvolumen der Hauptkavität aufgrund von zwei Faktoren Wärme während der Gaskühlung ab. Dabei wird zum einen aus dem gesamten System mittels erzwungener Konvektion durch das strömende Gas Wärme abgeführt und zum anderen wird weitere Wärme in Form von Leitung an der Grenzfläche von Werkzeug und Kunststoff abgeführt. Während der vorgelagerten Gasinjektion wird die heiße Schmelze aus der Haupt- in die Nebenkavität überführt und damit ein Teil der in Schmelze gespeicherten Wärme aus der Hauptkavität in die Nebenkavität abgeführt (siehe Abbildung 80).

Dabei gilt der erste Hauptsatz der Thermodynamik (Gl. 16). Dieser besagt, dass die Änderung der inneren Energie ( $U$ ) eines geschlossenen Systems gleich der Summe der Änderung der Wärme ( $Q$ ) und der Arbeit ( $W$ ) ist.

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (\text{Gl. 16})$$

In Abbildung 82 ist die Energiebilanz des Formteils zu Beginn der Gaskühlung schematisch dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass der Zustand vor dem Phasenwechsel beschrieben wird, also der Zeitpunkt an dem der Kunststoff noch flüssig ist.

Der abgeführte Wärmestrom setzt sich aus dem konduktiven Wärmestrom an die Werkzeugwand ( $\dot{Q}_{\text{Werkzeug,Leitung,ab}}$ ) und der erzwungenen Konvektion an der Grenzschicht von Polymer und Gasblase ( $\dot{Q}_{\text{Grenzfläche,Konvektion,ab}}$ ) zusammen.



$$c_p \times M \times \frac{dT_{\text{Schmelze}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{Werkzeug, Leitung, ab}} + \dot{Q}_{\text{Gas, Konvektion, ab}}$$

Abbildung 82 Bilanzielle Darstellung der Energiebilanz des Versuchsbauteils während des Nebenkavitätsverfahrens zu Beginn Gaskühlung bei noch flüssiger Polymerschmelze.

Wendet man nun den ersten Hauptsatz der Thermodynamik auf das dargestellten Kontrollvolumen an, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$c_{v,Schmelze} * M_{Schmelze} * \frac{dT_{Schmelze}}{dt} = \dot{Q}_{Werkzeug,Leitung,ab} + \dot{Q}_{Gas,Konvektion,ab} \quad (\text{Gl. 17})$$

Dabei stellt das Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität ( $c_{v,Schmelze}$ ) und der Masse ( $M_{Schmelze}$ ) der Schmelze die Wärmekapazität der selbigen dar.

Durch den im Laufe der Gaskühlung einsetzenden Phasenwechsel des Polymers, von flüssig zu fest, wird Energie in Form von latenter Wärme freigesetzt. Die Menge der Energie beträgt ca. 1/3 der gesamten Wärmeenergie. Diese latente Wärme wird ebenfalls durch die erzwungene Konvektion in der Grenzschicht von Polymer und Gasblase aus dem System abgeführt. Dies führt dazu, dass aus dem Kontrollvolumen beim Nebenkavitätsverfahren während der Gaskühlung Wärme durch Leitung, Konvektion und den Phasenwechsel abgeführt wird. In der sich anschließenden Gasnachdruckphase wird sowohl beim Nebenkavitäts- als auch beim Short-Shot-Verfahren Wärme nur über den Wärmestrom ( $\dot{Q}_{Werkzeug,Leitung,ab}$ ) abgeführt.

Dies zeigt, dass das Nebenkavitätsverfahren mit Gaskühlung prozessuale Vorteile in Form von geringerer Porosität und kürzerer Zykluszeit gegenüber dem Short-Shot-Verfahren bietet.

#### Parameterstudien – Aufschäumen der Grenzschicht

Wie die Ergebnisse der unterschiedlichen Parameterstudien am Beispiel des GasComp-Prozesses in der Verfahrensvariante Short-Shot (vgl. Abschnitt 8.3) zeigen, steht die Porosität im Zusammenhang mit mehreren Verfahrensparametern. Für die Porosität in der Verfahrensvariante Short-Shot sind hauptsächlich der maximale Gasdruck und die Gasdruckabbauzeit verantwortlich. Es zeigt sich, dass mit steigendem Gasdruck die Dicke der Schaumschicht zunimmt (siehe Abbildung 68). Dies ist durch das erste Fick'sche Gesetz zu erklären, nach dem der Stoffstrom während der Diffusion proportional zum Konzentrationsgradienten ist. Dadurch steigt bei steigendem Gasdruck auch die Dicke der porösen Schicht an (Crank 2009).

Der Einfluss der Gasabbauzeit auf die Porosität wird in Abbildung 20 schematisch erklärt. Bei einem bestimmten Druck kann eine gewisse Menge des inerten Gases im Kunststoff gelöst werden, sodass sich ein Sättigungszustand einstellt. Da im Inneren des Hohlkörpers ein isothermer Zustand angenommen werden kann, kann eine Blasenbildung in Folge von Überhitzung ausgeschlossen werden. Daher ist die Porenbildung im Zusammenhang mit dem Druckabbau und eine Übersättigung zusehen. Erfolgt dieser Druckabbau zu schnell, kommt es zur Porenbildung, da ein kontrolliertes Zurückdiffundieren der Gasmoleküle nicht möglich ist (Nicolay 1976). Dieser Effekt tritt bei den Druckabbauzeiten von 0,1 bis 2 Sekunden deutlich auf. Die Porosität der Langfasertechnologieträger ist allgemein auf den Mechanismus der heterogenen Keimbildung zurückzuführen, wie er in Abschnitt 3.2.5 beschrieben wurde. Hierbei dienen die Glasfasern als Keimbildner.

## 9.4 Leichtbaupotenzial

Die Ausweisung des Leichtbaupotenzials erfolgt in Anlehnung an die in Abschnitt 5.7 vorgestellte normierte Gütekennzahl und Leichtbaukennzahl.

In den hier vorliegenden Fällen (Biegung und Torsion) wird wie bei der mechanischen Analyse eine Unterscheidung vorgenommen. Im Fall der Biegung wird der Quotient aus Bruchspannung  $\sigma_B$  und Masse  $m$  gebildet. Im Falle der Torsion wird der Quotient aus Drehmoment  $M_t$  und Masse  $m$  gebildet. Die Ergebnisse werden je in einem spannungs- bzw. drehmoment- und gewichtsnormierten Diagramm veranschaulicht. Die Normierung erfolgt am Beispiel des spritzgegossenen Vollkörpers aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF. Um die Lesbarkeit des Diagramms zu vereinfachen, wird eine Trendlinie mit der Steigung 1 durch den Punkt 1/1 (Wert des normierten 100 % Trägers) gelegt. Dieser Punkt entspricht dem normierten Mittelwert der spritzgegossenen Vollkörper aus pultrudiertem Material. Ausgehend von diesem Vollkörper werden die Leichtbaupotenziale ermittelt. Die Werte oberhalb dieser Winkelhalbierenden weisen ein Leichtbaupotenzial auf, alle darunterliegenden Werte nicht.

Hierbei werden die unterschiedlichen Leichtbaupotenziale ausgewählter Träger aufgezeigt, die mit den zuvor vorgestellten Prozess- und Verfahrenskombinationen sowie Materialien gefertigt wurden. Die als Raute dargestellten Ergebnisse stellen die Leichtbaupotenziale des GasComp-Prozesses (◆) dar, als Kreis dargestellte Ergebnisse sind dem GAIM-Prozess (●) zuzuordnen. Die Legende des Diagramms ermöglicht die Zuordnung von Material und Verfahrensvariante und unterliegt einer Farbcodierung.

### Leichtbaupotenzial – Lastfall Biegung

Das Diagramm in Abbildung 83 zeigt, dass ausschließlich Träger, die im GAIM-Prozess gefertigt wurden im Vergleich zu Referenz ein Leichtbaupotenzial aufweisen. Dabei zeigt sich auch, dass mit Ausnahme des pultrudierten Materials mit 40 Gew.-% GF, nur Materialien mit 30 Gew.-% GF oberhalb der Linie liegen. Das größte Leichtbaupotenzial weisen die Träger aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF auf. Die Träger, die im Nebenkavitätsverfahren gefertigt wurden, liegen über denen des Short-Shot-Verfahrens. Diese weisen bei einer durchschnittlichen Gewichtseinsparung von 52 % eine Steigerung der Biegefestigkeit von 17 % auf. Damit zeigt sich, dass die Kombination aus GAIM-Prozess und Nebenkavitätsverfahren zusammen mit dem pultrudiertem Material und 30 Gew.-% GF das größte Leichtbaupotenzial bezogen auf die Biegefestigkeit in diesen Untersuchungen besitzt.

Im Gegensatz dazu stellen die im Fließpressprozess gefertigten Vollkörper aus ummanteltem Material mit 40 Gew.-% GF (roter Kreis) kein Leichtbaupotenzial dar. Diese sind bis zu 8,2 % schwerer und rund 20 % weniger biegefest als die Referenzkörper. Die aus dem gleichen Material im GAIM-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigten Träger (hellgrüner Kreis) sind zwar um mehr als 40 % leichter, versagen jedoch bei einer um mehr als 50 % geringeren Spannung.

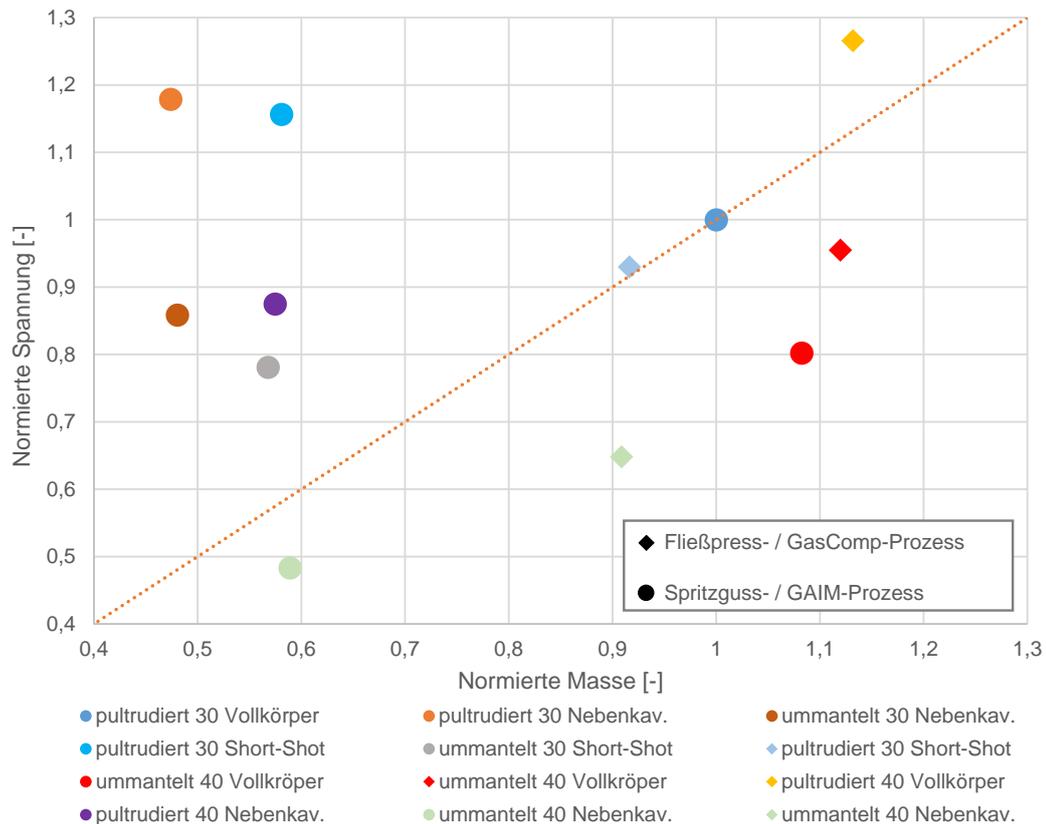
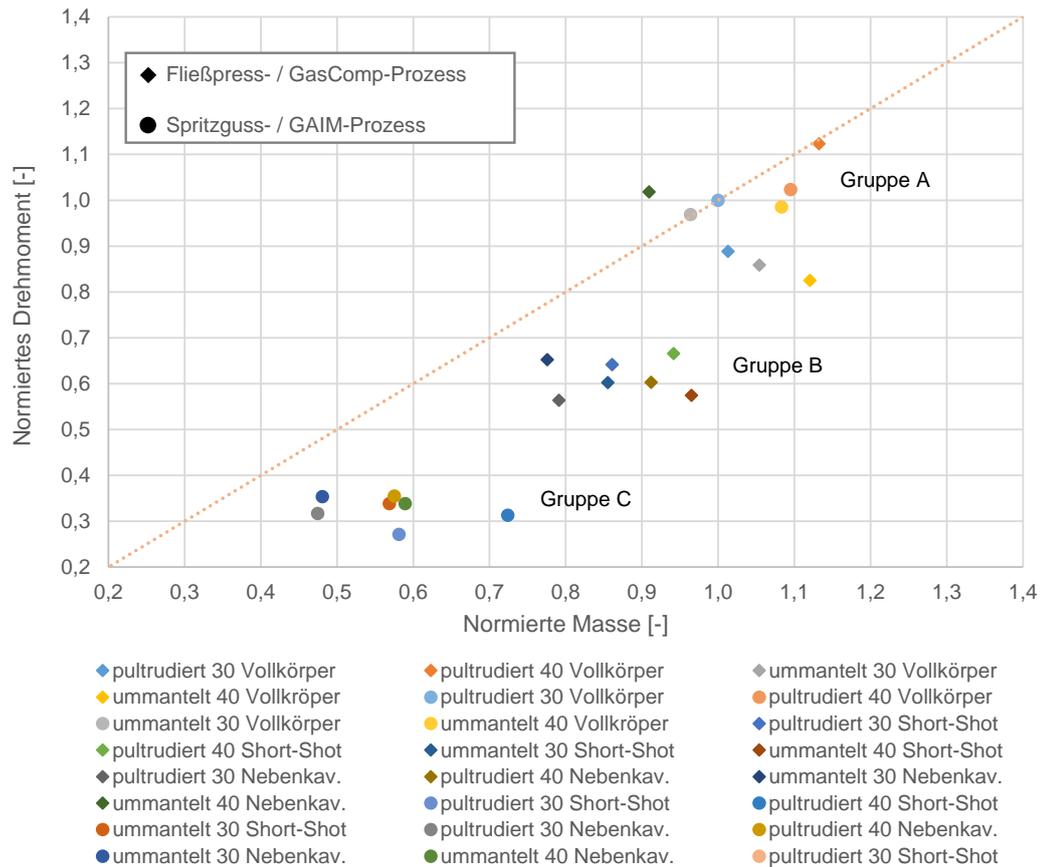


Abbildung 83 Darstellung der Leichtbaupotenziale der unterschiedlichen Prozess- Verfahrens- und Materialkombinationen mittels normierter Bruchspannung und normierter Masse am Lastfall 3-Punkt-Biegung.

Somit bestätigen die ausgewiesenen Leichtbaupotenziale das sich während der Diskussion der Ergebnisse abzeichnende Bild: Bezogen auf die Biegespannung ist unter Leichtbauaspekten die Kombination aus GAIM-Prozess, Nebenkavitätsverfahren und pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF die beste der untersuchten Prozess-, Verfahrens- und Materialvariationen. Dabei weist diese Kombination nicht nur das größte Leichtbaupotenzial auf, sondern zeigt darüber hinaus sowohl eine gute Oberflächenqualität als auch eine robuste Reproduzierbarkeit.

### Leichtbaupotenzial – Lastfall Torsion

Das Diagramm in Abbildung 84 zeigt, dass sich für den Lastfall Torsion bei der gewählten Analyse- bzw. Darstellungsform nahezu keine Leichtbaupotenziale ausweisen lassen. Es liegen, mit Ausnahme des im Fließpressprozess gefertigten Vollkörper aus pultrudiertem Material mit 40 Gew.-% GF, alle ermittelten Werte Unterhalb der Trendlinie. Dies ist auf die Bezugsgröße, das Torsionsmoment, zurückzuführen. Anders als bei der Biegespannung wird hier nicht der belastete Querschnitt berücksichtigt, sondern ausschließlich die Bruchkraft bzw. das Moment. Da der Querschnittsfläche bzw. die Restwanddicke unmittelbar mit der Masse des Trägers und der resultierenden Torsionsspannung korreliert, sind diese Aspekte entscheidend für die Bewertung möglicher Leichtbaupotenziale. Da aus den zuvor genannten Gründen von einer Berechnung der Torsionsspannung abgesehen wurde, kann an dieser Stelle keine abschließende Bewertung des Leichtbaupotenzials für den Lastfall Torsion vorgenommen werden.



**Abbildung 84 Darstellung der Leichtbaupotenziale der unterschiedlichen Prozess- Verfahrens- und Materialkombinationen mittels normiertem Drehmoment und normierter Masse am Lastfall Torsion. Mit Gruppe A (Vollkörper), Gruppe B (GasComp-Prozess) und Gruppe C (GAIM-Prozess)**

Dennoch können aus dieser Darstellung Rückschlüsse gezogen werden, die sich mit den zuvor beschriebenen Beobachtungen decken. Im Diagramm sind drei Gruppen an Werten gekennzeichnet. Diesen Gruppen sind unterschiedlichen Wandstärken zuzuordnen. Die Gruppe mit den höchsten normierten Drehmomentwerten und Massen (Gruppe A) besteht aus Vollkörpern, die einen massiven Querschnitt aufweisen. Darunter folgt Gruppe B mit den im GasComp-Prozess gefertigten Trägern. Die niedrigsten ermittelten normierten Drehmomente bei gleichzeitig geringster normierter Masse, weisen die im GAIM-Prozess gefertigten Versuchsbaueteile auf (Gruppe C). Diese Gruppierung steht im Einklang mit den zuvor in der Interpretation und Diskussion besprochenen Erkenntnissen. Wäre das zum Versagen führende Drehmoment lediglich von der Masse bzw. Wandstärke abhängig, würde dies zu einer Parallelverschiebung der Datenpunkte entlang der Trendlinie führen. Da dies nicht zu beobachten ist, wird der in Abschnitt 9.3 beschriebene Zusammenhang von resultierender Wandstärke und Faserorientierung bestätigt. Dieser besagt, dass mit abnehmender Wandstärke die relative Faserorientierung in Fließrichtung zunimmt, woraus eine Zunahme der anisotropen Werkstoffeigenschaften bezogen auf die Restwanddicke resultiert. Für den Lastfall Torsion bedeutet dies, dass bei der vorliegenden Faserorientierung ein Abnehmen des Lastaufnahmevermögens für Torsion vorliegt. Dieser Zusammenhang zeigt nochmals, dass Leichtbaukonstruktionen mit anisotropen FKV Werkstoffen lastfalloptimiert ausgelegt und gefertigt werden müssen, um das Leichtbaupotenzial ausschöpfen zu können.

## 10 Fazit und Ausblick

Das Fazit wird auf Basis der in Kapitel 4 gestellten wissenschaftlichen Fragestellungen gezogen und dabei in die drei dort aufgeführten Kategorien untergliedert. Es schließen sich ein kurzes Resümee und der abschließende Ausblick an.

### Prozess- und Verfahrensentwicklung

- Wie kann der GasComp-Prozess auf LFT übertragen werden und welche verfahrenstechnischen Anpassungen sind aufgrund der geänderten Materialcharakteristik zu treffen?

Eine Übertragung des GasComp-Prozesses auf LFT-Werkstoffe ist grundsätzlich möglich. In Anbetracht der geänderten Materialcharakteristik von GMT Brzeski (2009) zu LFT müssen beim Short-Shot-Verfahren sowohl der Vorfüllgrad der Kavität also als auch das Gasdruckprofil (Abbildung 32) angepasst werden. Wird der GasComp-Prozess in Verbindung mit dem Nebenkavitätsverfahren bei LFT eingesetzt, muss im Vergleich zum Short-Shot-Verfahren ein komplexerer Werkzeugaufbau mit zeitlich steuerbarer Verriegelung der Nebenkavität umgesetzt werden. Darüber hinaus wird bei dieser Verfahrensvariante eine fast vollständige Vorfüllung der Kavität benötigt und ein Gasdruckprofil (Abbildung 34) mit einer grundlegend anderen Charakteristik als beim Short-Shot-Verfahren.

- Worin unterscheiden sich im GasComp-Prozess gefertigte Versuchsbauteile von im GAIM-Prozess gefertigten Versuchsbauteilen hinsichtlich der Hohlraumausbildung der Oberflächenanmutung und des Faserfüllgrads?

Die prozessspezifischen Unterschiede der Versuchsbauteile sind in mehreren Punkten zu erkennen (siehe Abbildung 39). Bei der Hohlraumausbildung zeigt sich, dass der GAIM-Prozess Hohlräume mit einem größeren Durchmesser und damit geringere Wandstärken ermöglicht. Darüber hinaus können mit dem Nebenkavitätsverfahren größere Hohlräume als das Short-Shot-Verfahren erzielt werden. Die Anmutung der Oberfläche ist beim GAIM-Prozess als homogener einzustufen, durch die Quellströmung während der Formfüllung bildet sich eine gleichmäßige ebene Oberfläche an der Werkzeugwand aus. Im GasComp-Prozess ist die Oberfläche deutlich strukturiert, was auf die Strangstruktur des Plastifikats zurückzuführen ist. Der Faserfüllgrad beeinflusst die Ausformung des Hohlraums bei beiden Prozessen in gleicher Weise, mit steigendem Fasergewichtsanteil nimmt die Ausformung des Hohlraums ab und damit die lokale Wandstärke teils stark zu.

### Mechanische und mikrostrukturelle Eigenschaften

- Welche mechanischen Eigenschaften weisen Versuchsbauteile auf, die im GasComp-Prozess hergestellt werden und wie stellt sich der Vergleich zu im GAIM-Prozess gefertigten Bauteilen dar?

Die mechanischen Eigenschaften wurden anhand der Biegefestigkeit und des maximalen Drehmoments beim Versagen bestimmt. Werden die ermittelten Biegefestigkeiten betrachtet so ergeben sich sowohl beim Versuchsbauteilen aus dem GasComp- als auch Versuchsbauteilen aus dem GAIM-Prozess unabhängig der Verfahrensvariante und des Materials Werte im Bereich von 49 bis 92 MPa. Einzig die Träger aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF,

die im GAIM-Prozess gefertigt wurden, zeigen mit 118 MPa (Short-Shot-Verfahren) und 120 MPa (Nebenkavitätsverfahren) deutliche höhere Werte.

Bei den ermittelten Drehmomenten liefern die Vollkörper unabhängig des Prozesses mit Werten zwischen 882 bis 1200 Nm die größten gemessenen Werte. Die im GasComp-Prozess gefertigten Technologieträger, unabhängig der Verfahrensvariante und des Materials, weisen Werte im Bereich von 602 bis 712 Nm. Die mit den gleichen Materialien und Verfahrensvarianten im GAIM-Prozess hergestellten Träger weisen mit Werten von 290 bis 379 Nm deutlich niedrigere Drehmomente auf. Diese Einteilung in drei Gruppen, zeigt einen Zusammenhang von Masse bzw. Wandstärke zum Versagensdrehmoment. Diese Korrelation zeigt, dass mit abnehmender Masse das zum Versagen notwendige Drehmoment ebenfalls abnimmt.

- Welchen Einfluss haben die Prozess- und Verfahrensvarianten auf die werkstofflichen Eigenschaften der Versuchsbauteile und gibt es einen Einfluss des Granulattyps?

Die Ausformung der Gasblase beeinflusst die Mikrostruktur. Beides wird sowohl von Prozess als auch von der Verfahrensvariante und dem Granulattyp beeinflusst. Grundsätzlich liefert der GAIM-Prozess eine homogen ausgeformte Gasblase, was zu einer niedrigeren Restwandstärken als im GasComp-Prozess führt. Im Vergleich der Verfahrensvarianten führt das Nebenkavitätsverfahren zu einer homogenen und niedrigeren Restwandstärken als das Short-Shot-Verfahren. Ein Einfluss des Granulattyps auf die Restwandstärke ist zu erkennen, mittels des pultrudierten Materials können gleichmäßigere Gasblasen bei niedrigerer Wandstärke erzeugt werden. Darüber hinaus nimmt, unabhängig des Granulattyps, mit steigendem Glasfasergehalt die Ausformung der Gasblase ab und die Restwandstärke nimmt zu.

Die Mikrostruktur wird ebenfalls sowohl von der Prozess- als auch der Verfahrensvariante beeinflusst. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Faserorientierung im GAIM-Prozess stärker ausgeprägt ist als im GasComp-Prozess und dass das Nebenkavitätsverfahren die Fasern stärker in Verarbeitungsrichtung ausrichtet als das Short-Shot-Verfahren. Dies ist auf die unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten zurückzuführen. Daraus lässt sich ableiten, dass die am stärksten in Verarbeitungsrichtung orientierten Fasern im GAIM-Prozess in Kombination mit dem Nebenkavitätsverfahren zu erzielen sind.

Die Faserlänge wird ausschließlich während der Plastifizierung und der Formfüllung beeinflusst, sodass hier nur die Prozesse und nicht die Verfahrensvarianten von Bedeutung sind. Dabei zeigt sich, dass die schonende Plastifizierung während des GasComp-Prozesses zu einer höheren gewichtsgemittelten Faserlänge führt als die Plastifizierung im Spritzgussprozess mit hohen Schergeschwindigkeiten. Wird die anzahlgemittelte Faserlänge betrachtet, kehrt sich das Bild um, sodass der Plastifiziervorgang während des Spritzgießens leicht höhere Faserlängen ermöglicht. Unabhängig des Prozesses nimmt mit steigendem Fasergehalt sowohl die gewichts- als auch die anzahlgemittelte Faserlänge ab.

Die Porosität, die ebenfalls die Mikrostruktur beschreibt, wurde ausschließlich bei den im GasComp-Prozess gefertigten Technologieträgern untersucht. Hier zeigt sich, dass die Verfahrensvarianten die Porosität deutlich beeinflussen (vgl. Abbildung 67). Die in der Verfahrensvariante Short-Shot gefertigten Träger weisen eine signifikant höhere Porosität auf als die mit dem Nebenkavitätsverfahren gefertigten Träger. Dieser Unterschied ist durch die erzwungene

Konvektion und der damit einhergehenden Abkühlung der Grenzfläche während der Hohlraumausbildung zu erklären (siehe. Abbildung 78). In deren Folge kommt es zu einer Versiegelung des Kunststoffes, sodass kein Gas in diesen eindiffundieren kann.

Trotz der unterschiedlichen Vorkonsolidierung der Glasfasern in den zwei Granulattypen (ummantelt und pultrudiert) kann kein Einfluss auf die Porosität festgestellt werden. Es kann jedoch beim ummantelten Granulat zu lokal auftretenden nicht dispergierten Faserbündeln kommen.

### **Leichtbaupotenziale und Anwendungsfelder**

- Mit welcher der erprobten Kombinationen aus Prozess, Verfahrensvariante und Material können dünnwandige Hohlprofile mit einem großen Durchmesser gefertigt werden und welche Kombination bietet das größte Leichtbaupotenzial?

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass es prinzipiell mit allen Kombinationen aus Prozess, Verfahrensvariante und Material möglich ist, Hohlstrukturen zu fertigen. Jedoch schwankt die Restwanddicke in Abhängigkeit der einzelnen Kombinationsmöglichkeiten. Das für den Lastfall Biegung größte Leichtbaupotenzial bietet die Kombination aus GAIM-Prozess, Nebenkavitätsverfahren und dem pultrudierten Material mit 30 Gew.-% GF. Träger, die mit dieser Kombination gefertigt werden, weisen neben einem großen Innendurchmesser auch eine ausgeprägte Orientierung der Fasern in Fließrichtung auf. Dadurch erzielen diese Träger eine hohe Biegefestigkeit bei gleichzeitig niedrigem Gewicht. Dies führt zur höchsten gewichtsspezifischen Biegefestigkeit der untersuchten Versuchsbauteile und damit auch zum höchsten Leichtbaupotenzial dieser.

- Für welche potenziellen Bauteile ist diese Fertigungstechnologie geeignet und wie kann eine Funktionsintegration umgesetzt werden?

Als potenzielle Anwendungsbeispiele sind Klappen und Türen zu nennen, die einen umlaufenden Rahmen aufweisen. Hier kann durch die Hohlstruktur eine Versteifung erzielt werden. Darüber hinaus ist durch die gute Schweißbarkeit von Polypropylen eine einfache Anbindung anderer Bauteile möglich.

Der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Technologieträger zeigt Potenziale zur Funktionsintegration auf. So könnte der Hohlraum theoretisch beispielsweise zur Kabelführung genutzt werden. Zusätzlich bietet der Spritzgussprozess zahlreiche bekannte Möglichkeiten der Funktionsintegration, sodass an einen modifizierten Technologieträger Schraubdome, Klipse oder Schweißlaschen angebracht werden können.

- Welche der erprobten Kombinationen ist für eine industrielle Großserienfertigung am ehesten geeignet?

Die praktischen Versuche zeigten die unterschiedlichen Stärken und Schwächen der einzelnen Prozesse und Verfahren. Aufgrund des geschlossenen Systems aus Anlage und Werkzeug im Spritzgussprozess ist dieser robuster als der GasCom-Prozess, bei dem ein manueller oder auch automatisierter Transfer des Plastifikats in das Werkzeug erfolgt bzw. erfolgen kann. Zudem stellt die zeitabhängige Dosierung beim hier verwendeten GasComp-Prozess einen Unsicherheitsfaktor dar. Die Menge des Plastifikats hängt vom gleichmäßigen Einzug des Granulats in die Schnecke ab, der bei Langfasergranulaten nicht ohne Weiteres zu gewährleisten

ist. Somit ist auf Basis der gesammelten Erfahrungen und unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik der Spritzgussprozess dem GasComp-Prozess vorzuziehen.

Bezüglich der Verfahrensvariante können sowohl das Short-Shot- als auch das Nebenkavitätsverfahren mit Kühlung gute Ergebnisse erzielen. Unter Berücksichtigung des Leichtbauaspekts, der geringeren Porosität und der durch die Kühlung kürzeren Fertigungszeit ist hier das Nebenkavitätsverfahren mit Kühlung (wie in Abbildung 78 beschrieben) gegenüber dem Short-Shot-Verfahren vorzuziehen.

### **Resümee und Ausblick**

Insgesamt hat sich gezeigt, dass sowohl im GasComp-Prozess als auch im GAIM-Prozess mit beiden Verfahrensvarianten langfaserverstärkte Hohlstrukturen gefertigt werden können. Es ergeben sich in Abhängigkeit von Prozess- und Verfahrensvariante sowie Material unterschiedliche Leichtbaupotenziale, wobei die Kombination aus GAIM-Prozess, Nebenkavitätsverfahren und pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF die besten Ergebnisse liefert. Im Vergleich zum Referenzbauteil, einem spritzgegossenen Vollkörper aus dem gleichen Material, können 52 % Gewicht eingespart und dabei die gewichtsspezifische Biegefestigkeit um 18 % gesteigert werden.

Werden die gewonnenen Erkenntnisse als Ausgangspunkt für eine Weiterentwicklung herangezogen, so bieten sich durch die aufgezeigten Leichtbaupotenziale und die möglichen Anwendungsbeispiele zahlreiche Chancen das Fahrzeuggewicht zukünftig weiter zu reduzieren. Damit ließen sich zum einen der CO<sub>2</sub>-Ausstoß konventioneller Fahrzeuge senken sowie die Fahrdynamik erhöhen und zum anderen die Reichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen im Stadtverkehr erhöhen. Darüber hinaus sind auch Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der vertikalen Mobilität und der Einsatz in der Zweiradindustrie denkbar, da dort Leichtbau ebenfalls ein entscheidender Aspekt für erfolgreiche Produktentwicklungen darstellt.

Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen bieten sowohl der GAIM-Prozess als auch der GasComp-Prozess. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen könnte ein möglicher nächster Schritt für den GAIM-Prozess in Kombination mit dem Nebenkavitätsverfahren ein bauteilspezifisches Vorentwicklungsprojekt sein. Hier könnten weitere Erfahrungen mit komplexeren Geometrien gesammelt werden, mit dem Ziel, die Prozess-Verfahrens-Kombination als Serienprozess zu validieren. Dabei sollte der Fokus auf einer durchgehend homogenen Wanddicke liegen und in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie eine Analyse des am besten geeigneten Fasergewichtsanteils vorgenommen werden. In diesem Zusammenhang kann auch der Einsatz eines Injection Moulding Compounders (IMC) in Erwägung gezogen werden, da je nach Zielbauteil große Einspritzvolumen realisiert werden müssen. Darüber hinaus ist es vorstellbar, dass durch den IMC größere Faserlängen und ein auf das Bauteil optimierter Fasergehalt umgesetzt werden können. Aufgrund des dann nicht mehr von Lieferanten vorgegebenen Fasergehalts, besteht darin eine weitere Möglichkeit, das Leichtbaupotenzial zu steigern.

Ein interessanter nächster Schritt für den GasComp-Prozess kann der Einsatz eines Extrusionswerkzeuges darstellen. Dadurch besteht die Möglichkeit die Fasern in der extrudierten Formmasse orientiert vorliegen zu haben und beim Transfer in das Werkzeug eine Anisotropie

zu erzeugen, die dem späteren Lastfall des Bauteils entspricht. Damit lässt sich möglicherweise der Nachteil der geringeren Faserorientierung in den Randschichten des GasComp-Prozesses gegenüber dem GAIM-Prozess ausgleichen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die lastpfadgerechte Auslegung von Bauteilen kombiniert mit bewusst prozess-induzierter oder erzwungener Faserausrichtung das Leichtbaupotenzial von Hohlstrukturen im Automobilbereich weiter ausreizen kann und damit ein vielversprechender Ansatz zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung in Fahrzeugflotten ist.

## 11 Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1 Übersicht vier unterschiedlicher <i>Leichtbauansätze</i> , die gemeinsam eine <i>Leichtbaustrategie</i> ergeben.....  | 2  |
| Abbildung 2 Überblick über unterschiedliche <i>FKV Granulate</i> : <i>Kurzfasergrenulat</i> (Ausgangsfaserlänge von ~ 0,2 bis 0,4 mm) mit vollständig konsolidierten Fasern (links), <i>Langfasergrenulat</i> Ausgangsfaserlänge von ~ 5 bis 25 mm) mit ummanteltem Glasfaserroving, bei dem nur die Randfasern des Rovings mit Polymer benetzt sind (Mitte) sowie pultrudiertes Langfasergrenulat mit vollständig konsolidierten Fasern (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003)..... | 6  |
| Abbildung 3 Exemplarische Darstellung der <i>mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit der Faserlänge</i> sowie Kennzeichnung der kritischen Faserlänge $l_c$ und der Einteilung in Kurz- und Langfaser-Bereich (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003). ....   | 7  |
| Abbildung 4 <i>CT-Aufnahmen der drei Schichten der Faserorientierung</i> in einem Formteilquerschnitt mit 2 mm Wanddicke (links) und <i>Strömungsvorgang einer Polymerschmelze</i> im Spalt (rechts) (Schröder 2018) .....  | 9  |
| Abbildung 5 <i>REM-Aufnahmen einer Bruchfläche</i> eines kurzfaserverstärkten Bauteils, das im Spritzgussprozess mit Gasinjektionstechnik gefertigt wurde. Es zeigt <i>drei unterschiedliche Bereiche der Faserorientierung</i> in der Restwanddicke (Zheng u. a. 2007). ....   | 10 |
| Abbildung 6 Schematische Darstellung der unterschiedlichen in Faserverbunden auftretenden <i>Schädigungsmechanismen</i> (Schoßig 2011).....   | 11 |
| Abbildung 7 <i>Spannungsverlauf des Grenzflächenschubs</i> und <i>Faserzugspannungsverlauf</i> bei ideal elastisch (Cox) und ideal plastisch (Kelly-Tyson) angenommener Matrix (Kelly, Tyson 1965; Cox 1952). ....  | 12 |
| Abbildung 8 Schematische Darstellung der drei unterschiedlichen Stufen der <i>Faserkonzentration</i> in einer Polymerschmelze (Evans, Gibson 1986).....   | 13 |
| Abbildung 9 Die vier auf die Fasern wirkenden <i>Lastfälle</i> während des Plastifiziervorgangs in einer Plastifiziereinheit bzw. einem Extruder (Thieltges 1991). ....   | 15 |
| Abbildung 10 Schematische Darstellung einer <i>Dreizonenschnecke</i> mit Einzugs-, Kompressions- und Meteringzone (Johannaber, Michaeli 2004).....  | 16 |
| Abbildung 11 Resümierende Übersicht der Eigenschaften von FKV mit: a) Einteilung in Kurz- und Langfasergrenulat (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003); b) Darstellung des Aspektverhältnis (Bonnet 2009); c) Übersicht der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Faserlänge am Beispiel von glasfaserverstärktem PP (Bürkle, Siverding, Mitzler 2003); d) Einfluss der Faserorientierung auf die mechanischen Eigenschaften eines FKV (Willems u. a. 2018) ....            | 17 |
| Abbildung 12 Vergleich der <i>Hohlraumausbildung</i> bei Re-GMT (oben) und D-LFT (unten) am Beispiel von im <i>GasComp-Prozess</i> und dem <i>Short-Shot-Verfahren</i> gefertigten Versuchsbauteilen (Brzeski 2011).....  | 19 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 13 Schematische Darstellung der <i>drei Stufen des Short-Shot-Verfahrens</i> (links) und der des <i>Nebenkavitätsverfahrens</i> (rechts) (vgl. Menges, Michaeli, Mohren 2007).....  | 21 |
| Abbildung 14 Übersicht und Gliederung der <i>Einflussfaktoren auf die Formteilqualität</i> von Kunststoffbauteilen bei der Gasinjektionstechnik (vgl. Schröder 1997). .....   | 21 |
| Abbildung 15 <i>Qualitative Viskositätsverläufe</i> und <i>Strömungsprofile</i> für unterschiedliche Fluide für ein ideal Newtonsches Fluid (A), ein schwach strukturviskoses Fluid (B) und ein stark strukturviskoses Fluid (C) (vgl. Schröder 1997).....  | 22 |
| Abbildung 16 Schematische Darstellung des Einflusses der <i>Dehn- und Scherviskosität</i> auf die <i>Strömungsvorgänge</i> an der Gasblasenfließfront (vgl. Schröder 1997). .....   | 23 |
| Abbildung 17 Übersicht der <i>drei Geometrieklassifizierungen</i> für die Gasinjektionstechnik, flächig, stabförmig und flächig mit partiellen Verdickungen (vgl. Eyerer, Elsner, Avery 2003) (LanversÇPotente, Heim, RidderÈ. ....   | 24 |
| Abbildung 18 Darstellung des <i>Fingereffekts</i> bei einem flächigen im GIT-Verfahren gefertigten Bauteil aus transparentem Kunststoff (Schröder 1997). .....  | 26 |
| Abbildung 19 <i>Klassifizierung</i> und Lage der <i>Blasen und Schaumbildung</i> in einem GIT-Formteil von blasenfrei (links) bis aufgeschäumt (rechts) (vgl. Moritzer 1997). .....   | 27 |
| Abbildung 20 Schematische Darstellung zur <i>Bildung gasförmiger Keime</i> durch Übersättigung in Folge abrupten Druckabfalls (Nicolay 1976; Blander, Katz 1975). .....   | 28 |
| Abbildung 21 Schematische Darstellung der <i>freien Energie von homogener und heterogener Keimbildung</i> in Abhängigkeit des Keimradius (vgl. Altstädt, Mantey 2010).....  | 29 |
| Abbildung 22 Schnittdarstellung des <i>hybriden Versuchswerkzeugs</i> mit <i>Tauchkante (8)</i> und <i>Formteil (2)</i> (blau hervorgehoben) sowie den weiteren Funktionsdetails. ....  | 34 |
| Abbildung 23 Technische Zeichnung des <i>Technologieträgers</i> mit Bemaßung (Länge ( $L$ ) = 300 mm; Querschnittsabmessungen ( $d$ ) = 50 mm und Wanddicke ( $t$ ) = 3 mm) und Schnittdarstellung als idealer Hohlkörper mit homogener Restwanddicke.<br>Verarbeitungsprozesse und Verfahrensvarianten ..... | 35 |
| Abbildung 24 <i>Angepasstes Nebenkavitätsverfahren</i> mit <i>geöffneter Nebenkavität</i> während der Schmelzinjektion und abgetrennter Nebenkavität während der Gasnachdruckphase. ....  | 36 |
| Abbildung 25 Schematische Darstellung des <i>Biegemomentverlaufs</i> in einem symmetrischen Profil bei einer 3-Punkt-Biegung (Frick, Stern 2017). .....   | 37 |
| Abbildung 26 Prinzipieller Aufbau eines <i>Torsionsversuchs</i> (links) mit Festlager und Drehmoment einbringender Einspannung. Darstellung des aufgebracht Torsionsmoments $M_t$ (rechts) und der <i>Verdrillung der Torsionsprobe</i> (vgl. Frick, Stern 2017). .....                                       | 38 |
| Abbildung 27 Fehlerbild 1: <i>Aufgeplatzter Träger</i> .....  | 45 |
| Abbildung 28 Fehlerbild 2: <i>Gasblasendurchbruch</i> .....   | 45 |
| Abbildung 29 Fehlerbild 3: <i>Unvollständige Ausformung</i> .....   | 45 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 30 Fehlerbild 4: <i>Einstecken der Auswerferstifte</i> in den Probekörper.....   | 46 |
| Abbildung 31 Fehlerbild 5: <i>Schmelze dichtet am Injektor nicht richtig</i> ab .....  | 46 |
| Abbildung 32 <i>Gasdruckprofil des GasComp-Prozesses mit Short-Shot-Verfahren</i> mit [1] Druckaufbau-, [2] Druckhalte- und [3] Druckabbauzeit sowie den dazugehörigen Druckniveaus.....   | 47 |
| Abbildung 33 Fehlerbild beim <i>GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren</i> : Verwirbelungen der Schmelze im Bereich der Gasblasenausbildung und einer daraus resultierenden inhomogenen Grenzschicht von Gasblase und Polymer.....   | 48 |
| Abbildung 34 <i>Gasdruckprofil des GasComp-Prozesses mit Nebenkavitätsverfahren</i> mit [1] Druckaufbauzeit, zwei [2a/2b] Druckhalte- und zwei [3a/3b] Druckabbauzeiten sowie den dazugehörigen Druckniveaus.....  | 49 |
| Abbildung 35 Darstellung der Fehlerbilder beim <i>GAIM-Prozess mit Short-Shot-Verfahren</i> . Kurz ausgebildete Gasblase bei großem Gasblasendurchmesser bei 80 % Vorfüllung (oben) und Durchbruch der Gasblase bzw. aufreißen des Trägers bei 50% Vorfüllung (unten). .....   | 50 |
| Abbildung 36 <i>Gasdruckprofil des GAIM-Prozess mit Short-Shot-Verfahren</i> mit einer zweistufigen Druckaufbauzeit [1a/1b], einer Druckhaltezeit [2] und einer Druckabbauzeit [3] sowie den dazugehörigen Druckniveaus.....   | 51 |
| Abbildung 37 <i>Ausformung der Gasblase</i> sowie die sich ergebenden Restwanddicke von je einem exemplarischen Versuchsbauteil, das im <i>Short-Shot-Verfahren</i> gefertigt wurde. (a) <i>GasComp-Prozess mit 80 % Vorfüllung</i> ; (b) <i>GAIM-Prozess mit 80% Vorfüllung</i> ; (c) <i>GAIM-Prozess 60 % Vorfüllung</i> ..... | 56 |
| Abbildung 38 <i>Ausformung der Gasblasen</i> sowie die sich ergebenden Restwanddicke von je einem exemplarischen Versuchsbauteil aus dem <i>Nebenkavitätsverfahren</i> . (1) <i>GasComp-Prozess</i> ; (2) <i>GAIM-Prozess</i> .....  | 57 |
| Abbildung 39 Übersicht der <i>repräsentativen Restwanddicke</i> , der <i>durchschnittlichen Masse</i> des Versuchsbauteils sowie des <i>axialen Flächenträgheitsmoments</i> mit exemplarischen Querschnittsbildern der untersuchten Prozess-, Verfahrens und Materialkombinationen. ....   | 58 |
| Abbildung 40 <i>Versuchsaufbau der 3-Punkt-Biegeprüfung</i> mit Bemaßung des Prüfstandsaufbaus (links) und der Prüflage des Versuchsbauteils (rechts). .....   | 59 |
| Abbildung 41 Übersicht der durchschnittlichen Bruchspannung zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im Spritzguss- bzw. Fließpress-Prozess als <i>Vollkörper</i> gefertigt wurden. ....  | 60 |
| Abbildung 42 Übersicht der durchschnittlichen Bruchspannung zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im <i>GAIM- bzw. GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren</i> gefertigt wurden. ....   | 60 |
| Abbildung 43 Übersicht der durchschnittlichen Bruchspannung zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im <i>GAIM- bzw. GasComp-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren</i> gefertigt wurden...  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 44 <i>Aufbau des Torsionsprüfstands</i> (links) und Draufsicht auf die Stirnfläche eines Prüfkörpers mit eingezeichneter Torsionsachse (rechts).....   | 62 |
| Abbildung 45 Übersicht der durchschnittlichen Drehmomente zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im <i>Spritzguss- bzw. Fließpress-Prozess als Vollkörper</i> gefertigt wurden. ....  | 62 |
| Abbildung 46 Übersicht der durchschnittlichen Drehmomente zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im <i>GAIM- bzw. GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren</i> gefertigt wurden. ....   | 63 |
| Abbildung 47 Übersicht der durchschnittlichen Drehmomente zum Zeitpunkt des Versagens bei Versuchskörpern aus pultrudiertem und ummanteltem Granulat mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im <i>GAIM- bzw. GasComp-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren</i> gefertigt wurden...  | 64 |
| Abbildung 48 <i>Oberflächenstrukturvergleich</i> : unebene Strangstruktur mit länglichen Einkerbungen bei fließgepressten Trägern (links) und gleichmäßige Oberflächenstruktur bei spritzgegossenen Trägern (rechts) .....   | 64 |
| Abbildung 49 <i>Faserbündel</i> an der Oberfläche eines Trägers aus ummanteltem Granulat, der im Spritzgussprozess gefertigt wurde. ....   | 65 |
| Abbildung 50 <i>Bruchverlauf bzw. Bruchlinie</i> je eines Trägers aus der 3-Punkt-Biegeprüfung. Der obere Träger (a) wurde ein im <i>GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren</i> (20 bar Maximaldruck) gefertigt. Der untere Träger (b) wurde im <i>GAIM-Prozess mit dem Nebenkavitätsverfahren</i> gefertigt. Es wurde jeweils das pultrudierte Material mit 30 Gew.-% GF verarbeitet..... | 65 |
| Abbildung 51 Übersichtsbild mit eingezeichnetem Fokusbereich der <i>Bruchlinie</i> (links) eines <i>Versuchsbauteils nach 3-Punkt-Biegung</i> . Versuchsbauteil aus pultrudiertem Granulat mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im <i>GasComp-Prozess mit Short-Shot-Verfahren</i> , makroskopische Aufnahme der Bruchlinie im Fokusbereich ohne freiliegende Fasern (rechts).....                        | 66 |
| Abbildung 52 Bruchflächen nach 3-Punkt-Biegeprüfung von Trägern aus pultrudiertem Granulat mit 30 Gew.-% GF, die im <i>Nebenkavitätsverfahren</i> gefertigt wurden. <i>GasComp-Prozess</i> (links) <i>GAIM-Prozess</i> (rechts) .....  | 66 |
| Abbildung 53 zeigt die Bruchfläche eines Versuchsbauteils aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im <i>GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren</i> , nach 3-Punkt-Biegung bei 5000-facher Vergrößerung. ....   | 67 |
| Abbildung 54 Rissverlauf nach Torsionsprüfung an zwei Versuchsbauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im <i>GasComp-Prozess</i> (a) und <i>GAIM-Prozess</i> (b) jeweils in Kombination mit dem <i>Nebenkavitätsverfahren</i> . ....   | 67 |
| Abbildung 55 Bruchfläche eines Versuchsbauteils nach Torsionsprüfung aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im <i>GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren</i> . Darstellung bei 250-facher Vergrößerung (links) und 5000-facher Vergrößerung (rechts). ..  | 68 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 56 <i>Faserbenetzung an der Grenzfläche von Gasblase und Polymer bei 50- (a), 500- (b) und 2000-facher (c) Vergrößerung.</i> Die Aufnahmen zeigen ein Versuchsbauteil aus ummanteltem Granulat mit 30 Gew.-% GF, das im <i>GasComp-Prozess mit Short-Shot-Verfahren</i> hergestellt wurde. ....  | 69 |
| Abbildung 57 <i>Faserbenetzung an der Grenzfläche von Gasblase und Polymer bei 50- (d), 500- (e) und 2000-facher (f) Vergrößerung.</i> Die Aufnahmen zeigt ein Versuchsbauteil aus pultrudiertem Granulat mit 30 Gew.-% GF, das im <i>GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren</i> gefertigt wurde.....  | 69 |
| Abbildung 58 <i>Grenzfläche von Polymer und Gasblase bei 5.000-facher Vergrößerung,</i> Versuchsbauteile aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im <i>Short-Shot-Verfahren (a) und Nebenkavitätsverfahren (b).</i> ....  | 69 |
| Abbildung 59 <i>Grenzfläche von Polymer und Gasblase,</i> Versuchsbauteile aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im <i>Short-Shot-Verfahren (a),</i> gezeigt bei 15.000-facher Vergrößerung und <i>Nebenkavitätsverfahren (b)</i> gezeigt bei 10.000-facher Vergrößerung.....   | 70 |
| Abbildung 60 <i>Darstellung der gewichtgemittelten (<math>L_p</math>), anzahlgemittelten (<math>L_n</math>) und tabellarischen Darstellung Ausgangsfaserlängen (<math>L_A</math>) in Abhängigkeit von Verarbeitungsprozess und Granulattyp</i> .....   | 71 |
| Abbildung 61 <i>Schematische Darstellung der Analysebereiche</i> zur Faserorientierung am Beispiel eines Vollkörpers (links) und eines Hohlkörpers (rechts). ....  | 72 |
| Abbildung 62 <i>Darstellung der Porositätsanalyse</i> am Beispiel eines Trägers aus der <i>Maximaldruckstudie</i> mit 20 bar Druck. Weiß umrahmt der Analysebereich des Versuchsbauteils(links). Analyse des Bereichs (rechts), der türkise Rahmen stellt die Region of Interest dar, Rot und Blau stellen die detektierten Poren dar, deren Volumen anhand der Skala einzuordnen ist..... | 73 |
| Abbildung 63 <i>Darstellung der Porengeometrie</i> mit Perspektive und drei Schnittdarstellungen am Beispiel eines CT-Scans des Bauteils aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, das im <i>GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren</i> gefertigt wurde. ....   | 74 |
| Abbildung 64 <i>Porositätsverlauf</i> über den Querschnitt am Beispiel von repräsentativen <i>Vollkörpern</i> aus den vier unterschiedlichen Granluattypen, die im Fließpressprozess hergestellt wurden. ....  | 75 |
| Abbildung 65 Die Ergebnisse der LGF-Granulatstudie zeigen den <i>Verlauf der Porosität</i> entlang der Ortskoordinate bei Versuchsbauteilen, die aus den vier untersuchten Granulattypen im <i>GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren</i> gefertigt wurden. ....   | 75 |
| Abbildung 66 Die Ergebnisse der <i>Porositätsanalyse der Material-Referenzstudie</i> zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate von Versuchsbauteilen aus unverstärktem PP, PP KGF mit 30 Gew.-% GF und pultrudiertem PP LGF mit 30 und 40 Gew.-% GF, die im <i>GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren</i> gefertigt wurden. ....                                   | 76 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 67 Die Ergebnisse der <i>Verfahrensstudie</i> zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate am Beispiel von Bauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im <i>GasComp-Prozess mit Short-Shot- und Nebenkavitätsverfahren</i> gefertigt wurden. ...   | 76 |
| Abbildung 68 Die Ergebnisse der <i>Maximaldruckstudie</i> zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate am Beispiel von Bauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im <i>GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren</i> bei <i>unterschiedlichen maximalen Druckniveaus</i> gefertigt wurden.....   | 77 |
| Abbildung 69 Die Ergebnisse der <i>Druckabbauzeitstudie</i> zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate am Beispiel von Bauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im <i>GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren</i> bei <i>sechs unterschiedlichen Druckabbauzeiten</i> gefertigt wurden..... | 78 |
| Abbildung 70 Die Ergebnisse der <i>Haltezeitstudie</i> zeigen den Verlauf der Porosität entlang der Ortskoordinate am Beispiel von Bauteilen aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, die im <i>GasComp-Prozess mit dem Short-Shot-Verfahren</i> bei <i>sechs unterschiedlichen Druckhaltezeiten</i> gefertigt wurden.....      | 78 |
| Abbildung 71 CT-Aufnahme von <i>nicht dispergierten Faserbündeln</i> am Beispiel spritzgegossener Bauteile aus ummanteltem Granulat mit 30 Gew.-% GF (Goris u. a. 2018).<br>.....   | 84 |
| Abbildung 72 <i>Winkel des Rissverlaufs</i> in einem Versuchsträger aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, gefertigt im <i>GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren</i> (links); Skizze eines torsionsbelasteten Zylinders mit eingezeichneten Maximalspannungen und resultierendem Risswinkel (rechts).....                   | 85 |
| Abbildung 73 <i>Freie Kristallisation</i> (a) an der Grenzfläche von Polymer und Gasblase, zu sehen an einer Aufnahme aus der <i>Maximaldruckstudie bei 200 bar Maximaldruck</i> . Referenzaufnahme (b) der freien Kristallisation mit geätzter Oberfläche aus (Michler, Baltá Calleja 2012; Egorov u. a. 2011).....                | 87 |
| Abbildung 74 Aufnahmen von <i>Crazing</i> bei einem Versuchsbauteil aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, verarbeitet im <i>GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren</i> (a), Referenzaufnahmen aus Literatur (b) (Michler, Baltá Calleja 2012). ....  | 87 |
| Abbildung 75 <i>CT-Aufnahme mit Faserorientierungsanalyse</i> durch Referenzrichtungsmethode und schematischer Einzeichnung der Reorientierung der Glasfasern an der Gasblasenfließfront durch <i>Strömungsvorgänge</i> und daraus resultierender Dehnung und Scherung. ....  | 90 |
| Abbildung 76 <i>Schematische Darstellung der Faserorientierung</i> in Abhängigkeit von Restwanddicke und Prozess am Beispiel des pultrudierten Materials mit 30 Gew.-% GF; <i>GAIM-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren</i> (links); <i>GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren</i> (rechts). ....                                 | 92 |
| Abbildung 77 <i>CT-Aufnahme mit Faserorientierungsanalyse</i> nach der Referenzorientierungsmethode in der Grenzschicht von Gasblase und Polymer am Beispiel  |    |

|  |        |
|--|--------|
| eines Bauteils aus pultrudiertem Material mit 30 Gew.-% GF, das im <i>GasComp-Prozess</i> mit dem <i>Short-Shot-Verfahren</i> gefertigt wurde. Es zeigt den Einfluss der Faserorientierung auf die Form der Poren, die sich zwischen den Fasern als abgeflachter Ellipsoid ausbilden. .... | 93     |
| Abbildung 78 Die vier <i>Verfahrensschritte</i> beim <i>Nebenkavitätsverfahren mit Gaskühlung</i> .....  | 95     |
| Abbildung 79 Bilanzielle Darstellung der <i>Massenbilanz des Nebenkavitätsverfahrens</i> während der <i>Schmelzinjektion</i> mit Untergliederung in Gesamtkavität, Haupt- und Nebenkavität sowie eingetragenen Massenströmen <i>mi</i> .....   | 96     |
| Abbildung 80 Bilanzielle Darstellung der <i>Massenbilanz des Nebenkavitätsverfahrens</i> während der <i>Gasinjektion</i> mit Untergliederung in Gesamtkavität, Haupt- und Nebenkavität und eingetragenen Massenströmen <i>mi</i> .....   | 97     |
| Abbildung 81 Bilanzielle Darstellung der Massenbilanz des Nebenkavitätsverfahrens während der Gaskühlungsphase mit Untergliederung in Gesamtkavität, Haupt- und Nebenkavität und eingetragenen Massenströmen <i>mi</i> .....   | 97     |
| Abbildung 82 Bilanzielle Darstellung der <i>Energiebilanz</i> des Versuchsbauteils während des <i>Nebenkavitätsverfahrens</i> zu <i>Beginn Gaskühlung</i> bei noch flüssiger Polymerschmelze.....  | 98     |
| Abbildung 83 Darstellung der <i>Leichtbaupotenziale</i> der unterschiedlichen Prozess- Verfahrens- und Materialkombinationen mittels normierter Bruchspannung und normierter Masse am Lastfall 3-Punkt-Biegung.....  | 101    |
| Abbildung 84 Darstellung der Leichtbaupotenziale der unterschiedlichen Prozess- Verfahrens- und Materialkombinationen mittels normiertem Drehmoment und normierter Masse am Lastfall Torsion. Mit Gruppe A (Vollkörper), Gruppe B (GasComp-Prozess) und Gruppe C (GAIM-Prozess) .....      | 102    |
| Abbildung 85 Rippenwerkzeug (1/2) mit Beschriftung der einzelnen Bereiche, so wie es Brzeski im Rahmen seiner Versuche eingesetzt hat (Brzeski 2009-07).....   | XXV    |
| Abbildung 86 Rippenwerkzeug (2/2) mit Beschriftung der einzelnen Bereiche, so wie es Brzeski im Rahmen seiner Versuche eingesetzt hat (Brzeski 2009-07) .....  | XXVI   |
| Abbildung 87 Sternwerkzeug mit Bemaßung der einzelnen Bereiche, so wie es Brzeski im Rahmen seiner Versuche eingesetzt hat (Brzeski 2009-07).....  | XXVI   |
| Abbildung 88 Darstellung des Prozessablaufs für den GAIM-Prozess mit den einzelnen Prozessschritten und Prozesszeiten (Johannaber, Michaeli 2004).....   | XXVII  |
| Abbildung 89 Darstellung des Prozessablaufs für den GasComp-Prozess mit den einzelnen Prozessschritten und Prozesszeiten .....   | XXVII  |
| Abbildung 90 CAD-Darstellung des Anlagenaufbaus für den Fließpress- bzw. GasComp-Prozess mit Stanze und Plastifiziereinheit.....   | XXVIII |
| Abbildung 91 Die sechs Schritte der Faserlängenanalyse: 1) Materialproben im Tiegel 2) Pyrolyseofen mit Tiegeln 3) Veraschte Proben mit übrigen Glasfasergerüst 4) Petrischale mit in Lösung gegebenen Glasfasern 5) Scanner mit Petrischale für automatisierte                            |        |

Faserlängenanalyse mittels Graustufenerkennung 6) Histogramme als Ergebnis der Anzahl- und gewichtsgemittelte Faserlängenanalyse..... XXIX

Abbildung 92 Technische Zeichnung der konstruierten Spannbacken für die Torsionsprüfung 1/2 ..... XXX

Abbildung 93 Technische Zeichnung der konstruierten Spannbacken für die Torsionsprüfung 2/2 ..... XXXI

## 12 Tabellenverzeichnis

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabelle 1  | Verwendete langfaserverstärkte Materialien/Halbzeuge .....   | 18 |
| Tabelle 2  | Verarbeitungsparameter Brzeski .....   | 18 |
| Tabelle 3  | Übersicht Eigenschaften der Langfasergranulate .....   | 32 |
| Tabelle 4  | Einstellungen FASEP®-Analyse .....   | 41 |
| Tabelle 5  | Einstellungen CT Analyse .....   | 42 |
| Tabelle 6  | Prozess- und Parametergrenzen des Screenings.....  | 44 |
| Tabelle 7  | Parameter des Gasdruckprofils im GasComp-Prozess mit Short-Shot-Verfahren.   | 47 |
| Tabelle 8  | Parameter-Screening beim Gas-Comp Nebenkavitätsverfahren .....   | 48 |
| Tabelle 9  | Vorfüllgrad und Parameter des Gasdruckprofils für den GasComp-Prozess mit Nebenkavitätsverfahren .....   | 49 |
| Tabelle 10 | Parameter der Spritzgussanlage für den GAIM-Prozess .....  | 50 |
| Tabelle 11 | Vorfüllgrad und Parameter des Gasdruckprofils im GAIM-Prozess mit Short-Shot-Verfahren.....  | 51 |
| Tabelle 12 | Übersicht der Prozess- und Verfahrensstudie .....  | 52 |
| Tabelle 13 | Parameter Maximaldruckstudie .....   | 53 |
| Tabelle 14 | Parameter Druckabbauzeitstudie .....   | 53 |
| Tabelle 15 | Parameter Haltezeitstudie .....  | 54 |
| Tabelle 16 | Prozentuale Faserkürzung bei anzahl- (Gl. 13) und gewichtsgemittelter Faserlänge (Gl. 14) bezogen auf die Ausgangsfaserlänge in Abhängigkeit von Material und Verarbeitungsprozess .....                 | 71 |
| Tabelle 17 | Qualitative Ergebnisübersicht der Faserorientierungsanalyse für GasComp- und GAIM-Prozess sowohl bei Vollkörpern als auch bei Versuchsbauteilen aus dem Short-Shot- und dem Nebenkavitätsverfahren. .... | 72 |
| Tabelle 18 | Übersicht gewichts- und anzahlgemittelter Faserlänge und deren Quotienten....  | 89 |

## 13 Literaturverzeichnis

- ALTSTÄDT, Volker (Hrsg.); MANTEY, Axel (Hrsg.): *Thermoplast-Schaumspritzgießen*. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2010
- AVERY, Jack: Gas Assist Injection Molding The North American Legacy. In: *Specialized Molding Techniques Application, Design, Materials and Processing*, 2001, S. 15–25
- BARBOSA, Silvia E. ; KENNY, Jose M.: *Processing of short-fiber reinforced polypropylene. I. Influence of processing conditions on the morphology of extruded filaments*. In: *Polymer Engineering & Science* 40 (2000), Nr. 1, S. 11–22
- BAUR, Erwin ; BRINKMANN, Sigrid ; OSSWALD, Tim. A. ; RUDOLPH, Natalie ; SCHMACHTENBERG, Ernst: *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. 31. Ausgabe. München : Carl Hanser Verlag, 2013
- BECKER, Oliver Mark: *Analysis of the part forming process in gas-assisted injection molding and the development of design guidelines for plate-like parts*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1999. 1. Aufl. Aachen : Mainz, 1999 (IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung 88)
- BIRR, Thomas: *Verarbeitung von langglasfaserverstärkten Thermoplasten für Spritzgussanwendungen auf dem Planetwalzenextruder*. Berlin, Technischen Universität, Fakultät III – Prozesswissenschaften. Dissertation. 2015
- BLANDER, Milton ; KATZ, Joseph L.: *Bubble nucleation in liquids*. In: *AIChE Journal* 21 (1975), Nr. 5, S. 833–848
- BONNET, Martin: *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung : Verstehen und zuverlässig auswählen*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009
- BRAST, Karsten: *Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren : Processing of Long-Fibre Reinforced Thermoplastics Using the Direct Strand-Deposition Process*. 1. Aufl. Aachen : Mainz, 2001 (IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung / Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen Bd. 120)
- BRZESKI, Ian: *Gas-Assisted Compression Moulding of Glass Reinforced Polypropylene, Part 1 : Scoping Study*. In: *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology* 27 (2011), Nr. 2, S. 49–68
- BRZESKI, Ian: *Gas-Assisted Compression Moulding of Glass Reinforced Polypropylene*. University Of Warwick. Dissertation. 2009-07
- BÜRCEL, Ralf ; RICHARD, Hans Albert ; RIEMER, Andre: *Werkstoffmechanik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- BÜRKLE, Erwin ; SIVERDING, Matthias ; MITZLER, Jochen: *Spritzgießverarbeitung von Spritzgießverarbeitung von langfaserverstärktem PP*. In: *Kunststoffe* (2003), Nr. 03, S. 47–50

- BÜRKLE, Erwin ; WOBBE, Hans: *Kombinationstechnologien auf Basis des Spritzgießverfahrens*. 1. Aufl. s.l. : Carl Hanser Fachbuchverlag, 2016
- CANADIAN ASSOCIATION FOR COMPOSITES STRUCTURES AND MATERIALS (Hrsg.); NAGEL, Ulf (Mitarb.); CHIH-CHUAN, Kao (Mitarb.); THOMASON, James (Mitarb.) : *Study on properties of composites reinforced by heat treated glass fibres simulating thermal recycling conditions*, 2013
- CARREAU, Pierre J.: *Rheological Equations from Molecular Network Theories*. In: *Transactions of the Society of Rheology* 16 (1972), Nr. 1, S. 99–127
- COX, H. L.: *The elasticity and strength of paper and other fibrous materials*. In: *British Journal of Applied Physics* 3 (1952), Nr. 3, S. 72–79
- CRANK, John: *The mathematics of diffusion*. 2. ed., reprinted. Oxford : Oxford Univ. Press, ca. 2009 (Oxford science publications)
- DEKRA: *CO2 spielt eine entscheidende Rolle : Im Blickfeld: Emissionen durch Straßenverkehr*. URL <https://www.dekra.de/de/umwelt-und-co2/>
- DIETRICH, Jochen: Fließpressen. In: DIETRICH, Jochen (Hrsg.): *Praxis der Umformtechnik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 38–61
- DOMININGHAUS, Hans (Hrsg.); ELSNER, Peter (Hrsg.); EYERER, Peter (Hrsg.); HIRTH, Thomas (Hrsg.): *Kunststoffe : Eigenschaften und Anwendungen*. 8., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2012 (VDI-Buch)
- EGOROV, V. M. ; IVAN'KOVA, E. M. ; KULIK, V. B. ; LEBEDEV, D. V. ; MYASNIKOVA, L. P. ; MARIKHIN, V. A. ; RADOVANOVA, E. I. ; YAGOVKINA, M. A. ; SEYDEWITZ, V. ; GOERLITZ, S. ; MICHLER, G. H. ; NÖCHEL, U. ; BALTA-CALLEJA, F. J.: *Features of the amorphous-crystalline structure of UHMWPE*. In: *Polymer Science Series C* 53 (2011), Nr. 1, S. 75–88
- EHRENSTEIN, Gottfried W.: *Faserverbund-Kunststoffe : Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*. 2., völlig überarbeitete Auflage. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2006
- EHRENSTEIN, Gottfried W.: *Polymer-Werkstoffe : Struktur - Eigenschaften - Anwendung*. 3. Aufl. München : Hanser, 2011
- ERSCH, Maiko ; HOPMANN, Christian: *Der Einfluss von Länge und Krümmung : Berechnung des Langzeitverhaltens spritzgegossener langfaserverstärkter Thermoplastbauteile durch integrative Simulation*. In: *Kunststoffe* (2017), Nr. 12, S. 52–56
- EVANS, K. E. ; GIBSON, A. G.: *Prediction of the maximum packing fraction achievable in randomly oriented short-fibre composites*. In: *Composites Science and Technology* 25 (1986), Nr. 2, S. 149–162
- EYERER, Peter ; ELSNER, Peter ; AVERY, Jack: *Gasinjektionstechnik*. München : Hanser, 2003
- FOLGAR, Fransisco ; TUCKER, Charles L.: *Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions*. In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 3 (1984), Nr. 2, S. 98–119

- FORGACS, O.L ; MASON, S.G: *Particle motions in sheared suspensions*. In: *Journal of Colloid Science* 14 (1959), Nr. 5, S. 457–472
- FRICK, Achim ; STERN, Claudia: *Einführung in die Kunststoffprüfung : Prüfmethode und Anwendungen*. München : Carl Hanser Verlag, 2017 (Hanser eLibrary)
- FRIEDRICH, Horst E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. 2. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2017 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- GOODSHIP, V. ; BRZESKI, I. ; WOOD, B. M. ; CHERRINGTON, R. ; MAKENJI, K. ; REYNOLDS, N. ; GIBBONS, G. J.: *Gas-assisted compression moulding of recycled GMT : Effect of gas injection parameters*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014), Nr. 3, S. 515–523
- GORIS, Sebastian ; BACK, Teresa ; YANEV, Angel ; BRANDS, Dave ; DRUMMER, Dietmar ; OSSWALD, Tim A.: *A novel fiber length measurement technique for discontinuous fiber-reinforced composites : A comparative study with existing methods*. In: *Polymer Composites* 39 (2018), Nr. 11, S. 4058–4070
- GORIS, Sebastian ; OSSWALD, Tim A.: *Progress on the Characterization of the Process-Induced Fiber Microstructure of Long Glass Fiber-Reinforced Thermoplastics*. In: *Plastics Engineering* 73 (2017), Nr. 1, S. 46–47
- GRELLMANN, Wolfgang ; SEIDLER, Sabine: *Kunststoffprüfung*. 3. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2015
- GUPTA, V. B. ; MITTAL, R. K. ; SHARMA, P. K. ; MENNIG, G. ; WOLTERS, J.: *Some studies on glass fiber-reinforced polypropylene. Part I : Reduction in fiber length during processing*. In: *Polymer Composites* 10 (1989), Nr. 1, S. 8–15
- HANSEN, Michael: *Verfahrenstechnische Grundlagen zur Auslegung von Gasinnendruckformteilen*. Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 1996. Als Ms. gedr. Aachen : Shaker, 1996 (Berichte aus der Verfahrenstechnik)
- HEIM, Hans-Peter (Hrsg.): *Specialized injection molding techniques*. Amsterdam : Elsevier, 2016 (PDL handbook series)
- HENNING, Frank ; MOELLER, Elvira: *Handbuch Leichtbau : Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München, Wien : Hanser, 2011
- HERWIG, Heinz ; MOSCHALLSKI, Andreas: *Konvektiver Wärmeübergang*. In: HERWIG, Heinz; MOSCHALLSKI, Andreas (Hrsg.): *Wärmeübertragung*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 63–134
- HOHMANN, Marc ; HILLEBRECHT, Martin ; SCHÄFER, Michael: *Leichtbaupotenzial in urbanen Elektrofahrzeugen : Edag belegt anhand von Realversuchen und abgeglichenen Simulationen, dass Leichtbau in urbanen Elektrofahrzeugen aus energetischer Sicht sinnvoll ist. Ein um 100 kg leichteres urbanes Elektrofahrzeug spart demnach im Realbetrieb etwa 4 % an Antriebsenergie. Dies erlaubt wiederum den Einbau einer kleineren und leichteren Batterie, ohne die Reichweite zu reduzieren*. In: *Lightweight Design* 11 (2018), 6/2018, S. 48–51

- HOPMANN, Christian ; MICHAELI, Walter: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. 7., überarbeitete und erweiterte Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2015
- INSTITUT FÜR WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN (Hrsg.); MORITZER, Elmar (Mitarb.); HEIDERICH, Gilmar (Mitarb.) : *Beschreibung der Faserverkürzung während der Plastifizierung im Spritzgießprozess*. Lampertheim : ALPHA Informationsgesellschaft mbH und die Autoren für ihre Beiträge, 2018 (Jahresmagazin Kunststofftechnik)
- JOHANNABER, Friedrich ; KONEJUNG, Klaus: *Zufall oder Vorsehung : Wanddicken bei der GIT*. In: *Kunststoffe : Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung ; Organ deutscher Kunststoff-Fachverbände* (1995), 6/85, 763 - 771
- JOHANNABER, Friedrich ; MICHAELI, Walter: *Handbuch Spritzgießen*. 2. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2004
- KELLY, A. ; TYSON, W. R.: *Tensile properties of fibre-reinforced metals : Copper/tungsten and copper/molybdenum*. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 13 (1965), Nr. 6, S. 329–350
- KLEIN, Bernd ; GÄNSICKE, Thomas: *Leichtbau-Konstruktion : Dimensionierung, Strukturen, Werkstoffe und Gestaltung*. 11th ed. 2019, 2019
- KUNZ, J. ; LUKIC, D.: *Biegesteifigkeit und Biegefestigkeit in der beanspruchungsgerechten Auslegung : Biegesteifigkeit und Biegefestigkeit in der beanspruchungsgerechten Auslegung*. In: *Konstruktion* (2006), 7/8, S. 65–67
- LANVERS, Andreas Paul: *Analyse und Simulation des Kunststoff-Formbildungsprozesses bei der Gasinjektionstechnik (GIT)*. Aachen, RWTH Aachen, Institut für Kunststoffverarbeitung. Dissertation. 1993
- LINKE, Markus ; NAST, Eckart: *Festigkeitslehre für den Leichtbau*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015
- MAUS, Wolfgang (Hrsg.): *Zukünftige Kraftstoffe : Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel*. 1. Auflage 2019. Berlin : Springer Berlin, 2019 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- MENGES, Georg ; HABERSTROH, Edmund ; MICHAELI, Walter ; SCHMACHTENBERG, Ernst: *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe*. 1. Aufl. s.l. : Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014
- MENGES, Georg ; MICHAELI, Walter ; MOHREN, Paul: *Spritzgießwerkzeuge : Auslegung, Bau, Anwendung*. 6. Auflage. München : Hanser, 2007
- METTEN, Martin ; CREMER, Markus: *Langfaserverstärkte Thermoplaste spritzgießen : Verfahrensparameter beeinflussen die Faserlänge*. In: *Kunststoffe* 90 (2000), Nr. 1, S. 80–83
- MICHAELI, Walter ; ROBERS, Thomas: *Druck- und Volumenstromübertragungsverhalten beim Spritzgießen*. In: *Plaste und Kautschuk* 41 (1994), Nr. 1, S. 26–33
- MICHEL, Peter: *Smart Production und Modularisierung* (Green Economy Konferenz 2016 - Nachhaltiges Wirtschaften). Berlin, 02.11.2016 – Überprüfungsdatum 12.12.2019

- MICHLER, Georg Hannes: *Kunststoff-Mikromechanik : Morphologie, Deformations- und Bruchmechanismen ; mit 22 Tabellen*. München : Hanser, 1992
- MICHLER, Goerg H. ; BALTA CALLEJA, Francisco J.: *Nano- and micromechanics of polymers : Structure modification and improvement of properties*. München : Hanser, 2012
- MITTAL, R. K. ; GUPTA, V. B. ; SHARMA, P. K.: *Theoretical and experimental study of fibre attrition during extrusion of glass-fibre-reinforced polypropylene*. In: *Composites Science and Technology* 31 (1988), Nr. 4, S. 295–313
- MORITZER, Elmar: *Phänomenorientierte Prozeß- und Formteiloptimierung von thermoplastischen Gasinjektions-(GIT)-Spritzgießartikeln*. Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 1997. Als Ms. gedr. Aachen : Shaker, 1997 (Berichte aus der Kunststofftechnik)
- NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT: *Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase*. Mai 2018
- NEITZEL, Manfred ; MITSCHANG, Peter ; BREUER, Ulf: *Handbuch Verbundwerkstoffe : Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. 1. Aufl. s.l. : Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014
- NICOLAY, A.: *Untersuchung zur Blasenbildung in Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rissbildung*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule. Dissertation. 1976. URL [https://www.green-economy-plattform.de/de/veranstaltungen/2016/green-economy-konferenz-2016/medien/pdf/a\\_michel\\_peter\\_01\\_presentation\\_ge2016.pdf?m=1558434519&](https://www.green-economy-plattform.de/de/veranstaltungen/2016/green-economy-konferenz-2016/medien/pdf/a_michel_peter_01_presentation_ge2016.pdf?m=1558434519&)
- OELGARTH, Arndt Michael: *Analyse und Charakterisierung des Fließverhaltens langfaserverstärkter Preßmassen : Analysis and determination of the flow behaviour of long fibre-reinforced moulding compounds*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1997. Aachen : Mainz, 1997 (IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung 70)
- POHL, Michael (Hrsg.): *Konstruktion, Qualitätssicherung und Schadensanalyse : [Tagung "Werkstoffprüfung 2007", 29. und 30. November 2007 in Neu-Ulm]*. Düsseldorf : Verl. Stahl Eisen, 2007
- POTENTE, Helmut ; HEIM, Hans-Peter ; RIDDER, Helmut: *Gasinjektionstechnik: Der Querschnitt ist entscheidend*. In: *Kunststoffe* (2003), Nr. 10, S. 79–85. URL <https://www.kunststoffe.de/kunststoffe-zeitschrift/archiv/artikel/gasinjektionstechnik-der-querschnitt-ist-entscheidend-529249.html>
- POTENTE, Helmut ; MORITZER, Elmar: *Schaumstrukturen schwächen das GIT-Bauteil*. In: *Kunststoffberater* 42 (1997), Nr. 3, S. 16–22
- POTENTE, Helmut ; RENNEFELD, Christoph: *Konstruktionssystematik fuer die Formteilgestaltung bei der Gasinnendrucktechnik : Teil 2*. In: *Plastverarbeiter* (1995), Nr. 6, S. 38
- POTENTE, Helmut ; SCHÄFERS, Martin: *Modellgesetze für die Gasinjektionstechnik*. In: *Zeitschrift Kunststofftechnik Journal of Plastics Technology* (2007), Nr. 3

- ROHDE-TIBITANZL, Melanie: *Direct processing of long fiber reinforced thermoplastic composites and their mechanical behavior under static and dynamic load*. Hamburg, Hamburg : Tu-Tech Verl., 2015 (Technisch wissenschaftlicher Bericht / Polymer Engineering, Univ. Bayreuth)
- ROOS, Eberhard: *Werkstoffkunde für Ingenieure : Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. 6., ergänzte und bearbeitete Auflage : Springer Vieweg, 2017
- SALINAS, A. ; PITTMAN, J. F. T.: *Bending and breaking fibers in sheared suspensions*. In: *Polymer Engineering and Science* 21 (1981), Nr. 1, S. 23–31
- SCHEMME, Martin; MÜLLER, Thomas (Mitarb.): *angfaserverstärkte Thermoplaste -Status und Perspektive*. 2011 (Thermoplastische Faserverbundkunststoffe)
- SCHMID, B.: *Spritzgießen von langfaserverstärkten Thermoplasten*. In: *Kunststoffe* 7 (1989), Nr. 79, S. 624–630
- SCHÖBIG, Marcus: *Schädigungsmechanismen in faserverstärkten Kunststoffen : Quasistatische und dynamische Untersuchungen*, 2011
- SCHRÖDER, Thomas: *Neue Aspekte der Herstellung von Kunststoffformteilen mit der Gasinjektionstechnik (GIT) : New aspects in the production of plastics parts in the gas injection technique (GIT)*. 1. Aufl. Aachen : Mainz, 1997 (IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung / Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen Bd. 66)
- SCHRÖDER, Thomas: *Rheologie der Kunststoffe : Theorie und Praxis*. München, [München] : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; Hanser eLibrary, 2018 (Hanser eLibrary)
- SCHÜRMMANN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (VDI-Buch)
- SIEBENPFEIFFER, Wolfgang: *Leichtbau-Technologien im Automobilbau : Werkstoffe - Fertigung - Konzepte*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014
- STELZER, Gerhard: *Zum Faser- und Eigenschaftsabbau bei Verarbeitung und Recycling diskontinuierlich faserverstärkter Kunststoffe : Anwendung des Mikrobiegeversuchs zur Faserfestigkeitsbestimmung am Beispiel methodischer Untersuchungen des Eigenschaftsabbaus diskontinuierlicher faserverstärkter Kunststoffe*. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Recyclinggerechter Produktgestaltung / Entfertigung. Dissertation. 2002. URL <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/deliver/index/docId/1404/file/diss.pdf> – Überprüfungsdatum 19.05.2019
- STENGLER, Ralph ; SANDAU, Konrad ; HARTWICH, Mark Raphael ; HÖHN, Norbert ; MAYR, Helga: FASEP ULTRA, Sonderdruck.
- STEWART, C. W.: *Nucleation and growth of bubbles in elastomers*. In: *Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics* 8 (1970), Nr. 6, S. 937–955
- TEUWSEN, Jan: *Analysis of the Process-Induced Microstructure in Injection Molded Glass, Natural and Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics : Analyse der prozessinduzierten Mikrostruktur in spritzgegossenen glas-, natur- und carbonfaserverstärkten Thermoplasten*.

- Duisburg Essen, Universität Duisburg Essen, Institut für Produkt Engineering. Masterarbeit. 15.02.2017
- THEUNISSEN, Matthias: *Stickstoff-Wasser-Nebel als alternatives Prozessfluid für die Fluidinjektionstechnik*. RWTH Aachen. Dissertation. 2016
- THIELTGES, Hans-Peter: *Faserschädigung beim Spritzgießen von Thermoplasten*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Institut für Kunststoffverarbeitung. Dissertation. 1991
- TROSSBACH, Manuel ; BORNGRÄBER, Matthias ; IHLENFELDT, Alexander: *CFK-Felgen zur Verbesserung des Leistungsgewichts*. In: *ATZextra* 19 (2014), Nr. 6, S. 48–53
- TRZESNIOWSKI, Michael: *Rennwagentechnik : Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme*. 4., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- V, A. –. Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.K.: *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites : Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014
- WERNER, Lisa: *Hydrotalcite als neuartige Treibmittel für Polyethylenschäume : Hydrotalcites as novel blowing agents for polyethylene foams*. Darmstadt, Technische Hochschule Darmstadt, Makromolekulare Chemie. Dissertation. 2019
- WIEDEMANN, Johannes: *Leichtbau*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2007
- WILLEMS, Fabian ; BEERLINK, André ; METAYER, Jean-Francois ; KREUTZBRUCK, Marc ; BONTEN, Christian: Bestimmung der Faserorientierung langglasfaserverstärkter Thermoplaste mittels bild - Bestimmung der Faserorientierung langglasfaserverstärkter Thermoplaste mittels bildoptischer Analyse und Computertomografie. In: *DGZfP Jahrestagung 2018*, S. 1–10
- WITTEN, Elmar (Hrsg.); MATHES, Volker (Mitarb.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites : Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014
- WOLF, H. J.: *Screw plasticating of discontinuous fiber filled thermoplastic : Mechanisms and prevention of fiber attrition*. In: *Polymer Composites* 15 (1994), Nr. 5, S. 375–383
- WOLF, Hans Jürgen: *Zum Einfluss der Schneckenplastifizierung auf die Faserstruktur diskontinuierlich langglasfasergefüllter Thermoplaste*. Technische Hochschule Darmstadt. 1996
- WONG, Anson ; HUIMIN, Guo ; KUMAR, Vipin ; PARK, Chul B. ; SUH, Nam P.: *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* : Wiley, 2016
- ZHENG, Guo-Qiang ; YANG, Wei ; HUANG, Li ; YANG, Ming-Bo ; LI, Wei ; LIU, Chun-Tai ; SHEN, Chang-Yu: *Flow-induced fiber orientation in gas-assisted injection molded part*. In: *Materials Letters* 61 (2007), Nr. 16, S. 3436–3439

## 14 Anhang

### Werkzeuge Brzeski

Hier werden die von Brzeski im Rahmen seiner Dissertation verwendeten Werkzeug dargestellt auf die in Abschnitt 3.2.1 hingewiesen wird.

#### Rippenwerkzeug

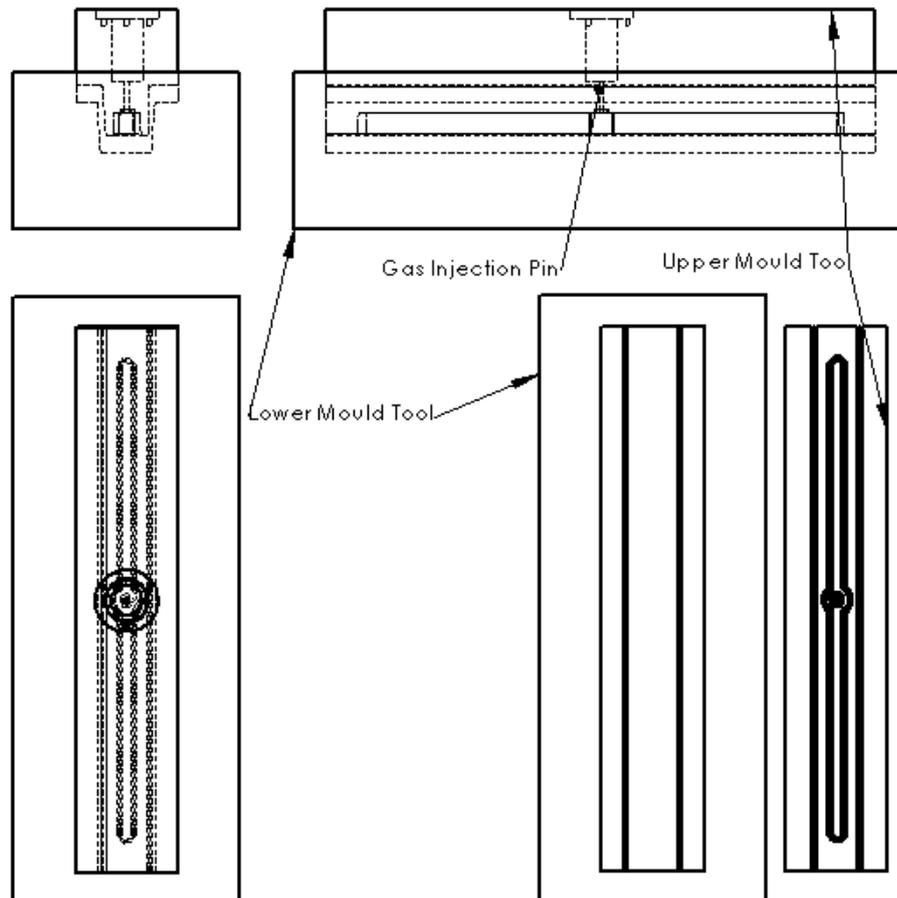


Abbildung 85 Rippenwerkzeug (1/2) mit Beschriftung der einzelnen Bereiche, so wie es Brzeski im Rahmen seiner Versuche eingesetzt hat (Brzeski 2009-07).

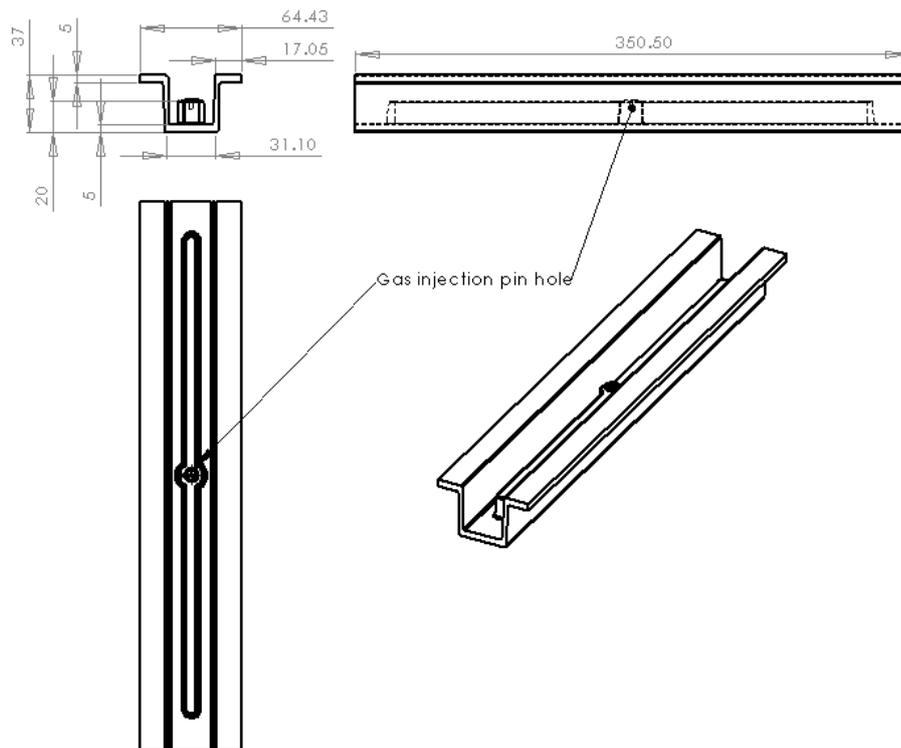


Abbildung 86 Rippenwerkzeug (2/2) mit Beschriftung der einzelnen Bereiche, so wie es Brzeski im Rahmen seiner Versuche eingesetzt hat (Brzeski 2009-07)

Sternwerkzeug

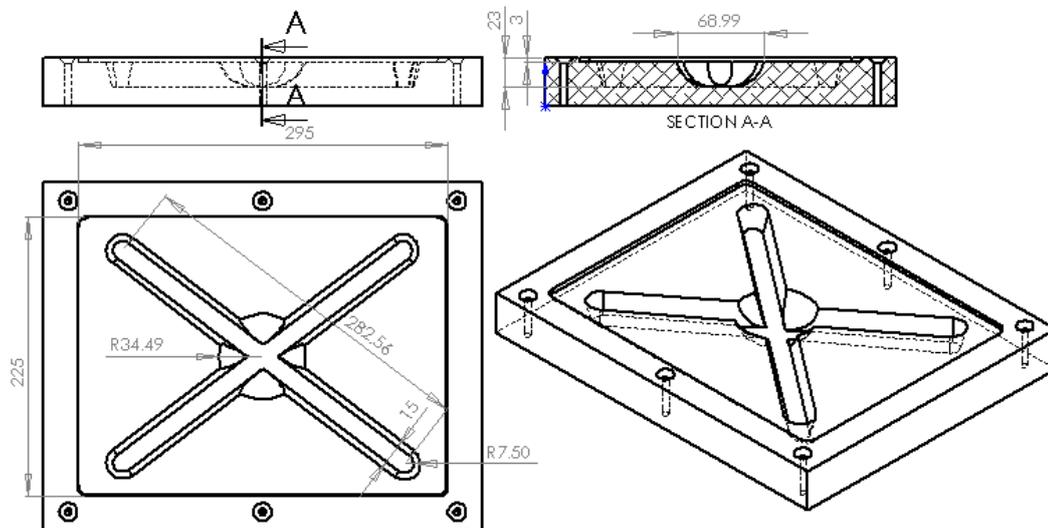


Abbildung 87 Sternwerkzeug mit Bemaßung der einzelnen Bereiche, so wie es Brzeski im Rahmen seiner Versuche eingesetzt hat (Brzeski 2009-07)

### Prozessablauf GAIM-Prozess

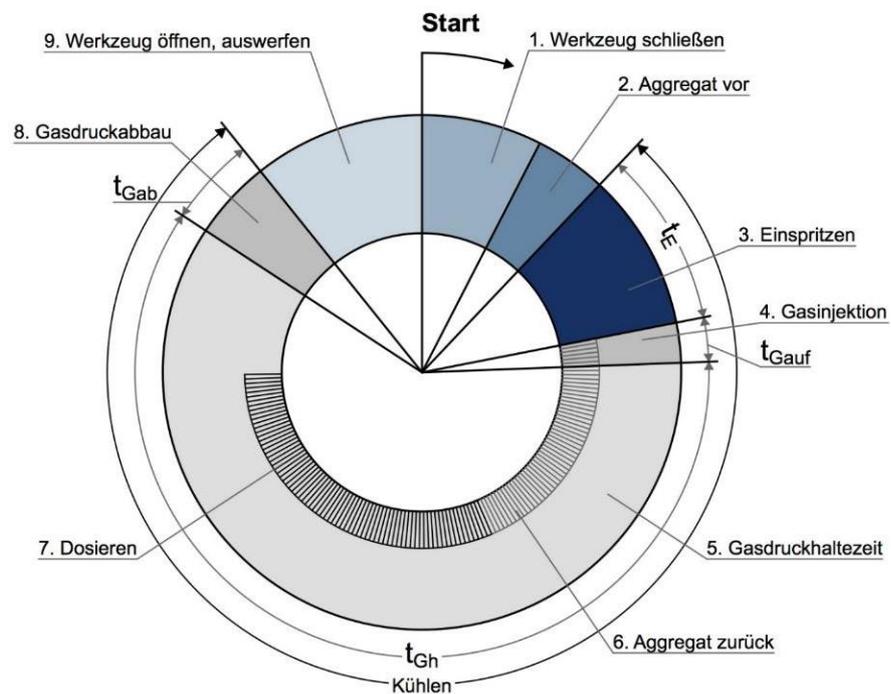


Abbildung 88 Darstellung des Prozessablaufs für den GAIM-Prozess mit den einzelnen Prozessschritten und Prozesszeiten (Johannaber, Michaeli 2004).

### Prozessablauf GasComp-Prozess

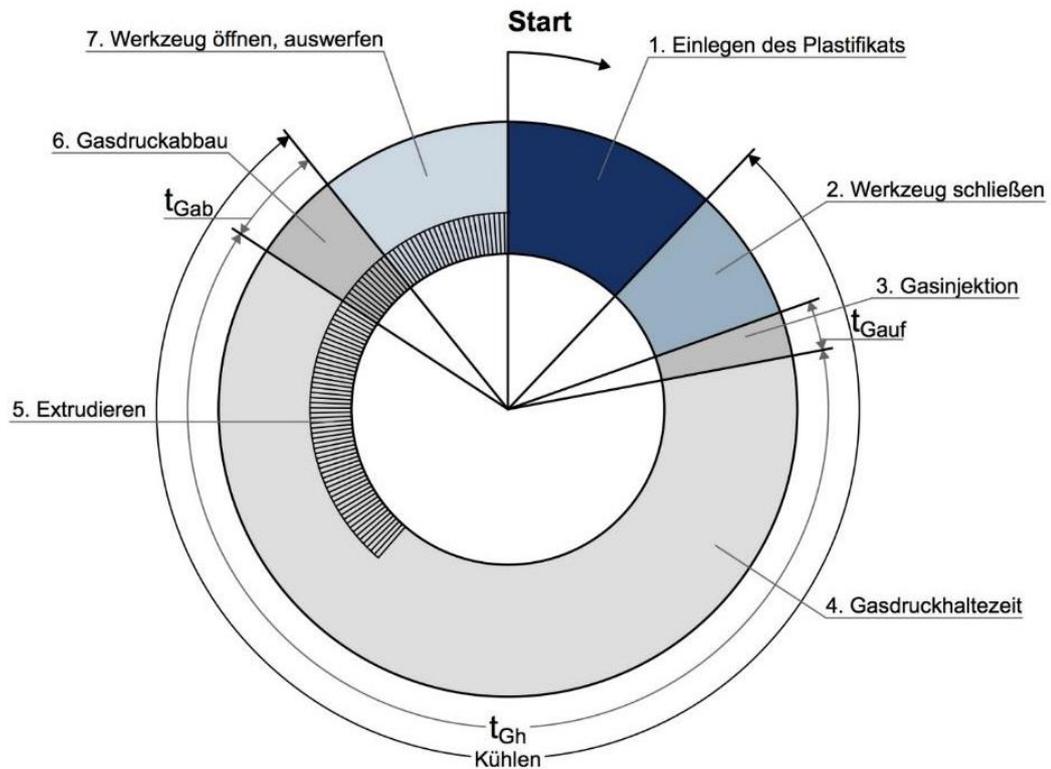


Abbildung 89 Darstellung des Prozessablaufs für den GasComp-Prozess mit den einzelnen Prozessschritten und Prozesszeiten

## Anlagenaufbau Fließpressanlage

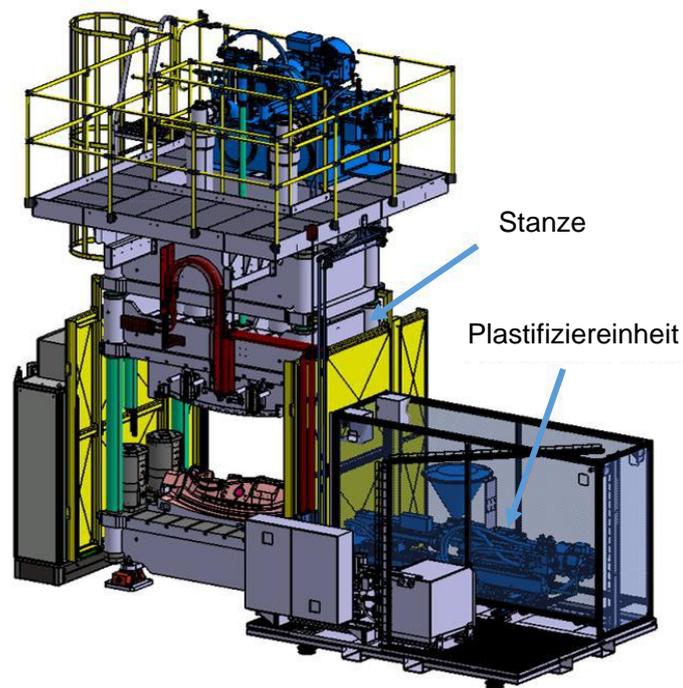


Abbildung 90 CAD-Darstellung des Anlagenaufbaus für den Fließpress- bzw. GasComp-Prozess mit Stanze und Plastifiziereinheit

### Technische Daten der Stanze

|                           |                                       |
|---------------------------|---------------------------------------|
| <b>Hersteller</b>         | R+S GmbH, Bocholt, Deutschland        |
| <b>Steuerung</b>          | Siemens S790                          |
| <b>Schließkraft</b>       | 2000 kN bis 4000 kN (optional)        |
| <b>Werkzeugmaße</b>       | min. 1450x1000 mm / max. 2100x1400 mm |
| <b>Werkzeugeinbauhöhe</b> | 750 bis 1250 mm                       |

### Technische Daten der Plastifiziereinheit

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| <b>Hersteller</b>               | Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery GmbH |
| <b>Schneckendurchmesser</b>     | 60 mm  |
| <b>Kanaldurchmesser</b>         | 6 mm   |
| <b>Schussgewicht, PS</b>        | 570 g  |
| <b>Spezifischer Spritzdruck</b> | 1351 bar                                     |

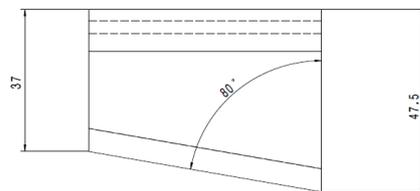
## Verfahrensablauf FASEP®-Faserlängenanalyse



Abbildung 91 Die sechs Schritte der Faserlängenanalyse: 1) Materialproben im Tiegel 2) Pyrolyseofen mit Tiegeln 3) Veraschte Proben mit übrigen Glasfasergerüst 4) Petrischale mit in Lösung gegebenen Glasfasern 5) Scanner mit Petrischale für automatisierte Faserlängenanalyse mittels Graustufenerkennung 6) Histogramme als Ergebnis der Anzahl- und gewichtsgemittelte Faserlängenanalyse

### Technische Zeichnung der Spannbacken für Torsionsprüfung

Da die Versuchsbauteile aufgrund ihrer Außengeometrie nicht mit den Standardspannbacken in die Torsionsprüfmaschine eingespannt werden können, wurde neue Spannbacken konstruiert und gefräst. Im Folgenden sind die technischen Zeichnungen mit Bemaßungen zu sehen, die Darstellungen sind nicht maßstäblich.



Bottom view  
Scale: 2:1

Front view  
Scale: 2:1

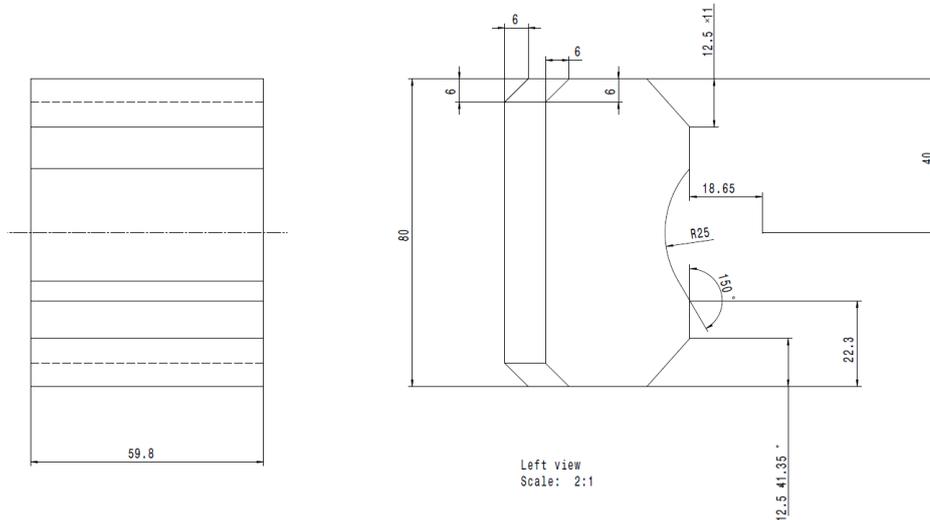


Abbildung 92 Technische Zeichnung der konstruierten Spannbacken für die Torsionsprüfung 1/2

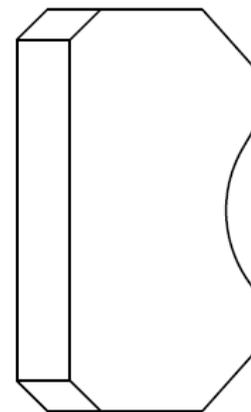
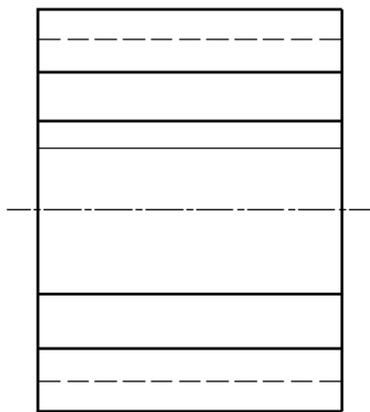
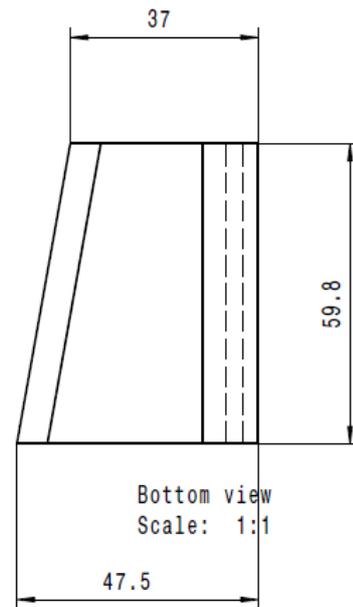


Abbildung 93 Technische Zeichnung der konstruierten Spannbacken für die Torsionsprüfung 2/2

## Erfindungs- und Patentanmeldungen

Patentanmeldung K 28679 DE aus Erfindungsmeldung Nr. 2020/0648-Z "Verfahren zur Herstellung von Kunststoffbauteilen"

Erfindungsmeldung Nr. 2020/1160 "Prozessfolien PU Folierung"

## Publikationen / Konferenzbeiträge

„Researching Towards Tomorrow“

Der Volkswagen Doktorandentag am 12.09.2018 in Wolfsburg

Poster: „*Process Development for the Production of long fiber reinforced hollow structures*“

„Simply clever – The Skoda PhD-Day“

Am 12.10.2018 in Mlada Boleslav, Tschechien

Poster: „*Process Development for the Production of long fiber reinforced hollow structures – potential and application field*“

„Driven by Fascination“

Der Volkswagen Doktorandentag am 20.09.2019 in Wolfsburg

Poster und Vortrag: „*Verfahrensentwicklung zur Fertigung langfaserverstärkter Hohlstrukturen; Struktur Morphologie und Mechanik*“

## Übersicht betreuter Abschlussarbeiten

Evers, Jannik – 02/2018 – Masterarbeit

„*Analyse der Faserverteilung von Glasmatten verstärkten Thermoplasten in Rippenstrukturen beim Fließpressen*“

Universität Bremen – Fachbereich Produktionstechnik

Galler, Hans Burkhard – 07/2018 – Masterarbeit

„*Verfahrensentwicklung mit anschließender Analyse zur Reduzierung der Faserschädigung bei Hohlkörperstrukturen*“

TU Ilmenau – Fachbereich Metallische Werkstoffe und Verbundwerkstoffe

Döppert, Felix – 04/2019 – Masterarbeit

„*Grundlagenuntersuchung zur Herstellung langfaserverstärkter Hohlstrukturen*“

Hochschule Aalen – Fachbereich Maschinenbau und Werkstofftechnik

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Lukas Mathias Klink  
 Geburtsdatum/-ort: 27.12.1988, Weinheim  
 Staatsangehörigkeit: deutsch



## Schulbildung

1995-1999 Grundschule Nieder-Liebersbach, (Birkenau)  
 1999-2008 Albertus-Magnus-Schule, allg. Hochschulreife, (Viernheim)

## Studium

10/2008-03/2009 Wirtschaftsingenieurwesen B.Sc. an der TU Kaiserslautern  
 04/2010-07/2013 Kunststofftechnik B.Eng. an der Hochschule Darmstadt  
 Bachelorarbeit: „Untersuchungen zur Potentialabschätzung einer online Prozessüberwachung beim Spritzgießen“  
 07/2013-09/16 Kunststofftechnik M.Eng. an der Hochschule Darmstadt  
 Masterarbeit: "Entwicklung und Herstellung verschiedener Matrixpolymere zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von NFK Organoblechen"

## Promotionsstudium

Seit 08/2016 Beginn der Dissertation an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
 Naturwissenschaftlichen Fakultät II  
 Unter der Betreuung von:  
 Prof. Dr.-Ing. habil. René Androsch  
 Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Michel

## Berufstätigkeit

09/2012-02/2013 Bachelorand - Bosch Gruppe (Bamberg)  
 Abteilung: Technische Funktionen  
 09/2014-12/2014 Praktikant als Projektingenieur - Vibracousitc AG in (Wuxi, China)  
 Abteilung: Technische Entwicklung  
 04/2015-05/2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter - Fraunhofer LBF (Darmstadt)  
 Abteilung: Betriebsfester und funktionsintegrierter Leichtbau  
 06/2015-02/2016 Masterand - Volkswagen AG (Wolfsburg)  
 Abteilung: Verfahrensentwicklung Kunststoff  
 08/2016-01/2020 Doktorand und Entwicklungsingenieur - Volkswagen AG (Wolfsburg)  
 Abteilung: Technologie Kunststoff  
 Seit 02/2020 Planungsingenieur - Volkswagen AG (Wolfsburg)  
 Abteilung: Fabrik der Zukunft

## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit wurde zuvor weder in dieser Form noch in anderer Fassung im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegt oder veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift