

FORSCHUNGSBERICHT

Entwicklung von Verfahren zur Online-Qualitätssicherung bei geschäumten Spritzgussbauteilen

Inlinequalität TSG "IQFoam"

Anika Fuhrmann, Manfred Popp, Alexander Neupert, Georg Schwalme, Thomas Hochrein, Martin Bastian

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20865 N der Forschungsvereinigung FSKZ e.V. wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Forschungseinrichtung SKZ - KFE gGmbH dankt dem BMWi und der AiF für die Förderung sowie der Forschungsvereinigung und den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsvorhabens.

Kurzfassung

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung und Etablierung verschiedener Inlinequalitätstechniken im Spritzguss für geschäumte, thermoplastische Bauteile. Durch die Validierung der Qualitätssicherungstechniken wie z. B. der Inline-Gewichtsmessung, Werkzeuginnendruck und der Inline-Thermografie hinsichtlich ihrer Tauglichkeit als Qualitätssicherungsverfahren für thermoplastische Schäume entstehen Handlungsempfehlungen über deren Potentiale, Herausforderungen und Chancen im industriellen Einsatz. Die genaue, systematische Begutachtung der Schaumstrukturen sowie auftretender Fehler liefert Daten über Einflussfaktoren im Prozess und den resultierenden mechanischen Eigenschaften und Einsatzgrenzen. Diese Strukturdaten sollen helfen ein Bauteil als gut bzw. schlecht einzustufen. Dies liefert die Grundlage zum Eignungstest der genannten Qualitätssicherungstechniken. Ähnlich den Gefügestrukturbildern bei Metalllegierungen entsteht eine Übersicht über prägnante Schaumstruktureigenschaften und -fehler. Diese sowie geeignete Inlinequalitätstechniken ermöglichen nach Abschluss des Forschungsvorhabens einer Vielzahl an Unternehmen, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen eine wertvolle Unterstützung in der täglichen Arbeit. Das physikalische Schäumen mit seinen vielen Vorzügen bietet eine echte Chance, um Material, Energie, Bauteilgewicht und Kosten zu sparen sowie Einfallstellen zu vermeiden. Eine 100 % Bauteilkontrolle durch eine sekundenschnelle, zerstörungsfreie Prüfung der Bauteile mit bezahlbarem Aufwand stellt einen erheblichen Wettbewerbsvorteil für viele Unternehmen dar.

Abstract

The aim of this research project was to develop and establish various inline quality assurance techniques for microcellular injection molding. The validation of quality assurance techniques such as inline weight measurement, cavity pressure and inline thermography with regard to their suitability as quality assurance methods for thermoplastic foams will result in recommendations for application regarding their potential, challenges and opportunities in industrial use. The precise, systematic examination of the foam structures and any defects that occur provides data on influencing factors in the process and the resulting mechanical properties and limits of use. These structural data should help to classify a component as good or bad. This provides the basis for suitability testing of the quality assurance techniques mentioned. Similar to the microstructure images for metal alloys, an overview of concise foam structure properties and defects is created. After completion of the research project, these and suitable inline quality techniques will provide valuable support in the daily work of a large number of companies, especially small and medium-sized enterprises. Physical foaming with its many advantages offers a real opportunity to save material, energy, component weight and costs and to avoid sink marks. A 100% component inspection by means of a non-destructive testing of the components within seconds with an affordable effort represents a considerable competitive advantage for many companies.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung.....	4
1.1 Anlass für das Forschungsvorhaben	4
1.2 Problemstellung	4
1.2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	4
1.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU	5
1.3 Zielsetzung.....	7
2 Stand der Technik.....	9
2.1 Thermoplast-Schaumspritzgießen	9
2.1.1 Morphologie von Polymerschäumen.....	9
2.1.2 Prozess des Thermoplast-Schaumspritzgießens	10
2.1.3 Physik des Schäumens.....	12
2.2 Aufbau geschäumter Polymerbauteile	18
2.3 Treibmittel	19
2.3.1 Chemische Treibmittel	19
2.3.2 Physikalische Treibmittel	21
2.4 Einfluss von Prozessparametern	22
2.4.1 Staudruck.....	22
2.4.2 Einspritzgeschwindigkeit	23
2.4.3 Schmelzetemperatur	23
2.4.4 Werkzeugtemperatur	24
2.5 Ausgewählte zerstörende und zerstörungsfreie Prüftechniken zur Schaumstrukturanalyse.....	24
2.5.1 Fehlstellen.....	24
2.5.2 Schaumstrukturanalyse:.....	24
2.5.3 Luftultraschallmessung:	25
2.5.4 Terahertz-Spektroskopie:	25
2.5.5 Inline-Thermografie:	25
2.5.6 Inline-Gewichtsmessung:	26
2.5.7 Zusammenfassung zerstörungsfreie Prüfung geschäumter Bauteile ..	26
3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	28
4 Durchgeführte Arbeiten	29
4.1 Material.....	29
4.1.1 Polypropylen (PP) mit 20 Gew.% Talkum.....	29

4.1.2	Polyamid 6 (PA6) mit 30 Gew% Glasfasern	30
4.1.3	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) mit TiO ₂ -Nanopartikeln	30
4.1.4	Wood - Polymer - Composite	30
4.2	Probenherstellung	32
4.2.1	Maschine	32
4.3	Werkzeugauswahl und Probenpräparation	33
4.3.1	Platte	33
4.3.2	Schale	34
4.3.3	Platte mit geometrischen Besonderheiten	36
4.4	Analytische Verfahren	37
4.4.1	Thermografie	37
4.4.2	Werkzeuginnendruckmessung	38
4.4.3	Computertomografie (CT)	38
4.5	Versuchsdurchführung	38
4.5.1	Platte	39
4.5.2	Schale	40
4.5.3	Platte mit geometrischen Besonderheiten	42
5	Diskussion der Ergebnisse	44
5.1	Präparation von Bruchflächen geschäumter Bauteile und deren Bildverarbeitung	44
5.1.1	Präparation	44
5.1.2	Bildverarbeitung	47
5.1.3	Ergebnisse	51
5.1.4	Zusammenfassung	62
5.2	Thermografie	63
5.2.1	Allgemeine Erläuterung der Interpretation der Thermografie	63
5.2.2	Einfluss der Bauteilauslegung	64
5.2.3	Einfluss von Prozessparametern	76
5.2.4	Zusammenfassung	86
5.3	Inline-Gewichtsmessung	86
5.4	Werkzeuginnendruck	95
6	Zusammenfassung	110
7	Literaturverzeichnis	112
8	Abbildungsverzeichnis	115
9	Tabellenverzeichnis	121

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
ADC	Azodicarbonamid
CBA	Chemical Blowing Agent – Chemisches Treibmittel
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CT	Computertomographie
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
FH	Fachhochschule
G	Geschäumt
Gew. %	Gewichtsprozent
GF30	Glasfasergehalt von 30 Gew. %
HMS	High Melt Strength
K	Kompakt
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
MFR	Melt Flow Rate - Schmelzflussindex
N ₂	Stickstoff
PA6	Polyamid 6
PBA	Physical Blowing Agent – Physikalisches Treibmittel
PP	Polypropylen
QS	Qualitätssicherung
SKZ	Süddeutsches Kunststoff-Zentrum
TiO ₂	Titandioxid
TSG	Thermoplast-Schaumspritzgießen
WPC	Wood-Polymer Composite
ZP	Zentralpunkt

1 Einleitung

1.1 Anlass für das Forschungsvorhaben

Durch die hohe Nachfrage nach geschäumten Bauteilen rücken praxisrelevante Fragestellungen in den Vordergrund, die aktuell nicht oder nur unzureichend zu beantworten sind. Hierzu zählen die verfahrensgerechte Konstruktion der Spritzgießbauteile sowie des Werkzeugs, die Simulation geschäumter Bauteile und insbesondere auch verfahrenstechnische Fragestellungen sowie Möglichkeiten zur Prozessüberwachung und Sicherung der Bauteilqualität. Durch die Implementierung verschiedener kostengünstiger Messverfahren zur zerstörungsfreien Qualitätssicherung wie Thermografie, Gewichtsmessung und Werkzeuginnendrucksensorik in den Prozess können Prozessabläufe verbessert, Ressourcen effizienter genutzt und die Bauteilqualität optimiert werden.

Dies soll zukünftig Unternehmen ermöglichen, optimale Prozessfenster beim Thermoplast-Schaumspritzgießen zu finden, ohne auf eine aufwändige nachgelagerte Analytik mit mikroskopischen Verfahren zurückgreifen zu müssen.

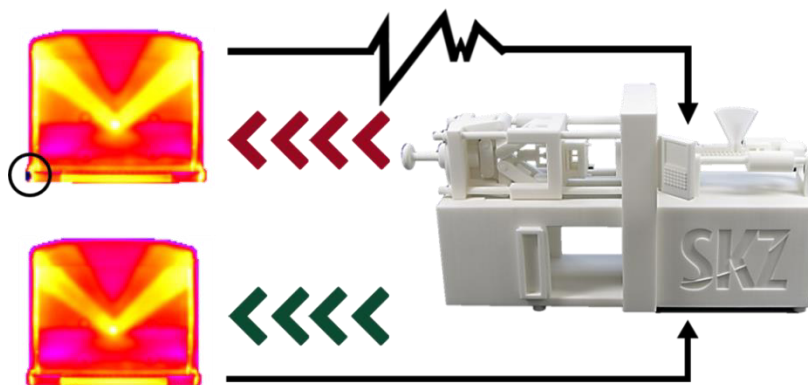


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der Inline-Qualitätssicherung bei der Herstellung geschäumter Spritzgussbauteile im Rahmen des Forschungsprojekts IQFoam.

1.2 Problemstellung

1.2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Das Interesse am Thermoplast-Schaumspritzgießen (TSG) mittels physikalischer Treibmittel steigt seit einigen Jahren signifikant an. Begründet ist diese Tatsache, trotz dessen jahrzehntelanger Verfügbarkeit, im Auslaufen von Patenten der Fa. Trexel (Patentnr. WO1998008667, 1997). Die dadurch entstehende Marktöffnung führte in den letzten Jahren zur Entwicklung neuer TSG-Verfahren, sodass inzwischen dem Spritzgießanwender vier kommerziell erhältliche Systeme zur Verfügung stehen: MuCell (Fa. Trexel), CellMould (Fa. Wittmann-Battenfeld), ProFoam (Fa. Arburg) und Platinum (Fa. Linde).

Das physikalische Schäumen von thermoplastischen Spritzgießbauteilen bietet viele Vorteile gegenüber kompakt hergestellten Spritzgussbauteilen. Durch das Schäumen können je nach Anwendung und Anforderung an die mechanischen Eigenschaften zwischen 5-30 % an Gewicht eingespart werden, bei gleicher Formgeometrie. Somit ergibt sich

eine erhebliche Reduzierung im Materialverbrauch und trägt somit zur Ressourceneffizienz bei. Dies geht einher mit einer Verbesserung der CO₂-Bilanz sowohl bei der Rohstoffherstellung, Verarbeitung, als auch im späteren Einsatz, z. B. im Automobilbereich. Die prozessbedingten Anpassungen ermöglichen ein schnelleres Abkühlen und folglich kürzere Zykluszeiten. Die Formgebung führt durch eine gleichmäßigere Verdichtung zu einer Verminderung von Einfallstellen und Bauteilverzug. Durch eine homogene Porenstruktur hat der Werkstoff eine verbesserte thermische sowie akustische Isolationswirkung [HAC05; MUE11; ALT11; MUE04; OPR15]. Aufgrund dieser vielfältigen Vorteile besteht vor allem in den Bereichen Automotive, Luft- und Raumfahrt, weiße Ware, Elektrogeräte sowie Haushaltsgeräte ein großes Bestreben physikalische Schäumverfahren für die Großserie einzusetzen.

Allerdings findet das physikalische Schäumen in einer Vielzahl von Unternehmen immer noch nicht großflächig Anwendung [BUE14; GRU05]. Ein maßgeblicher Hinderungsgrund ist die weit verbreitete Unkenntnis bezüglich der Prozessführung und der Qualitätssicherung bei physikalisch geschäumten Spritzgussbauteilen [OPR15]. Genau diese Herausforderung wurde in diesem Forschungsvorhaben adressiert.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens haben nicht nur große Bedeutung für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) der Spritzgussbranche sowie deren Lieferanten und Kunden, sondern können einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen, energieeffizienten Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Gesamtwirtschaft durch Qualität und Leichtbau schaffen. Weiterhin ergibt sich auch für die Prüfgerätehersteller die Möglichkeit bestehende Produkte auf das Anwendungsgebiet geschäumter Spritzgussbauteile weiterzuentwickeln und deren Potentiale gezielt zu nutzen.

1.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Eine Marktstudie von Smithers Rapra von 2016 zugrunde legend, wächst der Bedarf für Polymerschäume zwischen 2016 – 2021 weltweit jährlich um 3,3 % auf 122.41 Milliarden Dollar [ALL16]. Markttreiber sind hierbei die sich verschärfenden Umweltauflagen (z. B. Brennstoffverbrauch im Automobilbereich) und steigende Anforderungen im Baubereich (z. B. klimaneutrales Bauen). Dabei steigt insbesondere der Bedarf für das Schäumen von technisch relevanten Polymeren.

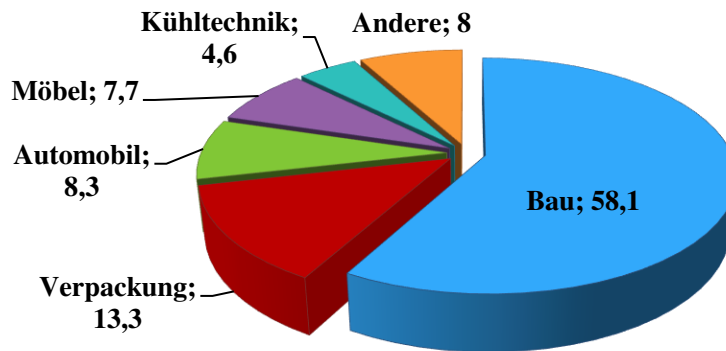


Abbildung 2: Globaler prozentualer Umsatz für polymere Schäume, branchenspezifisch; 2015 [ALL16]

Die Betrachtung der einzelnen Märkte zeigt (vgl. Abbildung 2), dass der größte Bedarf auf die Baubranche mit rund 58 % entfällt. Anwendungen sind hierbei hauptsächlich die thermische und akustische Isolation. Mit geringeren Anteilen vertreten sind die Verpackungs-, Automobil- und Möbelindustrie sowie der Einsatz von polymeren Schäumen in der Kühltechnik. Weitere Branchen sind die Schuhindustrie, Sport- und Freizeitbedarf, medizinische Anwendungen, andere Transportmöglichkeiten und der Haushaltsbedarf mit in Summe 8 % [ALL16].

Eine Reduzierung des Materialbedarfs und verkürzte Zykluszeiten senken mittelfristig die Produktionskosten. Im Vergleich zu konventionellen Spritzgussbauteilen reduzieren sich für geschäumte Bauteile die Teilekosten um 15-20 % [HEC18]. Eine Amortisierung des benötigten Invests kann zeitnah erfolgen. Somit ergibt sich ein hohes wirtschaftliches Potential für KMU zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. Durch die Implementierung einer zusätzlichen Inline-Qualitätssicherung können der Produktions-Ausschuss und damit verbundene mögliche Prozessausfallzeiten erheblich verringert werden, wodurch sich die Bauteilkosten weiter reduzieren.

Der intelligente Einsatz geeigneter Prozesskontroll-Technologien innerhalb des Herstellungsprozesses bietet neben der Qualitätssicherung noch viele weitere Vorteile. Auf wirtschaftlicher Seite können durch eine Inline-Prozessüberwachung die Fertigungsabläufe optimiert werden. Nachbearbeitungen oder Produktionsausfälle werden minimiert und folglich kann der Durchsatz erhöht werden [CHA00; SPE97].

In der Schaffung von Basiswissen hinsichtlich Prozessbedingungen, Schaumstruktur und Bauteiloptimierung liegt ebenso wie in der Entwicklung und Anwendung von Qualitätssicherungstechniken (QS-) Techniken für physikalisch geschäumte Bauteilstrukturen enormes Innovationspotential für die Vielzahl der Spritzgussverarbeiter in Deutschland, was sich durch verbesserte Bauteileigenschaften sowie geringes Gewicht positiv auf die unterschiedlichen Wirtschaftszweige auswirkt. Die hierbei entwickelte Inline-Prozesskontrolle ist in ihrer Systematik auf andere Technologien der Kunststoffverarbeitung übertragbar.

Das Verfahren des physikalischen Schäumens in Kombination mit einer geeigneten Qualitätssicherung der dabei erzeugten Schaumstruktur trägt in Summe wesentlich zur

Erreichung volkswirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ziele bei. So verringert sich durch den Einsatz eines geeigneten Treibmittels die Masse der Bauteile, was einen effizienteren Einsatz der Ressourcen durch Einsparung von Granulat mit sich bringt. Des Weiteren bieten die Einsparung von Material und Bauteilmasse sowie geringere Verarbeitungstemperaturen durch die Viskositätsreduzierung infolge des Einsatzes des Treibmittels viele Vorteile im Anwendungsbereich der entsprechenden Produkte (z. B. Leichtbau). Zudem wirken sich gerade im Automotive- sowie Mobilitätssektor geringere Massen positiv hinsichtlich des Kraftstoff-Verbrauchs aus und tragen somit zum Erreichen der gesetzten notwendigen Klimaziele bei. Auch Produkte aus anderen Bereichen, wie beispielsweise der Kommunikations- und Unterhaltungsindustrie, profitieren durch geringeres Gewicht, reduzierten Verzug und eliminierte Einfallstellen von den Vorteilen des Verfahrens des physikalischen Schaumspritzgusses [HEI01]. Leichtere Fernseherblenden oder Gehäuseteile sparen beispielsweise bei deren Transport zum Verbraucher so Treibhausgasemissionen ein [HAN12].

Für den massenhaften Einsatz ist eine umfassende QS unabdingbar, um hohe Kosten aus Regressionsansprüchen zu vermeiden. Die Entwicklung und das Testen von QS-Techniken für thermoplastische Schaumstrukturen bedingt eine gezielte Auseinandersetzung mit Einflussparametern auf die Schaumstruktur, welche bei der vorliegenden Forschungsstelle entwickelt werden sollen, sodass Normen, Standards und Richtlinien auf dem Gebiet der QS von thermoplastischen Schaumstrukturen entstehen können. Das Forschungsvorhaben soll weiterhin Richtlinien und Kriterien zur Gut- bzw. Schlechtsortierung von Schaumstrukturbauteilen inklusive geeigneter Qualitätssicherungstechniken liefern.

1.3 Zielsetzung

Gute Inline-Qualitätstechniken sollen Unternehmen in die Lage versetzen innerhalb von wenigen Sekunden Defekte und Abweichungen von definierten Gutteilen, Toleranzen bzw. Referenzen beim physikalischen Schäumen (wie in Abbildung 1 grafisch dargestellt) zu unterscheiden. Im Idealfall ist dazu die prozessbegleitende Visualisierung so programmiert und grafisch ausgestaltet, dass selbst für ungeschultes Personal an der Maschine auf den ersten Blick erkennbar wird, dass es sich um eine Abweichung von dem vorab definierten Soll- bzw. Gutteil handelt.

Dazu sind sowohl genaue Kenntnis des Spritzgießprozesses und dessen Einfluss auf die Schaumqualität als auch eine klare Definition dessen was gut und was schlecht an einem geschäumten Spritzgießbauteil ist, notwendig.

Um diese Grundlage zu schaffen sind erheblicher experimenteller Aufwand notwendig, da bislang nur sehr wenig dokumentiertes und öffentlich zugängliches Wissen für den Bereich geschäumter Spritzgießbauteile gibt, welches die Zusammenhänge zwischen Prozesseinstellungen, Material, Schaumstruktur und mechanischen Eigenschaften klar beschreibt.

Die Porengröße, deren Verteilung, die Zellwanddicke, die Richtung der Schaumexpansion sowie die Dicke der kompakten Randschichten im Verhältnis zum geschäumten Kern können wesentliche Einflussfaktoren bzgl. der Qualität von geschäumten Bauteilen

hinsichtlich ihrer mechanischen, akustischen, thermischen sowie optischen Eigenschaften sein.

Die Thermografie und Gewichtsmessung erlauben es die genannten Parameter geschäumter Bauteile zu charakterisieren, um so Aussagen zur Qualität, abhängig von den Prozessparametern treffen zu können.

2 Stand der Technik

2.1 Thermoplast-Schaumspritzgießen

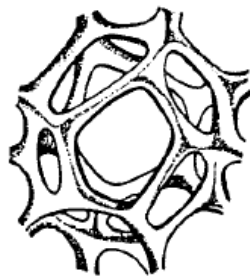
Das Thermoplast-Schaumspritzgießen, kurz TSG, ist eines der bedeutendsten Sonderverfahren der Spritzgießtechnologie und hatte seine ersten Anfänge in den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts [ALT11]. Grundlegende Idee des Verfahrens ist es, durch Zugabe und Verteilung eines Treibgases in der Polymerschmelze während des Spritzgießprozesses eine integrale Schaumstruktur mit kompakter Randschicht und einem feinporigen, geschäumten Kern im fertigen Bauteil herzustellen [ALT11; COU12].

Wie jedes Sonderverfahren besitzt auch das TSG-Verfahren Vor- und Nachteile gegenüber dem traditionellen, kompakten Spritzgießen. Aus ökonomischer Sicht sind für die Industrie dabei besonders die Materialeinsparung sowie die Reduzierung der Zykluszeiten und der Werkzeugdrücke von Bedeutung. Nicht zu vernachlässigende Vorteile sind aber auch isolierende Eigenschaften der Schäume sowie eine hohe Designfreiheit durch die verringerte Viskosität der Polymerschmelze aufgrund des verwendeten Gases [ALT11; COU12; WAN15]. Nachteilig am Prozess ist die Komplexität der Prozessführung sowie die durch das Schäumen resultierende Oberfläche, welche durch die charakteristischen Silberstreifen eine Sichtanwendung der Produkte erschwert [ALT11; VOL15; CRA08].

2.1.1 Morphologie von Polymerschäumen

Die mittels TSG-Verfahren hergestellten Schaumstoffe werden definiert als Zweiphasensysteme, bestehend aus einer soliden Matrix aus thermoplastischem Polymer und der darin enthaltenen, zellenförmig verteilten, fluiden Phase, dem Gas [VOL35; SAS11]. Eingeteilt werden können diese biphasigen Systeme unter anderem hinsichtlich ihrer Zellstruktur, Dichte sowie Zellgröße [HUA00; STA06].

Eine Unterteilung hinsichtlich der Zellstruktur im geschäumten Bauteil kann sowohl in offenporige als auch geschlossenporige Zellen, dargestellt in Abbildung 3, geschehen [HUA00; STA06; SHU91].



offenporig



geschlossenporig

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Porenstrukturen in geschäumten Bauteilen [HUA00; SHU91]

Wie in der Abbildung dargestellt sind die Zellwände bei der offenporigen Variante kaum vorhanden beziehungsweise nicht vollständig geschlossen, wodurch die Zellen miteinander verbunden sind. Offenporige Schäume besitzen hohe Absorptionsfähigkeiten hinsichtlich Wasser und Feuchtigkeit sowie eine hohe Permeabilität von Gasen und Dämpfen. Bauteile mit einer offenporigen Schaumstruktur können als Schalldämpfer genutzt werden und sind durch die verbundenen Kanäle weich und flexibel. Geschlossenporige Zellen sind hingegen von einer Polymermatrix umgeben und folglich voneinander abgekapselt. Durch die geschlossene Struktur besitzen die Schäume eine gute Isolationswirkung gegenüber Wärme und elektrischem Strom. Die geschlossenen Polymerwände sorgen dafür, dass das geschäumte Bauteil hart und steif ist und eine hohe mechanische Dämpfung sowie Druckfestigkeit aufweist. Der Übergang zwischen den beiden Zelltypen ist in der Produktion fließend und kann in gewissen Graden durch die Wahl der Prozessparameter beeinflusst werden [HUA00; STA06; SHU91].

Werden Schäume hinsichtlich ihrer Dichte eingeteilt, so geschieht dies in Schäumen mit hoher und niedriger Dichte. Ist die Gewichtseinsparung ohne Verlust von mechanischen Eigenschaften erwünscht, so kommen Schäume mit hoher Dichte von $\geq 0,4 - 0,6 \text{ g/cm}^3$ zum Einsatz. Ist hingegen die Gewichtseinsparung oder der Einfluss des Gases, beispielsweise in der Isolationstechnik, von Bedeutung, so werden Schäume mit einer niedrigen Dichte von $< 0,1 \text{ g/cm}^3$ verwendet [HUA00; STA06]. Beim konventionellen TSG-Verfahren werden üblicherweise Schaumstrukturen mit einer hohen Enddichte hergestellt [CRA08].

Abschließend können Schäume noch nach ihrer Zellgröße in grobzellig, $>100 \mu\text{m}$ und feinzellig, $100 \text{ bis } 10 \mu\text{m}$ sowie mikrozellulär, $<10 \mu\text{m}$, unterteilt werden. Die Zellgröße ist ein großer Einflussfaktor auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils, da mit abnehmendem Zelldurchmesser die Bruchdehnung, die mechanische Dämpfung sowie die Zugfestigkeit ansteigen [STA06].

2.1.2 Prozess des Thermoplast-Schaumspritzgießens

Die Herstellung von geschäumten Bauteilen mittels TSG-Verfahren läuft, genau wie das klassische Spritzgießen, nach den in der Literatur [JOH14] zu findenden Prozessschritten Einspritzen, Plastifizieren und Auswerfen ab. Parallel zu diesen finden die 4 Schritte des Schäumprozesses statt. Bildung einer einphasigen Lösung, Nukleierung, Zellwachstum und Stabilisierung. Auf diese wird in Kapitel 2.1.3 näher eingegangen. Ziel der Prozessoptimierung ist es, eine möglichst homogene und feinzellige Schaumstruktur im finalen Bauteil zu generieren [ALT11; COU12; WAN15].

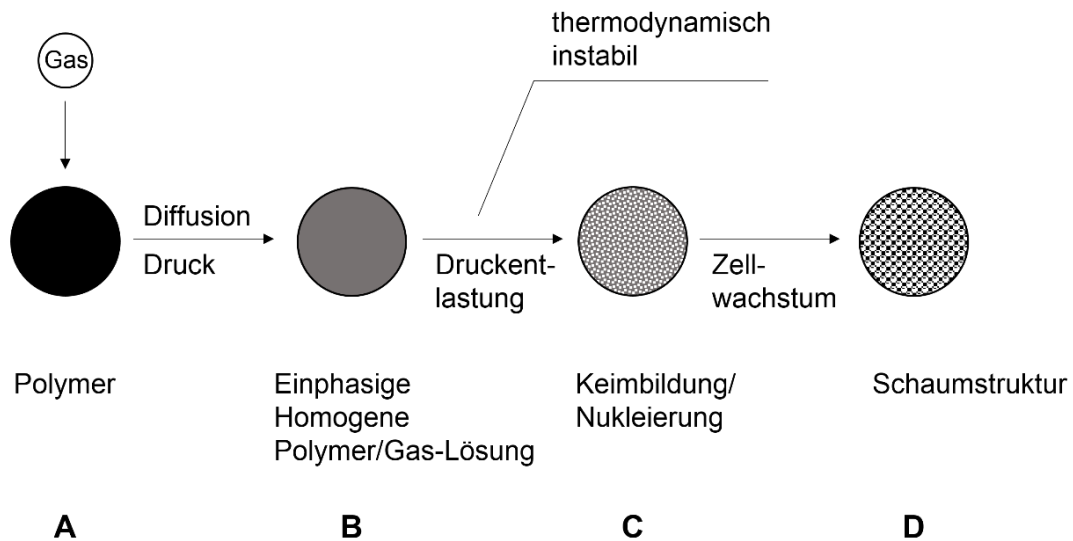


Abbildung 4: Schematischer Ablauf des TSG-Verfahrens, nach [HUA00]

Abbildung 4 zeigt schematisch den Ablauf des TSG-Verfahrens. Während des Aufdosierens und Plastifizierens des Polymers wird diesem ein Treibmittel, in Form eines superkritischen Fluids beim physikalischen Schäumen oder als Masterbatch beim chemischen Schäumen, zugeführt (A). Durch den im Zylinder anliegenden Staudruck werden die beiden Komponenten zu einer einphasigen, homogenen Polymer-Gas-Lösung vermischt (B). Ist der Schritt der Plastifizierung abgeschlossen, so wird das Polymer-Gas-Gemisch in die Kavität gespritzt. Durch den beim Einspritzen wirkenden Druckverlust der Schmelze liegt diese in einer thermodynamischen Instabilität vor, wodurch die Lösung an Gas übersättigt und sich ein Teil des Gases von der Lösung trennt und die Nukleierung (C) beginnt. Die gebildeten Zellen wachsen während des Einspritzens und Auskühlens der Lösung an und bilden die Schaumstruktur des fertigen Bauteils (D). Mit zunehmender Auskühlung des Polymers stabilisiert sich die Schaumstruktur und die Zellen können nicht weiterwachsen, das Bauteil kann ausgeworfen werden und der Zyklus beginnt von vorne. [ALT11; COU12; JOH14]

Obwohl das TSG-Verfahren demselben Zyklus wie das konventionelle Spritzgießen folgt, lassen sich, wie bereits erwähnt, die Zykluszeiten durch die Verwendung von Treibmitteln deutlich verkürzen [ALT11; COU12].

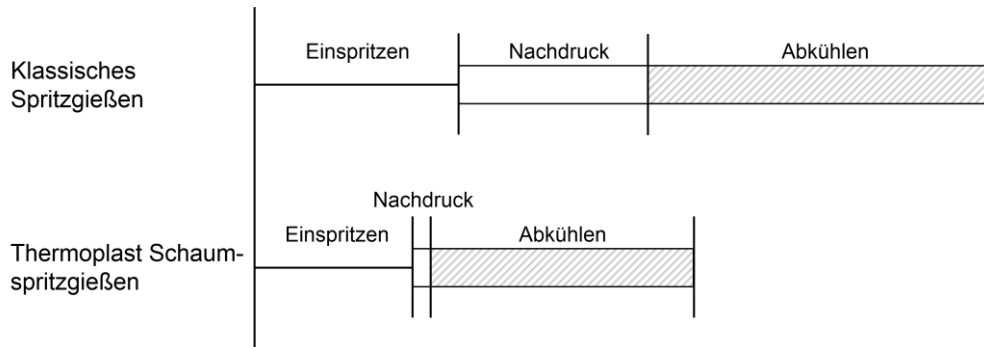


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Zykluszeiten von kompaktem und geschäumtem Spritzgießen, nach [GUA12]

Diese Zykluszeitenreduzierung, dargestellt in Abbildung 5, resultiert aus Zeiteinsparungen an mehreren Schritten im Spritzgießzyklus. Durch die Zugabe von Gas in die Schmelze wird deren Viskosität verringert. Dies ermöglicht eine Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit der Polymer-Gas-Lösung in die Kavität, wodurch sich die Zeit zum Einspritzen verringert. Die größte Zeiteinsparung des Prozesses findet, wie in der Abbildung dargestellt, durch die erhebliche Reduzierung der Nachdruck- und Abkühlzeit statt. Die entstandenen Zellen drücken während ihres Wachstums auf das sie umgebende Polymer, wodurch sie als innerer Nachdruck fungieren und hierdurch Schwindung und Verzug des Bauteils während des Abkühlens teilweise ausgleichen können. Ein zusätzliches Anlegen des Nachdrucks entfällt. Durch eine mögliche Reduzierung des Dosiervolumens im Vergleich zum Kompaktspritzgießen verringert sich zudem auch die Kühlzeit. [ALT11; GUA12]

2.1.3 Physik des Schäumens

Das Schäumen von Kunststoffen basiert auf den Stofftransportvorgängen im Polymer während und nach dem Zuführen des Treibmittels zum Polymer. Unterteilt wird diese Physik des Schäumens in die Unterpunkte Bildung einer einphasigen Polymer-Gas-Lösung aus dem superkritischen Treibmittel und der Polymerschmelze, der Nukleierung, dem Zellwachstum und der Stabilisierung [ALT11; VOL15; WAN15].

2.1.3.1 Superkritisches Treibmittel

Der Begriff superkritisch beschreibt den Zustand einer Substanz, welche sich oberhalb ihres kritischen Punktes, also dem kritischen Druck oder der kritischen Temperatur, befindet. In diesem Zustand kann kein Unterschied mehr zwischen dem flüssigen und gasförmigen Aggregatzustand gemacht werden, folglich besitzen superkritische Substanzen die Eigenschaften beider Zustände. Diese sind unter anderem die Viskosität und Diffusivität von Gasen, aber auch die Dichte, Kompressibilität und Löslichkeit von Flüssigkeiten. Besonders für die Lagerung ist dies aufgrund der hohen Dichte vorteilhaft [ALT11; COU12].

Wie aus Abbildung 6 am Beispiel von N_2 hervorgeht, sind bereits kleine Änderungen des Drucks oder der Temperatur ausschlaggebend auf das Verhalten und die Eigenschaften

der Substanz. Dies wird sich beim TSG-Verfahren im Zuge eines Druckverlustes zunutze gemacht, wobei die superkritische Substanz in einen gasförmigen Zustand überführt wird [STA06; GUA12].

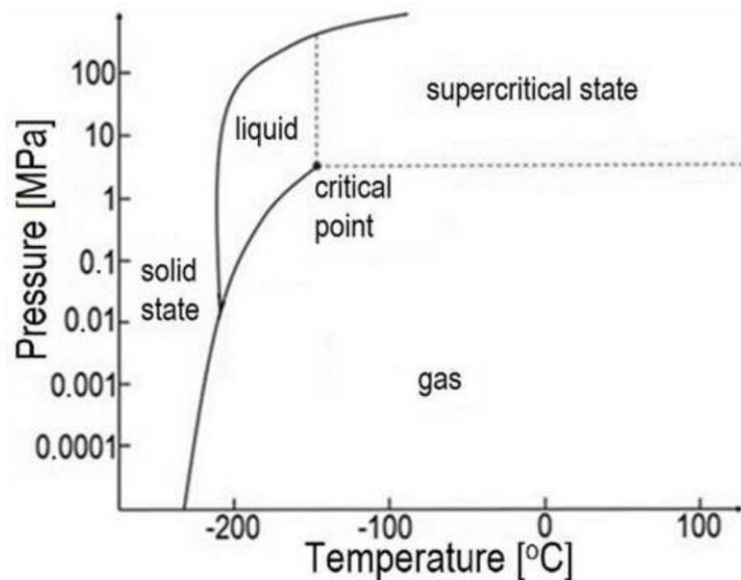


Abbildung 6: Phasendiagramm von Stickstoff [FRA17]

Als superkritisches Treibfluid werden für das TSG-Verfahren hauptsächlich die Gase CO_2 und N_2 verwendet [GUA12]. Die kritischen Werte von CO_2 betragen 73,8 bar und 31°C , die von Stickstoff 34 bar und -147°C , was neben den umweltfreundlichen Eigenschaften der beiden inerten Gase für die Produktion von Vorteil ist, da Stickstoff während den typischen Bedingungen des TSG-Verfahrens im überkritischen Zustand vorliegt und infolgedessen ein gutes Lösungsverhalten aufweist [5].

2.1.3.2 Einphasige Polymer-Gas-Lösung

Ziel des TSG-Verfahrens ist die Herstellung einer feinzelligen, homogenen Schaumstruktur im finalen Bauteil. Voraussetzung dafür ist die Herstellung einer einphasigen, homogenen Polymer-Gas-Lösung, die durch das Lösen und homogene Verteilen des Treibgases in der Schmelze während des Plastifizierens erreicht wird [ALT11; HUA00; CRA08; SAS11]. Die Bildung der Lösung unterliegt den Stofftransportvorgängen im Material und ist damit durch die Mechanismen der Sorption und Diffusion gekennzeichnet [ALT11; HUA00; CRA08; STA06]. Die Sorptionsfähigkeit des Polymers, oder auch Löslichkeit des Fluids im Polymer, beschreibt die maximal mögliche Menge an Treibmittel, welches sich in der Polymermatrix lösen lässt und ist, wie in Abbildung 7 dargestellt, abhängig von der Temperatur und dem Druck [ALT11; HUA00; CRA08; SAS11].

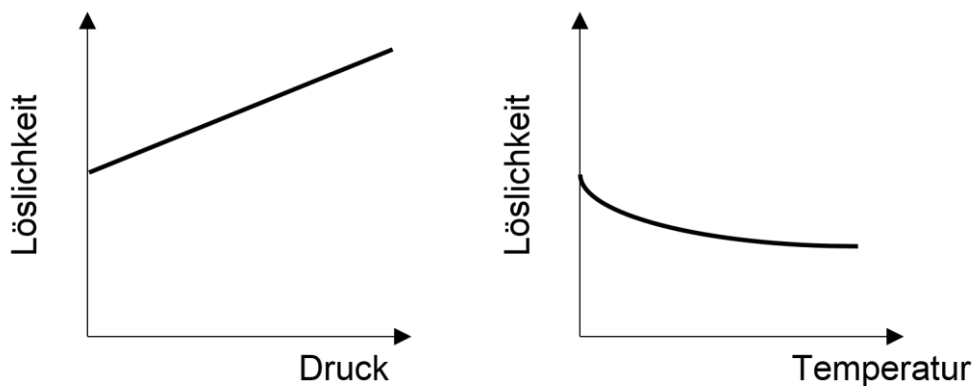


Abbildung 7: Löslichkeit von Gas in der Polymerschmelze in Abhängigkeit vom Druck und der Temperatur, nach [XUJ11]

Anhand der Abbildung zeigt sich, dass die Löslichkeit mit steigendem Druck zu- und mit steigender Temperatur abnimmt [XUJ11]. Die Diffusionsgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit des Fluidtransportes in der Polymerschmelze und ist abhängig vom Treibmittel, den Eigenschaften des Polymers sowie der Temperatur des Systems. Wichtig ist dies zum Ausgleichen von Konzentrationsunterschieden an Gas in der Schmelze [ALT11; CRA08; SAS11]. Hat das Polymer seine Sättigungsgrenze erreicht, so sinkt die Diffusionsgeschwindigkeit aufgrund der sinkenden örtlichen Konzentrationsunterschiede wieder und das Polymer kann nicht weiter mit Treibmittel beladen werden [ALT11]. Um die Durchmischung und die Herstellung einer homogenen einphasigen Polymer-Gas-Lösung zu gewährleisten, werden maschinentechnische Mischvorrichtungen, häufig für das Schäumen ausgelegte Schnecken, verwendet [WAN15; CRA08]. Dies ist von elementarer Wichtigkeit, eine nicht ausreichende Vermischung von Polymer und Treibmittel kann zu großen, lokalen Gashohlräumen führen [HUA00].

2.1.3.3 Nukleierung

Der Schritt der Nukleierung beschreibt das Erzeugen von Keimen in der Polymer-Gas-Lösung, welche anschließend zu Schaumzellen heranwachsen [ALT11]. In Zuge des TSG-Verfahrens findet die Nukleierung üblicherweise in der Kavität, nach einem schnellen Druckabfall oder einer Temperaturveränderung aus der daraus resultierenden thermodynamischen Instabilität, statt. Wie in Abbildung 7 bereits dargestellt, ist die Löslichkeit des Gases in der Schmelze stark von dem Druck auf diese abhängig. Durch einen Druckabfall kommt es zu einer Übersättigung des in der Schmelze gelösten Treibmittels, die vollständige Löslichkeit ist nicht mehr gegeben und ein Teil des Gases desorbiert aus dieser. Das desorbierte Gas bildet Zellen, nukleiert also, wodurch sich eine neue Phase in Form von metastabilen Keimen bildet. Die Bildung dieser Keime ist abhängig von dem Partialdruck des Treibfluids, dem Druck in der Polymerschmelze sowie der Oberflächenspannung [COU12; HUA00; CRA08].

Unterteilt werden kann die Nukleierung in die homogene und heterogene Keimbildung [ALT11; CRA08; SAS11]. Die homogene Nukleierung findet, wie oben beschrieben, durch eine thermodynamische Destabilisierung und der daraus resultierenden

Übersättigung des Polymer-Gas-Gemisches statt. Voraussetzung für die homogene Nukleierung ist die komplette Abwesenheit von Verunreinigungen im homogenen System, weshalb im Zuge einer industriellen Verarbeitung davon ausgegangen werden kann, dass eine Überlagerung von homogener und heterogener Nukleierung stattfindet [ALT11]. Bei der heterogenen Nukleierung liegen Grenzflächen zu einer festen Phase, beispielsweise Verunreinigungen, Füllstoffe wie Glasfasern oder der Werkzeugwand vor, an deren Oberfläche spannungsinduziert neue Keime entstehen. Diese zusätzlichen Phasen dienen somit als Keimbildungs- oder Nukleierungsmittel. Durch das Einbringen einer zusätzlichen Phase bilden sich die Blasen nicht in der einphasigen Lösung sondern bevorzugt an den Oberflächen der Nukleierungsmittel [HUA00]. Die Effizienz der Nukleierung ist dabei abhängig von der Anzahl, Form und dem Typus des Nukleierungsmittels sowie der Spannung der Oberflächen zwischen dem Gas und der Gas-Polymer-Lösung. Bereits geringe Mengen an Nukleierungsmitteln können die Ausbildung einer homogenen Schaumstruktur fördern. Ein zu hoher Gehalt an Füllstoffen reduziert jedoch das Volumen, in dem eine Schaumstruktur ausgebildet werden kann, sodass Poren vermehrt agglomerieren [ALT11; VOL15; HUA00].

Im Zuge der Nukleierungsphase spielen grundsätzlich zwei konkurrierende Mechanismen eine Rolle, einerseits die Diffusion des Treibmittels in bereits existierende Zellen und andererseits die Bildung von neuen Keimen. Energetisch gesehen ist die Diffusion von Gas in bereits bestehende Zellen der günstigere Mechanismus, da dieser zu einem geringeren Oberflächen- zu Volumenverhältnis im Vergleich zur Bildung vieler kleiner Zellen führt. Da im finalen Bauteil jedoch eine homogene, feinzellige Schaumstruktur angestrebt wird, wird durch eine schnelle Übersättigung der Schmelze sowie einer kurzen Diffusionszeit der Diffusionsprozess behindert und der Keimbildungsprozess bevorzugt. Dies geschieht dadurch, dass dem Treibfluid nicht die Zeit gegeben wird, in bereits bestehende Zellen zu diffundieren, sondern diese gezwungen werden selbst Zellen zu bilden. Es kommt im finalen Bauteil dann zu einer Vielzahl von homogen verteilten, feinporigen Zellen. [ALT11; CRA08]

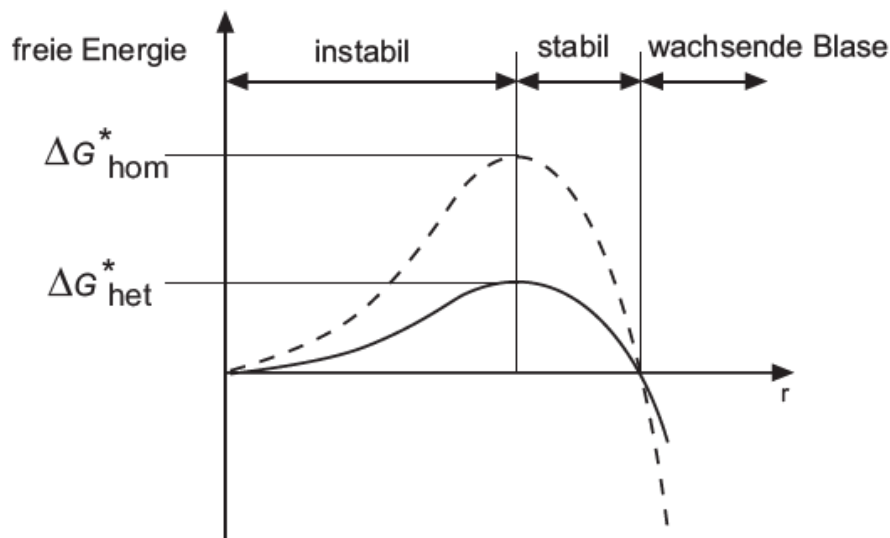


Abbildung 8: Darstellung der freien Energie bei der homogenen bzw. heterogenen Keimbildung [ALT11]

Für das TSG-Verfahren kann zur Beschreibung der Zellbildung und deren Stabilisierung die klassische Nukleierungstheorie zurate gezogen werden. Diese beschreibt die im Prozess nötige Zunahme der freien Energie zur Bildung von stabilen und wachstumsfähigen Zellen [ALT11; Wan15]. Wie aus Abbildung 8 hervorgeht, besitzen die heterogene und homogene Nukleierung unterschiedliche Barriereniveaus an freier Energie, die benötigt wird, bis die Zelle stabil ist und anfangen kann zu wachsen. Die Absenkung der Aktivierungsenergie bei der heterogenen Keimbildung lässt sich auf das Vorhandensein von Keimbildnern zurückführen, welche als Katalysatoren wirken. Aus energetischer Sicht ist damit die heterogene Nukleierung günstiger als die homogene und findet im Prozess bereits bei einer geringen Gaskonzentration statt [VOL15; HUA00; CRA08]. Die im Prozess stattfindende Überlagerung der beiden Nukleierungsarten führt durch den zeitlich verschoben Start der Nukleierung und dem daraus resultierenden Wachstum der Zellen zu inhomogenen Porengrößen im Bauteil. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, muss ein schneller Übergang der Lösung in die thermodynamische Instabilität vollzogen werden, da so heterogen und homogen gebildete Keime gleichzeitig entstehen. Zusätzlich kann eine hohe Schmelztemperatur verwendet werden, da diese die Gasdiffusion in der Schmelze verbessert [HUA00].

2.1.3.4 Zellwachstum

Sobald die Zellen gebildet wurden und den kritischen Radius überwunden haben, werden diese durch Diffusionsvorgänge wachsen [WAN15; GUA12]. Das Zellwachstum beeinflusst durch Größe und Verteilung der Zellen nachhaltig die mechanischen Eigenschaften des fertigen Bauteils [VOL15; WAN15] und ist ein zur Nukleierung konkurrierender Prozess. Das Zellwachstum basiert auf der Diffusion des in der Kunststoffschmelze gelösten Gases in die bereits gebildeten Zellen und resultiert aus dem Gaskonzentrationsunterschied zwischen den zwei Phasen. Ziel ist es, einen Zustand der minimalen freien Energie anzustreben, was durch die Ausbildung eines minimalen Oberflächen- zu

Volumenverhältnisses in Form von sphärischen Schaumzellen stattfindet [ALT11; CRA08; GUA12]. Beeinflusst wird das Wachstum durch den Druck des in der Schaumzelle eingeschlossenen Treibfluids, der Permeabilität der Kunststoffschmelze, der Dehnviskosität des Polymers und der Temperatur des Systems [VOL15; WAN15; CRA08].

Problematisch am Schritt des Zellwachstums ist, dass während des Prozesses davon ausgegangen werden kann, dass Zellen unterschiedlicher Größe miteinander in Kontakt kommen. Dabei kann es aufgrund der Gasdruckunterschiede zu einer Diffusion des Gases aus kleineren in größere Zellen sowie zur Zellkoaleszenz kommen. Ersteres begünstigt das Wachstum von großen Zellen, bei zweitem werden die Zellen so groß, dass es zum Aufreißen der Zellstege zwischen zwei benachbarten Zellen kommt und diese zusammenwachsen. Beide Effekte können auf die Verringerung der Energie aufgrund einer reduzierten Zelloberfläche im Verhältnis zum Volumen zurückgeführt werden und sind im TSG-Verfahren unerwünscht. Sowohl Zellkoaleszenz als auch die Diffusion treten besonders bei Materialien mit niedrigeren Dehnviskositäten oder bei zu hohen Prozesstemperaturen auf. [VOL15; CRA08]

Um beide Effekte einzudämmen, muss das Zellwachstum, wie bei der Nukleierung in Kapitel 2.1.3.3 beschrieben, durch einen schnellen Übergang in die thermodynamische Instabilität sowie eine rechtzeitige Stabilisierung der Schaumzellen kontrolliert werden. Die Verlangsamung des Zellwachstums darf jedoch nicht so stark ausfallen, dass diese keinen ausreichenden Expansionsgrad erreichen und keine Schaumstruktur ausbildet werden kann [HUA00].

2.1.3.5 Stabilisierung

Um eine möglichst feine und homogene Schaumstruktur zu erzielen, müssen die wachsenden Zellen rechtzeitig stabilisiert werden. Dieser Schritt kann durch interne und externe Mechanismen realisiert werden, wobei dies beim TSG-Verfahren üblicherweise extern geschieht. Intern wird das Wachstum der Zellen durch ein Gleichgewicht der Gaskonzentrationen zwischen dem Polymer-Gas-Gemisch und den Zellen gestoppt, extern durch das Einfrieren der Polymerschmelze. Aufgrund des Abkühlens der Polymerschmelze erhöht sich deren Viskosität, die Permeabilität sinkt, der Gegendruck zu den expandierenden Blasen steigt und hindert diese in ihrem Wachstum. Die Schnelligkeit der externen Stabilisierung ist maßgeblich für die resultierende Schaumstruktur verantwortlich. Eine schnelle Abkühlung, beispielsweise durch ein kaltes Werkzeug, führt zu einer schnellen Fixierung der Schaumstruktur und damit zu eher geschlossenporigen Zellen und einer dicken kompakten Randschicht. Nimmt die Abkühlung durch ein wärmeres Werkzeug mehr Zeit in Anspruch, so liegt das Polymer im Kern des Formteils länger im Schmelzestand vor und die Zellen können länger wachsen. Dies führt zu eher inhomogenen und offenporigen Schaumstrukturen im fertigen Bauteil. [ALT11; VOL15; HUA00; CRA08; GUA12]

2.2 Aufbau geschäumter Polymerbauteile

Die Eigenschaften der mittels TSG-Verfahren hergestellten Schäume werden maßgeblich durch den charakteristischen Aufbau und der damit einhergehenden Dichteverteilung im Bauteil bestimmt. Der als Integralstruktur bezeichnete Aufbau, schematisch dargestellt in Abbildung 9, besteht aus einer kompakten Randzone, welche den geschäumten Kern umschließt [STA06; JOH14].

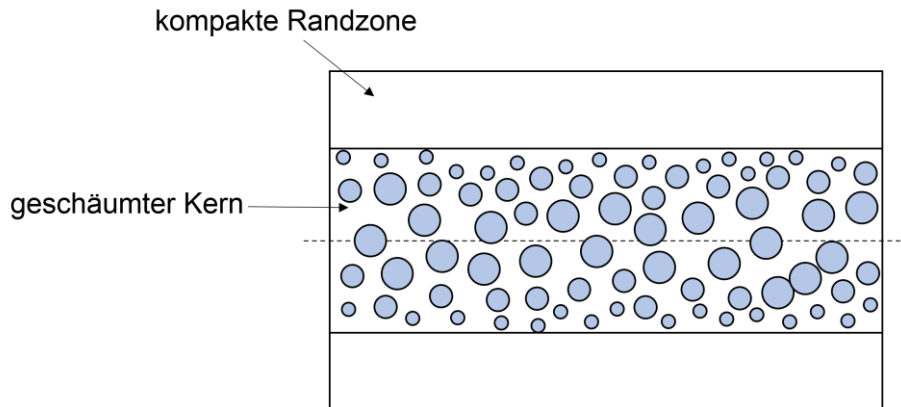


Abbildung 9: Schematischer Aufbau einer Integralschaumstruktur, nach [ALT11]

Wie in der Abbildung zu sehen ist, besteht diese Integralstruktur aus klar voneinander unterscheidbaren Schichten mit unterschiedlichen Zellformen und -verteilungen. Die dichte, zellarme Randschicht besitzt keine erkennbare Zellstruktur und bestimmt das Aussehen des finalen Bauteils [ALT11; JOH14].

In der Kernzone des Bauteils befinden sich der Großteil der, optimalerweise sphärisch, vorliegenden Zellen. Die Zellverteilung dieser Zone ist abhängig von den verwendeten Prozessparametern und sollte idealerweise eine gleichmäßige Verteilung von kleinen Zellen vorweisen [XUJ11].

Zwischen der Rand- und Kernzone liegt die Übergangzone, welche in idealen Bauteilen nicht existieren sollte. Unter idealen Prozessbedingungen liegen diese nämlich Übergangsfrei aneinander an, dies ist in der Produktion jedoch kaum zu realisieren. Die Zellen dieser Zone weisen einen Übergang von sphärischen Zellen nahe der Kernzone über elliptische Zellen zu stark deformierten Zellen nahe der Randzone auf [XUJ11].

Die unterschiedliche Verteilung der Zellen in den Schichten resultiert in einem Dichteverlauf über den Querschnitt des Bauteils hinweg. Dieser Dichteverlauf, schematisch dargestellt in Abbildung 10, wird als Integralschaumstruktur bezeichnet [CRA08; JOH14]. Dieser integrale Aufbau mit starken Dichtereduktionen im Kern des Bauteils und einem dichten, kompakten Rand bietet den Vorteil, trotz hoher Dichtereduktionen noch eine hohe Steifigkeit, insbesondere gegen Biegebeanspruchung, zu besitzen [ALT11; STA06].

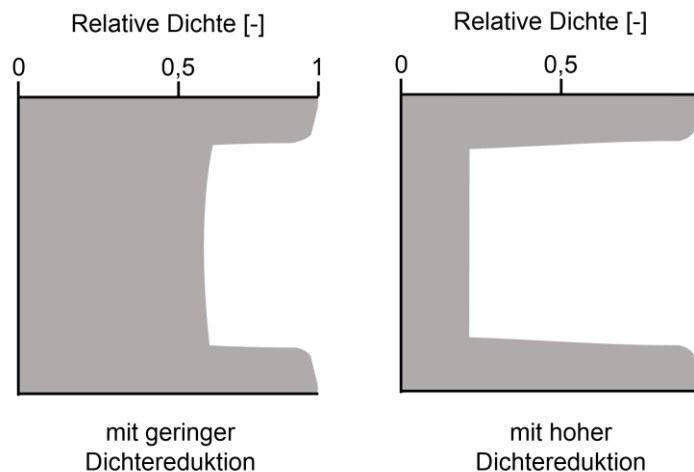


Abbildung 10: Schematischer Dichteverlauf eines Integralschaumbauteils, nach [CRA08]

Der schichtartige Aufbau sowie die in den Schichten vorliegenden Zellformen lassen sich durch die rheologischen Fließeigenschaften der treibmittelversetzten Schmelze und der auf sie einwirkenden Scherungs- und Kühlungseffekte während der Kavitätsfüllung erklären.

2.3 Treibmittel

Um Polymere im Zuge des TSG-Verfahrens aufzuschäumen, werden Treibmittel benötigt, welche homogen verteilt in der Polymerschmelze vorliegen. Als Treibmittel werden Substanzen bezeichnet, die durch eine chemische Reaktion oder physikalischen Phasenübergang Gase freisetzen, die sich im Polymer lösen, bei Druckverlust wieder ausfallen, nukleieren und durch Expansion die finale Schaumstruktur bilden. [CRA08; STA06]

Unterteilt werden diese Treibmittel hinsichtlich der Art der Zudosierung in chemische und physikalische Treibmittel.

2.3.1 Chemische Treibmittel

Chemische Treibmittel sind anorganische oder organische Verbindungen, welche bei Standardtemperaturen zumeist in fester Form vorliegen. Während des TSG Prozesses durchlaufen diese als Masterbatch zugeführten Treibmittel unter Wärmeeinwirkung eine chemische Reaktion, deren Produkte unter anderem Gase wie N_2 oder CO_2 sind, welche als Treibgas im Zuge des Verfahrens agieren [ALT11; VOL15]. Nachteilig an den chemischen Treibmitteln ist, dass ein überwiegender Teil des zersetzten chemischen Treibmittels nach der Reaktion nicht als Gas, sondern als feste Rückstände im Bauteil vorliegen. Dies kann, neben einer Verfärbung des Bauteils, auch zur Degradation der Polymermatrix und daraus folgend zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften sowie zur Korrosion bzw. Verschmutzung des Werkzeuges führen [ALT11; HUA00].

Die chemischen Treibmittel lassen sich in exotherme und endotherme Treibmittel einteilen. Zu den exothermen Treibmitteln zählen unter anderem Oxybis(benzensulphonylhydrazide), Toluensulphonylsemicarbazide und Azodicarbonamid (ADC), wobei ADC das am Häufigsten eingesetzte exotherme Treibmittel ist. ADC zersetzt sich

zwischen 205 und 215 °C. (Stehr, 2015) Der Zersetzungsprozess besteht aus mehreren Teilreaktionen, wobei verschiedene wirksame Gase freigesetzt werden. Dazu zählen Stickstoff, Ammoniak, Kohlenstoffdioxid sowie auch das Gas Kohlenstoffmonoxid. [PRE05] Der Reaktionsmechanismus ist in Abbildung 11 dargestellt.

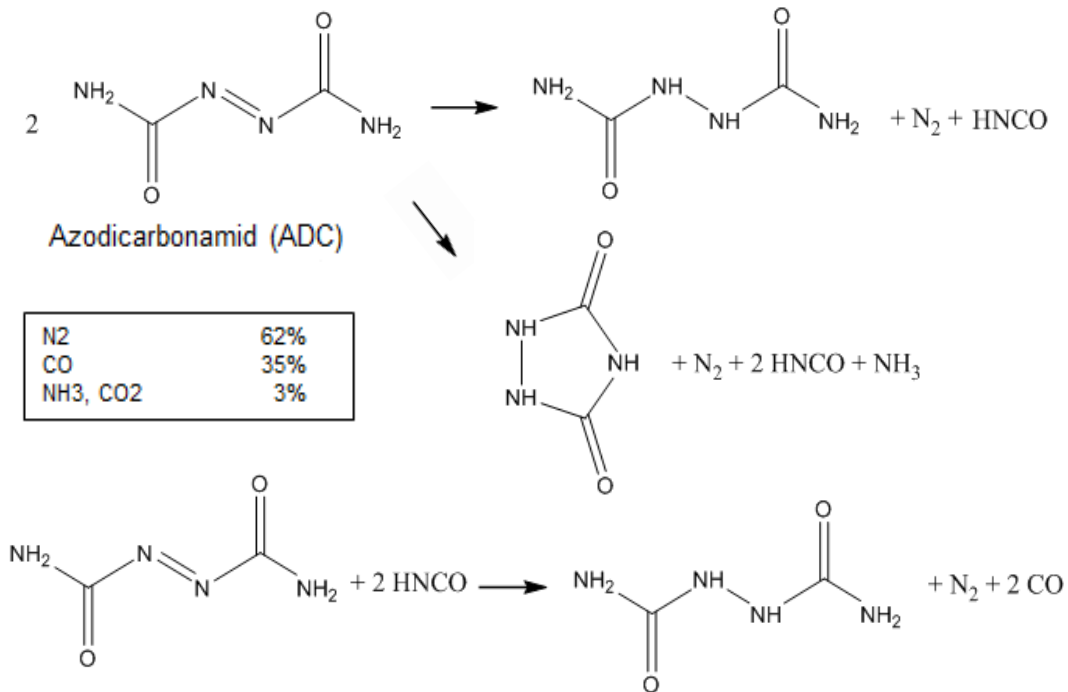


Abbildung 11: Zersetzungsreaktion von Azodicarbonamid [STE15]

Charakteristisch für exotherme Reaktionen ist die schnelle Freisetzung des Gases innerhalb eines kurzen Zeitraums. Dies zeigt auch der scharfe Peak der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC)-Messung eines exothermen Treibmittels in Abbildung 12. Ist die Zersetzungstemperatur einmal überschritten, lässt sich die Reaktion nicht mehr gezielt steuern. Aufgrund der zusätzlichen Wärmeenergie resultiert auch eine verlängerte Kühlzeit. [ALT11]

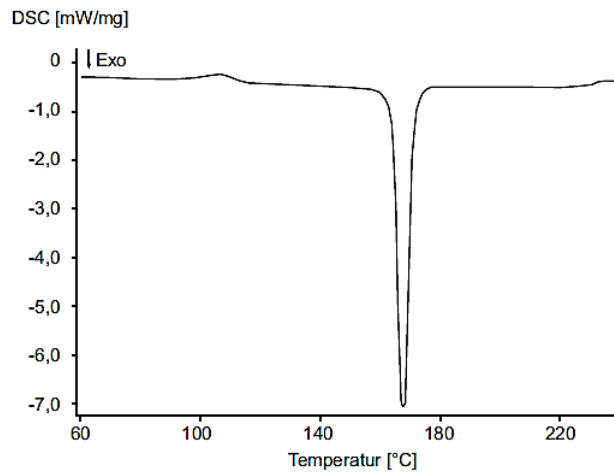


Abbildung 12: DSC-Kurve eines exothermen chemischen Treibmittels [ALT11]

Endotherme Treibmittel benötigen eine konstante Wärmezufuhr zum Ablauf der Reaktion, weshalb eine gute Prozesskontrolle möglich ist. Die wichtigsten Vertreter unter den endothermen Treibmitteln sind Natriumhydrogencarbonat und Zitronensäurederivate, wobei bei deren Zersetzungsreaktion jeweils Kohlenstoffdioxid und Wasser freigesetzt wird. Abbildung 13 zeigt die DSC-Kurve eines Treibmittelblends. Hierbei ist der erste Peak mit dem Aufschmelzen des Trägerpolymers zu erklären. Die Peaks bei circa 160 °C und 220 °C beschreiben die frühe Zersetzung des Bicarbonats sowie die später einsetzende Zersetzung des Zitronensäurederivats. [ALT11]

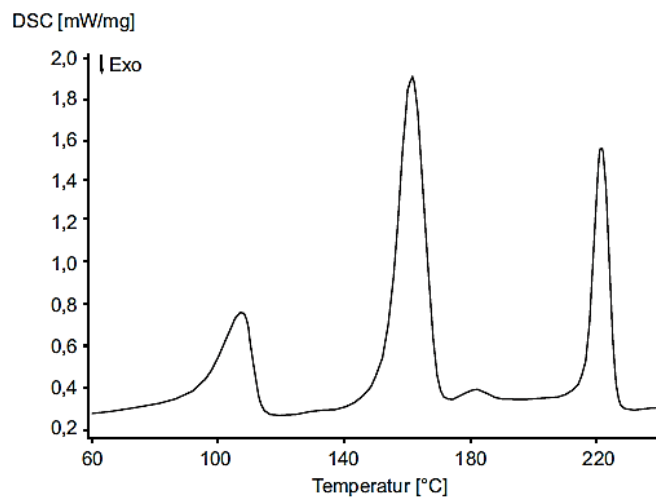


Abbildung 13: DSC-Kurve eines endothermen chemischen Treibmittelgemischs [ALT11]

2.3.2 Physikalische Treibmittel

Physikalische Treibmittel durchlaufen im Vergleich zu den chemischen keine Reaktion, sondern eine Änderung ihres Aggregatzustandes. Dieser physikalische Phasenübergang findet in Form einer Druck- oder Temperaturänderung beziehungsweise durch das Verdampfen einer Flüssigkeit statt. Aufgrund von Umweltauflagen, den Kosten sowie ihrer

chemischen Inertheit werden dafür besonders Stickstoff und Kohlenstoffdioxid im überkritischen Zustand verwendet. [ALT11; VOL15; XUJ11]

Als physikalische Treibmittel werden hauptsächlich die inerten Gase Stickstoff und Kohlenstoffdioxid verwendet. Beide Gase sind verhältnismäßig umweltfreundlich, weisen aber geringere Löslichkeiten als beispielsweise Fluorkohlenwasserstoffe, Isopentan oder Isobutan auf [PAR15]. Zum Ausgleich der geringen Löslichkeit werden CO_2 und N_2 als überkritisches Fluid in die Kunststoffschmelze injiziert. Überkritisches Fluid bedeutet bei der vorliegenden Substanz kann aufgrund des Erreichens des kritischen Punktes nicht zwischen Flüssigkeit und Gas unterschieden werden. Die Eingasung als überkritisches Fluid hat den Vorteil, dass die Diffusionseigenschaft des Gases verbessert wird. Grundsätzlich gilt, je höher die Menge an gelöstem Treibfluid, desto größer die Nukleierungsrate und damit der Aufschäumgrad. Je nach Material besitzt die Schmelze eine Sättigungsgrenze, welche nicht überschritten werden darf. Weiterhin verändert die Menge an Gas die Größe der kompakten Randschicht. Hohe Gasmengen führen zu schmalen Randschichten. [BOC13]

Gegenüber chemischen Treibmitteln bietet die physikalische Begasung im Zylinder verfahrenstechnische und formteiltechnische Vorteile. Zum einen ist der Schaumdruck höher als bei chemischen Treibmitteln, sodass auch hochkomplexe Bauteilgeometrien mit geringen Wandstärken reproduzierbar ausgefüllt werden können. Zum anderen ist die Bandbreite der zu verarbeitenden Kunststoffe größer, da die Polymere beim Einsatz chemischer Treibmittel zum Teil empfindlich auf deren Abbauprodukte reagieren. [ALT11] Zudem sind die physikalischen Treibmittel günstiger, wodurch langfristig kostentechnische Vorteile resultieren [HAN12].

2.4 Einfluss von Prozessparametern

Die Prozessparameter haben entscheidenden Einfluss auf die Schaumstruktur von geschäumten Bauteilen. Der Einfluss von Staudruck, Einspritzgeschwindigkeit, Masse- und Werkzeugtemperatur sollen im Folgenden erläutert werden. Die Parameter beeinflussen sich zum Teil gegenseitig und können deshalb nicht immer getrennt voneinander betrachtet werden.

2.4.1 Staudruck

Der Staudruck ist entscheidend für die Qualität der Schmelze und der Schaumstruktur. Er beeinflusst die Homogenisierung und Entlüftung, indem durch Regulierung des Staudrucks die Druckströmung beim Dosiervorgang verändert wird. Hohe Staudrücke sind beim Kompaktspritzen als auch beim TSG Verfahren meist von Vorteil, da sie aufgrund der besseren Durchmischung eine feinzellige Schaumstruktur begünstigen. [ALT11; BAR09]

Im Schaumspritzgießprozess erfüllt der Staudruck zwei weitere Funktionen. Zum einen wird das vorzeitige Aufschäumen des Polymer-Gas-Gemisches in der Plastifiziereinheit verhindert. Dies geschieht über den hohen Druck, durch den mehr Gas in der Schmelze gelöst wird [ALT11]. Zum anderen wirkt sich die Druckabfallrate beim Einspritzen in die

Kavität auf die Nukleierungsrate aus. Park zeigt dies in seinen Ausführungen zur Filament Extrusion von mikrozellulären Polymeren an speziellen Dekompressionselementen. Er weist in seinen Experimenten eine Erhöhung der Nukleierungsrate aufgrund des größeren Druckabfalls nach [PAR96].

2.4.2 Einspritzgeschwindigkeit

Beim Kompaktspritzgießen wird die Einspritzgeschwindigkeit an die Viskosität der Schmelze und die Form des Werkzeugs beziehungsweise die Kavität angepasst. Hohe Viskositäten oder komplizierte Bauteile mit großen Fließweg-Wanddicken-Verhältnissen benötigen höhere Geschwindigkeiten, um qualitativ hochwertige Formlinge zu erhalten. Das Schaumspritzgießen erfordert die Betrachtung weiterer Aspekte, da auch die Schaumstruktur maßgeblich von der Einspritzgeschwindigkeit abhängt. Schnelle Einspritzgeschwindigkeiten sind zu bevorzugen, da die Schaumstruktur anschließend gleichmäßiger ist [ALT11]. Dies ist zum einen mit dem geringen Temperaturgefälle innerhalb der Schmelze zu begründen, da die Blasen unter gleichen Bedingungen wachsen. Entscheidender ist aber die geringere Einspritzzeit. Das bedeutet, die Zeiten, die das Material am Anfang und am Ende des Einspritzzyklus zum Expandieren haben, liegen näher beieinander. Die Porengröße ist gleichmäßiger. Hingegen ist die Füllzeit bei niedrigen Geschwindigkeiten länger, sodass das Material an der Fließfront frühzeitig einen Druckabfall erfährt und die Keimbildung dort zuerst einsetzt. Die Blasen haben anschließend mehr Zeit zum Expandieren. Poren in Angussnähe sind kleiner als Poren mit großer Angussentfernung [PAN14].

Auch die Nukleierungsdichte ist abhängig von der Druckabfallrate in der Schmelze, welche direkt über die Einspritzgeschwindigkeit beeinflusst wird. Hohe Geschwindigkeiten bewirken hohe Druckabfallraten, sodass die Nukleierungsdichte ansteigt. [ALT11; BAR09]

2.4.3 Schmelztemperatur

Ebenfalls einen entscheidenden Prozessparameter des Schaumspritzgießens stellt die Schmelztemperatur dar. Sie kann Einfluss auf die Geschwindigkeit des Blasenwachstums, Viskosität der Schmelze, Randschichtdicke, Nukleierungsdichte, Gaslöslichkeit und bei chemischen Treibmitteln auch den Zersetzungszeitpunkt des Treibmittels nehmen.

Bezüglich der Geschwindigkeit des Blasenwachstums begünstigen hohe Temperaturen die Expansion der Zelle. Es besteht jedoch die Gefahr der Koaleszenz [ALT11].

Altstädt und auch Barzegari erkennen in ihren Untersuchungen zudem einen Zusammenhang zwischen der Massetemperatur und der Randschicht ihrer Proben. Hohe Temperaturen führen zu dünneren kompakten Randschichten. Dies ist mit der ausreichenden Zeit zu erklären, die die Keime im Randbereich zum Expandieren haben, bevor die Schmelze erstarrt. Auch die Nukleierungsdichte wird durch die Schmelztemperatur verändert. Je höher die Temperatur, desto größer die Nukleierungsdichte. Damit wächst die Anzahl der Keime und der Aufschäumgrad steigt. [ALT11; BAR09]

2.4.4 Werkzeugtemperatur

Das meist wassergekühlte Werkzeug kühlt die Schmelze auf unterhalb der Glasübergangstemperatur ab. Das Formteil wird gekühlt bis eine ausreichende Formstabilität des Bauteils beziehungsweise der Schaumzellen gewährleistet ist. Ansonsten kann der Post-Blow-Effekt eintreten. Der Effekt beschreibt das Blasenwachstum nach dem Entformen des Bauteils.

Hohe Temperaturen halten die Schmelze zu lange im fließfähigen Zustand. Dadurch können zwar hohe Aufschäumgrade generiert werden, andererseits kann es zu Koaleszenz zwischen den Schaumzellen kommen. Grundsätzlich werden hohe Temperaturen bevorzugt eingesetzt, da die Kühlrate geringer ist und dadurch gleichmäßigere Bedingungen möglich werden. Dies führt jedoch zu längeren Zykluszeiten. [ALT11; BAR09; YOO14]

Um den Nachteil der Schlierenbildung an der Oberfläche auszugleichen, wird zum Teil eine variotherme Werkzeugtemperierung eingesetzt. Dabei wird die Werkzeugwand vorübergehend auf eine Temperatur zwischen Glasübergangs- und Schmelzetemperatur des verwendeten Kunststoffes aufgeheizt. Die Erstarrung wird unterbunden und die Schmelze bleibt während des Einspritzvorgangs fließfähiger. [ALT11]

2.5 Ausgewählte zerstörende und zerstörungsfreie Prüftechniken zur Schaumstrukturanalyse

2.5.1 Fehlstellen

Einige typische Fehlstellen, wie sie bei geschäumten Bauteilen häufig auftreten, sind in Abbildung 5 dargestellt.

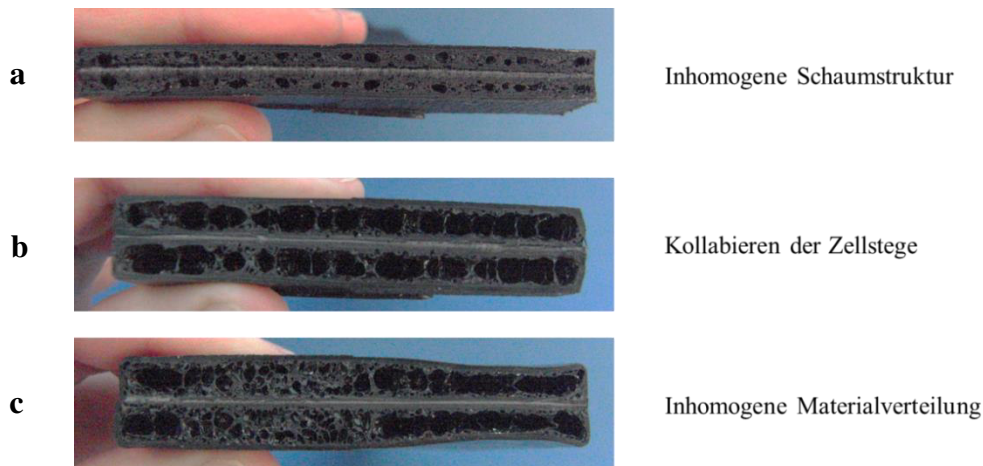


Abbildung 14: Typische Fehlstellen von TSG.

2.5.2 Schaumstrukturanalyse:

Die Schaumstrukturanalyse kann manuell anhand von Mikroskopie-Aufnahmen erfolgen [PET03], was einen hohen zeitlichen und präparativen Aufwand erfordert. Die mikroskopische Beurteilung ist häufig subjektiv [SCH91; RHO92; CHA92]. Standardmäßig herangezogene Bewertungskriterien sind die Blasengröße und –geometrie (mittlerer

Durchmesser, Rundheit) sowie die Anzahl der Blasen pro Fläche. Besonders aufwändig ist der Abgleich von Prozessparametern mit den resultierenden Schaumqualitäten [PET03].

Ein Nachteil dieser stichprobenartigen Prüfverfahren ist oft die notwendige Zerstörung der Bauteile. Eine kontinuierliche Prozessüberwachung ist mit diesen Methoden nicht möglich. Zerstörungsfreie Untersuchungen von geschäumten Spritzgussbauteilen erfolgen bislang nur im wissenschaftlichen Umfeld.

2.5.3 Luftultraschallmessung:

Ein Verfahren zur berührungs- und zerstörungsfreien Bauteilprüfung, welches großes Potenzial verspricht, ist die Luftultraschalltechnik. Hier gilt es jedoch noch die Herausforderungen zwischen den akustischen Impedanzen zwischen Gasen und Festkörpern zu lösen [GHO16].

2.5.4 Terahertz-Spektroskopie:

Die Terahertz-Spektroskopie verwendet elektromagnetische Strahlung mit Frequenzen zwischen 0,1 und 10 THz. Die Detektion von Lunkern, Fehlstellen oder (Füllstoff-)Inhomogenitäten funktioniert insbesondere bei dielektrischen Materialien gut und kann zur Charakterisierung von geschäumten Bauteilen herangezogen werden [GEH15].

2.5.5 Inline-Thermografie:

Eine Möglichkeit der zerstörungsfreien QS bietet die Inline-Thermografie. Die Thermografie ermöglicht es auf einfache und wirtschaftliche Weise Herstellprozesse zu analysieren, zu optimieren und zu überwachen. Um thermische Unterschiede über das gesamte Bauteil sofort zu erkennen, erfolgt der Vergleich von Gut-Teilen mit Referenzteilen. Dies dient dazu Unterschiede darzustellen und Maßnahmen einzuleiten (z. B. Ausschußseparierung, Abbildung 15) [SCH14; SCH16].

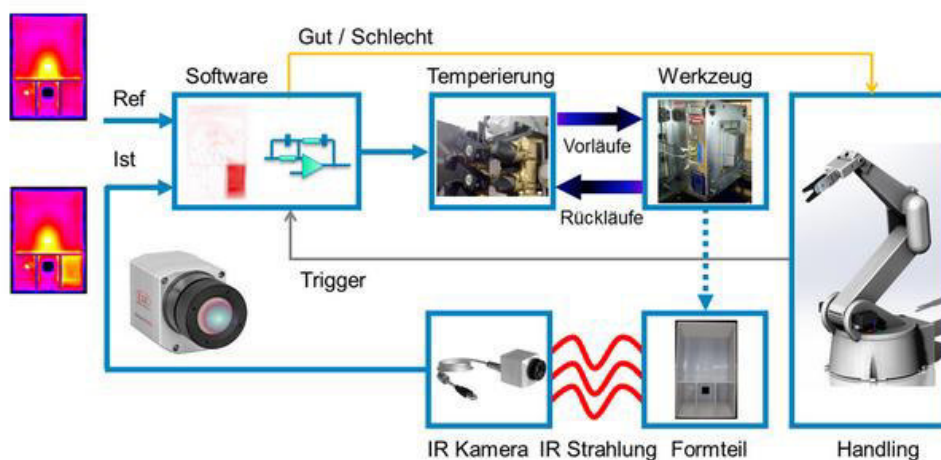


Abbildung 15: Blockdiagramme des Regelkreises bei der Inline-Thermografie [SCH14]

Die Wärmeübertragung vom Bauteil an die Umgebung findet nach der Entformung durch Wärmestrahlung und Konvektion statt. Die Inline-Thermografiertechnik zieht zur Qualitätssicherung die unterschiedlichen werkstoffspezifischen Abkühlgeschwindigkeiten der Materialien heran.

Aufgrund von Wärmeleitung und Konvektion ergeben sich über die Zeit auf der Oberfläche abhängig von Bauteil (mit und ohne Defekt bzw. zwischen kompakt und geschäumt) Unterschiede in der Oberflächentemperatur. Ein Bauteil mit Defekt kühlt aufgrund der geringeren Masse und somit geringeren lokalen Wärmekapazität zunächst schneller ab als das intakte Bauteil, was mittels Thermografie optisch erfasst und ausgewertet werden kann.

2.5.6 Inline-Gewichtsmessung:

Die Messung der Gewichtskraft von Kunststoffbauteilen ermöglicht präzise Rückschlüsse auf die Formteilqualität. So ist es möglich Dichteschwankungen sowie nicht vollständig gefüllte Formnester oder fehlende Einlegeteile zu detektieren. Wie Abbildung 8 zeigt, können mittels der Inline-Gewichtsmessung Schwankungen von unter einem Prozent präzise detektiert werden.

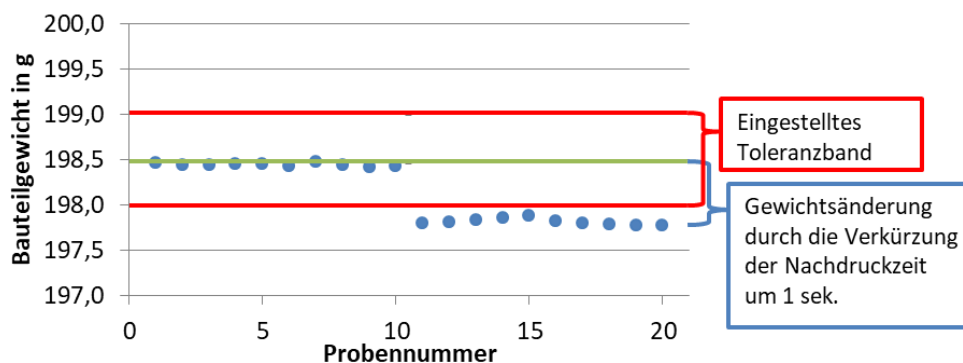


Abbildung 16: Inlinegewichtsmessung bei Vorversuchen an der Forschungsstelle [SCH16]

Die Weiterentwicklung des Systems und dessen Übertragung auf geschäumte Bauteile sollen in diesem Forschungsprojekt stattfinden.

2.5.7 Zusammenfassung zerstörungsfreie Prüfung geschäumter Bauteile

Die genannten Ausführungen zur Schaumstrukturanalyse zeigen, dass es im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung von geschäumten Bauteilen einen starken Bedarf an kostengünstigen Messtechniken zur Inline-Qualitätskontrolle für die industrielle Anwendung gibt. Des Weiteren bestehen noch keine Untersuchungen, welche die Zusammenhänge zwischen Maschineneinstellungen, Schaumstruktur, Bauteilqualität und Gut-Schlecht-Sortierung von Bauteilen klar herausstellen. Die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Untersuchungen sowie die Anwendung, Entwicklung und Erprobung neuer Qualitätssicherungstechniken, die eine sichere Gut-Schlecht-Sortierung ermöglichen, sollen diese Lücke schließen.

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Gute Inline-Qualitätstechniken sollen Unternehmen in die Lage versetzen innerhalb von wenigen Sekunden Defekte und Abweichungen von definierten Gutteilen, Toleranzen bzw. Referenzen beim physikalischen Schäumen zu unterscheiden. Im Idealfall ist dazu die prozessbegleitende Visualisierung so programmiert und grafisch ausgestaltet, dass selbst für ungeschultes Personal an der Maschine auf den ersten Blick erkennbar wird, dass es sich um eine Abweichung von dem vorab definierten Soll- bzw. Gutteil handelt.

Dazu sind sowohl genaue Kenntnis des Spritzgießprozesses und dessen Einfluss auf die Schaumqualität als auch eine klare Definition dessen was gut und was schlecht an einem geschäumten Spritzgießbauteil ist, notwendig.

Um diese Grundlage zu schaffen sind erheblicher experimenteller Aufwand notwendig, da bislang nur sehr wenig dokumentiertes und öffentlich zugängliches Wissen für den Bereich geschäumter Spritzgießbauteile gibt, welches die Zusammenhänge zwischen Prozesseinstellungen, Material, Schaumstruktur und mechanischen Eigenschaften klar beschreibt.

Die Porengröße, deren Verteilung, die Zellwanddicke, die Richtung der Schaumexpansion sowie die Dicke der kompakten Randschichten im Verhältnis zum geschäumten Kern können wesentliche Einflussfaktoren bzgl. der Qualität von geschäumten Bauteilen hinsichtlich ihrer mechanischen, akustischen, thermischen sowie optischen Eigenschaften sein.

Die Thermografie, Gewichtsmessung und der Werkzeuginnendruck erlauben es die genannten Parameter geschäumter Bauteile zu charakterisieren, um so Aussagen zur Qualität, abhängig von den Prozessparametern treffen zu können.

Die Herausforderung im Bereich der Inline-Thermografie besteht darin die vielen Einflussfaktoren, die beim Wärmetausch in und zwischen den verschiedenen Phasen (Metall des Werkzeugs, kompakte Kunststoffrandschicht, geschäumter Kern, Kunststoffrandschicht, Umgebungsluft) stattfinden, zu erkennen, zu interpretieren und für den Anwender in geeigneter Form aufzubereiten.

Ebenso verhält es sich mit der Inline-Gewichtsmessung. Hier gilt es, eine Systematik zu erarbeiten, die prozessrelevante Schwankungen im Gewicht des geschäumten Bauteils orts aufgelöst registriert und über die Software mögliche Ursachen und Abstellmaßnahmen signalisiert. Diese muss durch geeignete Konstruktion gegen nicht herausrechenbare Störeinflüsse in entsprechender Weise gelagert sein.

4 Durchgeführte Arbeiten

4.1 Material

Polymere, chemische Treibmittel und im Fall der Versuche mit WPC wurden die Füllstoffe von den Projektbegleitern aus der Industrie bereitgestellt. Nach einem intensiven Austausch mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden die folgenden Werkstoffe für die Versuche ausgewählt.

- Polypropylen (PP) mit 20 Gew.% Talkum
- Polyamid (PA) mit 30 Gew.% Glasfasern
- Wood-Polymer-Composites (WPC) – PP als Basispolymer und zwei Holzfasertypen mit unterschiedlichen Feinheitsgraden
- Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) mit TiO₂-Nanopartikeln

Während die teilkristallinen Kunststoffe PP und PA auf Grund ihrer hohen Anwendungsnähe für die Automobilindustrie ausgewählt wurden, wurde ABS als amorpher Kunststoff für einen direkten Vergleich gewählt. Dieser Kunststoff bietet den zusätzlichen Vorteil den Einfluss von Nanofüllstoffen auf die Schaumstruktur zu bewerten. Der Einsatz von Nano-Nukleierungshilfsmitteln ist ein Trend, welcher vermehrt in der industriellen Anwendung zu beobachten ist, um die Schaumstruktur zu verbessern. Durch ein anderes Vorhaben standen der Forschungsvereinigung eine große Variation an WPC-Rezepturen für Untersuchungen zur Verfügung. Die in Summe 16 Rezepturen erlaubten eine detaillierte Betrachtung der eingesetzten Inline-Qualitätssicherungsmaßnahmen mit Blick auf Variationen des Basispolymers mit verschiedenem MFR und diversen Holzfasertypen bzw. -gehalten.

4.1.1 Polypropylen (PP) mit 20 Gew.% Talkum

Tabelle 1: Materialdaten PP

Material	Eigenschaft	Name / Wert
Polypropylen	Hersteller	ALBIS
	Bezeichnung	ALTECH PP-B A 4920/500 MR20
	Polymerbasis	Polypropylen Block Copolymer
	Füllstoff	20 % Talkum
	Besondere Merkmale	Wärmealterungsstabilisiert, leichtfließend
	MFR (230 °C/ 2,16 kg)	20 g / 10 min
	E-Modul (Zugversuch)	2000 MPa
	Dichte	1030 kg/m ³

4.1.2 Polyamid 6 (PA6) mit 30 Gew% Glasfasern

Tabelle 2: Materialdaten PA

Material	Eigenschaft	Name / Wert
Polypropylen	Hersteller	ALBIS
	Bezeichnung	ALTECH PA6 A 2030/319 GF30 IM
	Polymerbasis	Polyamid 6
	Füllstoff	30 % Glasfasern
	Besondere Merkmale	Leicht entformbar, elastomermodifiziert, hohes Zähigkeitsniveau, wärmealterungsstabilisiert
	MFR (270 °C/ 5 kg)	50 g / 10min
	E-Modul (Zugversuch)	7500 MPa
	Dichte	1310 kg/m ³

4.1.3 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) mit TiO₂-Nanopartikeln

Tabelle 3: Materialdaten ABS

Material	Eigenschaft	Name / Wert
Polypropylen	Hersteller	Ineos Styrolution
	Bezeichnung	Terluran® GP-35
	Polymerbasis	ABS
	Füllstoff	TiO ₂ Nanopartikel
	Besondere Merkmale	Leicht fließend, gute Zähigkeit
	MFR (220 °C/ 10 kg)	34 g / 10min
	E-Modul (Zugversuch)	2300 MPa
	Dichte	1040 kg/m ³

4.1.4 Wood - Polymer - Composite

Bei der Auswahl der PP-Copolymer-Typen wurden zwei Standard-Spritzgieß-Typen mit MFI-Werten (230 °C, 2,16 kg) von ca. 20 g/10 min und 50 g/10 min verwendet. Zusätzlich wurden zwei Schaumtypen ausgewählt. Eine Type ist hierbei ein direkt im Reaktor hergestelltes, sehr homogenes PP-Copolymer mit breiter Molekulargewichtsverteilung. Die andere PP-Schaum-Type ist ein am SKZ compoundierter Blend bestehend aus 70 % Standard-PP und 30 % einer PP-High Melt Strength (HMS)-Type mit sehr hoher

Schmelzefestigkeit, was besonders vorteilhaft für das Schäumen ist. Details zu den Polymeren sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Übersicht zu den von den Projektbegleitern bereitgestellten Polymeren.

Hersteller	Typenbezeichnung	Kurzbezeichnung	MFR (230 °C, 2,16 kg)
Borealis	PP BF970MO	PP-Type 1	20 g/10 min
Borealis	PP BH348MO	PP-Type 2	50 g/10 min
Borealis	PP BH381MO	PP-Type 3	35 g/10 min
Borealis	PP BH348 MO (70 %) und WB140HMS (30 %)	PP-Type 4	20 g/10 min

Hinsichtlich der Holzfasern wurden zwei Typen mit unterschiedlichen Partikelgrößenbereichen ausgewählt. Die Einzelheiten sind Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Übersicht zu den von den Projektbegleitern bereitgestellten Holzfasern.

Hersteller	Typenbezeichnung	Partikelgrößenbereich
J. Rettenmaier und Söhne	Arbocel C100	70 – 150 µm
J. Rettenmaier und Söhne	Arbocel C400	250 – 600 µm

Für das physikalische Schäumen wurde Stickstoff als Treibmittel im Spritzgießprozess zugegeben. Für das chemische Schäumen der WPC-Materialien wurden verschiedene exotherme und endotherme Treibmittel ausgewählt (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Übersicht zu den von den Projektbegleitern bereitgestellten Treibmitteln.

Hersteller	Typenbezeichnung	Art	Einsatz Institut
kcd Kunststoffe	Cell.Mix a071	Endotherm	SKZ
WTH GmbH	Forcell TC AP30	Exotherm	SKZ
Tramaco	Tracel PO4207	Endotherm	SKZ

Basierend auf der Rohstoffauswahl ergaben sich für weiterführende Untersuchungen 16 Rezepturen (Tabelle 7).

Tabelle 7: WPC-Rezepturen.

Rezeptur	Polymer		Füllstoff	
	Typ	Anteil in Gew.-%	Typ	Anteil in Gew.-%
001	Borealis PP BF970MO	67,8	Arbocel C400	30,0
002		47,8		50,0
003		67,8	Arbocel C100	30,0
004		47,8		50,0
005	Borealis PP BH348MO	67,8	Arbocel C400	30,0
006		47,8		50,0
007		67,8	Arbocel C100	30,0
008		47,8		50,0
009	Borealis PP BH381MO	67,8	Arbocel C400	30,0
010		47,8		50,0
011		67,8	Arbocel C100	30,0
012		47,8		50,0
013	Blend (70 % BH348MO+ 30 % WB140HMS)	67,8	Arbocel C400	30,0
014		47,8		50,0
015		67,8	Arbocel C100	30,0
016		47,8		50,0

4.2 Probenherstellung

4.2.1 Maschine

1.1.1.1 Spritzgießmaschine

Für die Versuche wird eine Spritzgießmaschine der Firma Wittmann Battenfeld GmbH des Typs SmartPower 240/750 UNILOG B8 genutzt, welche 2017 hergestellt wurde und eine Schließkraft von 2400 kN besitzt. Die Zudosierung des Treibgases findet mit einer Druckerzeugungseinheit DE130 der Firma Wittmann Battenfeld GmbH, Baujahr 12/2016, mit einem maximalen Arbeitsdruck von 300 bar, einem Motorenstrom 9 A, einer Steuerspannung von 24 V DC und einer Frequenz von 50 Hz statt. Anlagenbedingt wird mit einer von Wittmann Battenfeld auf die Cellmould Technik spezialisierten 25D langen Schnecke, dargestellt in Abbildung 17, gearbeitet. Diese unterscheidet sich von der klassischen 3-Zonen-Schnecke durch zusätzliche Barrierezonen sowie Scherelemente. Ziel dieser zusätzlichen Elemente ist eine bessere Vermischung des Gases mit der Kunststoffschmelze sowie eine Vermeidung des Austretens des Gases.

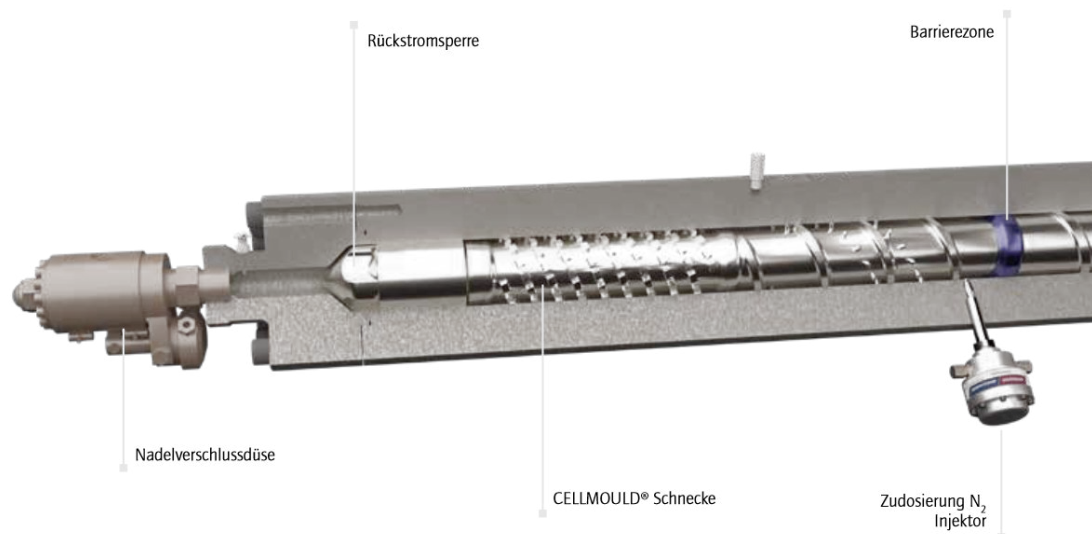


Abbildung 17: Abbildung der in den Versuchen verwendeten Schnecke von Wittmann Battenfeld [99]

1.1.1.2 Feuchtigkeitsmessung

Für die Feuchtigkeitsmessung des Granulats vor Durchführung der Versuchsreihen wird das Messgerät der Sartorius AG Germany mit der Bezeichnung MA100C-000230V1 verwendet. Für die Messung werden 20 g Granulat eingewogen, welches 25 min bei einer Temperatur von 110 °C temperiert wird.

1.1.1.3 Trockner

Als Trockner dient der Drymax E60 der Firma Wittmann Battenfeld. Die Trocknungsbedingungen waren materialspezifisch.

- PP mit 20 % Talkum: 80 °C für 4 h
- PA6 mit 30 % Glasfasern: 80 °C für 6 h
- ABS mit TiO₂-Nanopartikeln: 80 °C für 4 h
- WPC-Rezepturen: 90 °C für 4 h

4.3 Werkzeugauswahl und Probenpräparation

Um ein möglichst umfassendes Verständnis über mögliche Fehlerbilder zu bekommen, wurden für die Versuchsreihen drei verschiedene Werkzeuge herangezogen. Die Probenpräparation erfolgte ausschließlich mittels Fräsen. Die jeweiligen Positionen der Probenentnahme sind den jeweiligen Bauteilen zugeordnet.

4.3.1 Platte

Produziert werden rechteckige Platten mit den Maßen 250 mm x 90 mm x 3 mm, welche schematisch in Abbildung 18 dargestellt ist. Das Werkzeug verfügt über einen Kaltkanal

und einen Filmanguss. In blau markiert sind die Probekörper für die Computertomografie-Messung. Diese wurden mittels Fräsen aus der Platte entnommen.

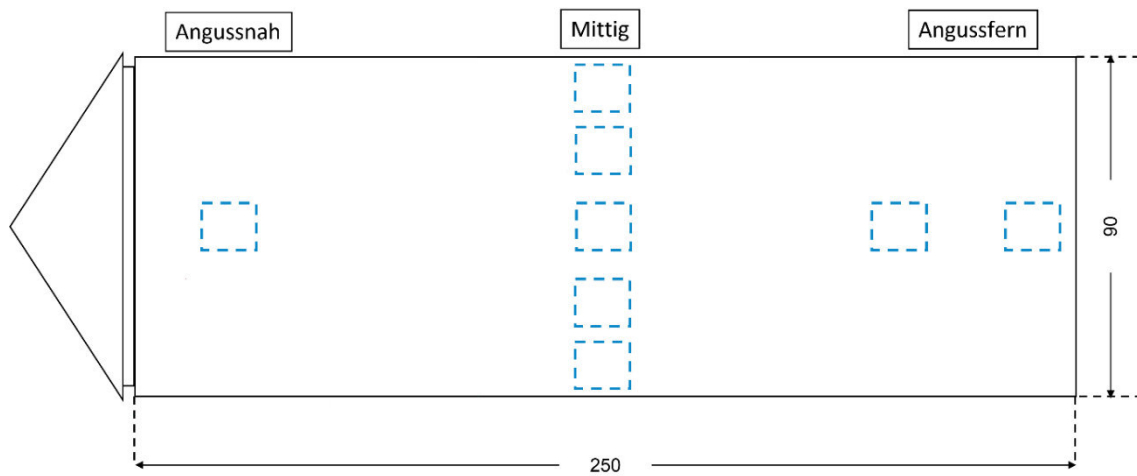


Abbildung 18: Platte mit Maßen, blau markiert sind die Positionen zur Probenentnahme.

4.3.2 Schale

Das Werkzeug (Abbildung 19) besitzt einen Heißkanal und enthält einen angussfern angebrachten Werkzeuginnendrucksensor. Proben für die weitere Charakterisierung der Schaumstruktur werden sowohl angussnah als auch angussfern entnommen (Abbildung 20).

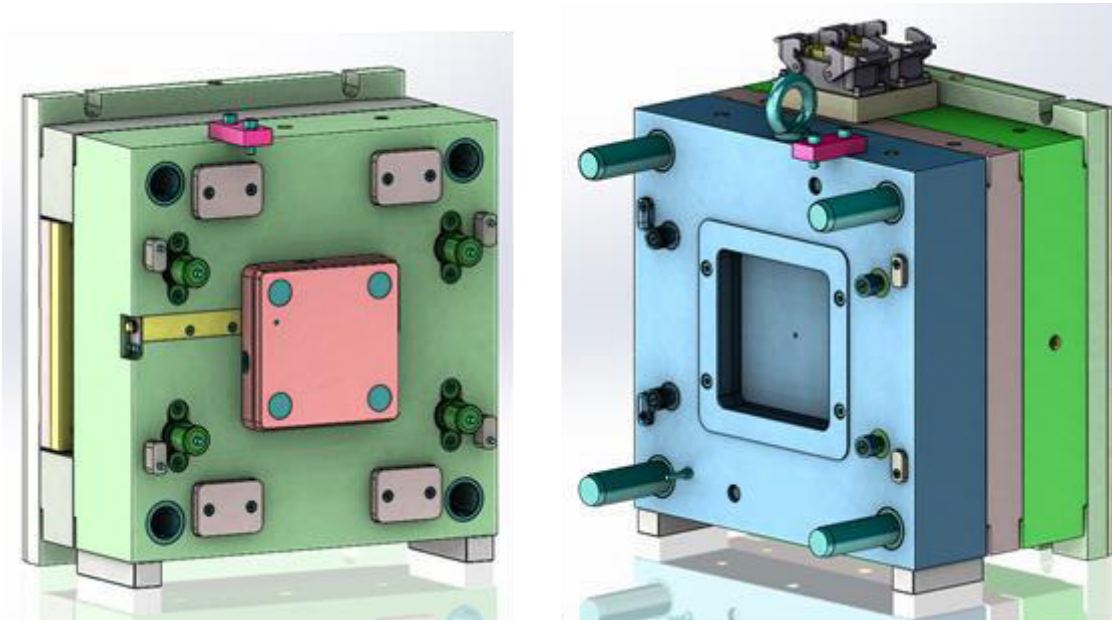


Abbildung 19: Schalenwerkzeug mit Heißkanal.

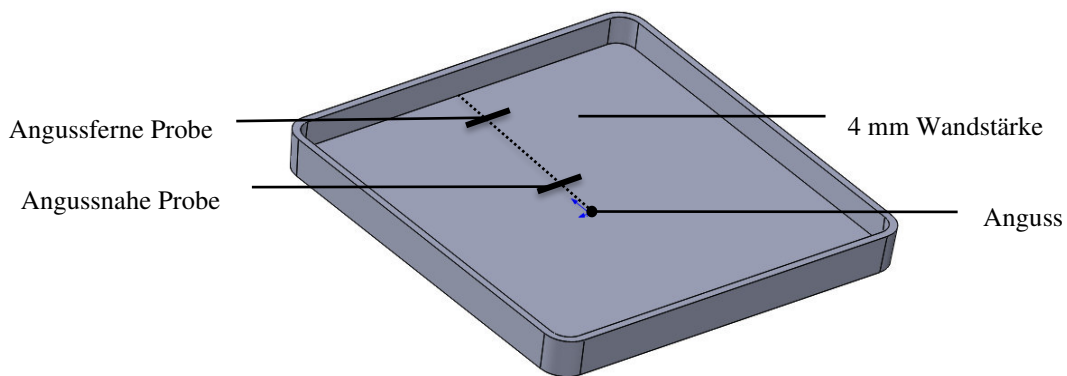


Abbildung 20: Werkzeug: Probekörper Schale.

Werkzeuge, die für das Schäumen geeignet sind, weisen in ihrer Auslegung einige Besonderheiten auf. Einer der kritischsten Faktoren ist das Design des Kaltangusses. Der Fließquerschnitt muss so weit wie möglich reduziert sein, um ein vorzeitiges Aufschäumen zu vermeiden. Andernfalls würden sich die bereits im Anguss gebildeten Poren am Übergang (Engstelle) vom Anguss zum Bauteil scheren, wodurch die Zellen eine elliptische Form bekommen, was in zusätzlichem Maße die Bauteileigenschaften verschlechtert. Zudem sorgt ein geringerer Fließquerschnitt für eine höhere Druckabfallrate der treibmittelbeladenen Schmelze beim Eintritt in die Kavität, wodurch sich die Nukleierungsrate erhöht. Durch die Verwendung eines Heißkanals lässt sich diese Problematik/Komplexität bei bestehenden Werkzeugen (Wechsel vom Kompaktspritzguss zu Schaumspritzgießen) vermeiden. Das gewählte Werkzeug hat den weiteren Vorteil, dass die Schmelze direkt auf eine Wand trifft. Infolgedessen bildet sich die Schmelzefront in alle Raumrichtungen gleichmäßig aus und der Einfluss der Porengröße von der Fließweglänge ist in allen Raumrichtungen in gleicher Weise gegeben. Dies erleichtert die Probenpräparation. Zusätzlich ist das Werkzeug mit einem Werkzeuginnendrucksensor am Fließwegende ausgestattet.

4.3.3 Platte mit geometrischen Besonderheiten

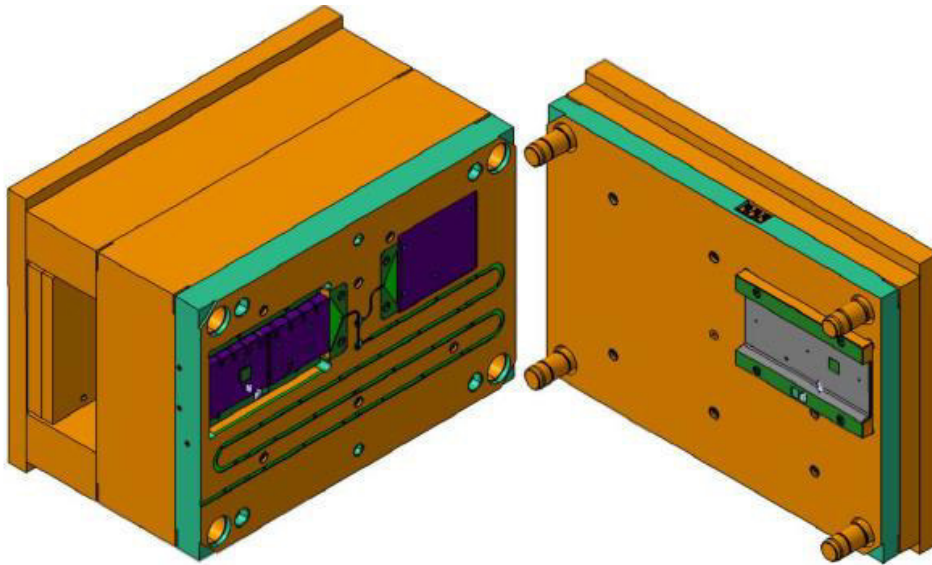


Abbildung 21: Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.

Dieses Werkzeug (Abbildung 21), welches gemeinsam mit Studenten der FH Würzburg-Schweinfurt entwickelt wurde, ermöglicht die Evaluierung der sich ausbildenden Schaumstruktur an geometrischen Besonderheiten. Das Werkzeug entspricht den in der Literatur angegebenen Designvorgaben zur Auslegung von geschäumten Bauteilen. Der Probekörper (Abbildung 22) ermöglicht die Untersuchungen folgender Spezialfälle: Wanddickensprünge von 2 auf 4 mm, Untersuchung der sich ausbildenden Fließfront einer treibmittelbeladenen Fließfront an Durchbrüchen, Ausbildung der Schaumstruktur in Domen bzw. Rippen unterschiedlicher Breite. Zusätzlich ist das Werkzeug mit drei Werkzeuginnendrucksensoren ausgestattet (angussnah, am Wanddickensprung, angussfern), um Rückschlüsse auf das Formfüllverhalten ziehen zu können.

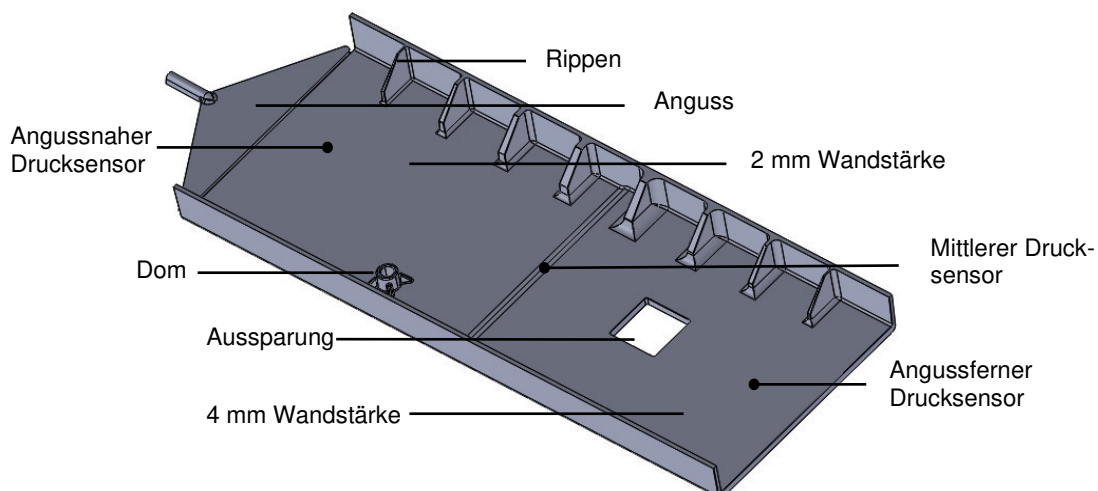


Abbildung 22: Speziell zum Schäumen ausgelegtes Bauteil mit unterschiedlichen Geometrieelementen.

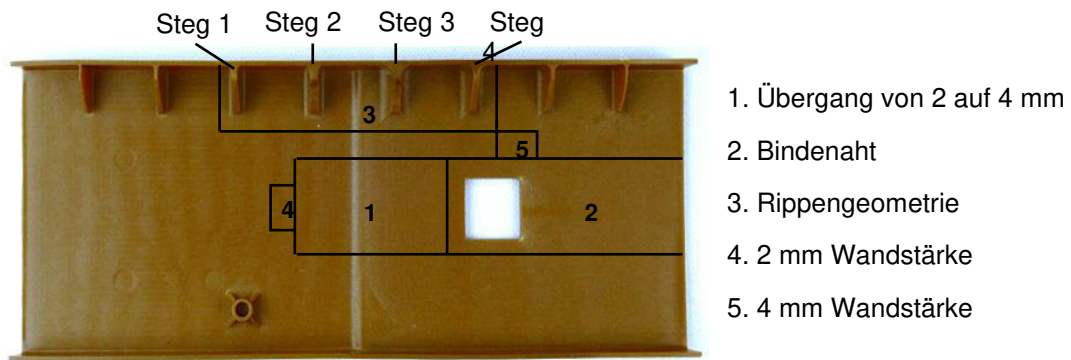


Abbildung 23: Darstellung der für die Computertomografie präparierten Proben.

4.4 Analytische Verfahren

4.4.1 Thermografie

Für die Inline-Thermografiemessung wird eine Wärmebildkamera der Firma Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG vom Typ TIM 640 mit 33°-Optik verwendet. Zur Kommunikation mit der Kamera wird die Software TIM Connect verwendet, die Darstellung der Messergebnisse geschieht über die SKZ eigene Software SKZ TDI V3.6.0.3000323.

Die Kamera ist oberhalb des Werkzeugs installiert. Nach dem Entformen aus dem Spritzgusswerkzeug wird das Formteil von einem Handlingsystem aufgenommen und vor die Kamera gefahren.

Tabelle 8: Wärmebildkamera

Eigenschaft	Name / Wert
Hersteller	Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG
Bezeichnung	TIM 640
Software	TIM Connect
Temperaturmessbereiche (umschaltbar)	-20°C - 100°C, 0°C - 250°C, 150°C - 900°C
Spektralbereich	7,5 - 13 µm
Optische Auflösung	32 Hz@640x480 Pixel oder 125 Hz@640x120 Pixel
Thermische Auflösung	0,1 °C
Objektivbrennweite	f=18,4 mm / 33°-Objektiv

4.4.2 Werkzeuginnendruckmessung

Die präzise Messung des Werkzeuginnendrucks ist beim Spritzgießen von zentraler Bedeutung. Sein Verlauf gibt Auskunft über die Qualität jedes einzelnen Spritzgießteils und dient dazu, den Prozess zu überwachen und eine nachhaltige Qualitätssicherung zu erzielen. Das verwendete Werkzeug enthält je nach Auslegung des Werkzeugs zwischen ein bis drei Drucksensoren. Die Daten geben Auskunft über das Formfüllverhalten der Kavität.

Tabelle 9: Werkzeuginnendrucksensoren

Eigenschaft	Name / Wert
Hersteller	Kistler Instrumente GmbH
Typ	6157BA
Empfindlichkeit	-9,4 Unisens
Druckbereich	0 - 2000 bar
Sensordurchmesser	4 mm

4.4.3 Computertomografie (CT)

Für die CT-Messungen werden zwei Geräte der Firma Wenzel Volumetrik GmbH genutzt. Das Verfahren wird darüber hinaus bei hoher Auflösung auch zur Porenvolumenbestimmung und zur Bestimmung der Faserorientierung über die Bauteilbreite genutzt.

Tabelle 10: Computertomograph 1

Eigenschaft	Name / Wert
Hersteller	WENZEL Group GmbH & Co. KG
Bezeichnung	CT-Workstation exaCT S60
Auflösung	5 µm bis 40 µm

Tabelle 11: Computertomograph 2

Eigenschaft	Name / Wert
Hersteller	WENZEL Group GmbH & Co. KG
Bezeichnung	CT-Workstation exaCT M150
Auflösung	40 µm bis 125 µm

4.5 Versuchsdurchführung

Um den Einfluss von spritzgießbedingten Prozessparametern auf die Schaumstruktur und den damit einhergehenden Qualitätsmerkmalen analysieren zu können, wird ein an Material und Werkzeug individuell angepasster Versuchsplan gewählt. Als

Prozessparameter werden dafür die Einspritzgeschwindigkeit, die Schmelzetemperatur, der Staudruck, die Werkzeugtemperatur, die Dosiergeschwindigkeit sowie der Fluiddurchfluss variiert und ihr Einfluss analysiert. Hinzu kommen die oben aufgeführten Materialvariationen hinsichtlich Basispolymer, sowie Füllstoffart und -gehalt.

4.5.1 Platte

Im Zuge eines klassischen Sternversuchsplans wurden für PA6 GF30 die Prozessparameter: Einspritzgeschwindigkeit, die Schmelzetemperatur, der Staudruck, die Dosiergeschwindigkeit sowie der Fluiddurchfluss untersucht. Wie in Tabelle 12 zu sehen ist, wird für jeden Einflussfaktor neben der Standardeinstellung eine obere sowie eine untere Grenze definiert, welche, mit Ausnahme des Fluiddurchflusses, im gleichen Abstand zum Zentralpunkt liegen. Ausgangspunkt für die Standardwerte sowie die Variationen sind aus der Literatur, SKZ internen Erfahrungen sowie dem Datenblatt des Herstellers entnommen. Die Literaturwerte wurden im Rahmen von Voruntersuchungen validiert und bei Bedarf angepasst.

Tabelle 12. Variation der Prozessparameter.

Prozessparameter	Obere Grenze	Standard	Untere Grenze
Einspritzgeschwindigkeit [ccm/s]	160	120	80
Schmelzetemperatur [°C]	290	275	260
Staudruck [bar]	160	120	80
Dosiergeschwindigkeit [ccm/s]	240	200	160
Fluiddurchfluss [l/Zyklus]	0,1	0,05	0,02

In Tabelle 13 kann der Versuchsplan für die geschäumten Versuchsreihen mit ihren jeweiligen Parameteränderungen betrachtet werden. Die Parameteränderungen sind jeweils fett hervorgehoben.

Tabelle 13: Versuchsplan der geschäumten Bauteile.

Versuchsreihe	Einspritzgeschwindigkeit [ccm/s]	Schmelzetemperatur [°C]	Staudruck [bar]	Fluiddurchfluss [l/Zyklus]	Dosiergeschwindigkeit [ccm/s].
V01	120	275	120	0,06	200
V02	160	275	120	0,06	200
V03	80	275	120	0,06	200

V04	120	290	120	0,04	200
V05	120	260	120	0,06	200
V06	120	275	160	0,07	200
V07	120	275	80	0,05	200
V08	120	275	120	0,1	200
V09	120	275	120	0,02	200
V010	120	275	120	0,05	240
V011	120	275	120	0,07	160

4.5.2 Schale

Die Versuche zum Schäumen von WPC waren Bestandteil des Forschungsvorhabens 20365 N. Da beide Projekte zeitliche Überschneidungen hatten, wurden die Inline-Qualitätsmaßnahmen in diesem Vorhaben mit evaluiert.

Die Prozessparameter Einspritzgeschwindigkeit, Staudruck und Gasbeladung wurden in einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit Zentralpunkt untersucht. Bei drei zu untersuchenden Prozessparametern in zwei Abstufungen (niedrig, hoch) – 2^3 -Versuchsplan - plus Zentralpunkt ergeben sich somit 9 Versuchsreihen je WPC-Rezeptur. Hinzu kommt die Vergleichsprobe für das Kompaktspritzgießen, welche immer mit den Projektparametern: hohe Einspritzgeschwindigkeit und hoher Staudruck gefertigt wurde. Als Nachdruck wurde für alle kompakt gespritzten Proben ein Profil von 500 bar → 300 bar für 20 Sekunden angelegt.

Bei 16 Rezepturen sind somit in Summe 160 Versuchsreihen durchzuführen. Weitere Prozessparameter wie die Schmelztemperatur, Dosierweg, die Begasungszeit und unterschiedliche Formteildicken (2, 4, 6, 8 mm) werden hingegen exemplarisch an einer Zusammensetzung (FV680.003 – PP-Type 1, 30 Gew.-% Holz, fein) untersucht. Die Werkzeugwandtemperatur wird vergleichend für zwei Rezepturen mit niedrigem und hohem Holz-Gehalt (FV680.003, FV680.004 – PP-Type 1, fein) analysiert. Somit ergeben sich 16 zusätzliche Versuchsreihen. Der Einfluss eines zusätzlichen Nukleierungsmittels (Talkum-Masterbatch), Zugabe von jeweils 5 bzw. 10 Gew.-%, wird für alle Rezepturen mit einem Holzgehalt von 30 Gew.-% evaluiert – entsprechend 16 weitere Versuchsreihen. Somit umfasst der Gesamtumfang der Untersuchungen in Abhängigkeit der Prozessparameter, wie in Tabelle 14 visuell dargestellt 192 Versuchsreihen.

Tabelle 14: Versuchsplanung in Abhängigkeit der untersuchten Prozessparameter.

Rezeptur	Einspritzgeschw	Staudruck	Gasbeladung	Schmelze- temperatur	Dosierweg	Begasungszeit	Formteil dicken	WZ- Temp	Nukleierungs mittel
FV680.001									
FV680.002									
FV680.003									
FV680.004									
FV680.005									
FV680.006									
FV680.007									
FV680.008									
FV680.009									
FV680.010									
FV680.011									
FV680.012									
FV680.013									
FV680.014									
FV680.015									
FV680.016									

Weiterführende Versuchsreihen für unterschiedliche Rezepturen wurden durchgeführt in Hinblick auf die Variation der Gewichtseinsparung (5, 10, 20 und 30 Gew.-%), der Kombination aus physikalischen und chemischen (endotherm, sowie exotherm) in variierenden Zusatzmengen, Untersuchungen zum Fließverhalten hochgefüllter Rezepturen und die Bewertung der Schaumstruktur in Abhängigkeit der Bauteilauslegung an einem separaten Spritzgießwerkzeug, sowohl mit chemischen, physikalischen sowie chemischen + physikalischen Treibmitteln. Über die Dauer des Projekts ergibt sich eine Gesamtsumme von mehr als 250 Versuchsreihen.

Die Eckdaten der Prozessparameter sind wie in Tabelle 15 angegeben:

Tabelle 15: Eckdaten der gewählten Prozessparameter.

	Minimum	Zentralpunkt	Maximum
Dosiergeschwindigkeit		200 ccm/s	
Fluidmenge	0,15 l/ Zyklus	0,33 l/ Zyklus	0,5 l/ Zyklus
Dosierweg Eingassung	20 – 50 ccm	20 – 90 ccm	60 – 90 ccm
Staudruck	60 bar	90 bar	120 bar
Einspritzgeschwindigkeit	80 ccm/s	120 ccm/s	160 ccm/s
Umschaltpunkt		8 ccm	
Kühlzeit		30 s	
Temperatur Werkzeug	30 °C	40 °C	50 °C
Temperatur Zylinder:	- 15 °C	1 – 180; 2 – 180; 3 – 175; 4 – 170 °C	+ 15 °C

Temperatur Düse	- 15 °C	175 °C	+ 15 °C
Temperatur Einzug		30 °C	
Temperatur Heißkanal	- 15 °C	175 °C	+ 15 °C

Das Dosiervolumen wurde für jede Versuchsreihe individuell dahingehend angepasst, dass eine Formteillfüllung bei minimalem Gewicht und somit einem maximalen Aufschäumgrad generiert werden konnte. Dies erlaubt insbesondere mit Blick auf die Auswahl der Rezepturbestandteile interessante Ansatzpunkte für neue Erkenntnisse. Der Nachdruck beim Schäumen wird auf ein Minimum reduziert. Abhängig vom verwendeten Material und den eingestellten Prozessparametern wird die Nachdruckhöhe so eingestellt, dass die expandierende Polymerschmelze beim Einspritzen nicht in die Plastifiziereinheit zurückgedrückt wird. Für die Versuchsreihen wurde ein Nachdruckprofil zwischen 50 – 80 bar für eine Dauer von 2 Sekunden gewählt.

4.5.3 Platte mit geometrischen Besonderheiten

4.5.3.1 Statistischer Versuchsplan WPC

Neben der Untersuchung des Einflusses von Einspritzgeschwindigkeit, Staudruck und Gasmenge auf die Schaumstruktur, kam es auch zu einem Vergleich zwischen chemischen und physikalischen Treibmitteln, sowie der Kombination beider. Die Untersuchungen erfolgten in Form eines vollfaktoriellen 2^3 – Versuchsplans mit Zentralpunkt.

Für die chemischen (CBA) und physikalischen (PBA) Treibmittel ergeben sich somit jeweils 9 Versuchsreihen. Des Weiteren werden 4 Reihen mit kombinierter Gasmenge aus physikalischem und chemischem Treibmittel gespritzt. In Tabelle 16 bis

Tabelle 18 sind die Versuchspläne aufgelistet.

Tabelle 16: Versuchsplan CBA

Versuchsreihen CBA	V1	V2	V3	V4	ZP CBA	V6	V7	V8	V9
Gasmenge [Gew%]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5 & 3	3	3	3	3
Staudruck [bar]	60	60	120	120	90	60	60	120	120
Einspritzgeschwindigkeit [ccm/s]	80	160	80	160	120	80	160	80	160

Tabelle 17: Versuchsplan PBA

Versuchsreihen PBA	V11	V12	V13	V14	ZP PBA	V16	V17	V18	V19
Gasmenge [l/Zyk]	0,26	0,26	0,26	0,26	0,33	0,4	0,4	0,4	0,4

Staudruck [bar]	60	60	120	120	90	60	60	120	120
Einspritzgeschwindigkeit [ccm/s]	80	160	80	160	120	80	160	80	160

Tabelle 18: Versuchsplan der Kombination aus CBA und PBA

Versuchsreihen CBA & PBA	V21	V22	V23	V24
Gasmenge CBA [Gew%]	1,5	1,5	1,5	1,5
Gasmenge PBA [l/Zyk]	0,15	0,15	0,15	0,15
Staudruck [bar]	60	60	120	120
Einspritzgeschwindigkeit [ccm/s]	80	160	80	160

4.5.3.2 Statistischer Versuchsplan PP 20 % Talkum; PA6 GF30; ABS

Die Untersuchungen erfolgten auf Grund der Menge der Parameter und gewählten Levelstufen in Form eines Sternversuchsplans, siehe Tabelle 19. Das Dosiervolumen wurde für die geschäumten Bauteile jeweils um 10 sowie 20 Gew.% reduziert.

Tabelle 19: Versuchsplan für PP 20 % Talkum; PA6 GF30; ABS für Platte mit geometrischen Besonderheiten

	Level 1	Level 2	Zentralpunkt	Level 4	Level 5	Level 6	Level 7	Level 8
Einspritzgeschwindigkeit [ccm/s]	60	90	120	150	180			
Staudruck [bar]	60	80	100	120	140	160	180	200
Werkzeugtemperatur [°C]	-20	-10	X*1	+10	+20			
Schmelzetemperatur [°C]	-30	-15	X*2	+15	+30			
Treibfluidgehalt [l/Zyklus]		0,1	0,25	0,5	1			
Dosiergeschwindigkeit [ccm/s]		50	150	200	250			

Der Zentralpunkt für die Werkzeugtemperatur wurde für die jeweiligen Materialien wie folgt definiert: PA6 – 90 °C; PP – 40 °C; ABS – 40 °C. Der Zentralpunkt der Schmelztemperatur war entsprechend der Datenblätter: PA6 – 275 °C; PP – 240 °C; ABS – 240 °C.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Präparation von Bruchflächen geschäumter Bauteile und deren Bildverarbeitung

5.1.1 Präparation

Zur Präparation der Probenquerschnittsfläche wurde für erste Vorversuche ein Ausschnitt aus dem Boden des Formteils inklusive angrenzender Seitenwand grob durch Sägen, Ritzen und Brechen herausgetrennt. Die Stirnfläche des Bodens wurde dann mit einem scharfen Messer abgetragen, bis eine ebene Fläche mit sichtbarer Schaumstruktur entstand. Prinzipiell empfiehlt sich die Präparation mittels Fräsen zur Bewertung der Schaumstruktur und Bestimmung mechanischer Kennwerte. Andere Präparationsmethoden wie Sägen oder Wasserstrahlschneiden bedingen ein Verschmieren an den Stirnflächen, wodurch Poren verschlossen werden und die Messergebnisse überhöht sind. Aus dem gleichen Grund ist es nicht empfehlenswert Prüfkörper wie Zug- und Biegestab direkt zu spritzen, sondern immer aus einer größeren Platte heraus zu präparieren.

Bei den Proben wurde dann versucht, die angeschnittenen Schaumzellen mit Farbe zu füllen, um die Poren besser sichtbar zu machen. Dabei kamen in den Vorversuchen mit der weißen ABS-Probe eine rote und blaue Acrylfarbe, ein schwarzer Acrylmalstift sowie orange Tafelkreide zum Einsatz (siehe Abbildung 24 und Abbildung 25). In allen Fällen wurde das Farbpigment mit dem Finger in die Hohlräume gerieben und anschließend die Schnittfläche wieder sauber gewischt.



Abbildung 24: Porenfüllung mit Acrylfarbe



Abbildung 25: Porenfüllung mit Tafelkreide.

Die Aufnahmen wurden im Auflicht mit 2400 DPI auf einem Flachbettscanner (Canon CanoScan 9000F) gemacht. Ebenso wurde ein einfaches USB-Mikroskop mit 250-facher Vergrößerung ausprobiert (siehe Abbildung 26). Dessen Ausschnitte sind bei formatfüllender Ansicht auf die Dicke der Wand jedoch sehr klein, sodass nur wenige Poren sichtbar sind. Für eine statistisch belastbare Aussage müssten hier auf jeden Fall mehrere Aufnahmen von unterschiedlichen Stellen gemacht werden. Für den Scan gilt dies trotz der wesentlich größeren Porenzahl (in den folgenden Auswertungen meist im Bereich von 3000 Poren oder mehr) letztendlich auch, wenn die Porengröße und -verteilung sehr unregelmäßig ist und über die Fließweglänge schwankt.

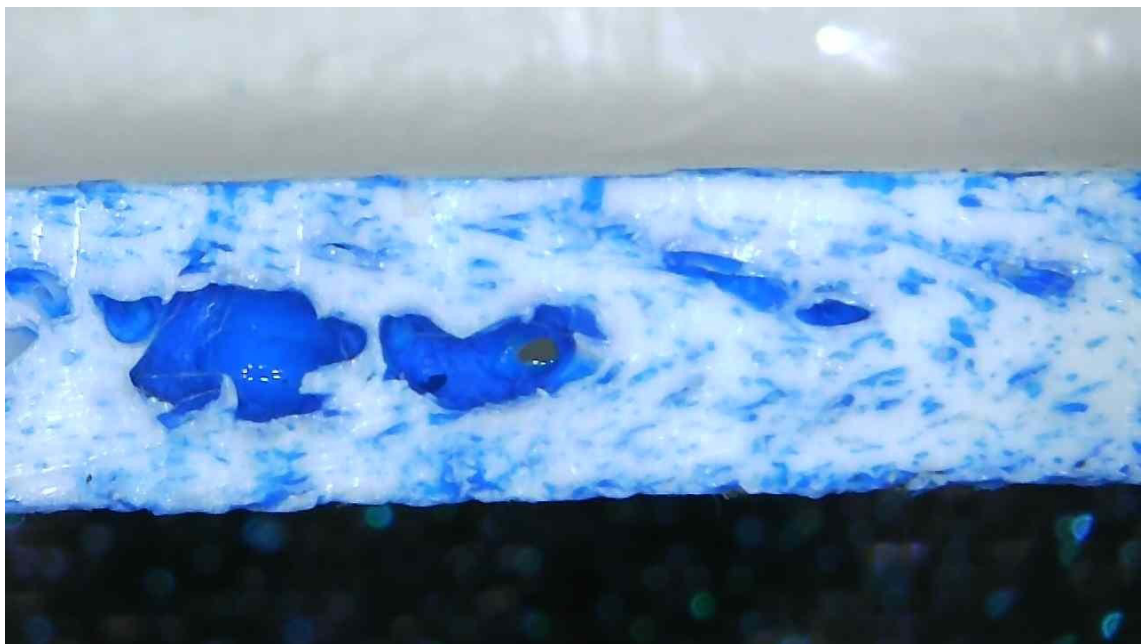


Abbildung 26: Mikroskopieaufnahme des Abschnitts mit blauer Farbfüllung

Ebenso gilt für beide Verfahren, dass sie bezüglich der optischen Auflösung, also dem Vermögen, nahe beieinanderliegende Details noch sichtbar zu trennen, bei den kleinsten Poren der Proben an der Grenze angelangt sind. Hier wären nochmals stärker vergrößerte Mikroskopieaufnahmen wünschenswert, die auch die kleinsten Poren noch mit mehreren Bildpunkten erfassen. Da mit steigender Vergrößerung gleichzeitig die Größe des sichtbaren Ausschnitts sinkt, müsste hier aber ein Mikroskop verwendet werden, das über einen motorisch gesteuerten Tisch die gesamte Probe abfährt, dabei viele Einzelaufnahmen macht und diese schließlich zu einem großen Gesamtbild zusammensetzt. Nur über einen solchen Weg lassen sich höchste Detailauflösungen mit einem großen Probenausschnitt kombinieren.

Ein Problem bei der Probenaufbereitung ist die vollständige Füllung großer Poren ohne Luftblasen. Bei kleinen, flachen Poren besteht dagegen die Gefahr, dass beim Sauberwischen der Schnittfläche die Farbe wieder ausgespült wird und die Pore daher unsichtbar bleibt. Da das trockene Pigment keine Haftung zum Polymer aufbaut, sind diese Problem bei der Kreide größer, die sich sonst eher einfacher handhaben lässt. Siehe hierzu vergleichend Abbildung 27 und Abbildung 28.



Abbildung 27: Scan einer ABS-Probe mit Kreide als Porenfüllung



Abbildung 28: Scan einer ABS-Probe mit Acrylfarbe als Porenfüllung

5.1.2 Bildverarbeitung

Die Auswertung der Porengröße und -verteilung erfolgte über die SKZ-eigene Software FiVer. Diese dient eigentlich zur Längenanalyse veraschter Fasern aus verstärkten Kunststoffbauteilen. Zur Filterung unerwünschter Staubanteile und Fremdpartikel im Bild enthält sie jedoch auch einen Blobfilter, der zusammenhängende Pixelhaufen (BLOB = Binary Large Object) hinsichtlich ihrer Größe und Geometrie bewerten kann. Die neueste, noch unveröffentlichte Version bietet in diesem Schritt die Möglichkeit, die Kennwerte der gefundenen Blobs als Tabelle zu exportieren.

Damit die lediglich 5-17 μm durchmessenden Glas- und Kohlefasern auch über mehrere Zentimeter hinweg sauber verfolgt werden können, muss das Programm mit sehr großen, hochaufgelösten Scans bis in den Gigapixelbereich umgehen können. Zur Datenreduktion werden daher ausschließlich Graustufenbilder mit 256 Helligkeitswerten verarbeitet, was bei den (teil)transparenten oder schwarzen Fasern keinen Nachteil gegenüber Echtfarbenbildern mit dem dreifachen Datenvolumen darstellt.

Bei der Hervorhebung der Poren lassen sich jedoch auch Farbkontraste erzeugen, die die Trennung vom umgebenden Polymer einfacher machen als ein reiner Helligkeitskontrast. So kann eine rote Füllfarbe die gleiche Helligkeit wie der graue Kunststoff des Bauteils aufweisen, obwohl sich die roten, blauen und grünen Farbanteile deutlich unterscheiden. Falls die Auswertung über eingefärbte Poren in einem industrienahen Forschungsvorhaben weiterverfolgt werden soll, könnte hier eine kleine Zusatzsoftware entwickelt werden, die den Farbkontrast in einen maximalen Helligkeitskontrast umrechnet. Für die orientierenden Versuche in diesem Vorhaben wurde stattdessen für die folgenden Auswertungen weiße und schwarze Acrylfarbe verwendet, die gegenüber den ebenfalls verschiedenen eingefärbten hellen und dunklen Proben bereits einen guten Helligkeitskontrast erreichen, wie Abbildung 29 belegt.

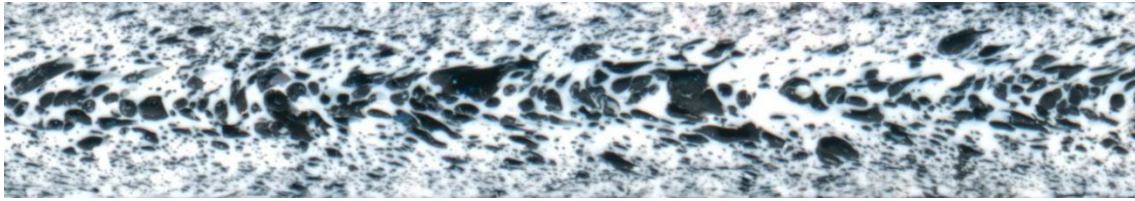


Abbildung 29: Ausschnitt der weißen ABS-Probe mit schwarz eingefärbten Poren

Als Vorbereitung für die anschließende Blobanalyse muss zunächst für jedes Pixel entschieden werden, ob es zu einer Pore oder zum umgebenden Kunststoffmaterial gehört. Da sich die Poren durch die andere Helligkeit abheben, geschieht diese Trennung durch die interaktive Festlegung einer Helligkeitsschwelle im Schritt der sogenannten Binarisierung. Abbildung 30 zeigt das binarisierte Bild.

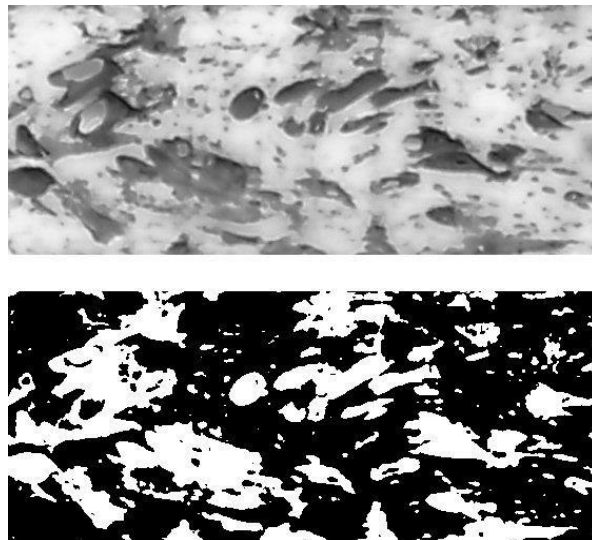


Abbildung 30: Originalbild (oben) und die erkannten, weiß markierten Poren (unten)

In der Blobanalyse werden alle Pixel, die sich unmittelbar berühren (auch diagonal), zu jeweils einem Pixelhaufen zusammengefasst und dessen Kennwerte bestimmt. Dazu gehören, neben der maximalen Ausdehnung in horizontaler und vertikaler Richtung, insbesondere auch Fläche und Umfang. Zudem können bei stabförmigen oder runden Geometrien über Ähnlichkeitsmodelle auch deren durchschnittliche Länge und Breite bzw. Durchmesser zumindest abgeschätzt werden. Diese Daten werden dann für jeden gefundenen Blob in eine Tabelle eingetragen (siehe Abbildung 31) und auf dem Datenträger abgespeichert. Mit einer Tabellenkalkulation können die Kennwerte dann weiter statistisch ausgewertet werden.

1.._01_ABS_2022-10-24_14-54-37_Blobs.txt

0	10	20	30	40	50	60	70
1	=====						
2	Column 1: Extension X [μm]						
3	Column 2: Extension Y [μm]						
4	Column 3: Area [μm^2]						
5	Column 4: Perimeter [μm]						
6	Column 5: Length [μm]						
7	Column 6: Width [μm]						
8	Column 7: Length/width						
9	=====						
10	4921,3	296,3	430668	13762,6	6818,1	63,2	107,9
11	52,9	52,9	2240	184,2	72,4	34,5	2,1
12	486,8	476,3	99799	2290,2	1050,1	95,0	11,0
13	592,7	508,0	109543	2688,2	1256,9	87,2	14,4
14	1312,3	656,2	262769	5998,6	2909,0	90,3	32,2
15	317,5	95,3	10977	738,7	336,8	32,6	10,3
16	105,8	42,3	3584	262,5	92,5	38,8	2,4
17	804,3	190,5	73701	2104,0	976,5	75,5	12,9
18	772,6	264,6	96326	2118,8	958,9	100,5	9,5

Abbildung 31: Ausschnitt aus der Tabelle mit den Blob-Kennwerten

Wenn es um Größenverteilungen geht, dann sind Histogramme eine übliche Form der graphischen Darstellung. Dabei wird der gefundene Größenbereich in eine endliche Zahl gleich großer Intervalle (Klassen) eingeteilt und abgezählt, wie viele Blobs in das jeweilige Intervall fallen.

Bei der Auswertung der Poren führt die Zahl sehr großer, miteinander verbundener Porencluster dazu, dass eine extreme Spreizung zwischen wenigen sehr großen und vielen sehr kleinen Poren besteht. Die Poren in diesen Clustern sind möglicherweise noch durch dünne Membranen getrennt, jedoch können diese vom Scanner optisch nicht mehr aufgelöst werden. In der Folge lässt sich kaum eine sinnvolle Klassenbreite festlegen, die für beide Enden des Größenspektrums gleichermaßen geeignet ist. Eine Logarithmierung der horizontalen Größenachse, evtl. sogar mit logarithmisch äquidistanten Klassen, könnte hier Abhilfe schaffen. Allerdings ist die Interpretation solch modifizierter Histogramme mit nichtlinearen Skalierungen deutlich schwieriger, weshalb sie möglichst vermieden werden.

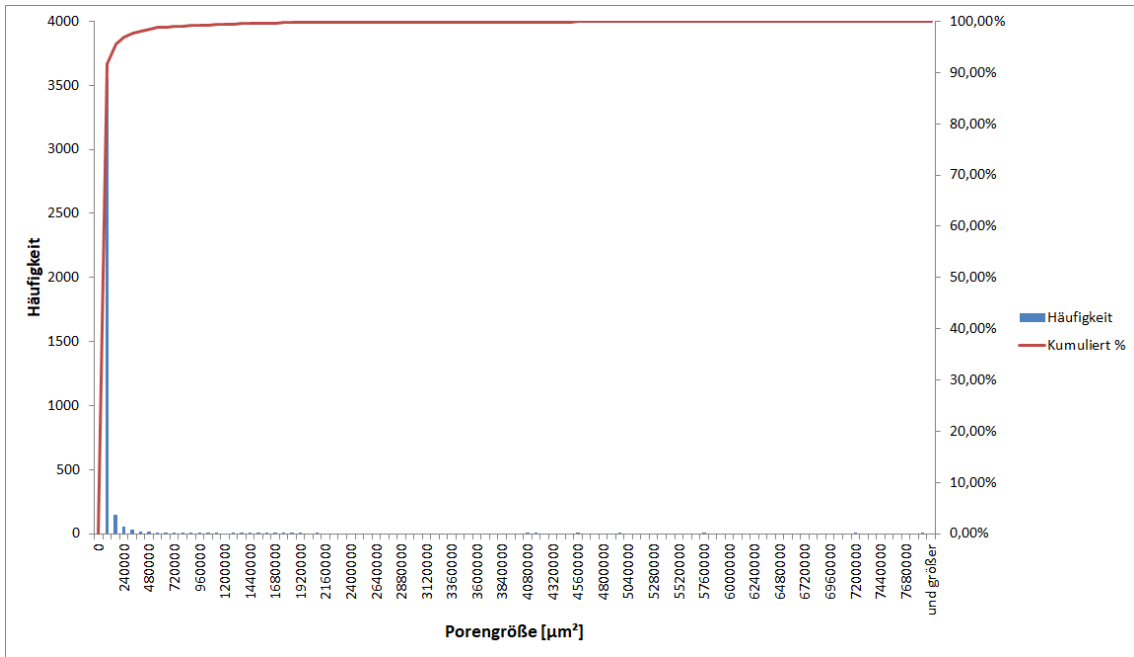


Abbildung 32: Histogramm der Porengrößenverteilung für den gesamten Größenbereich

Die wenigen großen Porencluster werden in der Häufigkeit nicht sichtbar, gleichzeitig führt die große Klassenbreite zum Verlust der Details bei den kleinen Poren, wie Abbildung 32 verdeutlicht. Auf einen Skalenbereich bis 50.000 µm² Porenfläche beschränkt (Abbildung 33), verbessert sich die Auflösung bei den kleinen Poren erheblich und es wird ein exponentieller Abfall der Porenanzahl über der Größe sichtbar.

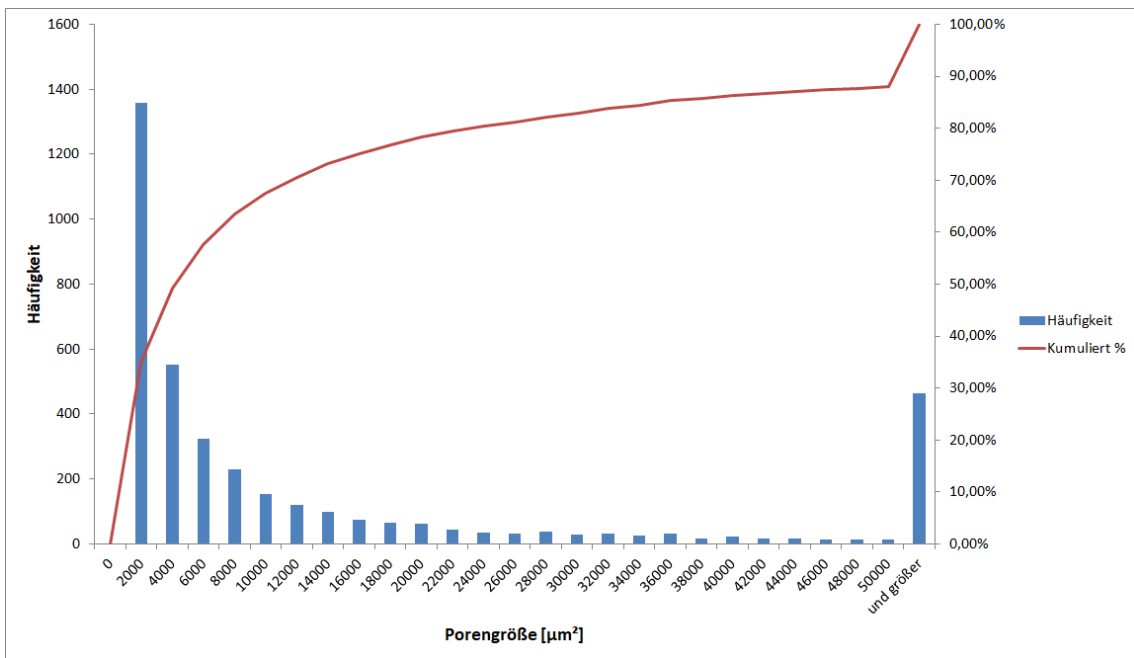


Abbildung 33: Histogramm der Porengrößenverteilung für einen Skalenbereich bis 50.000 µm²

Einzelne Kennwerte, wie z.B. die mittlere Porengröße, lassen sich aus der Tabelle natürlich ebenfalls errechnen. Das Auftreten größerer Porencluster, deren möglicherweise doch vorhandene Trennwände nicht erfasst werden, kann den Mittelwert jedoch stark verzerren. Eine sehr wichtige Größe, die dieses Problem glücklicherweise nicht betrifft, ist dagegen die zweidimensionale, flächige Porosität, also der prozentuale Flächenanteil der Poren bezogen auf die Gesamtfläche der Probe. Letztere ergibt sich aus der Pixelanzahl und der Scanauflösung. Bei 2400 DPI werden in jeder Richtung 2400 Bildpunkte pro Inch (25,4 mm) erfasst, was zu einer Pixelgröße von $10,58 \mu\text{m} \times 10,58 \mu\text{m} = 112,0 \mu\text{m}^2$ führt.

5.1.3 Ergebnisse

5.1.3.1 ABS

Das weiße ABS ergibt in Kombination mit schwarzer Acrylfarbe einen hohen Kontrast der Poren, welche zudem ein deutlich sichtbares Porenvolumen aufzeigen.

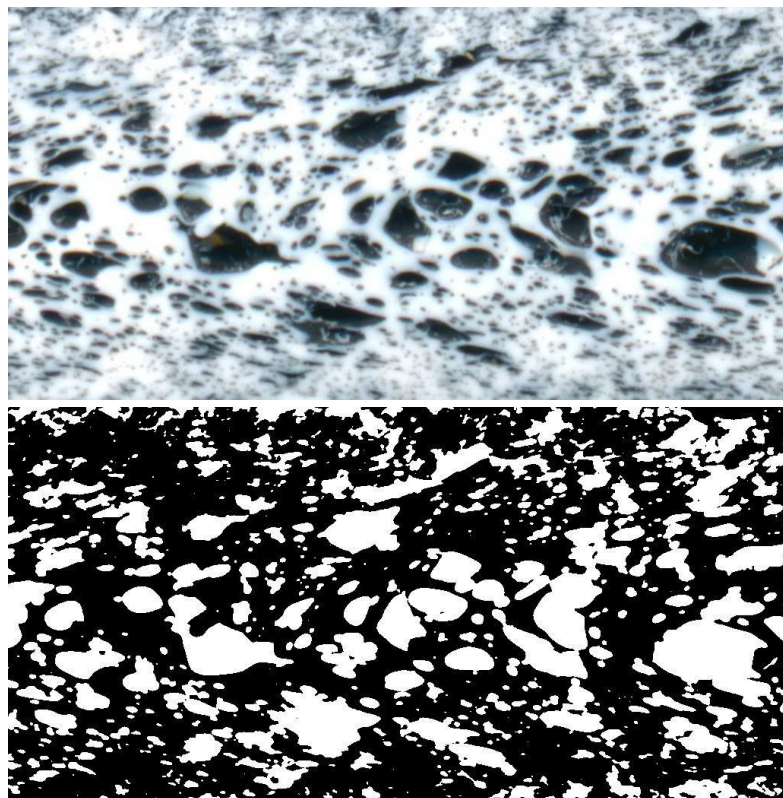


Abbildung 34: Ausschnitt aus dem Scan der ABS-Probe (oben) und erkannte Poren (unten)

Da das Programm weiße Objekte vor einem schwarzen Hintergrund erwartet, muss bei dieser Farbkombination das Bild zunächst invertiert, also das Negativ erzeugt werden (siehe Abbildung 34). Bei der Festlegung der Helligkeitsschwelle zur Trennung zwischen Poren und Polymer treten ähnliche Probleme auf, wie sie auch bei der Faserlängenanalyse bekannt sind. Die großen Poren nehmen viel Farbe auf und heben sich entsprechend stark ab. Die kleineren Poren sind dagegen nur leicht dunkler als der weiß eingefärbte

Kunststoff. Will man auch diese erfassen, muss die Schwelle schon recht nahe an die Helligkeit des Polymers herangerückt werden. In der Folge verschwimmen die Konturen der großen Poren immer mehr, bis sich die Ränder benachbarter Poren berühren und diese zu Porenclustern verschmelzen. Abbildung 35 und Abbildung 36 verdeutlichen dieses Problem.

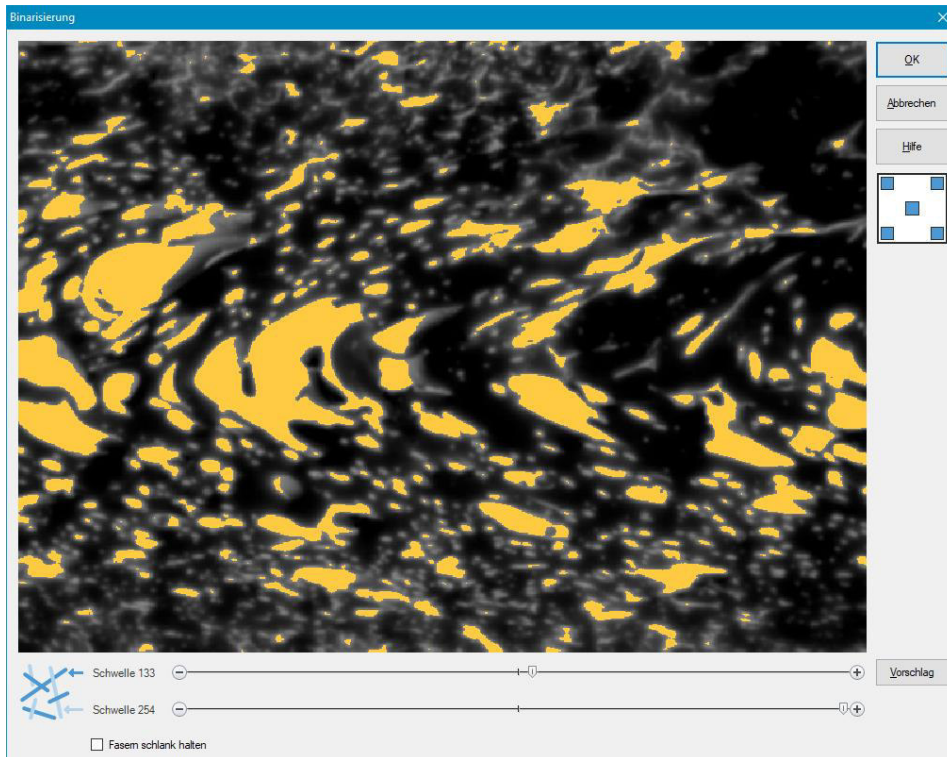


Abbildung 35: Eine hohe Schwelle sorgt für scharf abgetrennte große Poren. Kleinere Poren werden jedoch nicht vollständig erfasst.

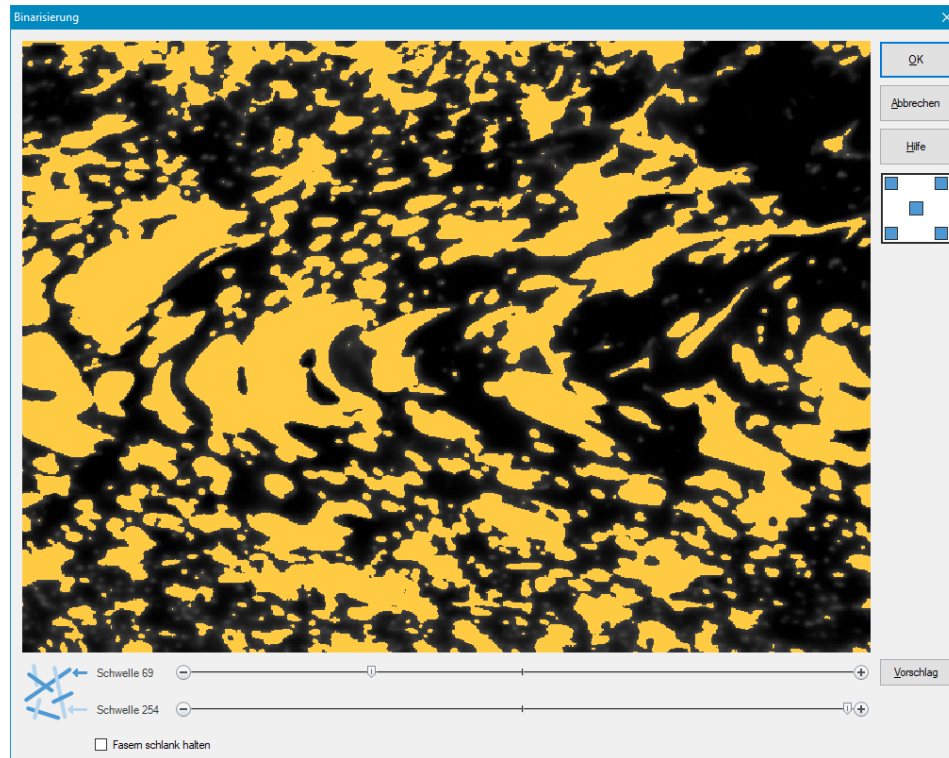


Abbildung 36: Die niedrigere Schwelle erfasst auch die kleinen Poren, jedoch verschmelzen viele große Poren und ihre Fläche wird überbewertet.

Mit einer Schwelle, die zumindest den Großteil der kleinen Poren miterfasst, ergibt sich für das ABS ein Porenanteil von ca. 42,9 %.

5.1.3.2 ABS, Variation des Staudrucks

Verglichen wurde hierfür die Probekörper von ABS mit einem Staudruck von 80 bar und einem Staudruck von 140 bar. Beide Bilder zeigen nahe der Wandgrenze im Bereich der höchsten Schergeschwindigkeit eine durchgehende Spur sehr kleiner, langgezogener Poren.

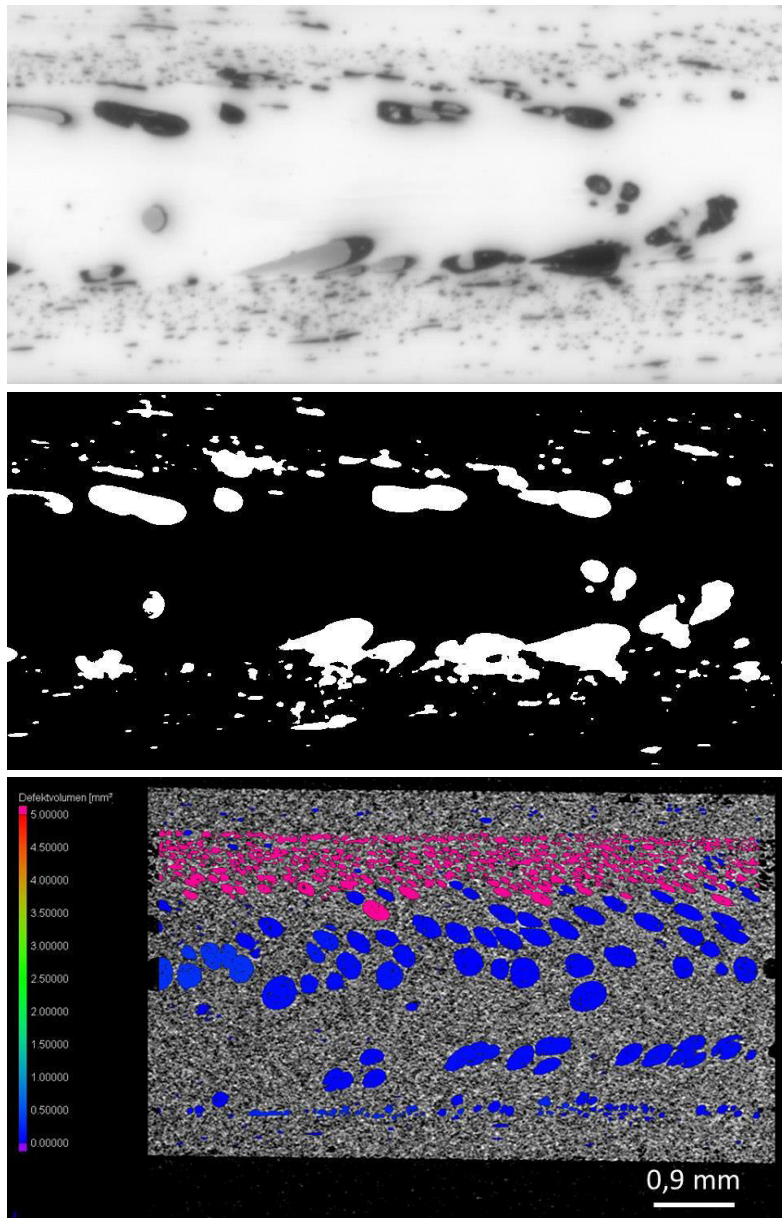


Abbildung 37: Ausschnitt aus dem Scan der ABS-Probe mit 80 bar Staudruck (oben) und erkannte Poren (Mitte); Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten)

Diese sind wegen ihrer Größe nur sehr blass im Scan zu sehen und lassen sich erst erfassen, wenn die Helligkeitsschwelle so stark verschoben wird, dass die größeren Poren in der Wandmitte bereits großflächig miteinander verschmelzen. Bei der moderateren Kompromisseinstellung der nachfolgenden Bilder bleibt dagegen ein nicht unerheblicher Teil unerkannt, dafür sind die großen Poren schärfer abgegrenzt.

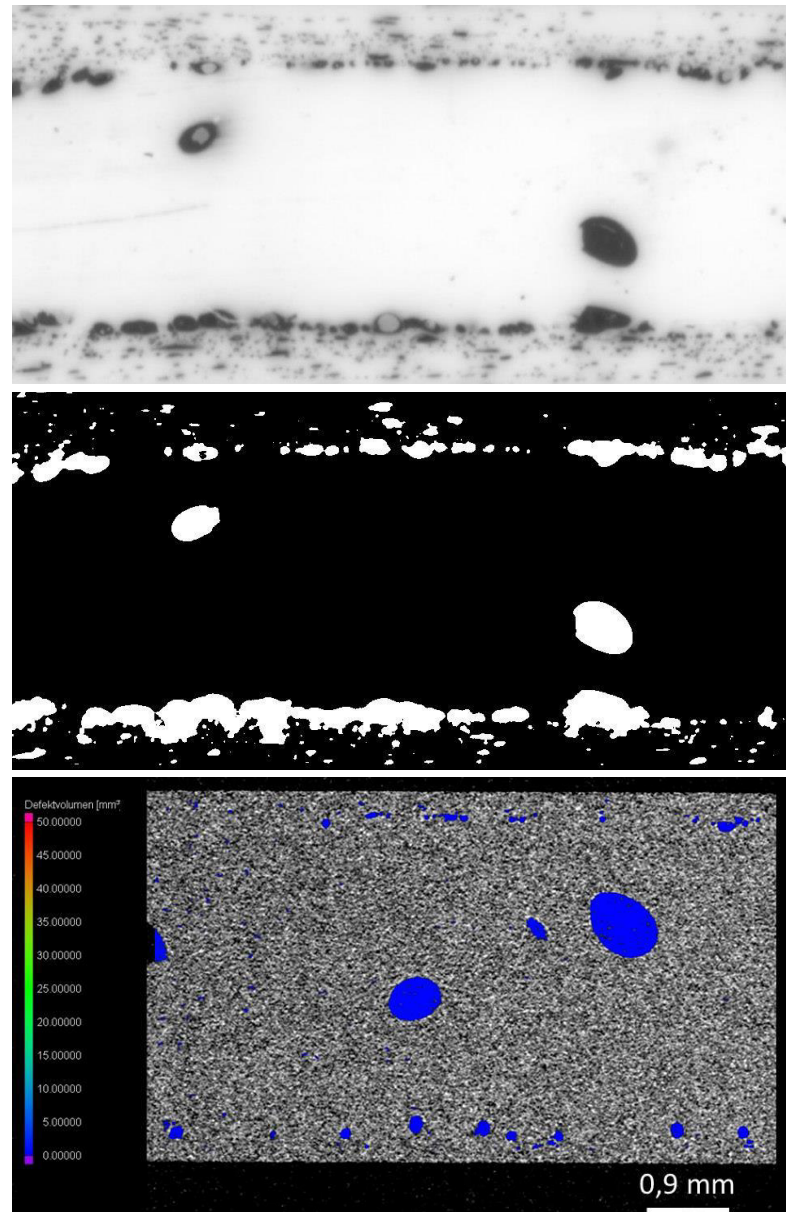


Abbildung 38: Ausschnitt aus dem Scan der ABS-Probe mit 140 bar Staudruck (oben) und erkannte Poren (Mitte), Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten)

Die mit 80 bar Staudruck hergestellte Probe hat keine so scharfe Unterscheidung zwischen Randschicht und Wandmitte (Abbildung 37). Zudem ist die Randschicht dicker und sie geht mit einzelnen größeren Poren in die Probenmitte über. Bei 140 bar Staudruck (Abbildung 38) trennt dagegen jeweils eine Linie aus mittelgroßen Poren den schmalen Randbereich scharf gegen die Wandmitte ab, die selbst nur noch vereinzelt Poren enthält.

Bei identischen Scanbedingungen und gleicher Helligkeitsschwelle zur Trennung zwischen Poren und Polymer erreicht die Probe bei 140 bar trotzdem mit ca. 19,6 % eine etwas höhere Porosität als die Probe bei 80 bar (ca. 16,1 %). Da besonders beim hohen Staudruck viele der Poren in der Scherzone bereits optisch zu zusammenhängenden

Porenclustern verschmelzen, macht ein Vergleich der Größenverteilung an dieser Stelle leider keinen Sinn mehr.

5.1.3.3 PP mit Talkum

Für das bereits schwarz eingefärbte PP wurde weiße Acrylfarbe als Füllung der Poren ausgewählt. Trotzdem ist der Kontrast geringer als beim ABS. Zudem enthält das Bild viele kleine weiße Punkte, die ebenfalls Poren sein könnten. Die optische Auflösung des Scanners kommt hier jedoch an ihre Grenzen, sodass Geometrie und Größe dieser Strukturen nicht eindeutig bestimmt werden können. Die entsprechenden Aufnahmen sind in Abbildung 39 zusammengestellt.

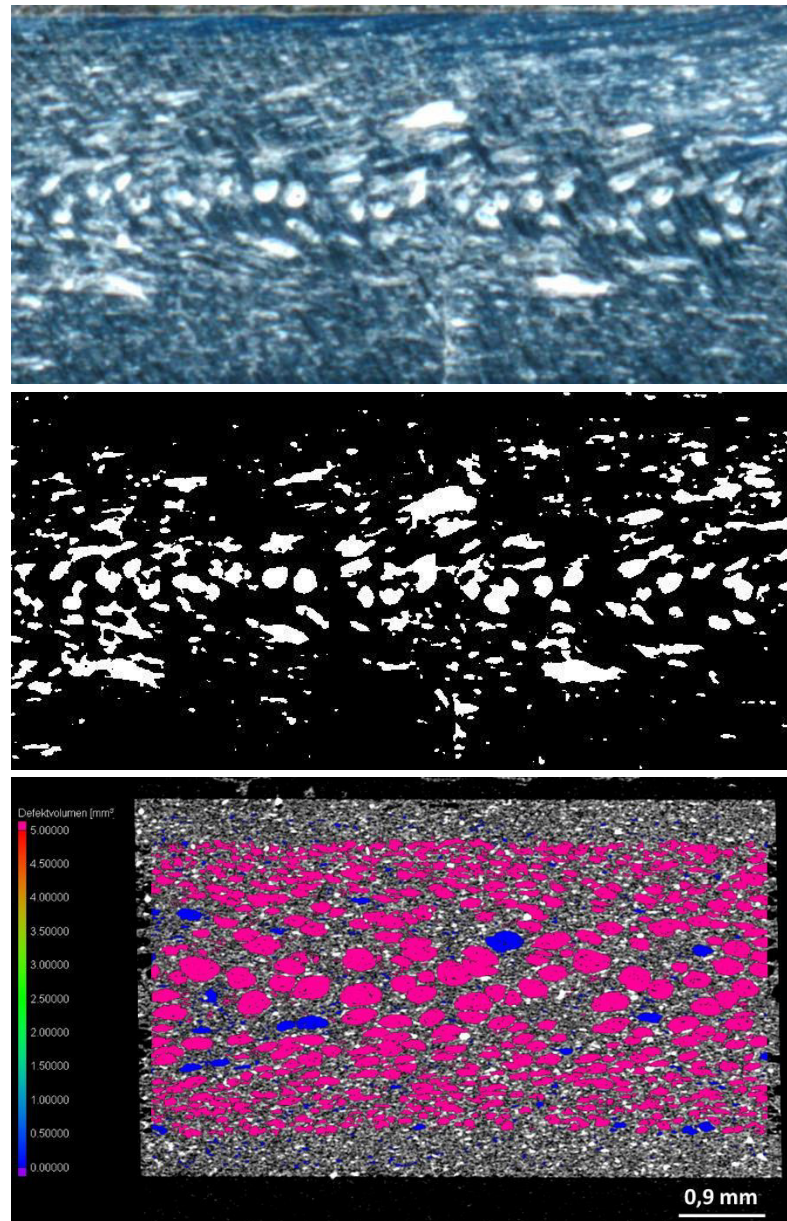


Abbildung 39: Ausschnitt aus dem Scan der PP-Probe (oben) und erkannte Poren (Mitte), Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten)

Für den im Ausschnitt gezeigten Schwellwert beträgt der Porenanteil für den gesamten, 9143 x 336 Pixel großen Probenscan ca. 37,2%. Der Ausschnitt mit relativ wenigen Poren ist dabei nur bedingt repräsentativ, da sich die Porengröße und -verteilung lokal deutlicher verändern als beim ABS, vgl. Abbildung 40.

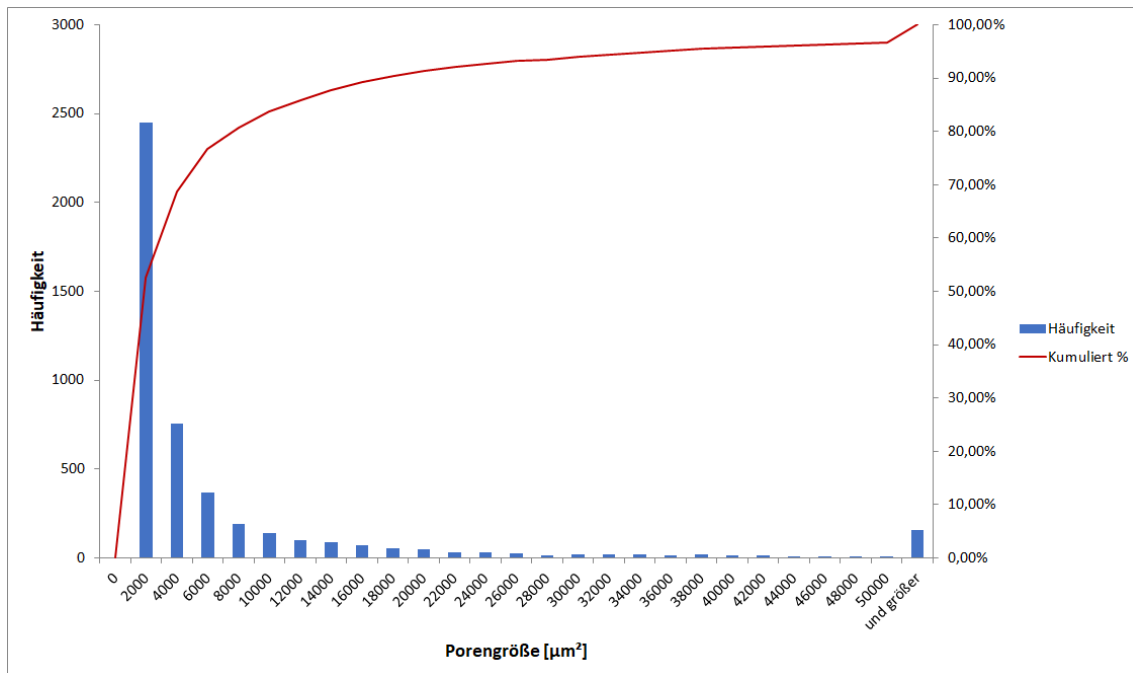


Abbildung 40: Histogramm der Porengrößenverteilung für einen Skalenbereich bis 50.000 µm²

5.1.3.4 WPC

Durch die Holzfasern hat der Werkstoff eine sehr unregelmäßige Textur auf Basis einer hellbraunen Grundfarbe. Als Füllfarbe für die Poren wurde daher erneut schwarz gewählt. Wie im folgenden Bild (Abbildung 41) zu sehen ist, tritt dabei jedoch das Problem auf, dass die Holzbestandteile ebenfalls Farbe aufsaugen, die nicht mehr abgewischt werden kann. Es ist daher nicht auszuschließen, dass manche dunkleren Bereiche keine wirklichen Poren darstellen.

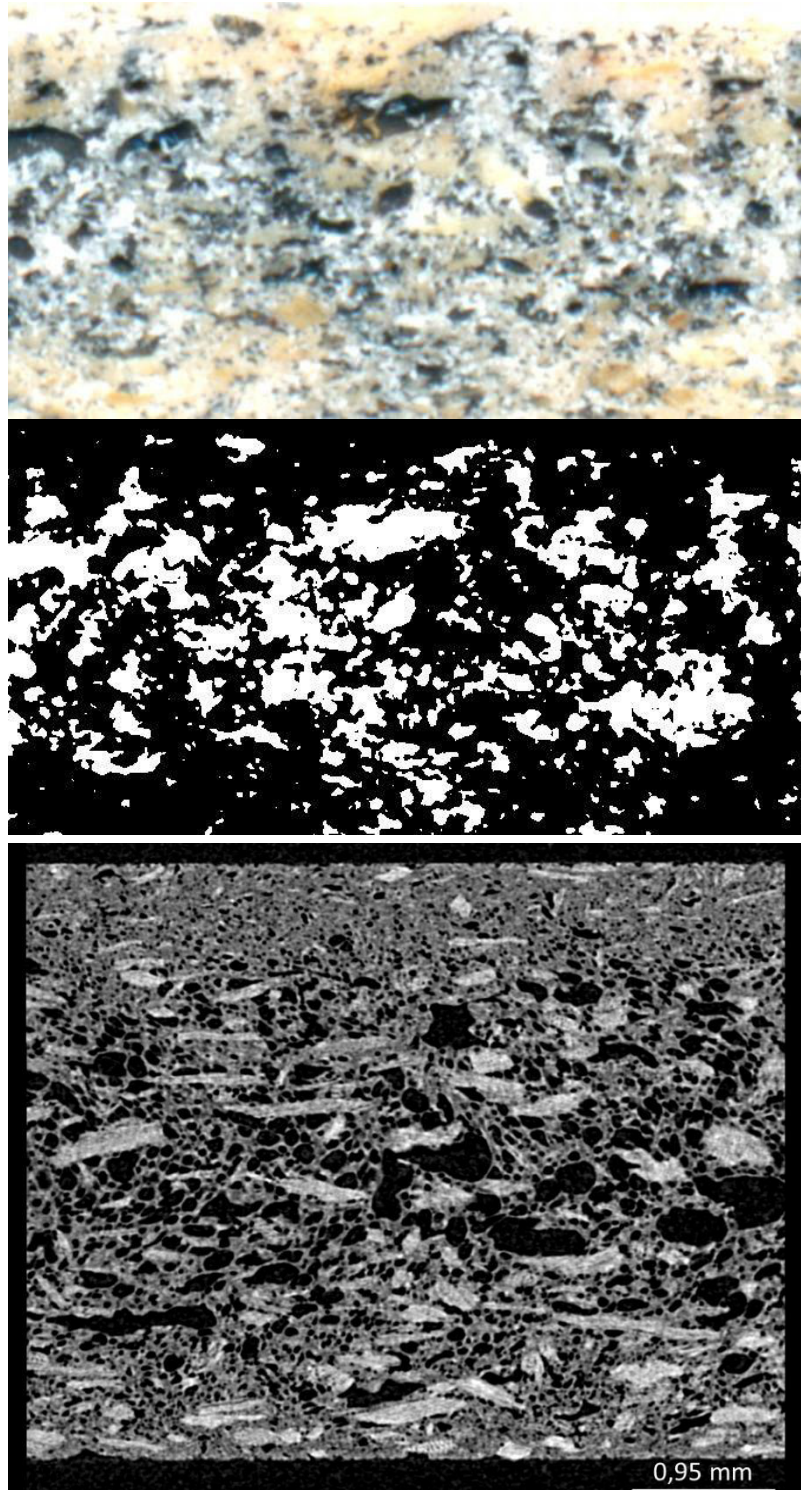


Abbildung 41: Ausschnitt aus dem Scan der WPC-Probe (oben) und erkannte Poren (Mitte), Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten)

Der Porenanteil liegt bei 26,9% und ist damit eher etwas niedriger, trotz der eventuellen Überbewertung der dunklen Stellen im Scan. Das Histogramm (Abbildung 42) zeigt erneut den exponentiellen Abfall.

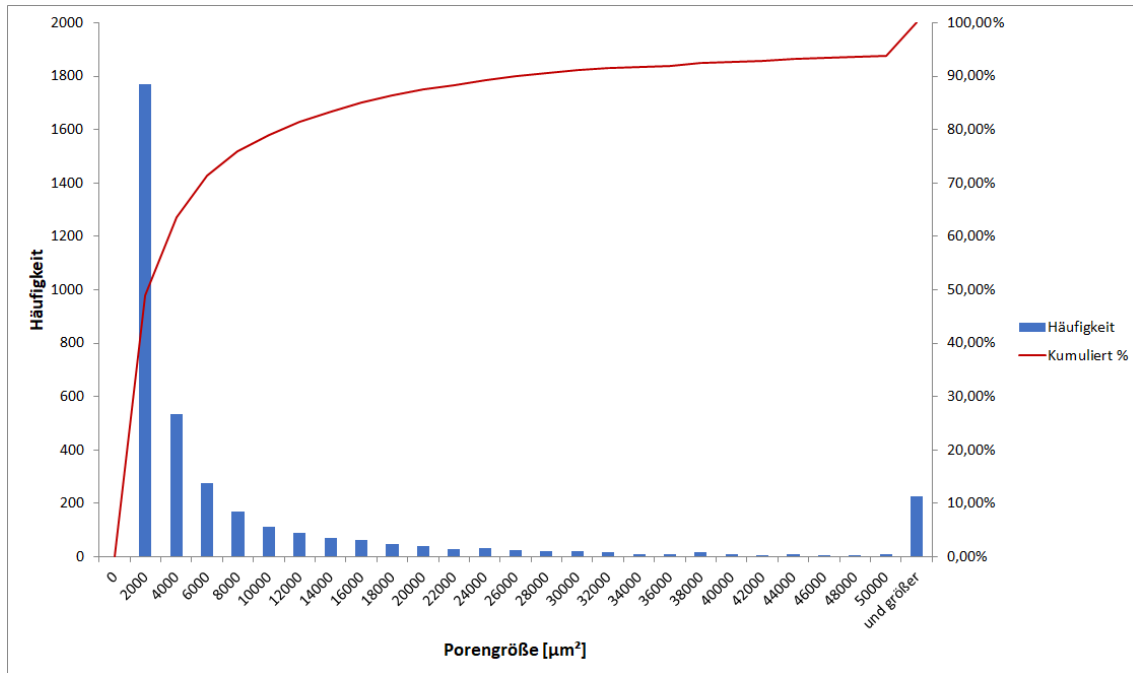


Abbildung 42: Histogramm der Porengrößenverteilung für einen Skalenbereich bis 50.000 µm².

5.1.3.5 PA6 mit 30 % Glasfasern

Die Probe selbst ähnelt stark dem ebenfalls schwarz eingefärbten PP, weshalb erneut Weiß als Kontrastfarbe für die Poren gewählt wurde, vgl. Abbildung 43. Der Faseranteil erschwert jedoch deutlich die Bearbeitung der Probenfläche mit dem Messer. Ebenso verursachen die angeschnittenen Glasfasern einen silbrigen Glanz, der sich mit der weißen Füllung der Poren überlagert und die eindeutige Identifizierung erschwert. Hier wäre ein zusätzlicher Farbkontrast eventuell hilfreich.

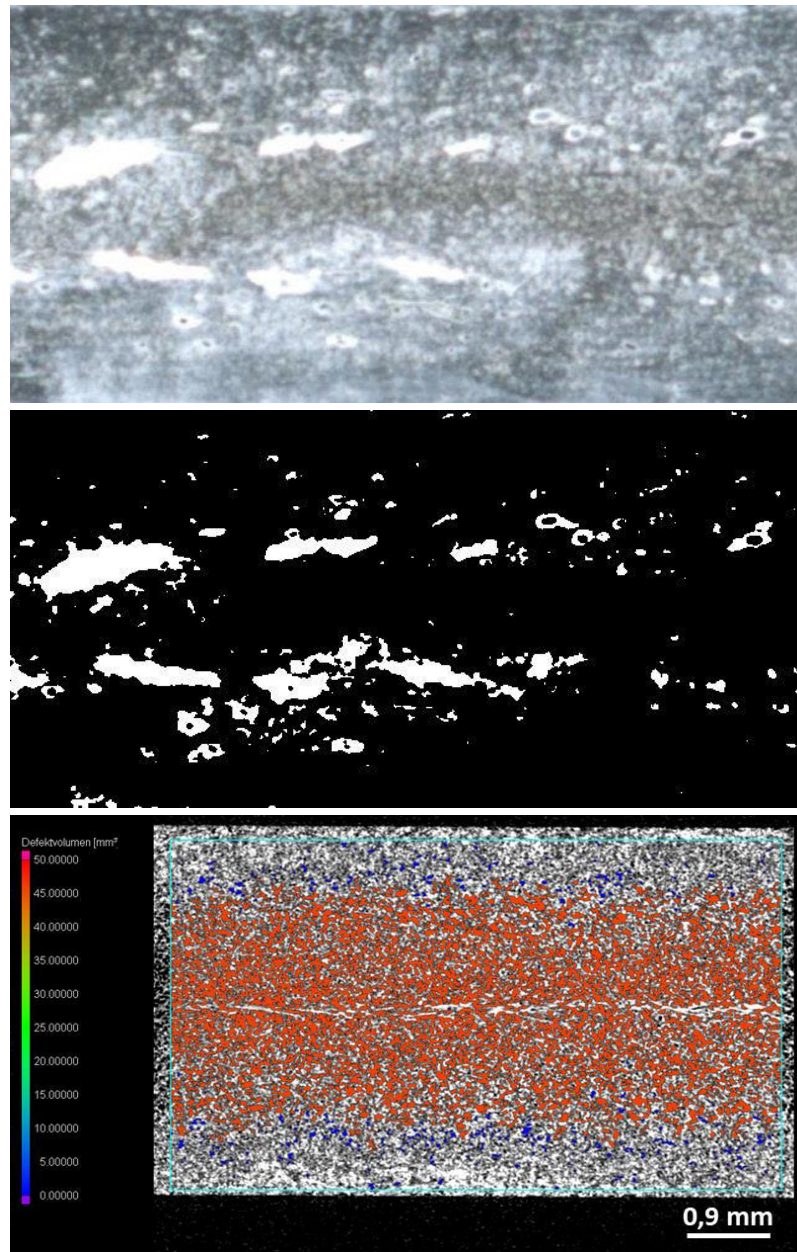


Abbildung 43: Ausschnitt aus dem Scan der PA-Probe (oben) und erkannte Poren (Mitte), Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten).

Für einen Schwellwert, der die Poren auf die großflächigeren, hellweißen Bereiche konzentriert, ergibt sich eine Porosität von ca. 8,0 %.

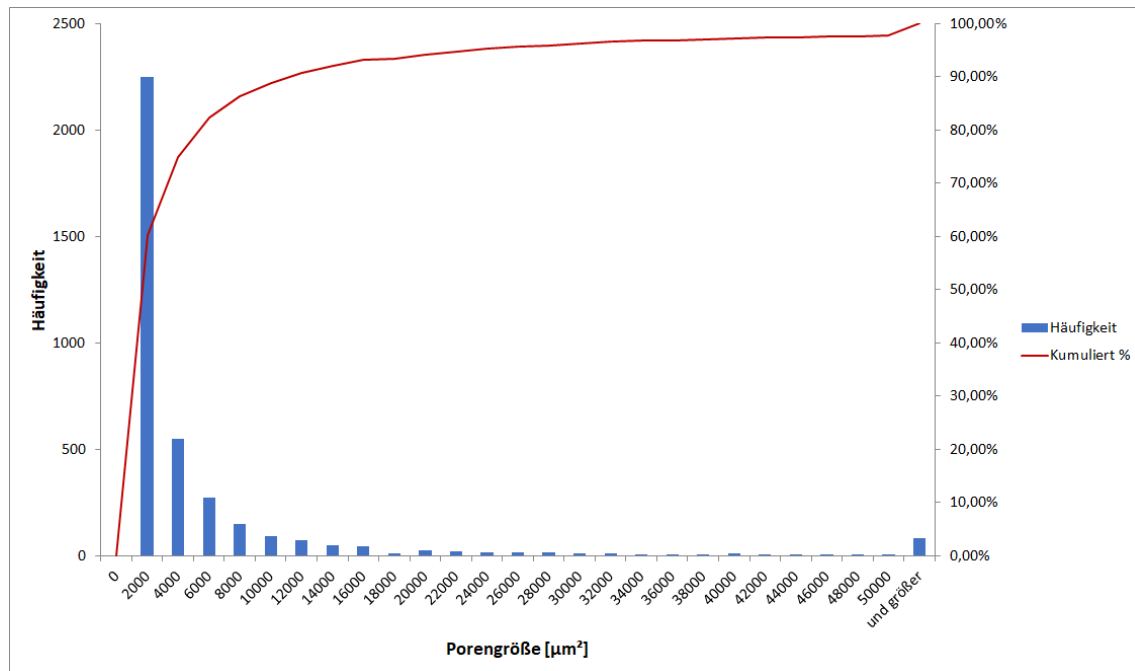


Abbildung 44: Histogramm der Porengrößenverteilung für einen Skalenbereich bis 50.000 μm^2 .

Erneut fällt die Häufigkeit der Poren in einer Klasse mit deren Größe exponentiell ab, siehe Abbildung 44. Cluster aus vielen, sich berührenden Poren spielen dank deren weitläufiger Verteilung über die Schnittfläche dagegen kaum eine Rolle.

5.1.4 Zusammenfassung

Eine Bewertung der Schaumstruktur an einer Bruchfläche mittels Scanner, Binarisierung der Daten und anschließender Blob-Analyse ist sehr gut möglich. Die oben beschriebene Herangehensweise ist seitens Invest in Ausrüstung und mit Blick auf den erforderlichen Mess- und Zeitaufwand (pro Probe ca. 1 Minute) gut in die Qualitätssicherung geschäumter Bauteile integrierbar. Die Herausforderung besteht in der Probenpräparation. Für weißes ABS waren die Ergebnisse der Aufnahmen in guter Übereinstimmung mit einfachen 2D-Ansichten der Computertomografie. Die Aufnahmen erlauben jedoch keine Rückschlüsse ob das Porennetzwerk offen- oder geschlossenporig vorliegt, wie es mittels CT möglich ist. Herausfordernd ist die Probenvorbereitung für gefärbte Proben (Kontrastdarstellung), Glasfaser-gefüllte Kunststoffe (Reflektionen während der Aufnahme) und naturfaserverstärkte Polymere (Fasern nehmen ebenfalls die Farbe an). Unterschiedliche Materialien erfordern angepasste Handlungsanweisungen zur korrekten Präparation der Bauteile, um realitätsnahe Aussagen hinsichtlich der Schaumstruktur treffen zu können. Für die weiteren Analysen im Vorhaben wurde die Schaumstruktur ausschließlich mittels Computertomografie analysiert, welche quantitativ und qualitativ die besseren Ergebnisse erzielt. Dieses Verfahren eignet sich aber nicht für eine kostengünstige (Gerätekosten sind sechs-stellig) und zeiteffiziente (Messdauer: 2 h + Auswertung) Bewertung der Prozessparameter im laufenden Prozess.

5.2 Thermografie

5.2.1 Allgemeine Erläuterung der Interpretation der Thermografie

Das Prinzip der Infrarot-Thermografie beruht auf dem physikalischen Phänomen, dass jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes elektromagnetische Strahlung aussendet. Zwischen der Oberflächentemperatur eines Körpers und der Intensität und spektralen Zusammensetzung der von ihm ausgesandten Strahlung besteht dabei ein eindeutiger Zusammenhang. Durch die Ermittlung der Strahlungsintensität kann somit die Temperatur eines Objekts berührungslos bestimmt werden.

Eine Wärmebildkamera ist mit einem optischen System ausgestattet, das die Infrarotenergie auf einem speziellen Detektor-Chip (Sensor Array) bündelt, auf dem mehrere Tausend Detektor-Pixel in einem Raster angeordnet sind. Jeder einzelne Pixel in dem Sensor Array reagiert auf die darauf gebündelte Infrarotenergie, und erzeugt ein elektronisches Signal. Mithilfe einer mathematischen Berechnung erstellt der Prozessor der Kamera anhand der Signale der einzelnen Pixel eine farbige Darstellung von der Temperatur des Gegenstands. Jeder Temperaturwert ist einer bestimmten Farbe zugeordnet. Die daraus resultierende Farbmatrix wird an den Speicher und an das Display der Kamera als Temperaturbild (Wärmebild) dieses Gegenstands übertragen.

Die am SKZ geschriebene Software (SKZ TDI – Thermal Difference Imager) bietet darüber hinaus die Möglichkeit aus 2 Thermografiebildern das Differenzbild zu erstellen, wie Abbildung 45 exemplarisch zeigt. Dies ermöglicht die Produktüberwachung im laufenden Prozess und die Optimierung der Prozessparameter.

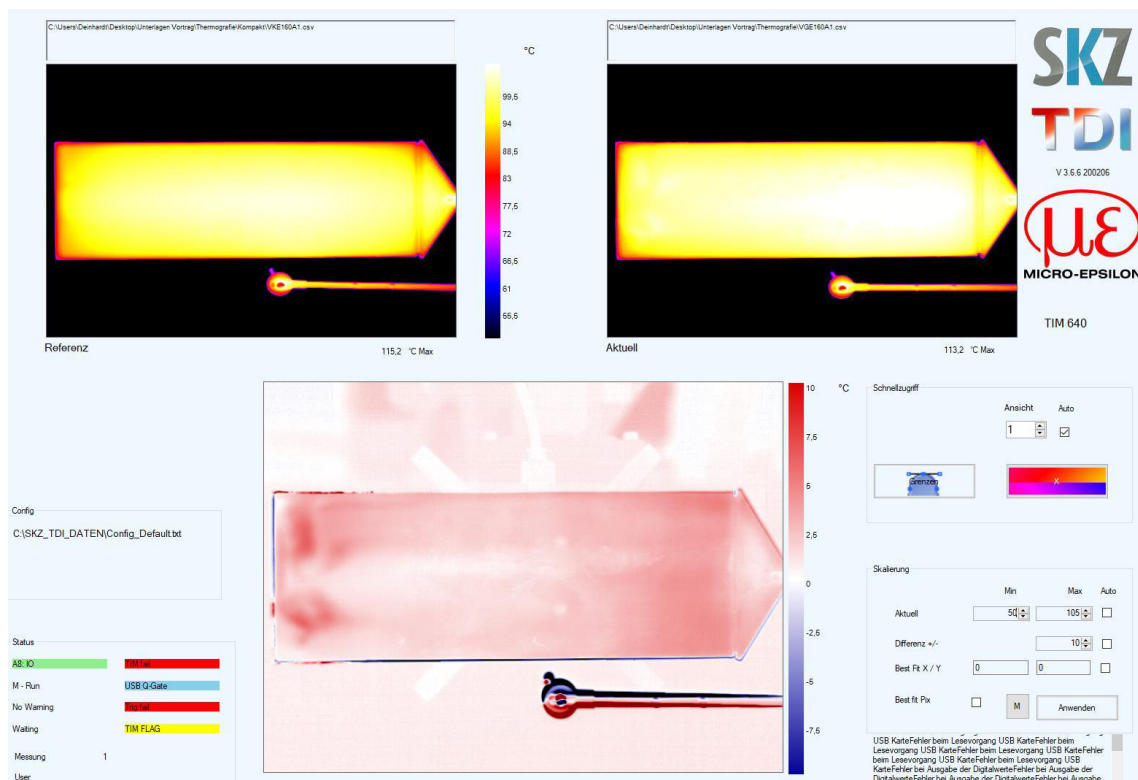


Abbildung 45: Darstellung der Benutzeroberfläche SKZ TDI; am Beispiel: PA6 GF30; Platte; Einspritzgeschwindigkeit: 160 cm/s; links: Kompakt; rechts: Geschäumt.

Abbildung 45 stellt die Thermografieaufnahmen bei gleichen Prozessparametern für Kompakt und Geschäumt gegenüber. Der Einfluss des Treibmittels ist hierbei abhängig von Bauteilauslegung und Prozessparametern, wie in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert wird. Für die gewählten Prozesseinstellungen zeigt das geschäumte Bauteil eine inhomogene Temperaturverteilung sowohl über die Fließweglänge als auch Breite.

5.2.2 Einfluss der Bauteilauslegung

5.2.2.1 Fließweglänge

Die Temperaturverteilung ändert sich über die Fließweglänge und bedingt somit direkt die Porengröße bzw. das Porenwachstum. Eine ungleichmäßige Porengrößenverteilung kann das Schwindungs- und Verzugsverhalten negativ beeinflussen. In Abbildung 46 ist für den Zentralpunkt einer geschäumten Platte aus PA6 GF30 die höchste Temperatur in der Bauteilmitte. Sowohl Angussfern als auch Angussnah liegen die mittels Thermografie gemessenen Temperaturen leicht niedriger.

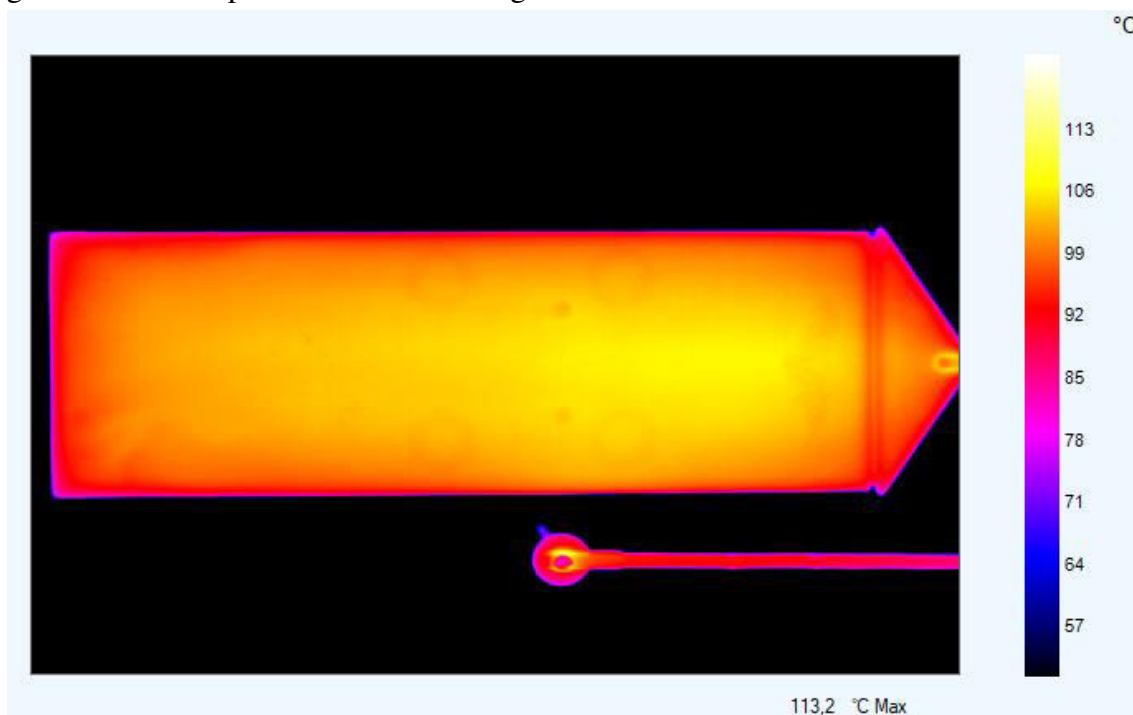


Abbildung 46: Thermografieaufnahme geschäumt; Zentralpunkt; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30.

Dieser Effekt zeigt sich sofort in Unterschieden im gemessenen Defektvolumen mittels CT, siehe Abbildung 47. Wie aus den Aufnahmen hervorgeht, steigt der Anteil an Defektvolumen von der angussnahen zur mittleren Position an, zum Fließwegende hin nimmt der Zelldurchmesser wieder ab.

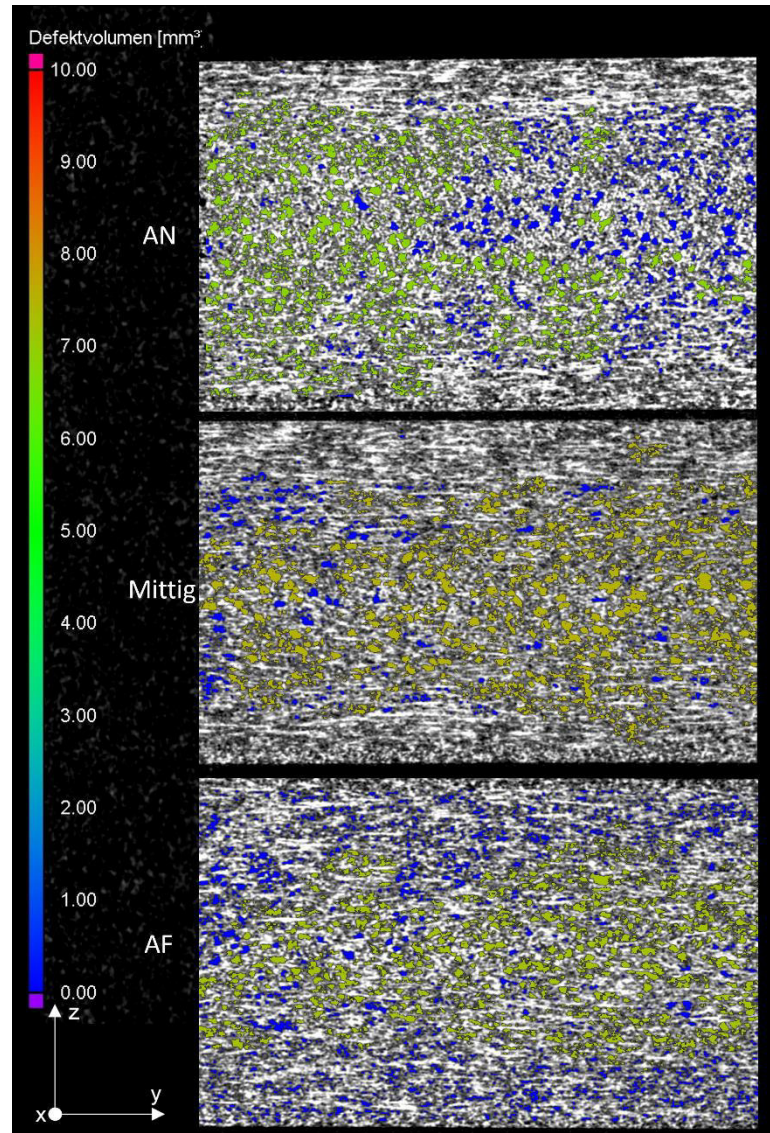


Abbildung 47: Defektvolumen über die Fließweglänge (Geschäumt; Zentralpunkt; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30), dargestellt wird die yz-Ebene, Fließrichtung der Schmelze von links nach rechts.

Die Temperaturverteilung über die Fließweglänge ist abhängig von Material und Prozessparameter, was im nachfolgenden Kapitel betrachtet wird und ist somit ein verlässlicher Ansatz zur Bewertung der sich ausbildenden Schaumstruktur.

Abhängig von den gewählten Prozessparametern kann es zur Ausbildung von Verwirbelungen zum Fließwegende kommen, siehe Abbildung 48.

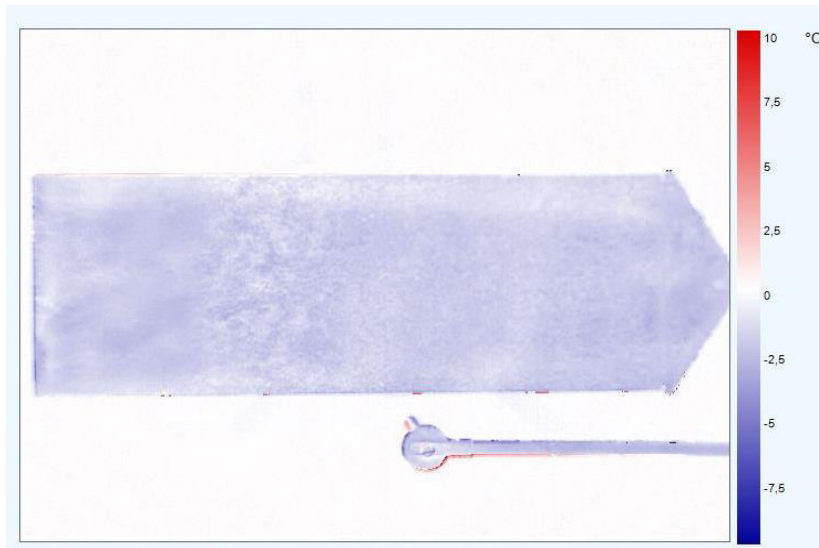


Abbildung 48: Differenzdarstellung aus zwei nacheinander aufgenommenen Thermografieaufnahmen; Werkzeug: Platte; Material PA6 GF30; Prozessparameter: Fluiddurchfluss: 0,05 l/ Zyklus, Dosiergeschwindigkeit: 200 ccm/s, Staudruck: 120 bar, Einspritzgeschwindigkeit 120 ccm/s, Werkzeugtemperatur: 40 °C.

Diese sind auch optisch am Bauteil erfassbar, wie Abbildung 49 belegt.

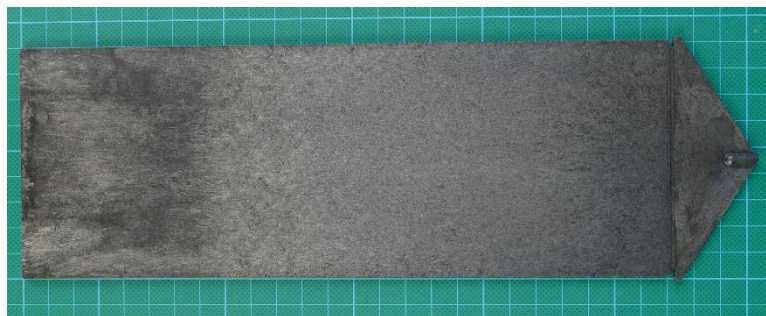


Abbildung 49: Platte mit Verwirbelungen.

Diese Verwirbelungen sind eine Folge des Fließverhaltens treibmittelbeladener Schmelzen in Kombination mit fasergefüllten Kunststoffen. Die Faserorientierung ist in diesen Bereichen in hohem Maße unorientiert. Dies begrenzt das Porenwachstum, sodass die Poren üblicherweise einen sehr geringen Durchmesser aufzeigen.

Die in Abbildung 50 gezeigte Bewertung der Faserorientierung zeigt deutlich den Einfluss des Treibmittels über die Fließweglänge. Die farbliche Darstellung des projizierten Winkels bezieht sich dabei auf die Orientierung der Fasern, 90 ° bedeutet parallel zur Fließrichtung, 180 ° bzw. 0 ° quer dazu.

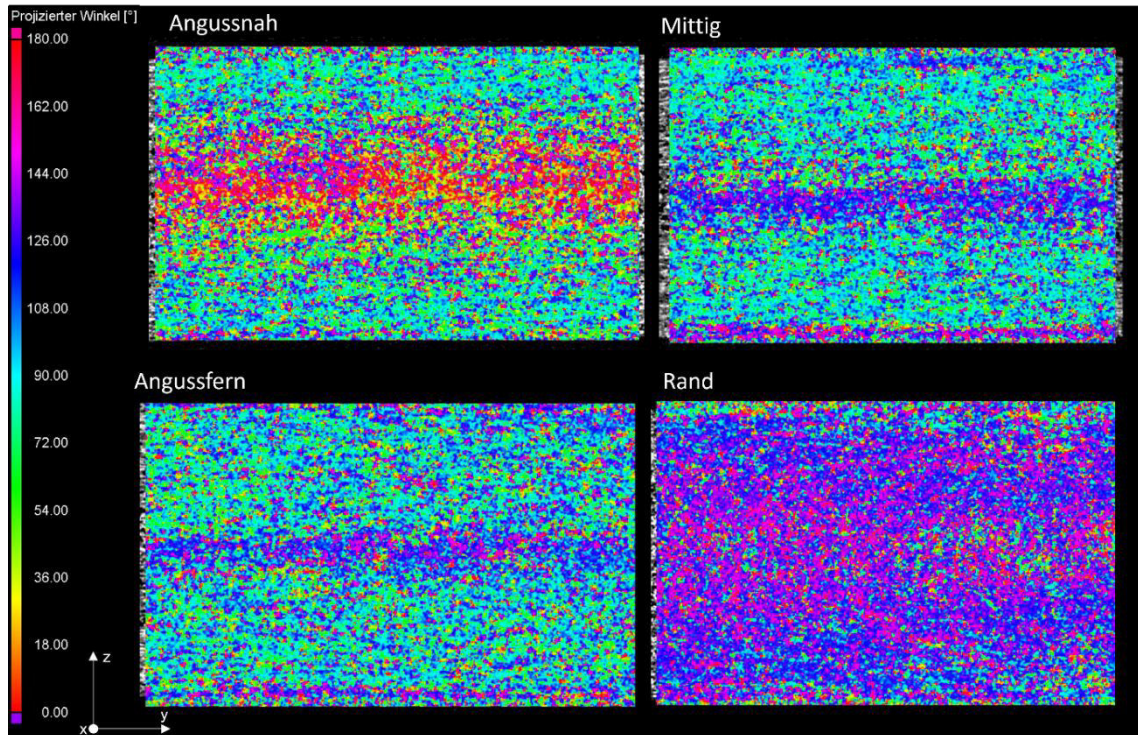


Abbildung 50: Darstellung der Faserwinkel über die Bauteillänge des Probekörpers (Geschäumt; Zentralpunkt; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30), yz-Ebene, Fließrichtung von links nach rechts.

Anhand von Abbildung 50 sowie der graphischen Darstellung der Faserorientierungen in Abbildung 51 zeigt sich, dass mit zunehmendem Fließweg die Kernzonenbreite der Probe absinkt und die Fasern vermehrt in Fließrichtung orientiert werden. Zudem ist auffällig, dass lediglich in der angussnahen Region die Fasern der Kernzone primär quer zur Fließrichtung orientiert sind, mit weiterer Fließweglänge lässt sich kaum noch eine Orientierung entlang der xx-Ebene erkennen, dafür aber in xy-Ebene. Zurückzuführen ist die Umorientierung der Fasern auf die Schaumstruktur der Proben. Da die Glasfasern für das Gas als Barriere wirken, begrenzt im Umkehrschluss die zunehmende Unordnung der Fasern über die Fließweglänge auch das Porenwachstum, sodass die Schaumstruktur mit zunehmendem Abstand zum Anguss feinporeiger wird. Durch den hohen Druckabfall mit Beginn der Einspritzphase kommt es in Folge eines thermodynamischen Ungleichgewichts zur Ausbildung einer hohen Anzahl an nukleierenden Zellen. Am Ende der Einspritzphase ist der Druckabfall aufgrund der Teilfüllung der Kavität erheblich geringer, sodass aus thermodynamischer Sicht die Gasdiffusion in bestehende Poren energetisch bevorzugt wird. Es entstehen somit gröbere Zellstrukturen. Ein Vergleich der Ausbildung der Schaumstruktur mit der Faserorientierung belegt, dass mit zunehmender Porendichte die Orientierung der Glasfasern inhomogener wird. Eine klare Abgrenzung zwischen den Zonen über den Bauteilquerschnitt ist nicht mehr gegeben. Gleichzeitig begrenzt die diffuse Orientierung der Fasern das Porenwachstum, sodass angussfern ein feinzelliger Schaum mit verbesserten mechanischen Eigenschaften entsteht.

Neben der Umorientierung der Fasern lässt sich zudem ein mit dem Fließweg erhöhtes Verdrängen der Fasern in die Randzonen der Proben beobachten. Die chaotische

Orientierung der Fasern lässt sich teilweise auf das Füllverhalten des Werkzeuges zurückführen. Wird die Schmelze eingespritzt, so trifft sie am Ende des Werkzeuges auf die Werkzeugwand und staut sich entsprechend zurück. Dieser Rückstau führt zu einer starken und nicht voraussehbaren Umorientierung der Fasern.

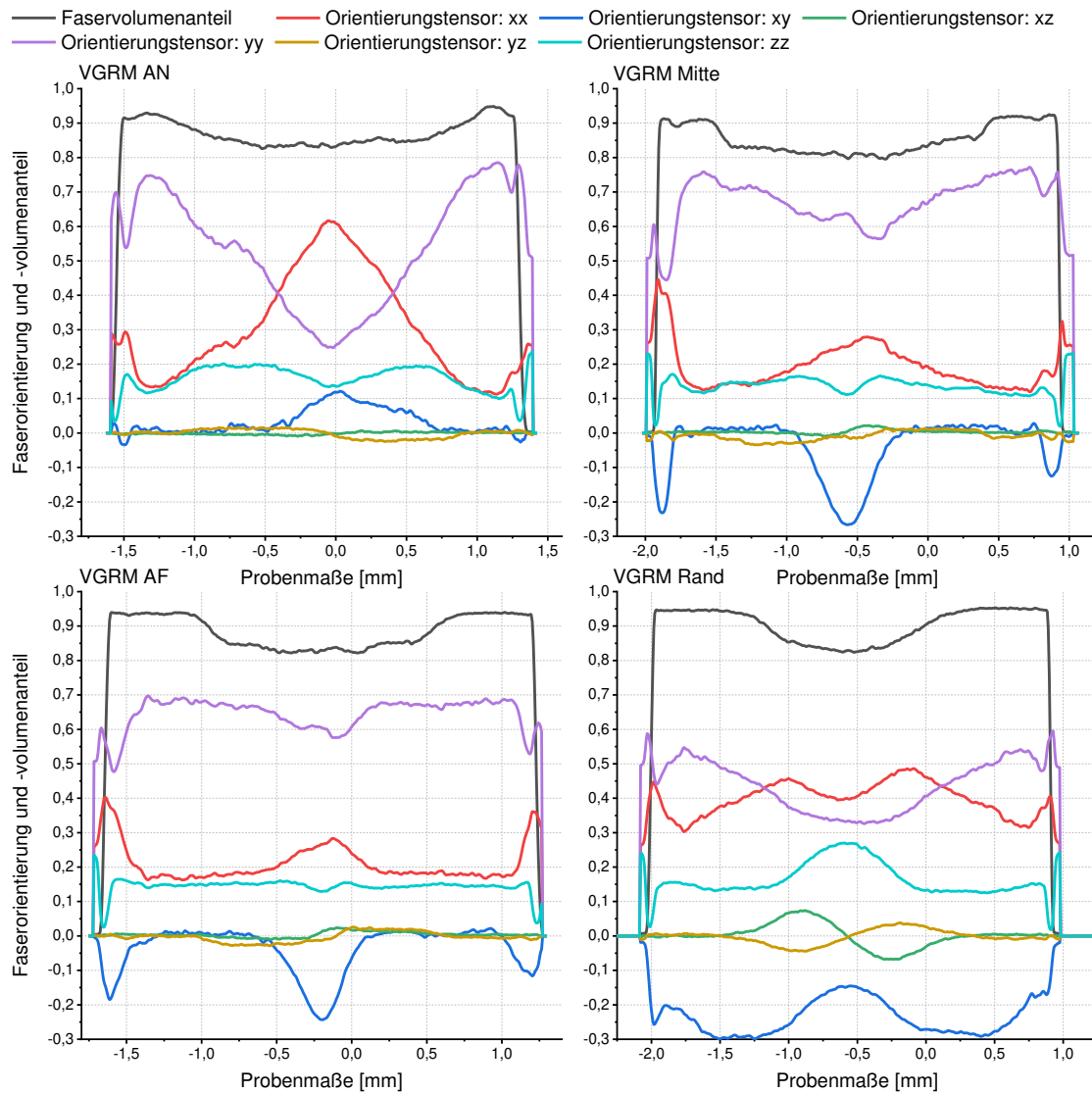


Abbildung 51: Faserorientierung und Faservolumenanteil (Geschäumt; Zentralpunkt; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30) über die Fließweglänge.

Einen weiteren Erklärungsansatz zeigen Untersuchungen an naturfasergefüllten Polymeren, in diesem Fall WPC auf Basis von PP. Auch hier kommt es zur optisch sichtbaren Ausbildung von Verwirbelungen (Abbildung 52), welche nicht auf eine für Schaum-spritzgießen typische Schlierenbildung zurückzuführen sind.

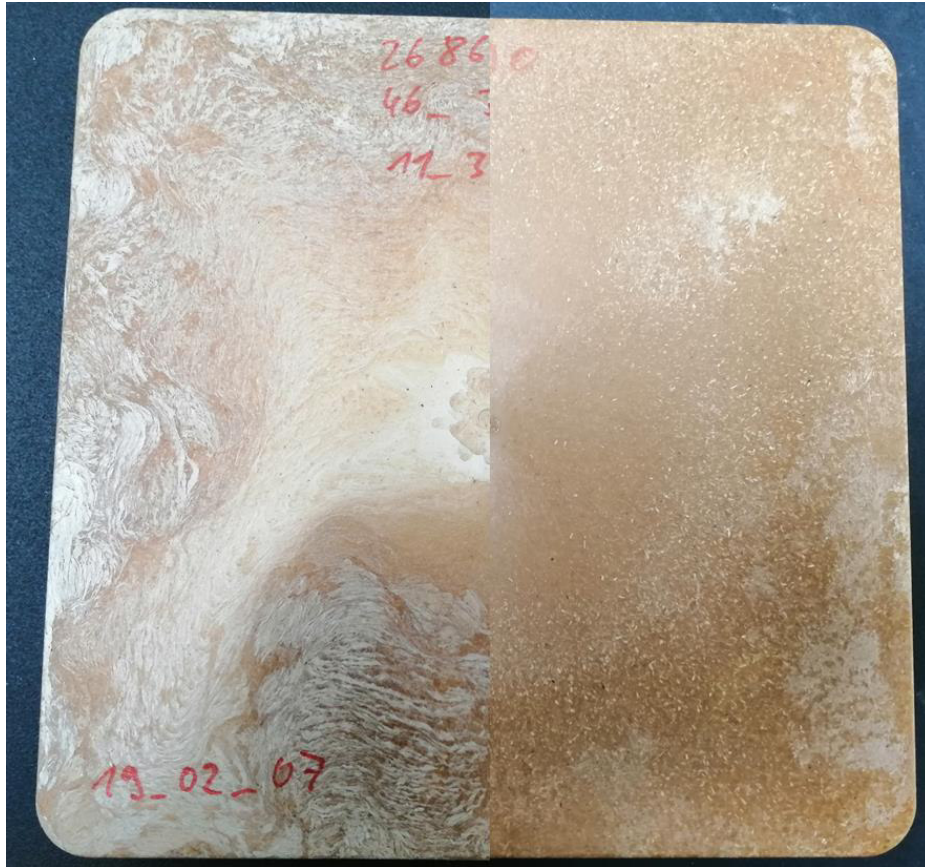


Abbildung 52: Aufnahme der Oberflächenqualität am Beispiel: PP-Type 3 mit 50 Gew.-% Holzfasern, grob, linke Bildhälfte: geschäumt, rechte Bildhälfte: kompakt.

In Füllstoffhaltigen-Kunststoffen findet bevorzugt eine heterogene Nukleierung statt. Eine fürs WPC umfassend durchgeführte Füllstudie zeigt, dass durch das Blasenwachstum die Fasern aus ihrer Vorzugsorientierung gerissen werden, vgl. Abbildung 53. Dies ist für Naturfasern wie Holz auf Grund der großen Oberfläche noch stärker ausgeprägt als für anorganische Fasern wie Glas.

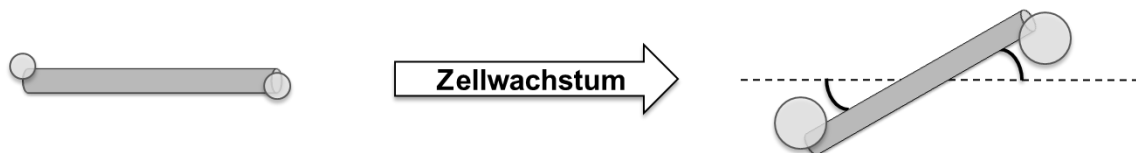


Abbildung 53: Graphische Darstellung der Faserorientierung im Zusammenhang mit dem Blasenwachstum des expandierenden Treibmittels.

Die Faserorientierung nimmt zum Fließwegende hin vermehrt ab, wie Abbildung 54 belegt.

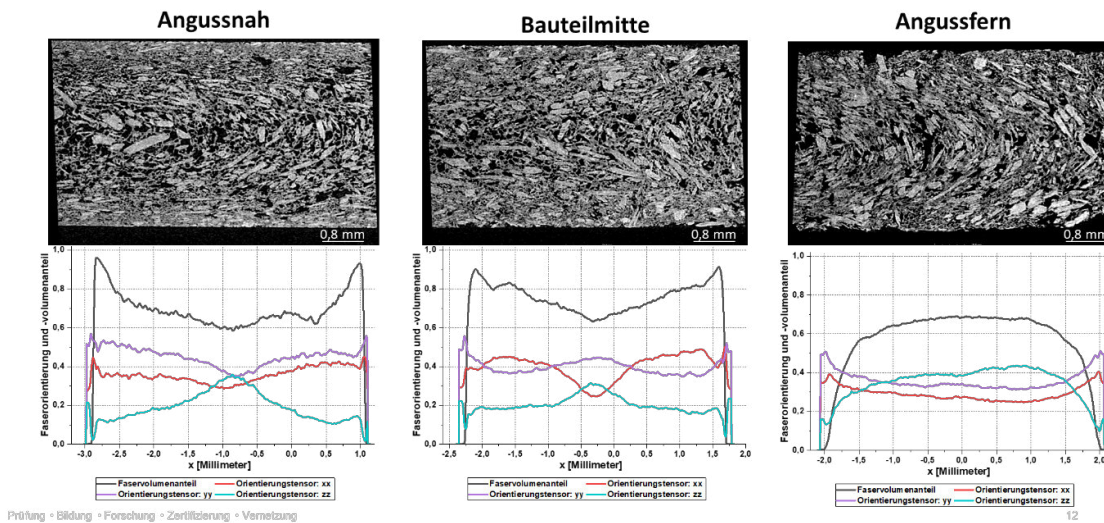


Abbildung 54: Bewertung der Mikrostruktur mittels CT über die Fließweglänge am Beispiel: PP-Type 2 mit 50 Gew.-% groben Holzfasern, physikalisch geschäumt mit 0,15 l/ Zyklus N_2 .

Da sowohl starke Variationen der Schaumstruktur als auch der Faserorientierung über die Fließweglänge Unterschiede in den Bauteileigenschaften bedingen, ist eine Optimierung der Prozessparameter unter Zuhilfenahme der Thermografie dringend empfohlen.

5.2.2.2 Fließwegbreite

Der Einfluss über die Bauteilbreite zeigt sich am Beispiel von Abbildung 46. In der Bauteilmitte ist die ausgeworfene Probe erheblich heißer als in den Randzonen. Das Abkühlverhalten ist einer der wichtigsten Faktoren, wenn das Porenwachstum begrenzt werden soll. Auf Grund des Temperaturgefälles vom Kern zum Rand ist anzunehmen, dass die Poren in der Bauteilmitte gröber sind, bzw. es zu einem Kollabieren der Zellstege zwischen einzelnen Poren kommt und somit zum Zusammenschließen dieser. Die CT-Aufnahmen in Abbildung 55 belegen dies, dabei liegt Position 1 direkt am Rand und Position 3 in der Bauteilmitte.

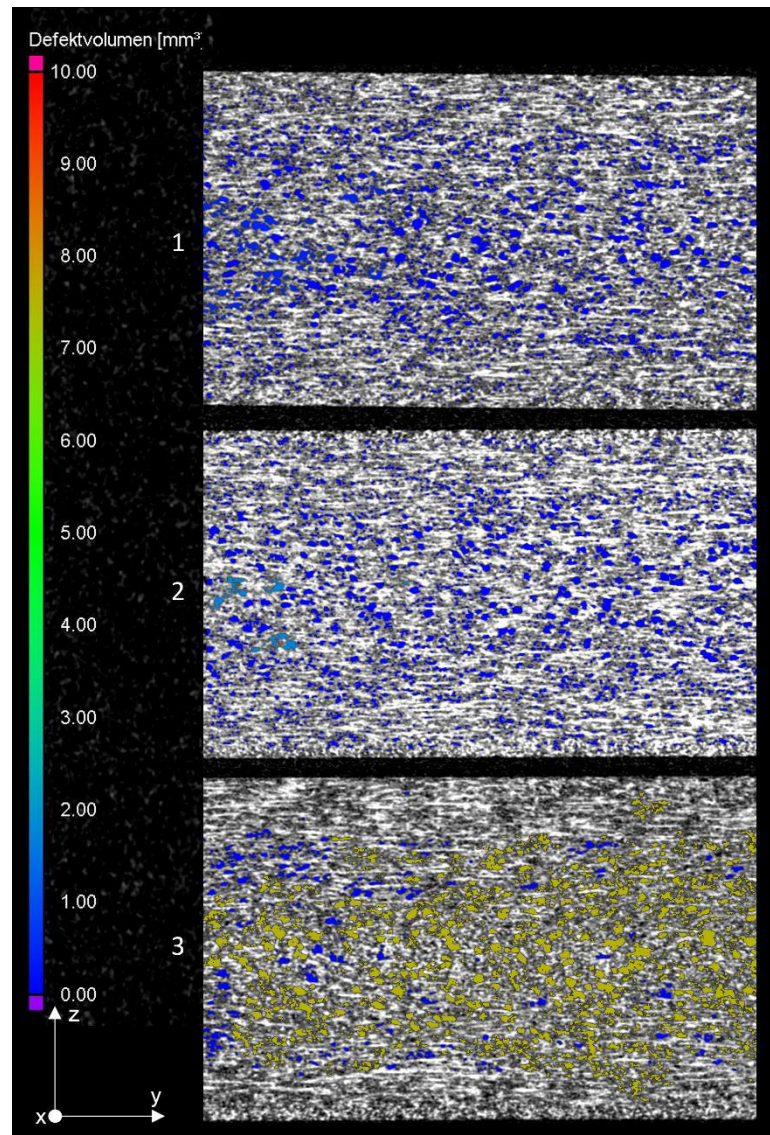


Abbildung 55: Defektvolumen des mittigen Bauteilquerschnitts der Probe Zentralpunkt, dargestellt wird die yz-Ebene, Fließrichtung der Schmelze von links nach rechts

Zur Bauteilmitte hin nimmt das Defektvolumen zu, zu erkennen in den CT-Aufnahmen am Farbwechsel von blau nach Ocker. Die sich dabei ausbildende Porenstruktur gibt Grund zur Annahme, dass ein Porenwachstum durch die Glasfasern im Polyamid 6 begrenzt wird und es vermehrt zu einem Zusammenwachsen von Poren durch Zellkoaleszenz. Darauf deuten auch die sehr inhomogenen Zellwandstrukturen hin.

5.2.2.3 Wandstärke

Die Wandstärke eines Bauteils hat einen erheblichen Einfluss auf die Ausbildung der Schaumstruktur und das Abkühlverhalten des Bauteils. Die Differenzdarstellung in Abbildung 56 zeigt beim Wanddickensprung von 2 mm auf 4 mm eine Temperaturdifferenz von ca. 10 °C.

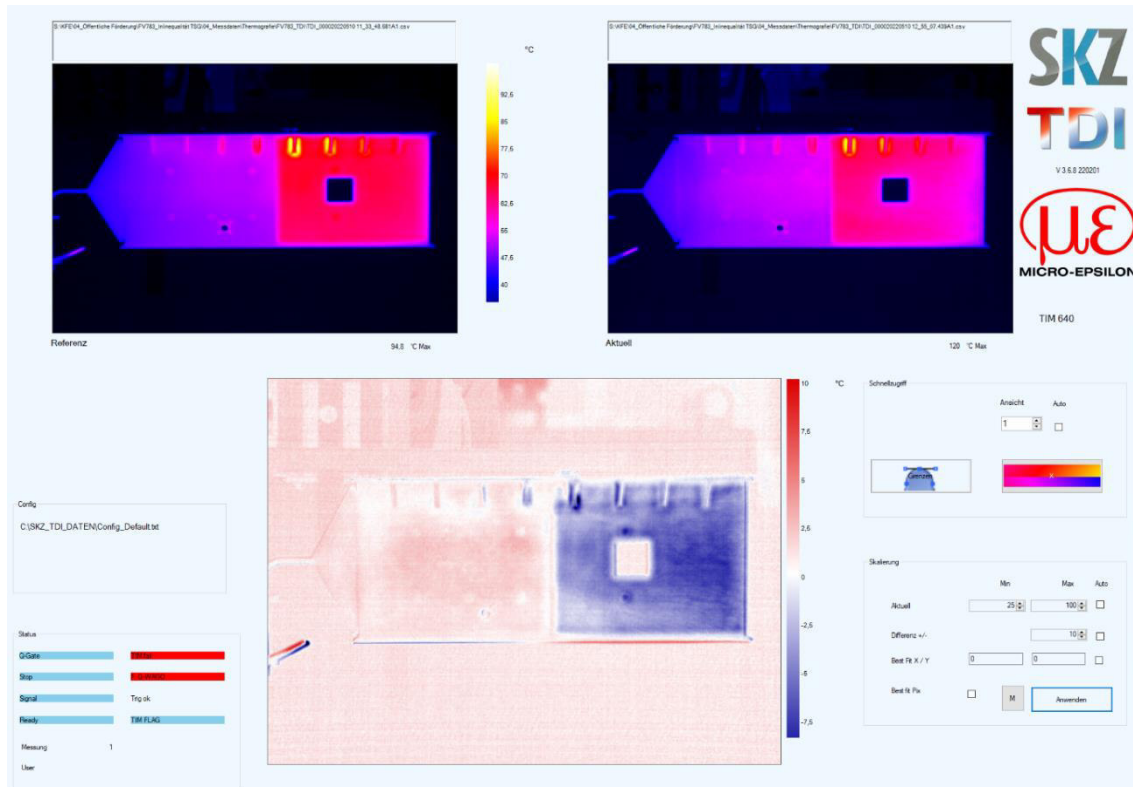


Abbildung 56: Thermografieaufnahme (links: Kompakt, rechts: Geschäumt) sowie Differenzdarstellung der Platte mit geometrischen Besonderheiten am Beispiel ABS; Einspritzgeschwindigkeit 60 ccm/s.

Dabei fällt auf, dass sich bei einer geringen Wandstärke von 2 mm die Temperatur des ausgeworfenen Bauteils nur unwesentlich vom kompakt gespritzten Bauteil abweicht, während bei 4 mm Wandstärke die geschäumte Probe eine deutlich niedrigere Temperatur als das kompakt gespritzte Bauteil zeigt.

Betrachtet man die zugehörigen Schaumstrukturen (Abbildung 57), belegen die CT-Aufnahmen, dass bei den gewählten Prozessparametern mit sehr niedriger Einspritzgeschwindigkeit im 2 mm dicken Probenbereich nur sehr wenige Poren gebildet werden. Das Temperaturprofil gleicht somit dem geschäumten Bauteil. Ein wichtiger Ansatzpunkt, um unter zu Hilfenahme der Thermografie die Prozessparameter anzupassen.

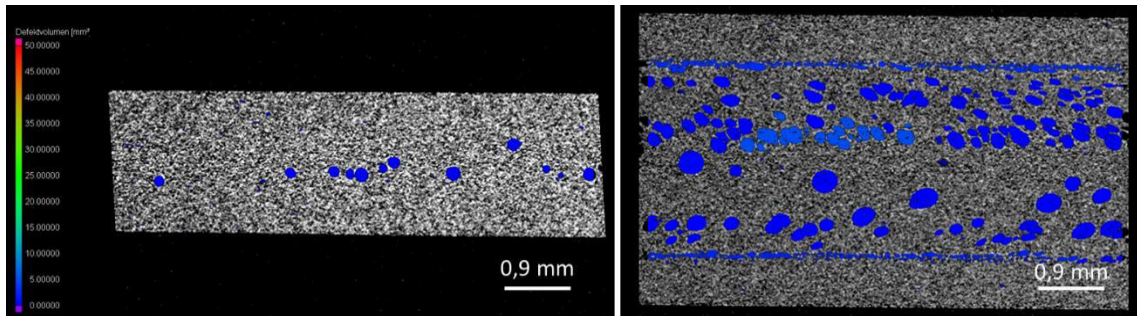


Abbildung 57: Computertomographie-Aufnahme: Werkzeug: Platte mit besonderen Geometrien; Material: ABS; Einspritzgeschwindigkeit: 60 ccm/s. links: 2 mm Wandstärke; rechts: 4 mm Wandstärke.

5.2.2.4 Rippengeometrien

Die Gestaltung von Rippen ist beim Thermoplast-Schaumspritzgießen durchaus komplexer als für das Kompaktspritzgießen. Bei ungünstiger Auslegung kommt es zum Wärmerestau. Infolgedessen expandieren die Zellen und schließen sich zusammen. Dabei entstehen sehr große Hohlräume innerhalb des Stegs, welche die mechanischen Eigenschaften schwächen. Im ungünstigsten Fall kann die Bildung von Blow-Ups die Folge sein. Um dem vorzubeugen, empfiehlt es sich die Radien im Rippenfuß größer zu gestalten. Derartige Fehlstellen können sicher mittels Thermografie detektiert werden, sodass der Maschinenbediener frühzeitig in den Prozess eingreifen kann, um den Ausschuss zu minimieren.

In den Untersuchungen ist der Steg direkt nach dem Wanddickensprung prädestiniert, um dieses spezielle Fehlerbild in Abhängigkeit von den Prozessparametern zu evaluieren.

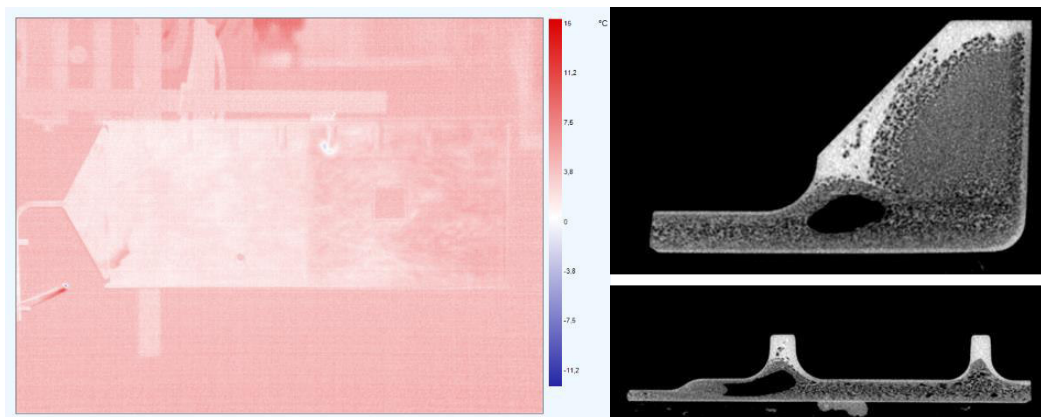


Abbildung 58: links: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ höhere Schmelztemperatur); rechts: CT-Aufnahme der Rippe nach dem Wanddickensprung im Querschnitt, am Beispiel: Material: PP mit 20 % Talkum; Schmelztemperatur: 270 °C, Gewichtseinsparung 20 Gew%.

Abbildung 58 zeigt eine thermische Anomalie unter dem Steg nach dem Wanddickensprung. Direkt nach der Entformung ist das Bauteil an dieser Stelle deutlich kühler als dessen Umgebung. Die unterhalb des Stegs gebildete Vakuole wurde mittels

Computertomografie bestätigt. Ein gleiches Bild zeigt sich bei einem erhöhten Treibmittelgehalt, wie Abbildung 59 belegt.

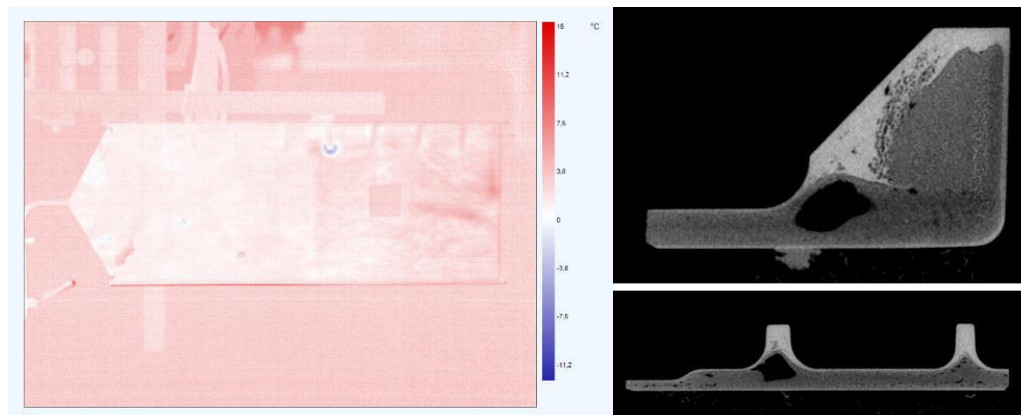


Abbildung 59: links: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ höherer Treibmittelgehalt); rechts: CT-Aufnahme der Rippe nach dem Wanddickensprung im Querschnitt, am Beispiel: Material: PP mit 20 % Talkum; Treibmittelgehalt: 0,5 l/ Zyklus, Gewichtseinsparung 20 Gew%.

5.2.2.5 Bindenaht

Die Bindenaht an Fließhindernissen ist bei geschäumten Bauteilen mittels Thermografie besonders ausgeprägt zu sehen. Eine Ursache ist, dass je nach Auslegung des Fließhindernis es zu einer schlagartigen Druckentlastung kommen kann, welche im ungünstigsten Fall Schmelzeeruptionen hervorrufen. Hierbei kommt es zur Ausbildung sehr grober Zellstrukturen, einer schlechten Oberflächenqualität und sehr schlechten mechanischen Eigenschaften. Ein Beispiel hierfür ist die Ausbildung der Bindenaht am Beispiel PP mit 20 % Talkum bei einem Treibmittelgehalt von 1 l/ Zyklus, siehe Abbildung 60.

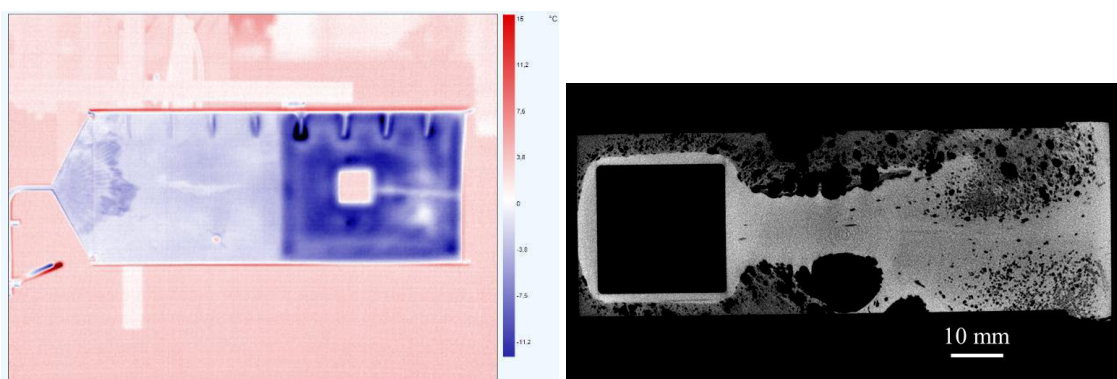


Abbildung 60: Darstellung der Bindenaht am Beispiel PP mit 20 % Talkum bei einem Treibmittelgehalt von 1 l/ Zyklus, links: Thermografie – Differenzdarstellung (Kompakt/ Geschäumt); rechts: Computertomografie der Bindenaht.

Die Bindenaht-Ausbildung ist deutlich in der Thermografie erkennbar. Die Schmelzeeruptionen gehen einher mit der Freisetzung einer großen Menge thermischer Energie,

sodass auf den Thermografie-Aufnahmen deutlich weiße Bereiche entlang der Bindenaht erkennbar sind, welche eine höhere Temperatur haben als die Umgebungstemperatur.

Treten Schmelzeeruptionen noch expliziter auf, kann aber auch in der Thermografie die gegenteilige Farbdarstellung auftreten, wie Abbildung 61 verdeutlicht.

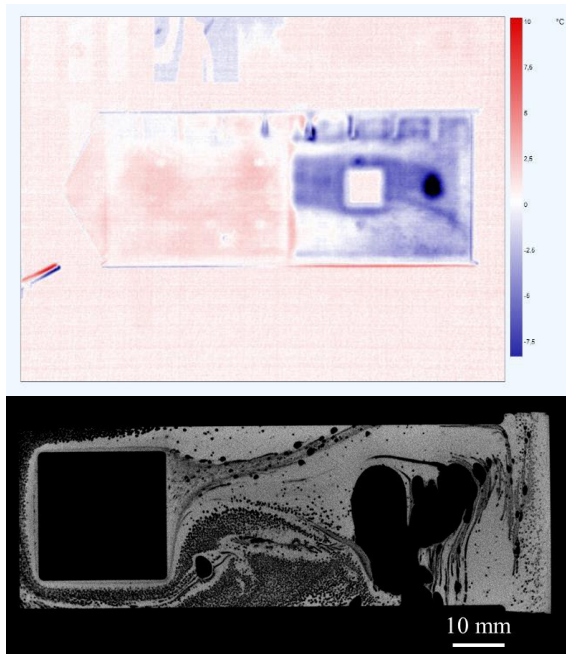


Abbildung 61: Darstellung der Bindenaht am Beispiel ABS bei einer Schmelzetemperatur von 225 °C, links: Thermografie – Differenzdarstellung (Kompakt/ Geschäumt); rechts: Computertomografie der Bindenaht.

Hier ist das erzeugte Defektvolumen so groß, dass davon auszugehen ist, dass unter der kompakten Randzone nur noch eine große Vakuole liegt, dessen Temperatur nach Ablauf der Kühlzeit deutlich kälter ist als das umgebende erstarrte Polymer.

Eine andere Ursache ist, dass der Werkzeuginnendruck beim Schaumspritzgießen signifikant geringer ist als fürs Kompaktspritzgießen. Über die Fließweglänge sinkt der Werkzeuginnendruck noch weiter. Bei einem Durchbruch oder einem Dom umfließt die Polymerschmelze diesen. Ein erneutes Zusammenfließen wird ausschließlich durch den Expansionsdruck des Treibfluids bewirkt. Die zu verschweißenden Kräfte sind bei der Ausbildung dieser Bindenaht sehr gering. Dies wird noch zusätzlich negativ begünstigt durch die an den jeweiligen Fließfronten anliegenden Temperaturen, welche niedriger sind als beim Kompaktspritzgießen in Folge des expandierenden Gases.

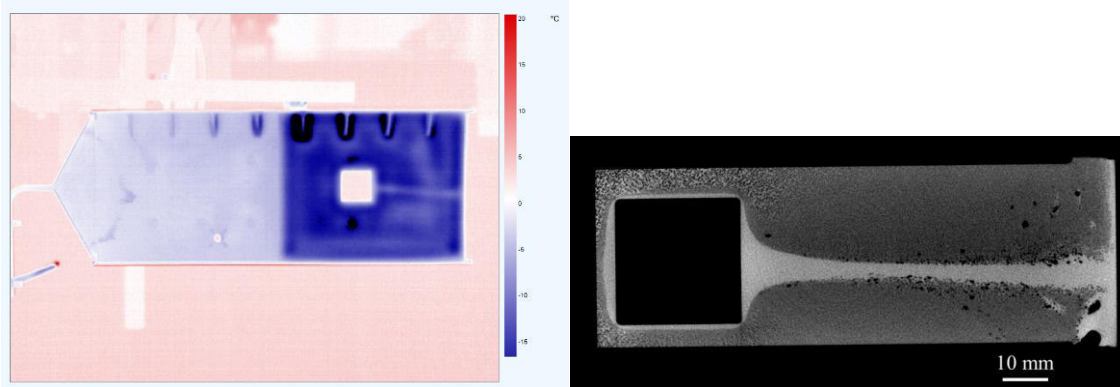


Abbildung 62: Darstellung der Bindaht am Beispiel PP mit 20 % Talkum bei einer Dosiergeschwindigkeit von 50 ccm/s, links: Thermografie – Differenzdarstellung (Kompakt/ Geschäumt); rechts: Computertomografie der Bindaht.

Auch in diesem Fall ist die Bindaht mittels Thermografie (Abbildung 62) deutlich zu erkennen als sehr feine Linie, welche vom Durchbruch bis zum Fließwegende führt.

Die Ausbildung von Bindahten werden sich beim Thermoplast-Schaumspritzgießen nicht vermeiden lassen. Ziel sollte es jedoch sein bereits in der Konstruktions-Phase vom Werkzeug die Lage von Fließhindernissen noch viel stärker zu berücksichtigen als beim Kompakt-Spritzgießen.

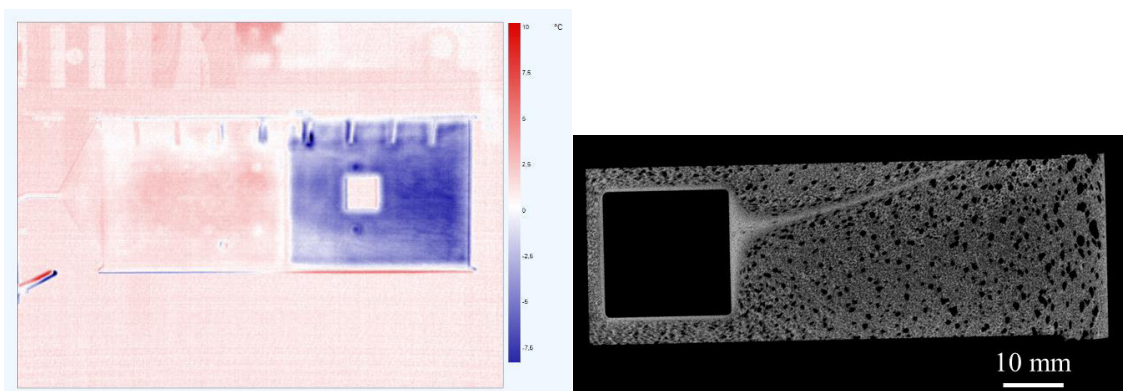


Abbildung 63: Darstellung der Bindaht am Beispiel ABS, prozessoptimiert, links: Thermografie – Differenzdarstellung (Kompakt/ Geschäumt); rechts: Computertomografie der Bindaht.

Andernfalls sollte durch Optimierung der Prozessparameter unter zu Hilfenahme der Thermografie der Einfluss der Bindaht weitestgehend minimiert werden, wie Abbildung 63 beispielhaft zeigt.

5.2.3 Einfluss von Prozessparametern

Für die Optimierung der Prozessparameter beim Spritzgießen ist die Thermografie ein einfaches, kostengünstiges und schnelles Messverfahren, welches sich problemlos in den Prozess integrieren lässt und nicht störanfällig ist. Ziel in der Auswertung ist es, über das

gesamte Bauteil eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erzeugen. Ist dies gegeben, kann angenommen werden, dass Schwindung und Verzug über das Bauteil weitestgehend gleichmäßig ist und die Schaumstruktur annähernd konstant ist. Große Unterschiede in der Farbgebung der Wärmebildkamera deuten auf größere ungleichmäßig verteilte Poren hin, welche den mechanischen Eigenschaften nachträglich sind und die Qualität des Bauteils herabsetzen.

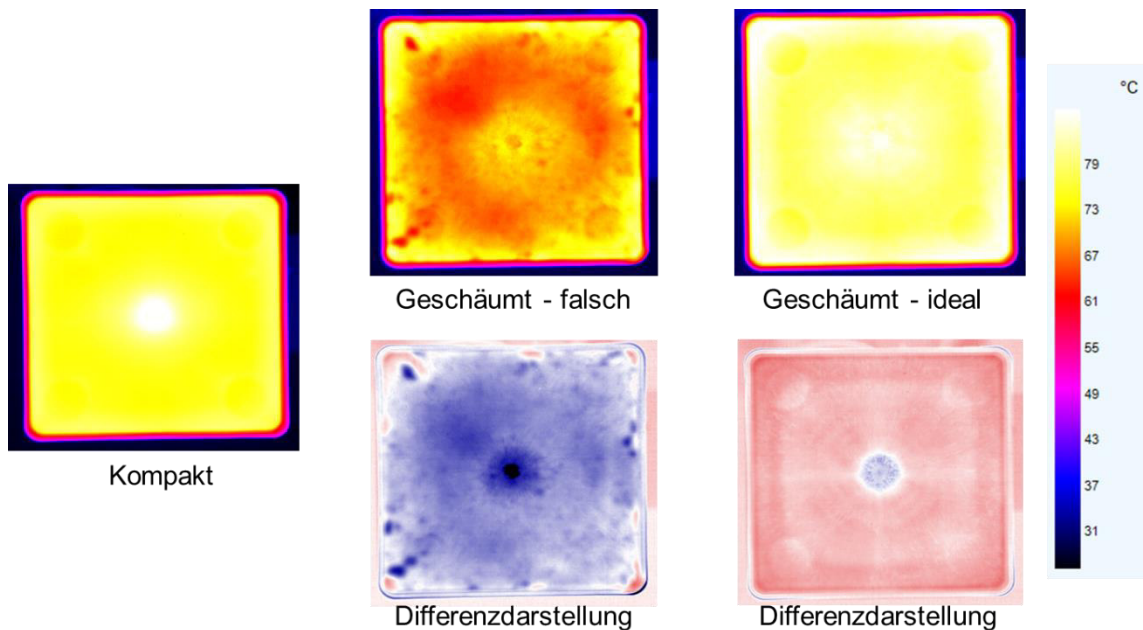


Abbildung 64: Vergleichende Darstellung Thermografie – inhomogene, sowie homogene Schaumstruktur; am Beispiel WPC, Schalenwerkzeug (4 mm Wandstärke).

Abbildung 64 zeigt beispielhaft, wie zwischen einer guten und schlechten Schaumstruktur basierend auf dem Thermografiebild unterschieden werden kann.

5.2.3.1 Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit

Die Einspritzgeschwindigkeit ist einer der wichtigsten Prozessparameter beim Schaumspritzgießen und auch in der Literatur im Detail untersucht. Durch Einsatz der Thermografie kann dieser Prozessparameter im laufenden Prozess problemlos optimiert werden.

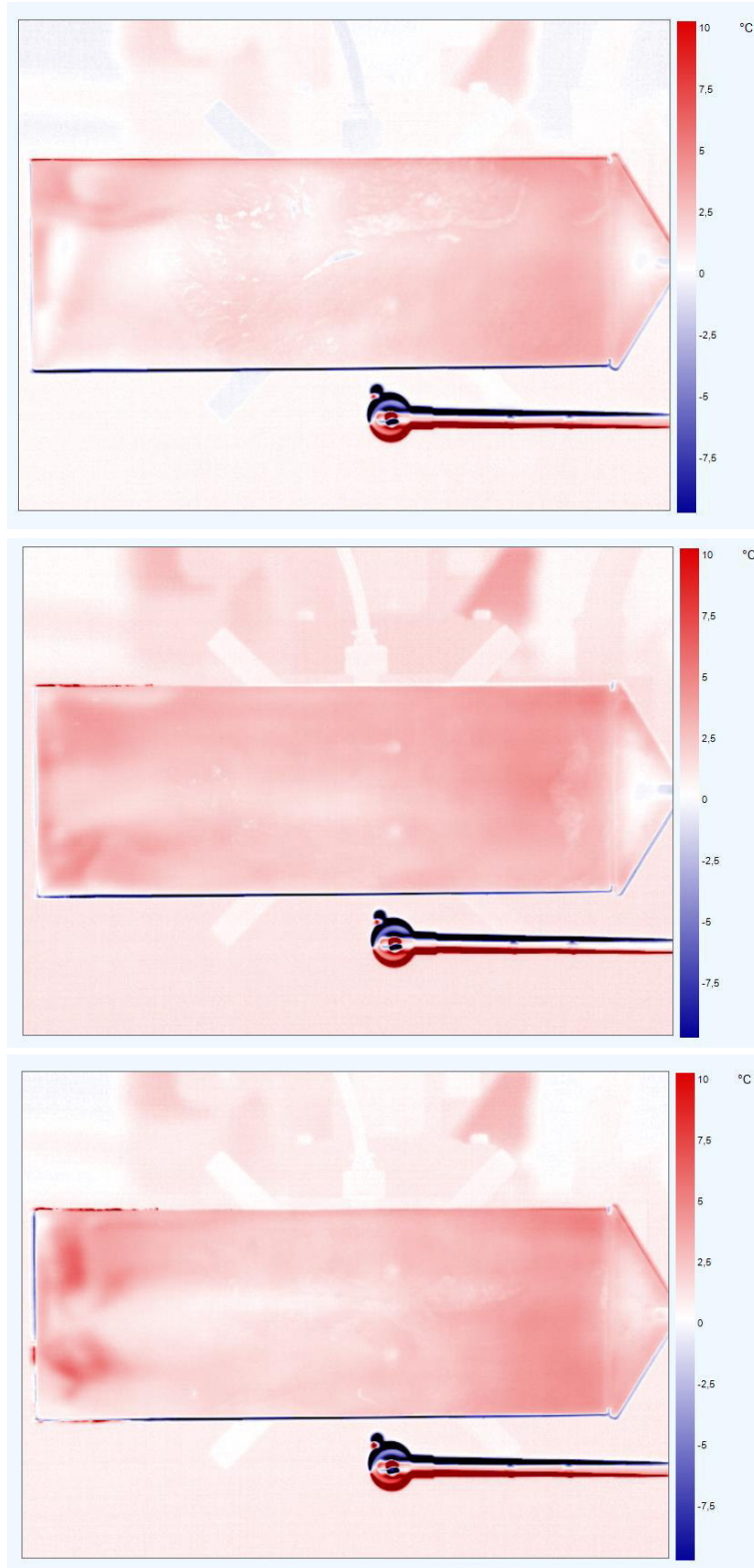


Abbildung 65: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Kompakt/ Einspritzgeschwindigkeit):
oben: Einspritzgeschwindigkeit 80 ccm/s; Mitte: Einspritzgeschwindigkeit
120 ccm/s; Unten: Einspritzgeschwindigkeit 160 ccm/s; Werkzeug: Platte; Mate-
rial: PA6 GF30.

Bei niedrigen Einspritzgeschwindigkeiten kommt es beim Eintritt in die Kavität zu einem geringen Druckabfall. Es bilden sich wenige stabile Zellkeime und die Diffusion erfolgt vermehrt in bereits existierende Blasen. Es kommt zur Ausbildung einer ungleichmäßigen Schmelzefront, was in Abbildung 65 oben an den Fließlinien erkennbar ist. Die ungleichmäßige Temperaturverteilung und die leicht zu erkennenden weißen Punkte niedrigerer Temperatur deuten auf die Ausbildung großer Poren hin. Mit Zunahme der Einspritzgeschwindigkeit, erhöht sich die Druckabfallrate. Es wird eine hohe Anzahl an Zellkeimen gebildet und es bildet sich eine feine Schaumstruktur aus. Abbildung 65 Mitte zeigt eine nahezu gleichmäßige Ausbreitung der Fließfront über die Bauteillänge. Temperaturdifferenzen liegen unter 3 °C. Bei sehr hohen Einspritzgeschwindigkeiten kann es jedoch zur Ausbildung von Turbulenzen kommen, wie sie in Abbildung 65 unten zu sehen sind. Die Polymerschmelze trifft mit sehr hoher Geschwindigkeit auf die Rückwand des Werkzeugs. Die Newton'schen Gesetze ($Actio = Reactio$) zu Grunde legend, strömt die Polymerschmelze zurück, bis sie durch die entgegenkommende Schmelze in ihrem Fluss behindert wird. Die sich ausbildende Schaumstruktur aber auch die Orientierung der Glasfasern werden sich in diesem Bereich erheblich vom restlichen Bauteil unterscheiden. Dies kann negative Folgen für die Bauteileigenschaften haben.

Bei niedrigen Einspritzgeschwindigkeiten kann es zudem vorkommen, dass das Bauteil nicht vollständig ausgefüllt wird, wie Abbildung 66 belegt.

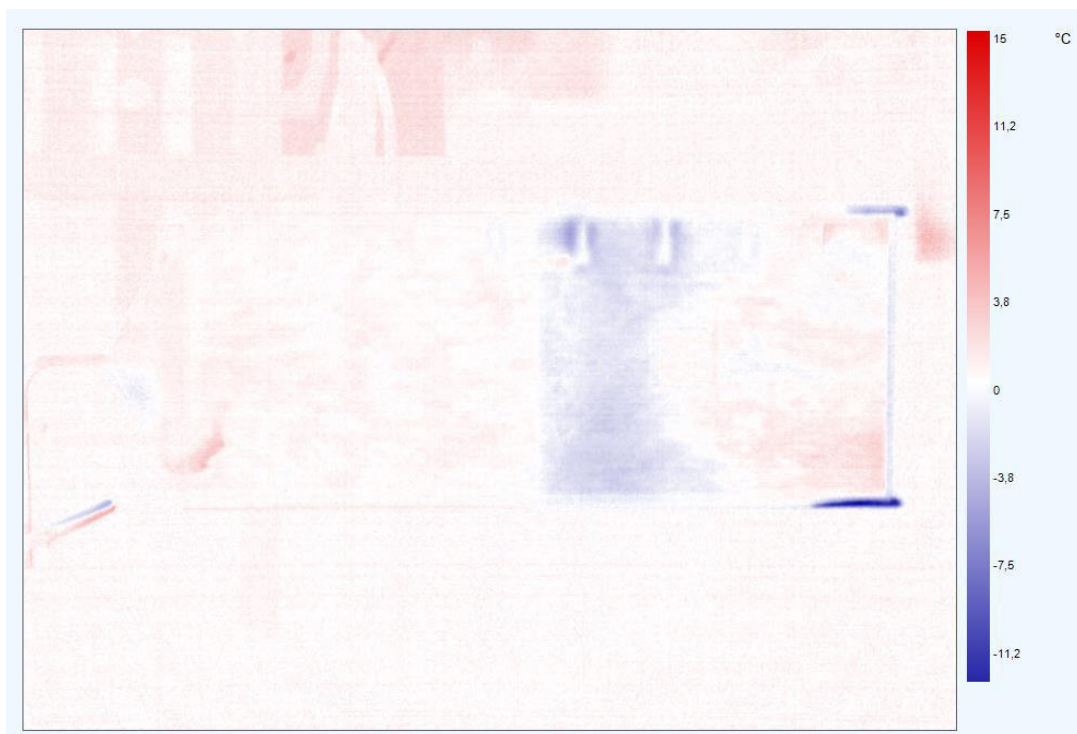


Abbildung 66: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Einspritzgeschwindigkeit): Einspritzgeschwindigkeit 60 ccm/s; Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten; Material: PP mit 20 % Talkum.

Die Ecken zum Fließwegende können auf Grund des geringen Gasdrucks durch die verminderte Anzahl an Nukleierungsstellen nicht mehr vollständig gefüllt werden. In der Thermografie ist dies dadurch zu erkennen, dass die nicht existenten Ecken signifikant kälter sind als das Bauteil.

5.2.3.2 Einfluss des Staudrucks

Durch den Staudruck wird das vorzeitige Aufschäumen der Treibfluid-Polymer-Mischung in der Plastifiziereinheit im Bereich vor der Verschlussdüse verhindert. Ist der Staudruck nicht ausreichend hoch, wird die Schnecke durch das Gas zurückgedrängt, welches sich vor der Schnecke anreichert. Es kommt zu einer Phasentrennung von Gas und Polymerschmelze. Die Schaumstruktur wird gröber.

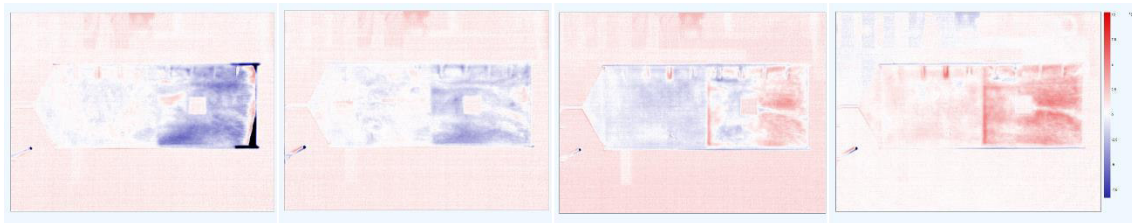


Abbildung 67: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Staudruck): von links nach rechts: 60 bar; 80 bar; 120 bar; 140 bar; Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten; Material: ABS.

Abbildung 67 zeigt für verschiedene Staudrücke die entsprechenden Wärmebildaufnahmen. Bei niedrigen Staudruck ist die Fließfront sehr inhomogen. Die Ecken zum Fließwegende sind nicht gefüllt. Der Staudruck bringt zusätzliche Scherung in die Polymerschmelze, sodass hierdurch die jeweiligen Temperaturunterschiede im Vergleich zum Zentralpunkt (100 bar) erklärt werden können. Mit Zunahme des Staudruck wird die Fließfront gleichmäßiger.

Wie die Thermografieaufnahme Abbildung 68 zeigt, sorgt der erhöhte Staudruck durch die verstärkte Scherung für einen dissipativen Anstieg der Schmelzetemperatur. Dies führt zu einer verzögerten Stabilisierung der Schmelze und damit zu einem verlängerten Wachstum der Zellen. Je länger die Zellen wachsen, desto mehr Gas kann in diese diffundieren und desto größere Zelldurchmesser lassen sich im abgekühlten Bauteil vorfinden.

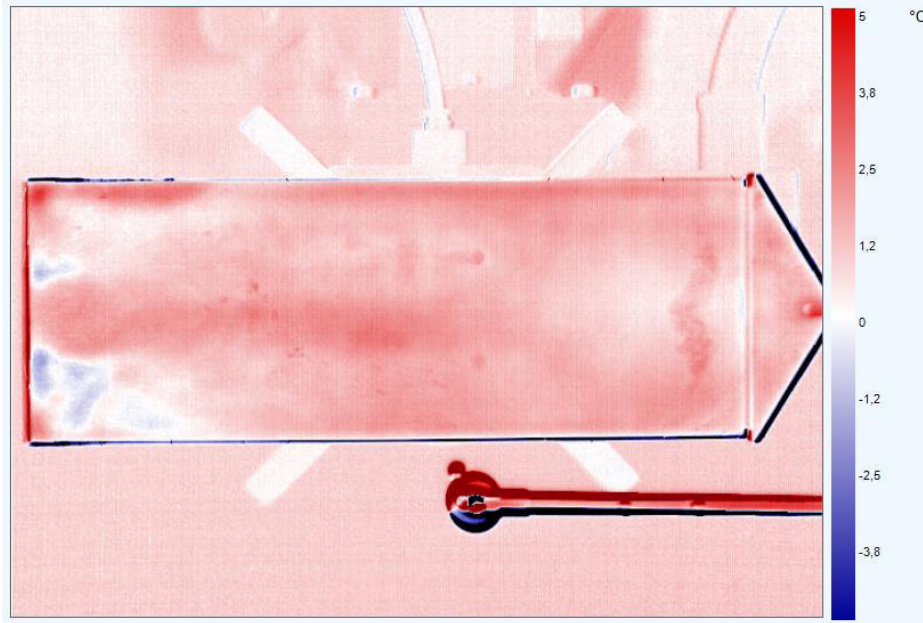


Abbildung 68: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Staudruck): Staudruck: 160 bar; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30.

5.2.3.3 Dosiergeschwindigkeit

Die Dosiergeschwindigkeit ist für das Schaumspritzgießen ein kritischer Faktor, welcher in der aktuellen Literatur noch unterrepräsentiert ist. Eine zu geringe Schneckendrehzahl bedingt eine schlechtere Homogenisierung der gasbeladenen Polymerschmelze, weshalb eine gröbere Schaumstruktur zu erwarten ist. Bei einer zu hohen Dosiergeschwindigkeit wird die Homogenisierung des Gas-Polymer-Gemischs verbessert, gleichzeitig wird das Polymer stärker geschert, was den Molekülkettenabbau negativ beeinflusst und zu einer höheren Schmelztemperatur führt. Diese wiederum bedingt längere Kühlzeiten und ein verstärktes Porenwachstum. Die Thermografie ermöglicht die Überwachung dieses Prozessparameters, wie Abbildung 69 und Abbildung 70 belegen.

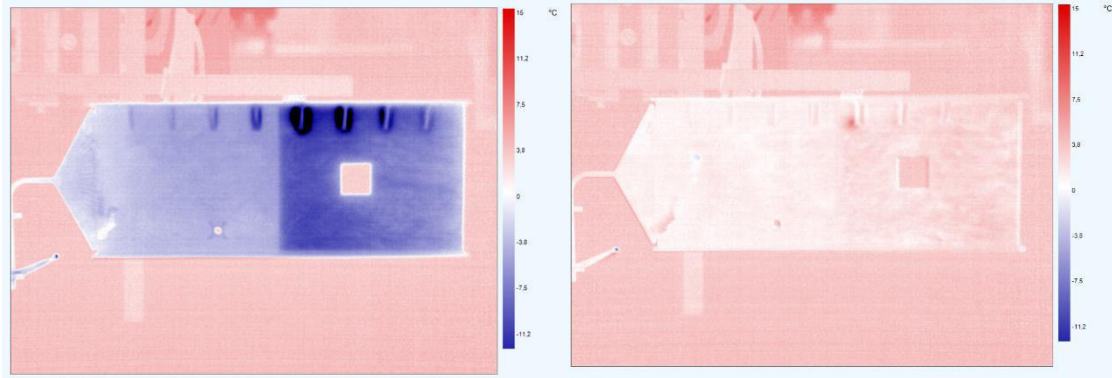


Abbildung 69: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Dosiergeschwindigkeit); Material: PP mit 20 % Talkum; Gewichtseinsparung 20 %; links: Dosiergeschwindigkeit: 50 ccm/ s; rechts: Dosiergeschwindigkeit: 250 ccm/s (Dosiergeschwindigkeit vom Zentralpunkt: 150 ccm/ s).

Im Vergleich zum Zentralpunkt des geschäumten Bauteils, ist das aus dem Werkzeug entnommene Bauteil mehr als 10 °C kälter. Bei einer höheren Dosiergeschwindigkeit bedingt die verstärkte Scherung eine bessere Homogenisierung, führt aber auch zu einer erhöhten Schmelztemperatur.

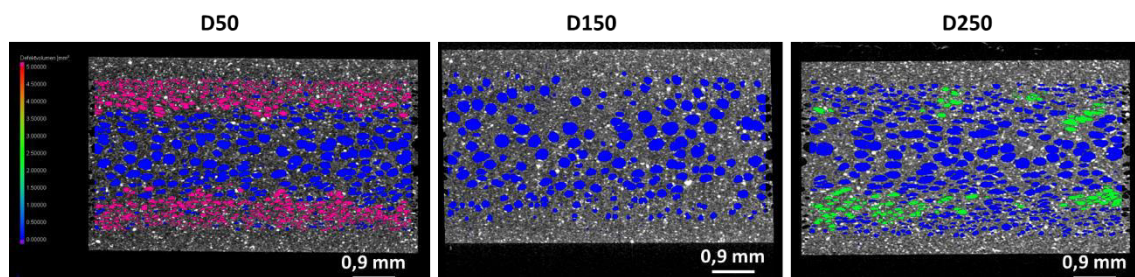


Abbildung 70: CT-Aufnahme: Schaumstruktur in Abhängigkeit der Dosiergeschwindigkeit; Material: PP mit 20 % Talkum; Gewichtseinsparung 20 %; links: Dosiergeschwindigkeit: 50 ccm/ s; Mitte: Dosiergeschwindigkeit: 150 ccm/ s rechts: Dosiergeschwindigkeit: 250 ccm/s.

Bei den Untersuchungen an der Platte mit PA6 GF30 zeigten sich ebenfalls bei niedrigen Dosiergeschwindigkeiten Inhomogenitäten in der Temperaturverteilung. Das Differenzbild aus dem Zentralpunkt mit der Aufnahme einer niedrigeren Dosiergeschwindigkeit deutet darauf hin, dass keine gleichmäßige Fließfront bei der Formteillfüllung vorliegt. Anzunehmen ist, dass das Gas sehr heterogen in der Polymerschmelze vorliegt.

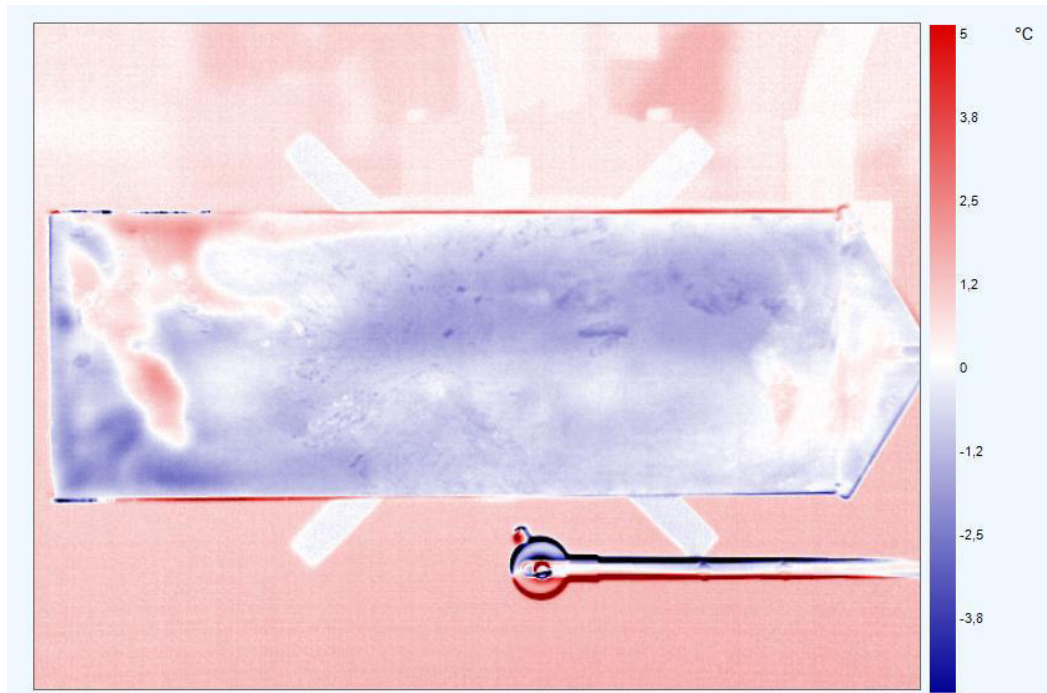


Abbildung 71: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Dosiergeschwindigkeit);
Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30; Dosiergeschwindigkeit: 160 ccm/s.

Beim Einspritzen ins Werkzeug kommt es durch den Druckabfall zu Schmelzeeruptionen, welche eine ungleichmäßige Forteilfüllung bedingen. Die Thermografieaufnahmen zeigen auch Bereiche, in denen die Ausbildung einer groben Schaumstruktur zu erwarten ist. Die zugehörigen CT-Aufnahmen zeigen, dass es durch die geringe Dosiergeschwindigkeit zur Ausbildung einer offenen Schaumstruktur in Folge des Kollabierens von Zellstegen gekommen ist.

5.2.3.4 Schmelzetemperatur

Für die Festlegung der Schmelzetemperatur muss beim Schaumspritzgießen ein Optimum gefunden werden. Basierend auf dem Arrhenius-Plot ist die Homogenisierung der gasbeladenen Polymerschmelze diffusionsgesteuert. Eine Erhöhung der Schmelzetemperatur verbessert die Gaslöslichkeit. Gleichzeitig führt die erhöhte Temperatur zu längeren Kühlzeiten im Werkzeug und gegebenenfalls zu einer gröberen Schaumstruktur. Niedrigere Schmelzetemperaturen im Umkehrschluss reduzieren den Gehalt an gelöstem Gas in der Polymerschmelze, ermöglichen aber ein schnelleres Erstarren der Polymerschmelze und somit eine frühzeitige Begrenzung des Porenwachstums.

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass bei einer geringeren Schmelzetemperatur die Scherung an der Schnecke und Zylinderwand zunimmt, sodass verstärkt Scherwärme in das Bauteil eingetragen wird.

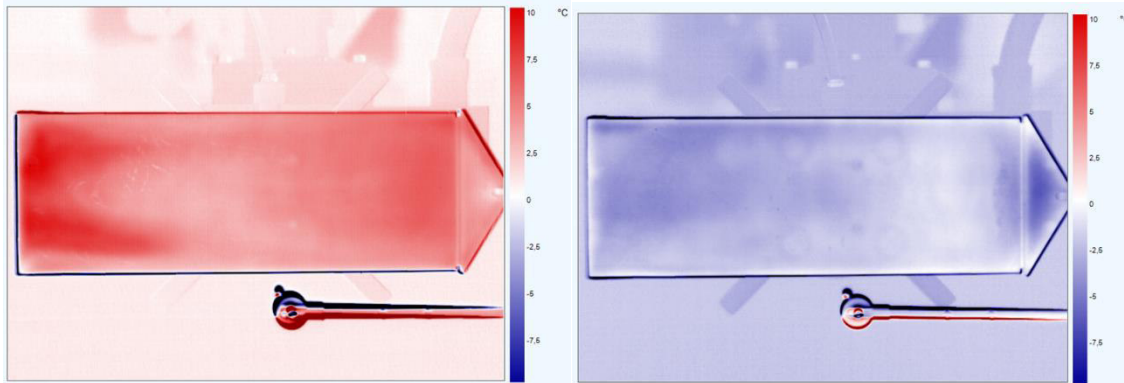


Abbildung 72: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt (275 °C) / Schmelzetemperatur); Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30; Schmelzetemperatur: links: 260 °C; rechts: 290 °C.

Abbildung 72 zeigt, dass bedingt durch die Scherwärme das Bauteil mit der niedrigeren Schmelzetemperatur (260 °C) heißer ist als die Referenz mit 275 °C und das Bauteil, welches mit einer höheren Schmelzetemperatur (290 °C) als die Referenz gespritzt wurde, ist kälter.

5.2.3.5 Werkzeugtemperatur

Die Werkzeugtemperatur beeinflusst die Kühlrate, welche wiederum einen direkten Einfluss auf diverse Materialeigenschaften hat, wie Schmelzeviskosität, Oberflächenspannung, Aktivierungsenergie, Kristallisationskinetik, Diffusivität und die Gaslöslichkeit. Prinzipiell ist festzuhalten, dass mit zunehmender Kühlrate das Wachstum der Poren schneller begrenzt wird und die Schaumstruktur feiner ist. Eine höhere Werkzeugtemperatur verbessert die Oberflächenqualität durch Verminderung der Ausbildung von Silbersehlieren.

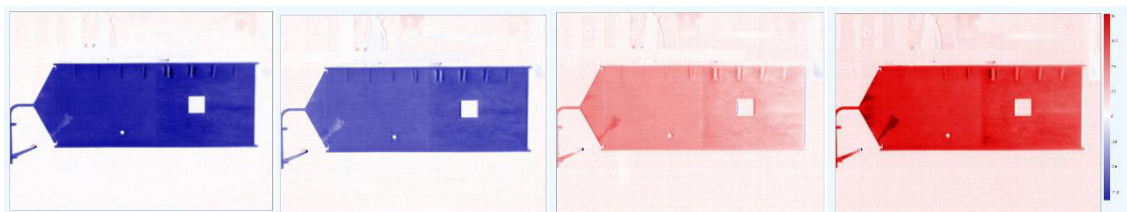


Abbildung 73: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Werkzeugtemperatur): von links nach rechts: 20 °C; 30 °C; 50 °C; 60 °C; Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten; Material: PP mit 20 % Talkum, 10 % Gewichtseinsparung.

5.2.3.6 Treibmittelgehalt

Der Treibmittelgehalt sollte immer an die Gaslöslichkeit des jeweiligen Polymers angepasst sein. Hierbei gilt es ein Optimum zu finden. Zu hohe Gasgehalte führen, dazu, dass dieses teilweise als separate Phase im Zylinder vorliegt und die Prozessstabilität, die

Schaumstruktur, Oberflächenqualität und mechanischen Eigenschaften negativ beeinflusst. Ist der Gasgehalt zu niedrig, steigt der Anteil eingebrachter Scherwärme in hohem Maße an.

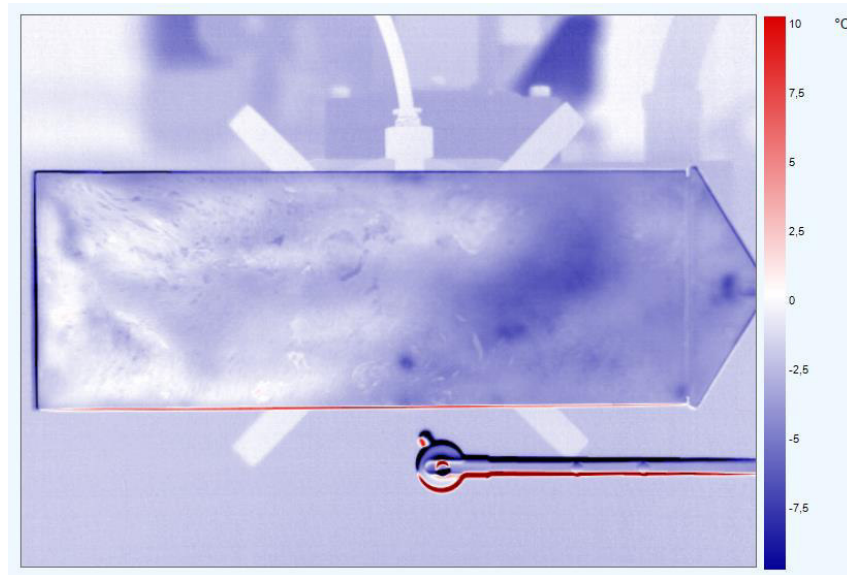


Abbildung 74: Thermografieaufnahme – Differenzbild
(Gasgehalt 0,02 l/ Zyklus / Gasgehalt 0,1 l/ Zyklus); Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30.

Abbildung 74 und Abbildung 75 zeigen, dass bei einem zu niedrigen Gasgehalt die eingebrachte Scherwärme zu einer Vergrößerung der Schaumstruktur mit einem Kollabieren von Zellstegen führt.

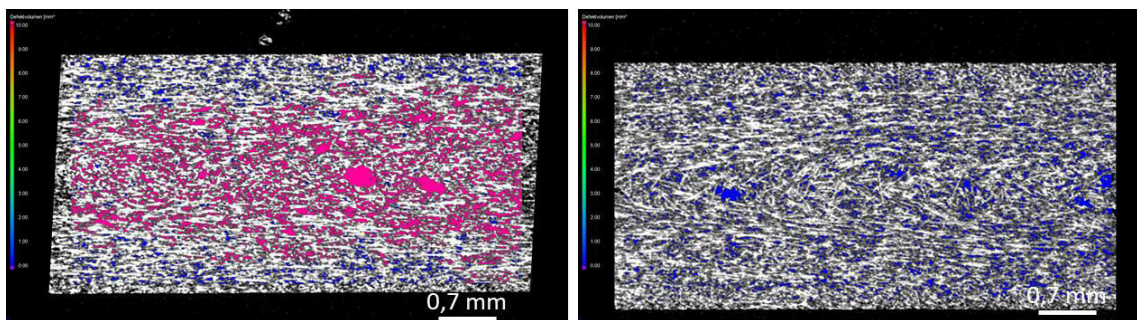


Abbildung 75: CT-Aufnahme: links: Treibmittelgehalt: 0,02 l/Zyklus; rechts: Treibmittelgehalt: 0,1 l/Zyklus; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30.

Bei sehr hohen Gasgehalten (siehe Abbildung 76) kommt es zu Schmelzeeruptionen und der Ausbildung von Defekten, welche mittels Wärmebildkamera deutlich sichtbar sind.

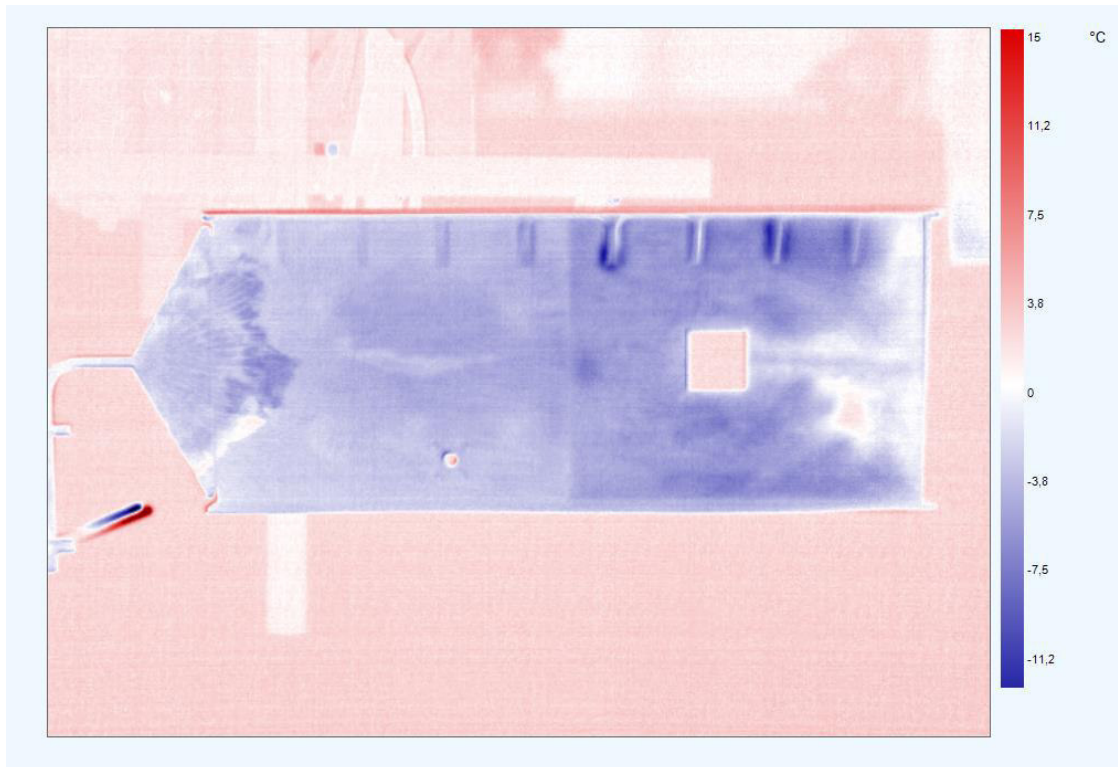


Abbildung 76: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt / Gasgehalt 1 l / Zyklus); Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten; Material: PP mit 20 % Talkum.

5.2.4 Zusammenfassung

Über alle Versuchsreihen hinweg hat sich die Thermografie als bestes Verfahren zur Inline-Qualitätssicherung bewiesen. Auch wenn keine direkten Rückschlüsse auf die tatsächliche Porengröße möglich sind, so ermöglicht das Verfahren die Prozessparameter zu optimieren und Fehlerbilder frühzeitig zu erkennen und mit einfachen Maßnahmen zu beheben. Eine kontinuierliche Prozessüberwachung ist mit diesem Verfahren möglich.

5.3 Inline-Gewichtsmessung

Das Gewicht eines geschäumten Bauteils ist ein entscheidendes Qualitätsmerkmal. Die kontinuierliche Inline-Überwachung bietet die Möglichkeit ein robustes Prozessfenster zu definieren. Das Messverfahren erleichtert das Detektieren von Fehlstellen am Bauteil, wie beispielsweise der Abriss von z. B. Schraubdomen beim Entformen, das Erkennen von fehlenden Einlegeteilen oder Schwankungen in Prozessgrößen wie Nachdruckzeit und Nachdruckhöhe. Für das Thermoplast-Schaumspritzgießen hilft das Messverfahren zur Bewertung der Prozessstabilität bei kritischen Größen, wie dem Staudruck (niedrige Werte), Gasgehalt (hohe Werte) und dem Dosiervolumen (bei der diskontinuierlichen Förderung von Granulat und Treibmittel (chemisch) – siehe Abbildung 77). Darüber hinaus unterstützt die kontinuierliche Gewichtsmessung bei der Bewertung des Zustands der Maschine mit speziellem Augenmerk auf die Dichtigkeit des Gasinjektors und Abnutzungserscheinungen an der Rückstromsperre.

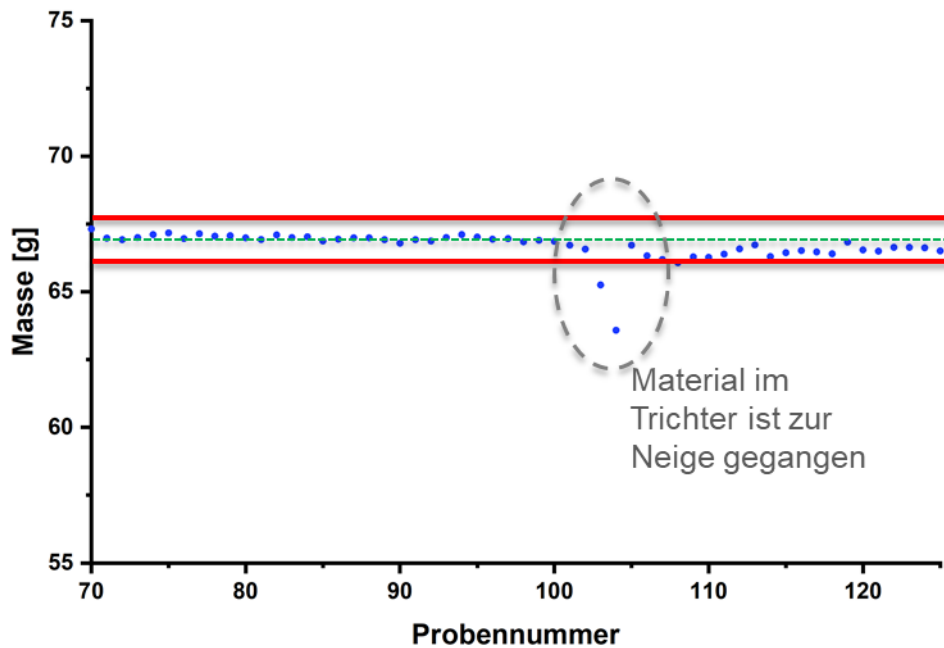


Abbildung 77: Fehlerbild bei der Inline-Gewichtsmeldung. Batchweise Zugabe von Granulat gemischt mit chemischem Treibmittel, am Beispiel WPC mit endothermem Treibmittel.

Die Implementierung der Inline-Gewichtsmessung in den laufenden Spritzgießprozess zeigte eine unerwartete Komplexität.

Zu Projektbeginn war die Erwartungshaltung, dass die Probekörper mit einem individuell additiv gefertigten Greifer nach Zyklusende aus dem Werkzeug entnommen werden. In diesen ist eine Kraftmesszelle integriert, der eine Gewichtsmessung direkt nach der Entformung ermöglicht, ohne dass zusätzliche Arbeitsschritte notwendig werden.

Da verschiedene Werkzeuge für die Versuche eingesetzt wurden, mit stark variierenden Bauteilmaßen, war es für die Arbeiten und auch weiterführende Arbeiten sinnvoll einen Aufbau zu entwickeln, welcher universell eingesetzt werden kann. Hierfür wurde eine Master-Halterung konstruiert mit einer Schnellspannhalterung, welche fest an der Spritzgießmaschine verbaut ist. Die Umrüstung der für die verschiedenen Bauteilgeometrien entworfenen Greifer-Einsätze erfolgt schnell und ohne großen Aufwand an den Anlagen.

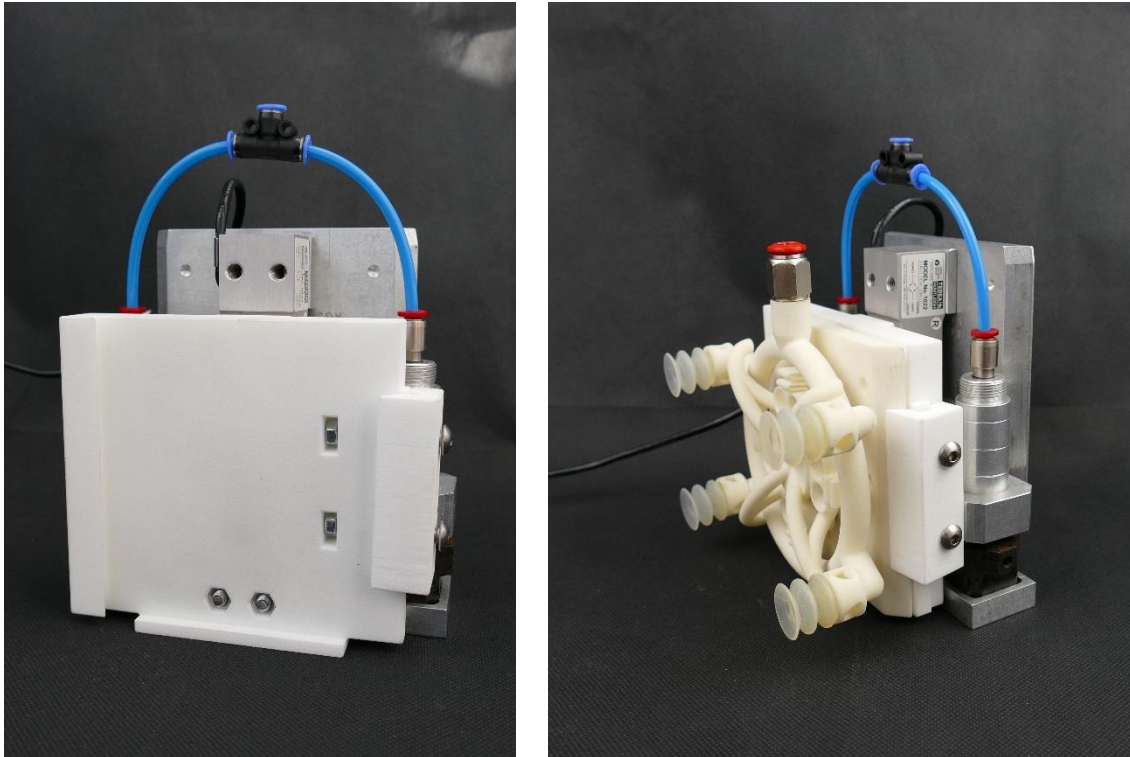


Abbildung 78: Aufbau aus Halterung und gedrucktem Greifer

In die Greifer sind bereits in der Fertigung mittels Selektivem Lasersintern Kanäle für die Druckluftzuführung berücksichtigt. An deren Ende sitzen Silikon-Sauger welche die Bauteile ansaugen und auf diese Weise für den Weitertransport stabilisieren. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 79 gezeigt.

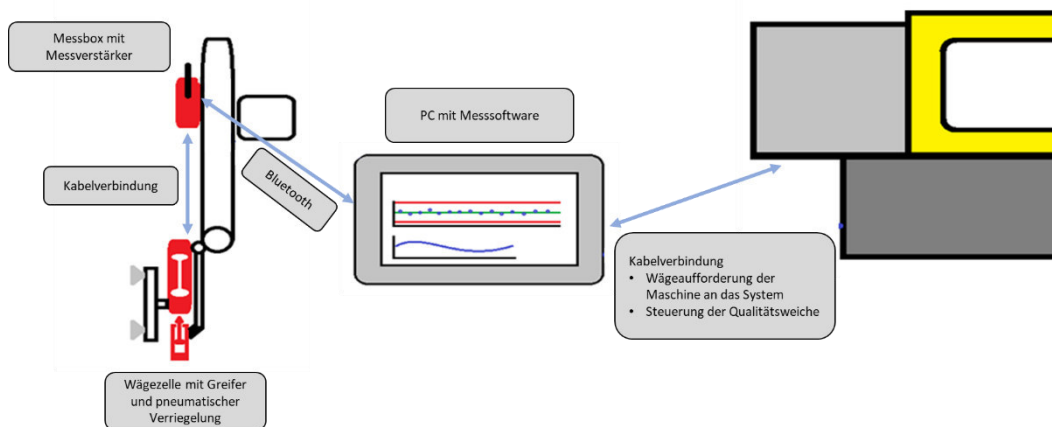


Abbildung 79: Schematischer Aufbau der Implementierung der Inline-Gewichtsmessung.

Eine am SKZ geschriebene Messsoftware erfasst die Messwerte und bereitet die Daten für die Weiterverarbeitung auf. Diese Software wurde im Rahmen der Digitalisierung aller Messdaten erweitert mit der Zuordnung eines Zeitstempels für jede Messung. Dies erlaubt die eindeutige Zuordnung der Messergebnisse zu Prozessparametern und

Bauteil. Eine beispielhafte Darstellung der Benutzeroberfläche ist in Abbildung 80 und Abbildung 81 dargestellt.

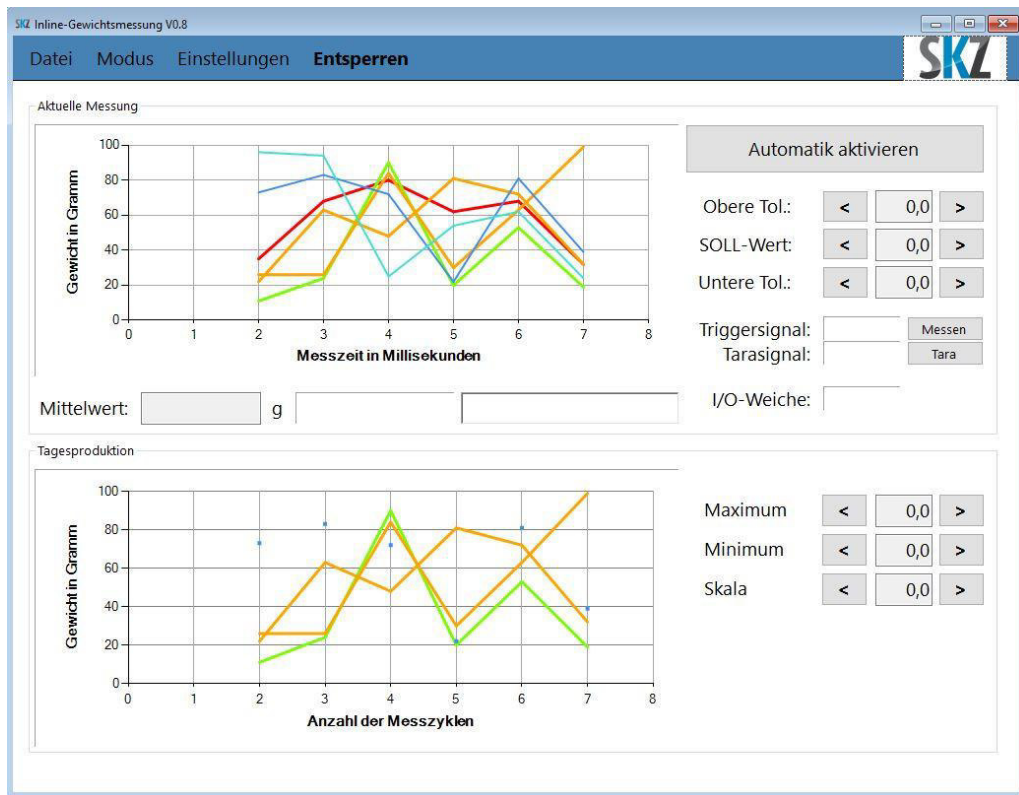


Abbildung 80: Benutzeroberfläche der Messsoftware zur Inline-Gewichtsmessung.

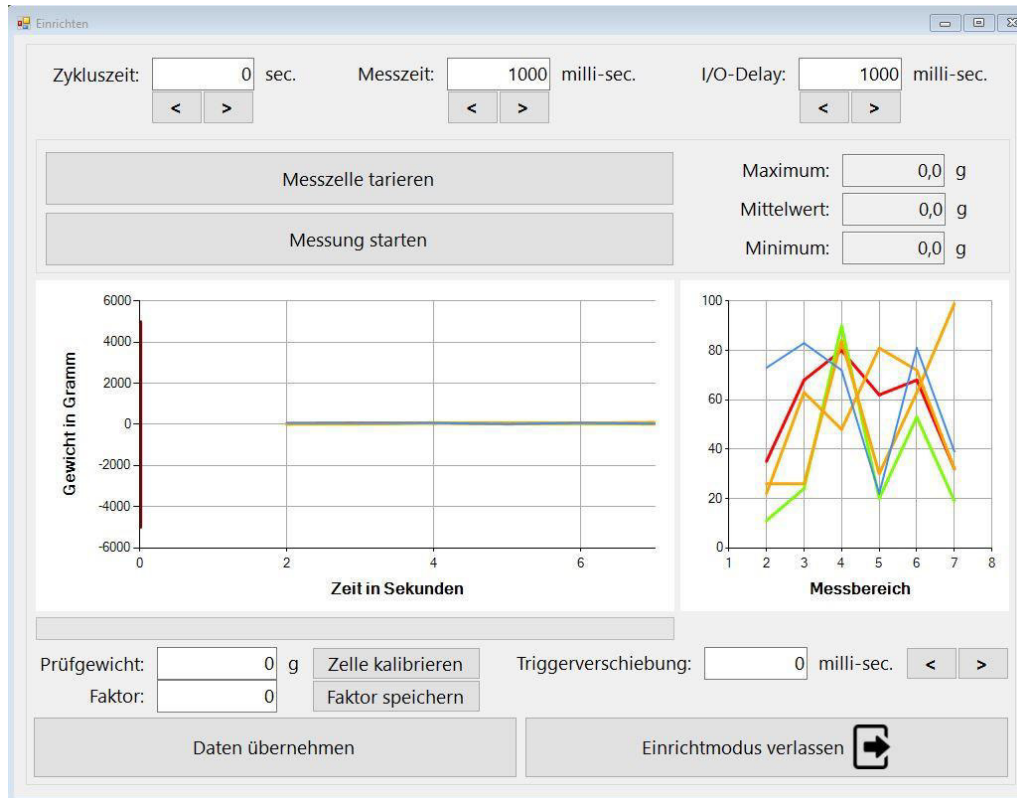


Abbildung 81: Benutzeroberfläche zum Einrichten der Messsoftware zur Inline-Gewichtsmessung.

Im laufenden Spritzgießprozess ergaben sich mehrere anwendungsnahe Problemstellungen, welche ein Umdenken in der Prozessführung erforderlich machten. Der Spritzgießzyklus umfasst für jeden Arbeitsschritt (siehe Abbildung 82) eine Vielzahl von Maschinenbewegungen und unterschiedlichen Druckniveaus.

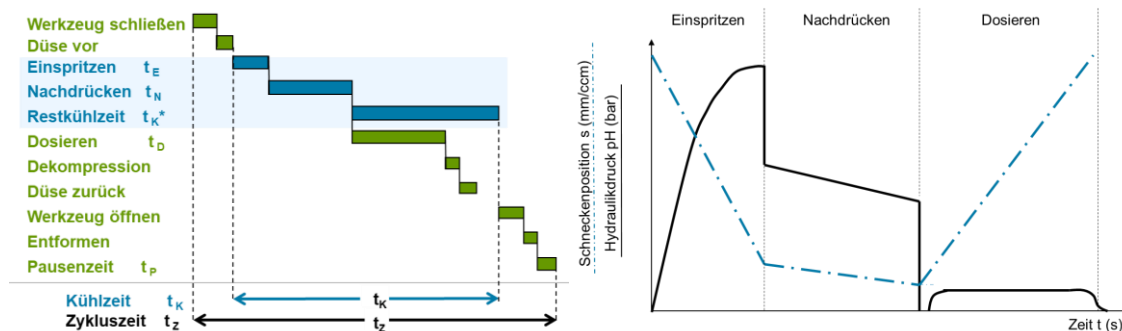


Abbildung 82: Links: Spritzgießzyklus; rechts: Schneckenposition und Hydraulikdruck im Spritzgießzyklus.

Diese agieren als Störgrößen für die automatisierte Gewichtsmessung, da die Kraftmesszelle am Greifer über das Handlinggerät mit der Spritzgießmaschine verbunden ist, was zu Schwankungen in der Messwerterfassung führt. Diese, in Abbildung 83 dargestellten,

Störgrößen müssen beim Einrichten des Messverfahrens berücksichtigt werden. Eine Bestimmung des Bauteilgewichts kann nur in einem sehr begrenzten Zeitfenster erfolgen und muss in Abhängigkeit der Prozessparameter individuell angepasst werden.

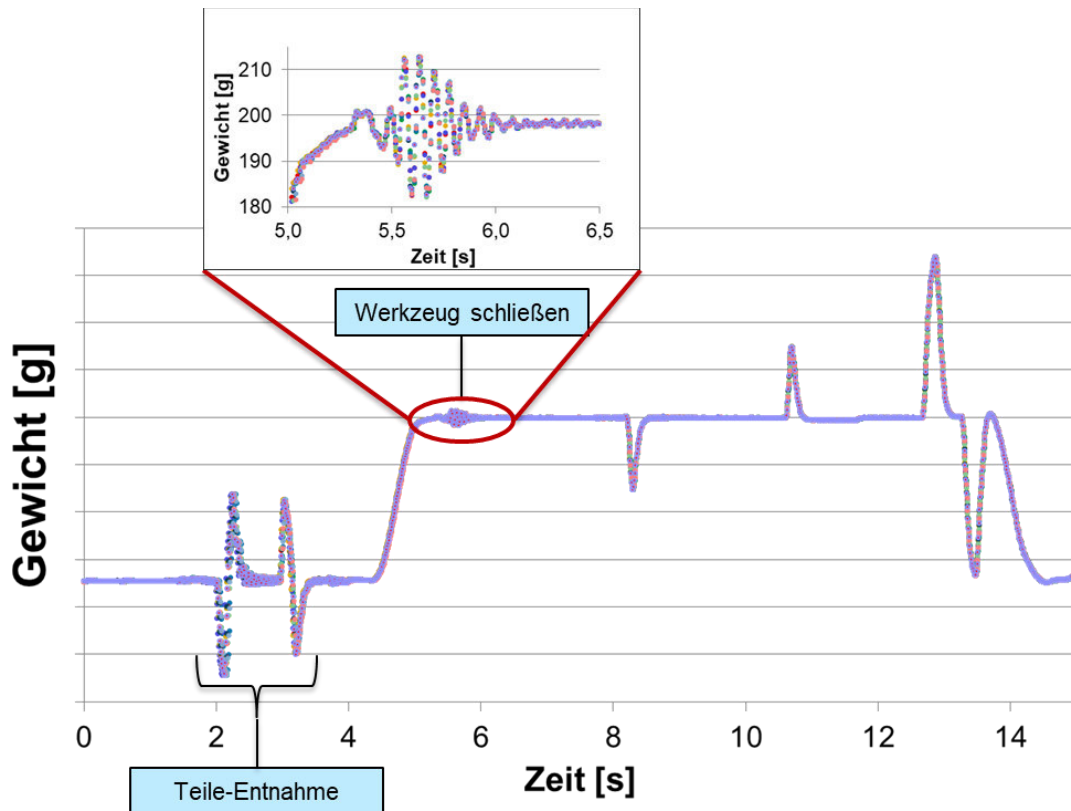


Abbildung 83: Einfluss des Spritzgießzyklus auf die Erfassung des Bauteilgewichts.

Verstärkt wird dies durch die auf die Messzelle wirkenden Beschleunigungskräfte, welche die durch die Maschine übertragenen Schwingungen noch zusätzlich überlagern, wie Abbildung 84 zeigt.

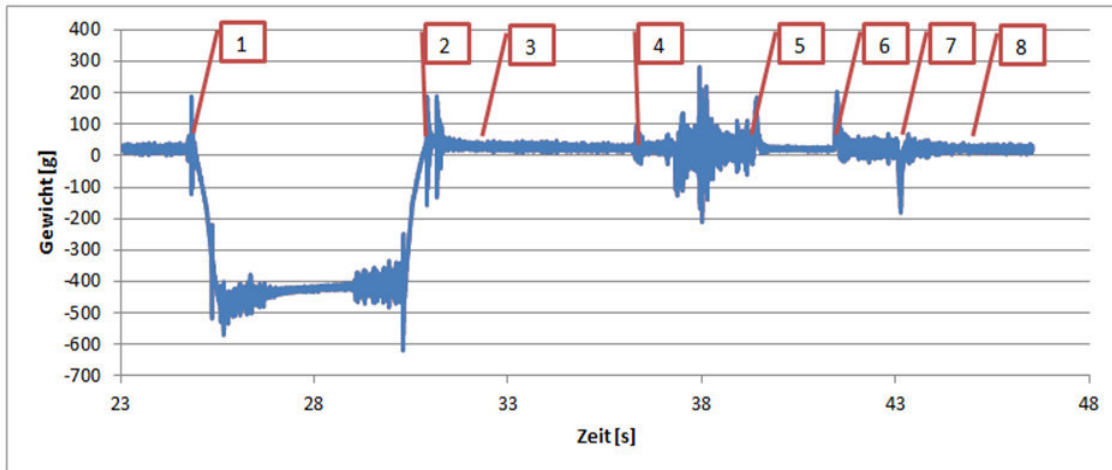


Abbildung 84: Messzyklus: 1: Greifer fährt in das Werkzeug ein; 2: Greifer aus dem Werkzeug ausgefahren (Y-Achse) und geschwenkt (2. Peak); 3: Horizontalfahrt (Z-Achse) zur Ablageposition; 4: Werkzeug schließt und Greifer fährt nach unten auf Ablageposition; 5: Ablageposition unten erreicht – Formteil ablegen; 6: Greifer (Y-Achse) nach oben; 7: Position oben erreicht; 8: Horizontalfahrt (Z-Achse) zur Warteposition über dem Werkzeug.

Eine weitere Komplikation ergibt sich durch das Messprinzip selbst. Wägezellen enthalten einen Federkörper mit Dehnungsmessstreifen, dessen Geometrie sich unter Einwirkung des Gewichts leicht verändert. Zur Durchführung der Messung wird die Halterung mit dem angesaugten Bauteil nach unten geklappt, es kommt zu einer Entkopplung der Wägezelle, sodass durch die durch das Bauteil wirkende Gewichtskraft eine Auslenkung bzw. Längenänderung auf den Messkörper wirken kann. Durch die Entkopplung wird das System leicht instabil und ist somit stark anfällig für die oben aufgeführten Störquellen. Hinzu kommt die Relaxation des bei der Schwenkbewegung verformten Unterdruckschlauches. Die hierbei wirkende Gewichtskraft beeinflusst die Messung zusätzlich, wie Abbildung 85 verdeutlicht.

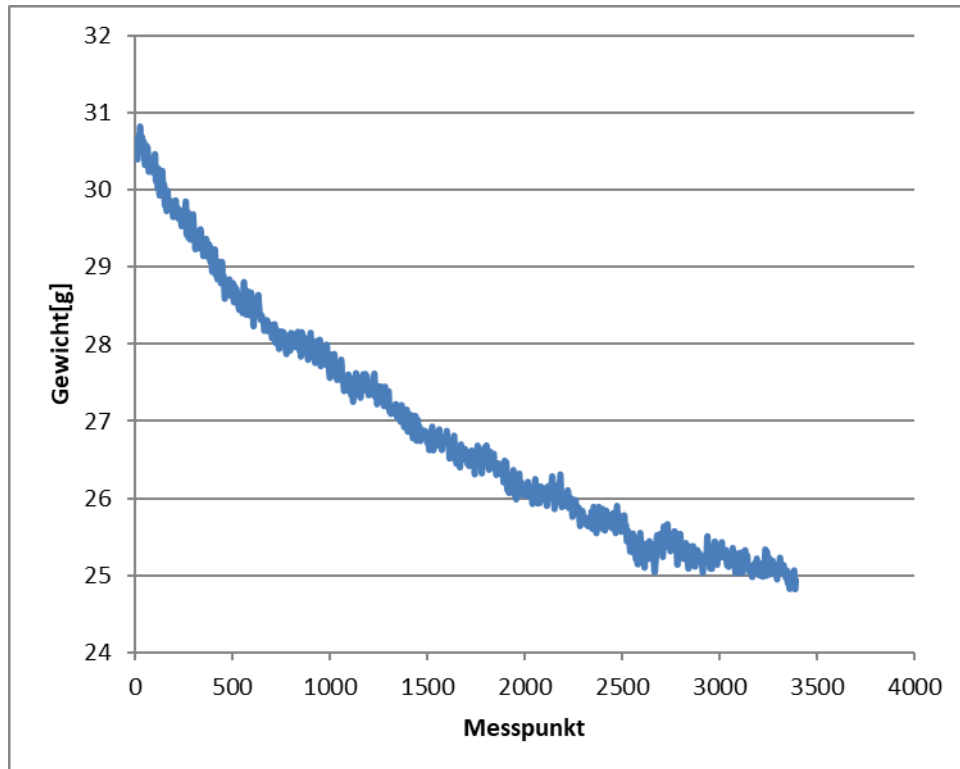


Abbildung 85: Rollierend arithmetisch gemittelte Werte über die Messdauer während der Horizontalfahrt (3).

Die angezeigte Gewichtskraft fällt während der Messfahrt ab. Auch im ruhenden Zustand wird das Gewicht durch Lage, Steifigkeit und Auslegung der Unterdruckschläuche beeinflusst. Auch geringste Schwankungen in der Druckluftversorgung, um das Bauteil zu halten, zeigen einen Einfluss auf die Messwertbestimmung. Die Schwankungen im laufenden Spritzgießprozess machten einen Einsatz als Qualitätssicherungsmaßnahme nicht möglich.

Das Messprinzip wurde basierend auf diesen Erkenntnissen an die Umgebung adaptiert. Nach der Entnahme des Bauteils wird dieses zunächst vor die Thermografie-Kamera befördert. Anschließend wird das Bauteil automatisiert auf einer separat eingerichteten, schwingungsarm gelagerten Plattform mit einer Waage abgelegt. Der gemessene Wert wird über eine entsprechende Verbindung in Echtzeit mit Zeitstempel in eine Excel-Tabelle eingetragen. Hierdurch war es möglich das individuelle Bauteilgewicht über alle Versuchsreihen hinweg aufzuzeichnen. Der finale Aufbau ist in Abbildung 86 dargestellt.

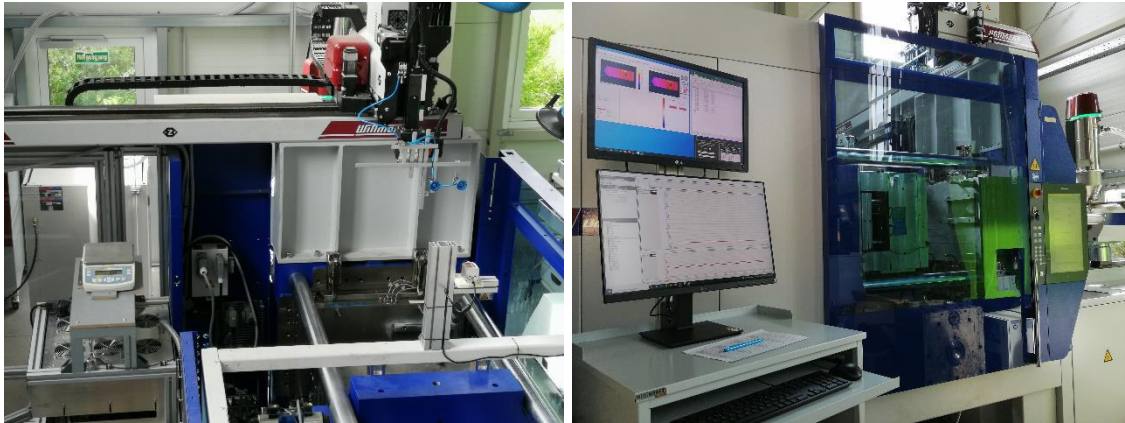


Abbildung 86: Messaufbau zur Inline-Qualitätssicherung, links: Aufsicht mit Thermographie-Kamera und Waage; rechts: Rechner mit entsprechender Messsoftware.

Die Untersuchungen belegen, dass die Inline-Gewichtsmessung eine kostengünstige Methode zur Inline-Qualitätssicherung geschäumter Bauteile ist. Insbesondere Prozessparameter, welche einen direkten Einfluss auf die Homogenität der Polymerschmelze und auf die Prozessstabilität haben, können mit diesem Messverfahren überwacht werden und zur Bauteiloptimierung herangezogen werden.

Der Staudruck ist hierfür ein klassisches Beispiel, siehe Abbildung 87.

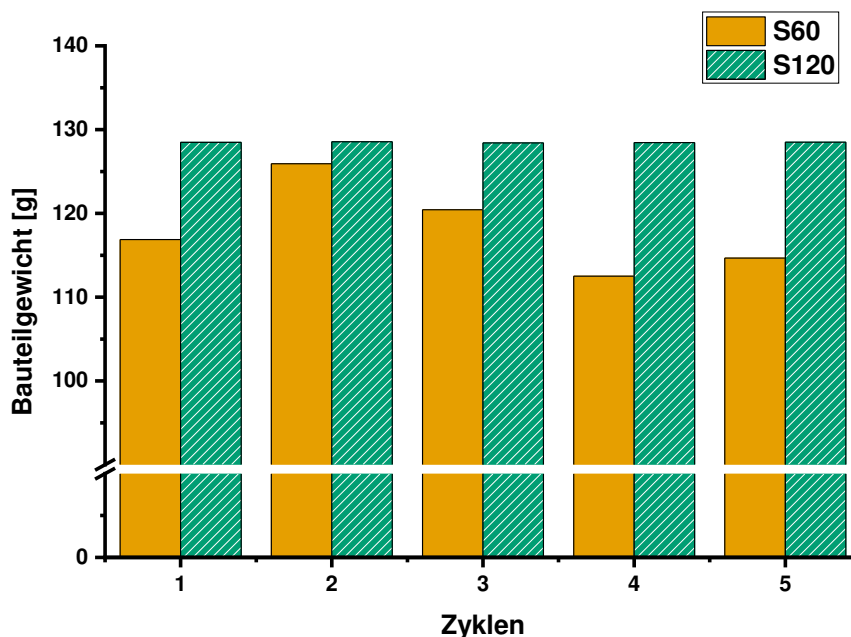


Abbildung 87: Bauteilgewicht in Abhängigkeit des Staudrucks (60 bzw. 120 bar) über 5 Zyklen, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum.

Ist dieser zu niedrig, ist das Treibgas nicht homogen in die Polymerschmelze eingearbeitet. Es kommt zu Fluktuationen in der Verarbeitung, eine stabile Prozessführung ist nicht möglich.

Den gleichen Effekt sieht man auch, wenn sich mehrere Parameter gegenseitig negativ beeinflussen, wie Abbildung 88 verdeutlicht.

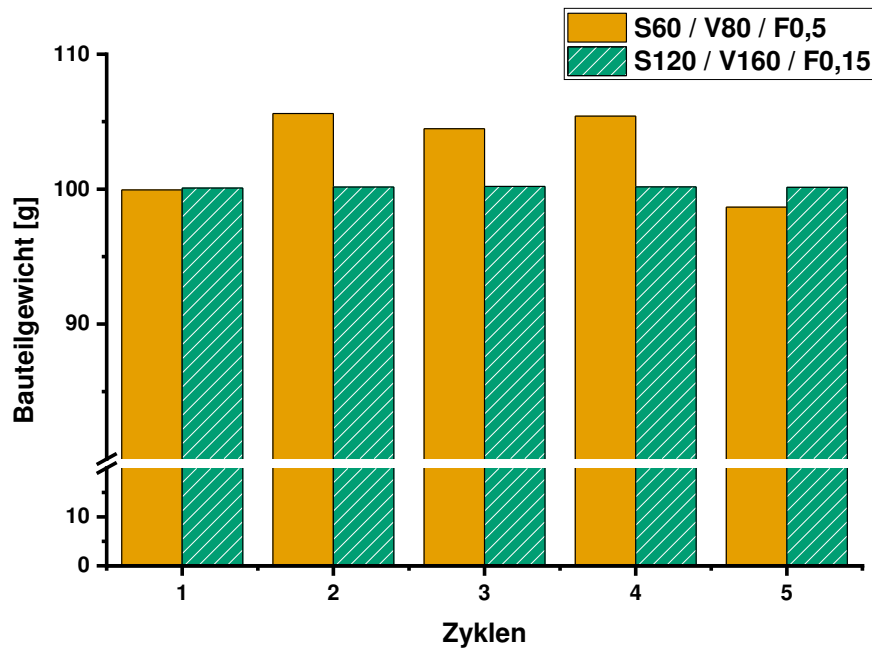


Abbildung 88: Fluktuationen des Bauteilgewichts über 5 Zyklen; orange: niedriger Staudruck (60 bar), niedrige Einspritzgeschwindigkeit (80 ccm/ s) und hoher Gasgehalt (0,5 l/ Zyklus); grün: optimierter Staudruck (120 bar), optimierte Einspritzgeschwindigkeit (160 ccm/ s) und optimierter Gasgehalt (0,15 l/ Zyklus) am Beispiel WPC mit 50 Gew.% feinen Holzfasern

Die Untersuchungen haben aber auch gezeigt, dass die Einflussgrößen nicht die gleiche Aussagekraft haben, wie andere untersuchte Messverfahren. Zur Prozessoptimierung wird die Inline-Gewichtsmessung nicht empfohlen. Ein Einsatz für die kontinuierliche Prozessüberwachung ist aber sinnvoll, um maschinenbedingte Abweichungen rechtzeitig erkennen zu können. Hierzu zählt beispielsweise: Verschleiß der Verschlussdüse, Verstopfen des Gasinjektors und ein Leerlaufen der Granulatbereitstellung.

5.4 Werkzeuginnendruck

Der Werkzeuginnendruck ist ein beim Kompaktspritzgießen etabliertes Verfahren zur Produktionsüberwachung und Prozessoptimierung. Bekannte Hersteller von Spritzgießmaschinen nutzen diesen Messparameter als einen wichtigen Aspekt in der automatisierten Prozesssteuerung, welche sich problemlos in eine Industrie 4.0 Umgebung einbinden lässt.

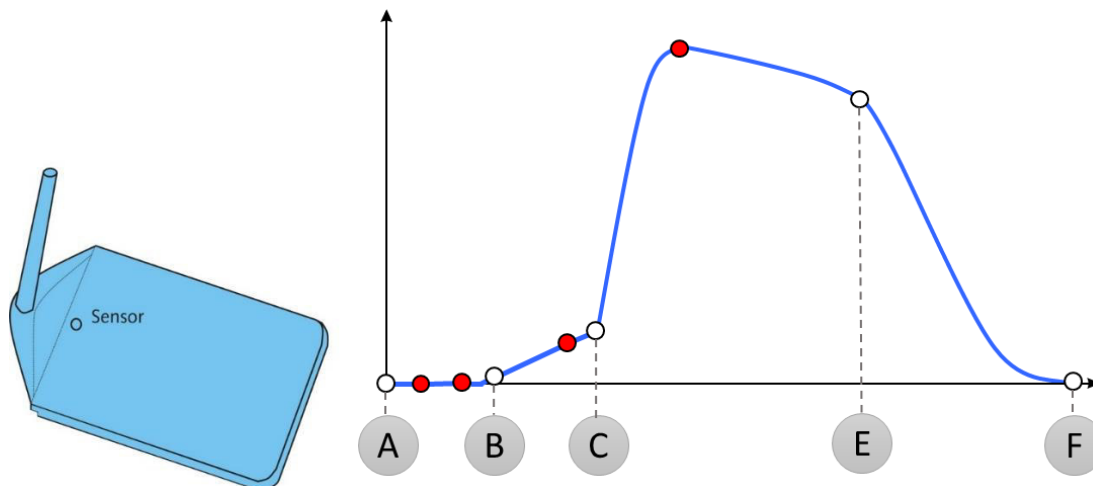


Abbildung 89: Darstellung einer idealisierten Werkzeuginnendruckverlaufskurve mit Angussnahe Sensor für das Kompaktspritzgießen.

Abbildung 89 beschreibt grafisch den im Kompaktspritzgießen typischen Verlauf einer idealen Werkzeuginnendruckkurve für eine einfache Platte mit einem angussnah angebrachten Werkzeuginnendrucksensor. Zwischen dem Einspritzen der Polymerschmelze in die Kavität des Werkzeugs (A) und dem Erreichen des Sensors (B) vergeht eine Zeitspanne x , welche abhängig ist von der Viskosität der Polymerschmelze und den eingestellten Prozessparametern. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind Einspritzgeschwindigkeit, Schmelztemperatur und Werkzeugtemperatur. Zum Zeitpunkt C ist die Kavität volumetrisch gefüllt und es erfolgt ein Umschalten von der Einspritz- auf die Nachdruckphase, wodurch es in dieser Kompressionsphase zu einem starken Druckanstieg kommt. Dieser Druckanstieg am Sensor wird mit zunehmender Zeit überlagert von der in Folge der Abkühlung bedingten thermischen Volumenschwindung. Dies wird durch das Nachdrücken von zusätzlichem Material in die Kavität ausgeglichen. Zum Zeitpunkt E kommt es zum Erstarren des Anschnitts. Nach einer bauteil- und materialspezifischen Kühlzeit wird das Werkzeug zum Zeitpunkt F geöffnet, das Bauteil entnommen und der am Sensor anliegende Druck entspricht wieder dem atmosphärischen Druck.

Beim Thermoplast-Schaumspritzgießen entfällt die Nachdruckphase fast vollständig. Es wird lediglich ein sehr geringer Nachdruck für wenige Sekunden angelegt, um ein Zurückfließen der expandierenden Schmelze zu verhindern. Folglich ist der am Sensor anliegende Druck erheblich niedriger und es müssen neue Eckpunkte definiert werden, um den Kurvenverlauf mit den Prozessdaten abzugleichen und das Messinstrument zur Prozessoptimierung heranziehen zu können.

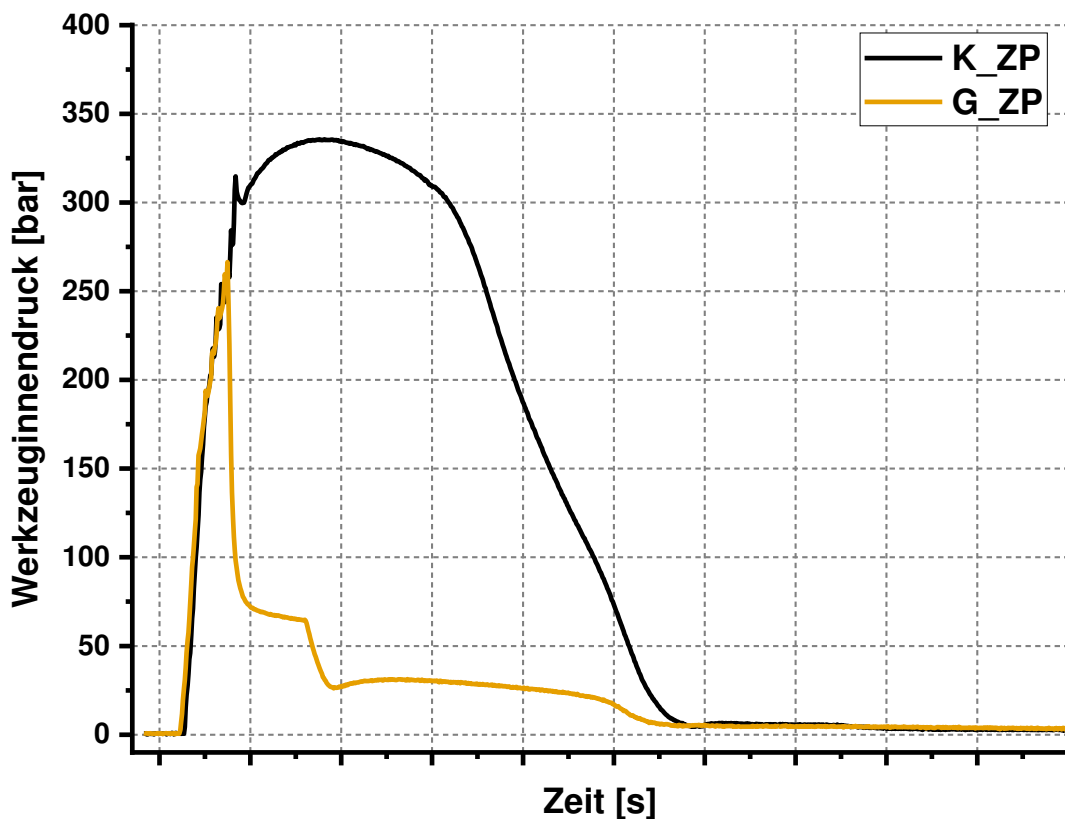


Abbildung 90: Vergleich der Werkzeuginnendruckkurven für kompakt (schwarze Linie) und geschäumt (gelbe Linie) gespritzte Probekörper, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum, Zentralpunkt, 10 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.

Abbildung 90 zeigt beispielhaft den Kurvenverlauf des Werkzeuginnendruckes zwischen einem kompakt gespritzten Bauteil (schwarze Linie) und einem geschäumten Bauteil (gelbe Linie).

Mit Abschluss der Einspritzphase kommt es beim Schaumspritzgießen zu einem starken Abfall des anliegenden Werkzeuginnendruckes. Der anschließende Verlauf wird maßgeblich bestimmt durch den Füllgrad und durch die Nukleierung sowie Expansion des Treibmittels in der Polymerschmelze. Die treibmittelbeladene Schmelze ist unter gleichen Prozessparametern nur insignifikant schneller als bei dem kompakt gespritzten Bauteil. Das expandierende Gas zeigt in den Versuchsreihen über die gesamte Fließweglänge keinen erheblichen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit.

Der beim Thermoplast-Schaumspritzgießen typische Verlauf der Werkzeuginnendruckkurve ist wie folgt – siehe Abbildung 91 - zu beschreiben.

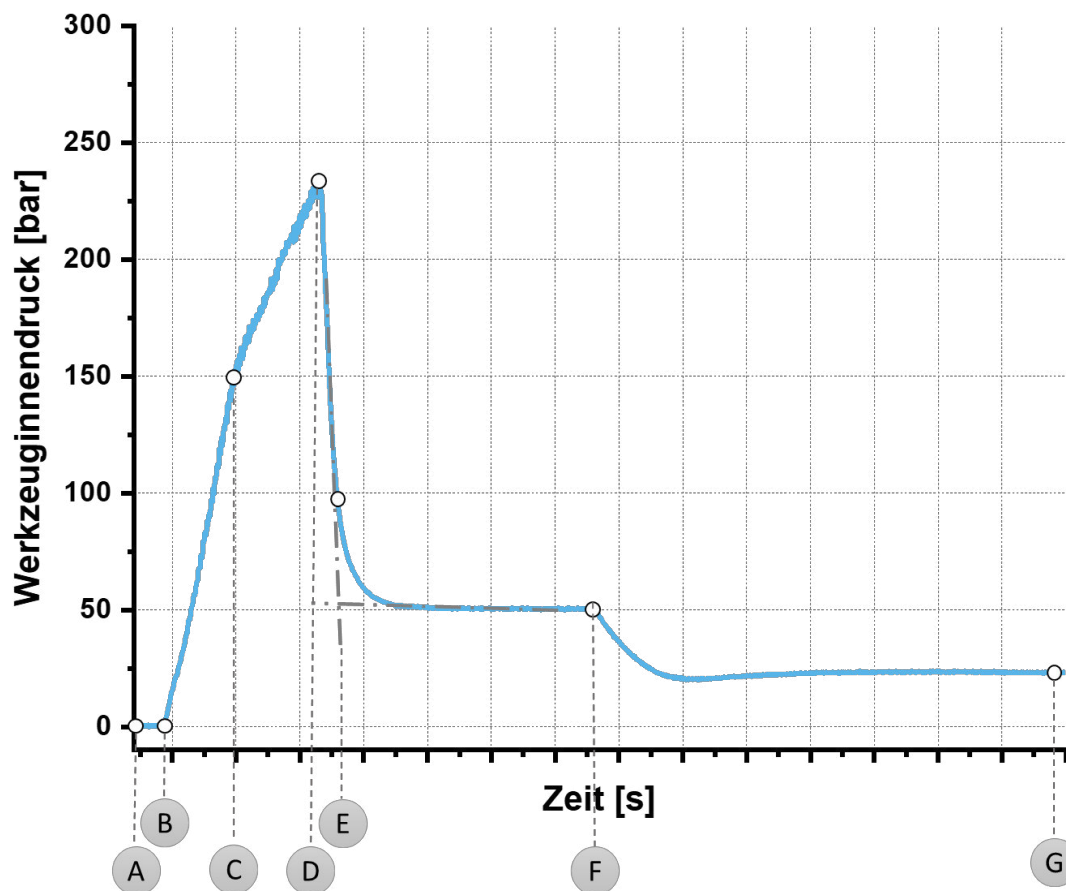


Abbildung 91: Darstellung einer idealisierten Werkzeuginnendruckverlaufskurve mit Angussna- hem Sensor für das Thermoplast-Schaumspritzgießen.

Ebenso wie beim Kompaktspritzgießen vergeht zwischen dem Einspritzen der gasbeladenen Polymerschmelze (A) und dem Erreichen des Werkzeuginnendruckensors (B) eine gewisse Zeit x . Mit Erreichen des Sensors steigt der Druck in kurzer Zeit sehr stark an. Zum Zeitpunkt C beginnt parallel zum Einspritzen die Bauteil- schwindung. Je nach Prozesseinstellung ist mit Erreichen des Zeitpunkts D die Einspritzphase abgeschlossen und der Druck fällt schlagartig ab. In diesen Bereich fällt auch die Nukleierungsphase. Das beginnende Blasenwachstum setzt zum Zeitpunkt E ein und bildet in Abhängigkeit von den Prozessparametern ein Plateau auf einem niedrigen Druckniveau aus. Für teil- kristalline Kunststoffe startet zum Zeitpunkt F die Kristallisation. Die Kristallisations- temperatur des gewählten Kunststoffs ist ein wichtiger Faktor, welcher bei der Material- auswahl und im laufenden Prozess berücksichtigt werden muss, da die Schaumstruktur- ausbildung durch die Kristallisation stark begrenzt wird. Mit einsetzender Kristallisation fällt der Werkzeuginnendruck erneut ab, da es zu einer verstärkten Schwindung kommt und die durch die Schaumstruktur nur noch bedingt ausgeglichen werden kann. Mit Ab- schluss der Restkühlzeit wird das Bauteil zum Zeitpunkt G ausgeworfen.

Auf die einzelnen Besonderheiten wird im Folgenden eingegangen.

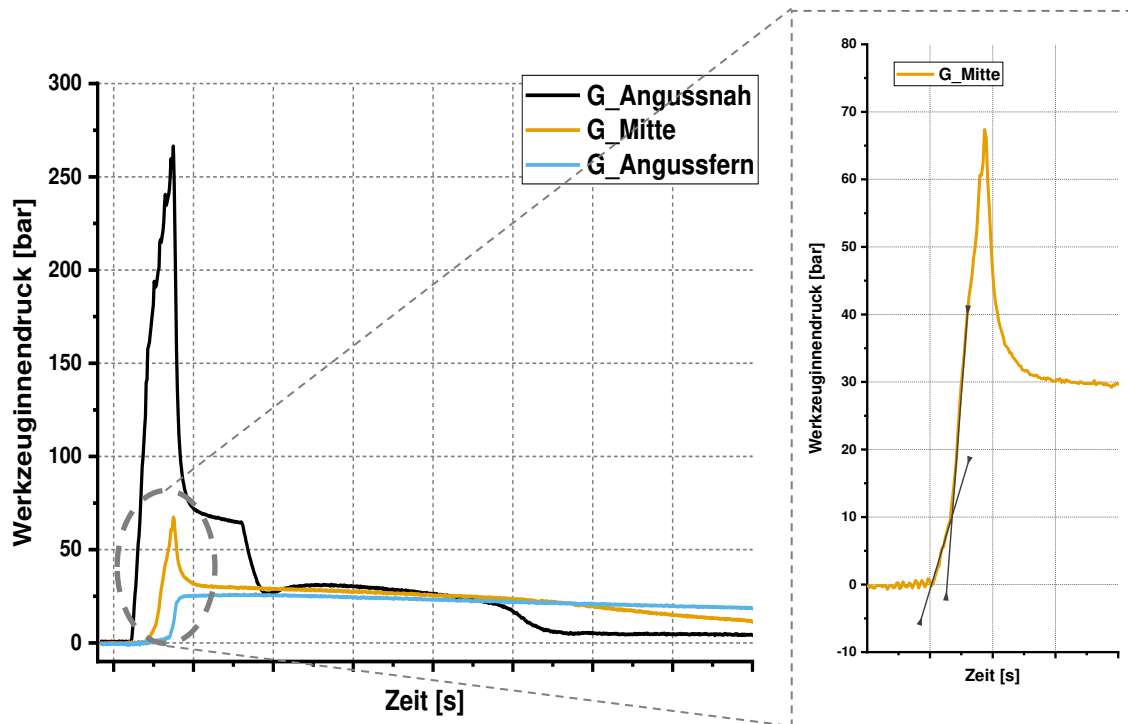


Abbildung 92: Verlauf des Werkzeuginnendrucks über die Fließweglänge für geschäumte Bauteile, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum, Zentralpunkt, 10 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.

Der Einfluss der Lage des Drucksensors mit besonderem Fokus auf geschäumte Bauteile zeigt, dass der anliegende Druck der Treibmittelbeladenen Polymerschmelze angussnah am höchsten ist. Bereits zur Hälfte der Fließweglänge beträgt der Werkzeuginnendruck lediglich ein Fünftel des angussnah gelegenen Drucksensors. Angussfern beträgt der Druck nur noch 25 bar, was insbesondere bei der Lage des Sensors in der Nähe der sich ausbildenden Bindaht nach dem Probekörperdurchbruch ein erstes Indiz für eine mangelhafte Bindahtfestigkeit ist. Der hohe Druckverlust über die Fließweglänge bedingt, dass der aus den Kurven generierte Informationsgehalt zum Fließwegende hin sehr gering ist, sodass für weitere Betrachtungen vornehmlich die Druckkurven des angussnahen Drucksensors betrachtet werden. Angussnah und Angussfern waren die Sensoren zusätzlich mit Thermoelementen ausgerüstet. Der hierbei bestimmte Messwert setzt sich zusammen aus der Werkzeugtemperatur und der Kontakttemperatur der umfließenden Polymerschmelze. Sowohl für das Kompakt- als auch das Schaumspritzgießen beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Angussnah und Angussfern $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der in der Mitte der Platte mit geometrischen Besonderheiten gelegene Werkzeuginnendrucksensor liegt genau am Wanddickensprung. In Abbildung 92 wird dies deutlich an dem sich verändernden Anstieg im Kurvenverlauf der gelben Linie.

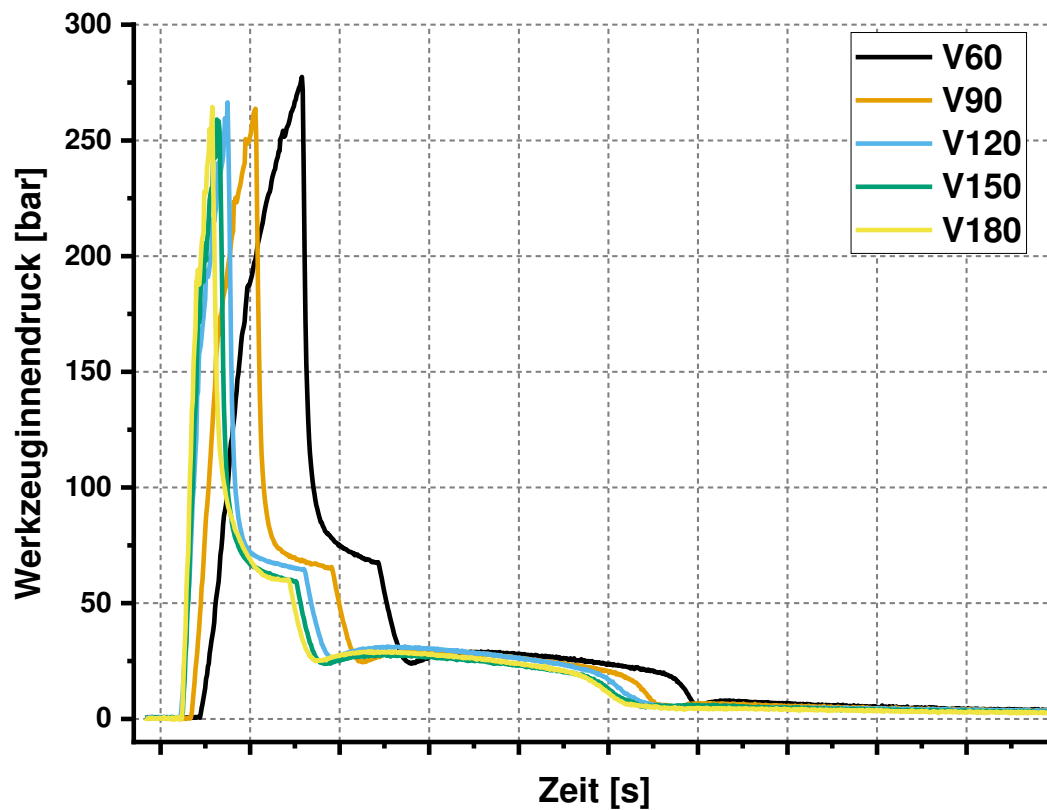


Abbildung 93: Grafische Darstellung des Werkzeuginnendrucks in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum, 10 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.

Mit zunehmender Einspritzgeschwindigkeit (siehe Abbildung 93) verschiebt sich die Kurve zu niedrigeren Zeiten. Darüber hinaus wird der Anstieg der Kurve steiler und die Breite des Peaks wird schmaler. Besonders deutlich wird dies mit zunehmender Gewichtseinsparung, siehe Abbildung 94 bei einer Gewichtseinsparung von 20 %.

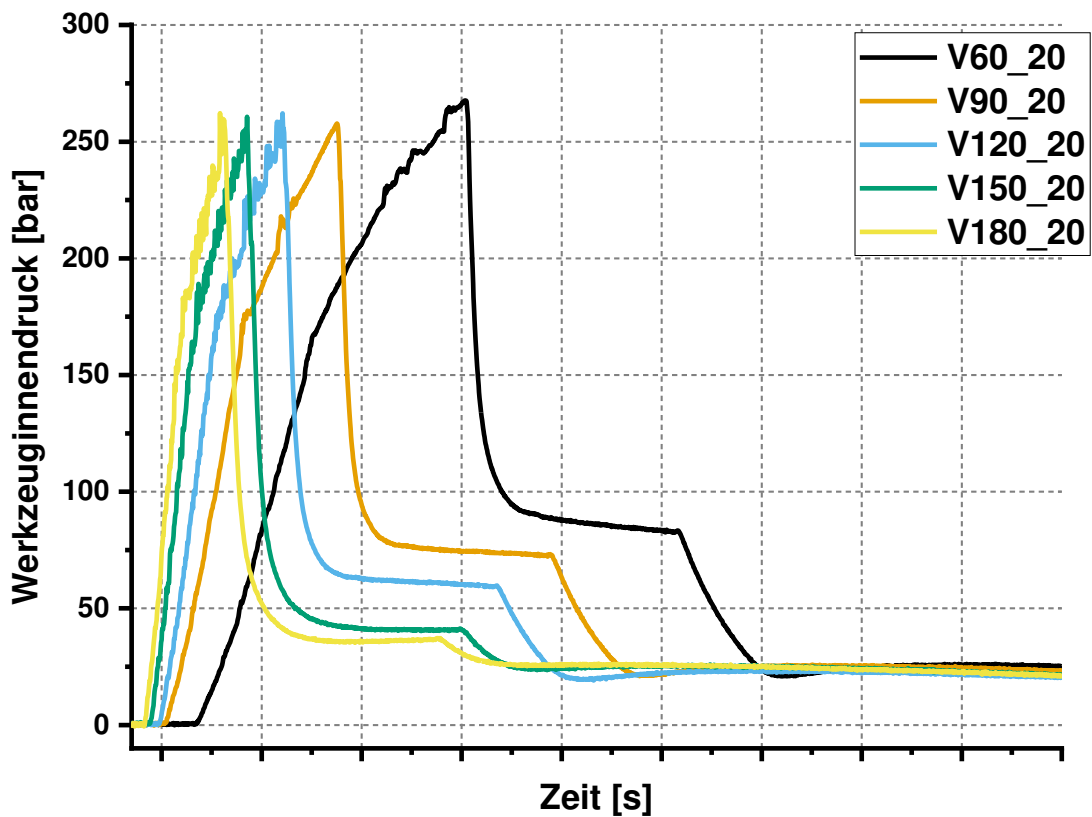


Abbildung 94: Grafische Darstellung des Werkzeuginnendrucks in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum, 20 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.

Je breiter der Peak, desto länger wirkt der Expansionsdruck des Treibfluids und ist ein erstes Indiz dafür, dass abhängig von der Bauteilauslegung eine gröbere Schaumstruktur zu erwarten ist. Die Computertomografie-Aufnahmen in Abbildung 95 belegen dies deutlich.

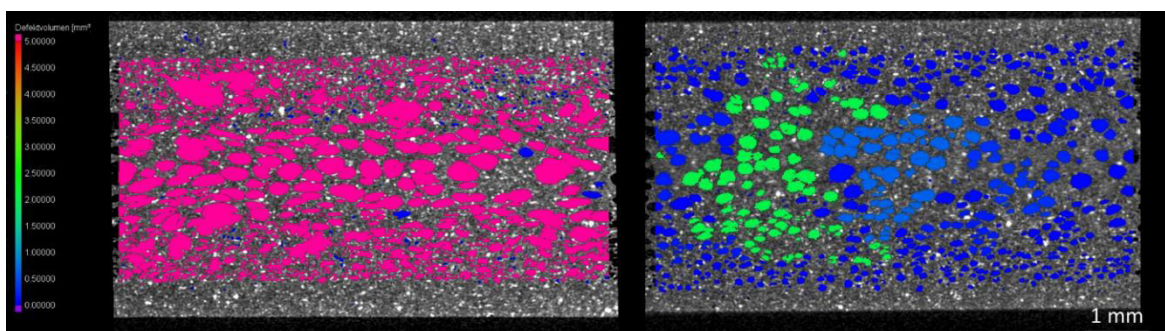


Abbildung 95: Computertomografie-Aufnahme des Defektvolumens von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 20 % Gewichtseinsparung, links Einspritzgeschwindigkeit 60 ccm/s, rechts Einspritzgeschwindigkeit 180 ccm/s

Die Werkzeuginnendruckkurven vom amorphen ABS zeigen zudem eine Reduzierung der Höhe des Werkzeuginnendrucks mit zunehmender Einspritzgeschwindigkeit wie der Graph in Abbildung 96 belegt.

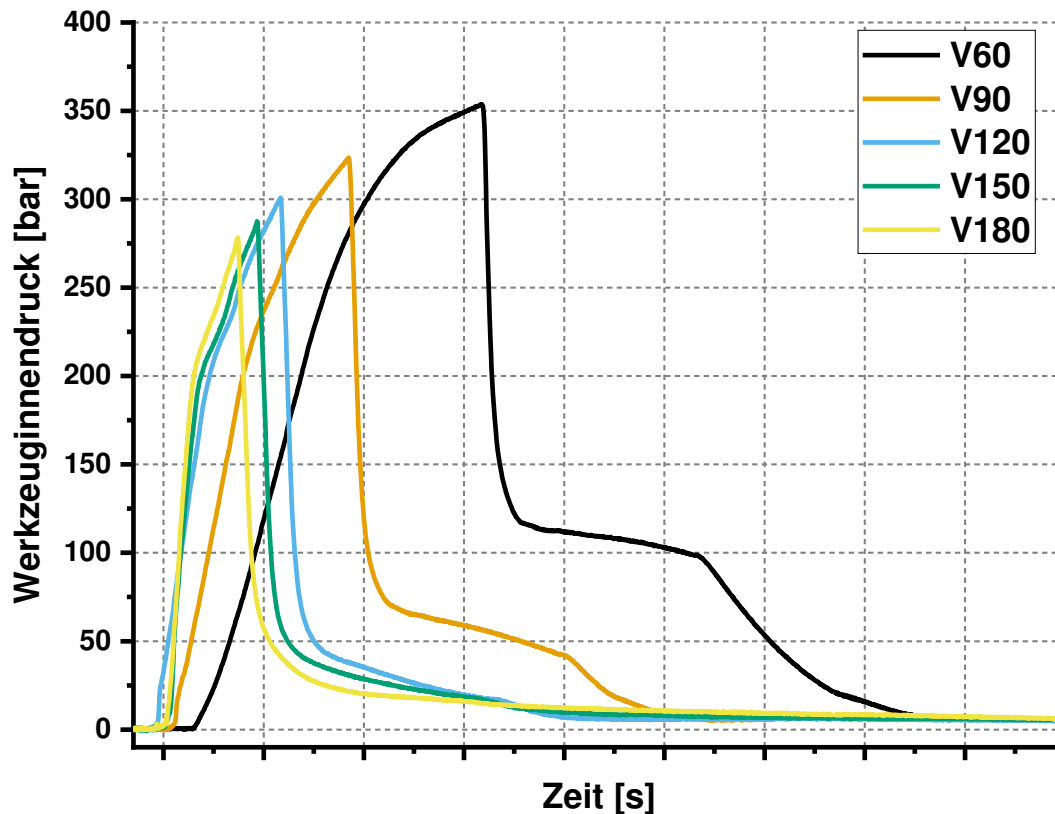


Abbildung 96: Grafische Darstellung des Werkzeuginnendrucks in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit, am Beispiel ABS, 10 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.

Dies ist gegensätzlich zum Kurvenverlauf beim Kompaktspritzgießen, wo eine geringere Einspritzgeschwindigkeit einen niedrigeren Druck bedingt. Beim Thermoplast-Schaumspritzgießen verhält sich das gelöste Gas wie ein Fließhilfsmittel, dessen Wirkung mit zunehmender Einspritzgeschwindigkeit zu Tragen kommt. Darüber hinaus bedeutet eine geringe Einspritzgeschwindigkeit einen niedrigen Druckabfall beim Eintreten der gasbeladenen Schmelze in die Kavität. Es bilden sich folglich nur wenige Nukleierungskeime. Das gelöste Gas diffundiert bevorzugt in diese wenigen Zellkeime und bildet eine grobe großporige Schaumstruktur aus, welche einen höheren Werkzeuginnendruck erzeugt als eine feinporige Schaumstruktur, bei denen viele Zellen das gegenseitige Wachstum begrenzen.

Der Einfluss des Staudrucks auf den Werkzeuginnendruck kann ebenfalls erfasst werden, wie Abbildung 97 zeigt, kann jedoch nur bedingt zur Bewertung der Schaumstruktur herangezogen werden.

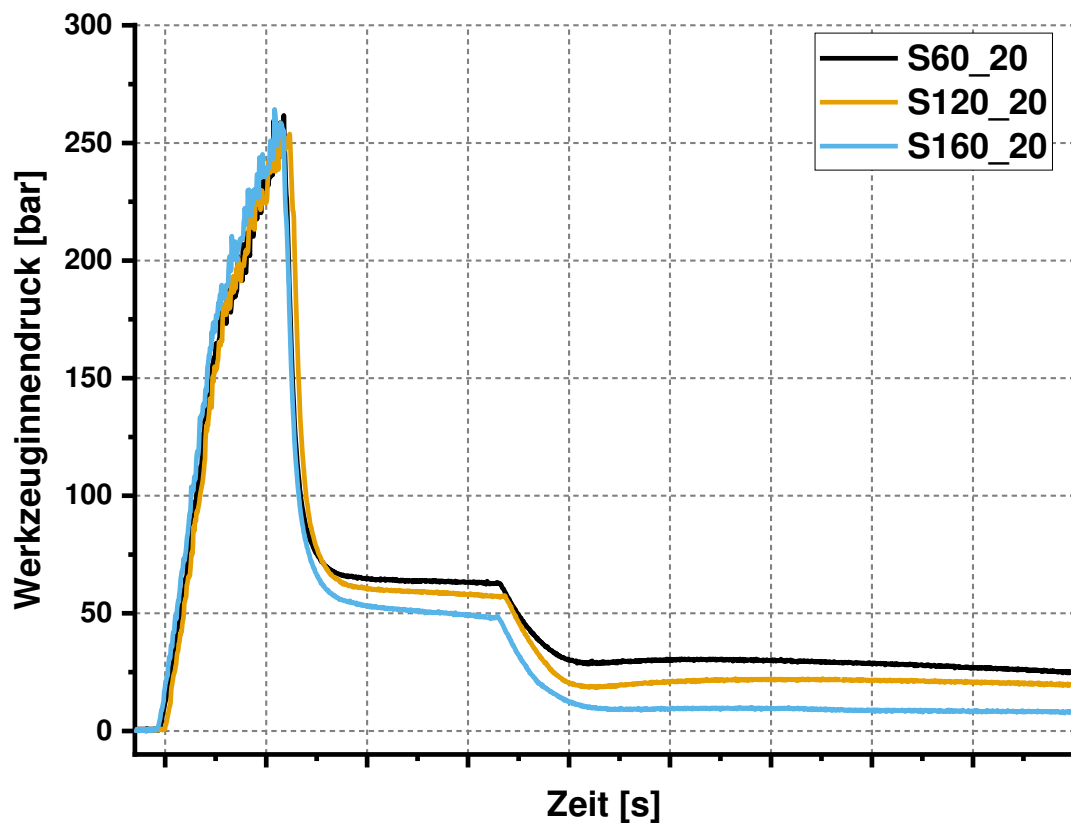


Abbildung 97: Grafische Darstellung des Werkzeuginnendrucks in Abhängigkeit des Staudrucks, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum, 20 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.

Das Druckniveau im Werkzeug nach Abschluss der Einspritzphase wird stark vom Staudruck beeinflusst. Wie CT-Aufnahmen in Abbildung 98 zeigen, bedingen sehr niedrige Staudrücke eine sehr schlechte Löslichkeit des Treibmittels in der Polymerschmelze. Beim Einspritzen in die Kavität erhält man eine niedrige Druckabfallrate. Es kommt zur Ausbildung großer Porenräume und zum Kollabieren von Zellstegen, sodass ein hohes Defektvolumen generiert wird. In Folge dessen wird eine große Menge des Matrixpolymers in die Außenbereiche transportiert, was hohe Werte am Werkzeuginnendrucksensor in der Kühlphase generiert.

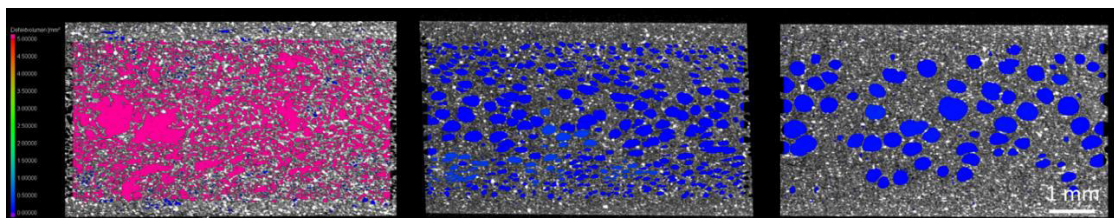


Abbildung 98: Computertomografie-Aufnahme des Defektvolumens von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 20 % Gewichtseinsparung, links Staudruck 60 bar, Mitte Staudruck 120 bar, rechts Staudruck 160 bar.

Mit zunehmendem Staudruck wird das Treibmittel homogener in der Polymerschmelze gelöst und bildet eine feinporige Schaumstruktur. Mit Überschreiten des Optimums wird mit Zunahme des Staudrucks die Löslichkeit des Gases reduziert. Dies bedingt eine Reduzierung der Porenanzahl sowie Vergrößerung der Schaumstruktur. Hierdurch wird Matrixpolymer in einer nicht signifikanten Menge verdrängt, sodass in der Kühlphase der anliegende Werkzeuginnendruck sehr schnell auf nahe Null abfällt. Durch den fehlenden Gasinnendruck in der Kühlphase, welcher Schwindung und Verzug entgegenwirkt, entspricht das Schwindungsverhalten dem beim Kompaktspritzgießen.

Um den Werkzeuginnendruck zur Prozessoptimierung des Parameters Staudruck effektiv nutzen zu können, ist eine Bewertung der Prozesskonstanz zu empfehlen. Wird das Treibmittel durch einen zu niedrigen Staudruck nicht homogen in die Polymerschmelze eingearbeitet, liegt es als separate Phase vor oder diffundiert während der Verarbeitung leicht wieder aus dem Polymer heraus. Die Konsequenz ist eine instabile Prozessführung: Schwankungen im eingespritzten Volumen; in der Schnecke expandierendes Gas, welches die Schneckenposition im Ruhezustand wandern lässt; und infolgedessen ein Spritzgießprozess, welcher alle paar Zyklen in die Notabschaltung geht. Um dem vorzubeugen, eignet sich die Überwachung mittels Werkzeuginnendruck, wie Abbildung 99 und Abbildung 100 belegt.

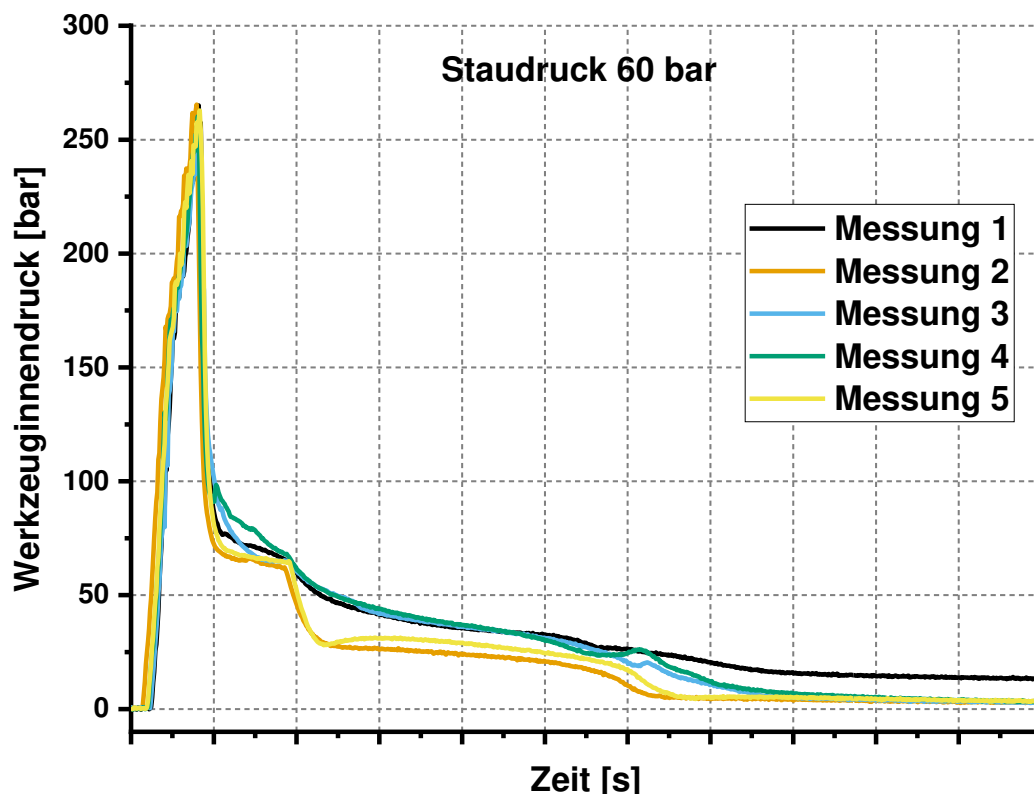


Abbildung 99: Vergleich der Prozesskonstanz über 5 Zyklen bei einem Staudruck von 60 bar, am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung

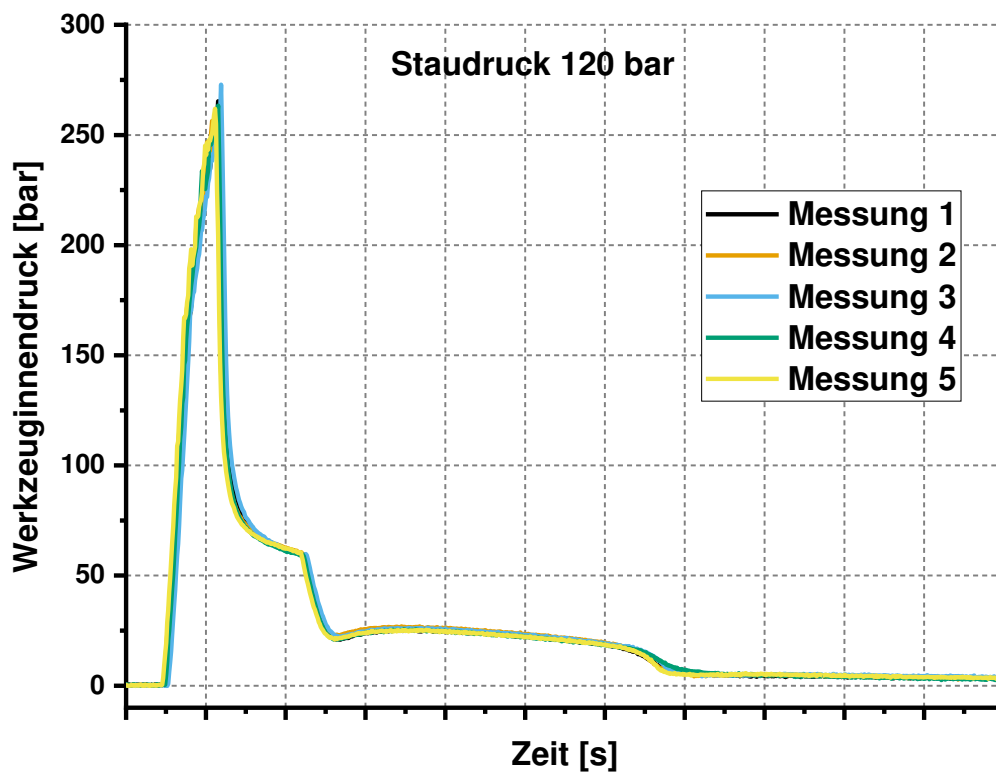


Abbildung 100: Vergleich der Prozesskonstanz über 5 Zyklen bei einem Staudruck von 120 bar, am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung

Ist das Treibmittel inhomogen in die Polymerschmelze eingearbeitet kommt es zwischen den einzelnen Zyklen zu Schwankungen der Werkzeuginnendruckkurve in der Kühlphase. Bei einem homogenen Polymer-Gas-Gemischs sind die Kurvenverläufe nahezu identisch zyklusübergreifend. Somit kann der Parameter mit einfachen Methoden für das Thermoplast-Schaumspritzgießen optimiert werden. Zu geringe oder unnötig hohe Staudrücke können vermieden werden. Letzteres ist, wie oben gezeigt der Schaumstruktur nicht unbedingt zuträglich und bedingt zudem eine stärkere Scherung in der Schnecke, was der Molekülkettenlänge und in Konsequenz den Bauteileigenschaften nachträglich ist.

In analoger Weise kann der Treibmittelgehalt mittels Werkzeuginnendruckkurve überwacht und optimiert werden. Übersteigt der Treibmittelgehalt unter den gewählten Prozessparametern und für das eingesetzte Material die Löslichkeitsgrenze so liegt analog zum Staudruck das Treibfluid nicht homogen gelöst, sondern als separate Phase vor und führt zu Fluktuationen im Prozess und den damit in Zusammenhang stehenden Werkzeuginnendruckkurven (Vgl. Abbildung 101 und Abbildung 102).

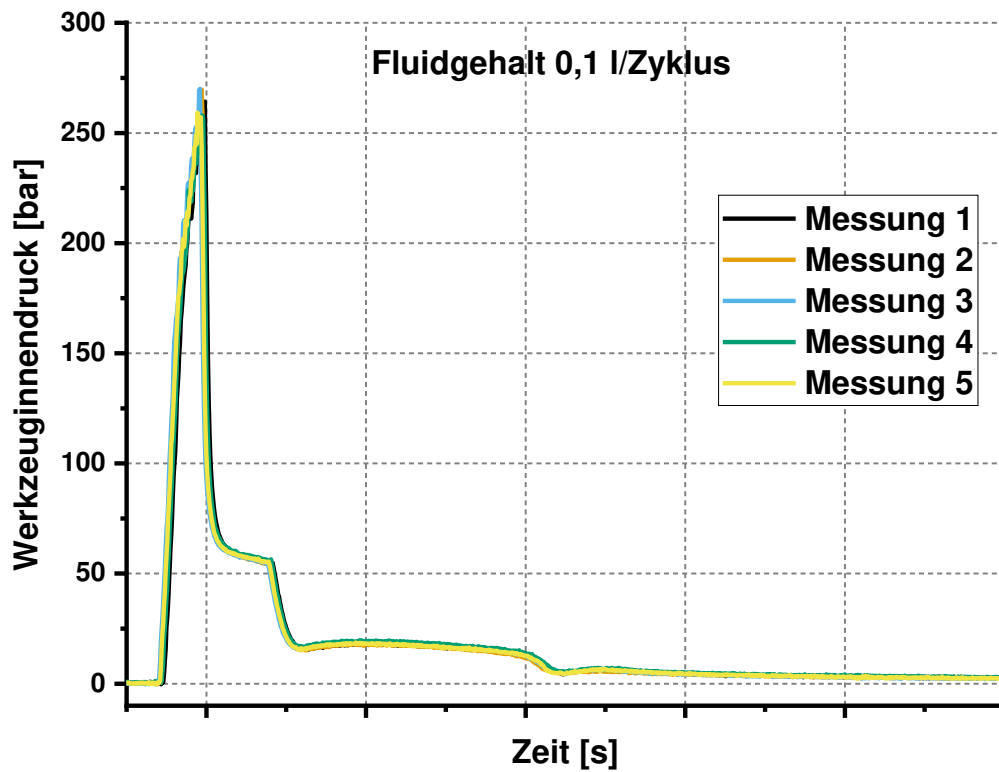


Abbildung 101: Vergleich der Prozesskonstanz über 5 Zyklen bei einem Fluidgehalt von 0,1 l/Zyklus, am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.

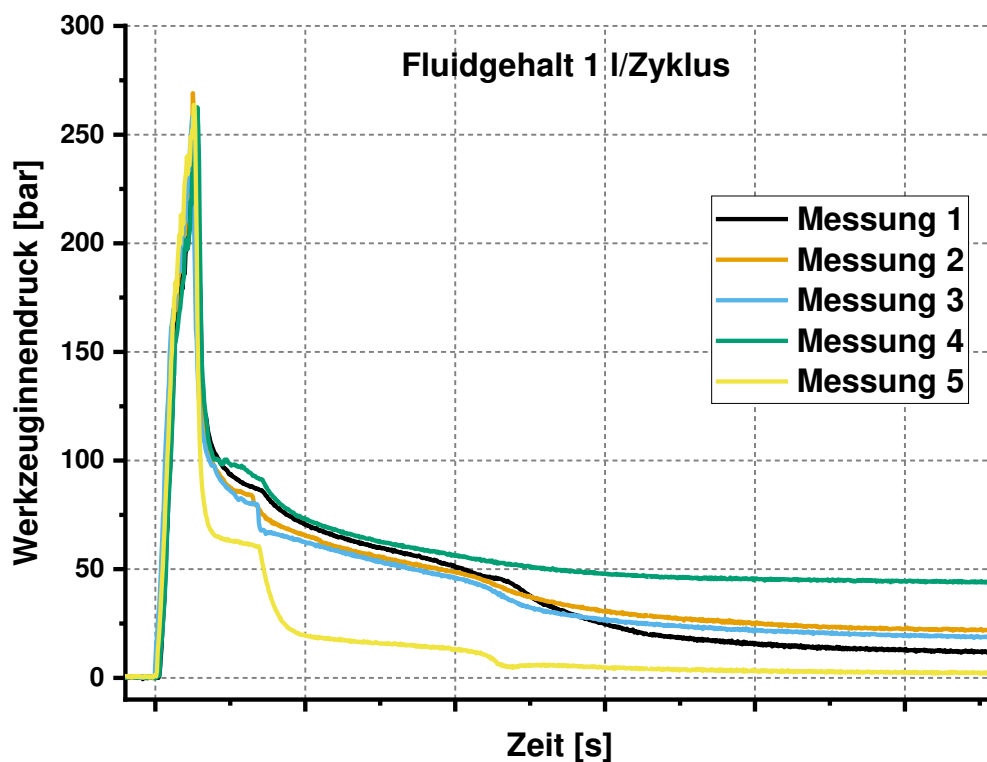


Abbildung 102: Vergleich der Prozesskonstanz über 5 Zyklen bei einem Fluidgehalt von 1 l/Zyklus, am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.

Mit zunehmendem Treibmittelgehalt steigt hierbei der in der Kühlphase anliegende Werkzeuginnendruck – siehe Abbildung 103.

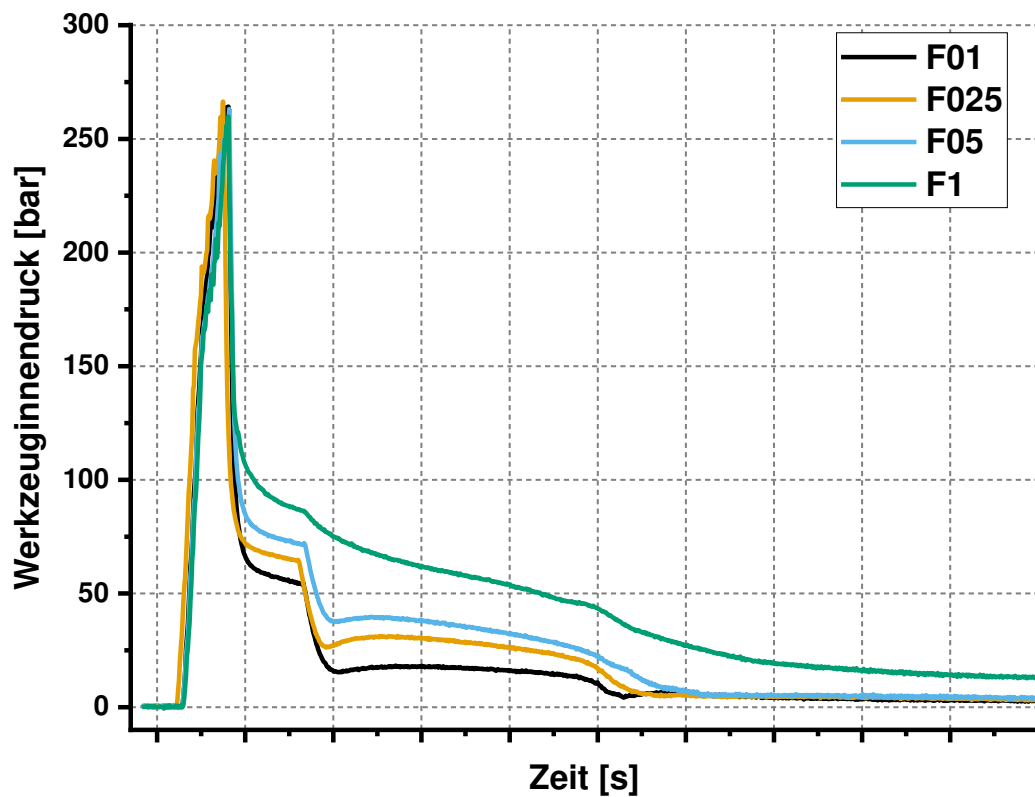


Abbildung 103: Graphische Darstellung des Werkzeuginnendrucks in Abhängigkeit vom Fluidgehalt am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.

Für das amorphe ABS ist die Bewertung und Optimierung der Prozessparameter Staudruck und Treibmittelgehalt mittels Werkzeuginnendruckkurve erheblich komplexer – siehe Abbildung 104 und Abbildung 105. Die Kurven zeigen nahezu keinen Einfluss beider Parameter auf den Druckverlauf. Anzunehmen ist, dass der Kurvenverlauf in der Kühlphase stark von einem Zusammenspiel aus Gasbeladung und Kristallisation dominiert ist. Hierbei kommt zum Tragen, dass Zellkeime nur in amorphen Bereichen gebildet werden können. Die material- und temperaturabhängige Kristallisation begrenzt also zum einen die Ausbildung von Nukleierungsstellen und zum anderen das Porenwachstum. Die komplexen Zusammenhänge, die hier zu Grunde liegen, sind in der Fachliteratur noch nicht hinlänglich untersucht und bieten Raum für tiefgreifende Forschungsarbeiten.

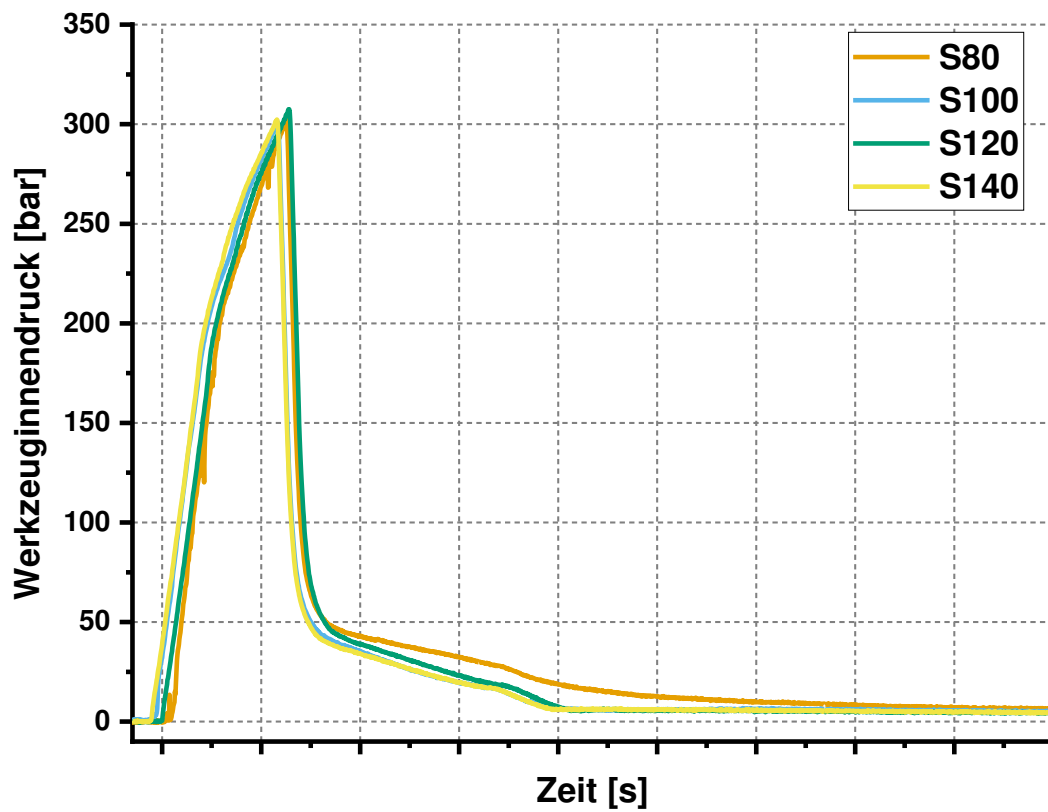


Abbildung 104: Graphische Darstellung des Werkzeuginnendruck in Abhängigkeit vom Staudruck [bar] am Beispiel von ABS, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.

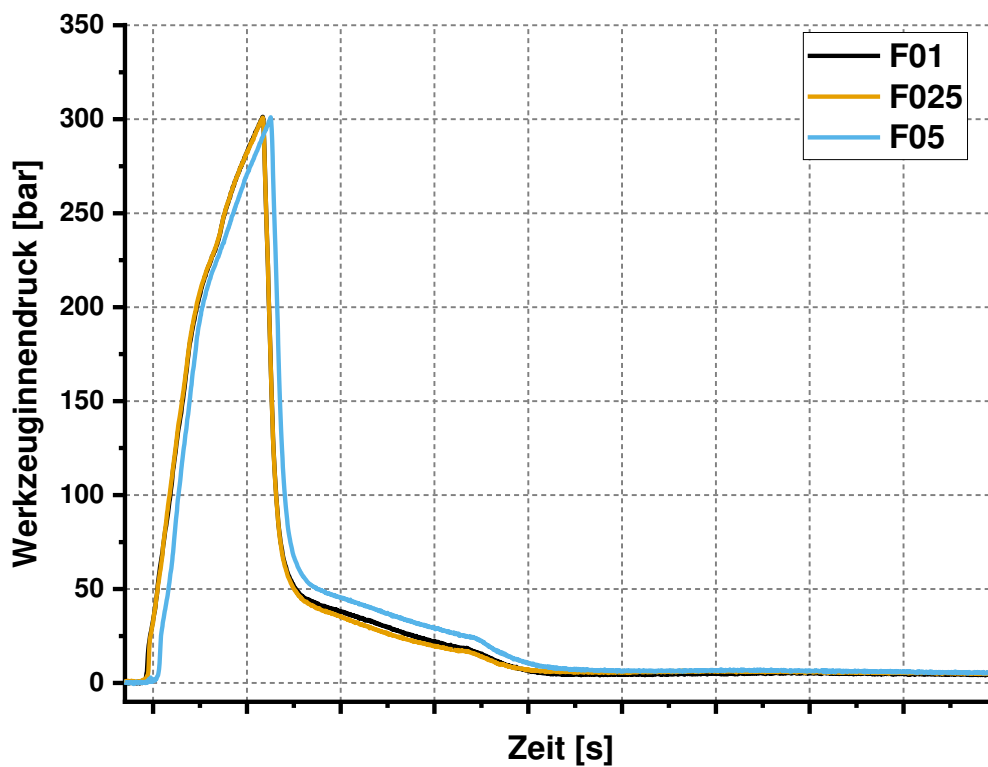


Abbildung 105: Graphische Darstellung des Werkzeuginnendruck in Abhängigkeit vom Fluidgehalt [l/ Zyklus] am Beispiel von ABS, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.

Abhängig vom gewählten Material und den eingestellten Prozessparametern kann es im ungünstigsten Fall vorkommen, dass das Gas als separate Phase vorliegt. Neben starken Prozessschwankungen wird auch die Qualität des Bauteils negativ beeinflusst. Es treten verstärkt Oberflächendefekte auf und bei ungünstiger Werkzeugauslegung kann das Gas stark komprimiert werden und Brenner am Bauteil verursachen.

Eine Überwachung dieses Fehlerbilds ist mittels Werkzeuginnendrucküberwachung problemlos möglich. Abbildung 106 zeigt, dass bei einem inhomogenem Gas-Polymer Gemisch, verursacht durch einen nicht optimierten Gasgehalt, Staudruck und/ oder unzureichende Endlageregelung beim Einspritzvorgang, der Werkzeuginnendruckkurve der Polymerschmelze ein Gaspeak vorwegläuft. Dies gilt es in der Prozessführung unbedingt zu vermeiden.

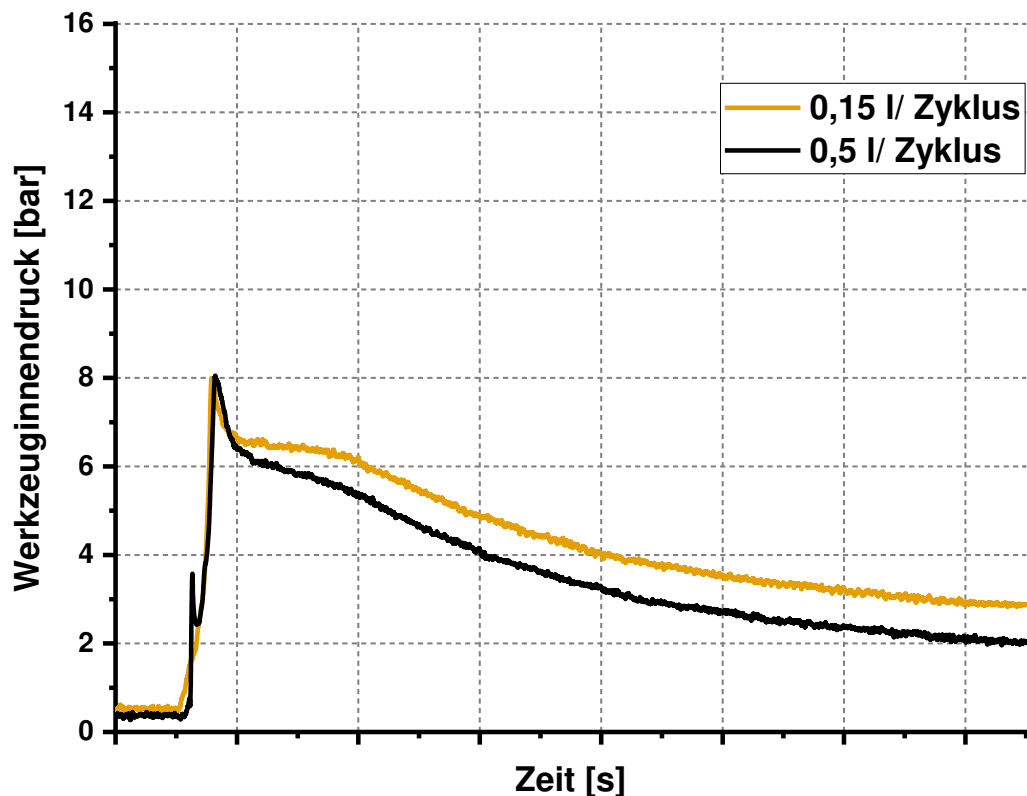


Abbildung 106: Vergleich des Werkzeuginnendruckes in Abhängigkeit des Treibmittelgehalts, am Beispiel WPC mit 30 Gew.% Holzgehalt (feine Fasern).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die kontinuierliche Überwachung des Werkzeuginnendruckes gut zur Bewertung und Optimierung der Schaumstruktur geeignet ist. Insbesondere Aspekte, welche Rückschlüsse auf die Homogenisierung des Gas-Polymer Gemischs geben, können hiermit im Detail betrachtet werden.

6 Zusammenfassung

Das Thermoplast-Schaumspritzgießen gewinnt in Kunststoffverarbeitenden Unternehmen zunehmend an Bedeutung. In Hinblick auf Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz, Leichtbau und der Reduzierung von CO₂-Emissionen ist diese Technologie nicht mehr aus der Zukunftsstrategie von Firmen wegzudenken.

Dieses Sonderverfahren der Spritzgießverarbeitung stellt Verarbeiter hinsichtlich einer Prozessoptimierung jedoch vor große Herausforderungen. Fehlstellen im Bauteil sind mit bloßem Auge zumeist nicht zu erkennen. Eine nachgelagerte Charakterisierung aufwändig und teuer. Dies erschwert die Implementierung des Verfahrens in den laufenden Betrieb bei gleichzeitiger Gewährleistung höchster Qualitätsansprüche.

Das durchgeführte Forschungsvorhaben untersuchte und bewertete den Einsatz bekannter Qualitätssicherungstechnologien mit speziellem Fokus auf dem Thermoplast-Schaumspritzgießen.

Verfahren, welche im Projekt untersucht wurden, umfassen die Gewichtsmessung, die Thermografie und den Werkzeuginnendruck. Für eine Implementierung in den Prozess erfolgte eine teilweise Adaptierung der Technologien und zugehörigen Mess- und Auswertesoftware. Um eine umfassende Evaluierung zu gewährleisten, wurden vier Werkstoffe evaluiert, welche sich in ihrem Verarbeitungsverhalten signifikant unterscheiden, ebenso wie drei in ihrem Aufbau verschiedene Spritzgießwerkzeuge. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zeigen, dass eine Prozessüberwachung und Prozessoptimierung mit Hilfe der untersuchten Maßnahmen in hohem Maße erfolgversprechend sind.

Hierbei liefert die Gewichtsmessung generische Antworten, inwieweit ein Prozess über viele Zyklen konstant läuft. Ein Einsatz zur Prozessoptimierung ist nicht zielführend, jedoch kann die Messtechnik in einem etablierten Prozess Schwankungen detektieren, welche auf Abnutzungserscheinungen der Anlagentechnik zurückzuführen sind. Hierzu zählen beispielsweise ein Verstopfen des Gasinjektor, ein fortschreitender Abrieb an der Rückstromsperre oder eine unzureichende Förderung des Treibmittels bzw. Granulats.

Die Werkzeuginnendruckkurven geschäumter Bauteile unterscheiden sich signifikant von den kompakt gespritzten Proben. Ihr Verlauf ist jedoch ebenfalls für das Sonderverfahren charakteristisch und ist detailliert im Rahmen dieser Arbeit beschrieben. Insbesondere Prozessparameter, welche die Homogenisierung der gasbeladenen Schmelze betrachten, können mit dieser Qualitätssicherungstechnologie umfassend evaluiert werden. Zukünftig können diese Erkenntnisse in die Maschinensteuerung der Spritzgießmaschine integriert werden, welche bereits heute im Bereich des Kompaktspritzgießens den Werkzeuginnendruck zur automatisierten Prozessregelung heranzieht.

Die Thermografie bietet hinsichtlich der Optimierung der Schaumstruktur den größten Mehrwert. Das Fließverhalten und die Ausbildung von Schaumstrukturen kann über das gesamte Bauteil erfasst werden und wichtige Informationen zur Prozessoptimierung, Analyse von Fehlerbildern und Verbesserung der Werkzeugauslegung liefern. Durch eine vereinfachte Darstellung als Differenzbild kann der erfahrene Maschinenbediener für jedes Bauteil schnell die optimierten Prozessparameter bestimmen.

Um auf eine aufwändige nachgelagerte Analyse der Schaumstruktur verzichten zu können, wurde im Rahmen dieses Projekts eine einfache Systematik zur Erfassung der Schaumstruktur an einer Bruchkante mit Hilfe eines hochauflösenden Scanners und die Verarbeitung der Daten mit einer speziell für dieses Vorhaben adaptierten Software entwickelt. Der Messaufbau erlaubt eine erste Bewertung des Porenaufbaus über die Bauteilbreite bei einer vollständigen Automatisierung des Messprotokolls in unter 2 Minuten. Hierdurch kann eine Korrelation der an der Anlage gewonnen Messdaten aus der Qualitätssicherung schnell mit der tatsächlich Bauteilstruktur erfolgen.

Die Erkenntnisse aus diesem Vorhaben steigern in hohem Maße die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, insbesondere KMU und fördern die Implementierung von Leichtbau-Strategien. Die hier beschriebenen Qualitätssicherungstechnologien sind in ihrer Anschaffung kostengünstig und im Betrieb robust in die laufende Produktion integrierbar.

7 Literaturverzeichnis

- ALT11 Altstädt, V., & Mantey, A. (2011). Thermoplast-Schaumspritzgießen. München: Carl Hanser Verlag.
- ALL16 Allen, B.. Smithers Rapra. (Smithers Rapra) Abgerufen am 04. Oktober 2018 von <https://www.smithersrapra.com/resources/2017/february/high-performance-polymer-foams-market-forecast>
- BAR09 M. R. Barzegari und D. Rodrigue, „The effect of Injection Molding Conditions on the Morphology of Polymer Structural Foams,“ Kanada, 2009.
- BOC13 E. Bociaga und P. Palutkiewicz, „The impact of mould temperature and blowing agent content on structure and properties of injection moulded parts,“ Cellular Polymers, pp. 257-278, 2013.
- BUE14 Bürkle, E., & Wobbe, H. (2014). Die bessere Alternative zum Kompakt-spritzgießen? Kunststoffe, 2, 44-46.
- CHA00 CHAN, F. T., LAU, H. C., & JIANG, B. (2000). In-line process conditions monitoring expert system for injection molding. Journal of Materials Processing Technology, 101(1-3), S. 268-274.
- CHA92 Chaffanjon, P., & Verhelst, G. (1992). An Automated Image Analysis Method for the Characterisation of Flexible Foam Cellular Structure. Cell Polymer, S. 1-17.
- COU12 Cousineau, J.S., Effect of cooling rate and mold counter pressure on the crystallinity and foaming control in microcellular injection molded polypropylene parts. 2012, Wright State University.
- CRA08 Cramer, A., Analyse und Optimierung der Bauteileigenschaften beim Thermoplast-Schaumspritzgießen: Analysis and monitoring of plasma processes for plastics processing by optical emission spectroscopy (OES). 2008: Mainz.
- FRA17 FRĄCZ, Wiesław; JANOWSKI, Grzegorz; RYZIŃSKA, Grażyna. Selected aspects of manufacturing and strength evaluation of porous composites based on numerical simulations. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika, 2017.
- GEH15 Gehlen, M., & Schmidt, N. (2015). QualiControl 100 Prozent Bauteilprüfung. Lüdenscheid.
- GHO16 GHOLIZADEH, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. Procedia Structural Integrity, S. 50-57.
- GRU05 Gruber, M. (2005). Alt bekannt und doch innovativ - Schäumverfahren für das Thermoplast-Spritzgießen. Plastverarbeiter, 3(56), 26-28.
- GUA12 Guanghong, H. and W. Yue, Microcellular foam injection molding process. Some critical issues for injection molding, 2012: p. 175-202.
- HAC05 Hachmann, A., & Neuß, O. (2005). Schäume mit Ambitionen. Plastverarbeiter, 56. Jahrg.(8), 66-68.

- HAN12 Handschke, A., & Mitzle, J. (2012). Physikalisches Schäumen ganz leicht gemacht. *Kunststoffe*, 10, 151-156.
- HEC18 Heckenberger, B. (kein Datum). (Busse Design+Engineering) Abgerufen am 11. 02 2018 von <https://www.busse-design.com/news/2017/36-news-mucell-verfahren.php>
- HEI01 Heim, R., Naughton, P., & Koelman, H. (2001). Design Engineering With Foams And Plastics To Enhance Vehicle Safety. Dow Automotive Germany.
- HUA00 Huang, Q., Lösemittelfreie Herstellung von porösen polymeren Membranen durch Schaumextrusion. 2000, Staats-und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky.
- JOH14 Johannaber, F. and W. Michaeli, Handbuch Spritzgießen. Vol. 2.Auflgae. 2014, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.
- MUE04 Müller, N., & Ehrenstein, G. W. (2004). Evaluation and Modeling of Injection-molded Rigid Polypropylene Intergral Foam. *Journal of Cellular Plastics*, 40, 45-59.
- MUE11 Müller, J. (2011). Thermoplastschaumspritzgießen. Bayreuth.
- OPR15 OPREA-KISS, A., & KISS, I. (2015). About the numerous cost and processing advantages of the microcellular foam injection molding process for thermoplastics materials in the automobile industry. *Analecta Technica Szegedinensia*, 2, S. 6-14.
- PAN14 R. Pantani, V. Volpe und G. Titimanlio, „Foam injection molding of poly(lactic acid) with environmental friendly physical blowing agents,“ 2014.
- PAR15 C. B. Park und T. Kuboki, „Foaming Technology of Wood Fiber/Plastic Composites,“ 2015.
- PAR96 C. B. Park, „Filamentary Extrusion of Microcellular Polymer Using a Rapid Decompressive Element,“ *Polymer Engineering and science*, Januar 1996.
- PET03 Peters, R. (2003). Schaumstrukturanalyse mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden - Foam Structure Analysis with Digital Image Processing. Aachen: IKV.
- PRE05 G. U. Pretel, „Fließverhalten treibmittelbeladener Polymerschmelzen,“ Verlagsgruppe Mainz GmbH, Aachen, 2005.
- RHO92 Rhodes, M. H. (1992). Image Analysis as Applied to the Characterization for the Cellular Structure in Urethane Foams. Conference Proceeding of Annual Polyurethane Technical Marketing Conference.
- SAS11 Sastre, L.F.F., Einfluss Der Schaummorphologie Auf Die Mechanischen Eigenschaften Von Kunststoffstrukturschäumen: Influence of the Foam Morphology on the Mechanical Properties of Structural Polymer Foams. 2011: Mainz.

- SCH14 Schwalme, G. (2014). Entwicklung und Erprobung einer innovativen Anfahr- und Regelstrategie für Spritzgießwerkzeuge mittels Infrarot - Thermografie. Würzburg: Das Kunststoffzentrum SKZ AiF-Schlussbericht.
- SCH16 Schwalme, G. (2016). Qualitätssicherung beim Spritzgießen mittels In-line – Thermografie. Würzburg: Fachvortrag.
- SCH91 Schwartz, N., & Bomberg, M. (1991). Image Analysis and the Characterization of Cellular Plastics. *Journal of Thermal Insulation*(15), 153-171.
- SHU91 Shutov, F.A., Cellular structure and properties of foamed polymers. in "Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology", ed. D.Klempner and K.C. Frisch. Vol. 1. 1991, München: Carl Hanser Verlag.
- SPE97 Speight, R. G. (1997). In-line process monitoring for injection moulding control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 211(2), S. 115-128.
- STA06 Stange, J., Einfluss rheologischer Eigenschaften auf das Schäumverhalten von Polypropylenen unterschiedlicher molekularer Struktur. 2006, Erlangen.
- STE15 J. Stehr, „Chemical blowing agents in the rubber industry. Past - present - and future?“, *Gummi Fasern Kunststoffe*, pp. 812-819, 2015.
- VOL15 Volpe, V., Foam Injection molding with physical blowing agents. 2015.
- WAN15 Wang, G.l., et al., Research on formation mechanisms and control of external and inner bubble morphology in microcellular injection molding. *Polymer Engineering & Science*, 2015. 55(4): p. 807-835.
- XUJ11 Xu, J. and L.S. Turng, *Microcellular Injection Molding*. 2011: Wiley.
- YOO14 J. Yoon, T. Kuboki, P. Jung, J. Wang und C. Park, „Injection Molding of Wood-Fiber-Plastic Composite Foams“, *Taylor & Francis, London*, 2014.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der Inline-Qualitätssicherung bei der Herstellung geschäumter Spritzgussbauteile im Rahmen des Forschungsprojekts IQFoam.	4
Abbildung 2: Globaler prozentualer Umsatz für polymere Schäume, branchenspezifisch; 2015 [ALL16]	6
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Porenstrukturen in geschäumten Bauteilen [HUA00; SHU91]	9
Abbildung 4: Schematischer Ablauf des TSG-Verfahrens, nach [HUA00]	11
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Zykluszeiten von kompaktem und geschäumtem Spritzgießen, nach [GUA12]	12
Abbildung 6: Phasendiagramm von Stickstoff [FRA17]	13
Abbildung 7: Löslichkeit von Gas in der Polymerschmelze in Abhängigkeit vom Druck und der Temperatur, nach [XUJ11]	14
Abbildung 8: Darstellung der freien Energie bei der homogenen bzw. heterogenen Keimbildung [ALT11]	16
Abbildung 9: Schematischer Aufbau einer Integralschaumstruktur, nach [ALT11]	18
Abbildung 10: Schematischer Dichteverlauf eines Integralschaumbauteils, nach [CRA08]	19
Abbildung 11: Zersetzungsreaktion von Azodicarbonamid [STE15]	20
Abbildung 12: DSC-Kurve eines exothermen chemischen Treibmittels [ALT11]	21
Abbildung 13: DSC-Kurve eines endothermen chemischen Treibmittelgemischs [ALT11]	21
Abbildung 14: Typische Fehlstellen von TSG.	24
Abbildung 15: Blockdiagramme des Regelkreises bei der Inline-Thermografie [SCH14]	25
Abbildung 16: Inlinegewichtsmessung bei Vorversuchen an der Forschungsstelle [SCH16]	26
Abbildung 17: Abbildung der in den Versuchen verwendeten Schnecke von Wittmann Battenfeld [99]	33
Abbildung 18: Platte mit Maßen, blau markiert sind die Positionen zur Probenentnahme.	34
Abbildung 19: Schalenwerkzeug mit Heißkanal.	34
Abbildung 20: Werkzeug: Probekörper Schale.	35
Abbildung 21: Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.	36
Abbildung 22: Speziell zum Schäumen ausgelegtes Bauteil mit unterschiedlichen Geometrielementen.	36
Abbildung 23: Darstellung der für die Computertomografie präparierten Proben.	37
Abbildung 24: Porenfüllung mit Acrylfarbe	44
Abbildung 25: Porenfüllung mit Tafelkreide	45

Abbildung 26: Mikroskopieaufnahme des Abschnitts mit blauer Farbfüllung.....	45
Abbildung 27: Scan einer ABS-Probe mit Kreide als Porenfüllung.....	46
Abbildung 28: Scan einer ABS-Probe mit Acrylfarbe als Porenfüllung	47
Abbildung 29: Ausschnitt der weißen ABS-Probe mit schwarz eingefärbten Poren.....	48
Abbildung 30: Originalbild (oben) und die erkannten, weiß markierten Poren (unten) .	48
Abbildung 31: Ausschnitt aus der Tabelle mit den Blob-Kennwerten	49
Abbildung 32: Histogramm der Porengrößenverteilung für den gesamten Größenbereich	50
Abbildung 33: Histogramm der Porengrößenverteilung für einen Skalenbereich bis 50.000 μm^2	50
Abbildung 34: Ausschnitt aus dem Scan der ABS-Probe (oben) und erkannte Poren (unten)	51
Abbildung 35: Eine hohe Schwelle sorgt für scharf abgetrennte große Poren. Kleinere Poren werden jedoch nicht vollständig erfasst.....	52
Abbildung 36: Die niedrigere Schwelle erfasst auch die kleinen Poren, jedoch verschmelzen viele große Poren und ihre Fläche wird überbewertet.....	53
Abbildung 37: Ausschnitt aus dem Scan der ABS-Probe mit 80 bar Staudruck (oben) und erkannte Poren (Mitte); Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten)	54
Abbildung 38: Ausschnitt aus dem Scan der ABS-Probe mit 140 bar Staudruck (oben) und erkannte Poren (Mitte), Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten)	55
Abbildung 39: Ausschnitt aus dem Scan der PP-Probe (oben) und erkannte Poren (Mitte), Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten).....	57
Abbildung 40: Histogramm der Porengrößenverteilung für einen Skalenbereich bis 50.000 μm^2	58
Abbildung 41: Ausschnitt aus dem Scan der WPC-Probe (oben) und erkannte Poren (Mitte), Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten).....	59
Abbildung 42: Histogramm der Porengrößenverteilung für einen Skalenbereich bis 50.000 μm^2	60
Abbildung 43: Ausschnitt aus dem Scan der PA-Probe (oben) und erkannte Poren (Mitte), Computertomographie-Aufnahme der gleichen Probe bei gleichen Verarbeitungsparametern an anderer Stelle (unten).....	61
Abbildung 44: Histogramm der Porengrößenverteilung für einen Skalenbereich bis 50.000 μm^2	62
Abbildung 45: Darstellung der Benutzeroberfläche SKZ TDI; am Beispiel: PA6 GF30; Platte; Einspritzgeschwindigkeit: 160 ccm/s; links: Kompakt; rechts: Geschäumt.	63

Abbildung 46: Thermografieaufnahme geschäumt; Zentralpunkt; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30.....	64
Abbildung 47: Defektvolumen über die Fließweglänge (Geschäumt; Zentralpunkt; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30), dargestellt wird die yz-Ebene, Fließrichtung der Schmelze von links nach rechts.	65
Abbildung 48: Differenzdarstellung aus zwei nacheinander aufgenommenen Thermografieaufnahmen; Werkzeug: Platte; Material PA6 GF30; Prozessparameter: Fluiddurchfluss: 0,05 l/ Zyklus, Dosiergeschwindigkeit: 200 ccm/s, Staudruck: 120 bar, Einspritzgeschwindigkeit 120 ccm/s, Werkzeugtemperatur: 40 °C.	66
Abbildung 49: Platte mit Verwirbelungen.....	66
Abbildung 50: Darstellung der Faserwinkel über die Bauteillänge des Probekörpers (Geschäumt; Zentralpunkt; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30), yz-Ebene, Fließrichtung von links nach rechts.	67
Abbildung 51: Faserorientierung und Faservolumenanteil (Geschäumt; Zentralpunkt; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30) über die Fließweglänge.	68
Abbildung 52: Aufnahme der Oberflächenqualität am Beispiel: PP-Type 3 mit 50 Gew.-% Holzfasern, grob, linke Bildhälfte: geschäumt, rechte Bildhälfte: kompakt.	69
Abbildung 53: Graphische Darstellung der Faserorientierung im Zusammenhang mit dem Blasenwachstum des expandierenden Treibmittels.	69
Abbildung 54: Bewertung der Mikrostruktur mittels CT über die Fließweglänge am Beispiel: PP-Type 2 mit 50 Gew.-% groben Holzfasern, physikalisch geschäumt mit 0,15 l/ Zyklus N ₂	70
Abbildung 55: Defektvolumen des mittigen Bauteilquerschnitts der Probe Zentralpunkt, dargestellt wird die yz-Ebene, Fließrichtung der Schmelze von links nach rechts 71	71
Abbildung 56: Thermografieaufnahme (links: Kompakt, rechts: Geschäumt) sowie Differenzdarstellung der Platte mit geometrischen Besonderheiten am Beispiel ABS; Einspritzgeschwindigkeit 60 ccm/s.	72
Abbildung 57: Computertomographie-Aufnahme: Werkzeug: Platte mit besonderen Geometrien; Material: ABS; Einspritzgeschwindigkeit: 60 ccm/s. links: 2 mm Wandstärke; rechts: 4 mm Wandstärke.	73
Abbildung 58: links: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ höhere Schmelzetemperatur); rechts: CT-Aufnahme der Rippe nach dem Wanddickensprung im Querschnitt, am Beispiel: Material: PP mit 20 % Talkum; Schmelzetemperatur: 270 °C, Gewichtseinsparung 20 Gew%.	73
Abbildung 59: links: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ höherer Treibmittelgehalt); rechts: CT-Aufnahme der Rippe nach dem Wanddickensprung im Querschnitt, am Beispiel: Material: PP mit 20 % Talkum; Treibmittelgehalt: 0,5 l/ Zyklus, Gewichtseinsparung 20 Gew%.	74
Abbildung 60: Darstellung der Bindenaht am Beispiel PP mit 20 % Talkum bei einem Treibmittelgehalt von 1 l/ Zyklus, links: Thermografie – Differenzdarstellung (Kompakt/ Geschäumt); rechts: Computertomografie der Bindenaht.	74

- Abbildung 61: Darstellung der Bindenaht am Beispiel ABS bei einer Schmelzetemperatur von 225 °C, links: Thermografie – Differenzdarstellung (Kompakt/ Geschäumt); rechts: Computertomografie der Bindenaht.....75
- Abbildung 62: Darstellung der Bindenaht am Beispiel PP mit 20 % Talkum bei einer Dosiergeschwindigkeit von 50 ccm/s, links: Thermografie – Differenzdarstellung (Kompakt/ Geschäumt); rechts: Computertomografie der Bindenaht.76
- Abbildung 63: Darstellung der Bindenaht am Beispiel ABS, prozessoptimiert, links: Thermografie – Differenzdarstellung (Kompakt/ Geschäumt); rechts: Computertomografie der Bindenaht.....76
- Abbildung 64: Vergleichende Darstellung Thermografie – inhomogene, sowie homogene Schaumstruktur; am Beispiel WPC, Schalenwerkzeug (4 mm Wandstärke).....77
- Abbildung 65: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Kompakt/ Einspritzgeschwindigkeit): oben: Einspritzgeschwindigkeit 80 ccm/s; Mitte: Einspritzgeschwindigkeit 120 ccm/s; Unten: Einspritzgeschwindigkeit 160 ccm/s; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30.78
- Abbildung 66: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Einspritzgeschwindigkeit): Einspritzgeschwindigkeit 60 ccm/s; Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten; Material: PP mit 20 % Talkum.79
- Abbildung 67: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Staudruck): von links nach rechts: 60 bar; 80 bar; 120 bar; 140 bar; Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten; Material: ABS.80
- Abbildung 68: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Staudruck): Staudruck: 160 bar; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30.....81
- Abbildung 69: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Dosiergeschwindigkeit); Material: PP mit 20 % Talkum; Gewichtseinsparung 20 %; links: Dosiergeschwindigkeit: 50 ccm/ s; rechts: Dosiergeschwindigkeit: 250 ccm/s (Dosiergeschwindigkeit vom Zentralpunkt: 150 ccm/ s).82
- Abbildung 70: CT-Aufnahme: Schaumstruktur in Abhängigkeit der Dosiergeschwindigkeit; Material: PP mit 20 % Talkum; Gewichtseinsparung 20 %; links: Dosiergeschwindigkeit: 50 ccm/ s; Mitte: Dosiergeschwindigkeit: 150 ccm/ s rechts: Dosiergeschwindigkeit: 250 ccm/s.....82
- Abbildung 71: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Dosiergeschwindigkeit); Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30; Dosiergeschwindigkeit: 160 ccm/s.....83
- Abbildung 72: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt (275 °C) / Schmelzetemperatur); Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30; Schmelzetemperatur: links: 260 °C; rechts: 290 °C.....84
- Abbildung 73: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt/ Werkzeugtemperatur): von links nach rechts: 20 °C; 30 °C; 50 °C; 60 °C; Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten; Material: PP mit 20 % Talkum, 10 % Gewichtseinsparung.84

Abbildung 74: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Gasgehalt 0,02 l/ Zyklus / Gasgehalt 0,1 l/ Zyklus); Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30.	85
Abbildung 75: CT-Aufnahme: links: Treibmittelgehalt: 0,02 l/Zyklus; rechts: Treibmittelgehalt: 0,1 l/Zyklus; Werkzeug: Platte; Material: PA6 GF30.	85
Abbildung 76: Thermografieaufnahme – Differenzbild (Zentralpunkt / Gasgehalt 1 l/ Zyklus); Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten; Material: PP mit 20 % Talkum.	86
Abbildung 77: Fehlerbild bei der Inline-Gewichtsmeldung. Batchweise Zugabe von Granulat gemischt mit chemischem Treibmittel, am Beispiel WPC mit endothermem Treibmittel.	87
Abbildung 78: Aufbau aus Halterung und gedrucktem Greifer	88
Abbildung 79: Schematischer Aufbau der Implementierung der Inline-Gewichtsmessung.	88
Abbildung 80: Benutzeroberfläche der Messsoftware zur Inline-Gewichtsmessung.....	89
Abbildung 81: Benutzeroberfläche zum Einrichten der Messsoftware zur Inline-Gewichtsmessung.	90
Abbildung 82: Links: Spritzgießzyklus; rechts: Schneckenposition und Hydraulikdruck im Spritzgießzyklus.	90
Abbildung 83: Einfluss des Spritzgießzyklus auf die Erfassung des Bauteilgewichts... 91	
Abbildung 84: Messzyklus: 1: Greifer fährt in das Werkzeug ein; 2: Greifer aus dem Werkzeug ausgefahren (Y-Achse) und geschwenkt (2. Peak); 3: Horizontalfahrt (Z-Achse) zur Ablageposition; 4: Werkzeug schließt und Greifer fährt nach unten auf Ablageposition; 5. Ablageposition unten erreicht – Formteil ablegen; 6: Greifer (Y-Achse) nach oben; 7: Position oben erreicht; 8. Horizontalfahrt (Z-Achse) zur Warteposition über dem Werkzeug.	92
Abbildung 85: Rollierend arithmetisch gemittelte Werte über die Messdauer während der Horizontalfahrt (3).	93
Abbildung 86: Messaufbau zur Inline-Qualitätssicherung, links: Aufsicht mit Thermographie-Kamera und Waage; rechts: Rechner mit entsprechender Messsoftware.	94
Abbildung 87: Bauteilgewicht in Abhängigkeit des Staudrucks (60 bzw. 120 bar) über 5 Zyklen, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum.	94
Abbildung 88: Fluktuationen des Bauteilgewichts über 5 Zyklen; orange: niedriger Staudruck (60 bar), niedrige Einspritzgeschwindigkeit (80 ccm/ s) und hoher Gasgehalt (0,5 l/ Zyklus); grün: optimierter Staudruck (120 bar), optimierte Einspritzgeschwindigkeit (160 ccm/ s) und optimierter Gasgehalt (0,15 l/ Zyklus) am Beispiel WPC mit 50 Gew.% feinen Holzfasern	95
Abbildung 89: Darstellung einer idealisierten Werkzeuginnendruckverlaufskurve mit Angussnahem Sensor für das Kompaktspritzgießen.	96
Abbildung 90: Vergleich der Werkzeuginnendruckkurven für kompakt (schwarze Linie) und geschäumt (gelbe Linie) gespritzte Probekörper, am Beispiel PP mit 20 Gew.%	

Talkum, Zentralpunkt, 10 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.	97
Abbildung 91: Darstellung einer idealisierten Werkzeuginnendruckverlaufskurve mit Angussnahem Sensor für das Thermoplast-Schaumspritzgießen.	98
Abbildung 92: Verlauf des Werkzeuginnendruckes über die Fließweglänge für geschäumte Bauteile, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum, Zentralpunkt, 10 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.	99
Abbildung 93: Grafische Darstellung des Werkzeuginnendruckes in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum, 10 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.	100
Abbildung 94: Grafische Darstellung des Werkzeuginnendruckes in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum, 20 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.	101
Abbildung 95: Computertomografie-Aufnahme des Defektvolumens von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 20 % Gewichtseinsparung, links Einspritzgeschwindigkeit 60 ccm/s, rechts Einspritzgeschwindigkeit 180 ccm/s	101
Abbildung 96: Grafische Darstellung des Werkzeuginnendruckes in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit, am Beispiel ABS, 10 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.	102
Abbildung 97: Grafische Darstellung des Werkzeuginnendruckes in Abhängigkeit des Staudrucks, am Beispiel PP mit 20 Gew.% Talkum, 20 % Gewichtseinsparung, Werkzeug: Platte mit geometrischen Besonderheiten.....	103
Abbildung 98: Computertomografie-Aufnahme des Defektvolumens von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 20 % Gewichtseinsparung, links Staudruck 60 bar, Mitte Staudruck 120 bar, rechts Staudruck 160 bar.....	103
Abbildung 99: Vergleich der Prozesskonstanz über 5 Zyklen bei einem Staudruck von 60 bar, am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung	104
Abbildung 100: Vergleich der Prozesskonstanz über 5 Zyklen bei einem Staudruck von 120 bar, am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung	105
Abbildung 101: Vergleich der Prozesskonstanz über 5 Zyklen bei einem Fluidgehalt von 0,1 l/Zyklus, am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.	106
Abbildung 102: Vergleich der Prozesskonstanz über 5 Zyklen bei einem Fluidgehalt von 1 l/ Zyklus, am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.	106
Abbildung 103: Graphische Darstellung des Werkzeuginnendruckes in Abhängigkeit vom Fluidgehalt am Beispiel von PP mit 20 Gew.% Talkum, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.	107

Abbildung 104: Graphische Darstellung des Werkzeuginnendruckes in Abhängigkeit vom Staudruck [bar] am Beispiel von ABS, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.....	108
Abbildung 105: Graphische Darstellung des Werkzeuginnendruckes in Abhängigkeit vom Fluidgehalt [l/ Zyklus] am Beispiel von ABS, geschäumt, 10 % Gewichtseinsparung.	108
Abbildung 106: Vergleich des Werkzeuginnendruckes in Abhängigkeit des Treibmittelgehalts, am Beispiel WPC mit 30 Gew.% Holzgehalt (feine Fasern).	109

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialdaten PP.....	29
Tabelle 2: Materialdaten PA	30
Tabelle 3: Materialdaten ABS	30
Tabelle 4: Übersicht zu den von den Projektbegleitern bereitgestellten Polymeren.	31
Tabelle 5: Übersicht zu den von den Projektbegleitern bereitgestellten Holzfasern.	31
Tabelle 6: Übersicht zu den von den Projektbegleitern bereitgestellten Treibmitteln. ..	31
Tabelle 7: WPC-Rezepturen.	32
Tabelle 8: Wärmebildkamera.....	37
Tabelle 9: Werkzeuginnendruckensensoren.....	38
Tabelle 10: Computertomograph 1	38
Tabelle 11: Computertomograph 2	38
Tabelle 12. Variation der Prozessparameter.	39
Tabelle 13: Versuchsplan der geschäumten Bauteile.	39
Tabelle 14: Versuchsplanung in Abhängigkeit der untersuchten Prozessparameter.	41
Tabelle 15: Eckdaten der gewählten Prozessparameter.....	41
Tabelle 16: Versuchsplan CBA	42
Tabelle 17: Versuchsplan PBA.....	42
Tabelle 18: Versuchsplan der Kombination aus CBA und PBA	43
Tabelle 19: Versuchsplan für PP 20 % Talkum; PA6 GF30; ABS für Platte mit geometrischen Besonderheiten	43