



Diplomarbeit

**Herstellung medienführender Leitungen durch
Kombination von Coinjektion und
Wasserinjektionstechnik**

Eingereicht von

Stephan Stückler

Betreuer: **Dipl.-Ing. Thomas Lucyshyn**

Beurteilt: **Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Clemens Holzer**
am



Institut für Kunststoffverarbeitung

Vorstand: Univ. Prof. Dr. Clemens Holzer

Montanuniversität Leoben

Leoben, 8.04.2009

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Datum

Unterschrift

Danksagungen

Mein Dank gilt dem Vorstand des Institutes für Kunststoffverarbeitung Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Walter Friesenbichler der mir diese Arbeit ermöglicht hat.

Für die kritische Durchsicht und Verbesserungsvorschläge möchte ich mich beim jetzigen Vorstand des Institutes für Kunststoffverarbeitung Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Clemens Holzer bedanken.

Besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Thomas Lucyshyn der mich in praktischer als auch theoretischer Hinsicht sehr tatkräftig unterstützt hat.

Weiters möchte ich mich bei sämtlichen Mitarbeitern des Institutes für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben für ihre Unterstützung bedanken.

Summary

Nowadays the demands on engineering parts like highly integrated hollow media pipes which are often used in automobiles are rising constantly. Especially the requirements in automotive industry are high. Mechanical properties must be guaranteed which often can only be achieved by using technical polymers with fillers like glass fibres. Those polymers can not always be processed by fluid injection technique (FIT). Only by combining FIT and sandwich injection moulding these materials can be used as outer layer. Through injection of a suitable core component, good hollow quality and component properties can be achieved. This makes it possible to choose the polymer of the outer layer independently from its suitability for FIT.

In this work the effect of process parameters on the moulded part have been investigated, with regard to the dependent variables like wall thickness, its distribution and hollow quality. Relevant parameters have been evaluated with a literature study and discussions. With preliminary tests the most influential parameters have been identified. Subsequently a statistical test plan with the identified parameters was generated by using ASSISTANT, a test planning and optimization software. With the results of the test plan a mathematical model for the correlation between parameters and dependent variables was generated which was also used for optimizing the parameters (Core component flow rate, water flow rate, outer- and inner component temperature, tool temperature, delay time of core component- and water injection) to obtain thinner walls, better distribution and hollow quality. Moreover, the possibility of ultrasonic wall thickness measurement has been investigated.

The results of this work show, that the identified parameters have a limited influence on the target variables. Slightly better wall thickness and distribution as well as hollow quality were achieved. It was also shown that the measurement of the wall thicknesses with ultrasonic is possible. But for an inline usage of this technology further investigations are necessary.

Kurzfassung

In der heutigen Zeit steigen die Ansprüche an Bauteile wie polymere Hohlkörper, wie sie oftmals für Medienleitungen in Automobilen zum Einsatz kommen, permanent. Die Anforderungen an Bauteile speziell im Automobilbereich sind hoch. Es müssen mechanische Eigenschaften garantiert werden, die oft nur mit technischen Kunststoffen sowie Füllstoffen wie Glasfasern gewährleistet werden können. Diese Materialien lassen sich mit der Fluidinjektionstechnik (FIT) alleine nicht immer prozesssicher verarbeiten. Erst in der Kombination mit dem Sandwich-Spritzgießen können auch solche Materialien als Außenhaut eingesetzt werden. Durch die Injektion einer für die FIT geeigneten Kernkomponente können gute Hohlraumqualitäten und Bauteileigenschaften erzielt werden. So ist es möglich, dass die Außenhaut unabhängig von ihrer Eignung für die FIT ausgewählt werden kann.

In dieser Arbeit wurde in Hinblick auf Zielgrößen wie Wanddicken, deren Verteilung und Hohlraumqualität untersucht, welchen Einfluss Prozessparameter auf den Formteilbildungsprozess haben. Durch eine Literaturstudie und Diskussionen wurden mögliche relevante Parameter identifiziert. Durch Vorversuche wurde verifiziert, welche Parameter den größten Einfluss auf die Zielgrößen haben. Im Anschluss wurde mit Hilfe von ASSISTANT, einer Versuchsplanungs- und Optimierungssoftware, mit den identifizierten Parametern ein statistischer Versuchsplan erstellt. Mit den Ergebnissen wurde ein mathematisches Modell für den Zusammenhang von Parametern und Zielgrößen erstellt und die Parameter (Wasser- und Kernkomponentenvolumenstrom, Haut- und Kernkomponententemperatur, Kernkomponenten- und Wassereinspritzverzögerungszeit, Werkzeugtemperatur anschließend in Richtung besserer Wanddicke, deren Verteilung und Hohlraumqualität optimiert. Darüber hinaus wurde noch die Möglichkeit einer Ultraschall-Wanddickenmessung untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Beeinflussung der Zielgrößen durch Prozessparameter in begrenztem Maße möglich ist. Es ließen sich leicht verbesserte Wanddicken und Hohlraumqualitäten erzielen. Die Messung der

Wanddicken mit Ultraschall ist möglich, allerdings müssen für eine Anwendung in der Produktion weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1-1
2	STAND DER TECHNIK	2-3
2.1	SANDWICH-SPRITZGIEßEN	2-3
2.2	FLUIDINJEKTIONSTECHNIK	2-4
2.3	KOMBINATION VON FLUIDINJEKTIONSTECHNIK UND SANDWICH-SPRITZGIEßEN	2-7
3	LITERATURERECHERCHE ZUM EINFLUSS DER PROZESSPARAMETER AUF DEN FORMTEILBILDUNGSPROZESS	3-9
3.1	SANDWICH-SPRITZGIEßEN	3-9
3.2	FLUIDINJEKTIONSTECHNIK	3-12
3.2.1	Einfluss rheologischer Materialeigenschaften	3-12
3.2.2	Einfluss von Prozessparametern	3-13
3.3	KOMBINATION VON FLUIDINJEKTIONSTECHNIK UND SANDWICH-SPRITZGIEßEN	3-15
3.4	AUSWAHL DER BETRACHTETEN PARAMETER	3-17
4	EXPERIMENTELLES	4-20
4.1	VERWENDETES MATERIAL	4-20
4.2	BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGE	4-21
4.2.1	Spritzgießmaschine	4-21
4.2.2	Anlage für die Wasserinjektion	4-22
4.2.3	Spritzgießwerkzeug und Injektortechnik	4-23
4.3	AUSWERTEMETHODEN	4-25
4.3.1	Ermittlung der Restwanddicke	4-25
4.3.2	Ermittlung der Exzentrizität	4-26
4.3.3	Ermittlung der Hohlraumqualität	4-27
4.3.4	Messung des Werkzeuginnendruckes	4-29
4.4	VERSUCHSPLANUNGS- UND OPTIMIERUNGSSOFTWARE ASSISTANT	4-29
5	SPRITZGIEßVERSUCHE	5-31
5.1	VORVERSUCHE	5-31
5.1.1	Referenzversuch	5-31
5.1.2	Vorversuche	5-34
5.2	OPTIMIERUNG DER PROZESSPARAMETER	5-53
5.2.1	Erstellung und Durchführung des Hauptversuchsplans	5-53
5.2.2	Ergebnisse der Optimierung	5-55
5.2.3	Vergleich der Ergebnisse zwischen Standard- und optimierten Einstellungen	5-64
6	UNTERSUCHUNGEN ZUR ULTRASCHALL-WANDDICKENMESSUNG	6-68
6.1	GRUNDLAGEN DER ULTRASCHALL - WANDDICKENMESSUNG	6-68
6.2	MESSAUFBAU UND MESSVERFAHREN	6-69
6.3	MESSERGEBNISSE	6-70
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	7-72
8	LITERATURVERZEICHNIS	8-75
9	ANHANG	9-77
9.1	OPTIMIERTE MASCHINENEINSTELLUNGEN	9-77
9.2	HAUPTVERSUCHSPLAN	9-83
9.3	ERGEBNISSE DER HAUPTVERSUCHE	9-84

1 Einleitung und Zielsetzung

Ein großer Vorteil des Spritzgießprozesses ist die kostengünstige Herstellung von Bauteilen mit hoher Funktionsintegration. Um diesem Anspruch gerecht zu werden und die Qualität zu optimieren sowie eine immer höhere Funktionsintegration zu erreichen, gab es in den vergangenen Jahren eine Reihe interessanter Entwicklungen. Eine dieser Entwicklungen ist die sogenannte Wasserinjektionstechnik (WIT). Sie ist eine sehr neue Technik in den Sonderverfahren des Spritzgießens und hat sich aus der Gasinjektionstechnik abgeleitet. Das vorwiegende Einsatzgebiet ist die Herstellung von medienführenden Leitungen. Der Vorteil ist die Ausbildung des Hohlraumes mittels Wasser und eine damit verkürzte Zykluszeit und eine bessere Oberflächenbeschaffenheit der Hohlkörperinnenseite.

In dieser Arbeit wurde zusätzlich das Coinjektionsverfahren zur Herstellung einer Zwei-Komponenten-Medienleitung angewendet. Dies ermöglicht eine noch bessere Funktionsintegration, da die Außenhaut aus einem Kunststoff bestehen kann, der unter anderem die mechanische Stabilität, geringe Brandneigung und Wärmeformbeständigkeit sichert, aber alleine ungeeignet für die WIT ist, während die Kernschicht aus einem geeigneten Material für die Hohlraumbildung besteht, das z.B. gute Barriereigenschaften oder Chemikalienbeständigkeit aufweist.

Eines der wichtigsten Qualitätskriterien für eine Medienleitung ist die Wanddickenverteilung. Sie bestimmt einerseits die Festigkeit des Bauteils als auch dessen Strömungsquerschnitt und hat darüber hinaus einen Einfluss auf die Materialkosten. Durch Variation von Prozessparametern lässt sich die Wanddickenverteilung in gewissen Grenzen beeinflussen [1].

Eine weitere Variationsmöglichkeit, die Wanddicke und deren Verteilung zu verändern, besteht in dem bei dieser Arbeit verwendeten Werkzeug selbst, da im Bereich der Wasserinjektion der Rohrquerschnitt verändert werden kann. Darüber hinaus können die Fließwiderstände der Nebenkavitäten mittels Schraubeinsätzen variiert werden.

Ebenso wichtig ist die Festigkeit des Haftverbundes der beiden Materialien. Nicht alle Materialien sind für eine Coextrusion geeignet. In dieser Arbeit wurde eine Kombination von hydrolysestabilisiertem PA 66 mit 30% Glasfasern für die

1. Einleitung und Zielsetzung

Hautschicht und PP mit spezieller Coextrusionseignung für die Kernschicht verwendet.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Fertigung einer medienführenden Leitung auf einer Engel Spritzgussmaschine (Victory 150) durch Kombination von Coinjektions- und Wasserinjektionstechnik mit möglichst gleichmäßiger Materialverteilung, d.h. eine möglichst gleichmäßig ausgeprägte Verteilung der Wanddicken von Haut- und Kernmaterial über den Umfang als auch über die Länge. Es sollte eine Mindestgesamtwandstärke von 2,2 mm, wovon 1 mm auf die Kernkomponente entfällt, erreicht werden, um die erforderlichen Festigkeiten zu gewährleisten. Ein Innendurchmesser von 16 mm sollte nicht unterschritten werden.

Zu diesem Zweck soll der Zusammenhang zwischen Einstellparametern und Wanddickenverteilung ermittelt werden, um daraus einen optimierten Prozess zu erhalten. Vorerst wurden die Prozessparameter mittels Literaturrecherche und Überlegungen ausgewählt und deren Einfluss wurde im Rahmen der Vorversuche bewertet. Anschließend findet eine Auswahl der Parameter mit dem größten Einfluss statt. Aus den gewählten Parametern wird mit Hilfe einer Versuchsplanungs- und Optimierungssoftware (ASSISTANT) ein statistischer Versuchsplan erstellt. Nach der Durchführung und Auswertung der Hauptversuche ist es möglich, ein mathematisches Modell zu erstellen, mit dem eine Optimierung der Parameter möglich ist. Um die Qualität der Wanddicken und deren Verteilung beurteilen zu können, soll eine Methode zur Ermittlung der Wanddickenverteilung gefunden werden. Darüber hinaus wurde die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Prüfung der Wanddicken mithilfe von Ultraschall untersucht.

Von Bedeutung für das Bauteil ist, neben der Wanddickenverteilung, ein möglichst niedriger Druckverlust, der sowohl über den Innendurchmesser als auch über die Hohlraumqualität beeinflusst wird. Die Hohlraumqualität soll optisch unter Zuhilfenahme eines vorher festgelegten Beurteilungsschemas analysiert werden.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die in dieser Diplomarbeit zum Einsatz kommenden Verfahren der Spritzgießtechnik vorgestellt. Dazu gehören das Sandwich-spritzgießen, die Wasserinjektionstechnik und eine Kombination aus beiden Verfahren. Des Weiteren soll ein kurzer Überblick über die Ultraschallwanddickenmessung gegeben werden.

2.1 Sandwich-Spritzgießen

Das Sandwich-Spritzgießen gehört ebenso wie die Fluidinjektionstechnik (FIT), dazu zählen Gas- und Wasserinjektionstechnik, zu den Sonderverfahren in der Spritzgießtechnik. In dieser Arbeit wird eine Kombination aus beiden Technologien betrachtet, wobei Wasser als Fluid eingesetzt wird. Da bei diesen Verfahren sämtliche Komponenten hintereinander eingebracht werden, gehören sowohl das Sandwich-Spritzgießen als auch die FIT zur Gruppe der Sequenzverfahren [1, 2].

Mit der Technik des Sandwich-Spritzgießens können mehrschichtig aufgebaute Spritzgussteile hergestellt werden. In der Praxis finden oft Hart-Weichkombinationen sowie Recycling-Neumaterialkombinationen und Kombinationen aus kompakter Haut und treibmittelhaltigem Kern Anwendung [3]. Üblicherweise werden dabei die Schmelzeströme von zwei Spritzaggregaten über einen Coinjektionskopf zusammengeführt. Die Füllung der Kavität erfolgt in mehreren Stufen. Zunächst wird mit der ersten Spritzeinheit das Hautmaterial in die Kavität gespritzt. Dabei wird die Kavität noch nicht vollständig gefüllt. Im zweiten Schritt erfolgt dann die volumetrische Füllung der Kavität mit der Kernkomponente die sich im Inneren der vorgelegten Hautmasse ausbreitet. Die Kernkomponente wird von dem zweiten Plastifizieraggregat über den Coinjektionskopf eingespritzt. In der Regel erfolgt zwischen dem Einspritzen der Haut- und Kernkomponente eine kurze Simultanphase, um Fließmarkierungen zu verhindern. Im letzten Schritt wird dann üblicherweise mit dem Hautmaterial der Nachdruck aufgebracht.

Voraussetzung für brauchbare Bauteile, die mit dieser Technik hergestellt werden, ist eine geeignete Materialkombination. Dabei gibt es drei wichtige Anforderungen, die erfüllt sein sollten: Verarbeitungs-, Haftungs- und Eigenschaftskompatibilität [4]. Hierunter versteht man ähnliche Verarbeitungstemperaturen, Elastizitätsmoduli und Ausdehnungskoeffizienten. Darüber hinaus sollte die Adhäsion der beiden Polymere ausreichend sein. Um eine genügend große Haftung der beiden Komponenten zu erreichen, werden den Kunststoffen oftmals Haftvermittler beigemischt. Ein Aspekt der Eigenschaftskompatibilität für die Verarbeitung ist das Viskositätsverhältnis der

beiden Komponenten. So sollte darauf geachtet werden, dass die Viskosität des Kernmaterials etwa gleich groß oder größer ist als die des Hautmaterials. Ansonsten kann es zum lokalen Voreilen des Kernmaterials kommen, dem sogenannten Fingereffekt [5].

2.2 Fluidinjektionstechnik

Wie bereits erwähnt, gehört die Fluidinjektionstechnik zu den Sequenzverfahren, da das Fluid nach der Schmelzevorlage injiziert wird. Dabei wird eine Flüssigkeit, meist Gas oder Wasser, eingesetzt, um einen Hohlraum in dem noch schmelzeflüssigen Kern eines Spritzgießbauteils zu formen. Der verdrängte Kunststoff füllt dabei entweder die restliche Kavität aus oder wird in eigens vorgesehene Nebenkavitäten gedrückt. Um Material zu sparen, ist auch ein Rückdrücken der Schmelze in den Schneckenorraum möglich. Bei der Fluidinjektionstechnik wird der Nachdruck üblicherweise mit dem Prozessfluid aufgebracht. Dabei kann man den Nachdruck bis zum Ende der Kühlphase wirken lassen, da es keinen Siegelpunkt wie beim Kompaktspritzguss zu beachten gibt. Ein weiterer Vorteil ist die gleichmäßige Druckübertragung im Prozessfluid über den gesamten Bauteilhohlraum.

Für die Einleitung des Fluides werden spezielle Injektoren verwendet, die in der Kavität oder im Angussbereich des Spritzgießwerkzeuges angebracht sind. Zusätzlich benötigt man noch ein Aggregat zur Fluidförderung und zur Druckerzeugung. Diese Aggregate sind meist extern an eine gewöhnliche Spritzgussmaschine angeschlossen. Mit diesen zusätzlich nötigen Bestandteilen ist ein Mehraufwand an Kosten und eine höhere Anforderung an die Bedienung verbunden. Überdies ist für die Erzeugung guter Bauteile ein höheres Prozessverständnis notwendig.

Neben den genannten Nachteilen bietet die Fluidinjektionstechnik einige Vorteile gegenüber dem konventionellen Spritzguss. So können Einfallstellen reduziert, Zykluszeiten verkürzt und Materialeinsparungen erreicht werden. Im Falle von Medienleitungen ermöglicht erst diese Technik eine wirtschaftliche Herstellung im Spritzguss. Bauteile, die auf diesem Weg hergestellt werden, benötigen Führungskanäle, damit dem Prozessfluid eine eindeutige Richtung vorgegeben wird. Bestünden diese Kanäle nicht, könnte es sehr leicht zu einer unkontrollierten Ausbreitung des Fluides kommen (Fingereffekt).

Bei der Fluidinjektionstechnik finden vier Verfahrensvarianten in der Praxis die häufigste Anwendung. Die Variante mit dem geringsten Aufwand ist das

2. Stand der Technik

Aufblasverfahren. Die Kavität wird dabei nur teilgefüllt und im Anschluss mit Hilfe des Prozessfluides, das die Schmelzefront vorantreibt, ausgefüllt. Dabei besteht allerdings die Gefahr von Fließmarkierungen, da die Schmelze vor der Fluidinjektion zum Stehen kommt.

Eine weitere Methode ist das Masserückdruckverfahren. Dazu muss der Injektor auf der dem Anguss gegenüberliegenden Seite im Werkzeug angebracht sein. Nach einer vollständigen Füllung der Kavität wird durch das Fluid die überschüssige Schmelze in den Schneckenorraum zurückgedrückt.

Bei dem Nebenkavitätenverfahren wird die Kavität zunächst auch vollständig gefüllt. Im Anschluss wird ein Schieber betätigt, um so einen zusätzlichen Hohlraum freizugeben, in den dann durch das injizierte Fluid die überschüssige Schmelze gedrückt wird.

Eine ähnliche Variante stellt das Kernzugverfahren dar. Hierbei wird während der Injektion durch Ziehen eines oder mehrerer Kerne zusätzlicher Hohlraum freigegeben, in den die Schmelze gedrückt wird [1, 4, 6].

Die Gasinjektionstechnik (GIT) wird schon seit vielen Jahren erfolgreich bei der Herstellung von Bauteilen eingesetzt und hat mittlerweile eine weite Verbreitung erfahren [7]. Meist wird als Prozessfluid ein Inertgas wie Stickstoff eingesetzt. Die Verwendung eines Gases ist mit gewissen Nachteilen verbunden. So kann es zum Beispiel bei zu früher Nachdruckentlastung zum Aufschäumen des Kunststoffes führen, da sich das Gas in der Schmelze lösen kann. Bei Medienleitungen ist dies unerwünscht. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Wärmeleitung und Wärmekapazität von Gasen. Somit muss die gesamte Wärmeenergie der Schmelze über die Außenwand des Bauteils in das Werkzeug abgegeben werden. Dies wirkt sich einerseits nachteilig auf die Zykluszeit aus und andererseits lassen sich Bauteildurchmesser nur bis ca. 30 mm realisieren, da ansonsten der schmelzeflüssige Kern zum Verlaufen neigt [4].

Weniger verbreitet ist die noch recht junge Technologie der Wasserinjektionstechnik (WIT). Sie wurde 1998 am Institut für Kunststoffverarbeitung in Aachen entwickelt [4]. Durch die Verwendung von Wasser als Prozessfluid zur Hohlraumbildung ergeben sich gewisse Vorteile gegenüber der GIT. Durch die im Gegensatz zum Gas viel höhere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität kann die Zykluszeit drastisch gesenkt werden. Die Massenträgheit des Wassers sorgt auch dafür, dass die Fluidblase bei Krümmungen nicht so nahe an der Kurveninnenseite entlang läuft wie dies bei Gasen der Fall ist. Damit wird die Zentrität des Hohlraumes gesteigert. Da Wasser ein inkompressibles Medium ist, ergibt sich ein weiterer Vorteil aus der Möglichkeit einer volumenstromgesteuerten Wasserinjektion. Dabei bleibt die

2. Stand der Technik

Fluidblasengeschwindigkeit während der gesamten Injektion konstant und beschleunigt nicht wie bei der GIT, die druckgesteuert wird, gegen Ende des Fließweges. Der Grund für eine Beschleunigung der Fluidblase liegt in dem gegen Ende des Fließweges abnehmenden Massepolster, wodurch ein geringerer Gegendruck vorhanden ist. Ein konstanter Volumenstrom hat positive Auswirkungen auf die Wanddickenverteilung [1, 4, 6]. Speziell für Medienleitungen interessant ist auch, dass bei Verwendung von Wasser anstatt von Gas als Prozessfluid bei manchen Polymeren (z.B. PP) eine verbesserte Hohlraumqualität erzielt werden kann. Nicht vergessen werden sollte auch noch die günstige und einfache Anschaffung sowie Handhabung von Wasser.

Bei der Verwendung von Wasser ist auf einen ausreichend hohen Injektions- und Haltedruck zu achten, da das Wasser ansonsten bei Temperaturen der Schmelze von bis zu 300 °C verdampfen würde. Bei 300°C beträgt der Dampfdruck des Wassers ca. 86 bar und bei 290°C 74 bar [8]. Die Schmelzetemperatur des Kerns bei den in dieser Diplomarbeit durchgeführten Versuchen beträgt maximal ca. 290°C. Also ist der aufgebrauchte Haltedruck von 80 bar ausreichend, um ein Verdampfen des Wassers zu verhindern.

Neben den genannten Vorteilen der WIT gibt es auch ein paar Nachteile. So stellt die Entfernung des Prozessfluides aus dem Formteil eine größere Herausforderung dar als bei der GIT. Die einfachste Methode der Entfernung ist, das Wasser durch den geöffneten Injektor durch die Schwerkraft ausströmen zu lassen. Diese Methode wird auch bei dem Werkzeug in dieser Diplomarbeit verwendet.

Des weiteren kann es zu Wasseraustritten kommen, wenn der Injektor nicht ausreichend dichtet, oder es zu Durchbrüchen im Formteil kommt. Das ausgetretene Wasser kann in Folge zu Korrosionsschäden am Werkzeug und der Maschine führen.

Ein weiterer Nachteil ist der im Vergleich zur GIT größere Injektor, der sich möglicherweise nicht mehr so leicht ins Werkzeug integrieren lässt.

In Bezug auf das Material kann es auch zu Problemen kommen. Bei manchen Polymeren (z.B. PA) kann das Wasser zu einem Polymerabbau durch Hydrolyse führen. Es müssen also noch Hydrolysestabilisatoren zugegeben werden. Eine andere Möglichkeit, die Hydrolyse zu verhindern, stellt der Sandwichspritzguss dar. Dabei wird als Kernmaterial ein hydrolysebeständiges Polymer verwendet, das besser für die WIT geeignet ist. Das Hautmaterial kommt dann mit dem Wasser nicht mehr in Berührung.

2.3 Kombination von Fluidinjektionstechnik und Sandwich-Spritzgießen

Da Seitens der Kunden immer höhere Anforderungen an Spritzgussbauteile gestellt werden, kommt es zu einer immer höher integrierten Fertigung von Bauteilen mit hervorragenden Eigenschaften. Die kunststoffverarbeitende Industrie sucht daher ständig nach neuen Möglichkeiten, diese Forderungen zu erfüllen. Viele bereits bekannte Technologien befinden sich auf einem hohen Entwicklungsstand. Somit ist eine gute Möglichkeit, den Kundenansprüchen gerecht zu werden, diese bekannten Technologien zu kombinieren.

So bietet die Kombination von FIT und Sandwichspritzguss die Möglichkeit, zweischichtige Hohlkörper mit diversen Anbauten (wie Befestigungen) in einem Prozessschritt herzustellen. Dabei läuft der Prozess vorerst wie beim konventionellen Sandwichspritzguss ab. Nachdem Haut- und Kernmaterial eingespritzt sind, wird durch die Injektion des Prozessfluides ein Hohlraum im Formteil erzeugt. *Abbildung 1* zeigt die Strömungsvorgänge während des Formteilbildungsprozesses bei der 2K-FIT. Die Strömungsvorgänge können in sieben Bereiche unterteilt werden. Die Bereiche A bis C kommen ebenso im konventionellen Einkomponenten-Spritzguss vor. Bereich A ist die ungefüllte Kavität. Im Bereich B bildet sich eine Quellströmung in der Fließfront der Hautkomponente aus. Im Bereich C bildet das Hautmaterial eine eingefrorene Randschicht aus. Im schmelzeflüssigen Kern liegt eine schichtförmige Einkomponentenströmung vor. Die Dicke der eingefrorenen Randschicht wird in erster Linie über die Temperaturleitfähigkeit a des Kunststoffes bestimmt.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (1)$$

ρ ...Dichte (kg/m³)

λ ...Wärmeleitfähigkeit (W/mK)

c_p ...Wärmekapazität (kJ/kgK)

Eine höhere Temperaturleitfähigkeit bewirkt eine schnellere Abkühlung und führt so zu größeren Restwanddicken (RWD).

Die fortschreitende Fließfront des Kernmaterials ist im Bereich D zu sehen. Die Strömungsverhältnisse gleichen denen des klassischen Sandwich-Spritzgießens. An der Fließfront des Kernmaterials werden die Kunststoffpartikel deformiert und es entsteht eine Dehnströmung in Richtung der Fließkanalwand. Durch die Zweikomponentenströmung im Bereich E wird die RWD der Haut reduziert. Das Kernmaterial überträgt eine Schubspannung auf die Hautkomponente und durch die entstehende Schleppströmung wird die Hautschicht ausgedünnt. Die Folge ist eine

2. Stand der Technik

mit dem Fließweg zunehmende Hautschichtdicke. Der sich bildende Schichtdickenverlauf und das Geschwindigkeitsprofil der beiden Komponenten hängen von Material- und Prozessparametern ab [1]. Im Bereich F ist die fortschreitende Fluidfließfront zu sehen. Es handelt sich wiederum um eine Zweikomponentenströmung. Die Kunststoffpartikel werden biaxial in Richtung der Kavitätswand gedehnt. In diesem Bereich wird die RWD des Kerns maßgeblich beeinflusst. Im Bereich G herrschen Verhältnisse wie bei der Einkomponenten FIT. Die Viskosität des treibenden Fluids ist im Vergleich zum Polymer vernachlässigbar, somit werden auch kaum Scherkräfte auf die Polymerschichten übertragen. Es findet also nach dem Passieren der Fluidblase kaum noch eine Änderung der RWD statt.

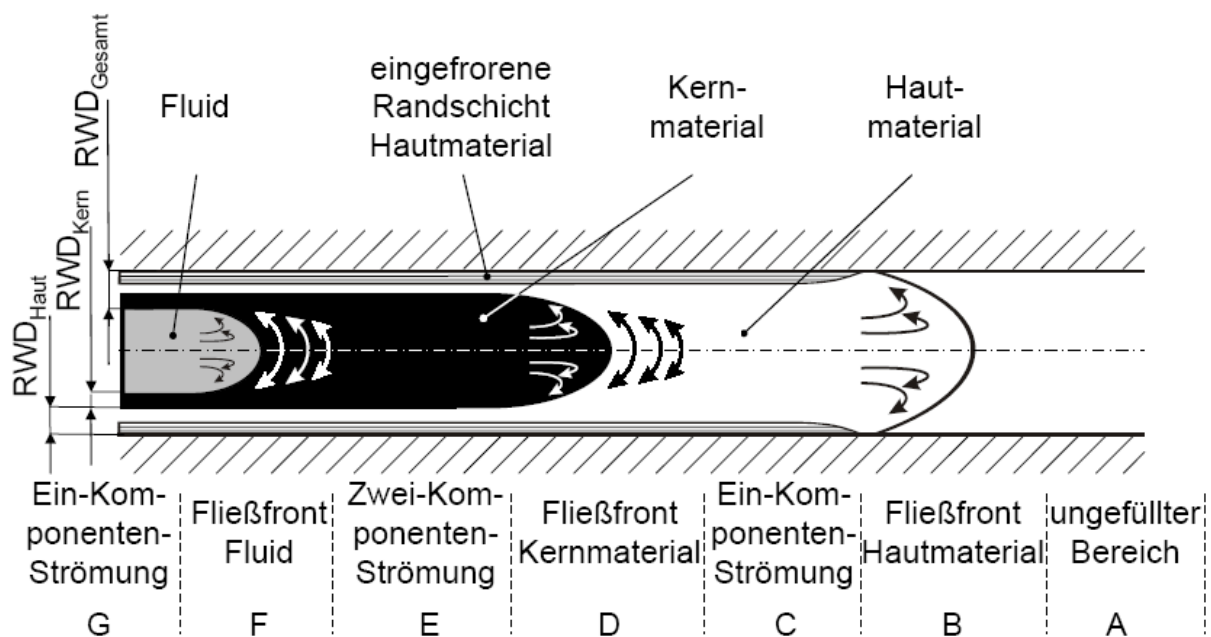


Abbildung 1: Strömungsbereiche bei der Kombination von FIT und Sandwich-Spritzguss [1]

Diese Technologie erlaubt grundsätzlich alle aus der FIT bekannten Methoden anzuwenden. Es können Bauteileigenschaften erreicht werden, die mit nur einer Kunststoffkomponente nicht möglich wären. Zum Beispiel kann man für die Hautschicht einen Kunststoff verwenden, der die Festigkeit sicherstellt, während man für die Kernschicht einen Kunststoff mit besonderen Barriereigenschaften einsetzt. Wie bereits im vorigen Abschnitt 2.2 erwähnt, gibt es auch Polymere, die nicht mit der WIT verträglich sind. Findet man nun ein geeignetes Kernmaterial, kann man auch für WIT ungeeignete Polymere für die Hautschicht einsetzen.

In der Praxis findet diese sehr junge Technologie noch kaum eine Anwendung, da es sich um ein sehr komplexes Verfahren mit vielen Einflussparametern und einer aufwendigen Steuerung handelt [7].

3 Literaturrecherche zum Einfluss der Prozessparameter auf den Formteilbildungsprozess

In diesem Kapitel werden mögliche Prozessparameter, die einen Einfluss auf den Formteilbildungsprozess bei der Wasserinjektionstechnik haben, in der Literatur recherchiert. Zur Zweikomponenten-Wasserinjektionstechnik bestehen nur sehr wenige Untersuchungen. Daher werden die Wasserinjektionstechnik und das Sandwichspritzgießen vorerst separat betrachtet. Am Ende dieses Kapitels findet eine Auswahl der betrachteten Parameter statt.

3.1 Sandwich-Spritzgießen

Ein wichtiges Qualitätskriterium beim Sandwich-Spritzgießen stellt die Hautschichtdicke und die damit verbundene Kernmaterialverteilung dar. Diese sollte im gesamten Bauteil möglichst gleichmäßig sein. Wesentliche Einflussgrößen sind Geometrie-, Material- und Prozessparameter. Dominant ist dabei das Viskositätsverhältnis k_η (Gleichung 2) zwischen dem Kern- und dem Hautmaterial [9]. In Abbildung 2 ist der Schichtenaufbau einer Zweikomponenten-Strömung dargestellt. Bereich I stellt die Fließfront der Kernkomponente dar. Hier wird die resultierende Restwanddicke der Hautkomponente maßgeblich festgelegt [10]. Bereich II ist der Zweikomponenten-Strömungsbereich, und im Bereich III hat sich eine stationäre Schichtstruktur ausgebildet, sobald die Kern- und die Hautschicht erstarrt sind. An der Schmelzefließfront der Hautkomponente findet eine Quellströmung statt.

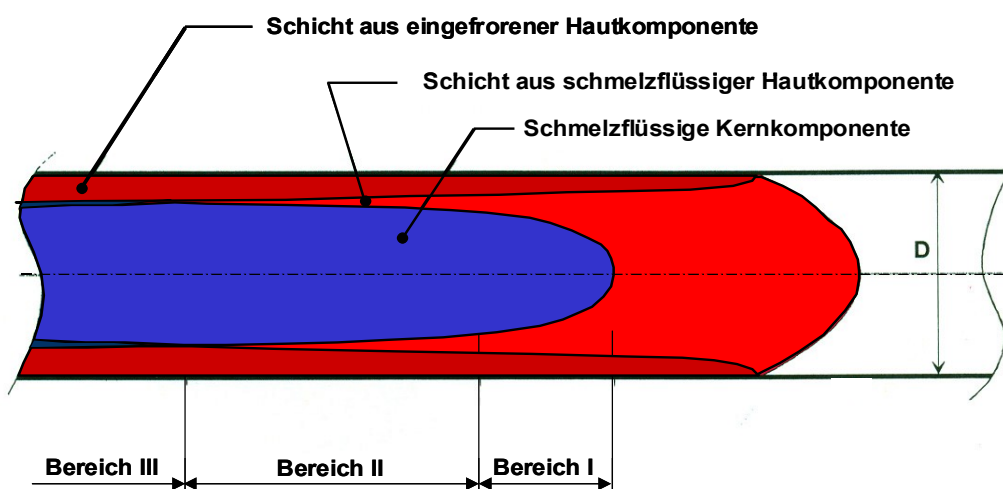


Abbildung 2: Strömungsverhältnisse beim Sandwich-Spritzgießen [9]

3. Literaturrecherche zum Einfluss der Prozessparameter auf den Formteilbildungsprozess

Das verdrängende Fluid hat eine nicht vernachlässigbare Scherviskosität. Folglich wird während der gesamten Einspritzphase des Kernmaterials Schubspannung auf die Hautkomponente übertragen und die Hautwanddicke durch Schleppströmung weiter ausgedünnt. Darüber hinaus wird durch Dissipation und Einbringung von Wärmeenergie durch die Kernkomponente die Abkühlung der Hautschicht verlangsamt. Dies trägt zusätzlich zum Materialtransport bei [6].

$$k_{\eta} = \frac{\eta_{rep,Kern}}{\eta_{rep,Haut}} \quad (2)$$

$\eta_{rep, Kern}$... repräsentative Viskosität der Kernkomponente (Pas)

$\eta_{rep, Haut}$... repräsentative Viskosität der Hautkomponente (Pas)

Bei einem niedrigen repräsentativen Viskositätsverhältnis, also wenn die Scherviskosität der Haut- höher ist als die der Kernkomponente, wird nach [6] und [9] die Hautschichtdicke gleichmäßiger ausgebildet und die Verdrängungsfront wird stumpfer (siehe Abbildung 3). Bei hohen Werten von k_{η} , also bei hoher Scherviskosität des Kernmaterials im Vergleich zum Hautmaterial, nimmt die Hautschichtdicke über den Fließweg kontinuierlich zu. Das Fließfrontprofil der Kernkomponente fällt dabei spitzer aus (siehe Abbildung 3). Das Viskositätsverhältnis hat auch einen entscheidenden Einfluss auf die Stabilität der Kernkomponentenströmung und somit auf die Verteilung der Schichten [11]. Je niedriger viskoser die Kern- im Vergleich zur Hautkomponente ist (Viskositätsverhältnis unter 1) umso instabiler ist die Ausbreitung der Kernkomponente. Ändert sich der Fließwiderstand des Hautmaterials lokal, so kommt es zu einem verstärkten Voreilen der Kernkomponente. Dieser Effekt wird noch verstärkt, da der Fließwiderstand im Bereich des Voreilens zusätzlich abnimmt. Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Viskositätsverhältnis von knapp unter 1 ideal ist [9].

[11] betrachtet neben den Materialparametern zusätzlich noch den Einfluss von Prozessparametern auf die Schichtenverteilung von flächigen Sandwich-Spritzgussteilen. Obwohl die Ergebnisse nicht direkt auf mittels FIT hergestellten Zwei-Komponenten Medienleitungen übertragbar sind, so liefern sie doch Anhaltspunkte. So liefert eine Erhöhung des Kernvolumenstroms eine Verringerung des Viskositätsverhältnisses. Dafür sind zwei Faktoren verantwortlich. Zum einen wird die lokale Verweilzeit der Schmelze und somit das Einfrierverhalten beeinflusst und zum anderen die Formfüllung durch veränderte Viskositäten. Die Viskosität ändert sich durch veränderte Temperatur- und Schergeschwindigkeitsprofile. Dies hat unterschiedliche Auswirkungen auf die Verteilung von Haut- und Kernschicht. Durch das niedrigere Viskositätsverhältnis wird das Schichtgrenzprofil zwischen

3. Literaturrecherche zum Einfluss der Prozessparameter auf den Formteilbildungsprozess

Haut- und Kernkomponente instabiler. Mit zunehmendem Kernvolumenstrom nimmt auch die Reichweite der Kernfließfront ab. Durch den höheren Volumenstrom friert das Hautmaterial angussnah weniger stark ein, weil sich die Verweilzeit verringert. Dadurch wird mehr Hautmaterial zum Fließwegende hin transportiert und sammelt sich vor der Kernfließfront. Die Folge neben der verringerten Kernkomponentenreichweite ist eine Zunahme der Hautschichtdicke zum Fließwegende hin.

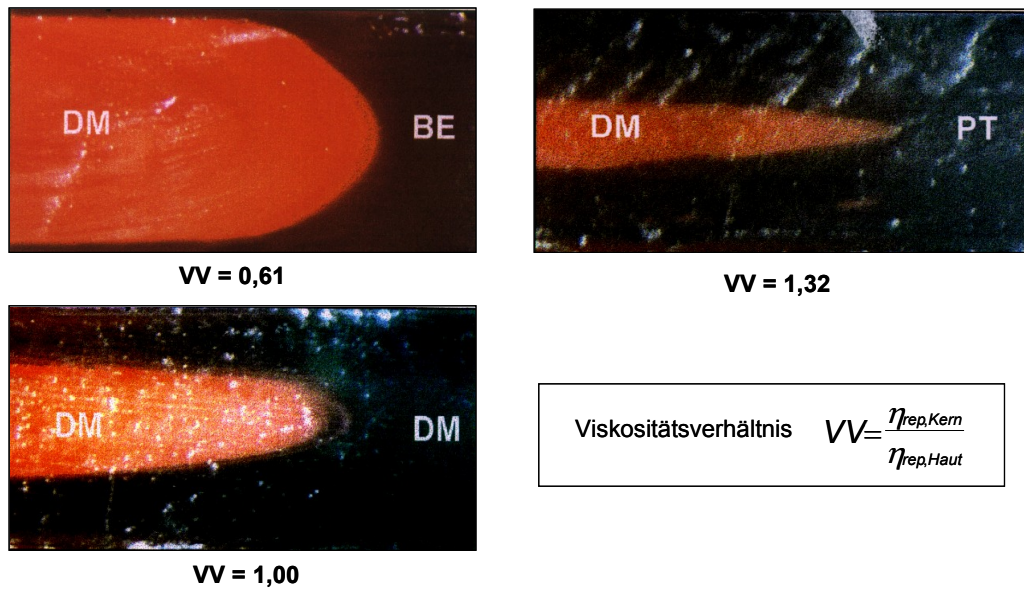


Abbildung 3: Fließfrontausbildung der Kernkomponente bei unterschiedlichen Viskositätsverhältnissen zwischen Haut- und Kernmaterial [9]

Der Einfluss der Werkzeugwandtemperatur fällt geringer aus, da das Viskositätsverhältnis von Kern- zu Hautmaterial kaum beeinflusst wird. Dennoch ergeben sich folgende Abhängigkeiten: Mit höherer Werkzeugwandtemperatur steigt die Kernschichtdicke über den Fließweg an, da angussnah weniger Material erstarrt. Zusätzlich wird mehr Hautmaterial in Richtung Fließwegende hin verschoben und die Kernschichtreichweite verringert sich [1].

Nach [11] ist der Einfluss der Wanddicke des Bauteils als eher gering zu bewerten. So ist für die Ausbildung der Hautschichtdicke weniger die Gesamtwanddicke verantwortlich als vielmehr die lokalen Abkühlbedingungen. Die Fließfront der Kernschicht ändert sich mit zunehmender Dicke des Bauteils nicht wesentlich. Mit größeren Wanddicken nimmt das Verhältnis von Haut- zu Kernschichtdicke unterproportional ab.

3.2 Fluidinjektionstechnik

3.2.1 Einfluss rheologischer Materialeigenschaften

Obwohl es nicht Ziel dieser Arbeit ist, den Einfluss der rheologischen Eigenschaften der Materialien auf den Formteilbildungsprozess zu untersuchen, werden einige Aspekte auszugsweise betrachtet, da sie in Hinblick auf unterschiedliche Massetemperaturen von Interesse sind. Bei der WIT kommt es im Vergleich zur GIT zu einem nicht vernachlässigbaren Wärmeaustausch zwischen Schmelze und Wasser. Die Massetemperatur hat einen großen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften von Polymeren. So haben Temperaturänderungen eine unmittelbare Auswirkung auf die Scherviskosität, die wiederum die Materialverteilung beim Sandwich - Spritzguss beeinflussen. Bei der WIT führt nach [4] eine Erhöhung der Schmelztemperatur und somit einer Erniedrigung der Scherviskosität zu einer Zunahme der RWD. Bestätigt wird diese Beobachtung durch [12], der eine Abnahme der Restwanddicke bei zunehmender Scherviskosität beobachtet. Begründet wird dies dadurch, dass mit zunehmender Scherviskosität und somit höherem Fließwiderstand die Fluidblasenfront stumpfer wird und mehr Material verdrängt.

Mit steigender Strukturviskosität sinken die RWD. Dies ist auf die mit steigender Strukturviskosität zunehmend stumpfere Blasenfront zurückzuführen, die mehr Material als eine spitzere Blase verdrängt [6]. Durch das mit zunehmender Strukturviskosität blockförmigere Geschwindigkeitsprofil treten wandnahe größere Geschwindigkeitsgradienten auf als im Zentrum. Die Folge ist eine stärkere Scherung der Schmelze unmittelbar unter der eingefrorenen Randschicht. Es entsteht ein lokales Temperaturmaximum in Wandnähe, wodurch die Scherviskosität ein Minimum erreicht. Die Schmelze kann nun in diesem Bereich besonders leicht verdrängt werden und es entstehen dünnere Wanddicken.

Ist die Strukturviskosität geringer ausgeprägt, kommt es zu einem parabelförmigeren Geschwindigkeitsprofil. Es entsteht ein Maximum in der Kanalmitte und es wird mehr Schmelze nach außen gedrängt. Dies führt zu höheren RWD [10]. Der Einfluss der Strukturviskosität C auf die rheologischen Verhältnisse ist in Abbildung 4 zu sehen.

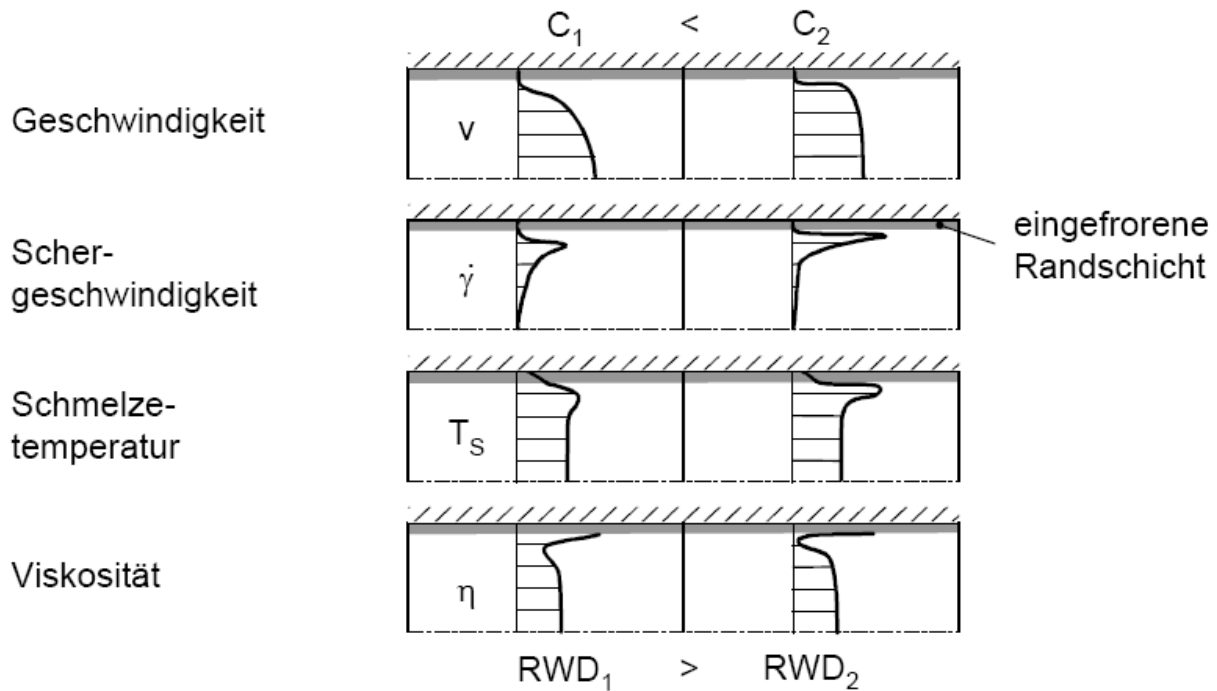


Abbildung 4: Unterschiede der rheologischen Verhältnisse mit verschiedenen Strukturviskositäten C [1].

Mit steigendem Speichermodul G' , der das elastische Materialverhalten beschreibt, steigen auch die RWD an. Dehnströmungen führen zu einer Dehnverfestigung. An der Blasenspitze sind die Dehnströmungen und somit die Verfestigung am größten. Das Resultat ist eine verringerte Blasenbreite, wodurch weniger Material verdrängt wird.

Der Einfluss der Dehnviskosität ist noch nicht restlos geklärt. Allerdings zeigt sich in den Arbeiten von [4, 6] eine Erhöhung der RWD des Kerns bei steigender Dehnviskosität. Eine mögliche Erklärung ist die sich schmaler ausbildende Fluidblase, die weniger Material verdrängt und somit zu höheren RWD führt.

3.2.2 Einfluss von Prozessparametern

Der Einfluss von ausgewählten Prozessparametern auf den Formteilbildungsprozess mittels WIT wird unter anderem in der Arbeit von [1] und [13] betrachtet. Beurteilt werden die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter hauptsächlich durch die RWD, da diese eine wichtige Zielgröße bei der FIT darstellt. Es folgt ein kurzer Überblick der Ergebnisse.

Unterschiedliche Füllgrade, die ein Maß für den Volumenanteil in der Kavität darstellen, haben nur eine kleine Auswirkung auf die RWD bei der

3. Literaturrecherche zum Einfluss der Prozessparameter auf den Formteilbildungsprozess

volumenstromgesteuerten WIT. Durch die Volumenstromsteuerung hat das sich ändernde Massepolster keinen Einfluss auf die Fluidblasengeschwindigkeit. Lediglich die Eindringtiefe der Fluidblase wird in stärkerem Maße beeinflusst. Dies führt zu Änderungen im Bauteilgewicht.

Die Untersuchungen zur Variation der Schmelzetemperaturen ergaben eine leichte Änderung der RWD. Die Masse-temperaturen haben einen direkten Einfluss auf die Viskosität der Polymere. Die Viskosität nimmt mit steigender Temperatur ab. Somit erniedrigt sich der Fließwiderstand in der Kavität. Bei der WIT beobachtet [4] eine Zunahme der RWD bei höheren Masse-temperaturen.

Eine Variation der Werkzeugwandtemperatur hat bei den vorliegenden Untersuchungen einen sehr geringen Einfluss auf die RWD. Begründet wird dies dadurch, dass die untersuchten Polymere eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Deshalb hat die Werkzeugtemperatur nur eine Wirkung auf unmittelbar an der Werkzeugwand anliegende Bereiche. In den wandfernen Bereichen, wo sich die Fluidblase ausbildet, ist der Einfluss vernachlässigbar.

Die Vorkühlzeit bezeichnet jene Zeit, die das Polymer bis zum Eintreffen der Fluidblase stationär in der Kavität verbleibt. An der Spritzgussmaschine kann die Vorkühlzeit direkt über die Verzögerungszeit eingestellt werden. Die Verzögerungszeit ist jene Zeit, die zwischen Ende der Einspritzphase und Beginn der Fluidinjektionsphase verstreicht. Eine hohe Verzögerungszeit führt zu größeren RWD [10, 13]. Begrenzt wird die Verzögerungszeit speziell beim Aufblasverfahren, da es bei längerer Stagnation zu deutlichen Fließmarkierungen kommen kann. Beim Nebenkavitätenverfahren können höhere Verzögerungszeiten realisiert werden. Somit ist eine Beeinflussung der RWD auch bei höheren Bauteildurchmessern möglich. Bei kleinen Durchmessern reagiert die RWD generell sensibler als bei größeren.

Es fanden auch Untersuchungen zu unterschiedlichen Fließkanaldurchmessern statt. Dabei ging hervor, dass die Beeinflussung der RWD durch die Vorkühlzeit mit zunehmendem Durchmesser sinkt. Untersuchungen zum Fließkanaldurchmesser haben gezeigt, dass die RWD linear mit der Zunahme des Durchmessers steigt.

Die Betrachtung des Einspritzvolumenstroms zeigt vor allem anspritzseitig einen Einfluss auf die RWD. Bei einer Erhöhung des Einspritzvolumenstroms sinkt die RWD vor allem am Fließweganfang ab. Angussnahe wird durch erhöhte Dissipation sowie eine kürzere Vorkühlzeit das Einfrieren der Randschicht verringert. Jedoch sind über längere Fließwege keine klaren Tendenzen feststellbar. [10] stellt einen gleichmäßiger ausgeformten Hohlraum fest, wenn mit höheren Volumenströmen eingespritzt wird.

Ein Vorteil der Verwendung von Wasser anstelle von Gas ist die Möglichkeit der Volumenstromsteuerung, da Wasser ein inkompressibles Medium ist. Damit ist eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fluidblase im Formteil gewährleistet, unabhängig von unterschiedlichen Massepolstern.

3.3 Kombination von Fluidinjektionstechnik und Sandwich-Spritzgießen

Da die Kombination von Sandwich-Spritzguss und Wasserinjektionstechnik noch eine sehr junge Technologie ist, existieren wenige Untersuchungen zum Einfluss von Prozessparametern auf diesem Gebiet. In den Arbeiten von [4] und [6] werden mit zunehmenden Kernlaufzeiten und Scherung des Materials abnehmende Wanddicken beobachtet. Analog zum Sandwichspritzguss nehmen die Wandstärken mit steigendem Viskositätsverhältnis zwischen Kern- und Hautmaterial, also $k_\eta > 1$, ab. Bei $k_\eta > 1$ kann es jedoch zu einem Austritt der Fluidblase aus dem Kernmaterial kommen, da sich das Medium den Weg des geringsten Widerstandes sucht.

In der Arbeit von [1] wird der Einfluss von Wasservolumenstrom, Verzögerungszeit und Kernmaterialvolumenstrom auf den Formteilbildungsprozess einer Medienleitung, die im kombinierten Verfahren aus Sandwich-Spritzguss und WIT hergestellt wird, untersucht. So führt eine Erhöhung der Kerneinspritzgeschwindigkeit zu einer reduzierten RWD der Haut über den gesamten Fließweg. Die Erklärung liefert die mit steigender Einspritzgeschwindigkeit höhere eingebrachte Scherung, wodurch das Hautmaterial stärker ausgedünnt wird. Zusätzlich wird die Kernfließfront blockförmiger, wodurch mehr Material verdrängt wird. Neben den genannten Effekten spielt auch die Vorkühlzeit eine Rolle. Bei höheren Einspritzgeschwindigkeiten der Kernkomponente verringert sich auch die Vorkühlzeit, insbesondere mit zunehmendem Fließweg. Dies führt auch zu reduzierten Hautwanddicken, wie sie ebenso beim Sandwich-Spritzguss festgestellt werden.

Der Einfluss der Verzögerungszeit auf die Ausbildung der Hautwanddicke ist deutlicher ausgeprägt als die Wirkung der Kerneinspritzgeschwindigkeit. Mit zunehmender Verzögerungszeit steigt auch die RWD der Haut. Erklärt werden kann dies mit einem höheren Abkühlgrad des Polymers und der somit zunehmenden erstarrten Randschicht. [1] stellt auch fest, dass mit sinkendem Fließkanaldurchmesser der Einfluss der thermischen Faktoren, wie der Verzögerungszeit, eine immer größere Rolle spielen.

Die Variation des Wasservolumenstroms ergibt keinen signifikanten Einfluss auf die RWD der Haut.

3. Literaturrecherche zum Einfluss der Prozessparameter auf den Formteilbildungsprozess

In Hinblick auf die Ausbildung der Wanddicke der Kernkomponente haben die von [1] betrachteten Prozessparameter einen geringen Einfluss. Es zeigen sich die größten Unterschiede bei der RWD des Kerns am Fließweganfang. So kommt es bei größeren Kernvolumenströmen zu höherer Scherung und somit zu erhöhter Dissipation. Beide Aspekte haben eine geringere Scherviskosität zur Folge, die eine verringerte RWD des Kerns bewirkt.

Bei geringeren Durchmessern (20 mm) wirkt sich auch eine Veränderung der Vorkühlzeit aus. So hat eine höhere Vorkühlzeit auch eine leicht erhöhte RWD des Kerns zur Folge. Bei größeren Durchmessern (30 mm) ergeben sich keine nennenswerten Einflüsse auf die RWD des Kerns.

Grundsätzlichen Überlegungen zufolge führt ein höherer Wasservolumenstrom zu dünneren RWD, da die Blasenfließfront sich blockförmiger ausbildet und mehr Material austrägt. Allerdings ergaben Untersuchungen von [1] eine gegenteilige Aussage über den Einfluss des Wasservolumenstroms. Er merkt aber an, dass dieses Ergebnis in weiteren Untersuchungen verifiziert werden sollte.

Der Wasservolumenstrom als auch die Verzögerungszeit haben einen deutlichen Einfluss auf die Exzentrizität der Fluidblase. Eine Erhöhung des Wasservolumenstroms ergibt eine höhere Exzentrizität der Fluidblase. Eine Erklärung liefert [1] damit, dass mit höherer Wassergeschwindigkeit die Turbulenzen zunehmen und folglich die Kräfte senkrecht zur Fließkanalrichtung zunehmen. Mit einer größeren Verzögerungszeit sinkt die Exzentrizität der Fluidblase. Durch die längere Kühlzeit nimmt die Dicke der hochviskoserer Randschicht zu. Dies scheint die Ausbreitung der Fluidblase zu stabilisieren. In Hinblick auf den Fließkanaldurchmesser nimmt die Exzentrizität mit größeren Durchmessern zu. Auch eine Erhöhung des Kernvolumenstroms wirkt sich auf die Exzentrizität der Fluidblase aus. Mit höherer Kerneinspritzgeschwindigkeit nimmt die Exzentrizität zu.

Nur sehr wenig kann nach den Erkenntnissen von [1] die Exzentrizität der Hautkomponente durch eine Variation der Prozessparameter beeinflusst werden. Die Hautschicht wird hauptsächlich durch die beim Sandwich-Spritzguss ablaufende Zweikomponentenströmung festgelegt. Diese Strömung kann mit den untersuchten Prozessparametern kaum beeinflusst werden.

Des Weiteren wurde noch der Einfluss der Prozessparameter auf die Hohlraumrauigkeit betrachtet. Der einzige Parameter, der einen Einfluss zeigt, ist der Wasservolumenstrom. Grundsätzlich wird festgestellt, dass eine Erhöhung des Wasservolumenstroms eine deutliche Verringerung der Rauigkeit bewirkt. Eine Begründung liefert die mit zunehmender Geschwindigkeit turbulenter werdende Strömung, die zu einer glatteren Hohlraumoberfläche führen kann. Eine weitere

Überlegung ist, dass mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit der Wasserdruck sinkt und somit die Verdampfungstemperatur herabgesetzt wird. Allerdings spricht laut [1] die lineare Abhängigkeit zwischen Wasservolumenstrom und Rauigkeit dagegen. Denn wenn das Wasser ab einem gewissen Volumenstrom dampfförmig vorliegen sollte, würde sich dies in einer veränderten Steigung in dem Verlauf der Rauigkeit bemerkbar machen.

3.4 Auswahl der betrachteten Parameter

Nachdem einzelne Einflussgrößen auf den Prozess mit Hilfe der Literatur beleuchtet wurden, fand nun eine Auswahl der Parameter statt. Zusätzlich zu den in der Literatur gefundenen Parametern wurden weitere mögliche Parameter, die einen Einfluss haben könnten, ausgewählt. Diese Parameter wurden dann im Rahmen der Vorversuche verifiziert. In Abbildung 5 ist ein Überblick über die ausgewählten Parameter mit möglichem Einfluss auf die Zielgrößen RWD, Exzentrizität sowie Hohlraumqualität gegeben.

Für die Parameter Verzögerungszeit, Wasservolumenstrom und Kernvolumenstrom wurde bereits von [1] ein Einfluss auf die zuvor genannten Zielgrößen nachgewiesen. Die Verzögerungszeit ist jene Zeit, die zwischen der Materialeinspritzung und der Wasserinjektion verstreicht. Ebenfalls einen Einfluss haben die Massetemperaturen der beiden Materialien, wie dies bereits von [4] und [6] anhand der sich ändernden Scherviskositäten nachgewiesen wurde. Zusätzlich zu diesen Parametern wurden noch eine Reihe weiterer Einflussgrößen ausgewählt und untersucht. So wurde die Werkzeugwandtemperatur, die über externe Temperiergeräte eingestellt wird, variiert. Die Werkzeugwandtemperatur sollte einen Einfluss auf die eingefrorene Randschicht haben. Je niedriger die Temperatur im Werkzeug, desto größer sollte sich die erstarrte Randschicht ausbilden.

Neben der Verzögerungszeit vor der Wassereinspritzung wurde noch die Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kernmaterialeinspritzung betrachtet. Erwartet wurde ein ähnlicher Einfluss wie bei der Verzögerungszeit vor der Wasserinjektion, also eine dickere eingefrorene Randschicht, die zu größeren RWD führen sollte.

Ebenfalls betrachtet wurden, neben dem standardmäßig eingesetzten Kernmaterial, zwei weitere Materialien derselben Type, aber mit höheren MFR Werten (siehe Kapitel 4.1, Seite 19).

Betrachtet wurde auch der Einfluss von veränderten Nachdruckhöhen des Haut- bzw. des Kernmaterials. Durch eine Absenkung der Nachdruckhöhe wird das in die Kavität gepresste Volumen reduziert. Somit kann es zu einer Beeinflussung der Restwanddicken kommen. Im Falle der Variation des Nachdrucks vom Hautmaterial

3. Literaturrecherche zum Einfluss der Prozessparameter auf den Formteilbildungsprozess

wurde der Nachdruck weggelassen. Neben dem reduzierten Hautvolumen bewirkt dies auch eine kürzere Vorkühlzeit, da die Kernkomponenteneinspritzung nicht mehr um die Dauer des Hautmassenachdrucks verzögert wird. In einem weiteren Versuch wurde der Nachdruck des Wassers weggelassen und die Auswirkungen auf die Hohlraumbildung anhand der zuvor erwähnten Zielgrößen untersucht.



Abbildung 5: Untersuchte Prozessparameter mit möglichem Einfluss auf die RWD, deren Verteilung und die Hohlraumqualität

Als weiterer Parameter wurde die Einspritzmenge des Kernmaterials betrachtet. Neben einer kleineren Eindringtiefe des Kernmaterials in das vorgelegte Hautmaterial sollte auch die Scherung und Kernlaufzeit verringert werden. Überlegungen zufolge führt dies zu höheren RWD der Haut während die RWD des Kerns zum Fließwegende hin abnehmen sollte.

Am Werkzeug selbst können verschiedene Geometrie-Veränderungen vorgenommen werden. Dies sind zwar keine Prozessparameter, aber deren Auswirkung wurde im Zuge dieser Arbeit trotzdem betrachtet. So ist im Werkzeug anspritzseitig, kurz nach der Injektornadel, ein Einsatz in der Kavität vorgesehen, mit dem man den Durchmesser eines Teilstücks des Rohres verändern kann. Dieser Einsatz sollte durch eine Verringerung des Durchmessers zu einer besser definierten Ausbreitung der Fluidblase führen und somit eine bessere Verteilung der Materialien bewirken. Zudem sind vor den beiden Nebenkavitäten (eine befindet sich nach dem Hauptrohr und eine nach der Abzweigung) Schrauben eingelassen, mit denen man den Fließwiderstand in der Kavität beeinflussen kann.

3. Literaturrecherche zum Einfluss der Prozessparameter auf den Formteilbildungsprozess

Zusätzlich wurde noch der Vorspanndruck des Injektors betrachtet. Der Vorspanndruck liegt an der Injektornadel an, um ein Eindringen der Schmelze vor der Öffnung des Injektors zu verhindern. Durch eine Erhöhung dieses Drucks, der unmittelbar nach der Öffnung des Injektors freigesetzt wird, könnte der sich ausbildende Fließkanal in der Kernkomponente bereits beeinflusst werden.

4 Experimentelles

Im Folgenden wird auf die Randbedingungen der durchgeführten Versuche näher eingegangen. Zuerst wird das Material charakterisiert und danach wird die Versuchsanlage vorgestellt. Im Zuge dessen wird noch näher auf das Werkzeug eingegangen und das Injektionsprinzip erläutert. Zum Abschluss des Kapitels werden die Auswertemethoden beschrieben.

4.1 Verwendetes Material

Die Untersuchungen werden mit einer Materialpaarung aus PA 66 und PP durchgeführt. Für das Hautmaterial der 2 Komponenten – Medienleitung kommt ein hydrolysestabilisiertes Polyamid 66 mit 30 % Glasfaseranteil (Zytel 70G30HSLR BK-99) der Firma Du Pont, Genf, Schweiz, und für das Kernmaterial ein haftungsmodifiziertes PP (Bynel 50E571) ebenfalls der Firma Du Pont zum Einsatz [15]. Neben dem standardmäßig eingesetzten PP werden im Rahmen der Voruntersuchungen noch zwei weitere Sorten von Bynel mit unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften eingesetzt (50E739, 50E806). Der Hauptunterschied liegt in den höheren MFR Werten von 6 bzw 25 (g/10 min; 190°C, 2,16 kg) im Vergleich zu 3,5 (g/10 min; 190°C, 2,16 kg) des standardmäßig verwendeten Kernmaterials.

Das eingesetzte PA ist, obwohl es als Hautschicht zum Einsatz kommt, hydrolysestabilisiert, da an den Anschlussstellen der Leitung ein Kontakt mit dem Medium auftritt. Um eine Delamination an den Grenzschichten der zwei Materialien möglichst zu verhindern, ist dem PP ein Haftvermittler zugesetzt. In Abbildung 6 sind die Viskositätskurven der beiden Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen zu sehen.

Diese Materialkombination ist besonders für den Automobilbau interessant, da die Außenhaut aus glasfaserverstärktem PA gute mechanische Eigenschaften sowie eine gute Warmformbeständigkeit besitzt, während die Innenschicht aus PP gut geeignet für die WIT ist und für eine gute Hohlraumqualität sorgt.

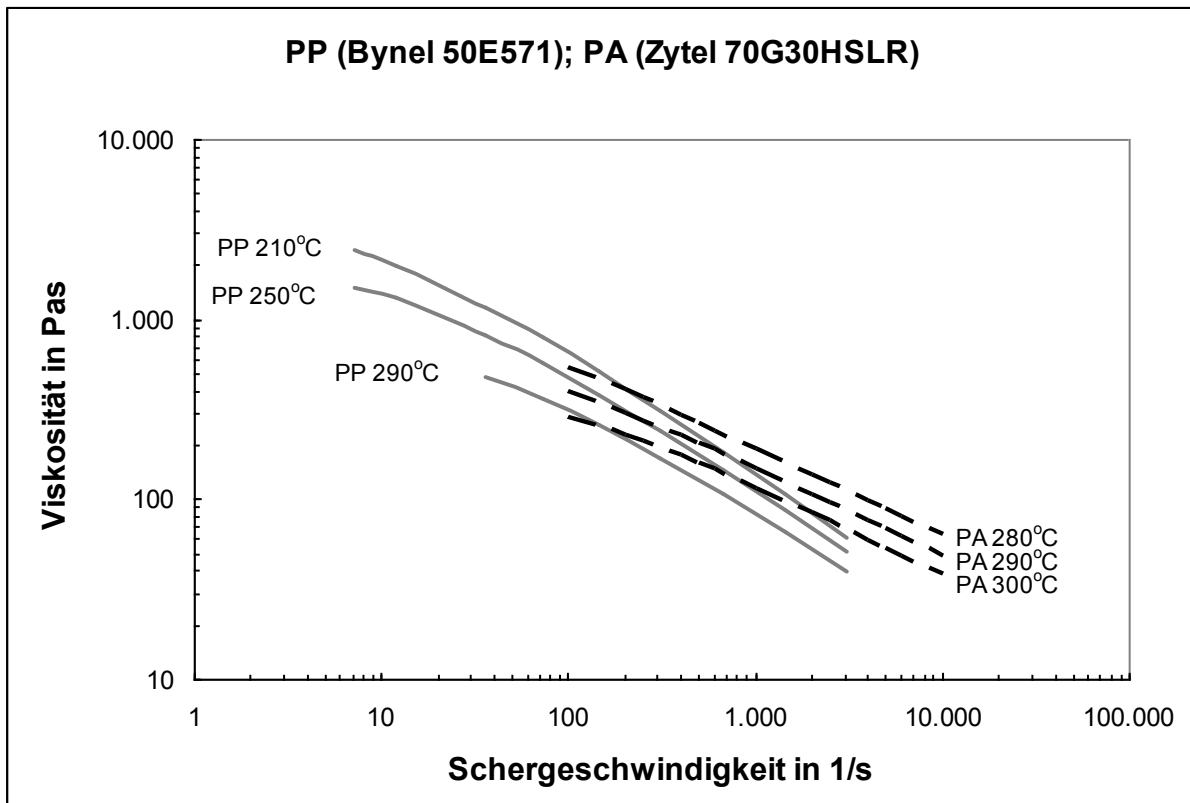


Abbildung 6: Viskositätskurven der verwendeten Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen. [15]

4.2 Beschreibung der Versuchsanlage

4.2.1 Spritzgießmaschine

Für die Spritzgießversuche wurde eine hydraulische Zweikomponenten-Spritzgießmaschine der Firma Engel Austria GmbH, Schwertberg, vom Typ Victory 1050H/500W/150 Combi mit 150 Tonnen Schließkraft eingesetzt. Die Maschine ist mit zwei Plastifizieraggregaten ausgestattet, die über einen Mischkopf miteinander verbunden sind. Das horizontal angeordnete Hauptaggregat für die Hautkomponente ist mit einer 50 mm Schnecke der Type S8 ausgestattet. Die Plastifiziereinheit für die Kernkomponente ist als Huckepackaggregat ausgeführt und mit einer 40 mm S8 Schnecke ausgerüstet. Das Aggregat für die Wasserinjektion ist in die Maschine integriert. Es kann wie ein zusätzliches Spritzaggregat über die Maschinensteuerung bedient werden.

4.2.2 Anlage für die Wasserinjektion

Die Anlage für die Wasserinjektion ist in die Maschine auf der Schließseite integriert und kann über Rollen bzw. Schienen aus der Maschine herausgefahren werden. Gebaut wurde sie von Maximator GmbH, Zorge, Deutschland. Die Type ist WID/300/1/So. Diese Wasserinnendruckeinheit ermöglicht eine volumenstromgesteuerte Wasserinjektion. In Abbildung 7 ist die verwendete Spritzgießmaschine mit integrierter Wasserinjektionseinheit zu sehen. Abbildung 8 zeigt das Hydraulikschema für die Wasserinjektion, mit dem auch die Funktionsweise verdeutlicht wird. Über eine Pumpe wird ca. 1l Wasser auf der Wasserseite des Druckübersetzers vorgelegt und über die Ölhydraulik komprimiert. Über den Druckübersetzer wird bei der Injektion des Wassers der Druck für die Hohlraumformung sowie Nachdruck im Bauteil aufgebracht. Nach Beendigung des Nachdrucks bleibt der Injektor noch geöffnet, um das überschüssige Wasser durch die Schwerkraft aus dem Hohlraum zu entfernen. Gleichzeitig wird das Wasser im Druckübersetzer wieder aufdosiert.

Mit dieser Anlage können Volumenströme von 10 bis 660 cm³/s und Drücke von 300 bar realisiert werden. Die Regelung des Volumenstroms erfolgt über den Wegaufnehmer am Kolben für die Druckübersetzung. Der Wasserdruck wird über einen wasserseitigen Drucksensor geregelt. Gesteuert wird die Anlage über die Maschinensteuerung und ähnelt in der Bedienung dem konventionellem Spritzguss. Sämtliche Parameter der Wasserinjektion können zusammen mit den Maschinenparametern gespeichert werden. Überdies ist eine grafische Überwachung der Istwerte möglich.



Abbildung 7: Spritzgießmaschine mit integriertem Aggregat für die Wasserinjektion

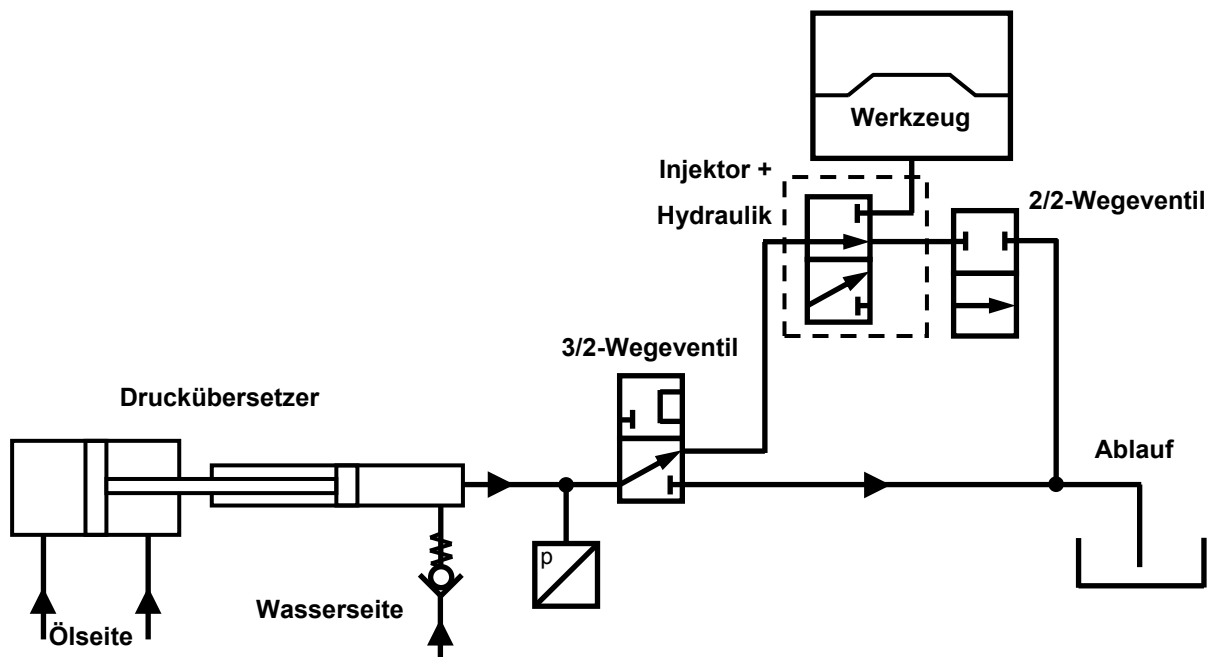


Abbildung 8: Hydraulikschema des Wasserinjektionsaggregates

4.2.3 Spritzgießwerkzeug und Injektortechnik

In Abbildung 9 ist die Schließseite des verwendeten Spritzgießwerkzeugs dargestellt. Das Werkzeug wurde von Fa. Engel, Schwertberg, Österreich in Zusammenarbeit mit Contitech Phönix, Hamburg, Deutschland konstruiert. Integriert in das Werkzeug sind die schlangenförmig angeordneten Nebenkavitäten, die durch Sperrschieber über die Kernzugsteuerung der Maschine verschlossen werden können. Insgesamt sind in dem Werkzeug vier Kernzüge auf der Injektionsseite vorgesehen. Zwei befinden sich im Fließweg der Hauptleitung und zwei in der Abzweigung. Diese sind notwendig um eine Vollenkung der Kavität mit zuerst Haut-, danach Kernmaterial und schlussendlich mit Wasser zu ermöglichen. Dabei werden jeweils zwei Kernzüge nach jeder Injektionsphase sequentiell geöffnet, um Hohlraum für die folgende Komponente freizugeben. Je nach Prozessbedingungen kann es zu unterschiedlichen ausgedrückten Schmelzemengen kommen. Um einen Durchbruch der Fluidblase zu verhindern, können über mehrere Einsätze in den Nebenkavitäten Fließsperrern angebracht werden, um das Volumen der Nebenkavitäten zu verändern. Vor den beiden Nebenkavitäten ist jeweils noch eine Schraube eingepasst, mit der der Fließwiderstand verändert werden kann. Anspritzseitig ist auch ein Einsatz für Durchmesseränderungen im Fließkanal vorgesehen. Für die Versuche wurde ein Einsatz mit 11 anstatt der 22 mm Durchmesser verwendet. Die Kavität, die symmetrisch in das Werkzeug eingelassen ist, hat an den dicksten Stellen einen Durchmesser von 22 mm.

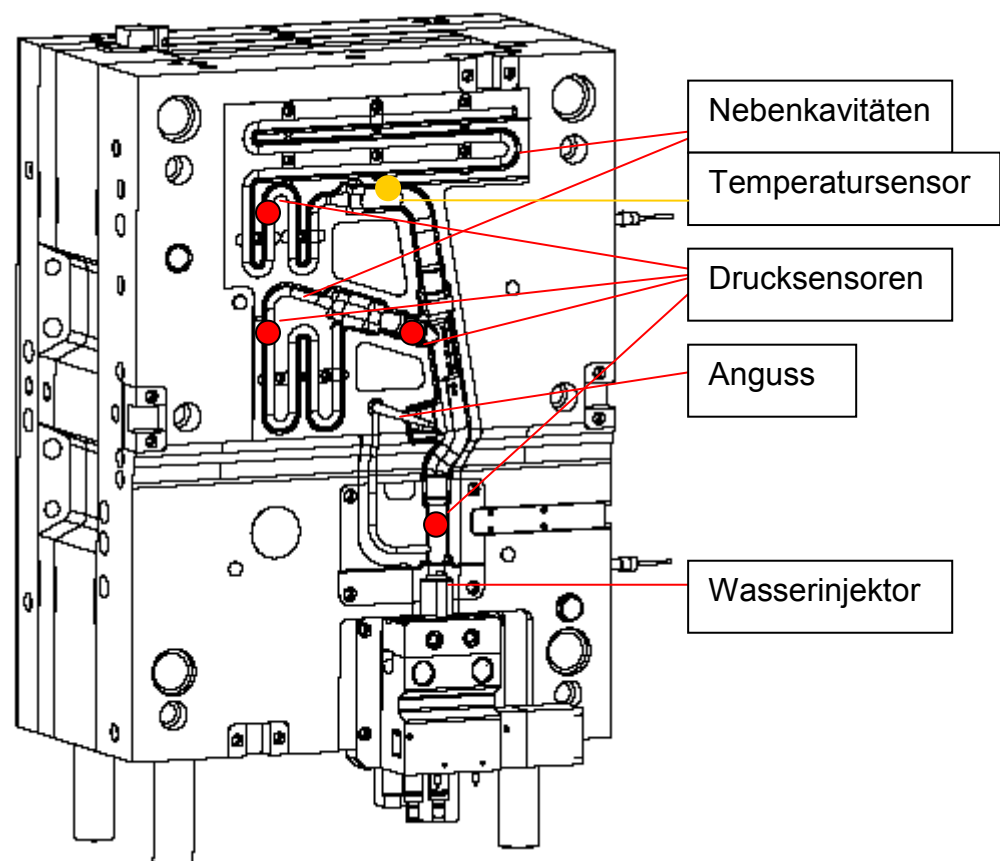


Abbildung 9: Schließseite des Spritzgießwerkzeuges mit Wasserinjektor

Auf der Schließseite des Werkzeuges ist auch der Injektor für die Wassereinspritzung angebracht. Beim Zufahren des Werkzeuges wird der Injektor über Schieber in die Kavität eingeschoben. Wichtig ist, dass der Injektorkopf vollständig mit Schmelze umspült werden kann und somit abgedichtet ist, um ein Austreten des Wassers zu verhindern. Beim Einspritzvorgang bildet sich ein fester Mantel aus Hautmaterial um den Injektorkopf. Dieser muss bei der Wasserinjektion durchbrochen werden. In diesem Fall ist ein ziehender Injektor eingebaut. Das bedeutet die Verschlussnadel wird in den Injektor gezogen, um den Wasserstrom freizugeben. Eine andere Möglichkeit bestünde darin, die Nadel in das Formteil einzustecken. Durch den anliegenden Vorspanndruck wird ein Eindringen der Schmelze in den Injektor verhindert. Der Vorspanndruck liegt an der Verschlussnadel an, die gegen diesen Druck geöffnet werden muss. Sobald die Nadel geöffnet ist, wird die eingefrorene Kappe aus Hautschicht aufgesprengt und der Weg für das Wasser zur Hohlraumbildung ist freigegeben. Die Betätigung des Injektors erfolgt über einen schließseitig vorgesehenen Kernzug direkt über die Maschinensteuerung.

Zusätzlich sind in dem Werkzeug noch vier Drucksensoren und ein Temperatursensor angebracht. Jeweils ein Drucksensor ist angussnahe bzw.

4. Experimentelles

angussfern und in den zwei Nebenkavitäten angebracht. Der Temperatursensor befindet sich in einem angussfernen Bereich. Die Druck- und Temperaturwerte können auf dem Bedienelement der Maschine grafisch dargestellt und aufgezeichnet werden. Nähere Details werden in Kapitel 5 beschrieben.

4.3 Auswertemethoden

4.3.1 Ermittlung der Restwanddicke

Die Ermittlung der Restwanddicke (RWD) war eine zentrale Aufgabe dieser Arbeit. *Abbildung 10* zeigt das komplette Formteil mit Nebenkavitäten. Eingezeichnet sind überdies der Wasserinjektionspunkt und die fünf Querschnittpositionen, die für eine Auswertung ausgesägt werden. Anhand dieser Positionen kann man eine Ausbildung der RWD über den Fließweg beurteilen. Nachdem die Querschnitte ausgesägt waren, wurden sie mit einer Auflösung von 300 dpi gescannt. Die anschließende Messung der jeweiligen Schichtdicken erfolgt mittels Adobe Photoshop. Dabei wurden bei allen fünf Schnitten jeweils für Haut- und Kernschicht vier Bereiche gemessen und jeweils arithmetisch gemittelt (*Abbildung 11*). Pro Versuchsreihe wurden nach einer Einfahrphase von mindestens 20 Zyklen 5 Probekörper entnommen, an denen die Messung der RWD durchgeführt wird. Es folgt eine Mittelung der Ergebnisse für den jeweiligen Schnitt über die 5 Probekörper. Die Grenze der Messgenauigkeit beträgt 0,1 mm.

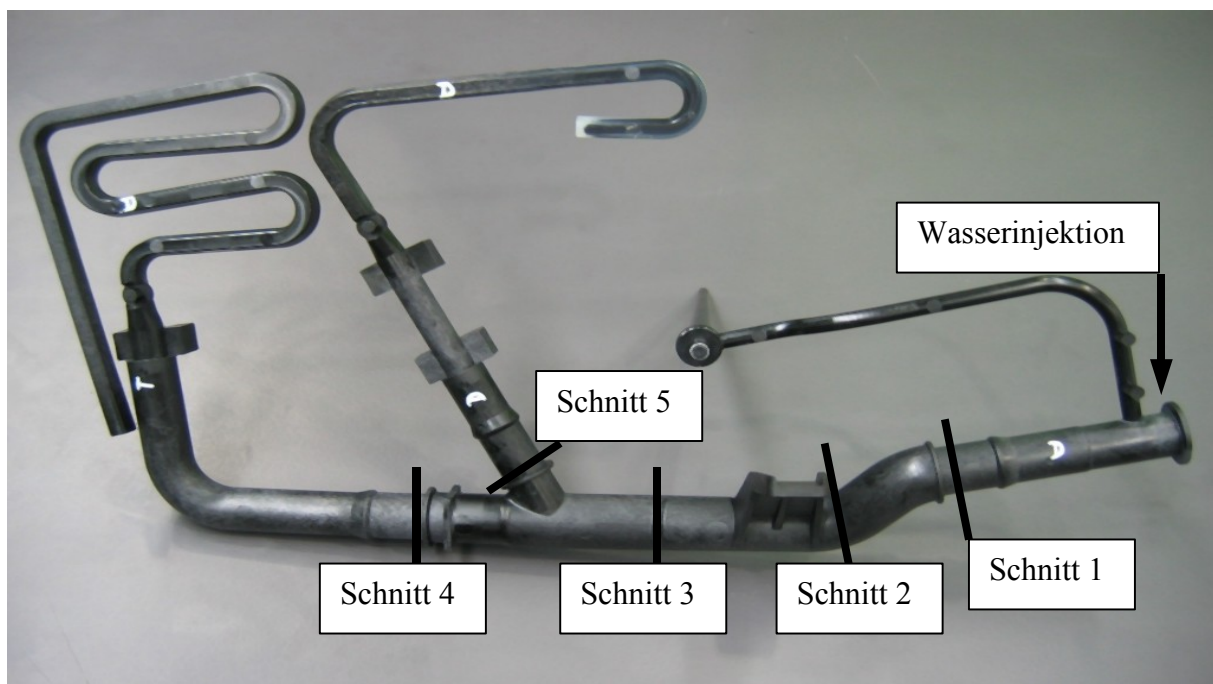


Abbildung 10: Fünf Bereiche, an denen die RWD ermittelt wird

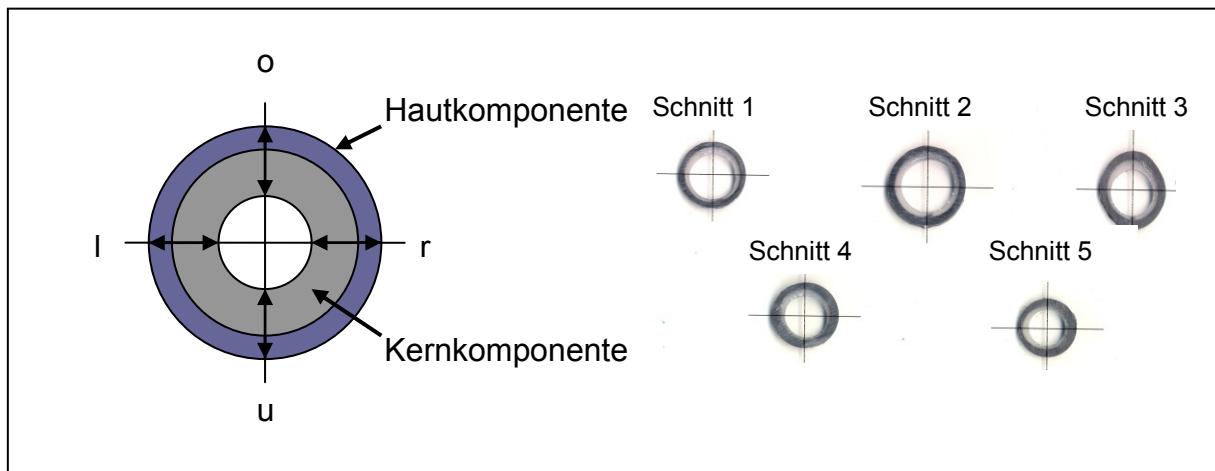


Abbildung 11: links: vier Bereiche an denen jeweils Haut und Kernwanddicke gemessen werden, rechts: fünf eingescannte Querschnitte

4.3.2 Ermittlung der Exzentrizität

Eine weitere Größe zur Beurteilung der Formteilqualität stellt die Exzentrizität dar. Damit kann eine Aussage über die Gleichmäßigkeit bzw. Symmetrie der Ausbreitung von einer Komponente in der anderen getroffen werden. So lassen sich die Ausbreitung der Kernkomponente in der Hautschicht sowie die Ausbreitung der Fluidblase in der Kernschicht analysieren. Die Exzentrizität lässt sich aus den für die RWD ermittelten Werten bestimmen.

Die Exzentrizität gibt an wie weit der Mittelpunkt der jeweiligen Komponente vom Mittelpunkt des Hohlraums der Kavität abweicht. Die Abweichung vom Mittelpunkt für die jeweilige Komponente in horizontaler- bzw. vertikaler Richtung lässt sich aus der halben Differenz der jeweiligen Wanddicken berechnen (Abbildung 12). Mit dem Satz von Pythagoras ergibt sich dann die Exzentrizität (Gleichung 3).

$$E = \frac{\sqrt{(RWD_l - RWD_r)^2 + (RWD_o - RWD_u)^2}}{2} \quad (3)$$

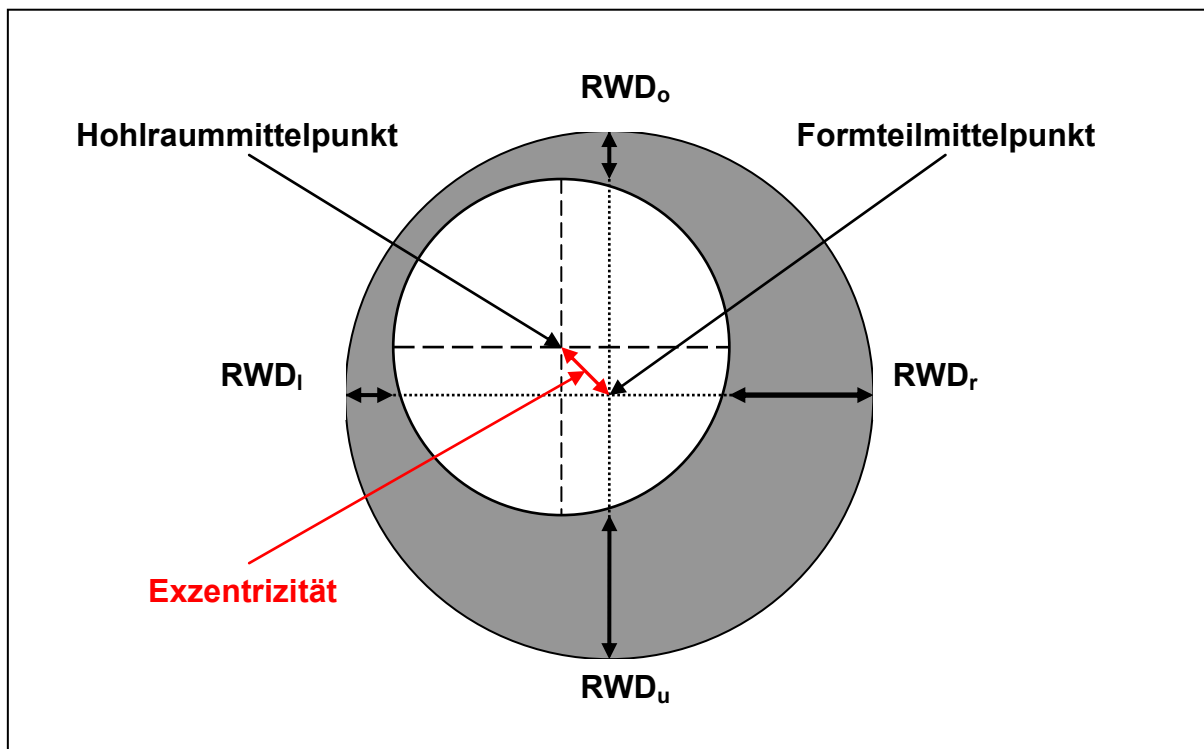


Abbildung 12: Bestimmung der Exzentrizität

4.3.3 Ermittlung der Hohlraumqualität

Um eine problemlose und möglichst druckverlustarme Strömung zu gewährleisten sollte der Hohlraum so glatt wie möglich und fehlerfrei sein. Daher ist eine Bewertung der Hohlraumqualität wichtig. Bei der Bewertung des Hohlraumes wurden sechs Arten von Fehlern unterschieden und eine Bewertungsskala mit drei Stufen eingeführt. 1 bedeutet gute Qualität bzw. der Fehler ist nicht aufgetreten. 2 bedeutet mittlere Qualität, also ein Auftreten des Fehlers aber mit schwacher Ausprägung. 3 bezeichnet einen Fehler im Hohlraum mit starker Ausprägung (siehe Abbildung 13). Für die Bewertung wurden pro Versuchsreihe 5 Probekörper der Länge nach aufgesägt und optisch beurteilt. Die Ergebnisse der Beurteilung werden für jeden Fehler gemittelt und in ein Spinnennetzdiagramm übertragen. In Abbildung 13 sind für die sechs Fehler und für jede Bewertungsstufe beispielhaft typische Fehler abgebildet.

4. Experimentelles


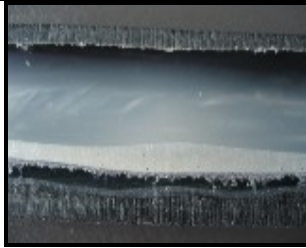

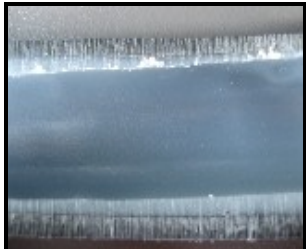









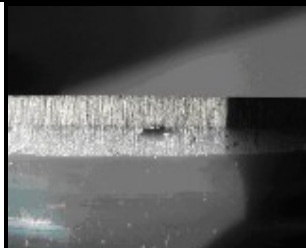


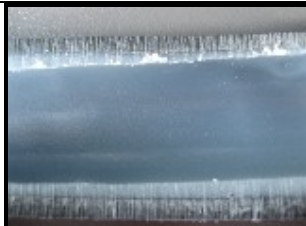

Bewertung	1	2	3
Doppelkanal			
Blasen			
Wulste			
Tropfenförmige Erhebungen			
Lunker			
Rauheit			

Abbildung 13: Bewertung der Hohlraumoberfläche

4.3.4 Messung des Werkzeuginnendruckes

In dem Versuchswerkzeug sind vier Forminnendruck - Sensoren der Firma Priamus, Schaffhausen, Schweiz angebracht. Die piezoelektrischen Drucksensoren sind direkt in die Kavität eingebracht. Die Einbaupositionen sind in Abbildung 14 zu sehen (P1 bis P4). Angeschlossen sind die Sensoren an einen Ladungsverstärker eDAQ Typ 8102 der Firma Priamus, der die Signale verarbeitet und an die Steuerung weiterleitet. Mit den so aufgenommenen Kurven kann der Formteilbildungsprozess beschrieben und beurteilt werden.

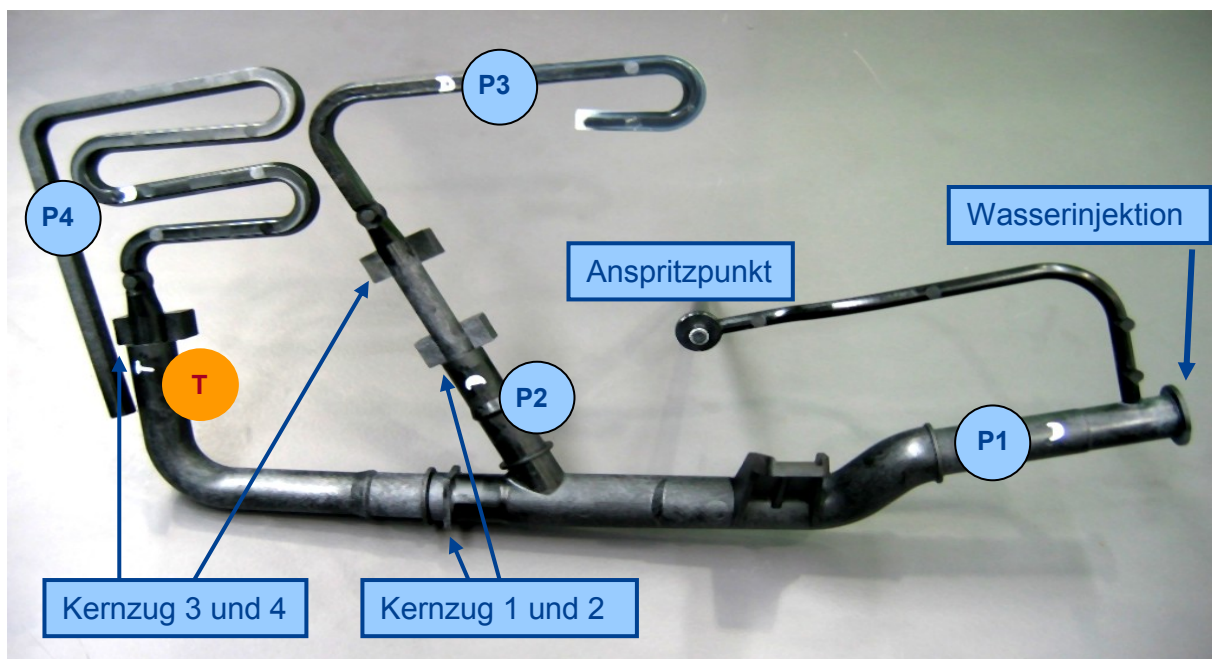


Abbildung 14: Drucksensor- Temperatursensor- und Kernzugpositionen im Werkzeug

4.4 Versuchsplanungs- und Optimierungssoftware ASSISTANT

Für die statistische Versuchsplanung mit anschließender Optimierung wurde die von der Firma Aachen Institut GmbH, Aachen, entwickelte Software ASSISTANT verwendet. Das Programm kombiniert verschiedene statistische Versuchsplanungsinstrumente mit der Möglichkeit zur Prozessmodellerstellung und anschließender Optimierung. In dieser Arbeit wurde der D-Optimale Plan gewählt, da er mit den wenigsten Versuchen auskommt und es trotzdem möglich ist, Effekte und Wechselwirkungen der Parameter auf die Zielgrößen zu erkennen. Mit den ausgewerteten Ergebnissen des Versuchsplans liefert die Software die Möglichkeit ein Prozessmodell zu erstellen. Bei diesem Prozessmodell handelt es sich um ein mathematisches Modell, das die Abhängigkeiten zwischen Eigenschaften bzw.

4. Experimentelles

Zielgrößen und den Parametern beschreibt, eine sogenannte Regressionsrechnung. Dieses Modell wird anschließend für die Optimierung der Prozessparameter verwendet. Hierfür stehen verschiedene Optimierungsalgorithmen wie Nelder-Mead-Algorithmus, Newtonalgorithmus oder das Simplexverfahren zur Verfügung. Für die Optimierung in dieser Arbeit wurde der Nelder-Mead-Algorithmus angewendet. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer Prozessanalyse sowie einer grafischen Auswertung der Ergebnisse. In der Prozessanalyse können Zusammenhänge von Parametern und Zielgrößen erkannt und simuliert werden. Darüber hinaus kann man eine statistische Analyse durchführen.

5 Spritzgießversuche

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit vorgenommenen Versuche und deren Ergebnisse erläutert. Zunächst wird auf die Vorversuche eingegangen, die der Findung der einflussreichsten Prozessparameter dienen. Die gefundenen Parameter wurden anschließend in einem statistischen Versuchsplan, der mit Hilfe von ASSISTANT erstellt wurde, näher betrachtet. Nach der Auswertung der Hauptversuche wurden die Parameter mit ASSISTANT in Hinblick auf die Zielgrößen optimiert. Danach wurden die Ergebnisse der Optimierung experimentell überprüft.

5.1 Vorversuche

5.1.1 Referenzversuch

Um die Auswirkungen der Variationen der unterschiedlichen prozessrelevanten Größen untereinander vergleichen zu können, musste zunächst ein Referenzversuch durchgeführt werden. Eine funktionierende Einstellung sämtlicher Größen wurde schon im Vorfeld von den Anwendungstechnikern der Firma Engel ermittelt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die ausgewerteten Ergebnisse dieser Einstellungen dienten als Referenz. Ein Ausdruck der genauen Maschineneinstellungen befindet sich im Anhang (Kapitel 9.1, S.74 ff).

Tabelle 1: Einstellungen der wichtigsten Parameter beim Referenzversuch

Einstellparameter	Einheit	Standardeinstellung
Verzögerungszeit	s	0
Einspritzmenge Haut	cm ³	215
Einspritzmenge Kern	cm ³	105
Massezylindertemperatur Haut	°C	285
Massezylindertemperatur Kern	°C	280
Einspritzvolumenstrom Kern	cm ³ /s	60
Einspritzvolumenstrom Wasser	cm ³ /s	30

5. Spritzgießversuche

Einstellparameter	Einheit	Standardeinstellung
Querschnittsveränderung anspritzseitig	mm	11
Fließwiderstände NK (ganz geöffnet)	Mm	8,8
Nachdruckhöhe Kernmaterial	Bar	700
Nachdruckhöhe Wasser	bar	80

In Abbildung 15 sind die gemittelten RWD aller fünf Schnitte der Haut- und Kernschicht, die aus dem Referenzversuch ermittelt wurden, dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg der Hautwanddicke über den Fließweg von Schnitt 1 bis 4.

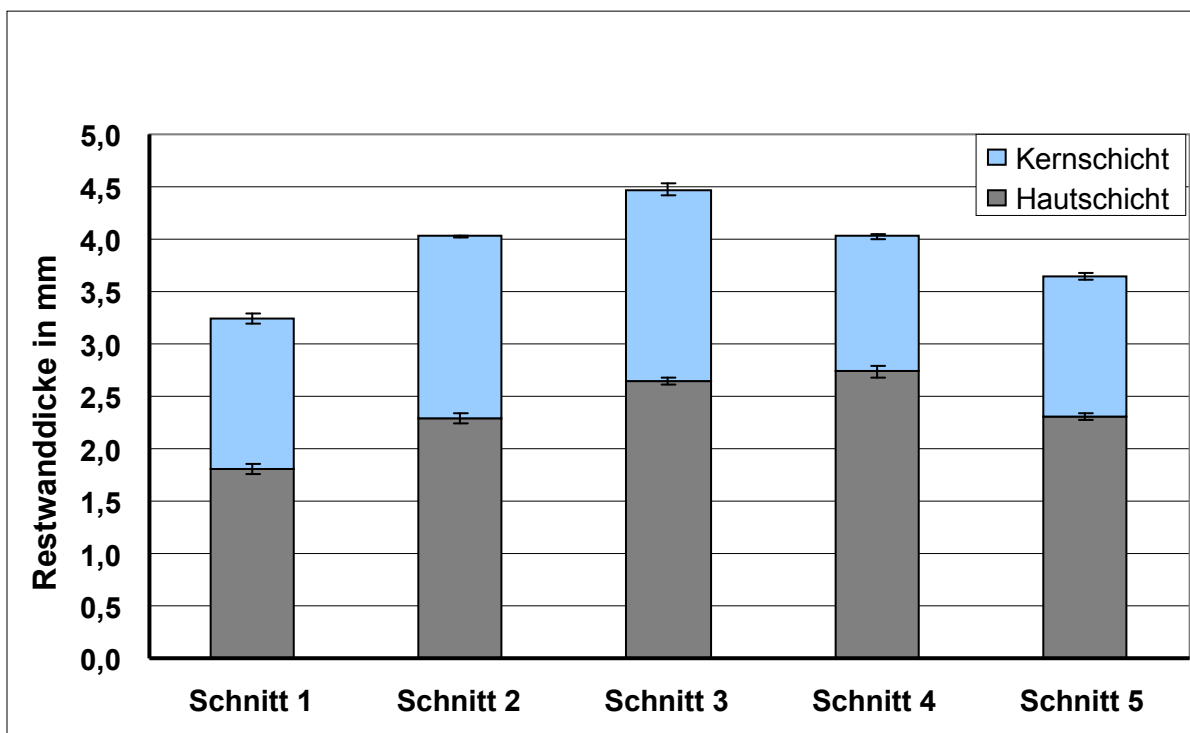


Abbildung 15: Gemessene RWD der Haut- und Kernschicht des Referenzversuches

Schnitt 5 repräsentiert die Abzweigung des Rohres, die mit 19,9 mm Durchmesser kleiner ist als das Hauptrohr mit einem Durchmesser von 23 mm. Für die Zunahme der RWD der Haut über den Fließweg ist die Kernlaufzeit der Grund. Kernlaufzeit bedeutet, wie lange die Kernkomponente während des Einspritzens Zeit hat, im jeweiligen Rohrabschnitt die Hautkomponente in Abhängigkeit vom Scherviskositätsverhältnis durch Schleppströmung auszudünnen. Am Rohranfang ist die Kernlaufzeit am längsten und somit die Ausdünnung am größten. Im Bereich des Angusses fließt während des Einspritzvorganges das gesamte Kernmaterial vorbei.

5. Spritzgießversuche

In diesem Bereich ergeben sich somit die größten Kernlaufzeiten. Auch bei der anschließenden Fluidinjektion nimmt das verdrängte Kernmaterialvolumen durch Umlagerungen hin zur Werkzeugwand mit dem Fließweg ab. Die Folge ist eine mit wachsendem Fließweg geringer werdende Kernlaufzeit. Somit verringert sich die Ausdünnung der Hautschicht durch Schleppströmung mit zunehmendem Fließweg.

Bildet man den Durchschnitt der RWD über alle fünf Schnitte, ergibt sich eine Hautwanddicke von 2,3 mm und eine Kernwanddicke von 1,5 mm. Laut Vorgabe sollte eine Gesamtwanddicke von 2,2 mm erreicht werden wovon ca. 1 mm auf die Kernwanddicke entfallen. Dieser Wert wird mit 3,8 mm Gesamtwanddicke des Referenzversuches deutlich überschritten.

Die Exzentrizität sollte im Idealfall null betragen. Dies wird in der Praxis bei diesem Prozess jedoch nicht erreicht werden. In Abbildung 16 sind die ermittelten Exzentrizitäten für die Haut- und Kernschicht des Referenzversuches für die jeweiligen Querschnitte dargestellt. Ziel ist es keine Exzentrizität zu haben. Die durchschnittliche Exzentrizität über alle fünf Schnitte ergibt sich für die Hautschicht mit 0,3 mm und für die Kernschicht mit 0,7 mm. Bei allen Versuchen ist die Exzentrizität der Kernschicht stärker ausgeprägt als die der Hautschicht.

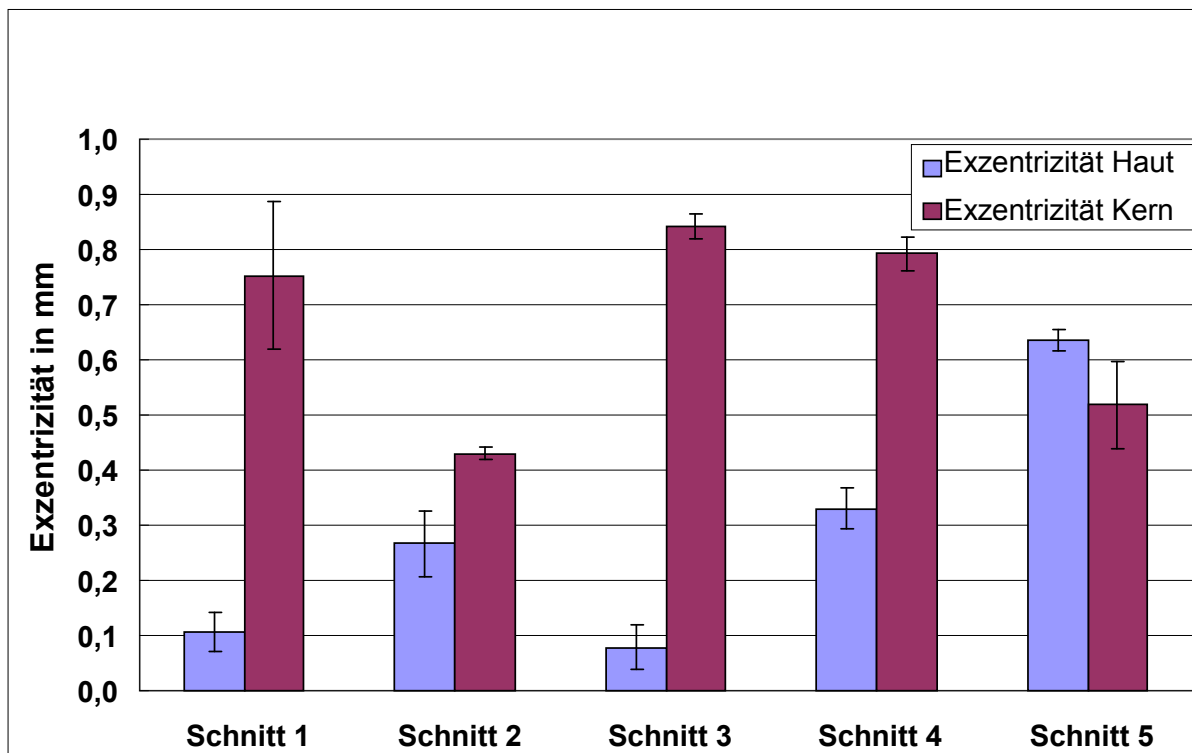


Abbildung 16: Exzentrizität der Haut- und Kernschicht des Referenzversuches

Ebenso wurde für den Referenzversuch die Hohlraumqualität ermittelt. Das Ergebnis ist in einem Spinnenetzdiagramm in Abbildung 17 dargestellt. Die

5. Spritzgießversuche

Bewertungsmethode wurde in Kapitel 4.3.3 (s. 26) näher beschrieben. Beim Referenzversuch traten bei den fünf betrachteten Versuchen vermehrt Wulste und Rauheit in stärkerer Ausprägung auf. Ebenso waren bläschenförmige Erhebungen bei manchen betrachteten Rohren sichtbar. Die Wulste traten vor allem im Bereich des Kernzug 1 (siehe Abbildung 14) auf, da dieser in das Rohr ragt und erst wenn die Kernkomponente eingespritzt wird geöffnet wird. So kühlt die Hautkomponente in diesem Bereich verstärkt aus und kann so zu einem Wulst führen.

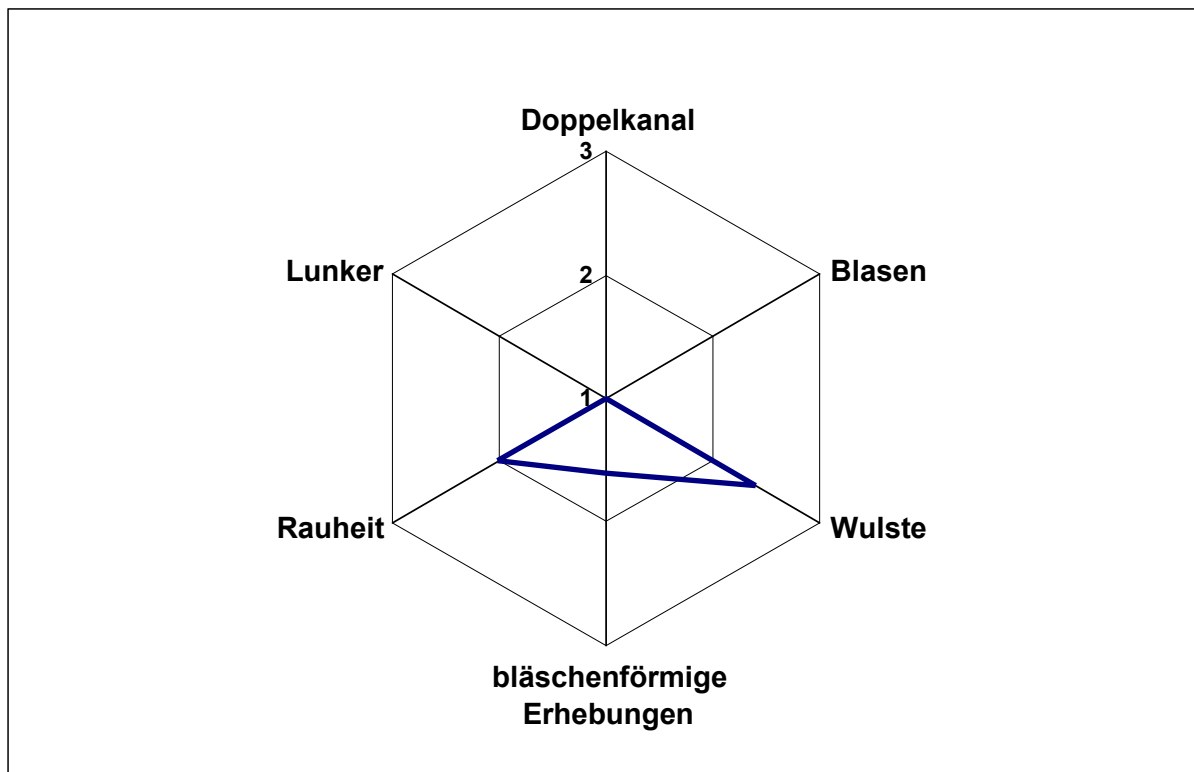


Abbildung 17: Bewertete Hohlraumqualität des Referenzversuches

5.1.2 Vorversuche

Im Folgenden wird die Durchführung und Auswertung der Vorversuche zu den zuvor bestimmten prozessrelevanten Größen dargestellt. Es wurde von einer bereits funktionierenden Einstellung ausgegangen und jede zu untersuchende Größe einzeln variiert. Die Ergebnisse sollen Aufschluss darüber geben ob und in welchem Ausmaß die unterschiedlichen Parameter auf die Ausbildung der Restwanddicken, deren Verteilung und die Hohlraumqualität wirken.

Im Rahmen der Vorversuche wurden insgesamt 15 Parameter betrachtet, wie in Abbildung 5 dargestellt. Die Präsentation aller Ergebnisse würde zu umfangreich sein und außerdem nicht zweckdienlich, da nur einige der Parameter einen mehr oder weniger signifikanten Einfluss auf die Zielgrößen haben. Aus den Ergebnissen

5. Spritzgießversuche

der Vorversuche wurden folgende sieben Parameter mit dem größten Einflüssen auf die RWD, die Exzentrizität und die Hohlraumqualität ermittelt:

- Hautmassezylindertemperatur (somit Hautmassetemperatur)
- Kernmassezylindertemperatur (somit Kernmassetemperatur)
- Werkzeugvorlaufzeit (somit Werkzeugtemperatur)
- Wassereinspritzverzögerungszeit
- Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kerneinspritzung
- Wasservolumenstrom
- Kernmassenvolumenstrom

Diese Versuche und deren Ergebnisse werden im Folgenden genauer beschrieben und im Vergleich zum Referenzversuch bzw. Standardversuch dargestellt.

5.1.2.1 Verzögerungszeit

Bei der Verzögerungszeit handelt es sich um jene Zeit, die zwischen Ende der Einspritzphase und Beginn der Wasserinjektion verstreicht. Die Verzögerungszeit zwischen der Kernmaterialeinspritzung und der Wasserinjektion wurde auf 4 Sekunden eingestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 bis 20 dargestellt.

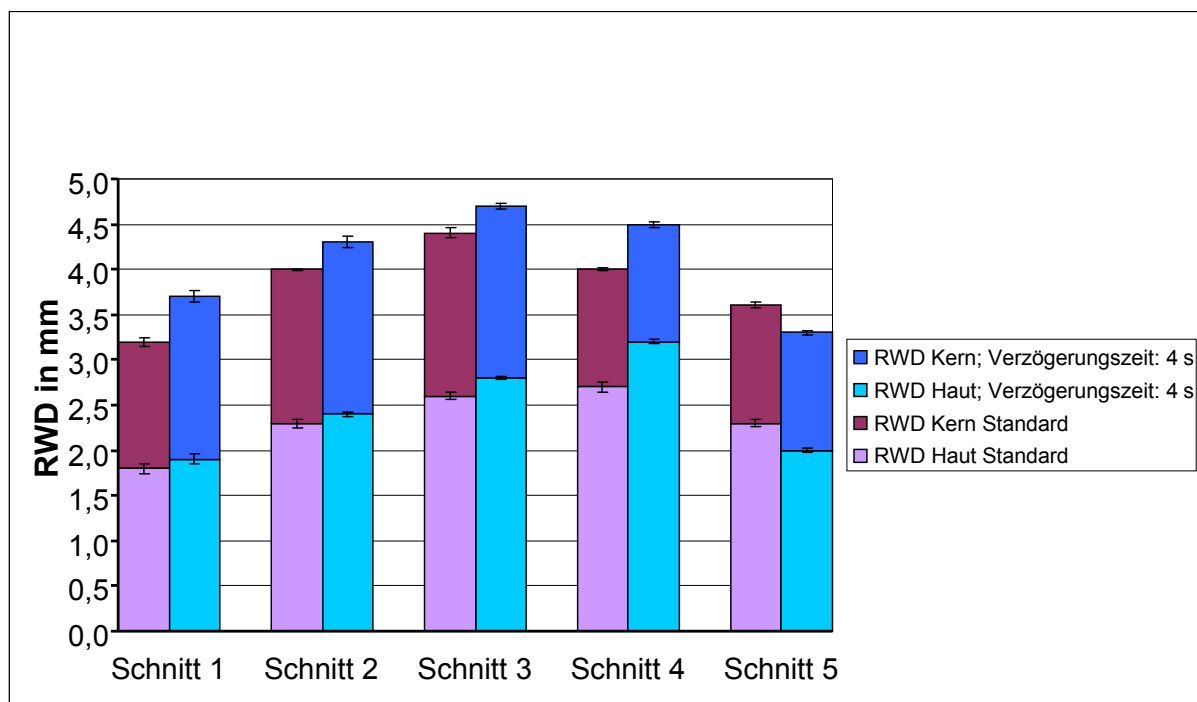


Abbildung 18: RWD der Haut- und Kernschicht bei 4 s Verzögerungszeit im Vergleich zum Standardversuch

5. Spritzgießversuche

Im Vergleich zum Referenzversuch (Standardeinstellung) erhöhte sich die durchschnittliche Restwanddicke (RWD) der Haut leicht von 2,3 auf 2,4 mm. Dies kann auf die längere Abkühldauer des Hautmaterials und somit eine größere eingefrorene Wanddicke zurückgeführt werden. Auffällig ist, dass die RWD der Haut bei Schnitt 4 (Rohrende) den größten Unterschied aufweist und bei Schnitt 5 (Abzweigung) eine kleinere RWD entsteht.

Generell ist zu bemerken, dass die RWD der Hautschicht von der Anspritzseite ausgehend über den Fließweg hin ansteigt, während die Kernschicht tendenziell abnimmt. Der Grund hierfür liegt in der Kernlaufzeit in den einzelnen Abschnitten des Rohres. Außerdem wird über die heiße nachströmende Schmelze und durch Dissipation zusätzlich Wärmeenergie eingebracht, die die Abkühlung des Hautmaterials verlangsamt und somit zu einem erhöhten Weitertragen beiträgt.

Die RWD des Kerns steigt anspritzseitig im Vergleich zum Standardversuch an, gleicht sich aber gegen Ende des Fließweges wieder an. Dies deutet darauf hin, dass die durch die Verzögerungszeit bewirkte Vorkühlzeit auch einen Einfluss auf die RWD der Kernschicht hat.

In Bezug auf die Exzentrizität der Hautschicht ergibt sich mit der Verzögerungszeit keine signifikante Änderung im Vergleich zu den Standardeinstellungen (siehe Abbildung 19).

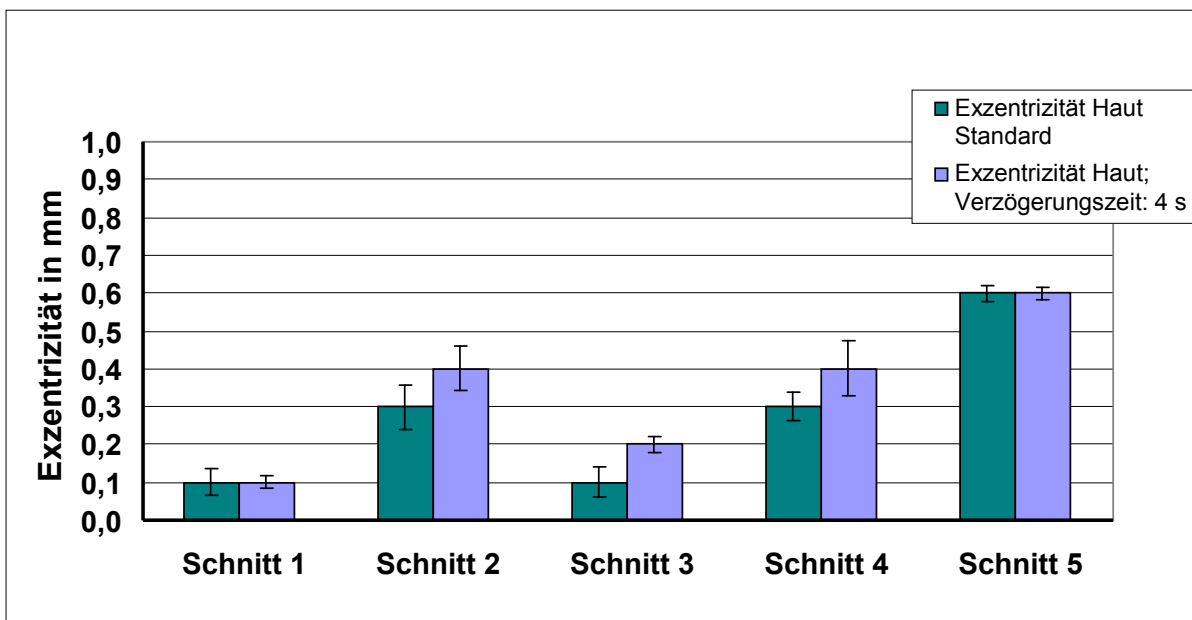


Abbildung 19: Exzentrizität der Hautschicht bei 4 s Verzögerungszeit im Vergleich zum Standardversuch

5. Spritzgießversuche

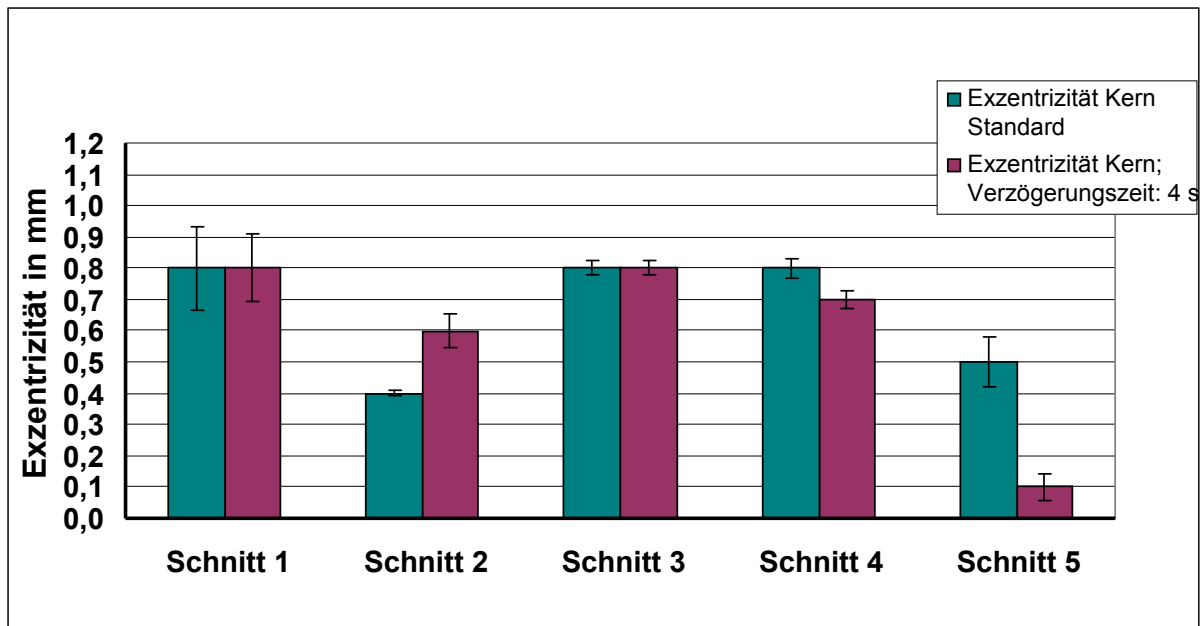


Abbildung 20: Exzentrizität der Kernschicht bei 4 s Verzögerungszeit im Vergleich zum Standardversuch

Bei der Kernschicht hingegen ergibt sich bei Schnitt 2 (nach der Umlenkung) eine höhere Exzentrizität und bei Schnitt 5 (Abzweigung im Rohr) eine wesentlich geringere (Abbildung 20). Die niedrigere Exzentrizität bei Schnitt 5 lässt sich mit einer dickeren eingefrorenen Hautschicht erklären, die eine bessere Führung für die Kernkomponente bietet. Allerdings sollte demnach auch die Exzentrizität nach der Umlenkung geringer werden. Dieses Ergebnis konnte in dieser Arbeit nicht geklärt werden. Prinzipiell sollte die Exzentrizität mit zunehmender Verzögerungszeit abnehmen, da die Schmelze eine größere eingefrorene Randschicht bildet und diese eine stabilisierende Wirkung auf die Fluidblasenbildung haben sollte [1]. Je kleiner der Durchmesser des Rohres, desto größer ist die Auswirkung der Verzögerungszeit auf die Exzentrizität.

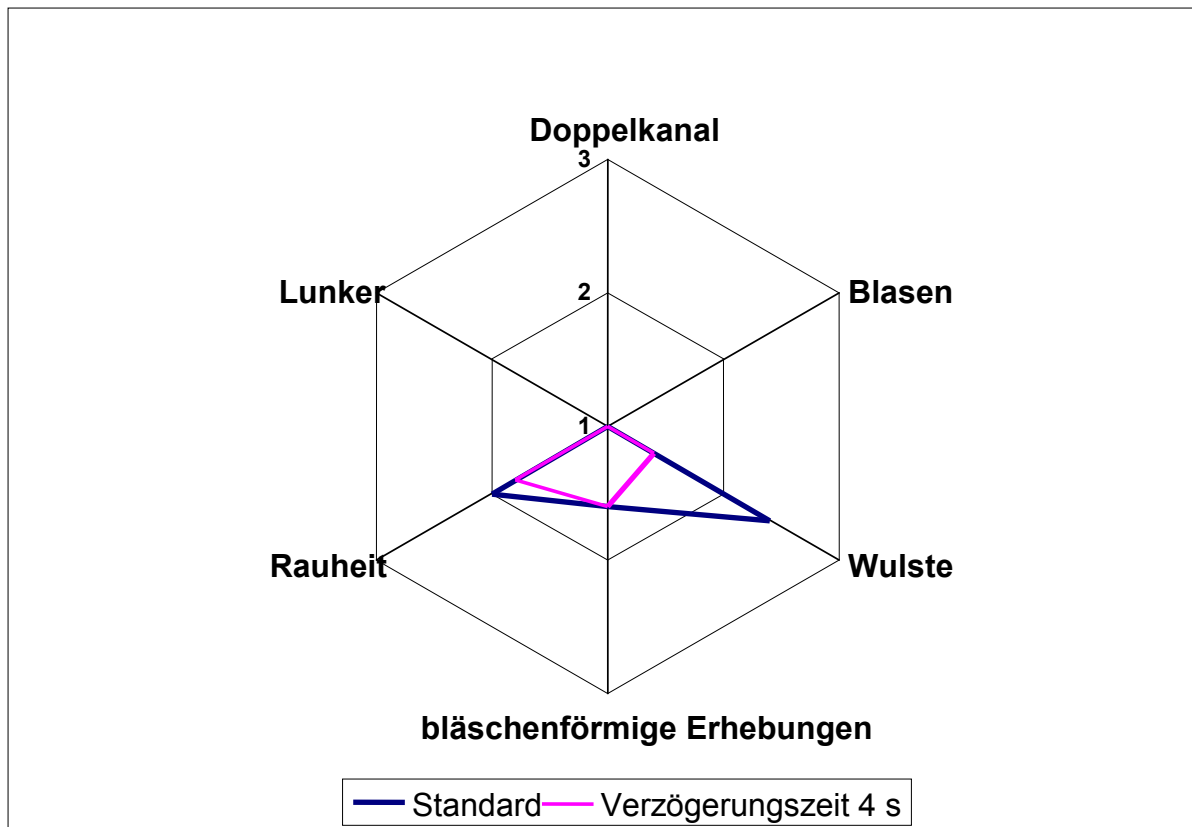


Abbildung 21: Hohlraumbewertung für 4 s Verzögerungszeit im Vergleich zum Standardversuch

Die Hohlraumqualität verbesserte sich leicht gegenüber dem Standardversuch. Speziell die Wulstbildung fiel geringer aus (Abbildung 20).

5.1.2.2 Kernvolumenstrom

Ein weiterer identifizierter signifikanter Parameter ist der Kernvolumenstrom. Bei diesem Versuch wurden die Kernvolumenströme variiert. Zuerst wurde der Kernvolumenstrom von 60 auf 100 cm³/s erhöht. Danach wurde mit einer im Vergleich zu dem Referenzversuch niedrigerem Volumenstrom von 20 cm³/s eingespritzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 bis 24 dargestellt.

Ein erhöhter Kernvolumenstrom von 100 cm³/s hat bei diesen Untersuchungen wenig Einfluss auf die RWD. Laut [1] sollte ein höherer Kernvolumenstrom zu einem stärkeren Anstieg der Hautwanddicke über den Fließweg führen, da mehr Material zum Fließwegende transportiert werden sollte. Dies ist an den vorliegenden Untersuchungsergebnissen zwar tendenziell zu erkennen, allerdings ist der Effekt bei kleinem Kernvolumenstrom stärker ausgeprägt. Die durchschnittliche RWD der Haut sowie des Kerns gleicht bei hohem Kernvolumenstrom annähernd dem Standardversuch. Bei niedriger Kerneinspritzgeschwindigkeit steigt sowohl die RWD

5. Spritzgießversuche

der Haut als auch des Kerns signifikant an. Die Dicke der Kernschicht steigt am Fließweganfang stark an und fällt gegen Ende desselben unter das Niveau des Standardversuchs ab (*Abbildung 22*). Eine Begründung für die dickere Hautschicht liefert das beim langsamen Einspritzen spitzere Fließfrontprofil des Kernmaterials, das dadurch mehr Hautmaterial zur Seite drängt und somit dickere Hautschichten erzeugt.

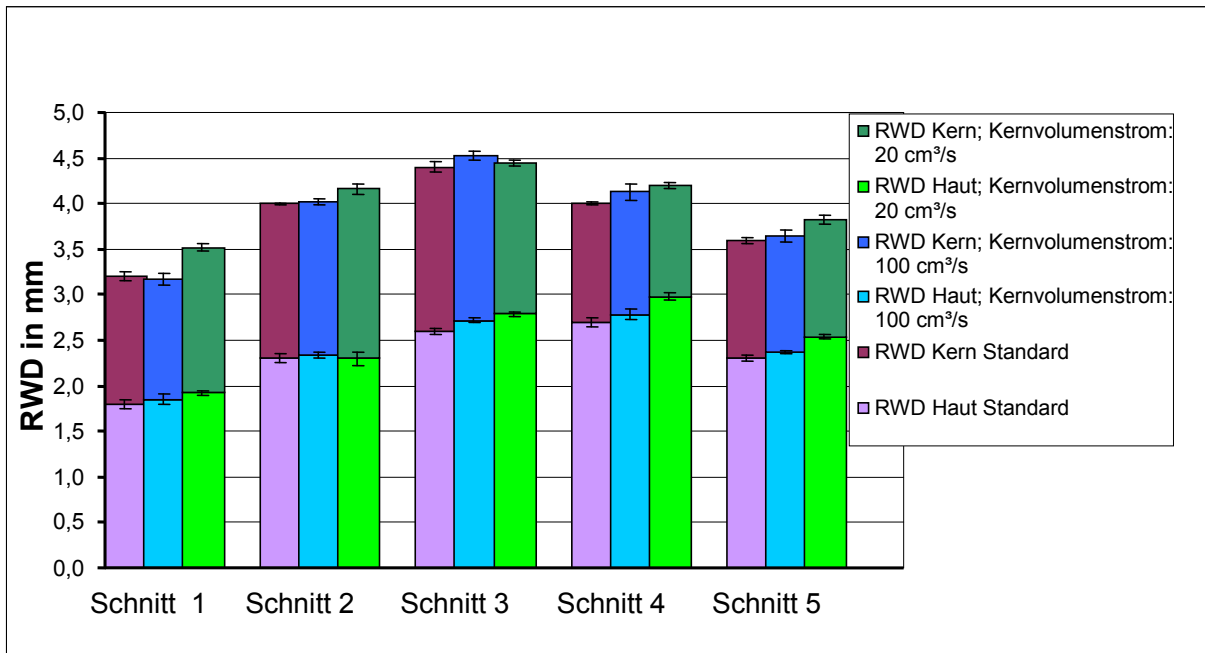


Abbildung 22: RWD der Haut- und Kernschicht bei unterschiedlichen Kernvolumenströmen im Vergleich zum Standardversuch

In Bezug auf die Exzentrizität stellt [1] fest, dass mit zunehmender Kerneinspritzgeschwindigkeit die Hohlräume Ausbildung ungleichmäßiger wird. Dieser Trend lässt sich an den gemessenen Exzentrizitäten nicht erkennen (*Abbildung 23* und *Abbildung 24*).

5. Spritzgießversuche

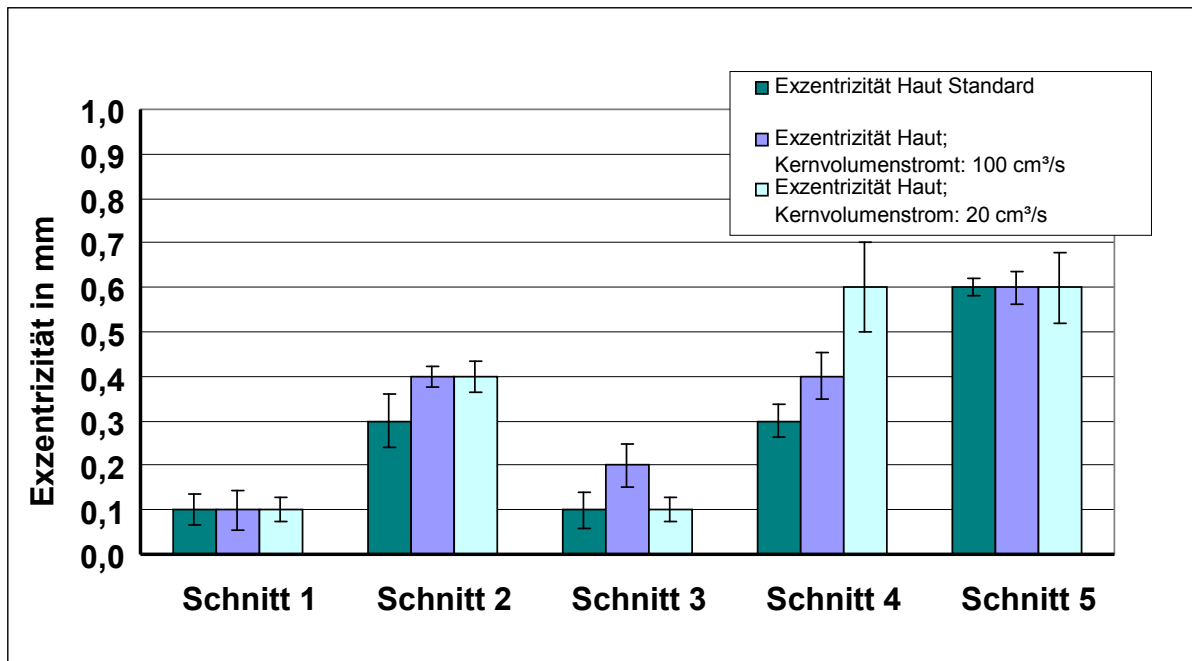


Abbildung 23: Exzentrizität der Hautschicht bei unterschiedlichen Kernvolumenströmen im Vergleich zum Standardversuch

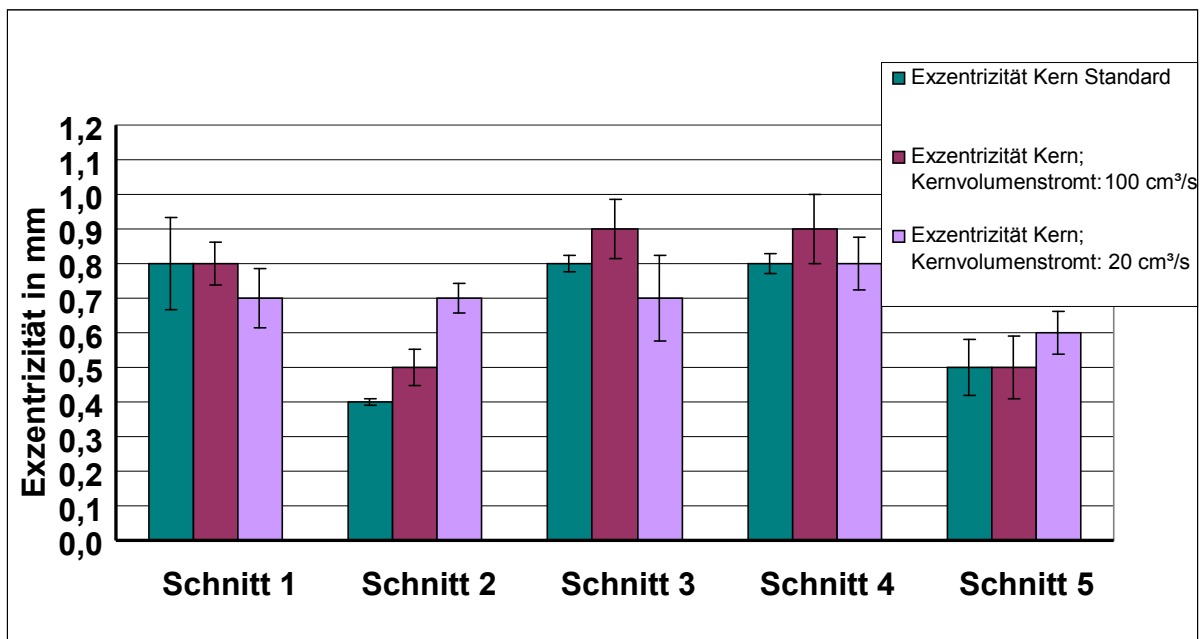


Abbildung 24: Exzentrizität der Kernschicht bei unterschiedlichen Kernvolumenströmen im Vergleich zum Standardversuch

Die Hohlraumqualität verbessert sich bei einer hohen Kerneinspritzgeschwindigkeit in Hinblick auf Wulstbildung und die Anzahl der bläschenförmigen Erhebungen. Die Oberflächenrauheit hingegen verändert sich ebenso wie bei kleinem Volumenstrom im Vergleich zum Standardversuch nicht (Abbildung 25). Bei 20 cm³ trat bei einem

5. Spritzgießversuche

Rohr eine Blase im Hohlraum auf. Demnach scheint eine höhere Einspritzgeschwindigkeit eine bessere Hohlraumqualität zu ergeben.

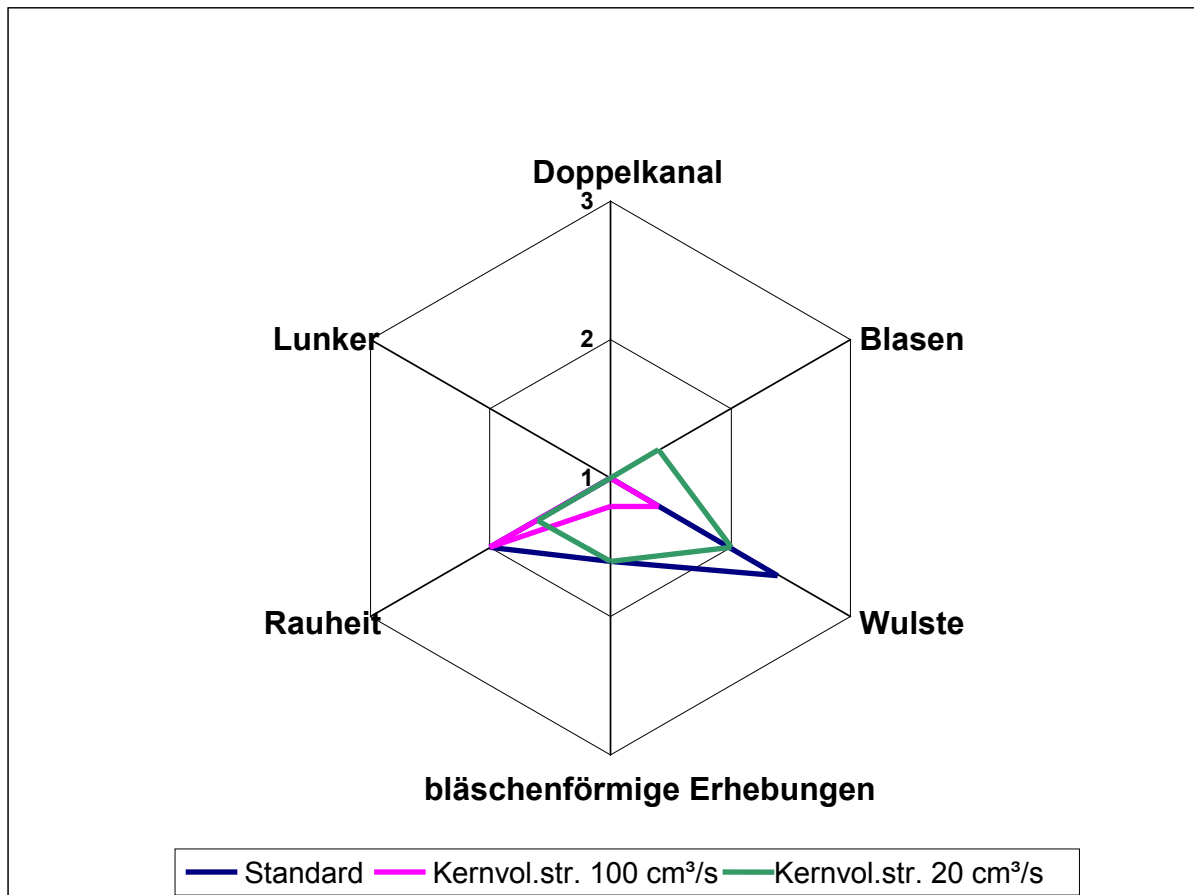


Abbildung 25: Hohlraumbewertung für unterschiedliche Kernmassevolumenströme im Vergleich zum Standardversuch

5.1.2.3 Massetemperatur

Als eine sehr wichtige Einflussgröße wurden die Massetemperaturen identifiziert. Sie haben einen entscheidenden Einfluss auf die Viskosität der Materialien und somit auf das Viskositätsverhältnis bei der Coinjektion (siehe Kapitel 3.1). Im Zuge dieser Versuchsserie wurde die Kernzylindertemperatur von 280 °C auf 230 °C erniedrigt. Weiters wurde die Hautzylindertemperatur von 285 °C auf 270 °C erniedrigt und auf 330 °C erhöht. Eine weitere Erhöhung der Kernzylindertemperatur war nicht möglich, da diese bereits mit 280 °C am oberen Limit war.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung der Wanddicken beim Sandwichspritzgießen hat das Viskositätsverhältnis von Kern zu Hautmaterial, das durch die Kennzahl $k_\eta = \eta_{\text{Kern}}/\eta_{\text{Haut}}$ beschrieben wird [6]. Demnach nimmt die RWD der Haut bei hohen Werten von k_η über die Fließweglänge kontinuierlich zu. Während

5. Spritzgießversuche

hingegen bei niedrigen Werten von k_{η} gleichmäßigere Verteilungen der Wanddicken über den Fließweg beobachtet werden.

Bei niedrigerer Kernmassestemperatur und daraus resultierender zunehmender Scherviskosität der Kernkomponente, sollte nach [4, 6] die RWD der Haut sinken, da mehr Hautmasse zum Rohrende hin geschoben werden sollte. Dieser Effekt ist aber bei der Fluidinjektionstechnik laut [1] schwach ausgeprägt. In den vorliegenden Ergebnissen ändert sich die RWD der Haut nicht wesentlich. Eine Erklärung könnte sein, dass das Scherviskositätsverhältnis zwischen dem PA mit 30% Glasfaser und dem PP so groß ist, dass sich durch eine Senkung der PP Temperatur keine großen Änderungen ergeben.

Was allerdings bei niedriger Kernmassestemperatur deutlich zu bemerken ist, ist eine Verringerung der RWD des Kerns. Anzunehmen ist, dass sich gegen den durch höhere Scherviskosität entstehenden größeren Schmelzedruck eine blockförmigere Membran an der Wasserfront ausbildet, die mehr Material vor sich her schiebt und somit zu dünneren RWD führt [1, 6]. Ebenfalls durch eine Senkung der Massestemperatur steigt die Dehnviskosität an. Eine hohe Dehnviskosität sorgt dafür, dass weniger Material zur Seite gedrängt werden kann, also mehr Material ausgeschoben wird. Diesen Phänomenen entgegen wirkt ein zunehmendes Verhältnis von Elastizität zu Scherviskosität [4]. Durch die höhere Elastizität ist der entstehende Schmelzeschlauch bestrebt, sich wieder zusammenzuziehen. Dies führt zu einer höheren radialen Kraft und somit zu größeren Wanddicken. Allerdings scheinen die zuvor beschriebenen Effekte der höheren Scher – und Dehnviskosität zu überwiegen. Das Zusammenspiel der viskosen Phänomene bei der WIT ist aber noch nicht restlos geklärt.

Eine Erniedrigung der Hautmassestemperatur hingegen führt zu leicht erhöhten Hautschichtdicken. Bei einer Erhöhung der Hautmassestemperatur bleibt die durchschnittliche RWD der Haut konstant, allerdings steigt sie über den Fließweg stärker an. Die Ausdünnung der Hautkomponente hängt im Wesentlichen von dem Viskositätsverhältnis zwischen Kern – und Hautmaterial ab [4]. Anders als bei der Wasserinjektion, bei der die Viskosität vernachlässigt werden kann und hauptsächlich das Fließfrontprofil eine Rolle spielt, wird beim Sandwichspritzgießen die Hautkomponente auch nach dem Passieren der Fließfront durch Scherung weiter ausgedünnt. Wenn also die Hautmassestemperatur gesenkt wird, steigt die Scherviskosität an und es kann nicht mehr soviel Material durch Scherung vom Kernmaterial ausgetragen werden. Eine Erhöhung der Hautmassestemperatur bewirkt den umgekehrten Effekt: Es wird mehr Material vom Anfang des Fließweges hin zum Ende transportiert. Auf die Ausbildung der Kernschichtdicke hat die Hautmassestemperatur kaum einen Einfluss (siehe *Abbildung 26*).

5. Spritzgießversuche

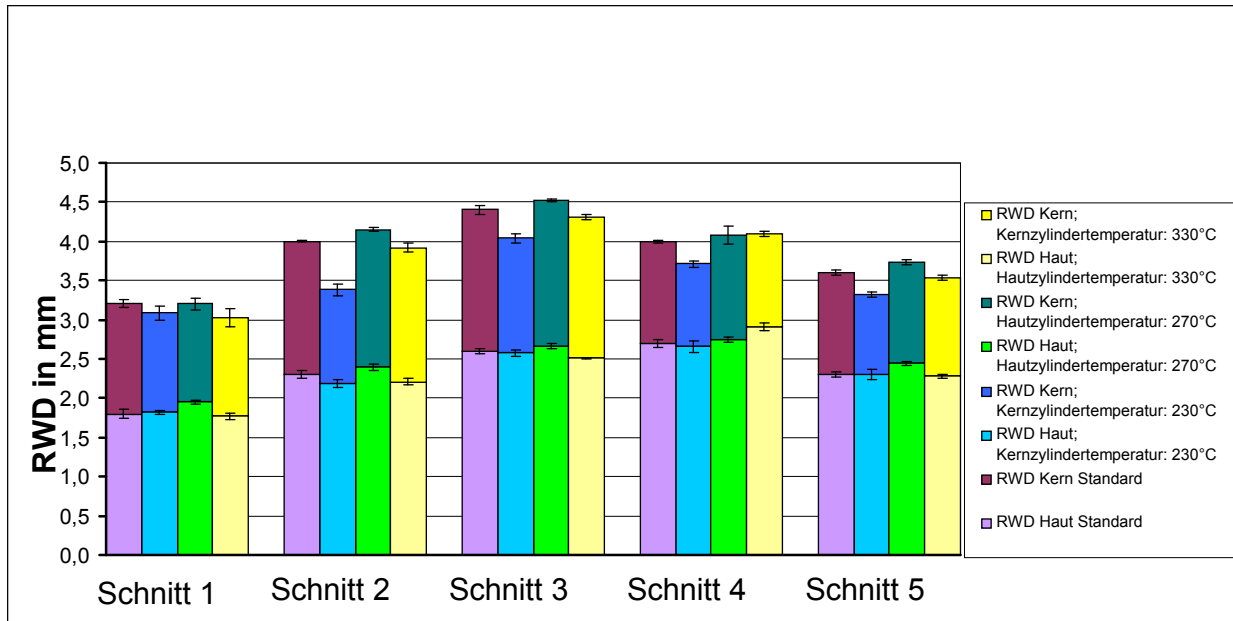


Abbildung 26: RWD der Haut- und Kernschicht bei unterschiedlichen Zylindertemperaturen im Vergleich zum Standardversuch

Die Exzentrizitäten der Hautschicht, deren Niveau im Allgemeinen sehr niedrig ist, ändern sich bei Variationen der Massetemperaturen kaum (Abbildung 27).

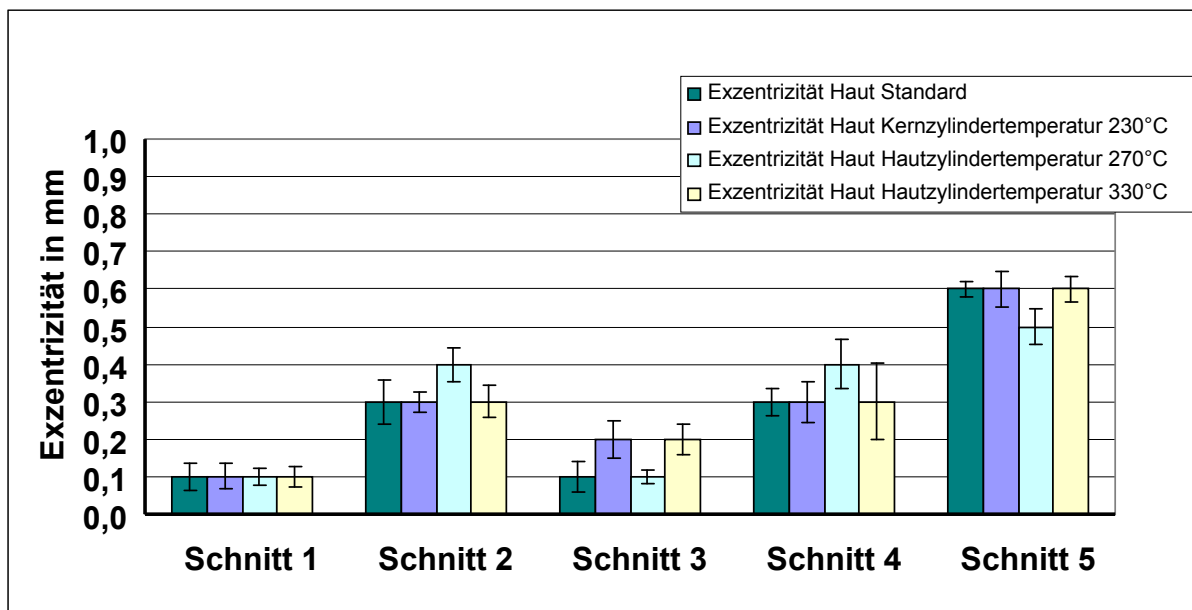


Abbildung 27: Exzentrizität der Hautschicht bei unterschiedlichen Zylindertemperaturen im Vergleich zum Standardversuch

Mit der Erniedrigung der Kernmassetemperatur steigt die Exzentrizität der Kernschicht an. Eine Erklärung liefert die mit sinkender Temperatur höhere Schmelzeelastizität, die zu einer ungleichmäßigeren Hohlraumausbildung führt [4]. Bei geringerer Hautmassetemperatur sinkt die Kernexzentrizität bis auf Schnitt 2 (Umlenkung) stark ab. Möglicherweise wird durch die höhere Viskosität der Hautkomponente eine bessere Führung gewährleistet. Allerdings sind die

5. Spritzgießversuche

Exzentrizitäten der Kernschicht bei hoher Hautmassetemperatur in der Nähe des Anspritzpunktes auch relativ niedrig (*Abbildung 28*).

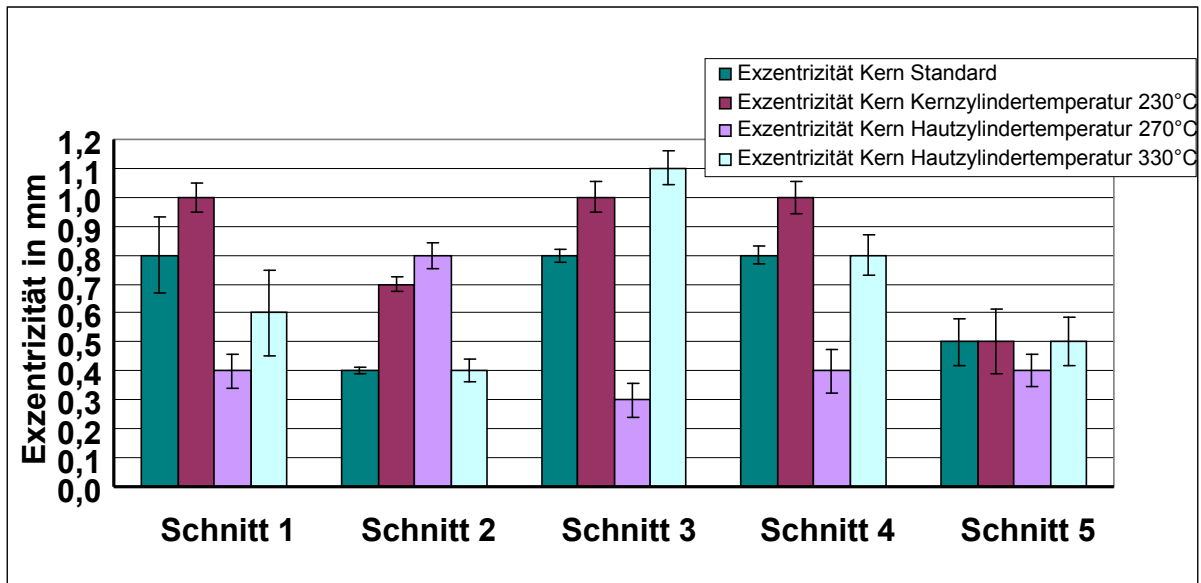


Abbildung 28: Exzentrizität der Kernschicht bei unterschiedlichen Zylindertemperaturen im Vergleich zum Standardversuch

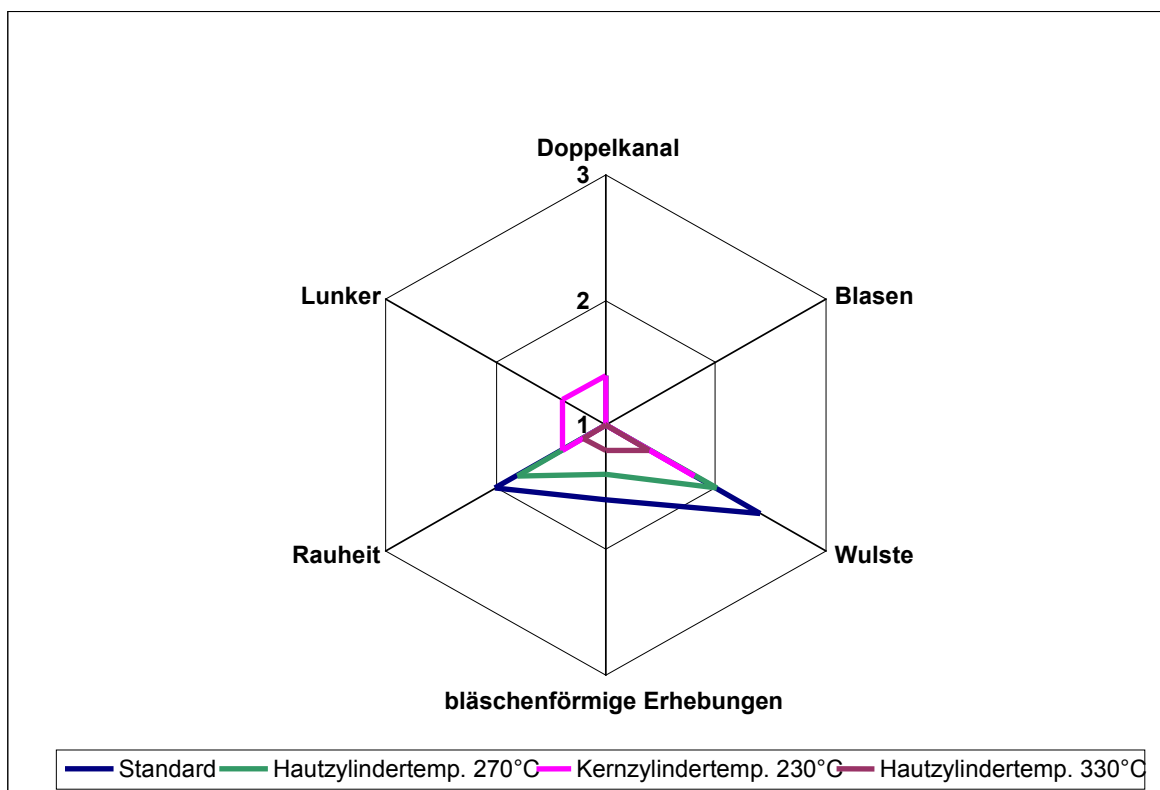


Abbildung 29: Hohlraumbewertung für unterschiedliche Zylindertemperaturen im Vergleich zum Standardversuch

5. Spritzgießversuche

In Hinblick auf die Hohlraumqualität treten bei höherer Kernmasstemperatur bei einem Bauteil Doppelkanal und Lunker auf. Ansonsten ist die Qualität sehr gut. Die beste Qualität trat bei erhöhter Hautmasstemperatur auf.

5.1.2.4 Wasservolumenstrom

Ein weiterer wichtiger Parameter, der sich aus den Vorversuchen herauskristallisierte, ist der Wasservolumenstrom. Bei diesem Versuch wird der Wasservolumenstrom zuerst von 30 cm³/s auf 100 cm³/s erhöht und danach auf 10 cm³/s erniedrigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 29 bis 32 dargestellt.

Zu bemerken ist eine deutliche Zunahme der Hautwanddicke bei einem hohen Volumenstrom des Wassers bei gleichzeitiger Abnahme der Kernwanddicke am Anfang des Fließweges. Die Abnahme der RWD des Kerns lässt sich, wie schon mehrmals angeführt, mit der mit zunehmendem Wasservolumenstrom blockförmiger werdenden Fließfront erklären, wodurch mehr Material ausgeschoben bzw. zum Ende des Rohres verschoben wird. [1] hingegen stellte keinen Einfluss auf die RWD bei Veränderung des Wasservolumenstroms fest.

Ein niedriger Wasservolumenstrom bewirkte eine noch etwas höhere RWD der Haut speziell am Fließwegende (Schnitt 4 und 5). Die RWD des Kerns änderte sich aber im Vergleich zum Referenzversuch nicht (Abbildung 29).

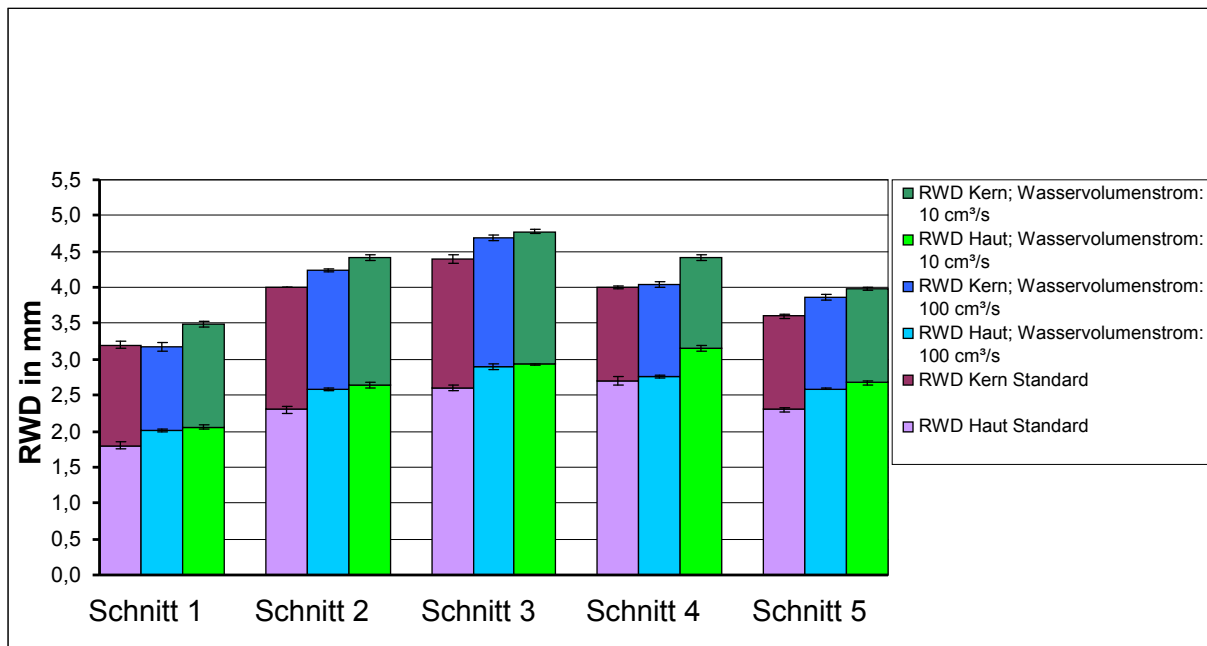


Abbildung 30: RWD der Haut- und Kernschicht bei unterschiedlichen Wasservolumenströmen im Vergleich zum Standardversuch

5. Spritzgießversuche

Bei der Exzentrizität des Hauthohlrums traten nur bei Schnitt 4 (Rohrende) Abweichungen auf. Bei hohem Wasservolumenstrom wurde die Exzentrizität kleiner, bei niedrigem höher (Abbildung 31).

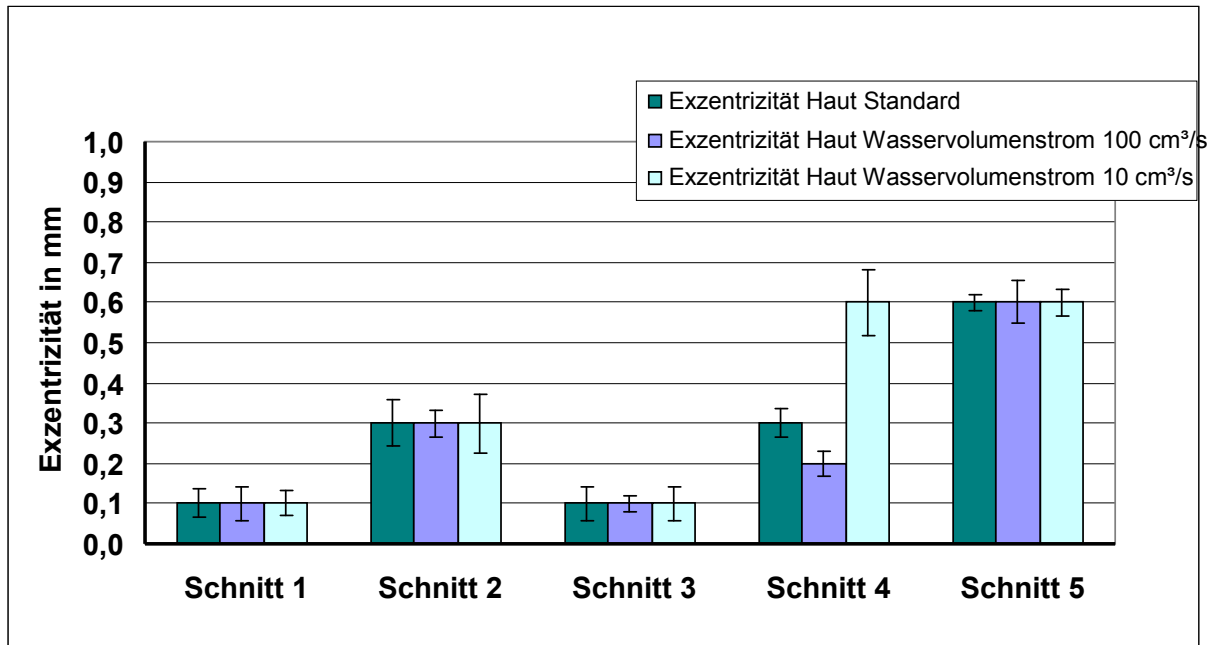


Abbildung 31: Exzentrizität der Hautschicht bei unterschiedlichen Wasservolumenströmen im Vergleich zum Standardversuch

Stärkere Änderungen traten bei der Kernexzentrizität auf. Vermutlich ist bei hohem Wasservolumenstrom der anspritzseitige Wassereintritt zentraler, allerdings weicht er nach der Umlenkung im Rohr durch seine Trägheit stärker vom Zentrum ab und zentriert sich anschließend wieder etwas besser als beim Standardversuch. Warum allerdings bei niedrigem Wasservolumenstrom die Exzentrizität gegen Fließwegende hin besser wurde, ist nicht klar (Abbildung 32).

5. Spritzgießversuche

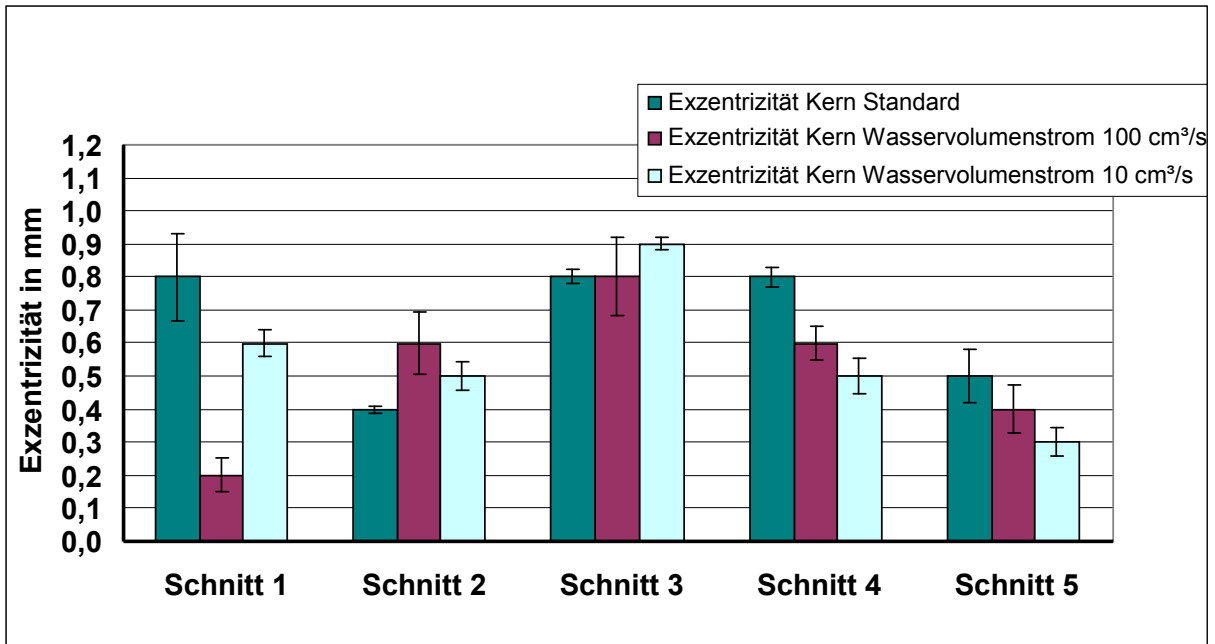


Abbildung 32: Exzentrizität der Kernschicht bei unterschiedlichen Wasservolumenströmen im Vergleich zum Standardversuch

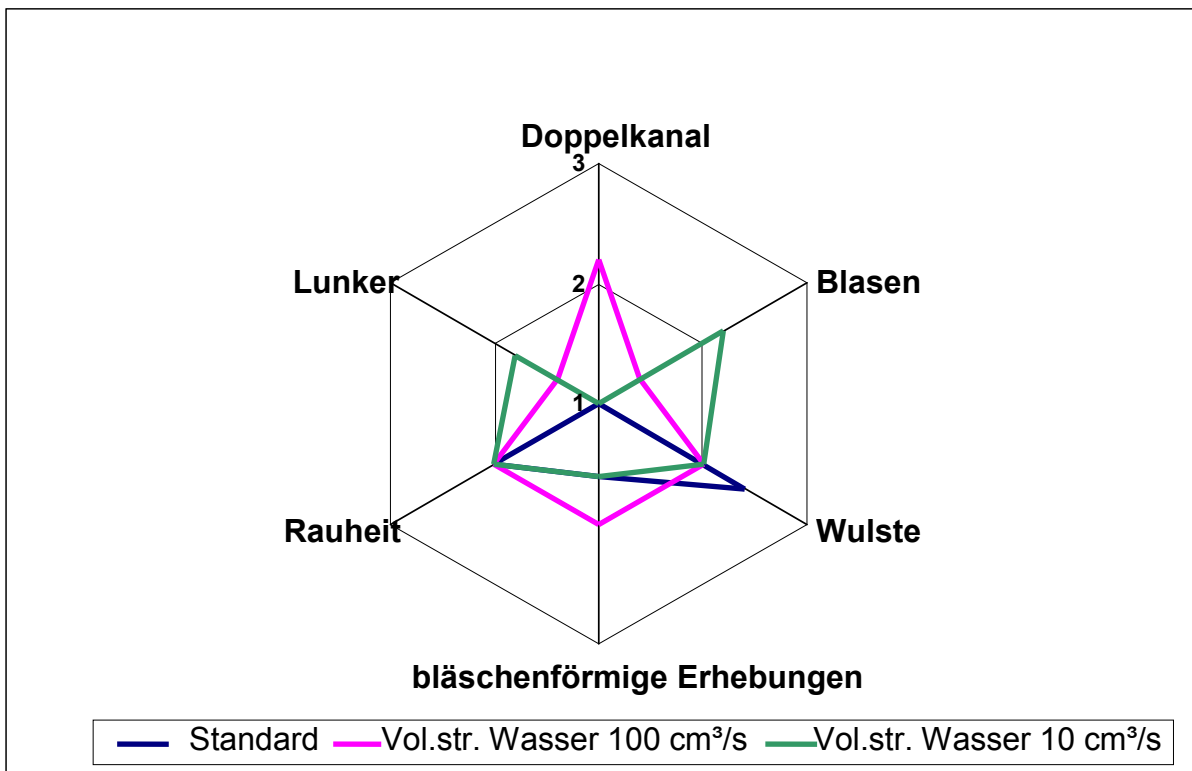


Abbildung 33: Hohlraumbewertung für unterschiedliche Wasservolumenströme im Vergleich zum Standardversuch

Die Hohlraumqualität ist bei beiden Extremwerten des Wasservolumenstroms schlecht. Bei hohem Volumenstrom des Wassers entstanden bei einigen Rohren

5. Spritzgießversuche

Doppelkanäle in der Kernschicht und bei zwei Lunker und Blasen. Bei niedrigem Volumenstrom traten vermehrt Blasen und Lunker auf (Abbildung 32).

5.1.2.5 Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kerneinspritzung

Auch einen signifikanten Einfluss speziell auf die RWD zeigte eine Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kerneinspritzung. Bei dem Versuch wurde eine Verzögerungszeit von 2 s zwischen der Einspritzung vom Haut und Kernmaterial eingestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 33 bis 36 dargestellt.

Eine Verzögerungszeit zwischen Haut – und Kerneinspritzung bewirkte eine deutliche Erhöhung der RWD der Haut entlang des gesamten Rohres. Die RWD des Kerns hingegen verändert sich kaum. Diese Verzögerungszeit bedeutet eine längere Kühlzeit für das bereits eingespritzte Hautmaterial. Es friert also eine dickere Randschicht ein und weniger Material wird durch die anschließende Kerninjektion durch Scherung ausgetragen (Abbildung 34).

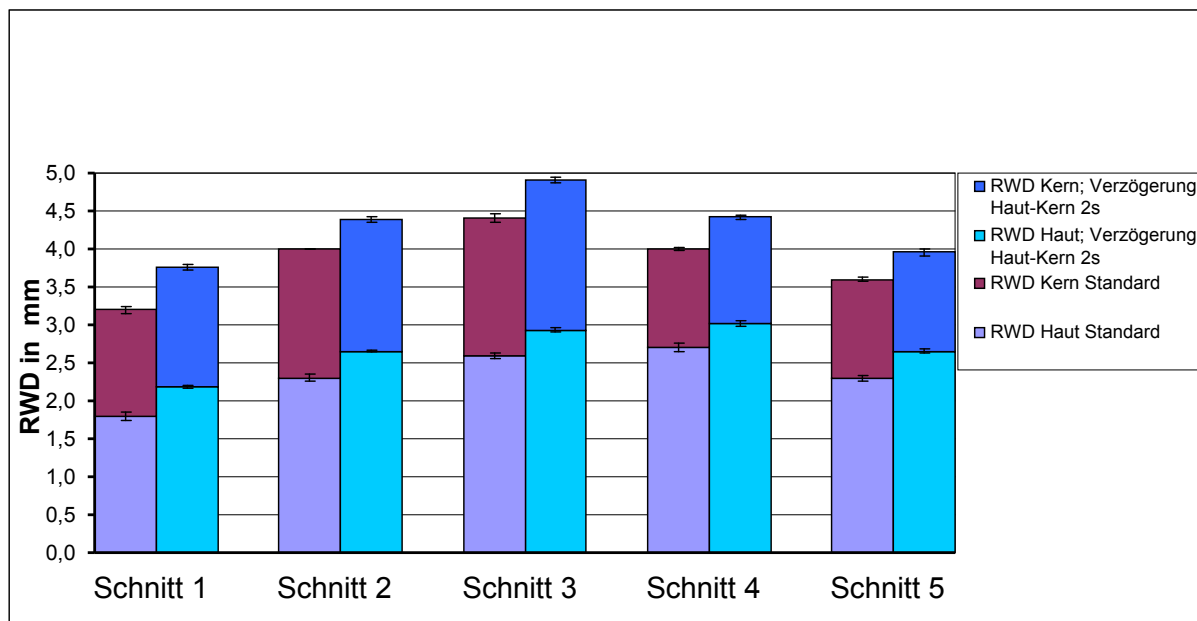


Abbildung 34: RWD der Haut- und Kernschicht bei 2 s Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kerneinspritzung im Vergleich zum Standardversuch

Die Exzentrizitäten der Hautschicht erhöhen sich leicht im Mittelstück des Rohres allerdings ist deren Standardabweichung wesentlich geringer als beim Standardversuch. Dies bedeutet eine höhere Reproduzierbarkeit der Hautwanddickenverteilung (Abbildung 35).

5. Spritzgießversuche

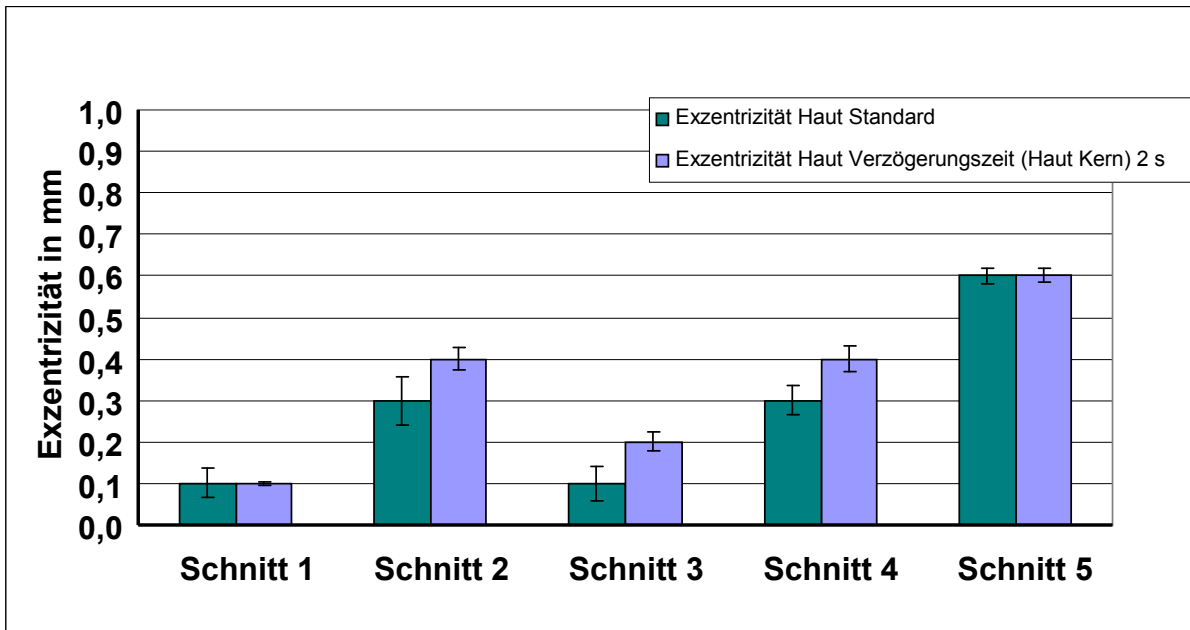


Abbildung 35: Exzentrizität der Hautschicht bei 2 s Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kerneinspritzung im Vergleich zum Standardversuch

Eine geringere Exzentrizität tritt bei der Kernschicht auf. Ausnahme bildet hier Schnitt 2 (Umlenkung) der eine etwas höhere Exzentrizität aufweist. Vermutlich bedeutet eine dickere Hautwandschicht eine bessere Führung der Kernblase und somit geringere Exzentrizitäten (Abbildung 36).

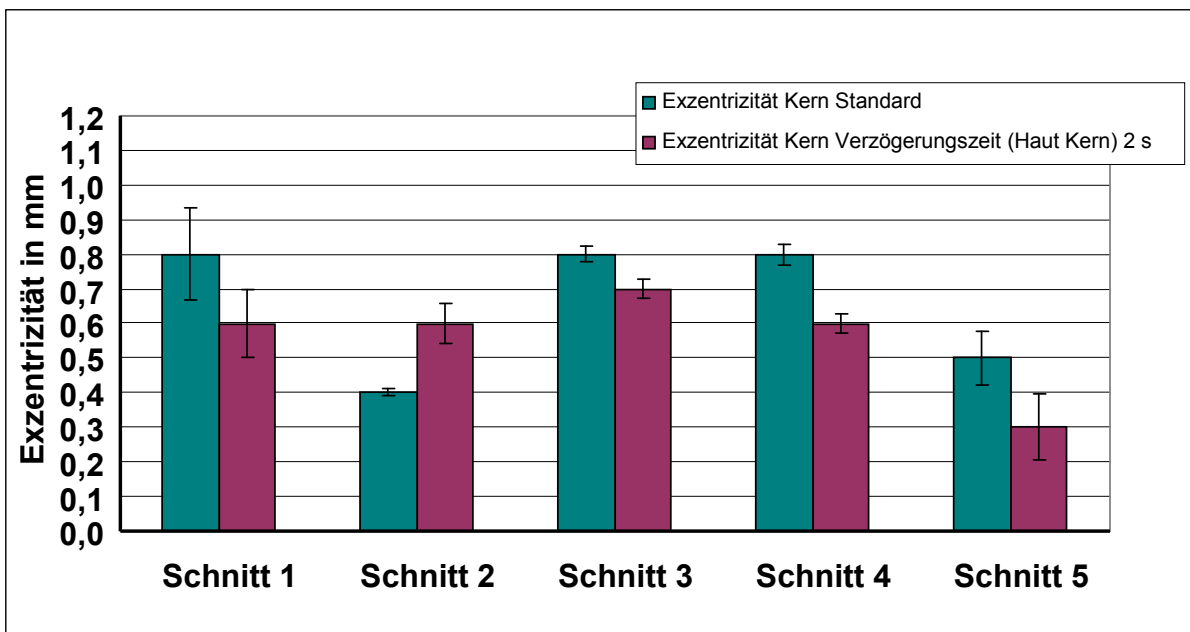


Abbildung 36: Exzentrizität der Kernschicht bei 2 s Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kerneinspritzung im Vergleich zum Standardversuch

5. Spritzgießversuche

Die Hohlraumqualität ist mit jener des Standardversuches vergleichbar (Abbildung 37).

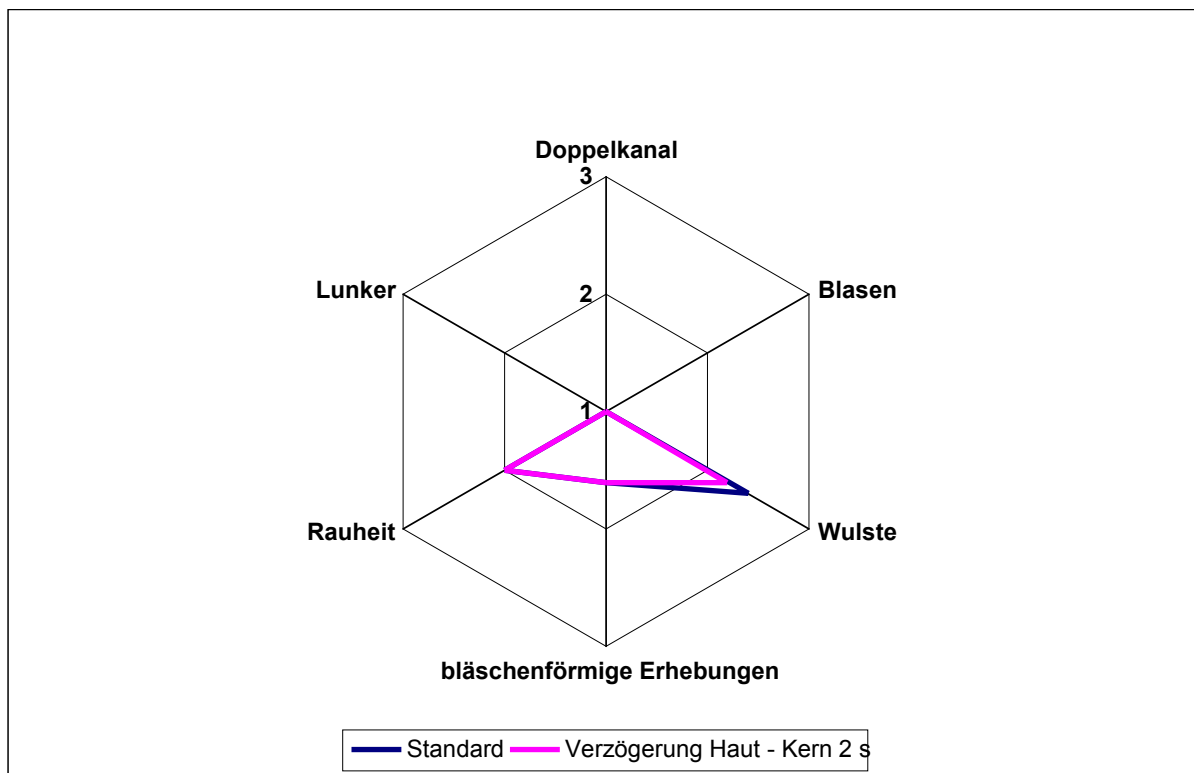


Abbildung 37: Hohlraumbewertung für 2 s Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kerneinspritzung im Vergleich zum Standardversuch

5.1.2.6 Werkzeugwandtemperatur

Als siebter und letzter Parameter wird die Werkzeugwandtemperatur gewählt. In diesem Vorversuch wird die Auswirkung einer Erniedrigung der Werkzeugvorlauftemperatur auf 70°C beobachtet. Die Werkzeugvorlauftemperatur ist ein Indikator für die Werkzeugtemperatur. Standardmäßig ist sie auf 90°C eingestellt. Die Werkzeugvorlauftemperatur wird an vier externen Temperieraggregaten für das Werkzeug eingestellt. In den Abbildungen 37 bis 40 sind die Ergebnisse dargestellt.

Erwartungsgemäß steigt die RWD der Hautschicht bei einer Erniedrigung der Werkzeugvorlauftemperatur und somit Werkzeugwandtemperatur an, da die Randschicht des Hautmaterials schneller einfriert und nicht mehr soviel ausgedrückt werden kann. Auf die RWD der Kernschicht hat die Werkzeugwandtemperatur kaum einen Einfluss. Dies ist damit zu begründen, dass die kühlere Werkzeugoberfläche nicht mit der Kernschicht in Berührung kommt und somit ähnliche

5. Spritzgießversuche

Temperaturverhältnisse im Rohrinneeren herrschen wie beim Referenzversuch (Abbildung 37).

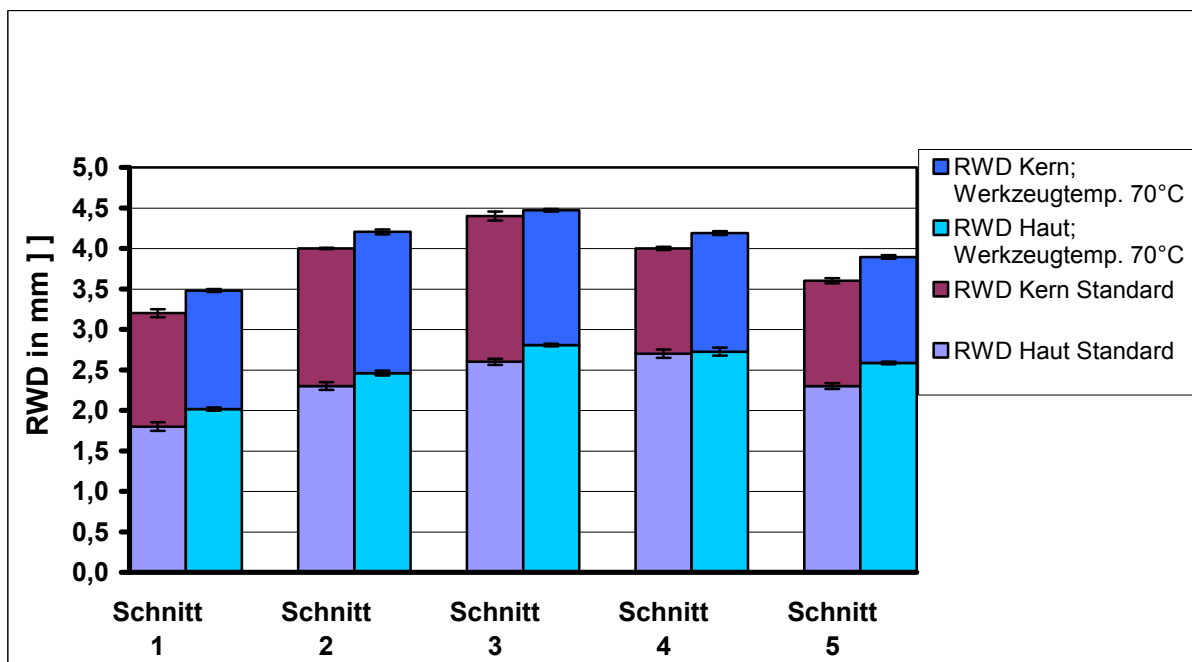


Abbildung 38: RWD der Haut- und Kernschicht bei niedrigerer Werkzeugvorlaufemperatur im Vergleich zum Standardversuch

Eine niedrige Werkzeugwandtemperatur hat nur wenig Einfluss auf die Exzentrizität der Hautschicht. Hingegen sinkt die Exzentrizität der Kernschicht im Durchschnitt ab (Abbildung 38 und Abbildung 39). Erklärt werden kann dies durch eine bessere Führung des Kernmaterials durch die dickere eingefrorene Hautschicht während der Hohlrumbaueung. Es wird ein Abweichen des einströmende Kernmaterials von der zentralen Achse erschwert, da die Hautschicht mehr abgekühlt und damit auch höherviskos ist.

5. Spritzgießversuche

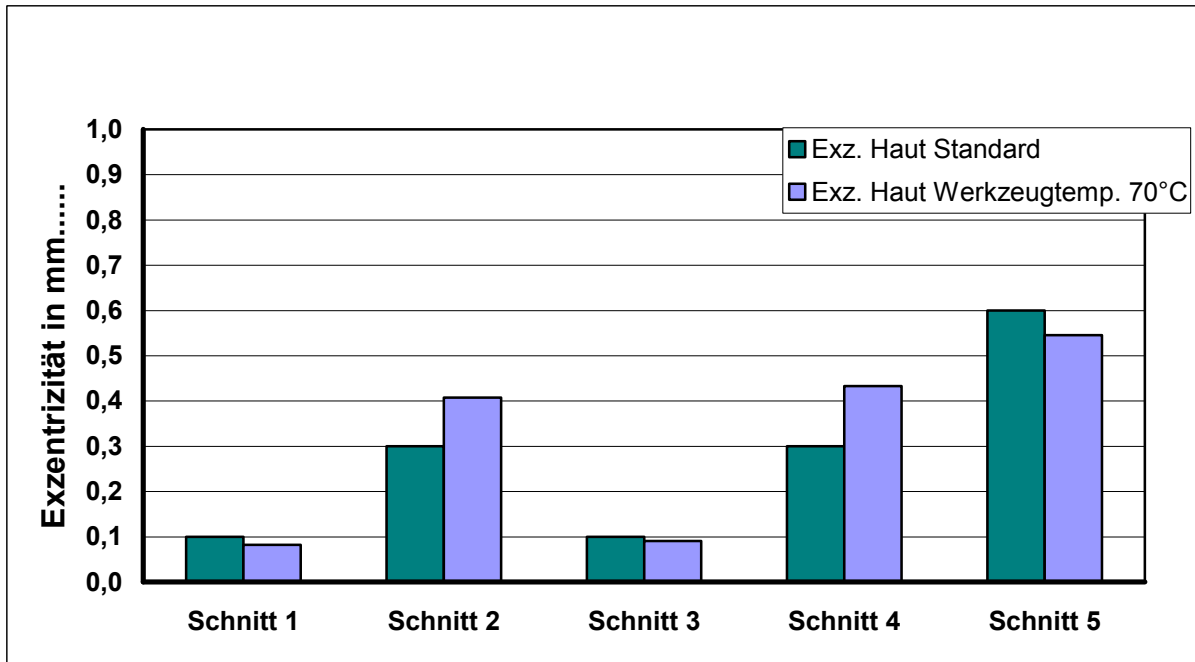


Abbildung 39: Exzentrizität der Hautschicht bei niedrigerer Werkzeugvorlaufemperatur im Vergleich zum Standardversuch

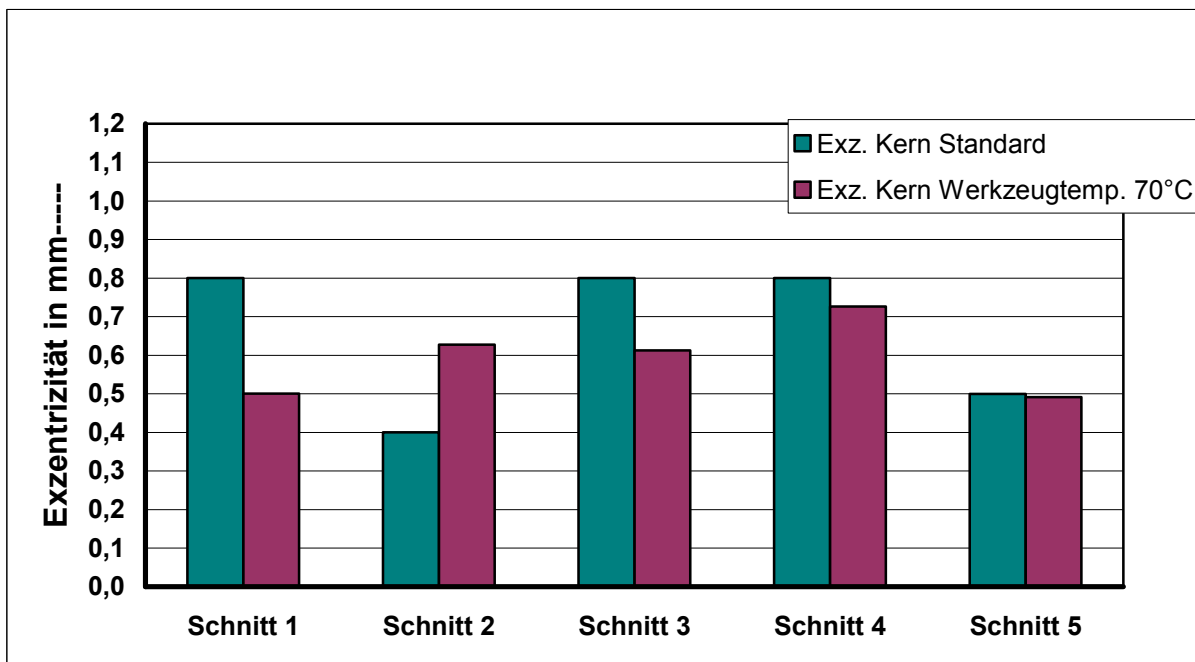


Abbildung 40: Exzentrizität der Kernschicht bei niedrigerer Werkzeugvorlaufemperatur im Vergleich zum Standardversuch

Obwohl sich die Hohlraumqualität der Auswertung nach bei niedrigerer Werkzeugwandtemperatur in Hinblick auf die Rauigkeit und die Ausbildung von Wülsten verbessert (siehe Abbildung 41), steht dies im Gegensatz dazu, dass sich eine bessere Qualität bei hoher Hautmassestemperatur ergibt. Eine naheliegende

5. Spritzgießversuche

Begründung haben die Versuche und Literatur nicht ergeben. Für eine Erklärung der Effekte zur Entstehung der Hohlraumoberflächengüte müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

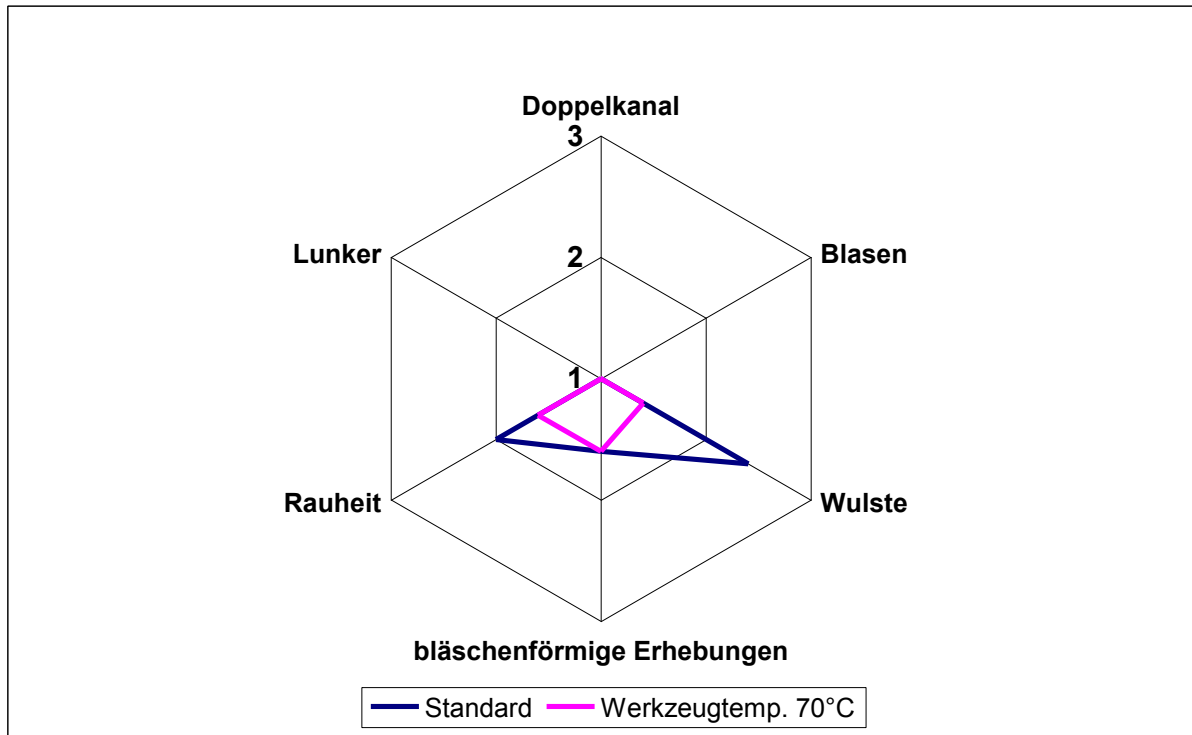


Abbildung 41: Hohlraumbewertung für eine niedrigere Werkzeugvorlauftemperatur im Vergleich zum Standardversuch

5.2 Optimierung der Prozessparameter

Im Folgenden wird die Durchführung sowie die Auswertung und Analyse der Optimierung der Prozessparameter beschrieben und dargestellt. Zunächst werden die Erstellung des Hauptversuchsplans und die Durchführung der Hauptversuche erläutert. Danach folgt die Beschreibung und Auswertung der Optimierung mit Hilfe der Versuchsplanungs- und Optimierungssoftware ASSISTANT. Bei der Auswertung werden die Ausbildung der RWD von Haut und Kernschicht, die Exzentrizität des Hohlraumes und die entstehenden Hohlraumoberflächenfehler betrachtet.

5.2.1 Erstellung und Durchführung des Hauptversuchsplans

Um eine Optimierung mit ASSISTANT zu ermöglichen wird zunächst ein Hauptversuchsplan erstellt. Der detaillierte Versuchsplan ist im Anhang zu finden

5. Spritzgießversuche

(Kapitel 9.2, S 82). Zunächst muss entschieden werden, welche Prozessparameter für den Hauptversuchsplan relevant sind. Für die Prozessoptimierung ist dies ein entscheidender Schritt. Wird ein wichtiger Prozessparameter übersehen, so kann es sein, dass die Ergebnisse aus den Hauptversuchen für eine Optimierung nicht geeignet sind. Die Entscheidung, welche Parameter relevant sind, wurde mit Hilfe der Ergebnisse aus den Vorversuchen getroffen. Wie bereits im Kapitel zu den Vorversuchen erläutert, fällt die Wahl auf folgende sieben Prozessparameter:

- Hautmassezy lindertemperatur (somit Hautmasse temperatur)
- Kernmassezy lindertemperatur (somit Kernmasse temperatur)
- Werkzeugvorlauf temperatur (somit Werkzeug temperatur)
- Wassereinspritz verzögerungszeit
- Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kerneinspritzung
- Wasservolumenstrom
- Kernmassenvolumenstrom

Ein ebenso wichtiger Punkt ist die Wahl der Grenzen für die einzelnen Parameter (siehe Tabelle 2). Zu beachten ist dabei, dass man nicht bis an den Rand der Machbarkeit des Prozesses geht. Bei der Wahl der Grenzen fließen die Erfahrungen aus den Vorversuchen ein.

Tabelle 2: Gewählte Grenzen der Prozessparameter für den Hauptversuchsplan

Parameter	Minimum	Maximum
Hautmassezy lindertemperatur in °C	285	330
Kernmassezy lindertemperatur in °C	240	280
Werkzeugvorlauf temperatur in °C	70	90
Wassereinspritz verzögerungszeit in s	0	4
Verzögerungszeit Haut- und Kerneinspritzung in s	0	3
Wasservolumenstrom in cm ³ /s	20	90
Kernmassenvolumenstrom in cm ³ /s	10	100

Des Weiteren müssen die Zielgrößen bzw. Produkteigenschaften festgelegt werden. In diesem Fall sind es die RWD und Exzentrizität von Haut- und Kernschicht sowie Hohlraumfehler. Bei den RWD und Exzentrizitäten wurde zwischen Haut und Kern und darüber hinaus zwischen den fünf einzelnen Querschnitten über die Rohrlänge, die vermessen wurden, unterschieden. Für jede Zielgröße wurde nun ein optimaler

5. Spritzgießversuche

Wert festgelegt, der durch eine Prozessparameterkombination möglichst gut angenähert wurde. Die optimalen Werte für die Schichtdicken wurden laut Zeichnung auf insgesamt 2,2 mm festgelegt wobei 1 mm auf die Kernschicht entfällt. Ein Wert von 0 wurde für die Exzentrizität und die Hohlraumfehler angestrebt. Darüber hinaus wurden die Toleranzen für jeden Wert eingetragen, um die Qualität der Optimierung beurteilen zu können. Für die RWD wurden die Toleranzen mit jeweils plus bzw. minus 0,3 mm angegeben. Für die Exzentrizität der Hautschicht mit 0,3 mm und für die Kernschicht mit 0,5 mm. In diesem Schritt ist es auch möglich, eine Gewichtung der einzelnen Zielgrößen zu wählen. Damit wird ein Wert stärker oder schwächer bei dem Optimierungsalgorithmus berücksichtigt. Darauf wird später noch näher eingegangen.

Mit den Vorgaben für Zielgrößen und Prozessparameter wird nun der Versuchsplan erstellt. Die Software bietet die Wahl zwischen verschiedenen statistischen Versuchsplänen. Gewählt wurde der D-Optimale Plan, da er mit den wenigsten Versuchen auskommt und es trotzdem möglich ist, Effekte und Wechselwirkungen der Parameter auf die Zielgrößen zu erkennen. Die minimale Versuchsanzahl für eine sinnvolle Optimierung ergibt sich mit 16 Versuchen. Wie bei den Vorversuchen wurden für jede Versuchseinstellung jeweils fünf Rohre für die Wanddicken- und Hohlraumauswertung gespritzt. Die Ergebnisse sind im Anhang (9.3) zu finden. Danach wurden die Zielgrößen aller Versuche ermittelt. Die Ergebnisse wurden in das Versuchsdatenblatt eingetragen und basierend darauf und den vorgegebenen Eigenschaften der Prozessparameter wird vom Programm ein Prozessmodell erstellt. Dieses Modell diente anschließend der Optimierung des Prozesses.

5.2.2 Ergebnisse der Optimierung

Bei dem, ausgehend von den Hauptversuchen erstellten, Prozessmodell handelt es sich um ein mathematisches Modell, das die Abhängigkeiten zwischen Eigenschaften bzw. Zielgrößen und den Parametern beschreibt, eine sogenannte Regressionsrechnung. Bei der Regressionsrechnung wird versucht, eine möglichst gute Beziehung zwischen den Zielgrößen (z.B. RWD) und den Prozessparametern zu finden. Dies geschieht mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Dabei wird versucht die Quadrate der Abweichungen von der erstellten Modellfunktion so klein wie möglich zu halten, also eine möglichst gute Anpassung der Modellfunktion an die gemessenen Werte zu erzielen. Beispielhaft für eine erstellte Regressionsrechnung ist Gleichung 4

5. Spritzgießversuche

$$\begin{aligned} \text{RWD Haut Schnitt 1} = & 1,8187 + 0,0463 \cdot \text{Kernmassezylindertemperatur}^\circ + \\ & 0,0212 \cdot \text{Verzögerungszeit-Wasserinjektion}^\circ + 0,0738 \cdot \text{Verzögerungszeit-} \\ & \text{Haut-Kern}^\circ - 0,0238 \cdot \text{Werkzeugvorlaufzeit}^\circ - 0,1287 \cdot \text{Hautmassezylindertemperatur}^\circ + 0,0063 \cdot \text{Wasservolumenstrom}^\circ - 0,0462 \cdot \\ & \text{Kernvolumenstrom}^\circ \end{aligned} \quad (4)$$

Führt man diese Berechnung aus, wird auch eine Prozessanpassung dargestellt. Dabei handelt es sich um ein Maß, das eine Aussage über die Eignung des Modells zur Optimierung trifft. Die Prozessanpassung stellt einen Wert zwischen 0 und 1 dar, wobei 0 keine und 1 optimale Eignung bedeutet. Laut ASSISTANT sollte man nur Modelle verwenden, deren Prozessanpassung größer als 0,6 ist. Für die Ermittlung der Prozessanpassung wird das Bestimmtheitsmaß (kurz R^2) der gemessenen Werte berücksichtigt. R^2 gibt an, wie gut die Modellkurve, in diesem Fall eine Gerade, die Verteilung der gemessenen Werte angleicht. Die Ergebnisse für R^2 und die Prozessanpassung für eine gleiche Gewichtung der Zielgrößen sind in

Tabelle 3 zu sehen. Diese Werte sind Durchschnittswerte der jeweiligen Zielgrößen über die fünf Querschnitte bzw. im Falle der Hohlraumqualität über die 6 Hohlraumfehler.

Tabelle 3: Durchschnittliche Werte der Prozessanpassung und R^2

Modellgüte	Zielgrößen				
	RWD Haut	RWD Kern	Exz. Haut	Exz. Kern	Hohlraumqualität
R^2	0,85	0,77	0,39	0,55	0,32
Prozessanpassung	0,82	0,72	0,76	0,69	0,77

Zur Überprüfung der von ASSISTANT berechneten Werte wurden fünf Versuche mit jeweils unterschiedlicher Gewichtung der Zielgrößen durchgeführt (siehe

Tabelle 4). Der Gewichtungsfaktor stellt einen Wert dar, der bestimmt wie stark die jeweilige Zielgröße bei der Gesamtoptimierung in der Optimierungsroutine

5. Spritzgießversuche

berücksichtigt wird. Mit Hilfe der unterschiedlichen Gewichtungen sollte erkannt werden, wie sich einzelne Zielgrößen auf die Ergebnisse der berechneten Prozessgrößen auswirken.

Tabelle 4: Gewichtungen der Zielgrößen für die Optimierungsversuche

		Zielgrößen				
		RWD Haut	RWD Kern	Exzentrizität Haut	Exzentrizität Kern	Hohlraumqualität
Gewichtung	Gew. RWD	10	10	1	1	1
	Gleiche Gew.	10	10	10	10	10
	Gew. Exz.	1	1	10	10	1
	Keine HQ	10	10	10	10	0
	Gew. Kern	1	10	1	10	1

In

Tabelle 5 sind die von ASSISTANT berechneten Prozessparameter für die unterschiedlichen Gewichtungen eingetragen.

Tabelle 5: Mit Hilfe von ASSISTANT optimierte Prozessparameter für die unterschiedlichen Gewichtungen.

Prozessparameter	Gew. RWD	Gleiche Gew.	Gew. Exz.	Keine HQ	Gew. Kern
Kernzylindertemperatur (°C)	256	268	280	269	268
Wasserverzögerungszeit (s)	0,3	0,4	1,6	0,5	0,5
Verzögerung Haut - Kerneinspritzung (s)	1,8	1,8	1,7	1,7	1,4
Werkzeugvorlaufzeit (°C)	76	75	76	75	74
Hautzylindertemperatur (°C)	305	306	303	305	304

5. Spritzgießversuche

Wasservolumenstrom (cm ³ /s)	61,5	56,6	54,8	61,9	58
Kernmassevolumenstrom (cm ³ /s)	92,7	89,9	57,3	91,4	91,1

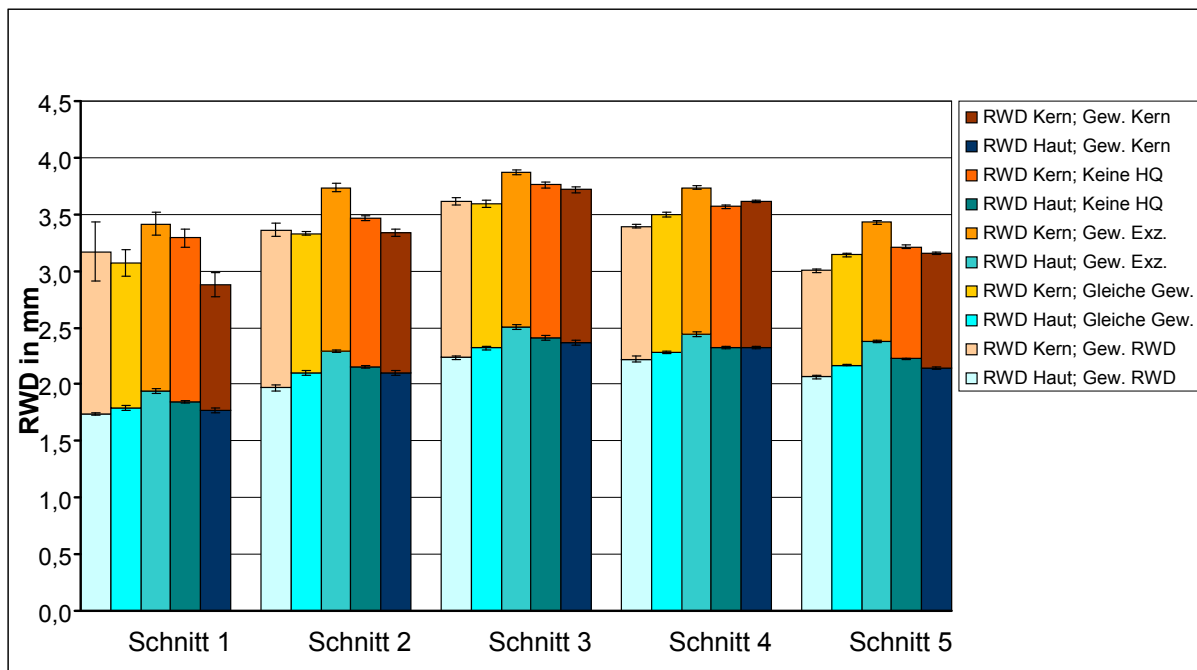


Abbildung 42: Vergleich der gemessenen RWD von Haut- und Kernschicht der Versuche mit unterschiedlichen Prozessparametern. Die schwarzen Balken stellen die Standardabweichung der jeweils durchgeführten 5 Versuche dar

In Abbildung 42 sind die gemessenen Ergebnisse der RWD von Haut- und Kernschicht der durchgeführten Versuche mit den berechneten, optimierten Prozessparametern bei unterschiedlichen Gewichtungen gegenübergestellt. Die gemessenen RWD sind in die jeweiligen Schnitte unterteilt und über die vier Messstellen am Umfang sowie über die jeweils 5 Wiederholungen eines Versuches gemittelt. Die Fehlerindikatoren stellen die Standardabweichung zwischen den 5 Wiederholungen eines Versuches dar.

Je nach Gewichtung wurden teils signifikant abweichende RWD erzielt. Besonders auffallend ist der Unterschied zwischen der RWD der Hautschicht bei einer starken Gewichtung der Zielgröße RWD und einer starken Gewichtung der Exzentrizität. Berücksichtigt man vorwiegend die Ausbildung der RWD bei der Optimierung, werden die geringsten Hautwanddicken erzielt. Hingegen entstehen die größten Hautwanddicken bei hoher Gewichtung der Exzentrizitäten. Die übrigen Gewichtungen der Zielgrößen ergeben kaum eine Änderung der RWD. Einzig die RWD der Kernschicht von Schnitt 1 bei starker Gewichtung der Zielgrößen des Kerns ist deutlich niedriger als bei den anderen Versuchen.

5. Spritzgießversuche

Die Erklärung für den signifikanten Unterschied der Hautwanddicke zwischen einer starken Gewichtung der RWD und den Exzentrizitäten bei der Optimierung muss in den deutlich verschiedenen Einstellungen für die Kernzylindertemperatur, der Wasserverzögerungszeit und dem geringeren Kernvolumenstrom (siehe

Tabelle 5) liegen. In den Vorversuchen ergibt sich keine signifikante Änderung der Hautwanddicke bei niedriger Kernzylindertemperatur (lediglich die RWD des Kerns sinkt). Die Wasserverzögerungszeit zeigt in den Vorversuchen einen deutlichen Einfluss auf die RWD der Haut. So steigt mit zunehmender Verzögerungszeit die Hautwanddicke an. Dies bestätigt sich auch in den Ergebnissen der optimierten Versuche, da die Verzögerungszeit bei starker Gewichtung der Exzentrizität deutlich höher ist als bei den anderen Gewichtungen. Betrachtet man den Kernmassevolumenstrom, zeigt sich eine deutlich niedrigere Einstellung bei starker Gewichtung der Exzentrizität im Vergleich zu den anderen Versuchen, die in Tabelle 3 aufgeführt sind. Hier scheint sich die Erkenntnis aus den Vorversuchen zu bestätigen, die zeigt, dass mit niedrigerem Kernmassevolumenstrom die RWD der Haut steigt. Allerdings kann man bei den Versuchen mit optimierten Einstellungen die unterschiedlichen Parameter nicht einzeln betrachten, da immer mehrere Parameter verändert werden.

Weitere Erkenntnisse aus den Ergebnissen bei unterschiedlich gewichteten Zielgrößen lassen sich aus den zwischen den verschiedenen Gewichtungen abweichenden Prozessparametereinstellungen (

Tabelle 5) ziehen. So hat die Kernzylindertemperatur und somit auch die Kernmassestemperatur einen großen Einfluss auf die Ausbildung der RWD und die Exzentrizität da diese stark variiert wird. Wie aus den Vorversuchen bekannt sinkt die RWD bei niedrigerer Kernmassestemperatur während die Exzentrizität ansteigt.

Einen weiteren wichtigen Einflussfaktor stellt die Verzögerungszeit der Wassereinspritzung dar. Sie wird, um eine geringe RWD zu erreichen, klein gehalten, da somit die Dicke der eingefrorenen Randschicht verkleinert wird. Optimiert man hingegen in Richtung geringere Exzentrizität, wird die Verzögerungszeit höher eingestellt, da eine größere eingefrorene Randschicht die Fluidblasenausbreitung besser zentriert. Durch die stärkere Abkühlung steigt auch die Viskosität des Bereiches zwischen Fluidblase und eingefrorener Schicht und es kommt zu weniger starkem Ausbrechen der Blase.

5. Spritzgießversuche

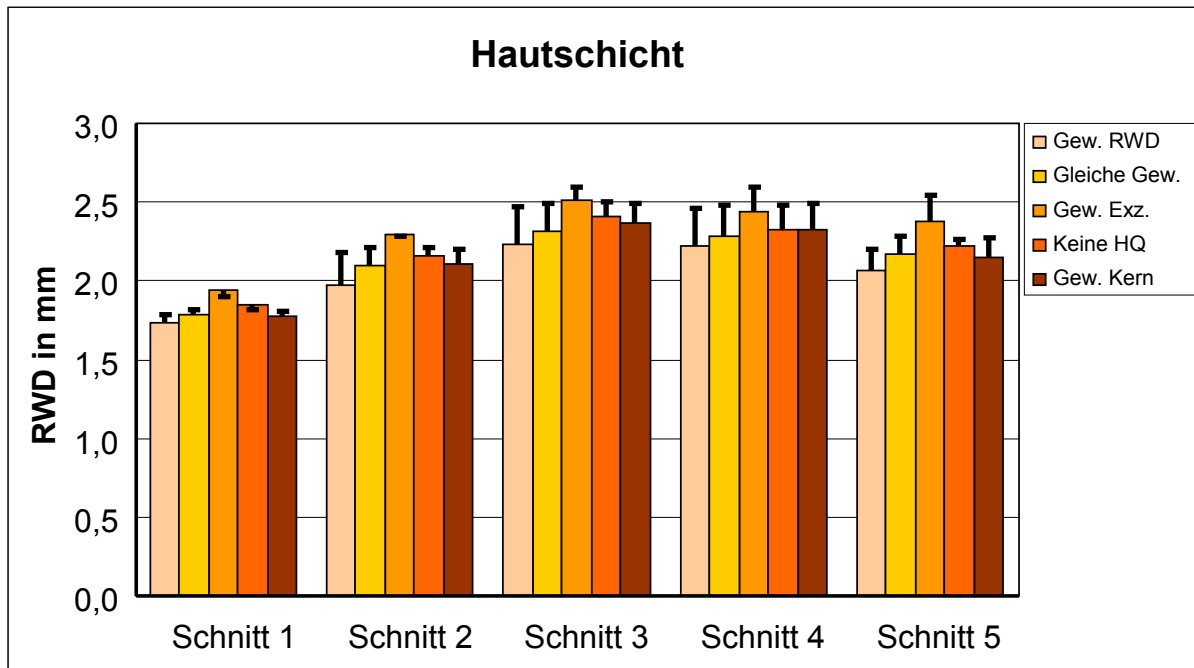


Abbildung 43: Vergleich zwischen den gemessenen Ergebnissen der RWD der Haut; die schwarzen Balken stellen die Abweichung von den berechneten Werten dar

In Abbildung 43 werden die gemessenen Ergebnisse der RWD der Haut im Vergleich zu den mit ASSISTANT berechneten Werten dargestellt. Die berechneten Werte weichen nur leicht von den tatsächlichen Ergebnissen ab und sind meist höher. Für die Vorhersage der Hautwanddicke ist das aus den Hauptversuchen erstellte Modell gut geeignet.

5. Spritzgießversuche

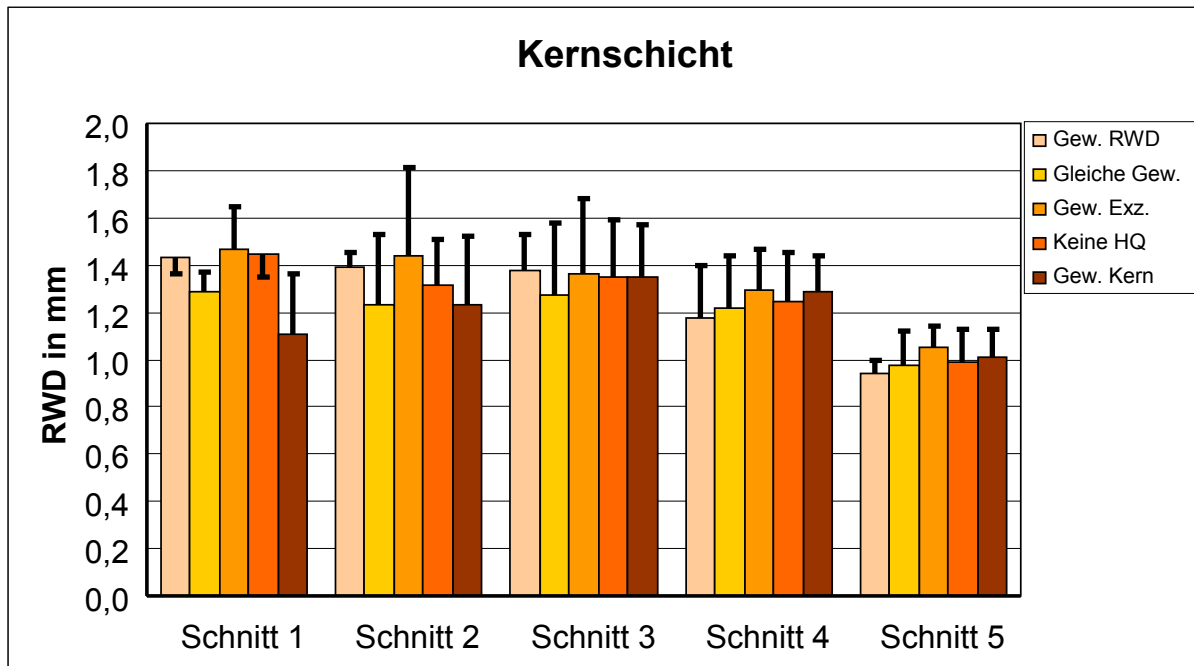


Abbildung 44: Vergleich zwischen den gemessenen Ergebnissen der RWD des Kerns; die schwarzen Balken stellen die Abweichung von den berechneten Werten dar.

Im Vergleich zur RWD der Hautschicht weichen die berechneten Ergebnisse für die RWD des Kerns durchschnittlich stärker von den gemessenen ab. Die mit ASSISTANT berechneten Werte der Hautwanddicken weichen von den gemessenen Ergebnissen durchschnittlich um 0,11 mm ab (Abbildung 42) und die der Kernwanddicken um 0,19 mm (Abbildung 43). Bei einer durchschnittlichen Hautwanddicke von 2,2 mm bedeutet das eine Abweichung von 5% und bei einer durchschnittlichen Kernwanddicke von 1,2 mm beträgt die Abweichung 15,8%. Daraus wird deutlich, dass sich die RWD der Haut besser vorherbestimmen lässt als die des Kerns.

5. Spritzgießversuche

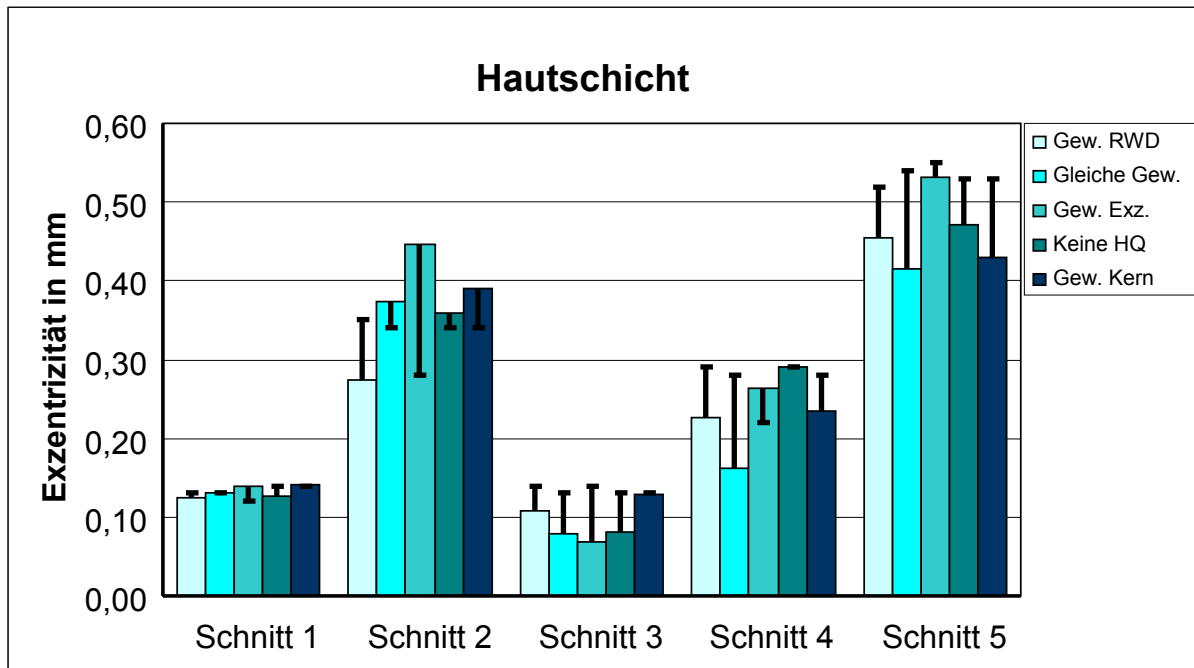


Abbildung 45: Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen der Exzentrizität der Haut; die schwarzen Balken stellen die Abweichung von den berechneten Ergebnissen dar

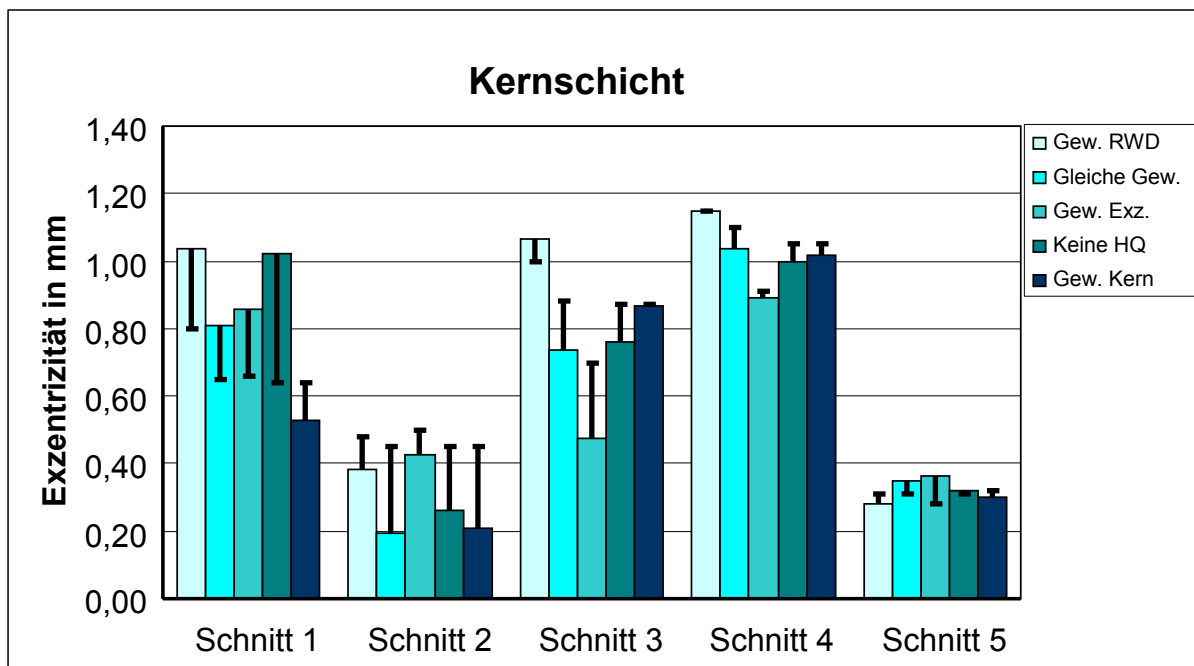


Abbildung 46: Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen der Exzentrizität des Kerns; die schwarzen Balken stellen die Abweichung von den berechneten Ergebnissen dar

Wie schon die Prozessanpassung (

5. Spritzgießversuche

Tabelle 3) durch niedrige Werte zeigt, ist die Qualität der Vorhersage für die Exzentrizität schlechter als die für die RWD. Die durchschnittliche Exzentrizität der Haut beträgt 0,26 mm und die durchschnittliche Abweichung 0,05 mm. Daraus ergibt sich eine Abweichung zwischen Vorhersage und Ergebnis von 19,2 %. Etwas geringer fällt die Abweichung bei der Exzentrizität des Kerns aus. Mit einer durchschnittlichen Exzentrizität von 0,65 mm und einer Abweichung der berechneten Werte von 0,11 mm ergeben sich 16,9% Unterschied.

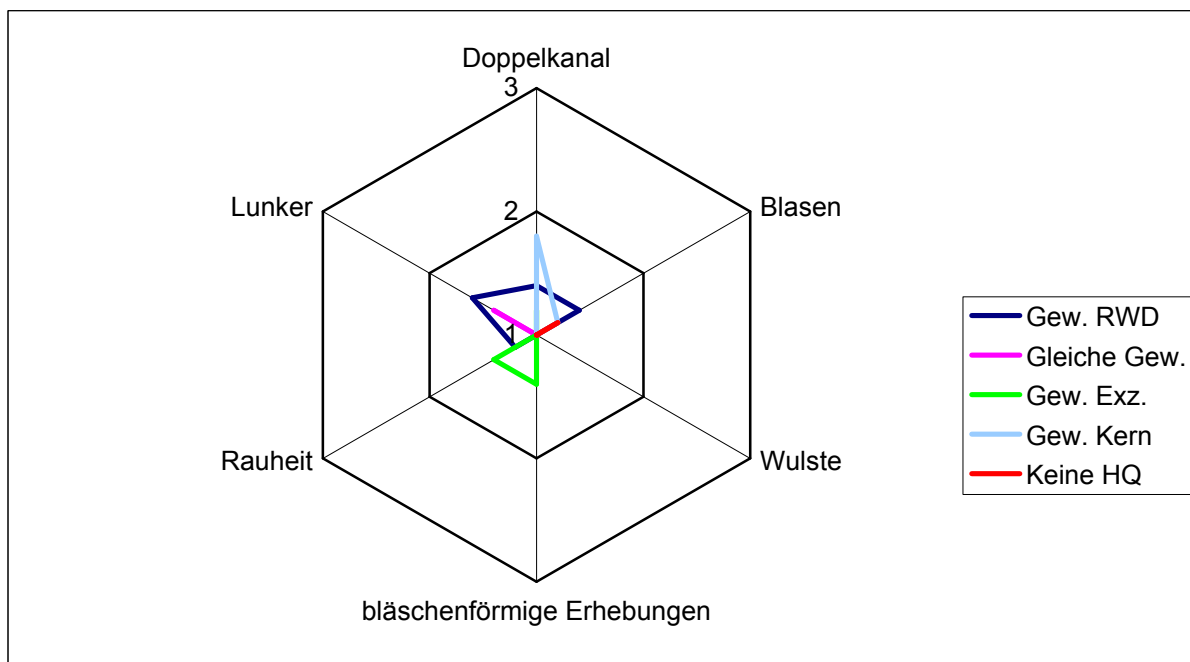


Abbildung 47: Hohlraumqualität der einzelnen Gewichtungen der Optimierung

Die besten Ergebnisse für die Hohlraumqualität wurden mit den Einstellungen für gleiche Gewichtung aller Zielgrößen und mit dem Weglassen der Zielgröße Hohlraumqualität erzielt. Dies bedeutet, dass das Modell für eine Optimierung der Hohlraumqualität nicht geeignet ist, da es ohne die Berücksichtigung dieser Zielgröße zu dem besten Ergebnis führten.

Das beste Gesamtergebnis konnte mit den berechneten Einstellungen für die gleiche Gewichtung aller Zielgrößen erzielt werden. Mit Hilfe des mit ASSISTANT erstellten Modells lässt sich die RWD der Haut gut vorhersagen. Bei den anderen Zielgrößen traten teils große Abweichungen zwischen den berechneten- und den gemessenen Werten auf.

5.2.3 Vergleich der Ergebnisse zwischen Standard- und optimierten Einstellungen

Um zu verdeutlichen, welchen Erfolg die Optimierung brachte, werden in diesem Abschnitt die Resultate für den Referenzversuch dem besten Ergebnis der Optimierung gegenübergestellt. Als bestes Resultat der Optimierung werden die Parameter für eine gleiche Gewichtung aller Zielgrößen herangezogen. In Tabelle 6 sind die in dieser Arbeit gefundenen optimierten Parameter der Anfänglichen gegenübergestellt.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Parametereinstellungen von Standard- und optimierten Einstellungen

Prozessparameter	Standardeinstellung	Optimierte Einstellung
Kernzylindertemperatur (°C)	280	268
Wasserverzögerungszeit (s)	0	0,4
Verzögerung Haut - Kerneinspritzung (s)	0	1,8
Werkzeugvorlauftemperatur (°C)	90	75
Hautzylindertemperatur (°C)	285	306
Wasservolumenstrom (cm ³ /s)	30	56,6
Kernmassevolumenstrom (cm ³ /s)	60	89,9

Abbildung 47 zeigt, dass durch die optimierten Einstellungen die Wanddicken reduziert wurden. Die durchschnittliche Hautwanddicke reduzierte sich vom Standardversuch mit 2,3 mm auf 2,1 mm nach der Optimierung. Die Kernwanddicke wurde von durchschnittlich 1,5 mm auf 1,2 mm verringert.

5. Spritzgießversuche

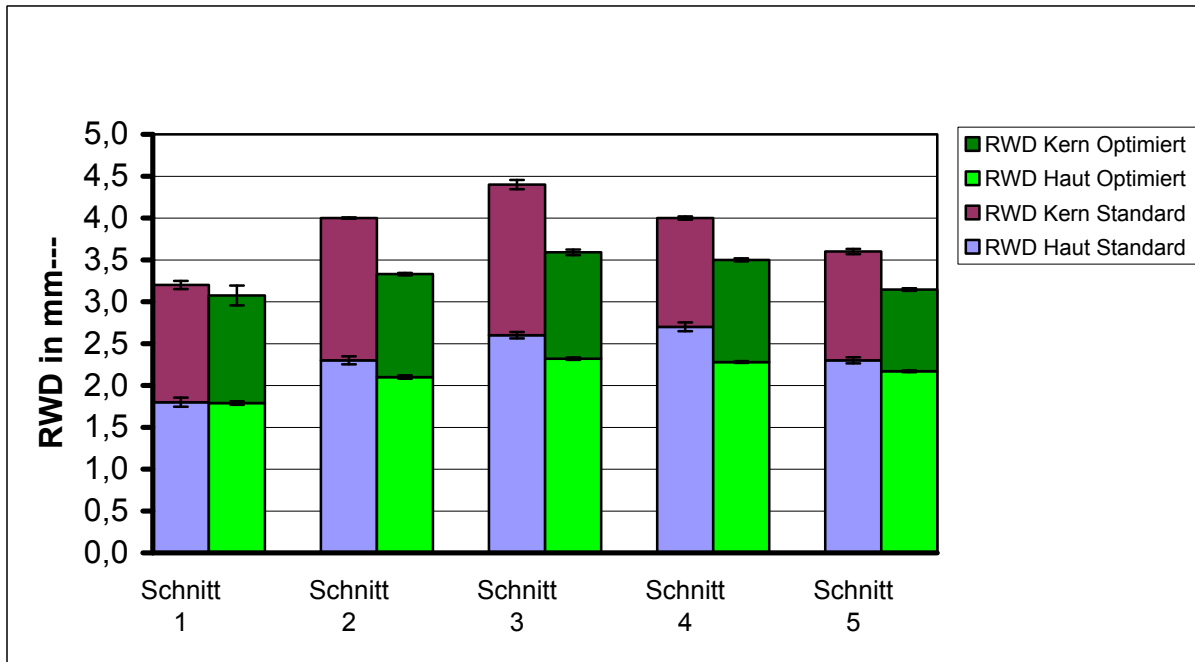


Abbildung 48: Vergleich der RWD zwischen dem Referenzversuch und den optimierten Einstellungen

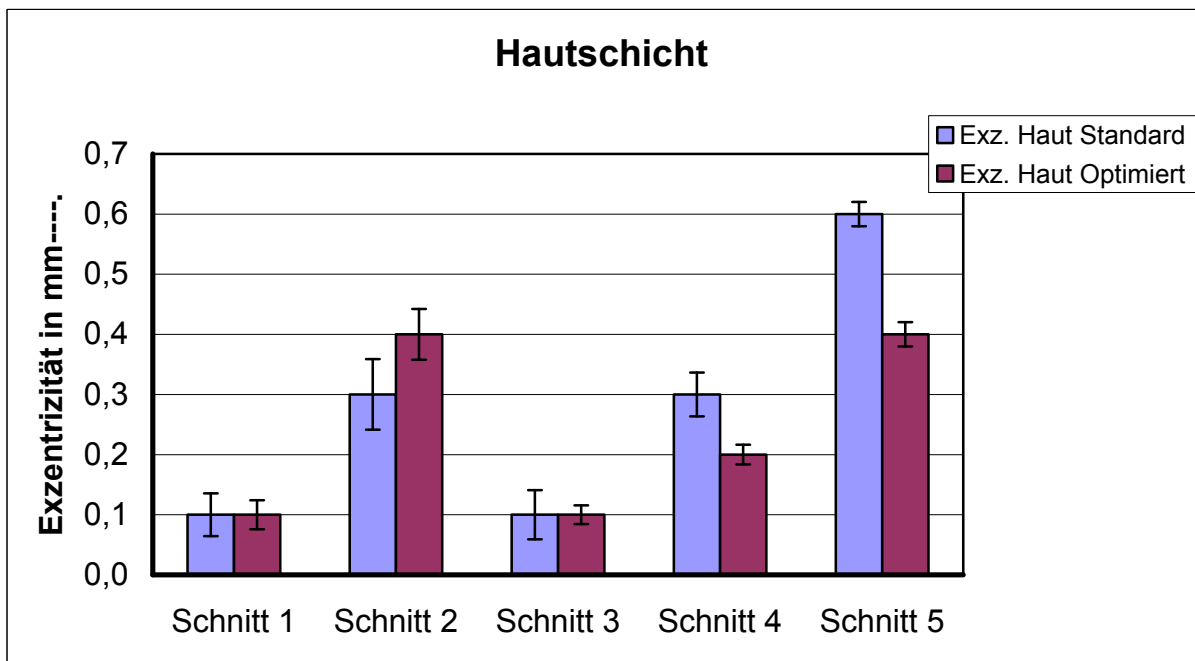


Abbildung 49: Vergleich der Exzentrizitäten der Hautschicht zwischen Standard – und Optimiertem Versuch

5. Spritzgießversuche

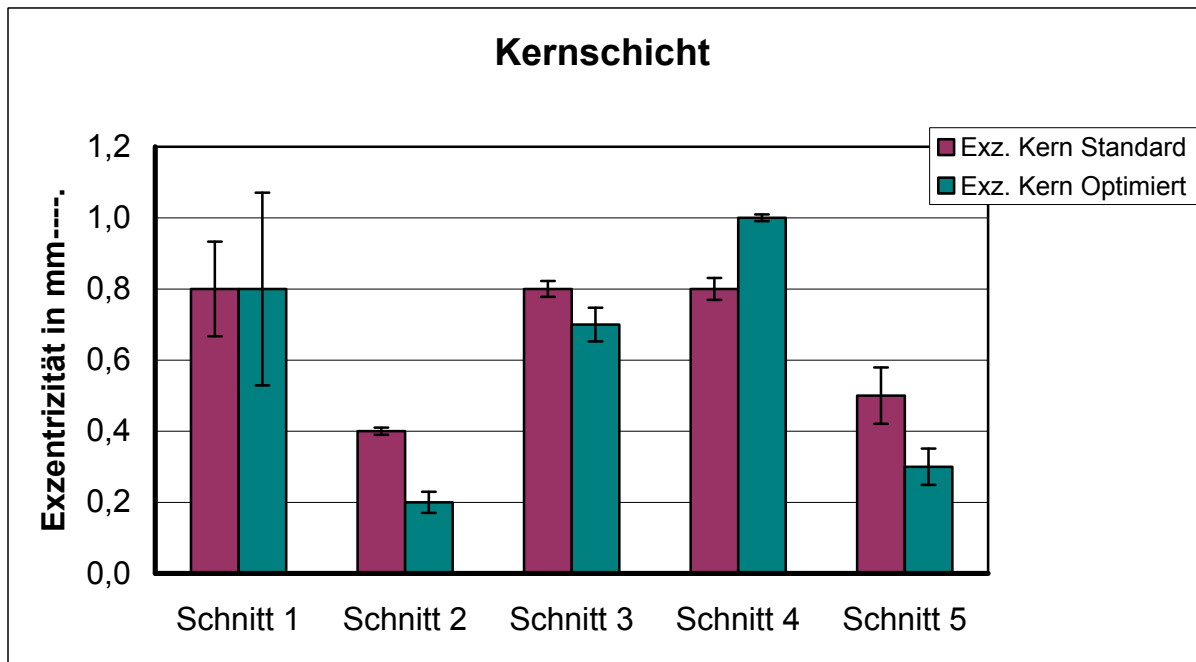


Abbildung 50: Vergleich der Exzentrizitäten der Kernschicht zwischen Standard – und Optimiertem Versuch

Bei den Exzentrizitäten ergibt sich durchschnittlich nur eine kleine Verbesserung im Vergleich zum Referenzversuch. Betrachtet man die einzelnen Schnitte, treten einmal bei Schnitt 2 der Hautschicht (siehe Abbildung 49) und einmal bei Schnitt 4 der Kernschicht Verschlechterungen auf (siehe Abbildung 50).

5. Spritzgießversuche

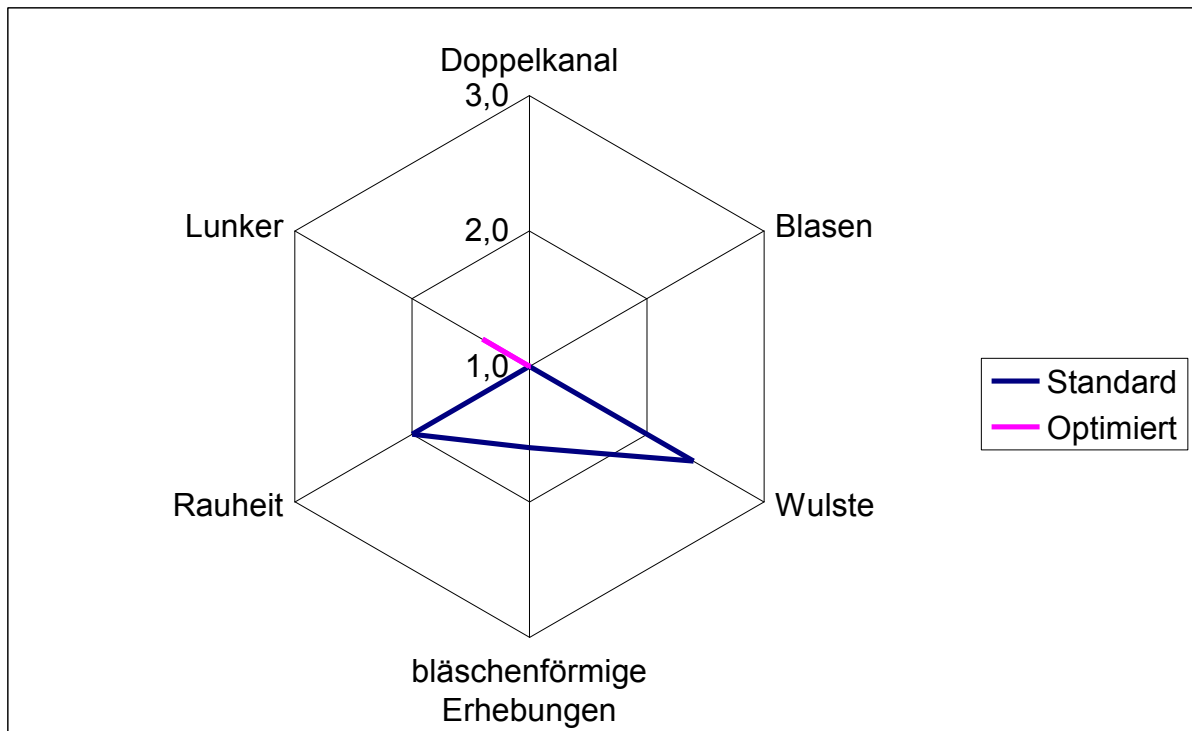


Abbildung 51: Vergleich der Hohlraumqualität zwischen Standard- und Referenzversuch

Die Hohlraumqualität hat sich durch die optimierten Prozessparameter deutlich verbessert. Es treten keine Wulste mehr auf und die Oberfläche hat eine geringe Rauigkeit (siehe Abbildung 50). Allerdings traten bei 2 Probekörpern kleine Luncker auf.

6 Untersuchungen zur Ultraschall-Wanddickenmessung

Im Zuge dieser Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Firma UAR Linz, Österreich, eine Machbarkeitsstudie zur Ultraschall - Wanddickenmessung durchgeführt. Interessant ist diese Technologie für eine zerstörungsfreie Qualitätssicherung. Dabei wurde untersucht, ob es möglich ist, sowohl Haut- als auch Kernschicht sowie die Gesamtwanddicke zu vermessen.

6.1 Grundlagen der Ultraschall - Wanddickenmessung

Die häufigste Anwendung der Ultraschall (US)-Technik ist die zerstörungsfreie Materialprüfung. Dabei können Fehlstellen wie Lunker, Risse und Einschlüsse erkannt werden. In der Kunststoffindustrie findet die US-Technik vorwiegend für die Wanddickenmessung bei der Rohrextrusion sowie der Blasform-Technik Anwendung [14]. Bei vorliegender Untersuchung wird das sogenannte Impuls-Echo Verfahren verwendet. Im Prinzip ist dieses Verfahren eine Laufzeitmessung zwischen zwei US-Signalen, dem Eintrittsecho und dem Rückwandecho. Das Prinzip ist in Abbildung 52 zu sehen. Der US-Sensor wird über ein Koppelmedium, meist Wasser, an das Werkstück angekoppelt. Über das Koppelmedium wird die Ultraschallenergie vom Sensor auf das Werkstück übertragen. Der Sensor fungiert sowohl als Sender als auch als Empfänger der US-Signale. Das heißt, die Laufzeit (T) des Impulses vom Eintritt in das Werkstück bis zum Wiederaustritt des Echos entspricht der doppelten Dicke (s) des Prüflings. Mit der Schallgeschwindigkeit (v) erhält man die Wanddicke (siehe Abbildung 52). Voraussetzung für eine präzise Messung der Wanddicke ist eine genaue Kenntnis der Schallausbreitungsgeschwindigkeit im jeweiligen Werkstoff. In diesem Zusammenhang ist speziell bei Kunststoffen zu beachten, dass Temperaturänderungen einen großen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit und Dämpfung haben. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Schallausbreitungsgeschwindigkeit, während die Dämpfung zunimmt. Auch diverse Füllstoffe können einen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung haben.

Bei mehrschichtigen Bauteilen ist darauf zu achten, dass die Schallenergie ausreicht, alle Schichten zu durchdringen. Ob eine Auswertung der US - Signale möglich ist, hängt zum Einen von den Dicken und zum Anderen von den Materialeigenschaften der angrenzenden Schichten ab und muss für jeden Einzelfall untersucht werden.

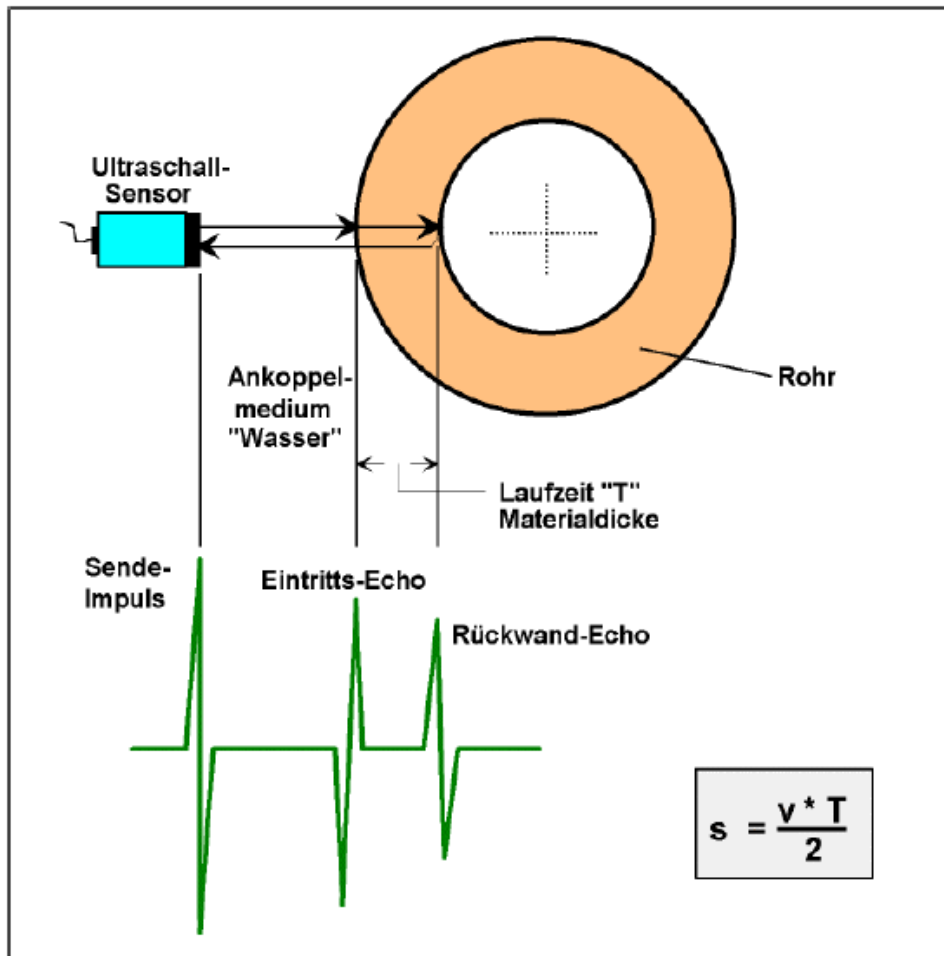


Abbildung 52: Prinzip der Ultraschall – Wanddickenmessung [14]

6.2 Messaufbau und Messverfahren

Als Messverfahren wird die Ultraschalltauchtechnik angewendet, da eine Messung mit Kontakttechnik aufgrund der Krümmungsradien der Medienleitung nicht möglich ist.

Der einfacheren Handhabung wegen wurde ein Teilstück aus dem Rohr geschnitten und in einen improvisierten Messaufbau geklemmt (Abbildung 53). Die Messung wurde, wie bereits erwähnt, in der Tauchtechnik durchgeführt. Dabei dient Wasser als Koppelmedium, um die Schallwellen zu übertragen. Um gleichmäßig über den Umfang verteilte Wanddickenwerte zu erhalten, wurde die Probe händisch gedreht. Über den Drehwinkelgeber konnten somit winkelsynchrone Ultraschallsignale aufgezeichnet werden. Um größere Bereiche der Rohrleitung messen zu können, wurde die Probe vertikal über einen Linearschlitten verschoben.

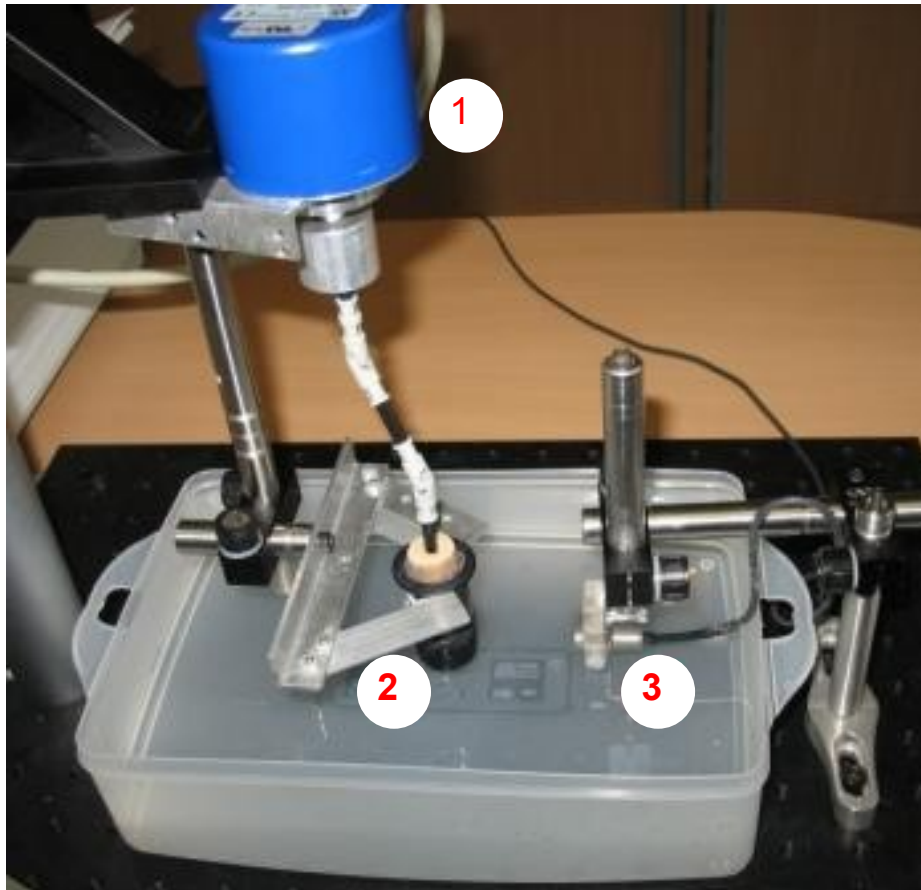


Abbildung 53: Messaufbau für die Ultraschall - Wanddickenmessung.
1- Drehencoder zur Winkelsynchronen Aufzeichnung,
2- Probenhalter,
3- Tauchtechnikprüfkopf (10 MHz)

6.3 Messergebnisse

In *Abbildung 54* sind die Ergebnisse der Ultraschallwanddickenmessung dargestellt. Die mit der US-Technik erhaltenen Ergebnisse stimmen in den Proportionen mit den händisch vermessenen Werten überein (siehe *Abbildung 54*). Die Absolutwerte weichen allerdings ab, da die Schallausbreitungsgeschwindigkeiten im verwendeten PA und PP nicht bekannt sind und mit 2700 m/s abgeschätzt wurden. Zu Problemen bei der Messung mit Ultraschall kam es insbesondere bei Schrägen in der Außenkontur sowie bei zu geringen Wanddicken.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Wanddickenmessung mit Ultraschall möglich ist. Für präzise Ergebnisse ist jedoch die genaue Kenntnis der Schallgeschwindigkeiten im jeweiligen Material notwendig. Für die Anwendung zur Qualitätssicherung in der Produktion ist jedoch eine umfangreichere Machbarkeitsstudie notwendig.

6. Untersuchungen zur Ultraschall-Wanddickenmessung

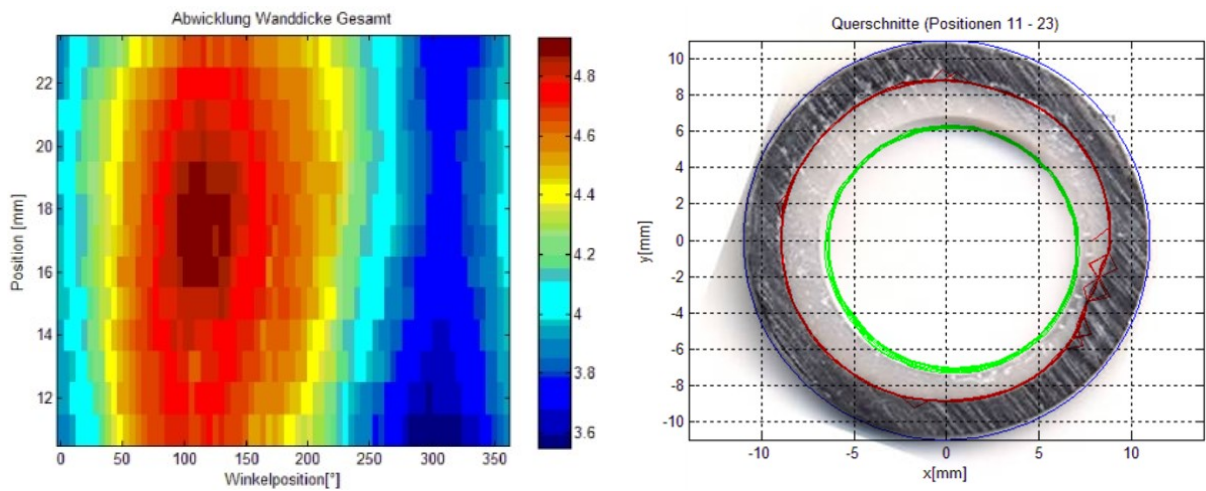


Abbildung 54: Ergebnisse der US – Wanddickenmessung:
links: Ergebnis der Gesamtschichtdicke über den Umfang als farbcodierte Abwicklung,
rechts: als übereinandergelegte Querschnitte

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde in Hinblick auf Zielgrößen wie Wanddicken, deren Verteilung und Hohlraumqualität untersucht, welchen Einfluss Prozessparameter auf den Formteilbildungsprozess haben. Durch eine Literaturstudie und Diskussionen wurden mögliche relevante Parameter identifiziert. Durch Vorversuche wurde verifiziert, welche Parameter den größten Einfluss auf die Zielgrößen haben. Dabei kristallisierten sich sieben Parameter heraus:

- Hautzylindertemperatur
- Kernzylindertemperatur
- Werkzeugtemperatur
- Wassereinspritzverzögerungszeit
- Verzögerungszeit zwischen Haut- und Kerneinspritzung
- Wasservolumenstrom
- Kernmassevolumenstrom

Im Anschluss wurde mit Hilfe von ASSISTANT, einer Versuchsplanungs- und Optimierungssoftware, mit den zuvor erwähnten Parametern ein statistischer Versuchsplan erstellt. Mit den Ergebnissen wurde ein mathematisches Modell für den Zusammenhang von Parametern und Zielgrößen erstellt und durchgeführt.

Anschließend wurden die Parameter in Richtung geforderter Wanddicke, deren Verteilung und Hohlraumqualität optimiert. Darüber hinaus wurde noch eine Machbarkeitsstudie für eine Ultraschall-Wanddickenmessung erstellt.

Die Untersuchungen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, zeigten, dass eine Beeinflussung der Zielgrößen RWD, Exzentrizität sowie Hohlraumqualität durch Parametervariation im Spritzgießprozess möglich ist. Eine Einflussnahme durch die Prozessparameter ist jedoch nur in begrenztem Maße erfolgt. Den größten Einfluss haben die Verzögerungszeiten zwischen den sequentiellen Injektionsstufen, die Zylindertemperaturen und somit Massetemperaturen und die Einspritzgeschwindigkeiten des Wassers und der Kernkomponente.

Die RWD der Haut konnte am stärksten durch die Verzögerungszeiten und die Werkzeugwandtemperatur beeinflusst werden. Die Exzentrizität der Hautschicht lässt sich durch die Prozessparameter nur sehr gering verändern. Generell ist die Exzentrizität der Haut jedoch gering im Vergleich zur Kernkomponente.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die RWD des Kerns lässt sich durch Massetemperaturen und Kernvolumenstrom am besten beeinflussen. Am Fließweganfang hat auch der Wasservolumenstrom einen signifikanten Einfluss auf die RWD der Kernschicht. Ebenso einen deutlichen Einfluss zeigte der Wasservolumenstrom am Rohranfang auf die Exzentrizität des Kerns. Die größten Veränderungen der Exzentrizität der Kernschicht konnten mit den Massetemperaturen erzielt werden. Sehr hohe oder niedrige Wasservolumenströme haben einen negativen Einfluss auf die Hohlraumqualität. Ebenso negative Auswirkungen hat eine zu niedrige Kernmassetemperatur, da bei den Experimenten Lunker und Doppelkanäle auftraten. Allerdings konnten die bläschenförmigen Erhebungen vermieden werden. Die besten Ergebnisse für die Hohlraumqualität lieferten hohe Hautmassetemperaturen.

Die Erkenntnisse aus den Vorversuchen wurden bei der Optimierung bestätigt. Durch die Optimierung konnte eine Verbesserung der Zielgrößen erreicht werden. Als Parametereinstellungen mit den besten Ergebnissen zeigten sich eine hohe Hautmassetemperatur, ein mittlerer Wasservolumenstrom, ein relativ hoher Kernvolumenstrom und geringe Verzögerungszeiten. Die Zielvorgaben von der RWD und Exzentrizität konnten trotz der Optimierung nicht erreicht werden und es scheint auch unmöglich, diese mit den vorhandenen Gegebenheiten durch Parametervariation zu realisieren.

Es wird sich erst in praxisnahen Untersuchungen bestätigen, ob die erreichten Verbesserungen der Medienleitung auch zu einem Erfolg in der Praxis führen können.

Die Machbarkeitsuntersuchung zur Ultraschall-Wanddickenmessung zeigte, dass es mit den gegebenen Materialien prinzipiell möglich ist, die Wandstärken beider Schichten zu messen. Für eine Umsetzung in der Serienfertigung sind aber noch weitere Untersuchungen nötig. Vor allem ist es wichtig, die genaue Schallausbreitungsgeschwindigkeit der Materialien zu kennen.

Bei der Auslegung eines für Wasserinjektionstechnik bestimmten Werkzeuges zur Herstellung einer Zwei-Komponenten Medienleitung empfiehlt es sich, Kernzüge im Bereich des Rohres zu haben. Ansonsten kann es im Rohrhohlraum zu Wulstbildungen kommen. Ebenso empfehlenswert ist ein stechender Injektor, da dieser einen definierten Wasservolumenstrom in die Schmelze einleitet und so zu einer verbesserten Hohlraumbildung beiträgt. Bei der Konstruktion der Medienleitung ist es sinnvoll, scharfe Umlenkungen bzw. Abzweigungen zu vermeiden.

Die verwendete Technologie und Materialkombination hat aufgrund des entstehenden Mehrwertes für den Kunden in Zukunft ein großes Potential, speziell im

7. Zusammenfassung und Ausblick

Bereich der Medienleitungen. Es besteht aber noch Forschungsbedarf, um den Prozess und die Auslegung der Injektoren und Werkzeuge noch besser im Griff zu haben und zu gestalten.

8 Literaturverzeichnis

- [1] *Neuß, A.*: Untersuchungen zum Einfluss von Prozessparametern und Verfahrensvarianten auf den Formteilbildungsprozess von zweischichtigen Kunststoff-Hohlkörpern hergestellt mittels Fluidinjektionstechnik. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Diplomarbeit, September 2005
- [2] *Knappe W.; Lampl A.; Heuel O.*: Kunststoff-Verarbeitung und Werkzeugbau. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1992
- [3] *Kühnert, I.*: Grenzflächen beim Mehrkunststoffspritzgießen. Fakultät für Maschinenbau, TU Chemnitz, Dissertation, 2005
- [4] *Arping, T.*: Untersuchungen zum Einfluss des Materialverhaltens auf die Restwanddickenausbildung bei der Herstellung von ein- und mehrschichtigen Medienleitungen mit der Wasserinjektionstechnik. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Diplomarbeit, 2004
- [5] *Bröker, R.*: Konstruktion und Auslegung eines Spritzgießwerkzeugs zur Herstellung von sequentiell aufgebauten Kunststoffhohlkörpern mittels der Kombination von Biinjektionstechnik und Fluidinjektionstechnik. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Diplomarbeit, März 2007
- [6] *Helbich, B.*: Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Ausbildung der Restwanddicke von ein- und zweischichtigen polymeren Hohlkörpern. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Diplomarbeit, 2005
- [7] *Eyerer, P.; Elsner, P.*: Gasinjektionstechnik. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2003
- [8] Dampfdrucktabelle des Wassers
<http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/U4BKDYDK7NTLWWFQ10TUFUCKJMTEE3Y>
- [9] Steinbichler, G.: Coinjektionstechnik. Interne Information der Firma Engel, 2007
- [10] *Lanvers, A. P.*: Analyse und Simulation des Kunststoff-Formteilbildungsprozesses bei der Gasinjektionstechnik (GIT). Dissertation, RWTH Aachen, 1993
- [11] Zipp, Th.: Fließverhalten beim 2-Komponenten-Spritzgießen. Dissertation, RWTH Aachen, 1992
- [12] Pohl, T.C.: Untersuchungen zum Formteilbildungsprozeß bei der Wasserinjektionstechnik. unveröffentlichte Diplomarbeit, RWTH Aachen, 1999

8. Literaturverzeichnis

- [13] Jüntgen, T.: Injektortechnik und Prozessuntersuchungen bei der Gas- und Wasserinjektionstechnik. Dissertation, RWTH Aachen, 2004
- [14] *Katten, W.*: Gravimetrik und Ultraschall – Messtechnik. Vortragsmanuskript, April 2001
- [15] Du Pont Materialdatenblatt Zytel 70G30HSLR, Bynel 50E571, 50E739, 50E806
<http://www.dupont.com>

9 Anhang

9.1 Optimierte Maschineneinstellungen

Es handelt sich um einen Ausdruck aus der Steuerung der Engel Spritzgießmaschine. Manche Bezeichnungen können von den gängigen abweichen.

Einspritzen 1

Einspritzgeschwindigkeit

V 0,0 27,7 55,5 70,0 90,0 138,7 166,4 194,2 221,9 249,6 cm³

v 46,3 46,3 46,3 65,3 65,3 65,3 65,3 65,3 65,3 65,3 cm³/s

Aktiviert EIN

Einspritzdruck

Spez. Spritzdruckgrenze 2332,0 bar

Spritzen stoppen bei Druckgrenze AUS

Erhöhter spezifischer Spritzdruck EIN

Spritzzeitüberwachung 3,93 s

Min. Spritzzeit 0,00 s

Max. Spritzzeit 30,00 s

Intrusion

Intrusionszeit 0,0 s

Intrusionsgeschwindigkeit 0,301 m/s

Einspritzen 2

Einspritzgeschwindigkeit

V 0,0 14,1 28,2 42,3 56,4 70,5 84,6 98,7 120,0 128,0 141,0 cm³

v 30,0 30,0 89,9 89,9 89,9 89,9 89,9 89,9 89,9 89,9 89,9 cm³/s

Aktiviert EIN

Spezifischer Einspritzdruck

9. Anhang

Spez. Spritzdruckgrenze 2022,6 bar

Spritzen stoppen bei Druckgrenze AUS

Erhöhter spezifischer Spritzdruck EIN

Spritzzeitüberwachung 1,23 s

Min. Spritzzeit 0,00 s

Max. Spritzzeit 30,00 s

Intrusion

Intrusionszeit 0,0 s

Intrusionsgeschwindigkeit 0,419 m/s

Umschaltart 1

Volumenabhängig umschalten EIN

Umschaltvolumen 16,0 cm³

Einfahrzyklen Umschaltvolumen 60,4 cm³

Aktuelles Umschaltvolumen 15,98 cm³

Zeitabhängig umschalten AUS

Umschaltzeit 4,80 s

Einspritzdruck umschalten AUS

Spez. Umschaltdruck 200,0 bar

Umschaltbereich 0,0 cm³

Spez. Druck beim Umschalten 700,4 bar

Spez. Einspritzdruck Spitzenwert 700,4 bar

Extern umschalten AUS

Paralleles Umschalten AUS

Umschaltbereich 0,0 cm³

Umschaltart 2

9. Anhang

Volumenabhängig umschalten EIN

Umschaltvolumen 40,0 cm³

Einfahrzyklen Umschaltvolumen 50,0 cm³

Aktuelles Umschaltvolumen 39,99 cm³

Zeitabhängig umschalten AUS

Umschaltzeit 30,00 s

Einspritzdruck umschalten AUS

Spez. Umschaltdruck 0,0 bar

Umschaltbereich 0,0 cm³

Extern umschalten AUS

Paralleles Umschalten AUS

Umschaltbereich 0,0 cm³

Nachdruck 1

Spezifischer Nachdruck

t 0,0 0,17 0,33 0,50 0,67 0,83 1,00 1,17 1,33 0,00 s

P 466,4 466,4 466,4 466,4 466,4 466,4 466,4 466,4 466,4 466,4 bar

Nachdruckzeit

Nachdruckzeit 0,00 s

Polsterüberwachung AUS

Polstervolumen Istwert 15,94 cm³

Min. Polster 0,0 cm³

Max. Polster 0,0 cm³

Kühlzeit

Kühlzeit 45,00 s

Dosiervolumen

Dosiervolumen 230,0 cm³

Schneckendurchmesser

Schneckendurchmesser 50,0 mm

2-Komponentenspritzen

2-Komponentenspritzen EIN

Hautkomponente

Hautkomponente Aggregat	1
Hautkomponente verschraubt	AUS
Zuschaltvolumen Hautkomponente	32,0 cm ³
Volumenanteil Hautkomponente	214,1 cm ³
Prozentueller Volumenanteil Hautkomponente	69,2 %

Kernkomponente

Kernkomponente Aggregat	2
Kernkomponente verschraubt	EIN
Zuschaltvolumen Kernkomponente	60,4 cm ³
Volumenanteil Kernkomponente	95,2 cm ³
Prozentueller Volumenanteil Kernkomponente	30,8 %

Nachdruck 2

Spezifischer Nachdruck

t	0,0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,00 s
P	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0 bar

Nachdruckzeit

Nachdruckzeit 0,00 s

Polsterüberwachung AUS

Polstervolumen Istwert	39,85 cm ³
Min. Polster	0,0 cm ³
Max. Polster	0,0 cm ³

Kühlzeit

Kühlzeit 45,00 s

Dosiervolumen

Dosiervolumen 135,0 cm³

Schneckendurchmesser

Schneckendurchmesser 40,0 mm

Dosieren 1

Dosiergeschwindigkeit

V 0,0 46,0 92,0 138,0 184,0 230,0 cm³

v 0,400 0,400 0,400 0,400 0,400 0,400

Spezifischer Staudruck

V 0,0 46,0 92,0 138,0 184,0 230,0 cm³

P 91,8 91,8 91,8 91,8 91,8 91,8

Dosiervolumen

Dosiervolumen 230,0 cm³

Dosierverzögerungszeit 0,0 s

Dosierzeitüberwachung **EIN**

Min. Dosierzeit 0,0 s

Max. Dosierzeit 30,0 s

Dosierzeit letzter Zyklus 1 10,24 s

Kompressionsentlastung

Entlastung vor Dosieren 0,0 cm³

Entlastung nach Dosieren 19,6 cm³

Entlastung Ende 249,6 cm³

Entlastungsgeschwindigkeit vor Dosieren 159,0 cm³/s

Entlastungsgeschwindigkeit nach Dosieren 159,0 cm³/s

Drehmoment

Drehmoment Spitzenwert letzter Zyklus 485,1 Nm

Drehmoment Spitzenwert laufender Zyklus 1 482,3 Nm

Drehmoment Mittelwert letzter Zyklus 443,6 Nm

Drehmoment Mittelwert laufender Zyklus 1 441,3 Nm

Dosierleistung 1 0,0 kW

Max Drehmoment 1290 Nm

Durchwärmungsprüfung

Maximales Drehmoment bei Durchwärmungsprüfung 384,0 Nm

Dosiergeschwindigkeit während Durchwärmungsprüfung 0,100 m/s

Durchwärmungsprüfungsdauer 5,0 s

Nachdurchwärmungszeit 120,0 s

Dosieren 2

Dosiergeschwindigkeit

V 0,0 54,0 108,0 135,0 cm³

v 0,300 0,300 0,300 0,300

Spezifischer Staudruck

V 0,0 54,0 108,0 135,0 cm³

P 75,8 75,8 75,8 75,8

Dosiervolumen

Dosiervolumen 135,0 cm³

Dosierverzögerungszeit 12,0 s

Dosierzeitüberwachung **AUS**

Min. Dosierzeit 0,0 s

Max. Dosierzeit 30,0 s

Dosierzeit letzter Zyklus 2 7,01 s

Kompressionsentlastung

Entlastung vor Dosieren 0,0 cm³

Entlastung nach Dosieren 6,0 cm³

Entlastung Ende 141,0 cm³

Entlastungsgeschwindigkeit vor Dosieren 96,2 cm³/s

Entlastungsgeschwindigkeit nach Dosieren 96,2 cm³/s

Drehmoment

Drehmoment Spitzenwert letzter Zyklus 144,9 Nm

Drehmoment Spitzenwert laufender Zyklus 2 143,6 Nm

Drehmoment Mittelwert letzter Zyklus 135,6 Nm

Drehmoment Mittelwert laufender Zyklus 2 135,1 Nm

Dosierleistung 2 0,0 kW

Max Drehmoment 520 Nm

Durchwärmungsprüfung

Maximales Drehmoment bei Durchwärmungsprüfung 225,0 Nm

Dosiergeschwindigkeit während Durchwärmungsprüfung 0,100 m/s

Durchwärmungsprüfungsdauer 5,0 s

Nachdurchwärmungszeit 120,0 s

9.2 Hauptversuchsplan

Dieser Versuchsplan wurde mit Hilfe von ASSISTANT (Optimierungssoftware) erstellt. Es sind 16 Versuche mit je 5 Wiederholungen. Die Ergebnisse dienen der Prozessoptimierung.

Versuch Nr.	Kerntemp. (°C)	Verz. Wasser (s)	Verz. Haut - Kern (s)	Werkz.temp. (°C)	Hauttemp. (°C)	Wasser Vstr. (cm ³ /s)	Kern Vstr. (cm ³ /s)
1	280	4	3	90	330	20	100
2	280	0	0	90	330	90	10
Versuch Nr.	Kerntemp. (°C)	Verz. Wasser (s)	Verz. Haut - Kern (s)	Werkz.temp. (°C)	Hauttemp. (°C)	Wasser Vstr. (cm ³ /s)	Kern Vstr. (cm ³ /s)
3	280	0	0	70	330	90	100
4	280	4	3	70	330	20	10
5	280	4	3	90	285	90	100
6	280	0	0	90	285	20	10
7	280	0	0	70	285	20	100
8	280	4	3	70	285	90	10
9	240	4	0	90	330	20	100
10	240	0	3	90	330	90	10
11	240	0	3	70	330	90	100
12	240	4	0	70	330	20	10
13	240	4	0	90	285	90	100
14	240	0	3	90	285	20	10
15	240	0	3	70	285	20	100
16	240	4	0	70	285	90	10

9.3 Ergebnisse der Hauptversuche

In Tabelle 7 sind für den ersten Hauptversuch die Einzelergebnisse für die Wanddicken und den daraus berechneten Exzentrizitäten dargestellt. L PA steht hierbei für Links und Polyamid, d. h. die linke Hautschichtdicke. L PP steht folglich für die linke Kernschichtdicke usw.

Tabelle 7: Einzelergebnisse des ersten Hauptversuches

	L PA	L PP	O PA	O PP	R PA	R PP	U PA	U PP	Exz. PA	Exz. PP	PA	PP
HV1-1												
Schnitt 1	1,6	3	1,7	1,5	1,8	0,8	1,6	2,1	0,1	1,1	1,7	1,9
Schnitt 2	1,7	1,7	2,2	2,2	2,5	1,7	1,8	1,7	0,4	0,3	2,1	1,8
Schnitt 3	2,2	1,2	2,5	3,3	2,2	1,7	2,5	1,4	0,0	1,0	2,4	1,9
Schnitt 4	2,1	3,8	2,7	0,7	2,3	0,5	2,6	1,8	0,1	1,7	2,4	1,7
Schnitt 5	2,4	1	2,6	0,9	1,7	1,2	2,3	1,2	0,4	0,2	2,3	1,1
HV1-2												
Schnitt 1	1,8	2,9	1,8	1,4	1,9	1	1,7	2	0,1	1,0	1,8	1,8
Schnitt 2	1,9	1,5	2,2	2,4	2,5	1,8	1,8	1,4	0,4	0,5	2,1	1,8
Schnitt 3	2,1	1,2	2,6	2,9	2,4	1,5	2,4	1,2	0,2	0,9	2,4	1,7
Schnitt 4	2,1	3,2	2,6	0,9	2,5	0,5	2,6	1,8	0,2	1,4	2,5	1,6
Schnitt 5	2,6	0,9	2,6	1	1,7	1,3	2,4	1,2	0,5	0,2	2,3	1,1
HV1-3												
Schnitt 1	1,8	2,8	1,8	1,2	1,8	1	1,7	1,7	0,1	0,9	1,8	1,7
Schnitt 2	1,9	1,4	2,2	2,1	2,4	1,8	1,8	1,6	0,3	0,3	2,1	1,7
Schnitt 3	2,2	1,2	2,4	3,2	2,4	1,4	2,5	1,1	0,1	1,1	2,4	1,7
Schnitt 4	2	3,1	2,7	1	2,4	0,5	2,5	1,7	0,2	1,3	2,4	1,6
Schnitt 5	2,6	1	2,5	1,1	1,7	1,5	2,5	1,1	0,5	0,3	2,3	1,2
HV1-4												
Schnitt 1	1,7	2,8	1,8	1,4	1,8	0,7	1,7	1,9	0,1	1,1	1,8	1,7
Schnitt 2	1,9	1,4	2,1	2,3	2,6	1,9	1,9	1,5	0,4	0,5	2,1	1,8
Schnitt 3	2,2	1,2	2,6	3	2,4	1,5	2,5	1,2	0,1	0,9	2,4	1,7
Schnitt 4	2,1	3,1	2,7	1	2,5	0,6	2,5	1,7	0,2	1,3	2,5	1,6
Schnitt 5	2,5	0,9	2,5	1	1,7	1,4	2,4	1,2	0,4	0,3	2,3	1,1
HV1-5												
Schnitt 1	1,7	2,9	1,7	1,3	1,7	0,9	1,7	1,8	0,0	1,0	1,7	1,7
Schnitt 2	1,9	1,5	2,1	2,4	2,6	1,9	1,8	1,5	0,4	0,5	2,1	1,8
Schnitt 3	2,2	1,2	2,5	3,2	2,3	1,5	2,6	1,1	0,1	1,1	2,4	1,8

9. Anhang

Schnitt 4	2	3,1	2,6	1	2,4	0,5	2,5	1,7	0,2	1,3	2,4	1,6
Schnitt 5	2,5	1	2,5	1	1,8	1,8	2,4	1,2	0,4	0,4	2,3	1,3

In Tabelle 8 sind, für die 16 Hauptversuche, die Durchschnittswerte (von 5 Wiederholungen jedes Versuches) der RWD und Exzentrizität für Haut und Kernschicht aufgeführt.

Tabelle 8: Einzelergebnisse der 16 Hauptversuche für die RWD sowie Exzentrizitäten von Haut- und Kernschicht. Es sind die Durchschnittswerte aus jeweils 5 Versuchen für die jeweiligen Schnitte angegeben.

Hauptversuch 1	Wanddicke									
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5				
	Haut	1,7	2,1	2,4	2,4	2,3				
	Kern	1,8	1,8	1,8	1,6	1,1				
	Summe	3,5	3,9	4,1	4,0	3,4				
	Exzentrizität									
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5				
	Haut	0,06	0,37	0,09	0,19	0,41				
	Kern	1,04	0,41	0,97	1,43	0,27				
Hauptversuch 2	Wanddicke									
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5				
	Haut	1,7	2,1	2,5	2,4	2,5				
	Kern	2,1	2,2	1,5	1,3	0,9				
	Summe	3,8	4,2	4,0	3,7	3,4				
	Exzentrizität									
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5				
	Haut	0,15	0,19	0,17	0,12	0,43				
	Kern	0,92	0,63	0,62	1,08	0,30				
Hauptversuch 3	Wanddicke									
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5				
	Haut	1,6	1,9	2,4	2,3	2,0				
	Kern	1,0	1,4	1,5	1,3	1,1				
	Summe	2,6	3,3	3,8	3,5	3,1				
	Exzentrizität									
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5				
	Haut	0,20	0,35	0,10	0,33	0,44				
	Kern	0,15	0,31	0,98	1,20	0,34				
Hauptversuch 4	Wanddicke									
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5				
	Haut	1,9	2,2	2,5	2,7	3,2				
	Kern	2,4	2,6	1,8	1,3	1,0				
	Summe	4,3	4,8	4,3	4,0	4,2				
	Exzentrizität									

9. Anhang

	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Haut		0,08	0,03	0,11	0,14	0,84
Kern		0,75	0,69	0,54	0,61	0,22

Hauptversuch 5	Wanddicke					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	2,1	2,5	2,7	2,6	2,6
	Kern	1,7	1,6	1,8	1,6	1,2
	Summe	3,8	4,1	4,5	4,2	3,8
	Exzentrizität					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	0,10	0,39	0,20	0,29	0,56
	Kern	0,94	0,44	0,54	0,81	0,26
	Hauptversuch 6	Wanddicke				
Durchschnitt		Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Haut		1,9	2,3	2,6	2,6	2,6
Kern		1,8	1,9	1,6	1,6	1,2
Summe		3,7	4,2	4,3	4,2	3,8
Exzentrizität						
Durchschnitt		Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Haut		0,10	0,36	0,11	0,17	0,44
Kern		0,67	0,68	0,47	1,02	0,36
Hauptversuch 7		Wanddicke				
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	1,8	2,3	2,5	2,6	2,4
	Kern	1,4	1,6	1,6	1,5	1,2
	Summe	3,3	3,9	4,1	4,2	3,6
	Exzentrizität					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	0,12	0,35	0,12	0,22	0,54
	Kern	0,54	0,41	0,85	0,91	0,32
	Hauptversuch 8	Wanddicke				
Durchschnitt		Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Haut		2,1	2,5	2,9	2,7	2,8
Kern		1,9	2,0	1,8	1,5	1,2
Summe		4,0	4,4	4,6	4,2	4,0
Exzentrizität						
Durchschnitt		Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Haut		0,04	0,07	0,19	0,07	0,43
Kern		0,99	0,67	0,49	0,60	0,14
Hauptversuch 9		Wanddicke				
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	1,4	1,8	2,3	2,3	2,3
	Kern	2,3	1,7	1,0	1,2	0,9
	Summe	3,7	3,4	3,4	3,5	3,1
	Exzentrizität					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	0,06	0,15	0,22	0,32	0,33
	Kern	1,73	0,87	0,85	1,44	0,61

Hauptversuch 10	Wanddicke					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	1,7	2,1	2,4	2,4	2,3
	Kern	2,2	2,0	1,4	1,1	0,8
	Summe	3,9	4,1	3,9	3,5	3,1
	Exzentrizität					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	0,06	0,19	0,22	0,12	0,39
	Kern	1,53	0,81	1,49	1,48	0,15
	Hauptversuch 11	Wanddicke				
Durchschnitt		Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Haut		1,6	1,9	2,2	2,3	1,9
Kern		1,2	1,4	1,5	1,1	1,0
Summe		2,8	3,3	3,7	3,4	2,9
Exzentrizität						
Durchschnitt		Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Haut		0,11	0,28	0,13	0,30	0,54
Kern		0,59	0,65	1,23	1,23	0,28
Hauptversuch 12		Wanddicke				
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	1,7	2,0	2,4	2,5	2,7
	Kern	2,4	2,2	1,5	1,0	0,8
	Summe	4,1	4,3	3,9	3,6	3,5
	Exzentrizität					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	0,11	0,14	0,11	0,05	0,49
	Kern	1,45	0,76	1,16	0,89	0,14
	Hauptversuch 13	Wanddicke				
Durchschnitt		Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Haut		1,8	2,3	2,7	2,7	2,4
Kern		1,9	1,7	1,7	1,5	1,2
Summe		3,7	4,0	4,4	4,3	3,6
Exzentrizität						
Durchschnitt		Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
Haut		0,08	0,35	0,08	0,25	0,56
Kern		1,47	0,64	1,12	1,01	0,26
Hauptversuch 14		Wanddicke				
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	1,9	2,4	2,8	2,7	2,6
	Kern	1,8	1,7	1,6	1,4	1,0
	Summe	3,7	4,1	4,4	4,1	3,6
	Exzentrizität					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	0,02	0,28	0,16	0,14	0,52
	Kern	0,97	0,44	1,23	1,24	0,21

Hauptversuch 15	Wanddicke					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	2,0	2,4	2,6	2,6	2,4
	Kern	1,3	1,3	1,5	1,6	1,1
	Summe	3,3	3,7	4,1	4,1	3,5
	Exzentrizität					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	0,09	0,38	0,16	0,30	0,55
	Kern	1,27	0,42	0,89	1,08	0,27
Hauptversuch 16	Wanddicke					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	1,9	2,3	2,8	2,8	2,6
	Kern	2,0	1,9	1,6	1,4	1,1
	Summe	3,9	4,2	4,5	4,2	3,7
	Exzentrizität					
	Durchschnitt	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4	Schnitt 5
	Haut	0,10	0,26	0,13	0,20	0,53
	Kern	1,42	0,57	1,15	1,21	0,21