

SchoPlast Plastic GmbH

**Entwicklung einer neuartigen Prozesstechnologie zur
abfallfreien Herstellung von Bauteilen im
Duroplastspritzgießen**

Abschlussbericht
über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 38140/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Projektbearbeitung:

Frau Benita Brendler

Herr Piet Marschner

Herr Nils Schmeißer

Herr Prof. Dr.-Ing. Seefried

Bewilligungsempfänger:

SchoPlast Plastic GmbH

SchoForm GmbH

Technische Universität Chemnitz

Juli 2025

Inhaltverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Zusammenfassung	7
2 Einleitung	8
3 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse	12
3.1 Verwendetes Material	12
3.2 Materialcharakterisierung	13
3.2.1 Laboranalytische Messverfahren	13
3.2.2 Prozessnahe Materialanalyse	21
3.3 Auslegung und Erprobung des Kaltkanalsystems im Versuchswerkzeug	21
3.3.1 Aufbau	21
3.3.2 Versuchsplanung und Ergebnisse	22
3.4 Konstruktive Anpassungen des Kaltkanalsystems und Erprobung im 12-fach-Serienwerkzeug	28
3.4.1 Aufbau	28
3.4.2 Versuchsplanung	31
3.4.3 Versuchsdurchführung	31
3.4.4 Auswertung	34
3.5 Richtlinien zur Auslegung und Verwendung eines Kaltkanalsystems	35
3.5.1 Rheologische Auslegung	35
3.5.2 Thermische Auslegung	36
3.5.3 Mechanische Auslegung	37
3.5.4 Sonstige Auslegungen	38
3.6 Konstruktive Anpassungen und Erprobung der Direktanspritzung im Versuchswerkzeug	39
3.6.1 Aufbau und Auslegung	40
3.6.2 Versuchsplanung	41
3.6.3 Versuchsdurchführung	42
3.6.4 Auswertung	43
4 Fazit	45
Literaturverzeichnis	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: links: Klassischer Aufbau eines Duroplastwerkzeuges; rechts: Aktueller Aufbau eines Duroplast-werkzeuges zur Ausschussverminderung; in blau dargestellt: Fließkanal und Formnest, in rot dargestellt: pro Zyklus entstehender Ausschuss.....	9
Abbildung 2: Sockel einer Steckdose (Harnstoff) hergestellt in einem 8-Kavitäten-Werkzeug der Fa. SchoPlast Plastic GmbH mit einem durch das Angussystem verursachten Abfallmasseanteil von 15 % pro Zyklus	10
Abbildung 3: neuartiges Werkzeugkonzept zur angusslosen Fertigung von Duroplastbauteilen im Spritzguss	11
Abbildung 4: Verwendete Harnstoff-Formaldehyd-Formmasse	12
Abbildung 5: links: TGA Q5000 der Firma TA Instruments; recht: Probenaufnahme und Platintiegel .	13
Abbildung 6: TGA Untersuchung der verwendeten Formmasse unter Stickstoff im Temperaturbereich von 20 – 650 °C bei einer Heizrate von 10 K/min	14
Abbildung 7: links: DSC Q2000 der Firma TA Instruments; recht: Messzelle mit Proben- und Referenztiegel.....	14
Abbildung 8: DSC Untersuchung der verwendeten Formmasse unter Stickstoff im Temperaturbereich von -40 - 350 °C bei einer Heizrate von 10 K/min	15
Abbildung 9: Overlay der DSC (grüne Messkurve - Wärmestrom) und TGA (blaue Messkurve – Masseverlust, braune Messkurve - Reaktionsgeschwindigkeit) Messungen	16
Abbildung 10: Bestimmung des Glasübergangs am ausgehärteten Material mittels DSC	16
Abbildung 11: links: Rotationsrheometer AR2000ex der Firma TA Instruments; recht: Platte-Platte Geometrie	17
Abbildung 12: links: gepresster Zylinder, rechts: Aus Zylinder gefertigte Rheometerproben	18
Abbildung 13: Temperaturrampentest im Temperaturbereich von 60-180 °C bei einer Heizrate von 5 K/min mit einer Frequenz von 1 Hz und einer Deformation von 0,01 %	19
Abbildung 14: Messkammer des Brabender und verwendete Schaufelgeometrie	20
Abbildung 15: Abhängigkeit der gemessenen Drehmomente von der Kammertemperatur	20
Abbildung 16: Verschiedene Ansichten der Versuchswerkzeugkonstruktion zur Erprobung unterschiedlicher	21
Abbildung 17: Schnitt der verwendeten Werkzeugkonstruktionen;	22
Abbildung 18: Einfluss der Härtezeit und Werkzeugtemperatur auf den benötigten Einspritzdruck.....	23
Abbildung 19: Einfluss der Härtungszeit im Versuchswerkzeug auf das Fließ-Vernetzungsverhalten bei einer Werkzeugtemperatur von 110 °C	24
Abbildung 20: Einfluss der Werkzeugtemperatur des Versuchswerkzeugs auf das Fließ-Vernetzungsverhalten bei einer Werkzeugtemperaturen von 110 °C – 160 °C.....	24
Abbildung 21: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit auf den erforderlichen Einspritzdruck	25
Abbildung 22: Einfluss der Fließkanalgeometrie auf den erforderlichen Einspritzdruck	26
Abbildung 23: Einfluss von Kanalgeometrie und -querschnitt auf das Fließ-Härtungsverhalten	27
Abbildung 24: Schematischer Aufbau der Düsenseite des geplanten Werkzeugs	28
Abbildung 25: Werkzeugöffnung und Angussentnahme nach Prozessende	29
Abbildung 26: Kaltkanalsystem des 12-fach-Serienwerkzeug	29
Abbildung 27: mögliche Betriebsarten des 12-fach-Serienwerkzeug; links: einfach temperierte Angießbuchse; rechts: Kaltkanalsystem	30

Abbildung 28: Konzept für ein 16-fach-Serienwerkzeug zur signifikanten Einsparung von Produktionsabfällen	30
Abbildung 29: Erprobung des Schmelzefflusses durch den Kaltkanalverteiler	31
Abbildung 30: Bei der Reinigung des Werkzeugs entnommener Anguss	32
Abbildung 31: Angussstachel zur Verbesserung des Abrissverhaltens des Unterverteilers	33
Abbildung 32: Break-Even-Point der verschiedenen Werkzeugkonzepte	34
Abbildung 33: links: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Direktanspritzung mittels Nadelverschlussystem;	40
Abbildung 34: Vereinfachte Geometrie zur Erprobung der Direktanspritzung	40
Abbildung 35: Draufsicht Versuchswerkzeug zur Erprobung der Direktanspritzung; links: Nadelverschluss während des Einspritzens durch die Spritzgussmaschine in hinterer Position; rechts: Nadelverschluss zur Kavitätsfüllung in vorderer Position	42
Abbildung 36: Unvollständig gefüllte Kavität aufgrund eines zu geringem Einspritzvolumens	43
Abbildung 37: Fehlstellen an den vollständig gefüllten Bauteilen aufgrund einer unzureichenden Nadelkraft	43
Abbildung 38: Break-Even-Point Standardlösung/Direktanspritzung	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsparameter zur Untersuchung des Einflusses der Härtezeit und Werkzeugtemperatur auf den erforderlichen Einspritzdruck	23
Tabelle 2: Versuchsparameter zur Untersuchung des Einflusses der Einspritzgeschwindigkeit auf den erforderlichen Einspritzdruck	25
Tabelle 3: Versuchsparameter zur Untersuchung des Einflusses Fließkanalgeometrie auf den erforderlichen Einspritzdruck	26

Abkürzungsverzeichnis

Az.....	Aktenzeichen
BMC.....	Bulk Molding Compound
DDK.....	Dynamische Differenz Kalorimetrie
DSC.....	Differential Scanning Calorimetry
RoHS.....	Restriction of Hazardous Substances
Tg.....	Glasübergangstemperatur
TGA.....	Thermogravimetrische Analyse
UF.....	Harnstoff-Formaldehyd
UV.....	Ultraviolettstrahlung

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Az: 38140/01) geförderten Projekts „Entwicklung einer neuartigen Prozesstechnologie zur abfallfreien Herstellung von Bauteilen im Duroplast-spritzgießen“ wurde ein innovatives Kaltkanalverteilersystem entwickelt, konstruiert und unter praxisnahen Bedingungen im industriellen Maßstab erprobt.

Ziel des Vorhabens war es, ein großserientaugliches Verfahren zur angusslosen Fertigung duroplastischer Formteile zu realisieren, welches eine signifikante Reduktion von Materialabfällen sowie eine Steigerung der Energieeffizienz ermöglicht.

Die Untersuchungen umfassten zunächst eine umfassende laboranalytische Charakterisierung der eingesetzten Harnstoff-Formaldehyd-Formmasse (UF-Formmasse) mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA), dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC), Rheometerversuchen sowie Untersuchungen am Messknetter. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein spezielles Versuchswerkzeug konstruiert, um den Einfluss von Werkzeugtemperatur, Härtezeit, Einspritzgeschwindigkeit und Kanalgeometrie auf das Materialverhalten und den Einspritzdruck zu analysieren. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen unmittelbar in die Auslegung eines Serienwerkzeugs ein, welches zum Nachweis der Funktionalität der entwickelten Technologie im industriellen Umfeld diene.

Im Rahmen der Serienerprobung mit dem neu entwickelten 12-fach-Werkzeug konnte die grundsätzliche Funktionstauglichkeit des Kaltkanalverteilersystems unter Beweis gestellt werden. Die Prozessführung verlief stabil und ermöglichte die Herstellung vollständig gefüllter Bauteile im Serienbetrieb. Die gefertigten Produkte wiesen keinerlei Unterschiede hinsichtlich Maßhaltigkeit oder mechanischer Eigenschaften im Vergleich zur Standardverarbeitung auf. Eine Energieeinsparung von 31 % gegenüber der konventionellen 8-fach-Variante wurde realisiert. Die vollständige Eliminierung des Angusses konnte anhand des Serienwerkzeugs aufgrund konstruktiver und wirtschaftlicher Restriktionen vorerst nicht umgesetzt werden.

Die ökologischen Potenziale der entwickelten Technologie sind erheblich. Durch die drastische Reduktion des Angussabfalls können große Mengen an nicht rezyklierbarem duroplastischem Material eingespart werden.

Für das weitere Vorgehen empfiehlt sich die technologische Weiterentwicklung eines aktiven Nadelverschlussystems, das eine direkte, angusslose Anspritzung der Formteile erlaubt und gleichzeitig eine zuverlässige thermische Entkopplung gewährleistet. Die Funktionalität einer solchen Technologie konnte im Rahmen des Projekts anhand des Versuchswerkzeugs nachgewiesen werden. Die erzielten Ergebnisse legen darüber hinaus eine Übertragung der Technologie auf höhere Fachigkeiten (Anzahl der Kavitäten im Werkzeug) nahe, wobei insbesondere im angestrebten 16-fach-Werkzeug signifikante Effizienzpotenziale zu erwarten sind. Perspektivisch ist eine branchenübergreifende Anwendung denkbar, insbesondere im Bereich der Elektro- und Automobilindustrie, in der duroplastische Formmassen aufgrund ihrer hervorragenden thermischen und mechanischen Eigenschaften zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Das Vorhaben wurde in Kooperation zwischen der SchoPlast Plastic GmbH, der SchoForm GmbH und der Professur Kunststofftechnik der Technischen Universität Chemnitz realisiert und durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Förderkennzeichen Az: 38140/01 unterstützt.

2 Einleitung

Das Spritzgießen stellt eine effiziente und hoch entwickelte Serienfertigungstechnologie dar, welche mit einer angepassten Werkzeugtechnik die Herstellung komplexer 3-dimensionaler Bauteile aus duroplastischen Materialien ermöglicht. Die komplexe Vernetzungsreaktion ist, neben den zahlreichen daraus resultierenden positiven Werkstoffeigenschaften duroplastischer Materialien (Temperaturbeständigkeit, Chemikalienbeständigkeit, hohe Steifigkeiten/Festigkeiten), auch für technologische Herausforderungen während der Verarbeitung verantwortlich [Joh03, Joh04]. Weiterhin entsteht in jedem Zyklus ein hoher Materialverlust durch das ausgehärtete Angussystem, welches mit dem Bauteil aus dem Werkzeug ausgeworfen wird. Das Angussystem ist wie das Bauteil irreversibel chemisch vernetzt und kann im Rahmen eines möglichen Recyclingansatzes somit nur vermahlen und als inaktiver Füllstoff anderen Verarbeitungsverfahren zugeführt werden. Als Konsequenz fallen durch das Angussystem hohe Mengen an Abfall an. Insbesondere bei Mehrkavitätenwerkzeugen, zur Herstellung von Kleinteilen, steigt der Anteil des ungenutzten Materials im Angussystems.

Ein technischer Ansatz zur Minimierung dieser Abfälle ist die thermische Entkopplung des Angussystems von der Werkzeugtemperatur. Im Bereich der Thermoplaste werden diese Verteiler Heißkanalsysteme, im Bereich der Duroplasten Kaltkanalsysteme genannt. Die Verwendung solcher Heißkanalsysteme zur hochautomatisierten Fertigung technischer Thermoplastbauteile ist Stand der Technik und bietet aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht trotz erhöhter Investitions- und Wartungskosten zahlreiche Vorteile gegenüber konventionellen Verteilersystemen. Neben einer erhöhten Ressourceneffizienz durch die Einsparung des Angussmaterials können aufgrund kürzerer Zykluszeiten (geringere Einspritzzeit und Kühlzeit) und der kleineren benötigten Maschinentechnik (geringeres Schussvolumen und damit geringere Zuhaltekräfte) auch energetische Vorteile umgesetzt werden. Heißkanalsysteme werden bereits als Normalien von zahlreichen Herstellern angeboten, weshalb sich Neuentwicklungen bzw. Eigenfertigungen nur noch selten lohnen. Weiterhin sind die Verarbeitungseigenschaften der verwendeten Thermoplaste heutzutage sehr stabil, weshalb diese sich robust gegenüber Prozess- und Temperaturschwankungen verhalten und damit die Anwendung der genannten Systeme erleichtert wird [Hop18, Hus22, Bea20].

Die Umsetzung einer Abfallverminderung im Duroplastspritzgießen setzt die exakte Temperierung des Materials in Abhängigkeit von Werkzeugheizung und Materialscherung während des gesamten Verarbeitungsprozesses voraus. Dabei muss sich das Material bis zum Eintritt in das Formnest in einem fließfähigen Zustand unterhalb der Vernetzungstemperatur befinden, um erst in der Kavität vollständig auszuhärten. Aus technologischer Sicht setzt dies eine thermische Entkopplung der Fließkanäle gegenüber der Werkzeugtemperatur, welche über Vernetzungstemperatur liegt, voraus.

Die der Materialvernetzung zu Grunde liegende chemische Reaktion kann bereits durch geringe Temperaturschwankungen initiiert werden [Dom12, Bec68]. Daher führen bereits sehr geringe Temperatur- bzw. Prozessschwankungen, z.B. verursacht durch Chargenschwankungen der verwendeten Formmasse, zu einer Vernetzung des Materials vor dem Austritt aus der Düse. Die entstehenden Blockaden führen zu einem veränderten Massestrom und schließlich zu einer fortschreitenden Vernetzungsreaktion entlang des gesamten Fließweges im Werkzeug. In Abbildung 1 sind derzeit existierende Anguss- und Düsenkonzepte zur Verarbeitung duroplastischer Materialien im Spritzguss schematisch dargestellt. Im Folgenden wird auf diese bestehenden Systeme eingegangen um die Eigenheiten und Neuheiten der geplanten Entwicklung herauszustellen.

Abbildung 1 (links) veranschaulicht ein klassisches Werkzeugkonzept, welches für zahlreiche Anwendungen verwendet wird. Der Anguss reicht von der Werkzeuggrennung bis hin zur Plastifiziereinheit der

Spritzgießmaschine. Der Vorteil bei diesem Konzept liegt im vereinfachten Werkzeugaufbau, welcher die Werkzeugherstellung, -reinigung und -wartung kostengünstig gestaltet. Dem entgegen stehen die enormen Abfallanteile, welche zu höheren Entsorgungskosten führen und zu einer schlechten Umweltbilanz beitragen.

Den Stand der Technik im Duroplastspritzgießen stellt die Verwendung von temperierten Angussbuchsen bzw. Tauchdüsen dar (siehe z.B. Fa. Arburg). Abbildung 1 (rechts) veranschaulicht das Konzept, welches bereits zu einer Verminderung des produzierten Materialausschusses führt. Der Fließweg der Masse geht nach der Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschine über in die temperierte Angussbuchse. Über eine Wassertemperierung ist es möglich die Masse in einem fließfähigen Zustand zu halten. Erst beim Übergang in den Anguss/Angussverteiler und in das Formnest führt die Werkzeugtemperatur zur Vernetzung der Formmasse. Über die Werkzeuggestaltung wird dann der Anguss ausgeworfen, wobei die Masse in der temperierten Angussbuchse plastisch bleibt. Der Übergang von plastischer zu vernetzter Formmasse ist nicht exakt abgegrenzt. Dadurch entsteht ein 1-2 cm langer Steg am Angussmittelpunkt, welcher in die Angussbuchse hineinragt. Dieses Phänomen zeigt, dass diese Angussbuchse nicht in der Lage ist eine strikte Trennung zwischen den Temperaturbereichen herzustellen. Damit ist sie für eine angusslose Anspritzung direkt in das Formnest ungeeignet. Ein sauberer Anschnitt kann nicht sichergestellt werden.

Trotz verschiedener Ansätze zur Minimierung der Angussabfälle beim Duroplastspritzgießen existiert im industriellen Umfeld derzeit kein, mit dem Heißkanalsystem des Thermoplastspritzgießens, vergleichbares System zur vollständigen Vermeidung von Abfällen.

Zwar stellen Kaltkanalsysteme eine technologisch vergleichbare Technik dar, allerdings liegen keine Richtlinien und Erfahrungswerte in Bezug auf Werkzeugauslegung und Prozessparameter vor.

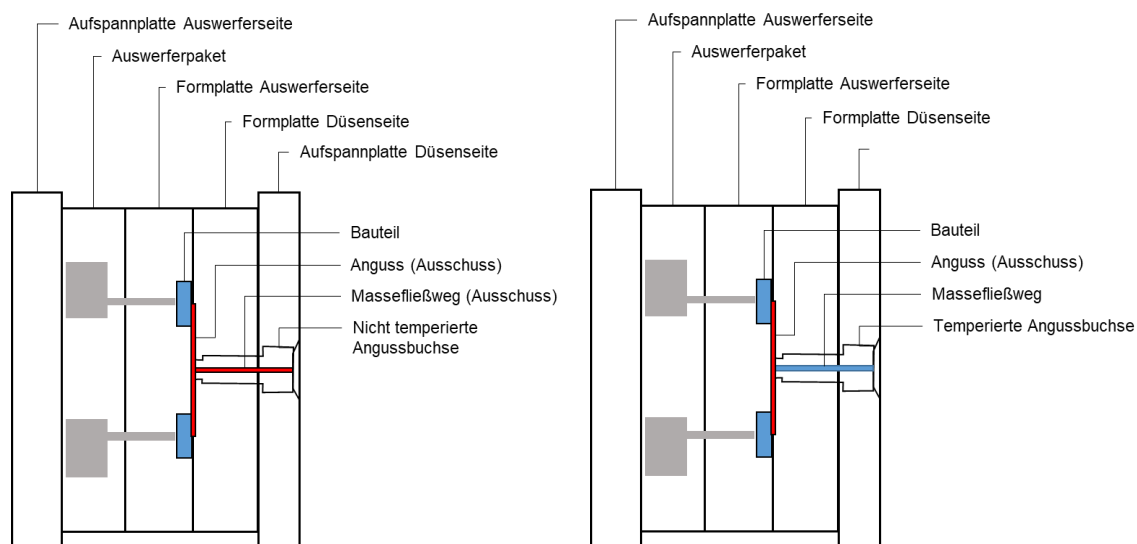


Abbildung 1: links: Klassischer Aufbau eines Duroplastwerkzeuges; rechts: Aktueller Aufbau eines Duroplastwerkzeuges zur Ausschussverminderung; in blau dargestellt: Fließkanal und Formnest, in rot dargestellt: pro Zyklus entstehender Ausschuss

Aus dem beschriebenen Materialverhalten und den damit einhergehenden technologischen Voraussetzungen ergibt sich die Umweltproblematik bei der Verarbeitung von duroplastischen Formmassen. Mit jedem Schuss entsteht prozentual betrachtet eine große Menge an Abfall. Zur Veranschaulichung wird im Folgenden auf genaue Kennzahlen der SchoPlast Plastic GmbH eingegangen. Für die

Potentialbetrachtung der Umweltentlastung sowie als Untersuchungsobjekt im vorliegenden Projekt dient ein Sockel-Bauteil (Abbildung 2), welches derzeit von der Schoplast Plastic GmbH gefertigt wird. Dieses Bauteil wird derzeit in großem Umfang im 3-Schicht-Modell produziert. Die Produktionsmenge lag im Jahr 2021 bei 26.693.473 Stück. Die Bauteile werden derzeit in 8-fach Werkzeugen gefertigt. Das heißt, in einem Zyklus werden 8 Bauteile produziert. Ausgehend von 26.693.473 Stück wurden 3.336.684 Zyklen im Jahr 2021 ausgeführt. Das Schussgewicht bestehend aus 8 Bauteilen und dem Anguss, beträgt 126,1 g. Davon stellen jedoch nur 107,2 g das tatsächliche Bauteilgewicht dar. Der verbleibende Anteil stellt das Angussystem dar, welches entsorgt werden muss. Mit jedem Einspritzvorgang fällt somit unter Nutzung der aktuellen Werkzeugtechnik, welche dem Stand der Technik entspricht, ein Abfallmasseanteil von 15 % an. Auf das Jahr 2021 summiert, wurden 68,03 t Abfall vernetzter Harnstoffformaldehydformmassen produziert. Dadurch entstehen allein durch dieses Bauteil jährliche Entsorgungskosten von 10.773 € und damit 38 % der Entsorgungskosten aller Kunststoffabfälle die im Unternehmen anfallen.

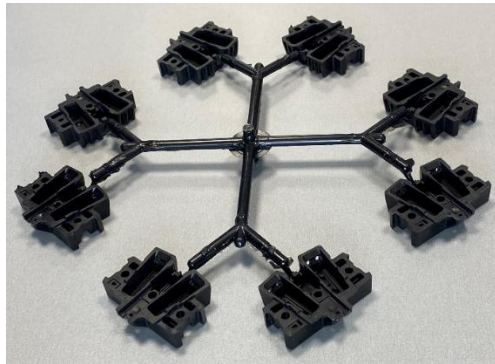


Abbildung 2: Sockel einer Steckdose (Harnstoff) hergestellt in einem 8-Kavitäten-Werkzeug der Fa. SchoPlast Plastic GmbH mit einem durch das Angussystem verursachten Abfallmasseanteil von 15 % pro Zyklus

Die Bauteile werden aktuell auf Spritzgießmaschinen mit einer Zuhaltkraft von 1600 kN (160 t) hergestellt. Diese Maschinen haben eine elektrische Leistung von 82 kW. Wenn die Querschnittsfläche des Angusses durch die neue angusslose Fertigung unberücksichtigt bleiben kann, wäre es möglich, die gleiche Anzahl an Bauteilen mit einer geringeren Zuhaltkraft von 1300 kN (130 t) zu fertigen. Eine entsprechende Maschine ist mit einer elektrischen Leistung von 69 kW 16 % effizienter als die 1600 kN-Maschine. Mit einer summierten Produktionszeit aller für die Fertigung nötigen Maschinen von 25.809 Stunden pro Jahr können Energiekosten von 28.518 € reduziert werden. Neben dem aufgeführten Sockel-Bauteil für die Elektroindustrie werden im Unternehmen SchoPlast Plastic GmbH zahlreiche weitere Artikel (ca. 40 Stk.) aus duroplastischen Formmassen hergestellt. Der durchschnittliche Abfallanteil pro Spritzgusszyklus beträgt über das gesamte Sortiment gesehen etwa 24 %. Der für diese Entwicklung vorgesehene Artikel „Sockel“ macht gut ein Drittel der gesamten Abfallmenge von 92,31 t aus. Als Rohmaterial wurden über alle Artikel 563,41 t duroplastische Formmasse verarbeitet.

Konkrete Marktzahlen zum Gesamtverbrauch duroplastischer Formmassen im Spritzguss sind öffentlich nicht verfügbar. Dies liegt vor allem an der Vielfalt dieser Materialien. Neben den genannten Harnstoffformmassen kommen zahlreiche weitere Materialien auf unterschiedlicher Harzbasis (Phenolharz, Epoxidharz, Polyesterharz, ...) und in unterschiedlichen Materialzuständen (Granulat, BMC) zum Einsatz. Viele Hersteller spezialisieren sich aufgrund der komplexen chemischen Vorgänge bei der Herstellung auf einzelne Materialien, weshalb ein umfassendes Bild über die Produktionsmenge der im Spritzguss verarbeiteten duroplastischen Materialien nur schwer darstellbar ist.

Eine vom Antragssteller unter drei der in Deutschland agierenden Materialhersteller durchgeführte Befragung ergab eine ungefähre jährliche Produktionsmenge von 40.000 t duroplastischen Spritzgießmaterials. Dies stellt eine sehr konservative Schätzung dar, da sich diese Menge vordergründig auf phenol- und epoxidharzbasierte Formmassen bezieht. Beispielsweise Harnstoffformmassen und BMC-Materialien, von denen ebenfalls große Mengen produziert und verarbeitet werden, sind hierbei nicht mit eingerechnet. Weiterhin bezieht sich diese Zahl auf ausschließlich in Deutschland produzierte Mengen. Europa- bzw. weltweit betrachtet, sollte diese Zahl erheblich höher liegen, da insbesondere im asiatischen Raum zahlreiche Produzenten duroplastischer Formmassen agieren.

Wird, wie im Fall der SchoPlast Plastic GmbH, von einem durchschnittlichen Abfallanteil von 24 % während der Produktion verschiedener Bauteile ausgegangen, unterstreicht dies das Potential der geplanten Entwicklung innerhalb des Unternehmens. Durch die Etablierung eines neuen Standes der Technik mithilfe der geplanten Entwicklung sind Einspareffekte jedoch auch skalierbar. In diesem Zusammenhang ist auch ein im Rahmen der Forschungsarbeit der letzten Jahre vernommenes gesteigertes Interesse der Industrie, die genannten Materialien in der Verarbeitung zur berücksichtigen, von Bedeutung. Belegt wird dies durch eine stetig wachsende Produktvielfalt am Markt. Neben zahlreichen Anwendungen in der Elektroindustrie dienen duroplastische Formmassen aufgrund ihrer hervorragenden Endigenschaften u.a. zur Herstellung von Haushaltsgeräten und immer häufiger zur Herstellung technischer Bauteile in der Automobilindustrie.

Aus diesem Grund besteht das Gesamtziel des vorliegenden Forschungsprojektes in der Entwicklung eines großserientauglichen Produktionsverfahrens zur Herstellung duroplastischer Bauteile im Spritzguss ohne Materialverlust. Die Umsetzung erfolgt über eine innovative Werkzeugkonstruktion mit Kaltkanalverteilersystem, welche die Aushärtung des Materials in den Angusskanälen bis hin zum Formnest unterdrückt und damit zur Verbesserung der Ressourcen- und Energieeffizienz des Duroplastspritzgießens beiträgt (Abbildung 3). Die Praxistauglichkeit der Konstruktion wird an einem komplexen Bauteil der Elektroindustrie anhand einer Harnstoffformmasse nachgewiesen. Bei dem Bauteil handelt es sich um den, in Abbildung 2 dargestellten, Sockel einer Steckdose.

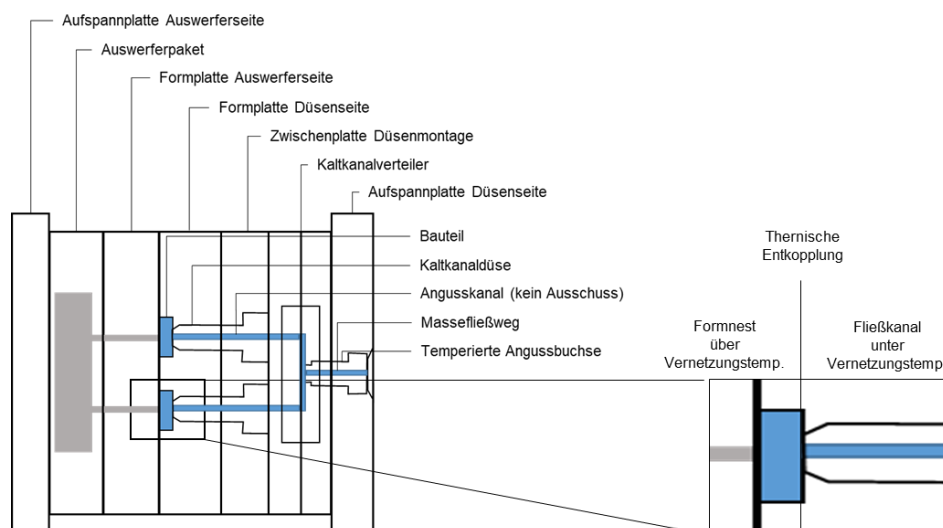


Abbildung 3: neuartiges Werkzeugkonzept zur angusslosen Fertigung von Duroplastbauteilen im Spritzguss

3 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

3.1 Verwendetes Material

Werkstoffzusammensetzung

Bei der verwendeten Formmasse handelt es sich um eine mit Melaminharz modifizierte duroplastische Formmasse auf Basis eines Harnstoff-Formaldehyd-Harzes (UF-Harz). Als Füllstoff dient hochreine Zellulose, ergänzt durch spezielle Additive wie Pigmente, Gleitmittel, Härtingsregulatoren und weitere prozessunterstützende Zusätze. Die Masse ist für das Duroplastspritzgussverfahren optimiert und lässt sich in nahezu unbegrenzter Farbvielfalt herstellen (Abbildung 4).



Abbildung 4: Verwendete Harnstoff-Formaldehyd-Formmasse

Eigenschaften

Die aus dem Werkstoff hergestellten Bauteile zeichnen sich durch eine harte, kratzfeste und glänzende Oberfläche aus. Sie sind formstabil, geruchsneutral und weisen eine gute Feuchtigkeitsbeständigkeit auf. Zudem bietet das Material eine ausgezeichnete UV-Stabilität. Die Formmasse ist gegenüber Fetten, Ölen sowie organischen Lösungsmitteln wie Alkohol und Aceton beständig. Eine eingeschränkte Resistenz besteht gegenüber schwachen Basen und schwachen Säuren, wobei eine kurzfristige Exposition gegenüber schwachen Säuren toleriert wird. Es besitzt hervorragende elektrische Isolationseigenschaften, insbesondere in Bezug auf Kriechstromfestigkeit und Flammwidrigkeit. Das Material ist halogenfrei.

Umwelt- und Gesundheitsaspekte

Die Hauptkomponenten sind aus erneuerbaren Rohstoffen hergestellt. Bei der Zersetzung entstehen Wasser, Stickstoff und Kohlendioxid und somit keine umweltschädlichen Substanzen.

Weiterhin entspricht die Formmasse den Anforderungen der RoHS-Richtlinie der EU und enthält keine gefährlichen Stoffe, was es zu einem geeigneten Werkstoff für umweltbewusste Anwendungen macht. Der Verzicht auf halogenhaltige Flammschutzmittel reduziert potenzielle Risiken für Mensch und Umwelt im Brandfall.

3.2 Materialcharakterisierung

3.2.1 Laboranalytische Messverfahren

Zur Charakterisierung des Materialverhaltens wurden umfangreiche laboranalytische Untersuchungen durchgeführt. Diese dienten zur Analyse des Vernetzungs- und Abbauverhaltens sowie zur Charakterisierung des Fließ-Härtungsverhaltens des verwendeten Materials. Die Analyse des thermischen und rheologischen Materialverhaltens ermöglichte erste Rückschlüsse auf das Materialverhalten im geplanten Kaltkanalsystem und damit auf ein mögliches Prozessfenster.

Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Experimentelles TGA

Zur Untersuchung des gravimetrischen Abbaus des eingesetzten Materials in Abhängigkeit von der Temperatur wurde die thermogravimetrische Analyse eingesetzt. Die Messungen erfolgten an einer Q5000 der Firma TA Instruments. Die Proben wurden in Platintiegeln mit einer typischen Masse von etwa 20 mg vorbereitet (Abbildung 5). Für Messungen wurde eine konstante Heizrate von 10 K/min im Temperaturbereich von 0 °C bis 1000 °C angewendet, wobei der Massenverlust der Probe kontinuierlich aufgezeichnet wurde. In einem Vorversuch wurde deutlich, dass bereits bei ca. 600 °C unter reinem Stickstoff alle Bestandteile der Harzmasse verdampft bzw. zersetzt sind. Aus diesem Grund wurde der vermessenen Temperaturbereich auf 20 °C bis 650 °C reduziert.

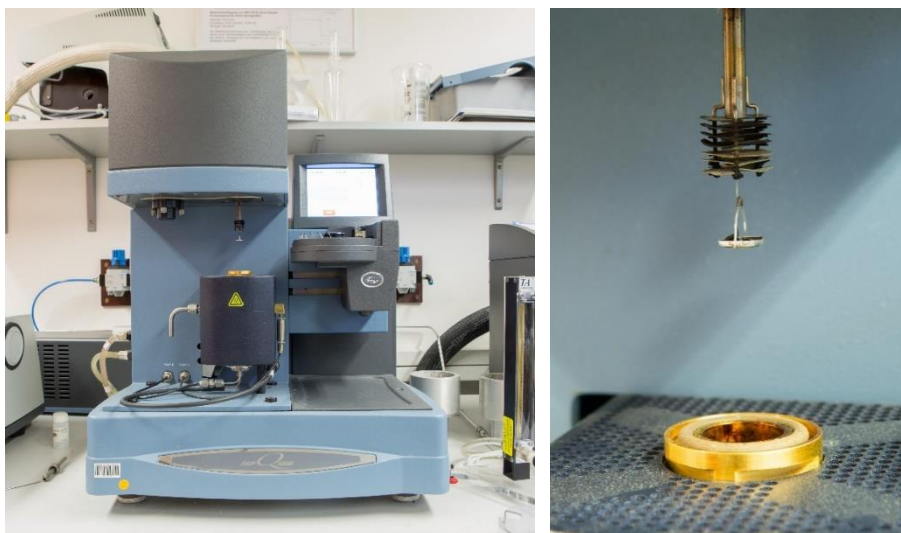


Abbildung 5: links: TGA Q5000 der Firma TA Instruments; recht: Probenaufnahme und Platintiegel

Ergebnisse TGA

Beim vorliegenden Material lassen sich im ersten Massenverlust-Peak etwa 2,5 % an freien, niedermolekularen Bestandteilen, z.B. Wasser, identifizieren. Ein zweiter Abbauppeak, beginnend bei ca. 100 °C, von ca. 6 % deutet auf die während der Polykondensation entstehenden und anschließend verdampfenden niedermolekularen Reaktionsprodukte hin. Die folgenden Abbaustufen deuten auf die

Zersetzung des Füllstoffs Zellulose hin (Abbildung 6). Eine genaue Zuordnung der weiteren Stufen kann aufgrund der unbekannten Inhaltsstoffe nicht eindeutig vorgenommen werden.

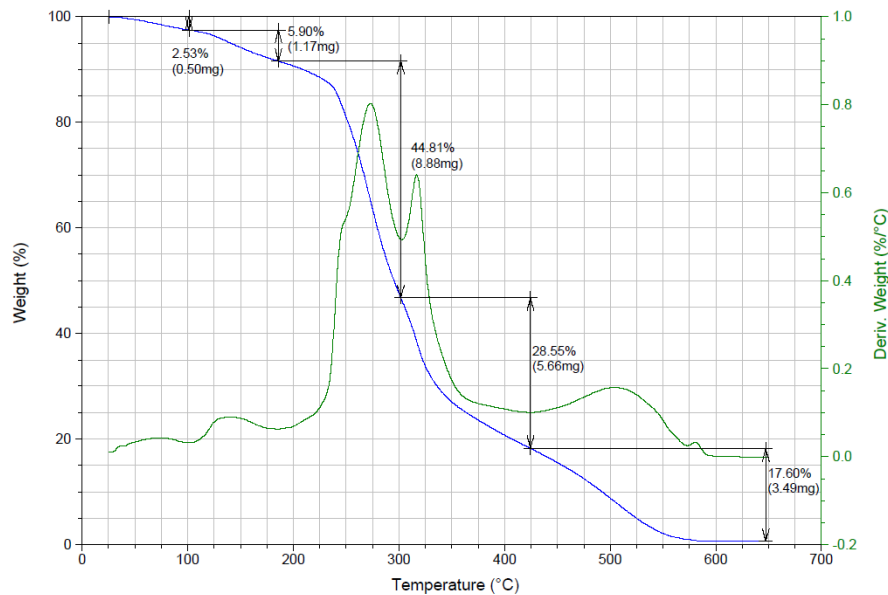


Abbildung 6: TGA Untersuchung der verwendeten Formmasse unter Stickstoff im Temperaturbereich von 20 – 650 °C bei einer Heizrate von 10 K/min

Dynamische Differenz Kalorimetrie (DDK, engl.: DSC)

Experimentelles DSC

Zur Untersuchung endothermer und exothermer Effekte der verwendeten Formmasse während des Aufheizens und des Abkühlens wurde die Dynamische Differenzkalorimetrie eingesetzt. Die Analyse erfolgte mit dem Gerät Q2000 der Firma TA Instruments. Hierfür wurden Proben mit einer Masse von ca. 10 mg in Aluminiumtiegel vorbereitet (Abbildung 7). Die Messmethodik umfasste, zur Identifikation möglicher reversible und irreversible Effekte, das Aufheizen, Abkühlen und nochmalige Aufheizen des Materials. Die Proben wurden in einem Temperaturbereich von -40 – 350 °C bei Heiz- und Kühlraten von jeweils 10 K/min vermessen. Als Spülgas diente Stickstoff.

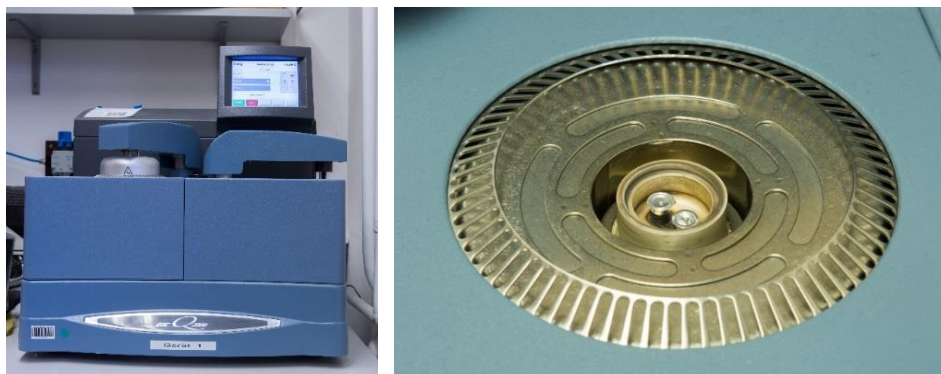


Abbildung 7: links: DSC Q2000 der Firma TA Instruments; recht: Messzelle mit Proben- und Referenztiegel

Ergebnisse DSC

Die durchgeführten DSC-Analysen lieferten Informationen über das thermische Verhalten des Materials unter dynamischer Temperaturführung.

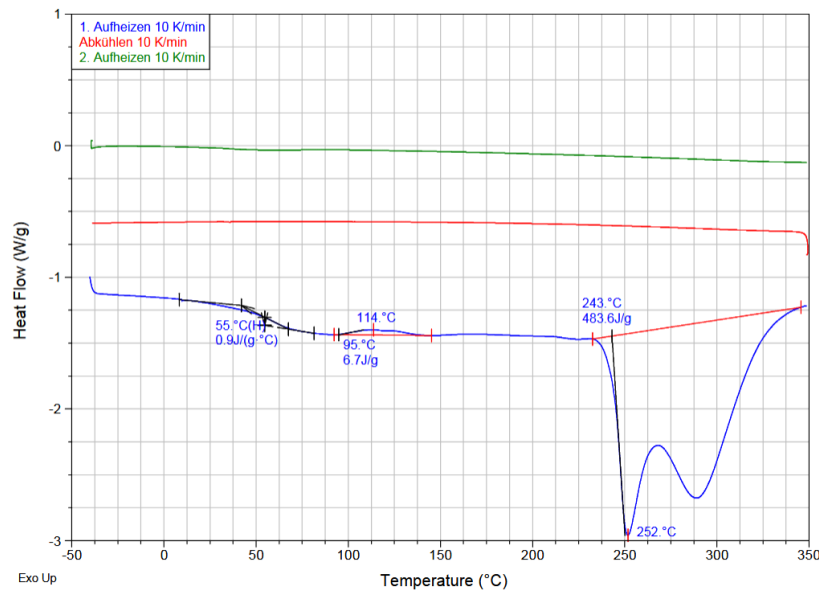


Abbildung 8: DSC Untersuchung der verwendeten Formmasse unter Stickstoff im Temperaturbereich von -40 - 350 °C bei einer Heizrate von 10 K/min

Im ersten Heizlauf (Abbildung 8, blau dargestellt) ist bei ca. 40 °C ein schwach ausgeprägter thermischer Effekt zu erkennen, der als Glasübergang (T_g) interpretiert werden kann.

Beginnend bei ca. 100 °C tritt ein exothermer Effekt auf, der durch eine geringe Reaktionsenthalpie gekennzeichnet ist. Dieser Effekt lässt sich der Aushärtung der Formmasse zuordnen. Die geringe Reaktionsenthalpie könnte auf eine Überlagerung des Effekts durch gleichzeitig ablaufende endotherme Effekte, wie z.B. das Abdampfen möglicher Reaktionsprodukte, hindeuten. Ein Masseverlust in diesem Bereich konnten anhand der TGA Versuche nachgewiesen werden.

Ab einer Temperatur von ca. 240 °C ist ein stark ausgeprägter endothermer Peak zu beobachten. Dabei handelt es sich um die Zersetzung des Materials insbesondere der im Material enthaltenen Zellulose. Diese Zersetzung kann ebenfalls anhand der TGA Versuche nachvollzogen werden.

Der Kühllauf (rote Kurve) sowie der zweite Heizlauf (grüne Kurve) verläuft ohne erkennbare Effekte. Dies bestätigt, dass sämtliche reaktiven Komponenten bereits im ersten Heizlauf umgesetzt bzw. zersetzt wurden.

Folgende Abbildung veranschaulicht den Zusammenhang des thermisch bedingten Materialverlustes durch Vernetzung (100 °C) und Zersetzung (240 °C) und den mittels DSC gemessenen endothermen und exothermen Effekten.

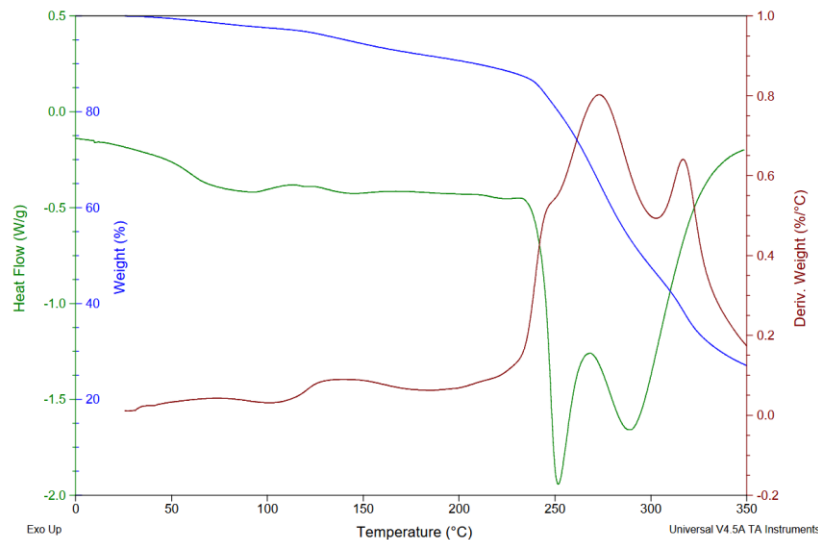


Abbildung 9: Overlay der DSC (grüne Messkurve - Wärmestrom) und TGA (blaue Messkurve – Masseverlust, braune Messkurve - Reaktionsgeschwindigkeit) Messungen

Die Zersetzung des Materials ließ eine Bestimmung der Glasübergangstemperatur des ausgehärteten Materials in den nachgelagerten Kühl- und Heizlauf nicht zu. Aus diesem Grund wurde eine Anpassung des vermessenen Temperaturbereichs auf -40 - 200 °C vorgenommen, um eine solche Zersetzung zu vermeiden.

Abbildung 10 veranschaulicht, dass die Bestimmung im zweiten Heizlauf möglich ist und ein Tg bei ca. 110 °C gemessen werden konnte.

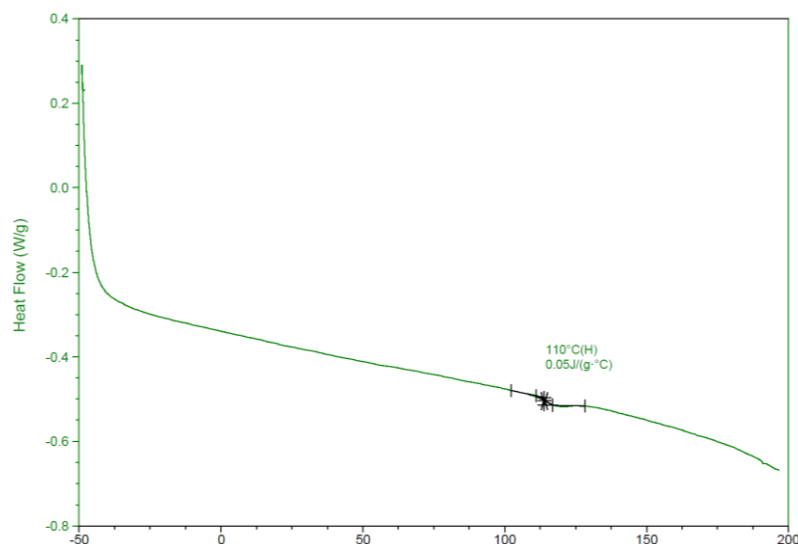


Abbildung 10: Bestimmung des Glasübergangs am ausgehärteten Material mittels DSC

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die untersuchte Harnstoff-Formmasse im unausgehärteten Zustand einen Glasübergang bei ca. 55 °C aufweist, im Bereich von etwa 100 °C eine Aushärtungsreaktion durchläuft und bei Temperaturen ab etwa 240 °C einer thermischen Zersetzung unterliegt. Ausgehärtet konnte ein Glasübergang bei einer Temperatur von 110 °C nachgewiesen werden.

Diese thermischen Charakteristika sind insbesondere für die prozesstechnische Auslegung von Formgebungs- und Härtingsprozessen sowie für die Bewertung der thermischen Stabilität im Endanwendungsbereich von Relevanz.

Platte-Platte-Rheometer

Experimentelles Rheometer

Zur Erfassung rheologischer Parameter wurde das Rotationsrheometer AR2000ex der Firma TA Instruments verwendet und mit Platte-Platte Geometrien im Oszillationsmodus betrieben wurde.



Abbildung 11: links: Rotationsrheometer AR2000ex der Firma TA Instruments; recht: Platte-Platte Geometrie

Zur Durchführung der Rheometerversuche war es notwendig, aus dem Ausgangsstoff, der als rieselfähiges Granulat vorlag, kreisförmige planparallele Platten mit Dicken von $1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ und Durchmessern von 25 mm herzustellen. Zur Herstellung dieser Probekörper existiert kein genormtes Verfahren, weshalb auf Erfahrungswerte und ein an der TU Chemnitz erprobtes Verfahren zurückgegriffen wurde. Anhand von Vorversuchen wurden die zur Herstellung der Probekörper benötigten, materialabhängigen Parameter ermittelt.

Zur Herstellung der Proben wurde die Harzmasse zunächst für 2 min bei 80°C und einer Drehzahl von 20 U/min im Messknetzer plastifiziert. Anschließend erfolgte die Formgebung in einer auf 80°C temperierten Pressvorrichtung bei einem Druck von 200 MPa für 3 Minuten. Der dabei entstandene Zylinder wurde mithilfe einer wassergekühlten Präzisionsdiamantsäge in Scheiben von 1 mm Dicke zerschnitten. Die rheologischen Messungen wurden in Anlehnung an DIN 53019-1 durchgeführt. Dabei wurde die Scherrate durch die vorgegebene Auslenkung und Frequenz definiert. Zur Bestimmung der maximal zulässigen Deformation wurde zunächst ein Amplitudentest durchgeführt. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden alle weiteren Messungen ausschließlich im Oszillationsmodus mit geringen Deformationsamplituden von 0,01 % durchgeführt, um innerhalb des linear-viskoelastischen Bereichs zu bleiben. Zur Charakterisierung des Fließ-Härtungsverhaltens wurden Temperaturrampentests durchgeführt. Dabei wurde bei konstanter Deformation (0,01 %) und Frequenz (1 Hz) der Temperaturbereich von 60°C bis 180°C mit unterschiedlichen Heizraten (2, 5 und 10 K/min) vermessen. Ziel war, das temperaturabhängige, viskoelastische Verhalten der Harzmasse unter dynamisch-mechanischer Belastung zu untersuchen.

Abschließend wurde zur Untersuchung des frequenzabhängigen Deformationsverhaltens ein Frequenz-Sweep durchgeführt. Bei konstanter Temperatur und Deformation wurde die Frequenz von 100 Hz auf 0,1 Hz reduziert.

Ergebnisse Rheometer

Die Aussagekraft der Rheometerversuche war durch die hohen Schwankungen der Messwerte eingeschränkt. Eine Ursache könnte die mechanische sowie thermische Belastung des Materials bei der Probenherstellung darstellen. Jeder der Herstellungsschritte führte zu einer Beeinflussung des Materialverhaltens. Während der Homogenisierung im Brabender wurde das Material mit einer Temperatur von ca. 80 °C beaufschlagt. Die während der Knetzeit eingebrachte Friktionswärme führte zu einer leichten Erhöhung dieser Temperatur. Bezugnehmend auf die Ergebnisse der TGA, kann darauf geschlossen werden, dass bereits die Homogenisierung zu einer Beeinflussung, z.B. Abdampfen von Wasser, des Ausgangsmaterials führte. Das anschließende Pressen führte aufgrund des eingebrachten Druckes und der Wärme zu einer weiteren Beanspruchung. Zusätzlich zu diesen Effekten fand während des Schneidens und Drehens der Zylinder ein weiterer undefinierter Wärmeeintrag statt. Um all diese Effekte möglichst konstant zu halten, wurde während der Probenherstellung auf eine hohe Reproduzierbarkeit aller Herstellungsschritte geachtet. Trotz allem konnten bereits optisch eine geringe Reproduzierbarkeit der Probenqualität festgestellt werden. Bereits nach dem Pressen der Zylinder wurden Fehlstellen sichtbar, welche dementsprechend zu großen Unterschieden in der Qualität der Probekörper führten (Abbildung 12).



Abbildung 12: links: gepresster Zylinder, rechts: Aus Zylinder gefertigte Rheometerproben

Bei der Versuchsdurchführung wurde auf die Verwendung von Probekörpern mit vergleichbarer, möglichst hoher Qualität geachtet. Trotz allem lieferten weder die Temperaturrampen noch die Frequenz-Sweeps plausible, reproduzierbare Ergebnisse. Folgenden Abbildung veranschaulicht dies anhand einer Dreifachbestimmung eines Temperaturratentest.

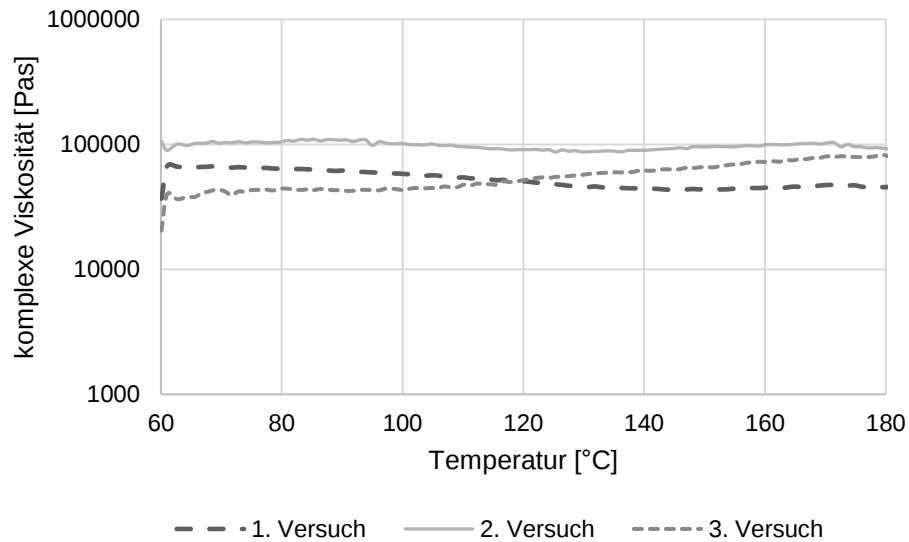


Abbildung 13: Temperaturrampentest im Temperaturbereich von 60-180 °C bei einer Heizrate von 5 K/min mit einer Frequenz von 1 Hz und einer Deformation von 0,01 %

Dabei konnte der für duroplastische Formmassen übliche parabelförmige Viskositätsverlauf nicht nachgewiesen werden. Demensprechend konnten auf Basis der Rheometerversuche keine belastbaren Aussagen bezüglich des Fließ-Härtungsverhalten getroffen werden.

Messknetter

Experimentelles Messknetter

Als Messvorrichtung diente eine PLASTI-CORDER Lab Station der Firma Brabender, welche ein zur Viskosität proportionales Drehmoment in Abhängigkeit von der Temperatur und der eingestellten Drehzahl misst. In die beheizte Messkammer wurden eine definierte Menge des zu untersuchenden Materials eingebracht. In dieser Messkammer drehten sich zwei gegenläufige Messschaufeln (Abbildung 14). Bei konstanter Drehzahl änderte sich aufgrund der Viskositätsänderung des Materials das für den Antrieb notwendige Drehmoment. Während der ganzen Messung wurde die Massetemperatur am Boden der Messkavität mittels Temperaturfühler aufgezeichnet. Die Versuche wurden mit einer Dreifachbestimmung und einer Einwaage von je 30 g durchgeführt. Bei einer Drehzahl von 30 U/min wurde die Formmasse bei Temperaturen von 80, 90, 100, 110, 120, 130 und 140 °C vermessen.



Abbildung 14: Messkammer des Brabender und verwendete Schaufelgeometrie

Ergebnisse Brabender

Anhand der gemessenen Drehmomentverläufe konnte das Fließ-Härtungsverhalten der vorliegenden Formmasse sehr gut nachvollzogen werden. Das zeitgleiche Ablaufen des Aufschmelzvorgangs und der Vernetzungsreaktion führten zu dem in Abbildung 15 dargestellten charakteristischen Verlauf für duroplastischer Materialien.

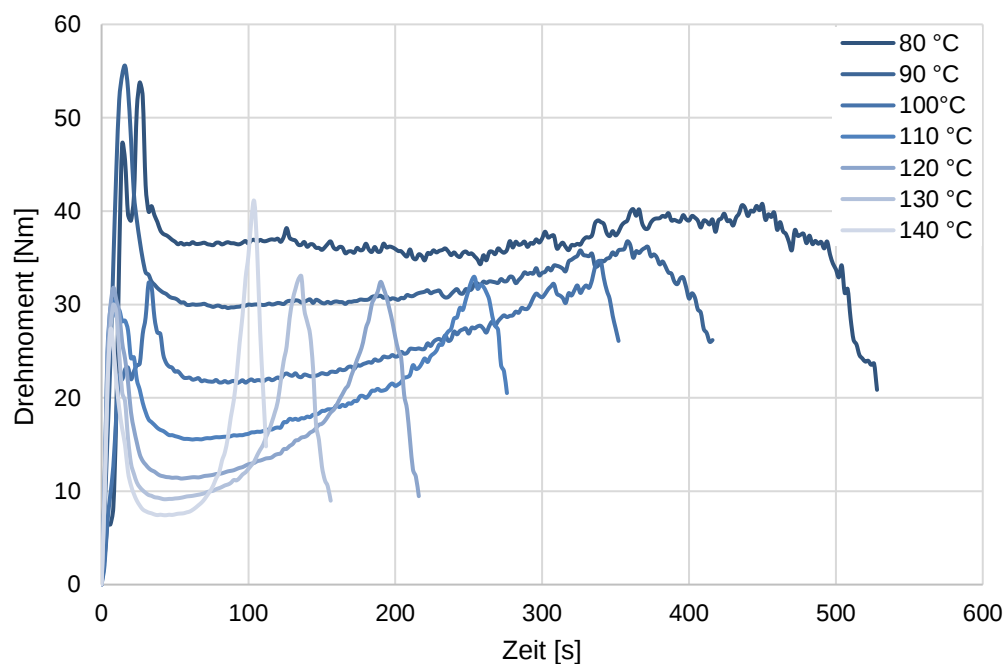


Abbildung 15: Abhängigkeit der gemessenen Drehmomente von der Kammertemperatur

Nach dem Erreichen des Einfüllmaximums nimmt das gemessene Drehmoment aufgrund der Erweichung des Materials bis zu einem minimalen Drehmoment ab. Folgend bildet sich in Abhängigkeit von der Kammertemperatur ein Plateau (Verweilzeit), bis das Drehmoment aufgrund der Vernetzungsreaktion der verwendeten Formmasse bis zum Erreichen eines zweiten Peaks ansteigt. Dieser Punkt kennzeichnet die einsetzende Materialschädigung der Formmasse und damit das Messende.

Eine qualitative Analyse der Diagramme anhand des Kurvenverlaufs ermöglicht eine schnelle und präzise Beurteilung des Fließ- und Härungsverhaltens des Materials, insbesondere in Bezug auf das minimale Drehmoment sowie die Zeitdauer bis zur vollständigen Aushärtung.

3.2.2 Prozessnahe Materialanalyse

Ergänzend zu den Laboranalysen wurden im Projekt umfangreiche Arbeiten in die Entwicklung und Durchführung eines prozessnahen Messverfahrens gesteckt. Im Unterschied zur ursprünglichen Planung wurde nicht auf ein bestehendes Werkzeug der TU Chemnitz zurückgegriffen. Stattdessen wurde ein neues Versuchswerkzeug entwickelt und gefertigt, welches speziell auf eine Untersuchung des Materialverhaltens im Kaltkanalsystem ausgerichtet wurde. Mit diesem wurde das Materialverhalten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Prozessbedingungen und Fließkanalgeometrien untersucht. In Kombination mit dem Messkneter lieferte das entwickelte Verfahren wichtige Erkenntnisse für die Konstruktion des geplanten 12-fach Serienwerkzeugs.

3.3 Auslegung und Erprobung des Kaltkanalsystems im Versuchswerkzeug

Zur Erprobung verschiedener Kanalgeometrien und prozessnahen Untersuchung des Materialverhaltens für das geplante Kaltkanalsystem wurde ein Versuchswerkzeug konstruiert und gefertigt.

3.3.1 Aufbau

Das Werkzeug besteht aus einer fest fixierten Grundplatte und verschiedenen Wechselplatten in welche die Fließkanäle eingebracht wurden (Abbildung 16). Diese Wechselplatten wurden über Verschraubungen auf der konstanten Platten fixiert und konnten für Reinigungszwecke dementsprechend einfach von dieser gelöst werden.

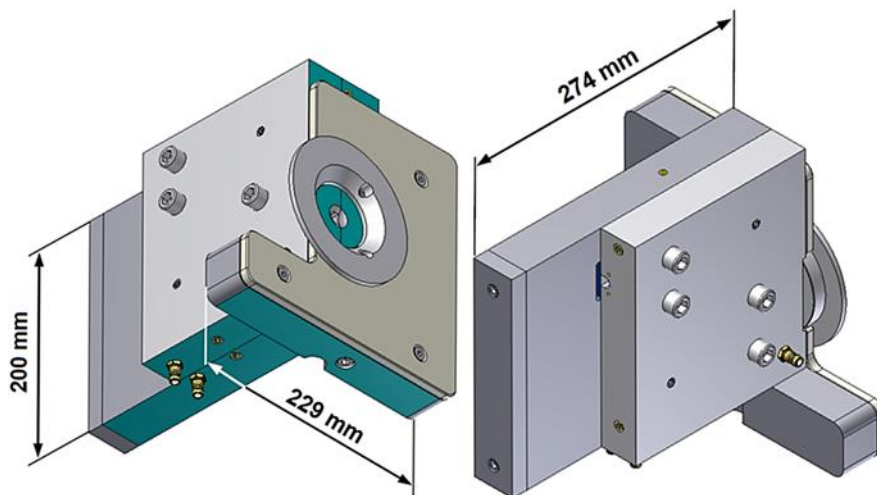


Abbildung 16: Verschiedene Ansichten der Versuchswerkzeugkonstruktion zur Erprobung unterschiedlicher Fließkanalgeometrien

Für die Untersuchungen wurden folgende drei Wechseleinsätze gefertigt:

1. Kleiner Rundkanal: Fließkanal mit abgerundeter Schmelzeumlenkungen und kleinem Kanalquerschnitt ($\varnothing$ 5mm)
2. Großer Rundkanal: Fließkanal mit abgerundeter Schmelzeumlenkungen und großem Kanalquerschnitt ($\varnothing$ 10mm)
3. Kleiner Eckkanal: Fließkanal mit eckiger Schmelzeumlenkungen und kleinem Kanalquerschnitt ($\varnothing$ 5mm)

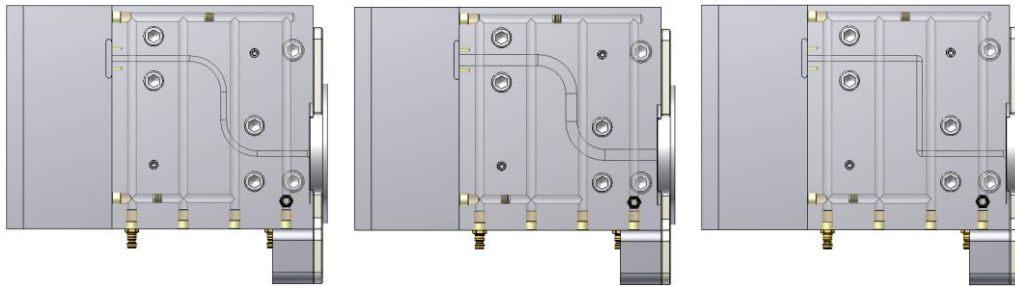


Abbildung 17: Schnitt der verwendeten Werkzeugkonstruktionen;
links: kleiner Rundkanal; mitte: großer Rundkanal; rechts: kleiner Eckkanal

Die gesamte Konstruktion wurde auf die Spritzgießmaschine KM 160CX mit Duroplastplastifizierung aufgespannt. Mit dieser wurde das Material plastifiziert und durch die verschiedenen Fließkanäle gespritzt. Während des Einspritzens wurden die benötigten Einspritzdrücke gemessen. Nach Beendigung des Einspritzvorgangs wurde das austretende Material mittels Abschlagvorrichtung abgetrennt und mit flüssigem Stickstoff gekühlt um eine fortschreitende Materialvernetzung zu vermeiden und eine nachfolgende Analyse des Materials mittels Messkneten zu ermöglichen. Nach Ablauf einer definierten Härtezeit wurde der nächste Einspritzvorgang gestartet.

Mit Hilfe dieses Ablaufs ermöglichte der Prozess die Messung der benötigten Einspritzdrücke in Abhängigkeit von der verwendeten Fließkanalgeometrie, Fließkanalquerschnitte und den verwendeten Prozessparametern.

3.3.2 Versuchsplanung und Ergebnisse

Versuchsreihe 1: Einfluss der Härtezeit und Werkzeugtemperatur

Versuchsreihe 1 diente zur Untersuchung des Einflusses von Härtezeit und Werkzeugtemperatur auf die erforderlichen Einspritzdrücke (Tabelle 1). Als Fließkanalgeometrie wurde der große Rundkanal verwendet. Die Versuche dienten zur Ermittlung von Prozessgrenzen innerhalb dieser eine Verarbeitung der verwendeten Formmasse mit dem maximal zur Verfügung stehenden Einspritzdruck von 2000 bar möglich ist.

Tabelle 1: Versuchsparameter zur Untersuchung des Einflusses der Härtezeit und Werkzeugtemperatur auf den erforderlichen Einspritzdruck

Spritzgießparameter	Wert
Schmelzetemperatur	110 °C
Einspritzgeschwindigkeit	16 cm ³ /s
Werkzeugtemperatur	110 - 160 °C
max. Einspritzdruck	2000 Bar
Härtezeit	10 - 60 s
Fließkanalgeometrie	Großer Rundkanal

Abbildung 18 veranschaulicht den Einfluss der Werkzeugtemperatur sowie der Härtezeit auf den erforderlichen Einspritzdruck. Untersucht wurden Temperaturstufen im Bereich von 110 °C bis 160 °C, wobei der Einspritzdruck jeweils in Abhängigkeit von Härtezeiten zwischen 10 und 60 s analysiert wurde.

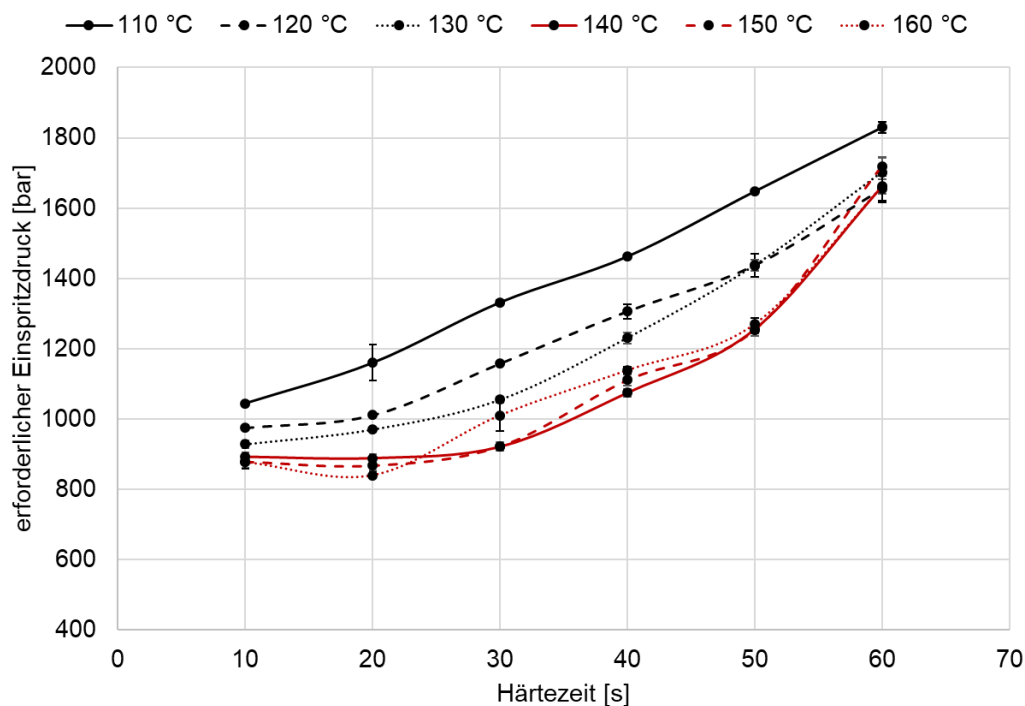


Abbildung 18: Einfluss der Härtezeit und Werkzeugtemperatur auf den benötigten Einspritzdruck

Grundsätzlich ist bei allen Temperaturstufen ein ansteigender Einspritzdruck mit zunehmender Härtezeit zu beobachten. Dieser Effekt ist insbesondere ab etwa 40 Sekunden deutlich ausgeprägt, was auf die fortschreitende Aushärtung und Viskositätszunahme der Formmasse zurückzuführen ist. Dieser Effekt kann anhand der Messkneterkurven nachvollzogen werden (Abbildung 19). Hierbei wird sichtbar, dass eine steigende Härtezeit zu steigenden minimalen Viskositäten und verringerten Verweilzeiten führt. Ab einer Härtezeit von 40 s konnten bereits keine auswertbaren Kurven mehr aufgezeichnet.

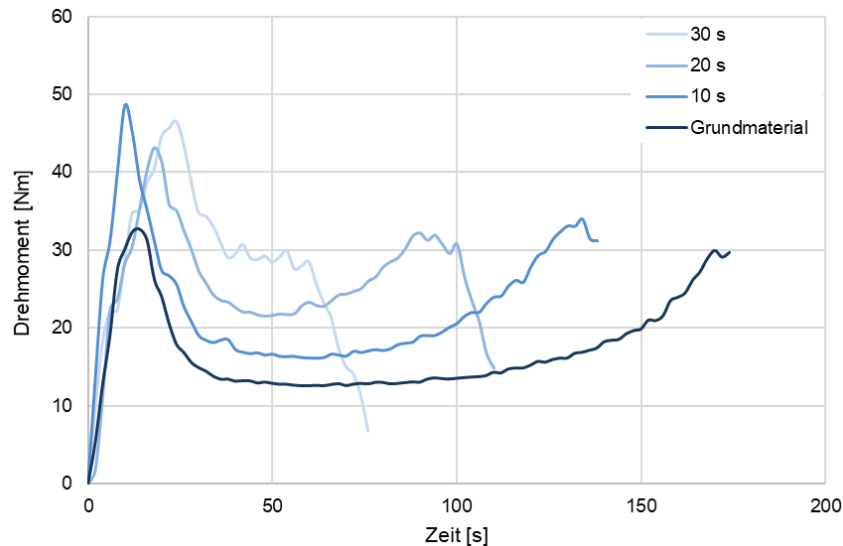


Abbildung 19: Einfluss der Härtungszeit im Versuchswerkzeug auf das Fließ-Vernetzungsverhalten bei einer Werkzeugtemperatur von 110 °C

Abbildung 18 veranschaulicht ebenfalls den Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die erforderlichen Einspritzdrücke. Bei niedrigeren Temperaturen (110 °C - 130 °C) sind für alle Härtezeiten höhere Einspritzdrücke erforderlich. Besonders bei 110 °C steigt der Druck von rund 1050 bar bei 10 s auf über 1800 bar bei 60 s an. Demgegenüber zeigen höhere Temperaturen (140 °C - 160 °C) bis etwa 40 s signifikant geringere Druckwerte, was auf eine niedrigere Viskosität und ein verbessertes Fließverhalten während des Einspritzvorgangs hindeutet. Dieser Effekte sowie die nachfolgenden Drehmomentkurven des Messkneters, lassen auf einen geringen Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Vernetzungsreaktion schließen (Abbildung 20). Vielmehr scheint eine erhöhte Werkzeugtemperatur zur Verbesserung der Fließfähigkeit beizutragen, da die Bildung einer niederviskosen Randschicht während der Formfüllung gefördert wird.

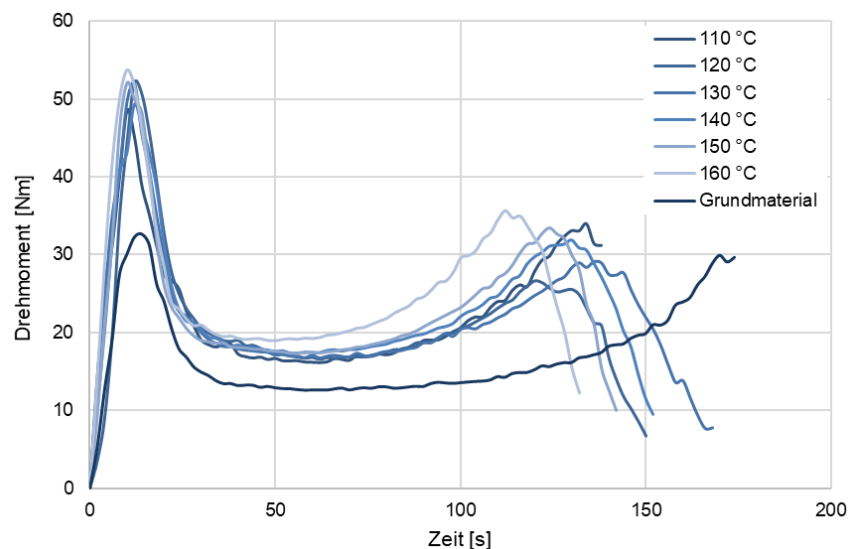


Abbildung 20: Einfluss der Werkzeugtemperatur des Versuchswerkzeugs auf das Fließ-Vernetzungsverhalten bei einer Werkzeugtemperaturn von 110 °C – 160 °C

Ab einer Härtezeit von ca. 50 s konvergieren die Einspritzdruckwerte aller Temperaturstufen zunehmend. Bei 60 s liegen die ermittelten Drücke nahezu auf gleichem Niveau (ca. 1700–1850 bar), wodurch sich der temperaturempfindliche Einfluss mit fortschreitender Reaktion relativiert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur bei gleichzeitig kurzer bis mittlerer Härtezeit (≤ 40 s) zu einer deutlichen Reduktion des erforderlichen Einspritzdrucks führt. Eine optimale Prozesseinstellung liegt demnach im Bereich von 130 °C bis 150 °C bei moderater Härtezeit.

Versuchsreihe 2: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit

Versuchsreihe 2 diente zur Untersuchung des Einflusses der Einspritzgeschwindigkeit auf die gemessenen Einspritzdrücke (Tabelle 2). Bei einer Härtezeit von 30 s und einer Werkzeugtemperatur von 130 °C wurden im großen Rundkanal drei Einspritzgeschwindigkeiten (8, 16, 32 cm³/s) untersucht.

Tabelle 2: Versuchsparemeter zur Untersuchung des Einflusses der Einspritzgeschwindigkeit auf den erforderlichen Einspritzdruck

Spritzgießparameter	Wert
Schmelzetemperatur	110 °C
Einspritzgeschwindigkeit	8, 16, 32 cm ³ /s
Werkzeugtemperatur	130 °C
max. Einspritzdruck	2000 Bar
Härtezeit	30 s
Fließkanalgeometrie	Großer Rundkanal

Das folgende Balkendiagramm zeigt den Zusammenhang zwischen der Einspritzgeschwindigkeit und dem dafür erforderlichen Einspritzdruck. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass steigenden Einspritzgeschwindigkeit zu steigenden Einspritzdrücken führen.

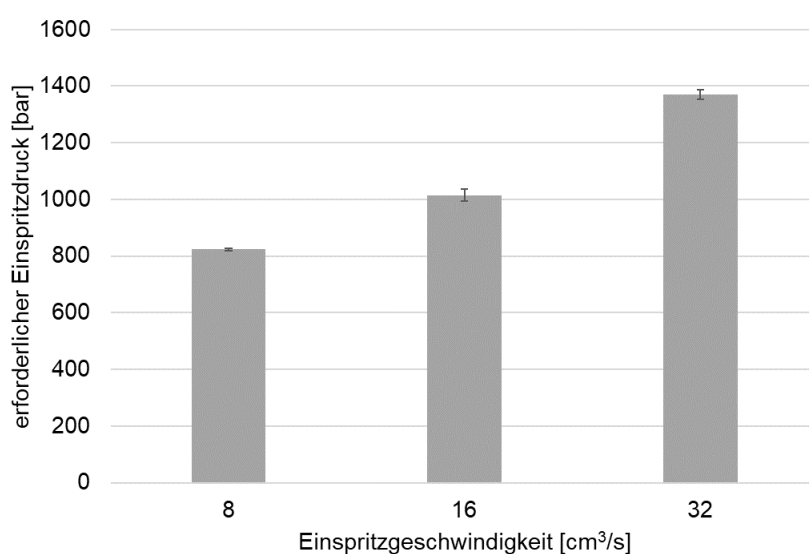


Abbildung 21: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit auf den erforderlichen Einspritzdruck

Aus werkstoff- und prozesstechnischer Sicht ist dies bei der Auslegung von Formgebungsprozessen zu berücksichtigen, da hohe Einspritzdrücke nicht nur höhere Anforderungen an das Werkzeug und die Maschinentechnik stellen, sondern auch potenziell Einfluss auf die Qualität des Endprodukts (z. B. durch Überfüllung oder Gratbildung) haben können. Eine Optimierung der Einspritzgeschwindigkeit muss daher stets unter Berücksichtigung der Druckverhältnisse und der materialspezifischen Verarbeitungsgrenzen erfolgen.

Versuchsreihe 3: Einfluss der Fließkanalgeometrie und des Fließkanalquerschnitts

Zur Untersuchung der unterschiedlichen Fließkanalgeometrien wurde basierend auf den ermittelten, optimalen Versuchsbedingungen eine Werkzeugtemperatur von 140 °C und eine Härtezeit von 10 s gewählt (Tabelle 3). Damit konnte das Erreichen der Druckbegrenzung von 2000 bar bei allen Geometrien vermieden werden.

Tabelle 3: Versuchsparameter zur Untersuchung des Einflusses Fließkanalgeometrie auf den erforderlichen Einspritzdruck

Spritzgießparameter	Wert
Schmelzetemperatur	110°C
Einspritzgeschwindigkeit	16 cm ³ /s
Werkzeugtemperatur	140 °C
max. Einspritzdruck	2000 Bar
Härtezeit	10 s

Fließkanalgeometrie großer Rundkanal, kleiner Rundkanal,
kleiner Eckkanal

Untersucht wurden drei Ausführungen: großer Rundkanal, kleiner Rundkanal und kleiner Eckkanal. Das vorliegende Balkendiagramm veranschaulicht den Einfluss der unterschiedlichen Geometrien auf den erforderlichen Einspritzdruck.

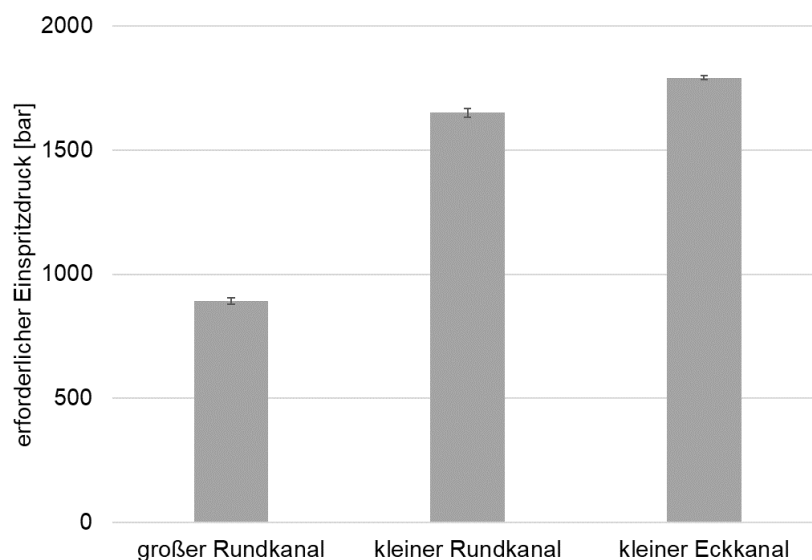


Abbildung 22: Einfluss der Fließkanalgeometrie auf den erforderlichen Einspritzdruck

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das Kanalverteilersystem einen signifikanten Einfluss auf den Einspritzdruck besitzt. Das System mit großem, rundem Querschnitt weist mit etwa 900 bar den geringsten Einspritzdruck auf. Im Gegensatz dazu erfordert das klein dimensionierte, runde System einen deutlich höheren Einspritzdruck von rund 1600 bar. Dieser Anstieg lässt sich durch die verringerte Querschnittsfläche und den damit verbundenen höheren Strömungswiderstand erklären, was zu einem erhöhten Druckbedarf für die Materialförderung führt.

Der höchste Einspritzdruck tritt beim klein dimensionierten, eckigen Kanalverteilersystem auf, mit einem Wert von etwa 1750 bar. Neben dem kleinen Querschnitt spielt hier zusätzlich die eckige Geometrie eine Rolle, die im Vergleich zu runden Querschnitten zu einer höheren Scherbeanspruchung und Stauwirkungen des Materials führt. Dies führt zu einer erhöhten Schererwärmung der Formmasse und damit zu einem schnelleren Vernetzungsfortschritt im Fließkanal. Anhand der Messkneteterkurven konnten ein dementsprechender Zusammenhang zwischen Einspritzdruck und Vernetzungsgrad nachgewiesen werden. In Abbildung 23 ist zu erkennen, dass die Geometrien kleiner Eckkanal und kleiner Rundkanal höherer minimale Viskositäten und geringere Verweilzeiten im Viskositätsminimum aufweisen. Beides deutet auf eine geringere Restreaktivität und damit einen höheren Vernetzungsgrad hin.

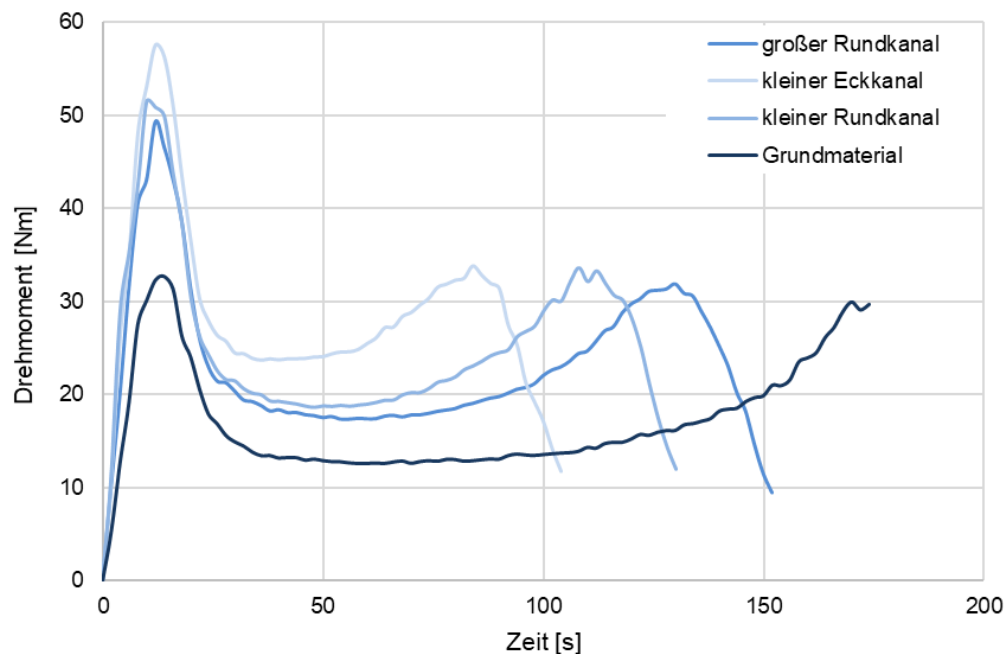


Abbildung 23: Einfluss von Kanalgeometrie und -querschnitt auf das Fließ-Härtungsverhalten

Aus den vorliegenden Ergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass der Kanalquerschnitt einen höheren Einfluss auf die benötigten Einspritzdrücke besitzt als die Geometrie. Zur Minimierung des Einspritzdrucks ist ein möglichst großer und strömungsgünstig (rund) ausgelegter Kanalquerschnitt vorteilhaft. Klein dimensionierte oder geometrisch ungünstige (eckige) Verteilersysteme erhöhen signifikant den benötigten Einspritzdruck und führen zu höheren Anforderungen an die Spritzgießmaschine.

3.4 Konstruktive Anpassungen des Kaltkanalsystems und Erprobung im 12-fach-Serienwerkzeug

3.4.1 Aufbau

Ein Kaltkanalverteilersystem stellt ein schmelzeleitendes System dar, welches aus einer Angießbuchse, einem Verteilerblock und den Angießdüsen besteht. In Abbildung 24 ist der Aufbau der Düsenseite des Spritzgießwerkzeuges schematisch dargestellt. Die Basis dafür bilden zwei Werkzeugplatten, die untere und die obere Verteilerplatte. Die Angießbuchse stellt die Verbindung zwischen der Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschine und dem Verteilerblock des Kaltkanalsystems dar. Der Verteilerblock besteht aus zwei Verteilereinsätzen, wovon einer in der unteren und einer in der oberen Verteilerplatte positioniert ist. Diese sind durch die sekundäre Werkzeugtrennebene voneinander getrennt, welche somit auch die Düsenseite des Spritzgießwerkzeuges in zwei Hälften teilt. Aus dem unteren Verteilereinsatz wird die Formmasse über die Angießdüsen in den Unterverteiler geleitet, welcher sich in der Haupttrennebene des Werkzeuges befindet und in dem die Formmasse zu den Kavitäten gelangt.

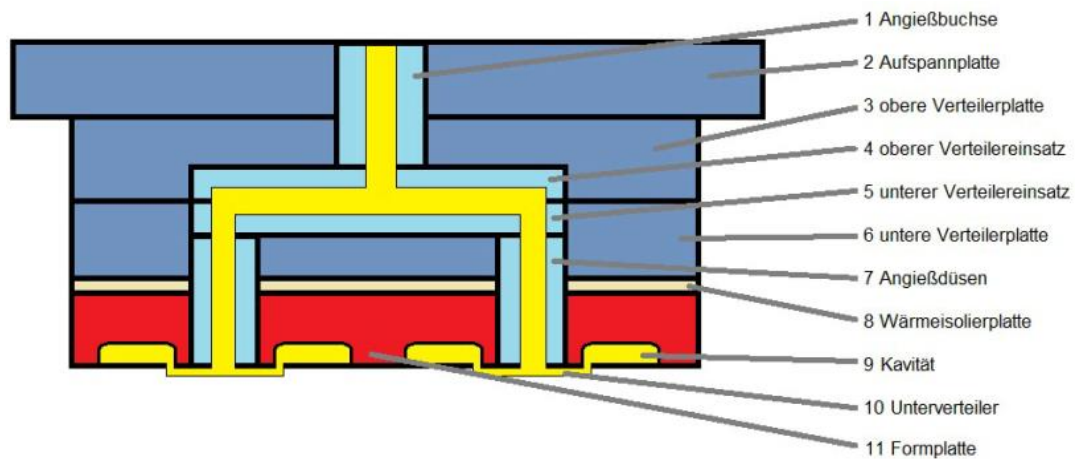


Abbildung 24: Schematischer Aufbau der Düsenseite des geplanten Werkzeuges

Nach Beendigung des Spritzgießprozesses folgt die Angussentnahme des mittlerweile erstarrten Angusses direkt auf der Spritzgießmaschine (Abbildung 25). Dafür wird das Werkzeug an der primären Trennebene aufgefahren und die Verschraubungen der sekundären Trennebene von der primären Trennebene aus gelöst. Danach wird das Werkzeug zusammengefahren. Im Anschluss folgt das Lösen der Werkzeugsicherung der sekundären Trennebene, welche zur Sicherheit bis zu diesem Moment die sekundäre Trennebene vorm Öffnen sichert. Ist dies erledigt, folgt das Verschrauben der Werkzeugsicherung der primären Trennebene. Somit ist der untere Teil der Düsenseite mit der Auswerferseite verbunden. Durch Auffahren der Spritzgießmaschine öffnet sich nun die sekundäre Trennebene und der Angusskanal wird entnommen. Um das Werkzeug wieder in den Betriebszustand zu bringen, müssen diese Vorgänge in entgegengesetzter Reihenfolge durchgeführt werden.

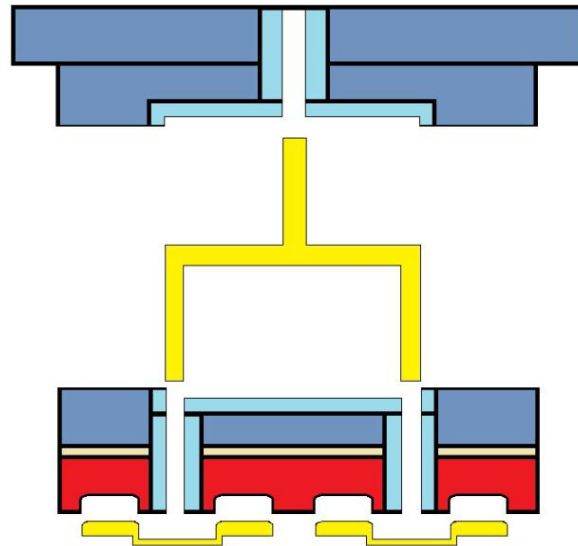


Abbildung 25: Werkzeugöffnung und Angussentnahme nach Prozessende

Das Kaltkanalsystem für das 12-fach-Serienwerkzeug ist ein Verteilersystem mit offenen Angießdüsen, welches einen Unterverteiler in der primären Trennebene bespeist (Abbildung 26). Dabei steht zunächst das prozesssichere Weiterleiten der Harzmasse von der Düse der Plastifiziereinheit bis zum Eintritt der Schmelze in den Unterverteiler und schließlich in die Kavität im Vordergrund.

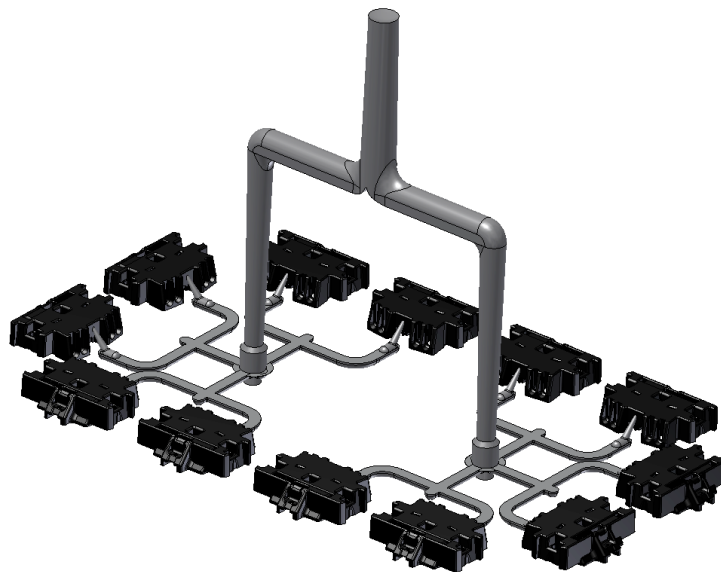


Abbildung 26: Kaltkanalsystem des 12-fach-Serienwerkzeug

Um einen direkten Vergleich zur Standardvariante bei der Spritzgießverarbeitung mittels des Kaltkanalsystems zu ermöglichen, wurde das Werkzeug so aufgebaut, dass das Werkzeug durch beide Varianten bespeist werden kann (Abbildung 27). Es kann also standardmäßig mit einer einfachen temperierten Angießbuchse als auch mit dem Kaltkanalsystem betrieben werden.

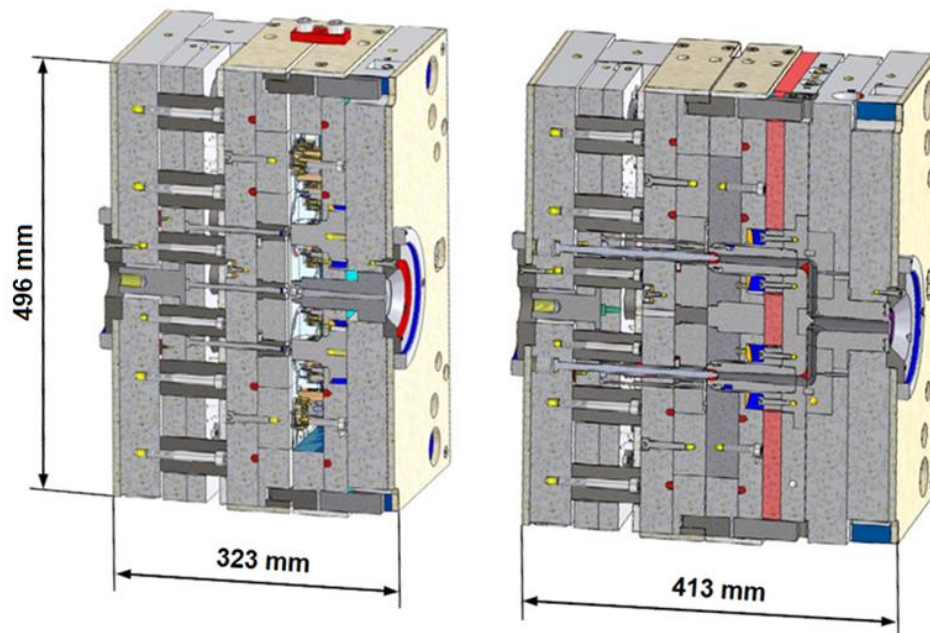


Abbildung 27: mögliche Betriebsarten des 12-fach-Serienwerkzeug; links: einfach temperierte Angießbuchse;
rechts: Kaltkanalsystem

Diese Maßnahme hatte jedoch zur Folge, dass der große Unterverteiler zwingend benötigt wird und somit trotz des Kaltkanalsystems noch keine Abfallersparnis eintrat. Erst mit den Erkenntnissen aus diesem Werkzeug kann zukünftig ein Werkzeug mit einem Kaltkanalsystem gebaut werden, welches auch ein massives Einsparen des Produktionsabfalls ermöglicht. Ein dafür bereits bestehendes Konzept für ein 16-fach Werkzeug ist in Abbildung 28 dargestellt. Ein solches Konzept würde bereits ohne Direktanspritzung zu einer Einsparung von Produktionsabfälle von 59 % führen.

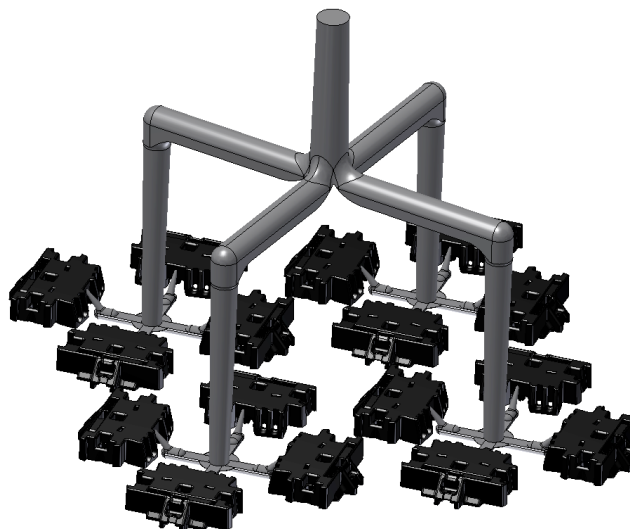


Abbildung 28: Konzept für ein 16-fach-Serienwerkzeug zur signifikanten Einsparung von Produktionsabfällen

Eine direkte Anspritzung der Formteile aus einem Kaltkanalsystem, ohne Angussreste an diesem zurückzulassen, beinhaltet das Lösen der Anschnittproblematik auf kürzester Distanz und stellt erst den daran folgenden Schritt der Entwicklung dar (vgl. Kap. 3.6).

3.4.2 Versuchsplanung

Schritt 1: Durchflusstest mit geöffnetem Werkzeug

Zu Beginn wird ein Durchflusstest mit geöffnetem Werkzeug durchgeführt. Dieses Vorgehen erfolgt analog zum Verfahren mit dem Versuchswerkzeug. Ziel ist es sicherzustellen, dass der Materialstrom gleichmäßig durch Kaltkanalsystem fließt. Dabei werden erste Rückschlüsse auf potenzielle Fließprobleme gezogen.

Schritt 2: Kontrolle der Werkzeugfunktion

Im Anschluss erfolgt eine umfassende Kontrolle der Werkzeugfunktion. Dabei wird insbesondere geprüft, ob die Kavitäten vollständig und gleichmäßig mit Material gefüllt werden. Zusätzlich wird überprüft, ob der Abriss des Unterverteilers korrekt erfolgt.

Schritt 3: Erprobung im Dauerlauf

Nach erfolgreicher Prüfung der Werkzeugfunktionen wird das Werkzeug im Dauerlauf getestet. Ziel dieser Phase ist es, die Prozessstabilität unter Serienbedingungen zu bewerten. Dabei wird das Werkzeug über einen längeren Zeitraum unter realistischen Produktionsbedingungen betrieben, um mögliche Schwachstellen, Temperaturverläufe, Verschleiß oder Prozessabweichungen frühzeitig zu erkennen.

Schritt 4: Qualitätskontrolle der Musterteile

Im letzten Schritt erfolgt die Prüfung der hergestellten Musterteile durch die Qualitätskontrolle. Hierbei werden relevante Merkmale wie Maßhaltigkeit, Oberflächenqualität, Materialfehler, Passgenauigkeit sowie ggf. mechanische Eigenschaften untersucht und dokumentiert. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die weitere Freigabe des Werkzeugs und die eventuelle Optimierung der Prozessparameter.

3.4.3 Versuchsdurchführung

Schritt 1: Durchflusstest mit geöffnetem Werkzeug

Im ersten Schritt verlief der Durchfluss der Kunststoffmasse durch das Kaltkanalverteilersystem zunächst problemlos und vor allem gleichmäßig (Abbildung 29).

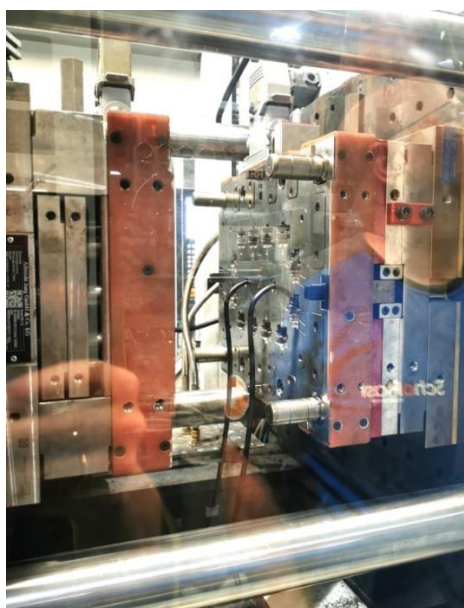


Abbildung 29: Erprobung des Schmelzefflusses durch den Kaltkanalverteiler

Im weiteren Verlauf kam es jedoch aufgrund eines Fehlers an der Spritzgießmaschine zu einer ungeplanten Verweilzeit der Masse im Kanal von ca. zwei Minuten. In dieser Zeit begann die Masse im Kaltkanal aufgrund der thermischen Einwirkung bereits zu reagieren und zu verfestigen. Ein anschließender Versuch, die teilvernetzte Masse durch Einspritzen frischer Masse aus dem Kanal zu verdrängen, scheiterte und unterstreicht damit die Notwendigkeit der Einhaltung des Prozessfensters. In der Folge kam es zu einem sogenannten Überspritzen der zweiten Trennebene, wodurch ein extrem hoher Druck auf die Schrauben entstand. Die Schrauben ließen sich anschließend nur noch schwer öffnen und es zeigten sich deutliche Fressspuren unter den Schraubenköpfen.

Das Reinigen des Kaltkanalsystems durch Angussentnahme auf der Spritzgießmaschine konnte hingegen problemlos durchgeführt werden (Abbildung 30).



Abbildung 30: Bei der Reinigung des Werkzeugs entnommener Anguss

Die ursprünglich eingesetzten Schrauben waren zwar grundsätzlich ausreichend für die im regulären Betrieb auftretenden Kanaldrücke und die vorgesehene Kanalfläche dimensioniert. Im Fall eines Überspritzens vergrößert sich jedoch die effektive Druckfläche so stark, dass die Schrauben dieser Belastung nicht mehr standhalten können.

Da aus konstruktiven Gründen keine weiteren Schrauben ergänzt werden können, wurde die Notwendigkeit erkannt, die wirksame Druckfläche in der zweiten Trennebene zu verringern. Als Lösung wurde ein Dichtungsring um den Kanal in der zweiten Trennebene vorgesehen. Zusätzlich wurden gehärtete Unterlegscheiben unter den Schraubenköpfen eingesetzt werden, um einer erneuten Beschädigung vorzubeugen und die Krafteinleitung zu verbessern.

Schritt 2: Kontrolle der Werkzeugfunktion

Nach den vorgenommenen konstruktiven Anpassungen wurde das Werkzeug erneut angefahren. Dabei wurde erstmals mit der gezielten Befüllung der Kavitäten begonnen, was von Beginn an problemlos funktionierte. Schwierigkeiten traten jedoch beim definierten Abriss des Unterverteilers von den Düsen auf. In einigen Fällen blieb der Unterverteiler teilweise an der Düsenseite haften.

Mit manueller Unterstützung konnte dennoch eine Serie von zehn Schuss mit vollständiger Teilefüllung durchgeführt werden. Allerdings nahm die händische Entfernung des Unterverteilers zunehmend Zeit in

Anspruch, sodass schließlich die Masse im Verteiler zu stark vernetzte und der Versuch abgebrochen werden musste.

Positiv hervorzuheben ist, dass es in dieser Versuchsdurchführung zu keinem Überspritzen der zweiten Trennebene mehr kam. Dank des eingebauten Dichtungsringes sowie des ausbleibenden Stillstands der Spritzgießmaschine blieben die Druckverhältnisse stabil. Die Schrauben ließen sich problemlos öffnen, und der Anguss konnte auf der Maschine einwandfrei entnommen werden.

Das Hauptproblem lag eindeutig im unzureichenden Abrissverhalten des Unterverteilers an den Düsen. Es wurde festgestellt, dass die Haltekraft auf der Auswerferseite nicht ausreichte, um den Unterverteiler zuverlässig zu lösen. Als Gegenmaßnahme wurde ein Angussstachel eingeführt, um den Abrissmechanismus zu unterstützen (Abbildung 31).

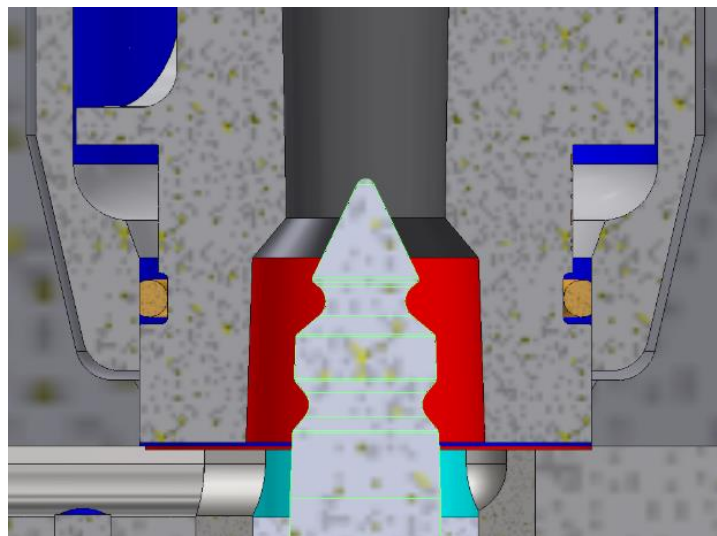


Abbildung 31: Angussstachel zur Verbesserung des Abrissverhaltens des Unterverteilers

Schritt 3: Erprobung im Dauerlauf

In einer weiteren Versuchsreihe wurde das Werkzeug erneut ohne Probleme angefahren. Das Abrissproblem war durch die Implementierung des Angussstachels vollständig behoben, sodass unmittelbar mit einem zweistündigen Dauerlauftest begonnen werden konnte.

Der Prozess lief stabil und ohne Störungen. Die verwendeten Spritzparameter entsprachen weitgehend denen der Standardvariante. Lediglich der Einspritzdruck war ca. 150 bar höher. Ursprünglich war mit einem noch höheren Druckbedarf gerechnet worden, basierend auf den Erfahrungen mit dem Versuchswerkzeug. Durch die Vielzahl an konstruktiven Optimierungen konnte jedoch ein deutlich verbesserter Durchfluss realisiert werden.

Schritt 4: Qualitätskontrolle der Musterteile

Die im Dauerlauf gefertigten Bauteile wurden der Qualitätssicherung übergeben. In Bezug auf Maßhaltigkeit und mechanische Eigenschaften (insbesondere der Bruchlasten) zeigten die Teile keinerlei Unterschiede zur Variante ohne Kaltkanalverteilersystem. Die Qualitätsanforderungen wurden vollständig erfüllt.

3.4.4 Auswertung

Die durchgeführten Versuchsreihen belegen eindeutig, dass das eingesetzte Kaltkanalsystem mit indirekter Anspritzung in Verbindung mit der verwendeten UF-Formmasse funktionsfähig ist. Die grundsätzliche Eignung dieser Technologie für den vorgesehenen Anwendungsfall konnte erfolgreich nachgewiesen werden.

Eine Umsetzung der angestrebten Abfallreduktion wurde im aktuellen Versuchsumfang noch nicht realisiert, da weiterhin eine Wechselvariante des Werkzeugs erforderlich ist (vgl. Kapitel 3.4.1). Für die Zukunft ist jedoch bei einem 16-fach-Werkzeug unter Anwendung derselben Technologie eine signifikante Abfallreduktion von bis zu 59 % gegenüber der bisherigen Standardlösung möglich.

Ein wesentlicher Vorteil des Kaltkanalverteilersystems liegt in der Möglichkeit, die Fachigkeit (Anzahl der Kavitäten) eines Werkzeugs bei gleichbleibender Spritzgießmaschine zu erhöhen. Dies wird dadurch ermöglicht, dass die projizierte Fläche des Unterverteilers deutlich geringer ausfällt als bei konventionellen Anspritzsystemen. Durch diese Erhöhung der Fachigkeit ergibt sich eine messbare Energieeinsparung: Beim getesteten 12-fach-Werkzeug beträgt die Ersparnis bereits 31 %, beim angestrebten 16-fach-Konzept sogar 46 %, jeweils im Vergleich zur Standardvariante.

Die Kombination aus reduziertem Energieverbrauch und geringerem Produktionsabfall bei gleichzeitig gesteigerter Fachigkeit wirkt sich auch ökonomisch positiv aus. Zwar erfordert die komplexere Werkzeugtechnologie höhere Anfangsinvestitionen, jedoch amortisieren sich diese im laufenden Betrieb. Der Break-even-Point wird beim 12-fach-Werkzeug nach 767.339 Zyklen erreicht, was etwa 266 Produktionstagen entspricht. Beim 16-fach-Konzept wird der Break-even bereits nach 229.012 Zyklen bzw. 80 Produktionstagen erzielt (Abbildung 32).

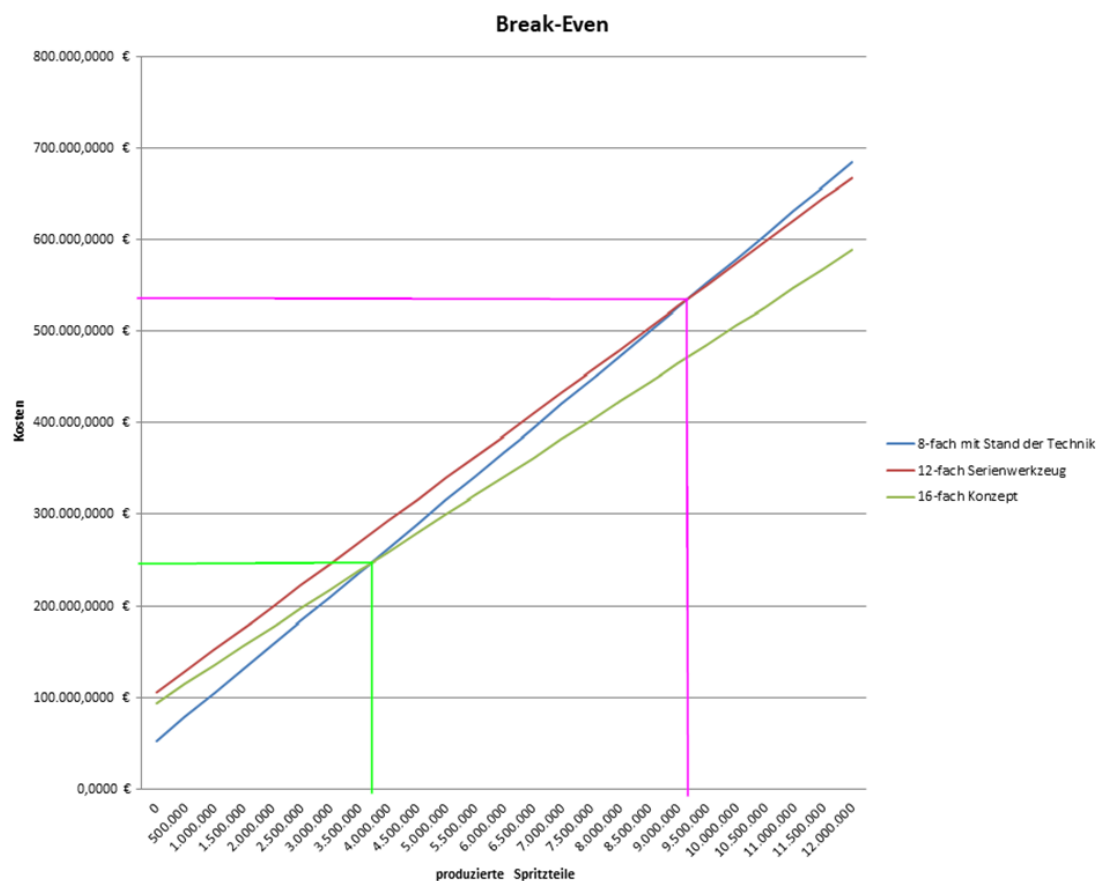


Abbildung 32: Break-Even-Point der verschiedenen Werkzeugkonzepte

3.5 Richtlinien zur Auslegung und Verwendung eines Kaltkanalsystems

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein umfangreicher Katalog bezüglich der Auslegung von Kaltkanalsystemen im Duroplastspritzgießprozess erarbeitet.

3.5.1 Rheologische Auslegung

Bereits bei den Laboranalysen sowie den Untersuchungen am Versuchswerkzeug wurde das scherempfindliche Verhalten der verwendeten Formmasse, speziell bei den relativ geringen Formmassentemperaturen im Kaltkanalsystem, deutlich. Aufgrund dessen steht die rheologische Auslegung des Kaltkanalsystems im Vordergrund. Durch das Scheren der Harzmasse erfährt diese eine Temperaturzunahme, welche das Prozessfenster der Verarbeitung schmälert. Mit der Scherung korreliert zudem auch der Druckverlust, sodass bei einer hohen Scherung auch der aufgewendete Einspritzdruck steigt. Auch diese Erkenntnis wurde mit Hilfe des Versuchswerkzeugs deutlich. Um die Scherung der Harzmasse und somit auch den Einspritzdruck so gering wie möglich zu halten, wurden folgende Punkte bei der Konstruktion des Verteilersystems beachtet:

- **Staubereiche vermeiden**

Staubereiche sind Bereiche, an denen die Harzmasse am weiteren Durchfließen des Verteilersystems gehindert wird. Darunter zählen starke Umlenkungen von Kanalverläufen, Pfropfenfänger, Querschnittsverjüngungen der Querschnittsgeometrie oder auch die Länge des Verteilerkanals an sich. Im Detail sind dafür folgende Punkte bei der Auslegung des Kaltkanalsystems beachtet wurden:

- Starke Umlenkungen der Kanalverläufe sollten durch möglichst große Radien verhindert werden. Dies gilt für die Betrachtung des Verlaufes in allen Ebenen
- Querschnittsverjüngungen können an verschiedenen Stellen des Systems auftreten. Dies fängt bereits in der Spritzgießmaschine, genauer an der Düse der Plastifiziereinheit an. Die Durchmesser der Düsen von Duroplastspritzgießmaschinen sind nicht für das Bespeisen von Verteilersystemen ausgelegt und deshalb eher zu klein. Diese Durchmesser sollten für den optimalen Harzmassenfluss an den oberen Durchmesser der Angießbuchse des Verteilersystems angepasst werden.
Des Weiteren stellen Versätze an Bauteilübergängen eine Querschnittsverjüngung dar. Deshalb wurde bei der Konstruktion darauf geachtet, die verschiedenen Bauteile genau zueinander zu führen bzw. zu zentrieren.
Eine weitere Querschnittsverjüngung stellen konisch zulaufende Kanäle dar. Diese sind jedoch funktionsbedingt in den Angießdüsen nicht zu vermeiden. Um den bei einer Prozessunterbrechung erstarrten Anguss aus der sekundären Trennebene entfernen zu können, müssen die Bereiche, welche senkrecht zu dieser Trennebene verlaufen, mit einer Entformungsschräge versehen werden. Diese Entformungsschräge weitet die Kanalgeometrie in Richtung der vorgesehenen Entformungsrichtung und verringert somit die Haftreibung zwischen dem erstarrten Angusskanal und der Kanaloberfläche. Während dies bei der Angießbuchse kein Problem darstellt, wird die Harzmasse in den Angießdüsen komprimiert. Dies stellt wiederum einen Staubereich dar. Um diesen Effekt weitestgehend gering zu halten, wurden die Entformungsschragen in den Angießdüsen auf das erfahrungsgemäße Minimum der Harzmasse ausgelegt. Bei dieser UF-Formmasse beträgt das Minimum 0,5°.
- Auch der Verteilerkanal an sich stellt einen Staubereich dar, der durch die Reibung zwischen der Kanaloberfläche und der Harzmasse entsteht. Deshalb sollte der Verteilerkanal so kurz wie möglich ausgelegt sein.

- Des Weiteren ist auch die Querschnittsgeometrie in Bezug auf die Staubereiche relevant. Dabei ist der Rundkanal zu bevorzugen. Ist dieser aus fertigungstechnischen Gründen nicht realisierbar, dann ist auch ein parabelförmiger Kanal möglich. Von trapezförmigen, rechteckigen oder halbrunden Kanälen ist jedoch abzusehen, da diese das Bilden von Staubereichen fördern.
- **Block-Scherströmung ermöglichen**

Durch die Block-Scherströmung wird der Widerstand zwischen der Harzmasse und der Kanaloberfläche aufgrund des niedrigviskosen Gleitfilms minimiert (äußere Reibung) und gleichzeitig die innere Reibung bzw. Scherung der Harzmasse durch das fehlende Deformieren des hochviskosen Masseblocks gering gehalten. Durch die geringen Prozesstemperaturen in dem Kanalverteilersystem wird das Verkleben der Randschicht und somit das Bilden der Quellströmung gefördert.

 - Durch Polieren der Kanaloberfläche wird deren Rauigkeit auf ein Minimum reduziert und somit das Verkleben der Randschicht minimiert.
 - Das Benutzen von hoch chromhaltigem Werkzeugstahl beugt einem Verkleben vor.

Zu einer rheologischen Auslegung gehört auch die Anpassung der Kanalgeometrie an den Druckverlauf während des Einspritzens der Harzmasse. Dieser sollte über den gesamten Weg gleichmäßig sein, um ein homogenes und somit auch prozesssicheres Verarbeiten der Harzmasse zu gewährleisten.

- **natürliches Balancieren des Verteilersystems**
 - Unter dem natürlichen Balancieren von Verteilersystemen wird das gleichmäßige Auslegen der Fließweglängen zu den einzelnen Kavitäten verstanden. Dadurch wird das Druckniveau auch nach Verzweigungen der Angusskanäle konstant gehalten. Dabei sind auch die Kanalquerschnitte gleicher Kanalbereiche identisch.
 - Zusätzlich zu den gleichen Fließweglängen gehört auch das gleichmäßige Aufteilen der Scherung auf die Harzmasse. Sind die Fließwege gleich lang, aber die Scherung einzelner Kanäle höher als von anderen, dann ist das System nicht balanciert.
- **Künstliches Balancieren vermeiden**
 - Beim künstlichen Balancieren werden Druckunterschiede durch unterschiedliche Fließweglängen mit einer Variation der Kanalquerschnitte ausgeglichen. Diese Balancierung ist sehr störungsanfällig bei Prozessschwankungen und wird somit nicht in diesem Serienwerkzeug zum Einsatz kommen.
- **Gleiche Fließfrontgeschwindigkeit in allen Verteilerkanälen**
 - Um die Fließfrontgeschwindigkeit in den Kanälen konstant zu halten, muss nach einer Verzweigung der Kanäle der Querschnittsdurchmesser bzw. die Querschnittsfläche angeglichen werden. Somit muss bei einer Verzweigung von einem auf zwei Kanäle die Querschnittsfläche halbiert werden. Eine konstante Fließfrontgeschwindigkeit ergibt eine konstante Scherrate und somit einen beherrschbaren Prozess.

3.5.2 Thermische Auslegung

- **Homogene Temperierung**
 - Für eine homogene Temperierung ist eine gleichmäßige Anordnung der Temperierkanäle die Grundvoraussetzung. Darunter zählt der Abstand zwischen den einzelnen Temperierkanälen und der Abstand zu den Verteilerkanälen.
 - Die für das Werkzeug vorgesehene Ausrichtung auf der Spritzgießmaschine ist bei der Konstruktion zu beachten. Aufgrund der aufsteigenden heißen Luft werden die oberen Werkzeugbereiche wärmer temperiert. Deshalb ist eine horizontale Ausrichtung des

rechteckigen Werkzeuges vorgesehen, wodurch die vertikale Ausrichtung und somit die Temperaturdifferenz verkleinert wird.

- **Thermische Trennung zwischen dem Kaltkanalsystem und dem heißen Werkzeug**

- Zwischen den unterschiedlich temperierten Werkzeugplatten wurde eine Wärmeisolationsplatte eingebracht. Diese wird mit der kompletten Schließkraft der Spritzgießmaschine belastet, weshalb diese eine hohe Druckfestigkeit und gleichzeitig ein geringes Setzverhalten aufweisen muss. Die Parallelität der Wärmeisolationsplatte muss sich dabei innerhalb der Formtoleranz von 0,02 mm befinden
- Wo dies konstruktiv vertretbar ist wurden Luftspalte von mindestens 1 mm zwischen den unterschiedlich temperierten Bereichen eingebracht.

Um die zwischen den unterschiedlich temperierten Werkzeugbereichen aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung auftretende Relativbewegung zu ermöglichen und somit den Verzug des Werkzeuges bzw. einzelner Bauteile zu vermeiden, wurden konstruktiv bestimmte Vorkehrungen getroffen:

- **Kompensation der thermischen Ausdehnung**

- Die Wärmeisolierplatte zwischen den unterschiedlich temperierten Werkzeugbereichen wurde mit einer Beschichtung versehen, welche die Haftneigung verringert und gleichzeitig die Gleitfähigkeit verbessert.
- Auch die Führung des Werkzeuges muss diese Relativbewegung ermöglichen, jedoch gleichzeitig eine präzise Positionierung der Werkzeugplatten und somit auch der jeweiligen Bauteile gewährleisten. Die standartmäßigen Säulenführungen können freiheitsgradbedingt nur eine translatorische Bewegung gewährleisten (Z-Richtung des Werkzeuges). Um die thermische Ausdehnung zu ermöglichen, werden Rechteckführungen benötigt, welche 2 translatorische Bewegungen zulassen. Die Rechteckführungen wurden mittig an allen Außenseiten der Werkzeugplatten eingebracht werden, um die Relativbewegung zu ermöglichen.
- Um die Relativbewegung möglichst gering zu halten sind die heißen Platten aus Stählen mit geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten (z.B. 1.2085) und die kühleren Platten aus Stählen mit großen Wärmeausdehnungskoeffizienten (z.B. 1.2312) auszuwählen.
- Die Angießdüsen erstrecken sich durch die heiße Formplatte, welche sich relativ zu der unteren Verteilerplatte mehr ausdehnt. Dadurch besteht die Gefahr, dass sich die Angießdüsen verbiegen oder die Relativbewegung unterdrücken. Um dies zu verhindern wurde bei diesem Werkzeug die Angießdüsenposition zwischen den verschiedenen thermischen Zuständen vermittelt. Das bedeutet, dass die Angießdüsenposition um den halben Relativweg nach außen versetzt wird, sodass im nicht temperierten sowie im temperierten Werkzeug dieselben Belastungen aufgrund der Relativbewegung vorherrschen.

3.5.3 Mechanische Auslegung

Die mechanische Auslegung des Kaltkanalverteilersystems erfolgt nach dem im inneren des Systems vorherrschenden Drucks. Dieser ist aufgrund der geringen Harzmassentemperatur und der damit einhergehenden hohen Viskosität sehr hoch, weshalb die mechanische Auslegung des Kaltkanalsystems eine große Rolle spielt.

- **Verhinderung einer zu großen Durchbiegung der Werkzeugplatten**
 - Um Durchbiegungen zu verhindern sind Freimachungen hinter Druckbelasteten Bereichen zu vermeiden und stattdessen ganzflächige Auflagen zu gewährleisten. Dies ist auch an den unterschiedlich temperierten Bereichen durch die druckbelastete Wärmeisolierplatte zu realisieren. Ist dies konstruktiv nicht möglich, ist eine gegen Biegung ausreichende Plattenstärke oder eine gegen Stauchung ausreichende Abstützung vorzusehen.
 - Durch den hohen Druck der hochviskosen Harzmasse im Kaltkanalsystem hat die sekundäre Trennebene das Bestreben aufgedrückt zu werden. Um diese Problematik zu vermeiden, ohne die Zuhaltkraft der Spritzgießmaschine unnötig erhöhen zu müssen, ist eine großzügige Verschraubung der sekundären Trennebene einzubringen.
- **Verhinderung des Berstens Schmelze-leitender Bauteile**
 - An den vertikal ausgerichteten Bauteilen (Angießbuchse und Angießdüsen) können die hohen Drücke nicht durch den Werkzeugaufbau aufgenommen werden. Stattdessen muss die Wandstärke dieser Bauteile dem hohen Druck standhalten. Aufgrund der Erfahrungen aus dem Versuchswerkzeug erfolgte diese Dimensionierung mit dem maximalen Einspritzdruck der vorgesehenen Spritzgießmaschine und einem Sicherheitsfaktor von mindestens 2.
 - Alle Schmelze-leitenden Bauteile sind aus einem zähen Warmarbeitsstahl, welcher auf mindestens 52 HRC gehärtet ist, zu fertigen. Hierfür hat sich 1.2343 bewährt, welcher zudem eine hohe Wärmeleitfähigkeit, Warmfestigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit aufweist und gut polierbar ist.

3.5.4 Sonstige Auslegungen

Das Auslegen des Angussvolumens stellt einen Kompromiss aus mehreren Anforderungen dar:

- **Möglichst geringes Angussvolumen**
 - Um den Abfall in Form des bei einer Produktionsunterbrechung erstarrenden Angusses gering zu halten, sollte dessen Volumen möglichst gering sein.
 - Das Angussvolumen sollte kleiner sein als die Summe des Volumens des Unterverteilers und der Formteile. Dies gewährleistet einen ständigen Austausch der Harzmasse im Kaltkanalsystem bei jedem Spritzgießzyklus.
- **Möglichst großes Angussvolumen**
 - Ein großes Angussvolumen durch durchgängig große Kanalquerschnitte ermöglicht eine gute Übertragung des Einspritz- und des Nachdruckes von der Spritzgießmaschine über das Verteilersystem bis hin zur Kavität. Dies ist für eine hohe Formteilqualität essenziell.

Für das gleichmäßige Füllen der Kavitäten bei jedem Spritzgießzyklus muss das Formmassenvolumen, welches in dem Kaltkanalsystem nach dem Auswerfen des Unterverteilers zurückbleibt, immer gleich sein.

- **Einbringen eines definierten Abrisspunktes**
 - Der definierte Abrisspunkt ist eine punktuelle Verengung des Kanalquerschnittes am Ende des Fließkanals in der Angießdüse. Dieser stellt eine Sollbruchstelle zwischen dem erstarrten Unterverteiler und der noch plastifizierten Harzmasse im Kaltkanalsystem dar. Zu positionieren ist der Abrisspunkt an diesem zu erwartenden Phasenübergang. Dieser befindet sich leicht oberhalb des unteren Führungsbereiches der Angießdüse, welcher mit dem heißen Werkzeugbereich im direkten Kontakt steht.

3.6 Konstruktive Anpassungen und Erprobung der Direktanspritzung im Versuchswerkzeug

Im Rahmen der weiteren Projektarbeiten wurde die Auslegung eines Kaltkanalverteilersystems mit direkter Anspritzung auf das Formteil untersucht. Entgegen der ursprünglichen Planung konnte diese Entwicklung nicht im vorgesehenen 8-fach-Serienwerkzeug realisiert werden. Grund hierfür sind die mittlerweile im Projektverlauf gewonnenen konstruktiven Erkenntnisse zur Auslegung eines derartigen Systems, die sich im bestehenden 8-fach-Werkzeug nicht technisch umsetzen lassen. Stattdessen wurde das Versuchswerkzeug als Basis für die Weiterentwicklung herangezogen und modifiziert.

Die Direktanspritzung sollte, wie im ursprünglichen Projektantrag vorgesehen, mit einer offenen Düse konzipiert werden. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass eine thermische Entkopplung zwischen den unterschiedlich temperierten Bereichen des Werkzeugs in dieser Konfiguration nicht möglich ist. Dies basiert auf den folgenden Problemstellungen:

1. Entweder wird das Spritzteil ordnungsgemäß gefüllt, jedoch vernetzt die Masse in der Düse durch die ständige thermische Belastung, was einen kontinuierlichen Prozess unmöglich macht.
2. Oder die Düse bleibt frei, allerdings ist in diesem Fall die Temperatur im angrenzenden Anschnittbereich zu niedrig, sodass dort keine vollständige Vernetzung erfolgt. Dies führt zu Spritzteilen mit unzureichenden mechanischen Eigenschaften.

Ein weiterer technischer Engpass ergibt sich aus dem für offene Düsen notwendigen sehr kleinen Anschnittdurchmesser. Bei einem System mit hochviskoser Reaktionsmasse ist dies jedoch nicht realisierbar, da sich die Masse nicht mit der erforderlichen Prozesssicherheit durch den kleinen Querschnitt fördern lässt.

Aufgrund dieser Herausforderungen wurde die Notwendigkeit einer mechanischen Entkopplung zwischen dem Kaltkanalsystem und der Kavität erkannt. Die Lösung bestand in der Entwicklung eines Nadelverschlusses, der über die Funktion eines klassischen Verschlusses (wie beispielsweise bei Thermoplastsystemen) hinausgeht.

Die Nadel erfüllt dabei zwei zentrale Aufgaben:

- Zum einen verschließt sie den Anschnitt zuverlässig.
- Zum anderen wird die Nadel zum aktiven Einspritzelement, das die Masse aus dem Kaltkanalsystem gezielt in die Kavität fördert. Dadurch verbleibt keine kritische Restmasse im thermischen Übergangsbereich zwischen kaltem Kaltkanal und heißer Formnestumgebung – was einer effektiven thermischen Entkopplung entspricht.

Ein zusätzlicher Vorteil dieser Konstruktion liegt in der Möglichkeit, über die Nadel einen gezielten Nachdruck auf das Formteil auszuüben. Dies ist beim klassischen Duroplastspritzgießen, aufgrund der typischen Verarbeitung ohne Massepolster, normalerweise nicht möglich. Bei langen Fließwegen, wie sie bei einem solchen Kaltkanalsystem auftreten, könnte der Nachdruck von der Spritzgießmaschine auch allein nicht bis zur Kavität übertragen werden. Durch den Nadelverschlussmechanismus ist dies jedoch direkt am Formteil realisierbar.

Insgesamt eröffnet diese Technologie neben der Einsparung des Angusses auch das Potenzial für eine verbesserte Formteilqualität, insbesondere durch optimierte Nachdruckverhältnisse und die Vermeidung von Teilvernetzungen im kritischen Übergangsbereich.

3.6.1 Aufbau und Auslegung

Für die Erprobung der Direktanspritzung ohne Unterverteiler wurde das bereits vorhandene Versuchswerkzeug modifiziert. Dabei diente die Kanalvariante mit großen Radien und großem Durchmesser als Grundlage, da sich diese als besonders praktikabel erwiesen hatte.

Die wesentliche Modifikation bestand darin, dass seitlich ein Formeinsatz integriert wurde, in den die zuvor von der Spritzgießmaschine eingespritzte Formmasse mittels hydraulisch angesteuerter Nadel gedrückt werden kann (Abbildung 33).

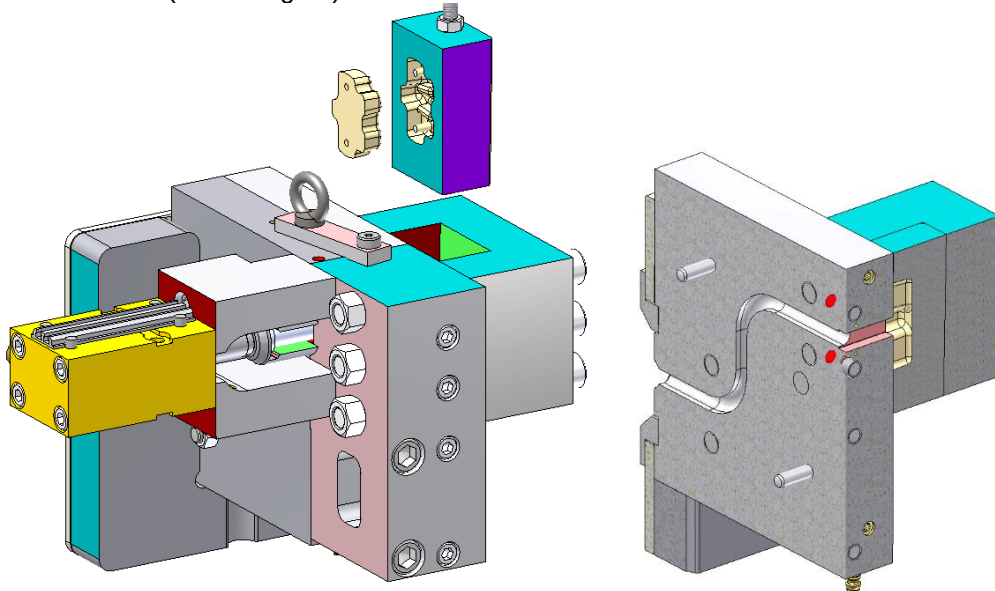


Abbildung 33: links: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Direktanspritzung mittels Nadelverschlussystem;
rechts: Schnitt der Konstruktion zur Veranschaulichung des Fließweges in die Kavität

Der Formeinsatz enthält dabei eine vereinfachte Geometrie des komplexen Sockels, der für die spätere Anwendung vorgesehen ist (Abbildung 34). Ziel war es, die wesentlichen prozess- und formrelevanten Aspekte in einer reduzierten, aber praxisnahen Kontur abzubilden.

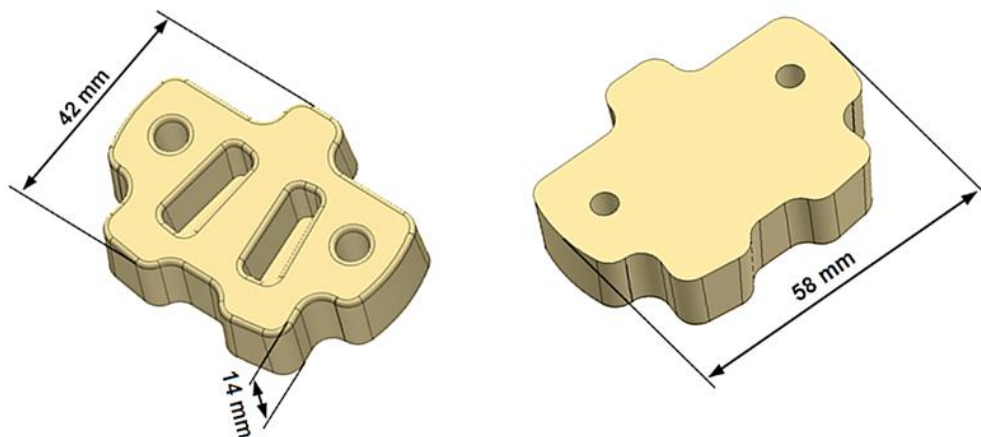


Abbildung 34: Vereinfachte Geometrie zur Erprobung der Direktanspritzung

Die Formeinsätze selbst wurden keilförmig konstruiert, sodass sie von oben in die Aufnahme des Werkzeugs eingesetzt werden können. Durch ihre Formgeometrie halten sie sich ohne zusätzliche Fixierung selbstständig in Position. Dieses einfache, aber effektive System ermöglicht einen schnellen und unkomplizierten Wechsel der Einsätze.

Insgesamt wurden drei identische Formeinsätze gefertigt. Diese Entscheidung basiert auf dem gewählten Prozessablauf: Die Einsätze werden zunächst auf einer separaten Heizplatte extern vorgewärmt, anschließend in das Werkzeug eingesetzt, dann befüllt und im Anschluss entnommen. Dieser Vorgang muss innerhalb der geforderten Zykluszeit von 30 Sekunden stattfinden. Da das Entformen des Spritzteils nach dem Entnehmen eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, stehen durch den Dreifachsatz jederzeit einsatzbereite Einsätze zur Verfügung, sodass der Prozess kontinuierlich fortgeführt werden kann. Diese Lösung vereint praxisnahe Bauteilgeometrie, eine robuste Prozessführung und eine effiziente Testabwicklung im Versuchsbetrieb.

3.6.2 Versuchsplanung

Schritt 1: Inbetriebnahme des Werkzeugs ohne Formeinsätze und Materialaustrag ins Freie

Zu Beginn der Versuchsreihe erfolgt das Anfahren des Spritzgießwerkzeugs in vollständig montiertem Zustand, jedoch ohne eingelegte Formeinsätze. Ziel dieser Maßnahme ist die prozesseitige Inbetriebnahme des Kaltkanalsystems sowie die Überprüfung des Materialflusses unter realitätsnahen Bedingungen. Hierzu wird Formmasse unter prozessnahen Parametern verarbeitet und die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Härtezeit beträgt 30 Sekunden bei einer Kaltkanaltemperatur von 130 °C. Der freie Materialaustrag dient zusätzlich zur Detektion potenzieller Unregelmäßigkeiten im Schmelzefluss sowie zur Sichtkontrolle des Schmelzezugs.

Schritt 2: Programmierung und Integration des Kernzugsystems

In Schritt 2 wird das hydraulisch angetriebene Kernzugsystem des Werkzeugs programmiert und in den automatisierten Maschinenzyklus eingebunden. Die Aktivierung des Hydraulikzylinders erfolgt direkt nach Beendigung des Einspritzprozesses. Während dieses Schritts befinden sich die Formeinsätze weiterhin außerhalb des Werkzeugs. Die Funktionsprüfung des Kernzugs erfolgt unter realen Zyklusbedingungen, um die vollständige Bewegungsfreiheit, Positioniergenauigkeit und zeitliche Abstimmung mit dem übrigen Werkzeugmechanismus zu gewährleisten.

Schritt 3: Formteilmontage mit beheizten Einsätzen

Nach erfolgreicher Prozessfreigabe wird mit der Formteilmontage unter produktionsnahen Bedingungen begonnen. Hierzu werden die einzusetzenden Formeinsätze zunächst auf einer externen Heizplatte auf die erforderliche Verarbeitungstemperatur von 150 °C vorgeheizt. Sobald die thermische Stabilität erreicht ist, wird ein Einsatz manuell in das Werkzeug eingelegt und innerhalb eines Zyklus mit Formmasse befüllt (Abbildung 35). Nach Ablauf der Härtezeit erfolgt der manuelle Wechsel der Einsätze um den Prozess kontinuierlich fortzuführen. Das ausgehärtete Bauteil wird aus dem gefüllten Einsatz entnommen und der leere Einsatz erneut auf der Heizplatte temperiert, um für die nachfolgende Befüllung bereitgestellt zu werden. Durch dieses zyklische Wechselverfahren kann ein kontinuierlicher Fertigungsprozess realisiert werden, bei dem sowohl die thermische Prozessführung als auch die Qualität der ausgehärteten Bauteile sichergestellt werden.

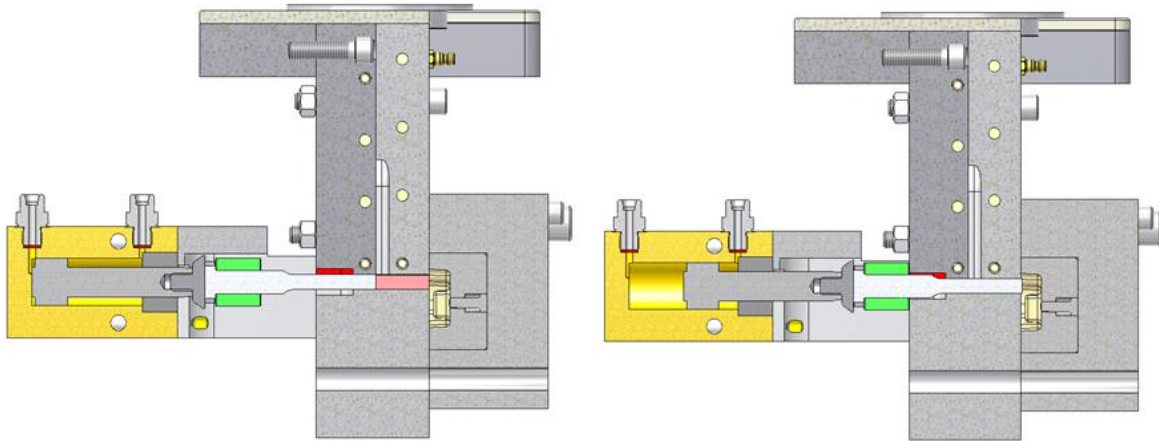


Abbildung 35: Draufsicht Versuchswerkzeug zur Erprobung der Direktanspritzung; links: Nadelverschluss während des Einspritzens durch die Spritzgussmaschine in hinterer Position; rechts: Nadelverschluss zur Kavitätsfüllung in vorderer Position

3.6.3 Versuchsdurchführung

Schritt 1: Inbetriebnahme des Werkzeugs ohne Formeinsätze und Materialaustrag ins Freie

Schritt 1 verlief ohne jegliche Komplikationen. Die Materialförderung durch das Kaltkanalsystem war stabil, der Schmelzefluss homogen und es zeigten sich keine Hinweise auf ungleichmäßige Temperaturverteilung oder Fließstörungen. Auch unter realitätsnaher Zykluszeit (30 s) ließ sich der freie Materialaustrag prozesssicher durchführen.

Schritt 2: Programmierung und Integration des Kernzugsystems

Auch die Integration und zyklische Ansteuerung des hydraulischen Kernzugsystems konnte ohne prozesstechnische Probleme umgesetzt werden. Die Bewegung des Hydraulikzylinders war wiederholgenau, vollständig synchron zum Maschinenzyklus und wies keine Beeinträchtigungen durch Toleranzabweichungen, thermische Ausdehnung oder Rückwirkungen auf das übrige Werkzeugsystem auf.

Schritt 3: Formteilkfertigung mit beheizten Einsätzen

Im Rahmen der Formteilkfertigung zeigten sich hingegen erste prozesstechnische Einschränkungen. Zwar konnte die thermische Konditionierung der Einsätze wie geplant durchgeführt werden, jedoch erwies sich die zur Verfügung stehende Nadelkraft in einzelnen Fällen als nicht ausreichend, um die Formmasse vollständig zu verdichten bzw. die Kavität vollständig zu füllen.

Ist das Einspritzvolumen kleiner als das eigentlich benötigte Artikelvolumen eingestellt, dann genügt die durch den Hydraulikzylinder generierte Nadelkraft, um die Nadel bis zu dem vorderen Anschlag zu drücken. Die Kavität wird dabei jedoch nicht vollständig gefüllt (Abbildung 36).



Abbildung 36: Unvollständig gefüllte Kavität aufgrund eines zu geringem Einspritzvolumens

Wird das Einspritzvolumen an das benötigte Artikelvolumen angepasst, so ist die durch den Hydraulikzylinder generierte Nadelkraft nicht mehr ausreichend, um die Nadel bis zum vorderen Anschlag zu bewegen. Dies resultiert darin, dass der in Bezug zur Entformungsrichtung hinterschnittige Angussbereich bei der Entnahme des Formeinsatzes abgeschert wird. Der Artikel ist jedoch bis auf ein paar Bindenähte vollständig gefüllt (Abbildung 37).



Abbildung 37: Fehlstellen an den vollständig gefüllten Bauteilen aufgrund einer unzureichenden Nadelkraft

3.6.4 Auswertung

Im Rahmen der Versuche mit direkter Anspritzung zeigte sich, dass durch die Kombination aus der hohen Viskosität der „kalten Schmelze“ und dem vergleichsweise großen Durchmesser der Nadel ein erheblicher Kraftaufwand erforderlich ist, um die Reaktionsmasse zuverlässig in die Kavität zu drücken. Dies stellt eine bedeutende konstruktive Herausforderung dar, die bei zukünftigen Werkzeugauslegungen berücksichtigt werden muss – entweder durch den Einsatz leistungsstärkerer Hydraulikzylinder oder durch die Reduktion des Nadeldurchmessers, sofern dies prozesstechnisch umsetzbar ist. Während der Versuche traten vereinzelt Formteilefehler wie Bindenähte auf. Diese bekannten Fehlerbilder lassen sich mit relativ einfachen Maßnahmen, wie sie aus der standardisierten Duroplastspritzgießverarbeitung bekannt sind, beheben. In den vorliegenden Versuchsreihen wurde jedoch bewusst auf derartige Korrekturen verzichtet, um zunächst ein realistisches Bild der prozessbedingt auftretenden Fehlerarten zu erhalten. Ziel war es, ein fundiertes Verständnis für die typischen Fehlstellen bei der Anwendung dieser neuen Technologie zu gewinnen, um diese Erkenntnisse gezielt in zukünftige Konstruktionen einfließen zu lassen.

Trotz der genannten Herausforderungen konnte die grundsätzliche Funktionalität des Direktanspritzsystems nachgewiesen werden. Die Machbarkeit der Technik ist somit bestätigt.

Bei der Übertragung dieser Technologie in ein Serienwerkzeug für eine identische Spritzgießmaschine zeigen sich jedoch wirtschaftliche und konstruktive Grenzen: Durch den Platzbedarf des Nadelantriebs ist eine Erhöhung der Fachigkeit nicht realisierbar. Im vorliegenden Fall lassen sich nur acht Kavitäten

unterbringen, was der Fachigkeit des ursprünglichen Werkzeugs entspricht. Zusätzlich führt der Betrieb des Nadelantriebs zu einem erhöhten Energiebedarf, der im Vergleich zur Standardvariante um ca. 7 % höher liegt.

Der große Vorteil dieses Systems liegt in der vollständigen Vermeidung von Produktionsabfall – die Angussersparnis beträgt hier 100 %. Aus ökonomischer Sicht ergibt sich jedoch ein später Break-even-Point nach 942 Produktionstagen, was außerhalb der typischen Lebensdauer eines solchen Werkzeugs liegt (Abbildung 38). Unter derzeitigen Bedingungen wäre die Umsetzung dieser Technologie in einem Serienwerkzeug daher nicht wirtschaftlich.

Dennoch bestehen Ansätze zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, etwa durch die Wiederverwendung von modularen Komponenten wie dem Nadelantrieb in mehreren Werkzeugen. Darüber hinaus überwiegen bei genauer Betrachtung die technischen Vorteile dieser Lösung: Die vollständige Vermeidung von Produktionsabfall stellt einen erheblichen Beitrag zur Ressourceneffizienz dar, und die Möglichkeit, über den Nadelverschluss gezielt Nachdruck bis hin zur Kavität aufzubauen, eröffnet neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Formteilqualität, insbesondere bei komplexen oder großvolumigen Bauteilen mit langen Fließwegen. Auch wenn die Technologie unter den vorliegenden Rahmenbedingungen noch nicht wirtschaftlich ist, stellt sie aus technischer Sicht eine zukunftsweisende Lösung dar, insbesondere für Anwendungen mit hohen Qualitätsanforderungen und Fokus auf Abfallvermeidung.

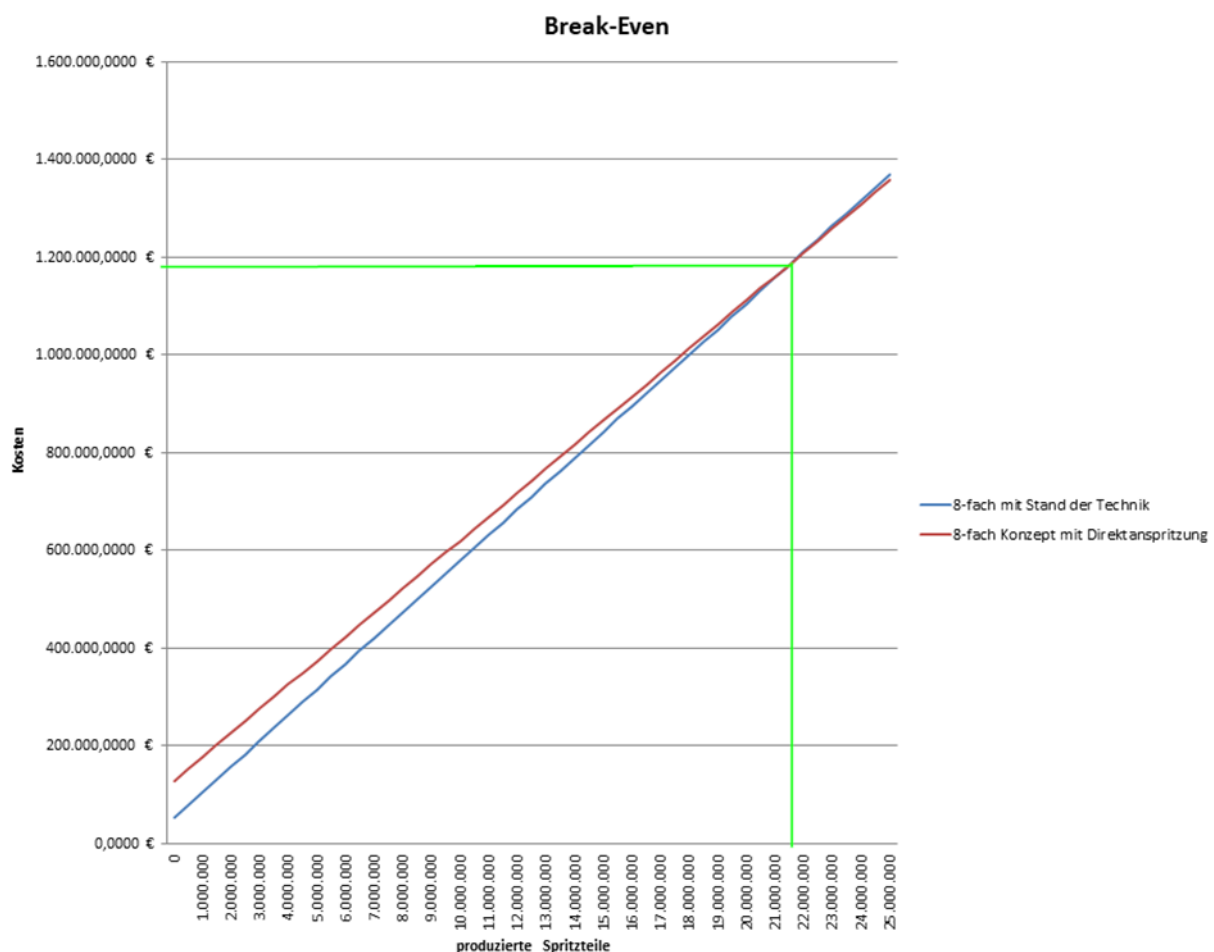


Abbildung 38: Break-Even-Point Standardlösung/Direktanspritzung

4 Fazit

Im Rahmen des geförderten Forschungsvorhabens konnte ein bedeutender Fortschritt im Bereich des abfallreduzierten Duroplastspritzgießens erzielt werden. Durch die Entwicklung und Erprobung eines innovativen Kaltkanalverteilersystems wurde nachgewiesen, dass eine signifikante Reduktion des anfallenden Produktionsabfalls sowie eine Steigerung der Energieeffizienz technisch realisierbar ist.

Zentrale Erkenntnis war, dass ein mögliches Prozessfenster zur Verarbeitung der verwendeten Harnstoff-Formaldehyd-Formmassen im Kaltkanalsystem durch laboranalytische sowie prozessnahe Materialcharakterisierungen bestimmt werden konnte. Thermoanalytische Untersuchungen mittels DSC und TGA sowie rheologische Messungen an Messkneten und Rheometer, lieferten hierfür eine fundierte Grundlage und zeigten die kritischen Temperaturbereiche für Aushärtung und Zersetzung des Werkstoffs auf. Ergänzt durch prozessnahe Analysen im eigens entwickelten Versuchswerkzeug konnten relevante Einflussgrößen wie Einspritzdruck, Härtezeit und Kanalgeometrie systematisch erfasst und bewertet werden.

Die schrittweise Entwicklung und Optimierung des 12-fach-Serienwerkzeugs unterstrich die konstruktiven und verfahrenstechnischen Anforderungen an ein robustes Kaltkanalsystem. Es konnte gezeigt werden, dass durch gezielte Anpassungen, etwa in der thermischen Trennung, mechanischen Auslegung und Steuerung der Abrissvorgänge, ein stabiler und prozesssicherer Betrieb unter Serienbedingungen möglich ist. Das Werkzeug erfüllte dabei alle qualitativen Anforderungen hinsichtlich Maßhaltigkeit und mechanischer Eigenschaften der Formteile.

Wirtschaftlich betrachtet ermöglicht das entwickelte System bei gleichbleibender Maschinenteknik eine Erhöhung der Fachigkeit sowie eine Reduktion der Energie- und Materialkosten. Für das getestete 12-fach-Werkzeug ergibt sich bereits eine Energieeinsparung von 31 %, die im angestrebten 16-fach-Werkzeugkonzept auf bis zu 46 % gesteigert werden kann. Gleichzeitig lässt sich der Materialabfall gegenüber konventionellen Anspritzsystemen um bis zu 59 % reduzieren.

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse wurde deutlich, dass die vollständige Realisierung einer an-gusslosen Direktanspritzung, insbesondere bei duroplastischen Formmassen, weitere technologische Entwicklungen, etwa in Form von Nadelverschlussystemen, erfordert. Diese stellen aufgrund der erforderlichen thermischen Entkopplung notwendige Entwicklung dar. Im Rahmen des Projektes konnte die Funktionalität und Machbarkeit solcher Systeme im Versuchsmaßstab nachgewiesen werden. Aufgrund konstruktiver und wirtschaftlicher Restriktionen jedoch noch nicht für Serienanwendungen erprobt werden.

Insgesamt belegt das Projekt die Machbarkeit eines ressourceneffizienten, großserientauglichen Duroplastspritzgießverfahrens mit hohem Transferpotenzial in die industrielle Praxis. Die erarbeiteten Technologien und Erkenntnisse bilden eine belastbare Grundlage für nachhaltige Produktionskonzepte im Bereich duroplastischer Formteile, insbesondere im Kontext wachsender Anforderungen an Kreislaufwirtschaft und energieeffiziente Fertigung.

Literaturverzeichnis

- [Bea20] BEAUMONT, J. P.: Auslegung von Anguss und Angusskanal. Hanser, München, 2020.
- [Bec68] BECKER, E.: Duroplaste. Hanser, München, 1968.
- [Dom12] DOMININGHAUS, H.: Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen. Springer Verlag, Heidelberg, 2012.
- [Hop18] HOPMANN, C.: Kapitel 8 – Ausführung der Angüsse. In: Spritzgießwerkzeuge. Hanser, München, 2018.
- [Hus22] HUSKY: Husky Heißkanalsysteme. Werkschrift der Husky Injection Molding Systems Ltd., Bolton, Kanada. Niederlassung Luxemburg in L-3401 Dudelange. Online verfügbar: www.husky.ca, 2022
- [Joh03] JOHANNABER, F.: Kunststoff Maschinen Führer. Hanser, München, 2003.
- [Joh04] JOHANNABER, F.: Handbuch Spritzgießen. Hanser, München, 2004