



Masterarbeit

Optimierung eines Automobilbauteils mittels Simulation und Versuchsplanung

verfasst von

Manuel Philipp Berger, BSc

Matr. Nr.: 0535052

eingereicht am

Lehrstuhl für Spritzgießen von Kunststoffen



SPRITZGIEßEN VON
KUNSTSTOFFEN

Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Walter Friesenbichler

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. Gerald Berger

Dipl.-Ing. Markus Battisti

Leoben, August 13

Eidesstattliche Erklärung

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

Datum

Unterschrift

Danksagung

Für die Beurteilung und kritische Anmerkungen bei der Korrektur dieser Masterarbeit möchte ich mich besonders bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Walter Friesenbichler, dem Leiter des Lehrstuhls für Spritzgießen, bedanken.

Für die hervorragende Betreuung, fachliche Unterstützung und die Erstkorrektur der Arbeit möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerald R. Berger meinen besonderen Dank aussprechen.

Ein Dankeschön auch an Frau Ing. Anja Wallner und Frau Ing. Nina Krempl für die Unterstützung bei den Materialmessungen und Materialauswertungen. Ein weiterer Dank gilt Herrn Eduard Leitner der mir beim praktischen Teil dieser Arbeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Bei meinen Bürokollegen und Mitstudenten möchte ich mich auch herzlichst bedanken. Im Speziellen bei Hans-Jürgen Luger der mir mit seiner Pionierarbeit unzählige Arbeitsstunden abgenommen hat. Weiteres danke ich Michael Kessler, Patrick Pazour und Astrid Pichler für die gemeinsamen angenehmen Bürostunden.

Der Firma Delphi Packard Austria und deren Mitarbeitern möchte ich ebenfalls für die ausgezeichnete und reibungslose Zusammenarbeit danken.

Ein großes Dankeschön abschließend auch an meine Familie, die mir mein Studium ermöglicht hat und mir stets das Gefühl der Unterstützung und der Sicherheit gegeben hat.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird der Spritzgießprozess eines Automobilbauteils aus PA 66 mittels Simulation und Versuchsplanung virtuell optimiert. Dazu wird ein Modell des Mehrkavitäten-Spritzgießwerkzeuges inklusive Heißkanal- und Kühlsystem in der Spritzgießsimulationssoftware Cadmould 3D-F 6.0 erstellt und der reale Ist-Zustand durch Übernahme der Prozessparameter aus der Serienproduktion simuliert. Es werden die mittlere Temperatur über der Bauteildicke, die Wandtemperaturverteilung, die Siegelzeiten sowie die Schwindung und der Verzug analysiert. Mittels der Prozessoptimierungssoftware VARIMOS 4.06 wird ein Versuchsplan erstellt, bei dem ausgewählte Parameter (Füllzeit, Nachdruckzeit, Nachdruckprofil, Kühlzeit, Schmelze- bzw. Heißkanaltemperatur und zweimal Vorlauftemperatur) systematisch variiert werden. Nach Auswertung der Simulationen werden lineare mathematische Prozessmodelle für die Qualitätsmerkmale Bauteilbreite, Bauteilhöhe und Bauteilverzug berechnet und damit einerseits die Haupteinflussgrößen bestimmt sowie ein optimaler, robuster Arbeitspunkt mit Einhaltung aller Toleranzvorgaben vorhergesagt.

Um zykluszeitbestimmende Hot Spots zu reduzieren, werden zusätzlich unterschiedliche Werkzeugmaterialien mit höherer Wärmeleitfähigkeit simuliert sowie die Störgröße „Zusetzen von Temperierkanälen“ betrachtet.

Ferner wird die Machbarkeit des Bauteiles aus PBT GF20 im gegebenen Werkzeug geprüft. Auch hier wird durch systematische Simulationen anhand eines Versuchsplanes eine optimale Prozesseinstellung, bei der innerhalb der vorgegebenen Spezifikationen produziert werden könnte, gesucht.

Abstract

In this work, the injection molding process of an automotive part made of PA 66 is optimized virtually by using simulation and Design of Experiments. A mold model including hot runner and cooling system is built in the simulation software Cadmould 3D-F 6.0 and the serial production process is simulated. The average temperature of the part thickness, the mold surface temperature distribution, the sealing times, the shrinkage and the warpage, respectively, will be considered in more detail. By means of the process optimization software VARIMOS 4.06 selected parameters (filling time, holding time, holding pressure profile, cooling time, cooling fluid temperatures, melt and hot runner temperature) are systematically varied in an D-optimal experimental design. Based on the simulation results, linear mathematical process models for part width, part height and warpage will be calculated to determine both, the major influence parameters and an optimum robust process setting, where all quality parameters are within their given tolerances.

Furthermore, the use of mold materials with a higher thermal conductivity and the disturbance parameter "calcium deposit in the cooling channels" are simulated to analyze cycle time dominating hot spots.

Finally, the feasibility of PBT GF20 as alternative polymer using both, the given part design and the given mold is proved. In several simulations based on a D-optimal experimental design an optimum process setting is determined.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Theorie.....	3
2.1	<i>Spritzgießen.....</i>	3
2.1.1	Spritzgießprozess.....	4
2.1.2	Werkzeug.....	6
2.1.3	Forminnendruck.....	8
2.1.4	Zusetzen der Temperierkanäle.....	9
2.2	<i>Materialeigenschaften.....</i>	11
2.2.1	PA 66.....	11
2.2.2	PBT GF20.....	12
2.2.3	Viskosität	13
2.2.4	Carreau- und WLF-Ansätze.....	14
2.2.5	pvT-Diagramme und Schwindung.....	15
2.3	<i>Formteilqualität.....</i>	18
2.4	<i>Frontloading</i>	19
2.5	<i>Statistische Versuchsplanung.....</i>	21
2.6	<i>Simulation.....</i>	24
2.6.1	Cadmould 3D-F.....	25
2.6.2	CQC (Continuous Quality Control)	27
2.6.3	VARIMOS [14].....	28
3	Simulation des Ist-Zustandes	30
3.1	<i>Bauteil.....</i>	30
3.2	<i>Materialdaten</i>	32
3.2.1	Viskosität	32
3.2.2	pvT	36
3.3	<i>Modellaufbau.....</i>	37
3.4	<i>Prozesseinstellungen.....</i>	43
4	Simulationsergebnisse Ist-Zustand	45
4.1	<i>Füllprobleme.....</i>	45
4.2	<i>Wandtemperaturverteilung</i>	46
4.3	<i>Bauteiltemperatur am Ende der Füllphase.....</i>	48
4.4	<i>Wärmestrom-Effizienz.....</i>	50
4.5	<i>Druckbedarf.....</i>	51
4.6	<i>Siegelzeit, Einfrierzeit und Entformungszeit.....</i>	52
4.7	<i>Randschichtdicke am Ende der Füllzeit.....</i>	56
4.8	<i>Schwindung und Verzug.....</i>	58

5	Virtuelle Bauteil- und Prozessoptimierung PA 66	62
5.1	<i>Versuchsplanung</i>	62
5.2	<i>Haupteinflussgrößen</i>	64
5.3	<i>Virtuelles Optimum PA 66</i>	69
5.4	<i>Weitere Optimierungsansätze</i>	72
5.4.1	Formeinsätze aus einem Material mit höherer Wärmeleitfähigkeit	72
5.4.2	Gesamtes Werkzeug aus wärmeleitfähigerem Stahl	74
5.4.3	Formeinsätze aus Aluminium	75
5.4.4	Zusetzen der Temperierkanäle	76
6	Machbarkeit in PBT GF20	78
6.1	<i>Einzelne Simulation PBT GF20</i>	78
6.1.1	Füllbarkeit	79
6.1.2	Bauteilabmessungen PBT GF20	80
6.2	<i>Machbarkeit in PBT GF20 mittels Versuchsplanung</i>	81
7	Zusammenfassung	86
8	Literaturangabe	89
9	Anhang	91
9.1	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	91
9.2	<i>Tabellenverzeichnis</i>	93
9.3	<i>Materialdatenblätter</i>	94
9.3.1	Materialdatenblatt für PA 66	94
9.3.2	Materialdatenblatt für PBT GF20	95
9.4	<i>Koeffizienten</i>	97
9.4.1	Carreau-WLF-Koeffizienten für PA 66	97
9.4.2	Carreau-WLF-Koeffizienten für PBT GF20	97
9.4.3	IKV-Koeffizienten für PA 66	97
9.4.4	IKV-Koeffizienten für PBT GF20	98
9.5	<i>Berechnungsbeispiel zur Reduzierung des Volumenstromes</i>	99
9.6	<i>Erläuterung des Optimierungsfensters in CQC</i>	101

1 Einleitung und Zielsetzung

Spritzgießen ist das am häufigsten verwendete Verfahren in der Industrie für die Herstellung von Kunststoffbauteilen. Gegenüber anderen Verfahren zur Produktion von Kunststoffbauteilen sind beim Spritzgießen nicht nur geringe Zykluszeiten möglich, sondern auch das Fertigen mehrere Bauteile pro Zyklus (Mehrfachwerkzeuge). Dadurch ergeben sich große Vorteile für Bauteile mit großen Stückzahlen.

Das Prinzip beim Spritzgießen ist, dass der Kunststoff aufgeschmolzen und unter Druck in ein Werkzeug mit der gewünschten Bauteilform eingespritzt wird, wo er abkühlt und erstarrt. Danach kann das Bauteil entnommen werden und wenn nötig weiterverarbeitet werden. Um eine optimale Bauteilqualität zu erhalten, müssen die Prozessparameter (z.B. Drücke, Temperaturen, Zykluszeiten) an die Produktionsmaschine, das Material und die Bauteilform angepasst sein.

Da es heutzutage immer wichtiger ist, einen Produktionsvorgang kosteneffizient zu gestalten, ist die Zykluszeit ein sehr wichtiger Faktor. Je länger ein Spritzgießzyklus dauert, desto weniger Bauteile werden produziert und damit steigen die Kosten der Fertigung. Die Kühlung bzw. die Kühlzeit des Bauteils im Werkzeug ist daher maßgebend für geringe Zykluszeiten. Weiteres ist die Kühlung auch sehr wichtig für die Bauteilqualität. Verzug und innere Spannungen können mit einer optimalen Kühlung reduziert bzw. so gering wie möglich gehalten werden.

Wichtige Einflussgrößen bei der Kühlung sind unter anderem Anzahl, Position und Durchmesser der Kühlkanäle, das Medium, das zum Kühlen verwendet wird, und die Durchflussrate. Es zeigt sich jedoch in der Praxis, dass es sich oft als schwierig erweist, Werkzeuge mit einer optimalen Kühlsituation zu fertigen. Deshalb muss bei der Position der Kühlkanäle meist ein Kompromiss zwischen Optimum und Fertigungsmöglichkeit getroffen werden [4].

Da die Fertigung von Spritzgießwerkzeugen sehr kostenintensiv ist, sind Versuche mit unterschiedlichen Kühlsystemen meist nicht finanzierbar. Mit Hilfe von Simulationsprogrammen kann man verschiedene Prozesseinstellungen bzw. Kühlsituationen kostengünstiger berechnen und bewerten. Solche Simulationen sollen durch Vergleich mehrerer Versuchseinstellungen vorab eine Optimierung des Prozesses ermöglichen, um kostengünstig Bauteile mit hoher Qualität fertigen zu können.

Die Firma DELPHI Packard Austria GmbH (DPA), Großpetersdorf, ist an den Lehrstuhl für Spritzgießen an der Montanuniversität Leoben (MUL-SGK) herangetreten, um anhand einer Diplomarbeit die Kühl- und Prozesssituation eines Werkzeuges bei einer Steckverbindung aus Polyamid 66 (PA 66) bzw. Polybutylenterephthalat mit 20 % Glasfaseranteil (PBT GF20) beurteilen zu lassen.

Das zu untersuchende Bauteil ist ein siebenpoliger Stecker für Schmelzsicherungen in der Automobilindustrie und wird derzeit aus PA 66 (Durethan AC30, Lanxess) mit dem Spritzgießwerkzeug Delphi 18120A in einer 4-fach-Kavität hergestellt. Besonders wichtige Qualitätsmerkmale sind die Zykluszeit, der Bauteilverzug und die Bauteilschwindung.

Mittels umfassender Simulation wird der „Ist-Zustand mit PA 66“ nachgebildet und durch systematische Versuchsplanung ein virtuelles Prozessfenster und ein virtuelles Prozessoptimum für PA 66 erstellt.

Nach virtueller Ermittlung der optimalen Geometrie und der optimalen Prozessbedingungen für PA 66 wird als nächster Schritt die Störgröße „Zusetzen der Temperierkanäle“ betrachtet, um einen dauerhaft stabilen Prozess vorhersagen zu können. Das Zusetzen der Temperierkanäle ist ein Phänomen, bei dem sich an der Kühlkanalwand eine Kalkschicht ausbildet, die einerseits als thermischer Isolator und andererseits als Fließwiderstand sowohl Durchflussrate des Kühlmediums als auch Kühlwirkung verschlechtern.

Die Machbarkeit (Maßhaltigkeit) des Bauteiles in PBT GF20 (Pocan B 3225, Lanxess) wird mit der derzeitigen Werkzeuggeometrie virtuell mittels Spritzgießsimulation und in einem weiteren systematischen Versuchsplan untersucht. Falls durch Variation der Prozessbedingungen die Machbarkeit in PBT nicht erreicht wird, muss der Versuchsplan um geometrische Änderungen (Abmaße, Wanddicken, Fließhilfen) ergänzt werden.

Es sind auch Versuche für PA 66 und PBT GF20 an der Spritzgießmaschine geplant, um die in der Simulation gewonnenen Ergebnisse mit der Realität vergleichen zu können. Dazu wurde das Werkzeug von DPA mit Sensorik (Temperatur- und Drucksensor) ausgestattet. Es soll analog zur Simulation ein Versuchsplan real abgefahren und ausgewertet werden.

2 Theorie

2.1 Spritzgießen

Wie in der Einleitung erwähnt, ist Spritzgießen das am häufigsten verwendete und bedeutendste Fertigungsverfahren für Kunststoffbauteile. Spritzgießen ist ein diskontinuierliches Fertigungsverfahren für Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere und ermöglicht eine vollautomatische Fertigung von Bauteilen, wodurch in kürzester Zeit hohe Stückzahlen produziert werden können. Das Spritzgießverfahren ermöglicht auch das Fertigen von komplexen Bauteilgeometrien und besitzt eine große Bandbreite von Formteilgrößen (10^{-6} – 10^2 kg pro Formteil). Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Spritzgießverfahren, wobei in dieser Masterarbeit nur das konventionelle Spritzgießen zur Anwendung kommt [7].

Eine Spritzgießmaschine besteht aus mehreren Bestandteilen, welche in Abbildung 1 dargestellt sind. Die wichtigsten sind dabei:

- Schließeinheit,
- Werkzeug,
- Plastifizieraggregat (Spritzeinheit),
- Temperiergerät,
- Steuerung sowie
- Maschinenbett.

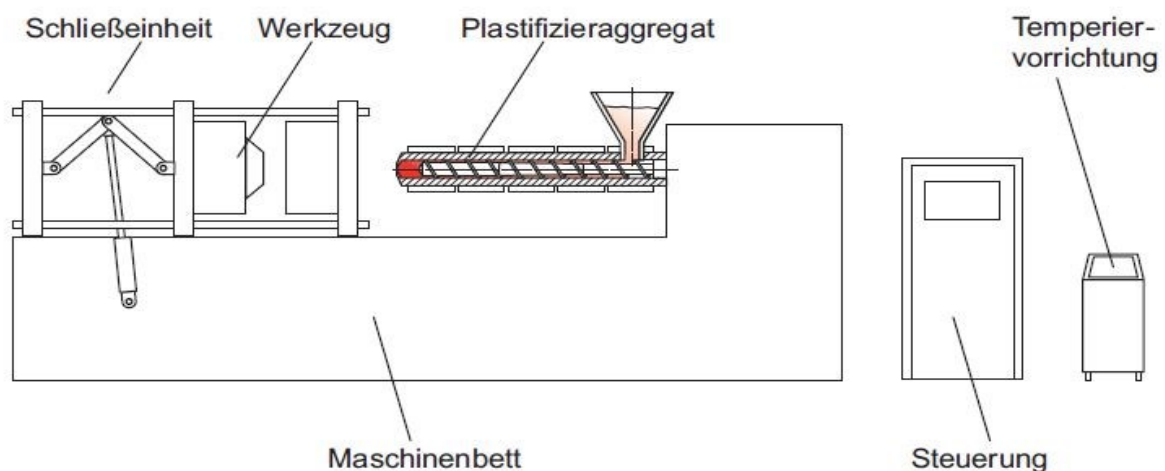


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Spritzgießmaschine [7].

Das Maschinenbett führt den Werkzeugschlitten, die Schließeinheit, das Werkzeug und das Plastifizieraggregat. Das Werkzeug wird mittels einer Temperiervorrichtung gekühlt und transportiert somit Wärme aus dem Bauteil ab. Über eine Steuerung werden die Vorgänge und die einzelnen Einheiten miteinander koordiniert [11].

2.1.1 Spritzgießprozess

Der Spritzgießprozess ist die Verarbeitung vom Ausgangsmaterial (z.B. Kunststoffgranulat) bis hin zum fertigen Bauteil (Spritzling). Abbildung 2 zeigt den schematischen Verfahrensablauf beim Spritzgießen. Im ersten Schritt wird das Werkzeug, welches einen Hohlraum entsprechend der gewünschten Bauteilgeometrie aufweist, geschlossen. Das plastifizierte Material wird mittels axialer Vorwärtsbewegung der Schnecke unter Druck in das Werkzeug eingespritzt (Schritt 2). Nach dem Einspritzen folgt eine Nachdruckphase, wobei noch immer Material in die Kavität gepresst wird. Anschließend verbleibt das Bauteil noch eine bestimmte Zeit zum Kühlen im Werkzeug, um eine gewisse Formstabilität zu erreichen. Diese Zeit wird auch als Restkühlzeit bezeichnet (Schritt 3). Beim Dosieren wird mittels Rotation der Schnecke das Material aufgeschmolzen und in Richtung Schneckenspitze transportiert (Schritt 4). Dieser Schritt wird meist parallel zu Schritt 3 durchgeführt. Im letzten Schritt wird das Werkzeug geöffnet und das Formteil ausgeworfen [11]. Die einzelnen Verfahrensschritte werden im folgenden Abschnitt nochmals genauer beschrieben.

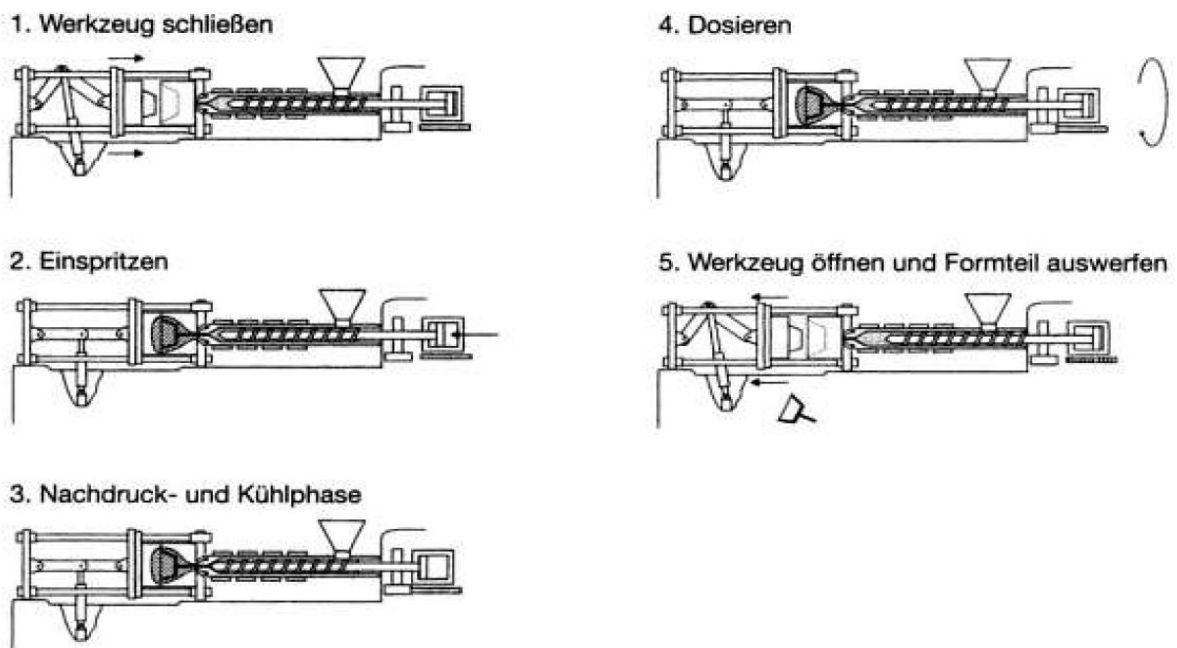


Abbildung 2: Verfahrensablauf beim Spritzgießen [11].

Einspritzen

Das aufgeschmolzene Material, welches sich im Schneckenorraum befindet, wird mittels einer axialer Vorwärtsbewegung der Schecke ohne Rotation durch die Düse ins Werkzeug eingespritzt. Die Geschwindigkeit, mit der die Schnecke nach vorne fährt, auch Schneckenvorlaufgeschwindigkeit genannt, ist steuerbar und spiegelt sich in der Form der Einspritzgeschwindigkeit wieder. Bei hydraulischen Maschinen ist die Schneckenvorlaufgeschwindigkeit meist von dem von der Hydraulikpumpe geförderten Ölvolumenstrom abhängig, der den hydraulischen Einspritzzylinder betätigt. Während des Einspritzvorgangs steigt für gewöhnlich der hydraulische Druck und mit ihm auch der Einspritzdruck. Um während des Einspritzvorgangs das Rückfließen der Schmelze über den Schneckensteg zu verhindern, besitzen die Schnecken in der Regel eine Rückstromsperre. Das Rückfließen der Schmelze bei verschlossenen Rückstromsperren führt zu einer erschwerten Reproduzierbarkeit des Spritzgießvorgangs und zu hohen Verweilzeiten [11].

Nachdruck- und Kühlphase

Die Nachdruckphase, oder auch Kompressionsphase, findet statt, nachdem das Formnest volumetrisch gefüllt ist. Der Druck im Formnest steigt weiter an, was zu sehr hohen Drücken im Werkzeug führt. Während des Nachdruckes findet weiterhin ein Massefluss ins Formnest statt. Dieser Massefluss soll die Volumenkontraktion des Formteils minimieren, d.h. Schwindung und Verzug sollen reduziert werden. Das Umschalten von Einspritzen auf Nachdruck kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- Hydraulikdruckabhängig,
- schneckenwegabhängig,
- werkzeuginnendruckabhängig und
- zeitabhängig.

Der Nachdruck wird mittels Nachdruckhöhe und Nachdruckzeit geregelt. Werden die Nachdruckzeit oder die Nachdruckhöhe zu kurz gewählt, so können z.B. Einfallstellen auftreten. Ist die Siegelzeit erreicht, was das Zufrieren des gesamten Querschnittes des Anschnittes bedeutet, so kann kein Nachdruck mehr in das Formteil übertragen werden. Die Nachdruckzeit sollte so gewählt werden, dass der Nachdruck gerade noch so lange anhält, solange Schmelze in das Formteil übertragen werden kann. Der Druck beginnt sich nach dem Siegelzeitpunkt abzubauen und nähert sich dem Umgebungsdruck. Ideal ist es, wenn im Formteil bei der Entformung kein Restdruck mehr wirkt.

Die Kühlphase beginnt eigentlich mit dem Zeitpunkt des Einspritzens. Das Material welches in das temperierte Werkzeug eingespritzt wird, kühlt ab dem ersten Kontakt ab. Da Formteile oft nach der Nachdruckphase noch nicht entformbar sind, verbleiben sie noch eine Zeit lang im Werkzeug bis sie formstabil sind und entformt werden können. In diesem Falle spricht man von einer Restkühlzeit, welche sich vom Ende der Nachdruckphase bis zur Entformung erstreckt [11].

Dosieren

Das Material wird über einen Trichter der Schnecke zugeführt und dann mittels Rotation der Schnecke Richtung Schneckenspitze gefördert. Neben der Rotation der Schnecke wird auch eine axiale Rückwärtsbewegung der Schnecke durchgeführt, da die geförderte Masse Raum benötigt. Mittels Schererwärmung und die von außen über die Zylinderheizung zugeführte Heizwärme, wird das Material plastifiziert. Die Dosierung erfolgt so lange, bis das gewünschte Dosiervolumen erreicht ist, welches aber durch die Zylinder- und Schneckenengeometrie beschränkt ist. Der Hydraulikzylinder, der für die axiale Bewegung der Schnecke zuständig ist, wird beim Plastifiziervorgang meist mit einem geringen Druck, dem Staudruck, beaufschlagt. Beim Plastifizieren des Materials muss die Schnecke bei ihrer Rückwärtsbewegung gegen den Staudruck arbeiten. Dadurch kommt es zu einer besseren Homogenisierung der Schmelze und bei bestimmten Materialien wird der Staudruck zur Vermeidung von Lufteinschlüssen verwendet [11].

2.1.2 Werkzeug

Das Werkzeug ist die zentrale Baugruppe bei der Spritzgießfertigung und gibt nicht nur die Geometrie des Bauteiles vor, sondern hat eine Reihe von wichtigen Aufgaben bzw. Eigenschaften. Grundsätzlich kann man die Aufgaben in zwei Gebiete mit Untergebieten unterteilen.

a. Technologische Aufgaben

- Aufnahme und Verteilung der Schmelze,
- Formgebung,
- Kühlung der Schmelze und
- Entformung.

b. Konstruktive Aufgaben

- Kraftaufnahme,

- Bewegungsübertragung und
- Führung der Werkzeugteile.

Es gibt eine Vielzahl von möglichen Konstruktionsvarianten, die entsprechend der funktionellen Gruppen und des zu produzierenden Formteils anzupassen sind. In Abbildung 3 ist ein schematischer Aufbau eines Spritzgießwerkzeuges dargestellt [11].

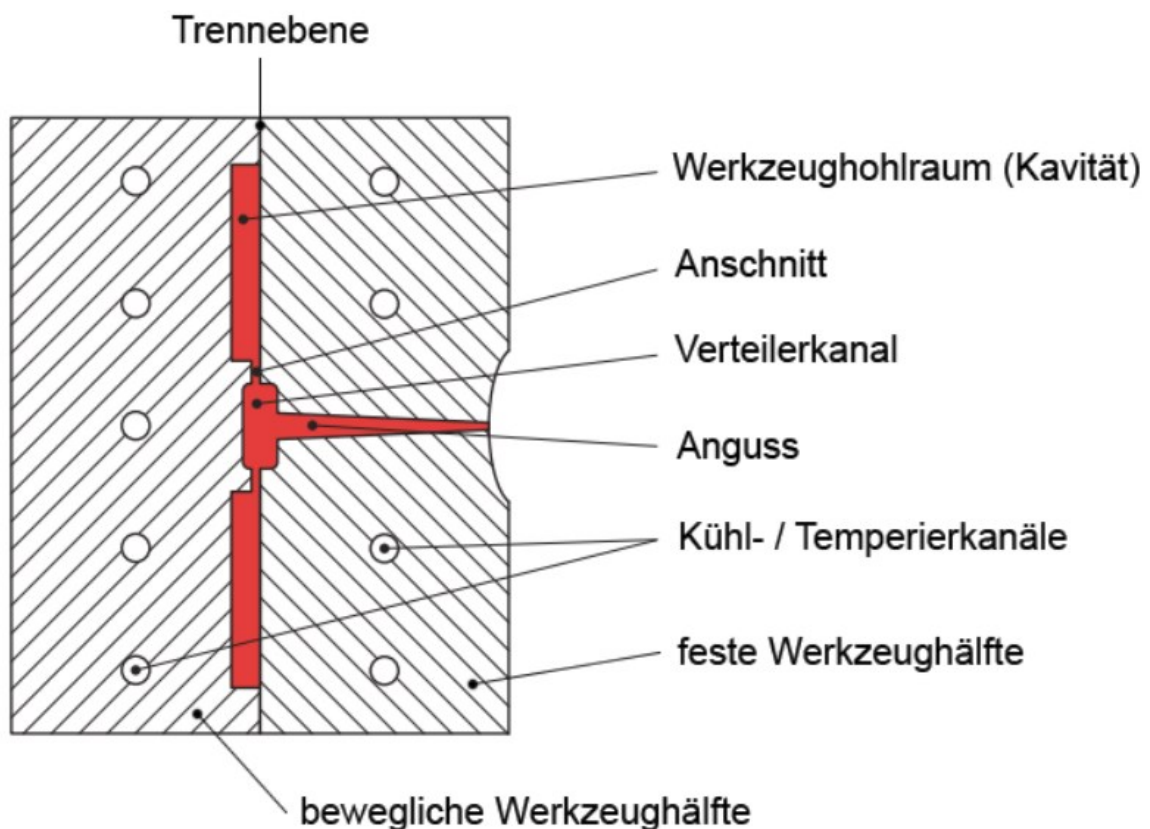


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Spritzgießwerkzeuges [7].

Dieses Werkzeug besteht aus zwei Hälften, der düsenseitigen, festen Werkzeughälfte (Spritzseite) und der schließseitigen, beweglichen Werkzeughälfte (Auswerferseite). Die Werkzeuge werden meistens aus Stahl gefertigt und verfügen unter anderem über einen Hohlraum (Kavität), welcher dem Bauteil seine äußere Gestalt vorgibt, einen Anguss inklusive Verteilerkanal und Anschnitt und Temperierkanäle.

Das Angusssystem kann aus mehreren Teilen bestehen, so z.B. aus einem Heißkanalsystem und einem Kaltanguss. Bei einem Heißkanal wird das Angusssegment vom restlichen Werkzeug isoliert und beheizt. So wird sichergestellt, dass das Material stets in einem fließfähigen Zustand bleibt. Bei einem Kaltkanal erstarrt die Schmelze und der Anguss muss mit entformt werden. Der Verteilerkanal teilt die Schmelze in mehrere Schmelzeströme auf,

was eine gleichzeitige Fertigung mehrerer Formteile in Mehrfachkavitäten ermöglicht. Der Anschnitt ist die Überführung vom Angussystem zum Formteil.

Die Temperierung des Werkzeuges erfolgt über Kühl- bzw. Temperierkanäle. Meist sind diese Kühlkanäle Bohrungen, die in das Metall eingearbeitet werden. Bei Thermoplasten wird in der Regel das Formteil mit Hilfe des Temperiersystems gekühlt. Das bedeutet, Wärme wird vom Formteil über das Werkzeug und das Kühlsystem abtransportiert. Als Temperiermedium wird in der Regel Wasser verwendet [11].

2.1.3 Forminnendruck

Der Druck im Inneren des Werkzeuges ist ein wichtiger Überwachungsparameter beim Spritzgießprozess. Der Forminnendruck wird über die Zeit betrachtet und abgebildet. Die dabei entstandene Forminnendruckkurve gibt Auskunft über Qualitätsmerkmale und Fertigungsprobleme. Sie ist sozusagen der Fingerabdruck eines jeden Spritzgießprozesses. In Abbildung 4 ist eine typische Forminnendruckkurve mit schematischen Zuordnungen von Qualitätsmerkmalen und Fertigungsproblemen zu den verschiedenen Druckbereichen dargestellt.

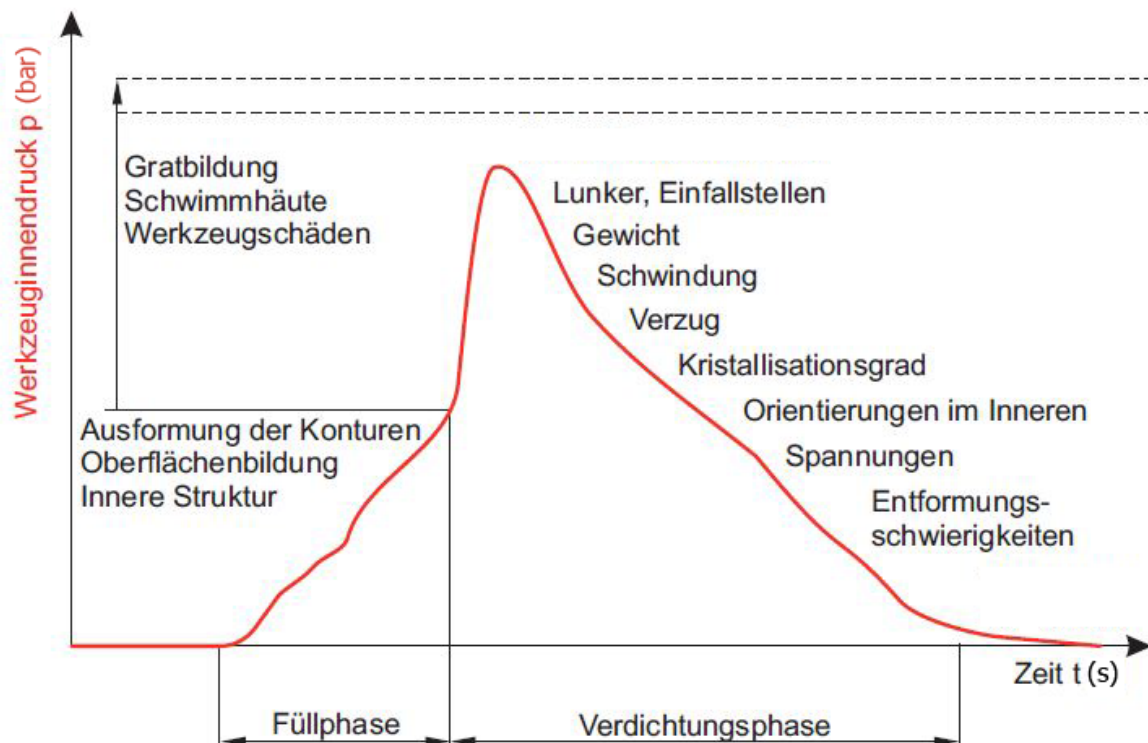


Abbildung 4: Interpretation einer Forminnendruckkurve [7].

Während der Füllphase wird das Material in die Kavität gepresst, was zu einem Druckanstieg führt. In diesem Bereich kann man bereits erkennen, ob eventuell Füllprobleme auftreten. Am Ende der Füllphase beginnt die Nachdruckphase, wobei der Druck durch die Trägheit der Spritzgießmaschinenschnecke zuerst zu einem Maximum hin ansteigt (Kompressionsphase). Erfolgt die Umstellung von Einspritzen auf Nachdrücken zu spät, kann es zu Gratbildung kommen, was zu Werkzeugschädigungen führen kann. Wenn die Siegelzeit erreicht ist, sprich der Anschnitt eingefroren ist, kann kein Druck mehr in das Formteil übertragen werden und der Druck im Formnest nimmt ab. Anhand des Verlaufes der Druckabnahme kann man unter anderem auf Einfallstellen, Schwindung, Verzug und Spannungen rückschließen [7].

2.1.4 Zusetzen der Temperierkanäle

In der Regel werden Werkzeuge bei der Verarbeitung von Thermoplasten mit Wasser gekühlt. Häufig wird das Wasser gar nicht oder nicht ausreichend aufbereitet. Durch die im Wasser enthaltenen Inhaltsstoffe bilden sich mit der Zeit Ablagerungen in den Temperierkanälen (Kühlkanälen). Den Hauptbestandteil dieser Ablagerungen bildet Calciumcarbonat (CaCO_3). Umgangssprachlich wird Calciumcarbonat auch als Kalk oder Kesselstein bezeichnet. In Folge der Ansetzung des Kalks in den Kühlkanälen kommt es zu einer Verkleinerung der fließfähigen Querschnittsfläche. Um dem Volumenstrom aufrecht zu erhalten, muss das Kühlaggregat mehr Pumpleistung erbringen. Wird ein Kühlaggregat über seinen Leistungsmöglichkeiten betrieben, kann die Ablagerung zu einer Reduktion des Volumenstroms d.h. zu einer Verschlechterung der Kühlwirkung führen. Abbildung 5 zeigt die Ablagerungen in einem Kühlkanal eines in der Produktion eingesetzten Spritzgießwerkzeuges der Firma DPA.



Abbildung 5: Ablagerungen im Kühlkanal (Kanaldurchmesser 10 mm).

Ein weiteres Problem ist die Isolierwirkung der Kalkschicht. Kalk ($\lambda = 0,18 \text{ W/(mK)}$) ist im Vergleich zu Stahl ($\lambda = 23,1 \text{ W/(mK)}$) ein sehr schlechter Wärmeleiter. Die Wärmeabfuhr zwischen Bauteil und Kühlwasser wird dadurch negativ beeinflusst, d.h. die Wärme aus dem Bauteil wird schlechter abtransportiert, was zu längeren Kühlzeiten bzw. Zykluszeiten führen kann. Wie aus Abbildung 5 hervorgeht, kann die Dicke der Ablagerungsschicht mehrere Millimeter betragen und beeinflusst dadurch maßgeblich den Wärmetransport. Abbildung 6 zeigt den Verlust der Wärmeübertragung in Abhängigkeit der Kalkschichtdicke.

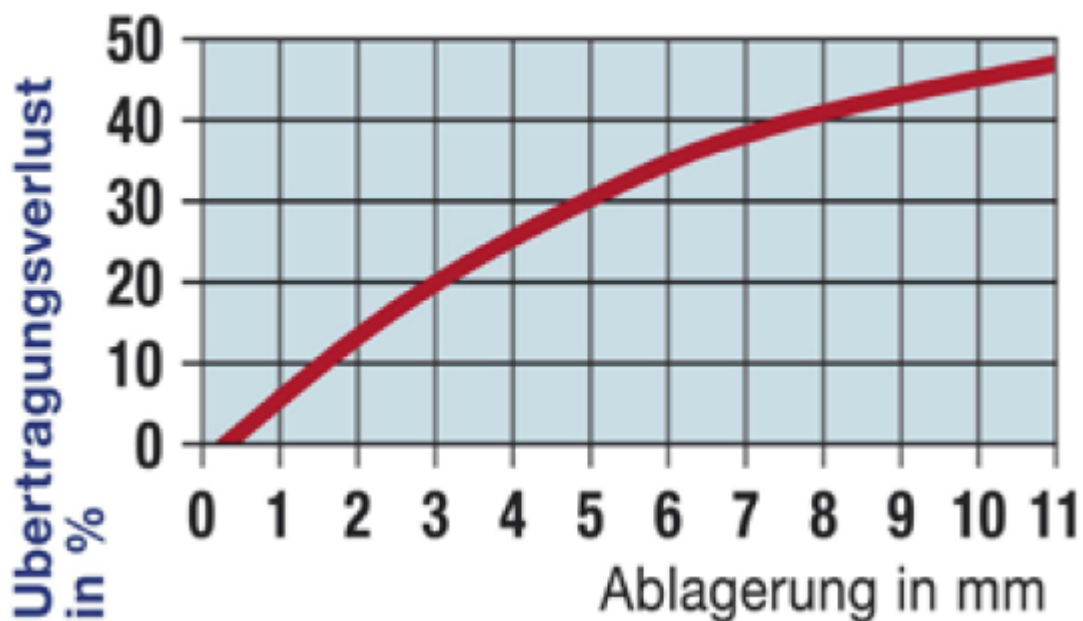


Abbildung 6: Übertragungsverlust in Abhängigkeit der Kalkschichtdicke [8].

Eine vermeintlich dünne Kalkschicht von 2 mm bewirkt bereits eine Reduktion der Wärmeübertragung von etwa 15 %. Eine solche Kalkschicht beeinflusst auch die Qualität des Bauteiles, da die Schicht die Kühlsituation verändert [8]. Ein Ziel dieser Masterarbeit ist es, den Einfluss der Kalkablagerungen auf die Bauteileigenschaften abzuschätzen.

2.2 Materialeigenschaften

In dieser Masterarbeit wurden zwei verschiedene Materialien (PA66 und PBT GF20) verwendet. Die Materialeigenschaften wurden anhand von verschiedenen Materialprüfungen bestimmt. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Materialien, deren Eigenschaften und die Eigenschaften von Kunststoffen allgemein erläutern.

2.2.1 PA 66

Polyamid (PA) ist ein teilkristallines, zumeist aliphatisches, thermoplastisches Polymer. Es gibt verschiedene Typen von Polyamid, welche sich durch die Anordnung und Häufigkeit der Grundeinheiten unterscheiden. Diese Grundeinheiten sind z.B. Diamine oder Dicarbonsäuren. Polyamid 66 (PA 66) besteht aus zwei Grundeinheiten bzw. Ausgangsstoffen, Hexamethyldiamin (Diamin) und Adipinsäure (Dicarbonsäure). Die Kennzeichnung 66 bezieht sich dabei auf die Anzahl der C-Atome im Diamin bzw. in der Dicarbonsäure. In

Abbildung 7 ist der schematische Aufbau eines PA 66 dargestellt. Die roten Ziffern in der Strukturformel beziehen sich jeweils auf die Anzahl der in Klammer stehenden Einheiten.



Abbildung 7: Strukturformel PA 66 [7].

Polyamid wird meist durch Kondensations- oder Kettenpolymerisation hergestellt und ist stark polar. Durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen benachbarten Amidgruppen kommt es zu hohen Nebervalenzkräften, welche eine Erhöhung der Glasübergangs- und Schmelzetemperatur im Vergleich mit unpolaren Thermoplasten verursacht. So besitzt PA 66 z.B. eine Glasübergangstemperatur von ca. 55 °C. Polyethylen hat zum Vergleich eine Glasübergangstemperatur von ca. -125 °C.

Weiters verfügen Polyamide über gute mechanische Eigenschaften sowie hohe Zähigkeit und gutes Gleit- und Verschleißverhalten. Die Feuchteaufnahme bei Polyamiden ist erwähnenswert, die je nach CH₂/CONH-Verhältnis und Umgebungsbedingungen, die Abmessungen und Eigenschaften erheblich beeinflussen kann. PA 66 zählt zu den wichtigsten technischen Kunststoffen und wird sehr häufig in der Automobilindustrie verwendet [7].

2.2.2 PBT GF20

Polybutylenterephthalat (PBT) gehört zur Gruppe der Ester-Thermoplaste und ebenfalls zu den technischen Kunststoffen und ist wie Polyamid polar. Abbildung 8 zeigt den chemischen Aufbau von PBT.

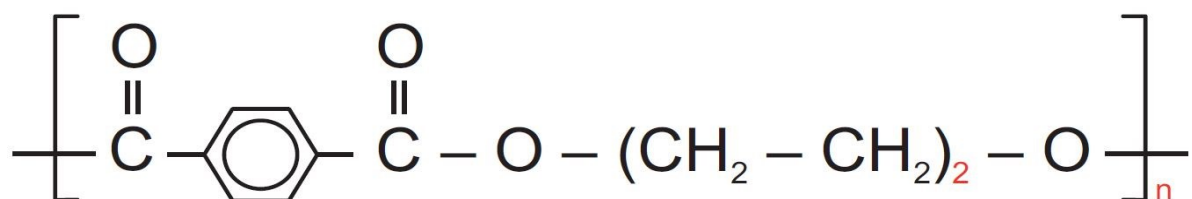


Abbildung 8: Strukturformel PBT [7].

Die Glasübergangstemperatur von PBT liegt ca. bei 50 °C und die Einsatzgrenzen liegen in etwa bei -40 °C bis 125 °C. PBT besitzt eine sehr gute Maßbeständigkeit und Maßhaltigkeit, d.h. hohe Steifigkeit, geringe Kriechverformungsneigung und hohe Abriebfestigkeit. Auch bei niedrigen Temperaturen besitzt PBT noch eine relativ hohe Schlagzähigkeit. Da jedoch bei hohen Temperaturen die Festigkeit erheblich abnimmt, wird als Gegenmaßnahme PBT oft mit Glasfasern (GF) verstärkt eingesetzt. So wie das Material in dieser Masterarbeit, welches aus Polybutylenterephthalat mit 20 % Glasfaseranteil (PBT GF20) besteht [7].

2.2.3 Viskosität

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähigkeit eines Fluides. Fluide welche eine hohe Viskosität besitzen, sind sehr zähflüssig, also träge Flüssigkeiten. Eine niedrige Viskosität hingegen bedeutet, dass das Fluid sehr dünnflüssig und damit schneller fließend ist.

Wasser besitzt eine sehr niedrige Viskosität im Gegensatz zu Kunststoffschmelzen. Weiters zeigt Wasser ein newtonsches Fließverhalten, d.h. bei steigender Schergeschwindigkeit ändert sich die Viskosität nicht. Kunststoffschmelzen zeigen ein sogenanntes strukturviskoses Fließverhalten, wobei die Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit abnimmt, was bedeutet, dass mit stiegender Schergeschwindigkeit die Kunststoffschmelze niedrigviskoser wird. Abbildung 9 zeigt die Unterschiede der einzelnen Viskositätskurven [7].

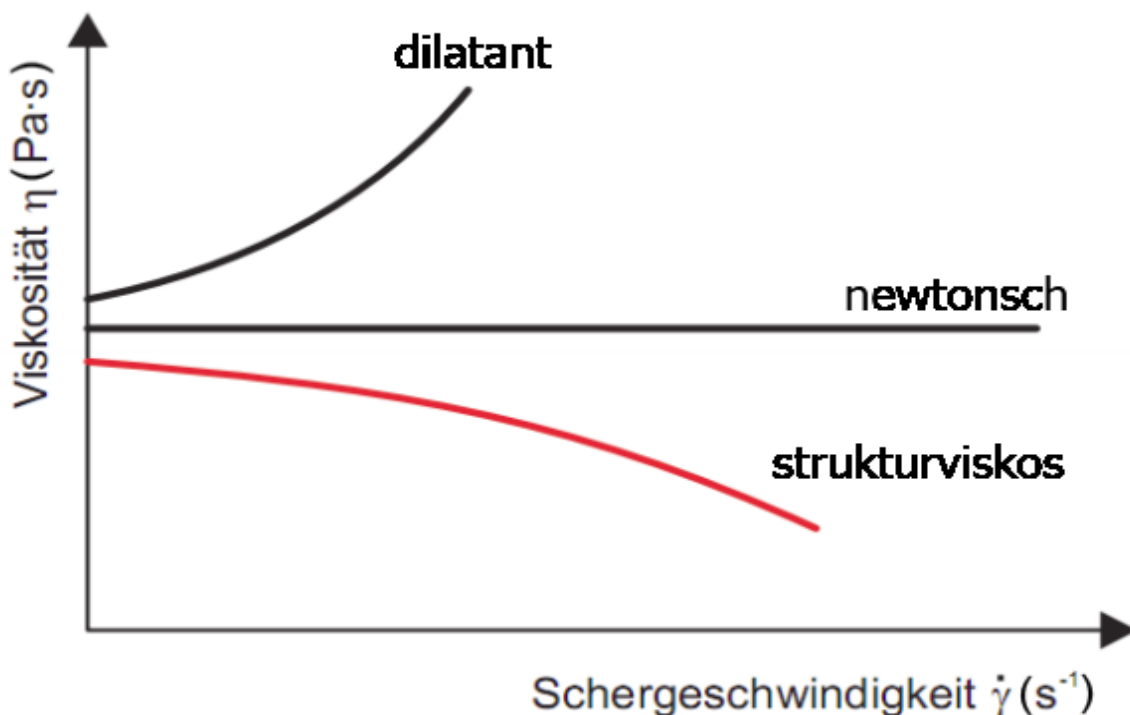


Abbildung 9: Unterschiede in den Viskositätskurven [7].

Die Schergeschwindigkeiten beim Spritzgießen sind typischerweise während der Einspritzphase in dem Bereich von 10^3 bis 10^6 s^{-1} . In der Nachdruckphase sind die Schergeschwindigkeiten geringer. Die Viskositätskurve beschreibt somit das Fließverhalten eines Fluides in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit. Für die Simulation ist das Fließverhalten der Kunststoffe ein wichtiger Input für die Berechnung von Füll- und Nachdruckphase.

2.2.4 Carreau- und WLF-Ansätze

Für die Beschreibung bzw. Auswertung der gemessenen Viskositätsdaten gibt es verschiedene Ansätze. Carreau beschreibt den Verlauf der Viskositätskurve mit einem 3-Parameter-Modell, welches in Gleichung (1) dargestellt ist.

$$\eta = \frac{A}{(1 + B * \dot{\gamma})^C} \quad (1)$$

Die Viskosität η wird hier über die Nullviskosität A , die reziproke Übergangsgeschwindigkeit B , die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ und die Steigung C beschrieben, wie in Abbildung 10 dargestellt ist.

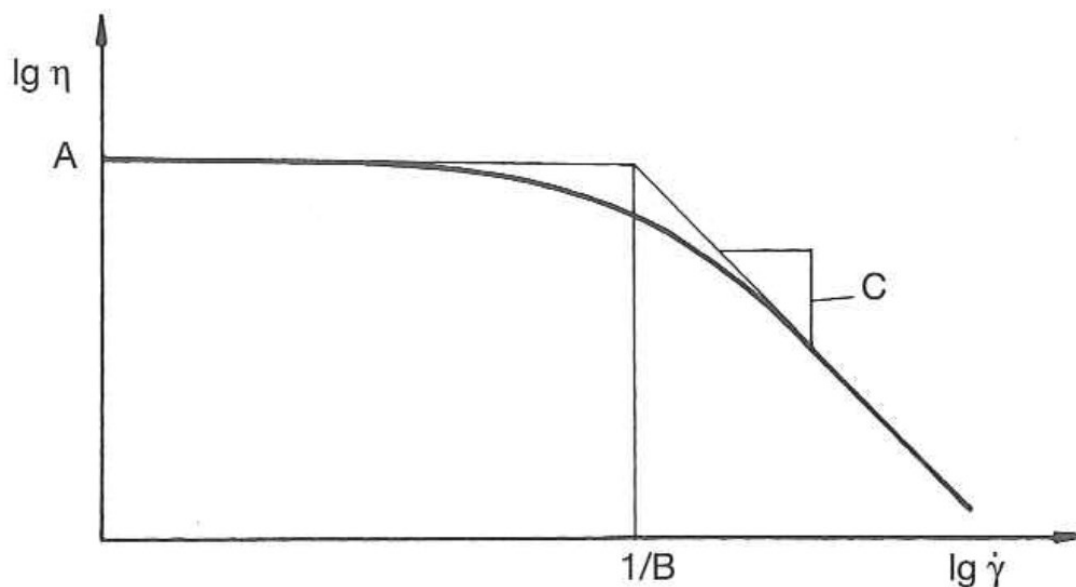


Abbildung 10: Beschreibung einer Viskositätskurve mit dem Carreau Modell [11].

Da die Viskositätskurven stark temperaturabhängig sind, bräuchte man für jede Temperatur eine eigene Messung. Da dies jedoch sehr aufwändig ist, werden meistens nur 3 Temperaturen gemessen und mit Hilfe des WLF-Ansatzes (nach Williams, Landel und Ferry)

oder des Arrheniusansetzes eine Masterkurve erstellt. Diese Masterkurve ermöglicht die Berechnung der Viskosität für jede beliebige Temperatur (Temperaturverschiebung). Gleichung (2) stellt die Berechnung des Temperaturverschiebungsfaktors a_T nach WLF dar.

$$\log a_T = \log \frac{\eta(T)}{\eta(T_s)} \quad (2)$$

Bei der Temperaturverschiebung wird mit Hilfe der Viskosität η bei einer Standardtemperatur T_s , welche materialabhängig ist, und mindestens einer weiteren Viskosität bei einer anderen Temperatur T , der Temperaturverschiebungsfaktor a_T berechnet. Dieser Faktor ermöglicht dann eine Berechnung der Viskosität einer beliebigen Temperatur [11].

Da bei der Messung der Viskosität am Hochdruckkapillarrheometer ein newtonsches Fließverhalten über der Kanalbreite bzw. Kapillarenradius angenommen wird, muss für die Bestimmung von Viskositätskurven bei Polymeren eine Weissenberg-Rabinowitsch-Korrektur durchgeführt werden. Dabei wird das strukturviskose Fließverhalten der Kunststoffschmelzen berücksichtigt. Weiters müssen die Einlaufdruckverluste beim Durchströmen der Kapillare, die durch elastische Deformationen und Reibungsverluste entstehen, berücksichtigt werden [6]. Eine genauere Beschreibung ist [6] zu entnehmen.

Cadmould verwendet zur Beschreibung der Viskositätskurven für unterschiedliche Temperaturen die Carreau-WLF-Koeffizienten (P_1, P_2, P_3, T_s, T_0). Diese rheologischen Kennwerte ergeben sich wie der Name schon sagt aus dem Carreau- und dem WLF-Ansatz. Die genaue Ermittlung der Koeffizienten und deren Einsatz sind [14] bzw. [2] zu entnehmen.

2.2.5 pvT-Diagramme und Schwindung

Während der Verarbeitung wirken auf das Material unterschiedliche Temperaturen und Drücke. Da die Dichte der Thermoplaste sowohl temperatur- als auch druckabhängig ist, ändert sich diese im Laufe des Verarbeitungsprozesses. Das pvT-Diagramm beschreibt die Änderung des spezifischen Volumens v in Abhängigkeit von Druck p und Temperatur T .

Anhand des pvT-Diagramms kann z.B. auf das Schwindungsverhalten rückgeschlossen werden. Als Schwindung bezeichnet man die Maßänderungen eines Bauteiles während der Kühlphase im Spritzgießprozess. Die Schwindung beruht auf der Kompressibilität und der Wärmedehnung der Kunststoffe.

Während des Spritzgießprozesses ändern sich die Formteilmaße mehrmals. Grund dafür sind z.B. die Wärmeausdehnung des Werkzeugmaterials und die verschiedenen Schwindungsarten.

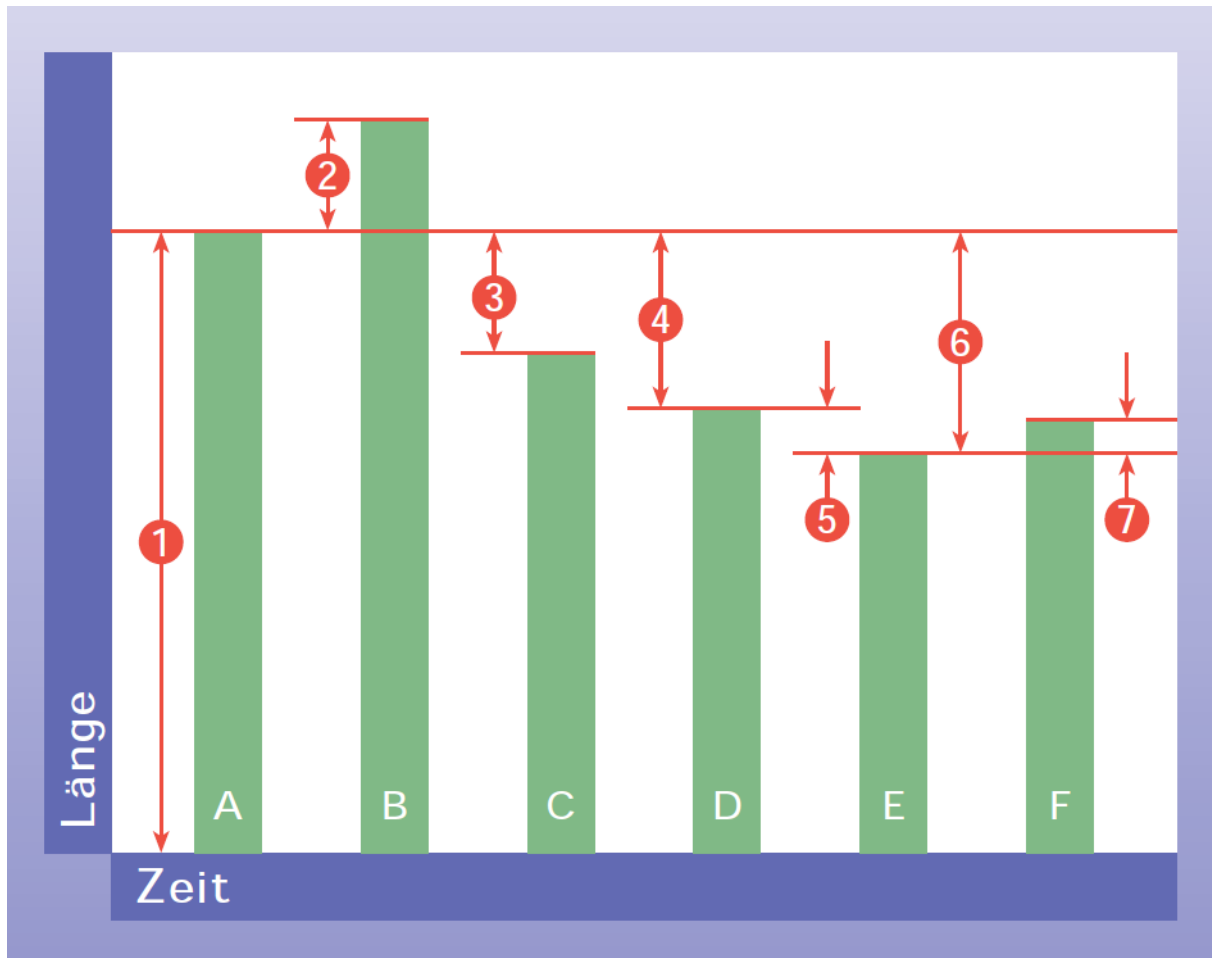


Abbildung 11: Zeitliche Änderung eines Formteilmaßes durch die Schwindung [16].

Abbildung 11 zeigt die zeitliche Änderung der Formteilmaße. Die Zahlenwerte beschreiben dabei folgende Maße:

- (1) Werkzeugmaß,
- (2) Wärmedehnung des Werkzeuges,
- (3) Entformungsschwindung,
- (4) Verarbeitungsschwindung,
- (5) Nachschwindung,
- (6) Gesamtschwindung und
- (7) evtl. Längenzunahme durch Konditionierung (z.B. bei Polyamiden).

Die Kennbuchstaben bezeichnen in der Abbildung 11 folgende Zustände:

- A. kaltes Werkzeug,

- B. warmes Werkzeug,
- C. Formteil nach Entformung,
- D. Formteil nach 24h in Normklima,
- E. Formteil nach langer Zeit und
- F. Formteil nach Wasseraufnahme (z.B. bei Polyamiden).

Während der Schwindung reduziert sich also das Volumen des Formteiles. Das Formnest muss also, um die gewünschten Bauteilabmessungen zu erhalten, um eine gewisse Schwindungszugabe, welche von Material, Formteilgeometrie und der Verarbeitung abhängig ist, vergrößert werden [16].

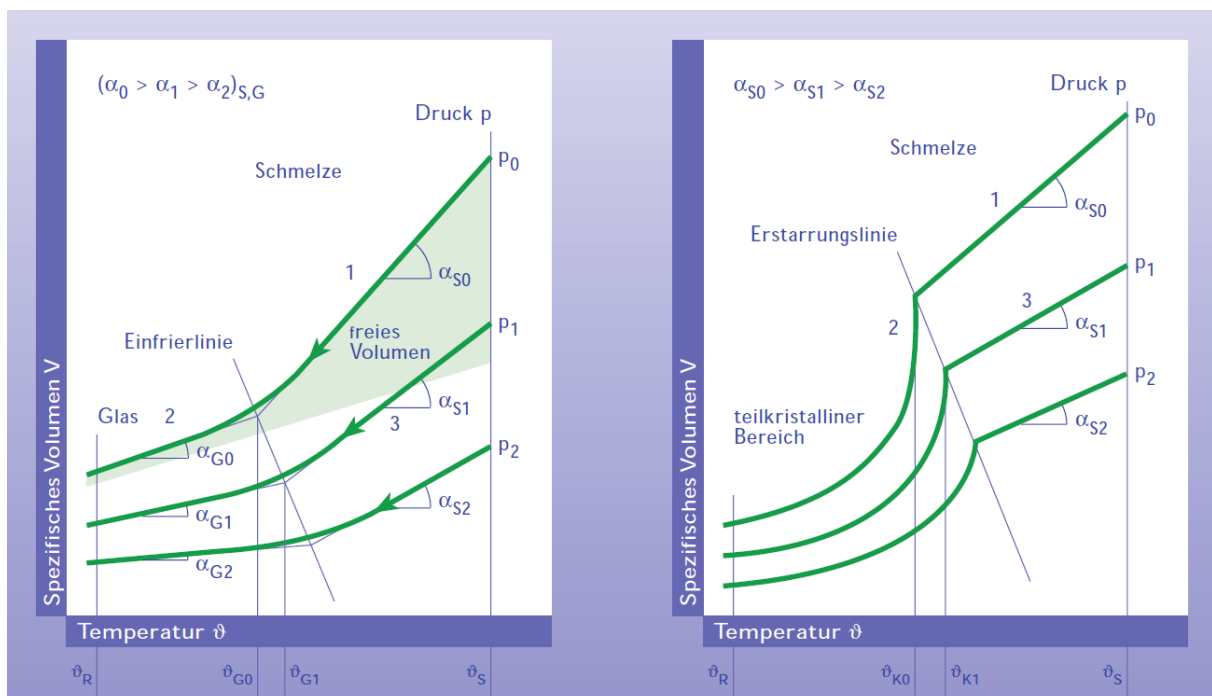


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines pVT-Diagramms für einen amorphen (links) und einen teilkristallinen (rechts) Kunststoff [16].

Abbildung 12 zeigt die pVT-Diagramme eines amorphen und eines teilkristallinen Kunststoffes bei langsamer Abkühlung unter verschiedenen Drücken ($p_0 < p_1 < p_2$). Der Druck p_0 ist dabei der Umgebungsdruck bei 1 bar. Zu Beginn des Einspritzvorgangs liegt eine Kunststoffschmelze bei hoher Temperatur und Umgebungsdruck vor. Während des Einspritzens erhöht sich der Druck. Die Temperatur der Schmelze beginnt sich auf Grund der Kühlung im Werkzeug zu senken, wobei der Druck sein Maximum erreicht. In der Nachdruckphase senkt sich der Druck allmählich ab und das Formteil wird weiterhin gekühlt.

Der Druck im Werkzeug wird idealerweise bis auf Umgebungsdruck abgesenkt und das Formteil dann noch so lange gekühlt, bis es die Entformungstemperatur erreicht hat. Auch nach dem Entformen kühlt das Bauteil weiter bis auf Umgebungstemperatur ab und erreicht das Umgebungsvolumen bei Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck. Das eigentliche Schwindungsverhalten ist die Volumsänderung, wenn kein Druck mehr auf das Formteil ausgeübt wird [16].

Die für die Berechnungen in dieser Arbeit verwendeten pvT-Daten werden über ein mathematisches Modell, dem IKV-Ansatz (bzw. Schmidt-Ansatz), beschrieben. Dabei werden 13 Koeffizienten (PM1-PM4, PS1-PS7, PT1-PT2) bestimmt, welche die pvT-Kurven für die unterschiedlichen Drücke beschreiben. Die genaue Beschreibung des Modells ist aus [14] zu entnehmen.

2.3 Formteilqualität

Die Qualität eines Bauteiles ist die Gesamtheit von Eigenschaften und Merkmalen eines Produktes, die sich auf dessen Eignung zur Erfüllung gegebener Erfordernisse beziehen [7]. Sie spiegelt das Zusammenspiel aller Einflussgrößen wieder. Ziel ist es, eine möglichst hohe Bauteilqualität zu erreichen. Abbildung 13 zeigt die wichtigsten Einflussgrößen auf die Formteilqualität.

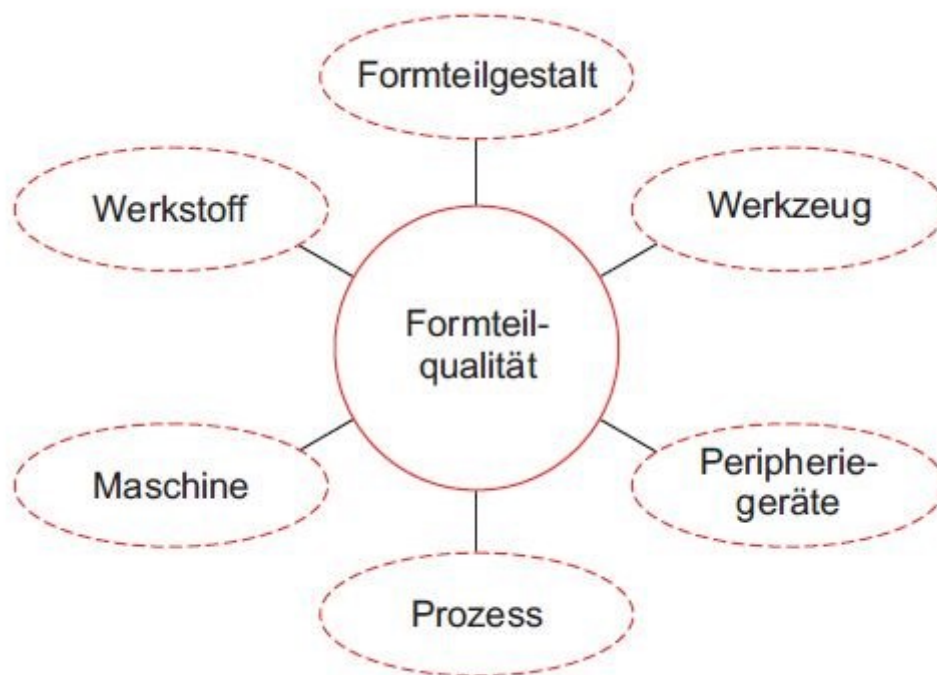


Abbildung 13: Einflussgrößen auf die Formteilqualität [7].

Jede der in Abbildung 13 dargestellten Einflussgrößen kann die Qualität des Formteiles maßgeblich beeinflussen. Je besser die einzelnen Einflussgrößen aufeinander abgestimmt und dem entsprechenden Produkt angepasst sind, desto besser ist die Bauteilqualität. Ist die Qualität des Produktes nicht akzeptabel, so ist die Ursache oft nur schwer zu ermitteln, da die einzelnen Einflussgrößen auch in Wechselwirkung zueinander stehen können [7].

2.4 Frontloading

Frontloading ist definiert als eine Problemlösungsstrategie zur Erhöhung der Entwicklungsleistung, in dem die Identifizierung und Lösung von Problemen hin zu früheren Phasen des Produktentwicklungsprozesses verschoben wird [15].

Durch den am Anfang eines Produktentwicklungsprozesses höheren Ressourceneinsatz sollen spätere Produktentwicklungsschleifen möglichst vermieden und dadurch insgesamt die Kosten reduziert werden. Abbildung 14 zeigt die Beeinflussungsmöglichkeiten in Abhängigkeit vom Planungsstadium. Im frühen Planungsstadium ist die Möglichkeit der Beeinflussung am größten, d.h. hier ist es am einfachsten, Änderungen im Prozess durchzuführen. Je später im Entwicklungsprozess Änderungen vorgenommen werden, desto schwieriger ist deren Realisierung und die Kosten dafür sind meistens sehr hoch. Wenn man Bauteilgeometrien bereits in der Entwicklung optimiert, entstehen z.B. weitaus geringere Kosten als bei späteren notwendigen Änderungen am Werkzeug.

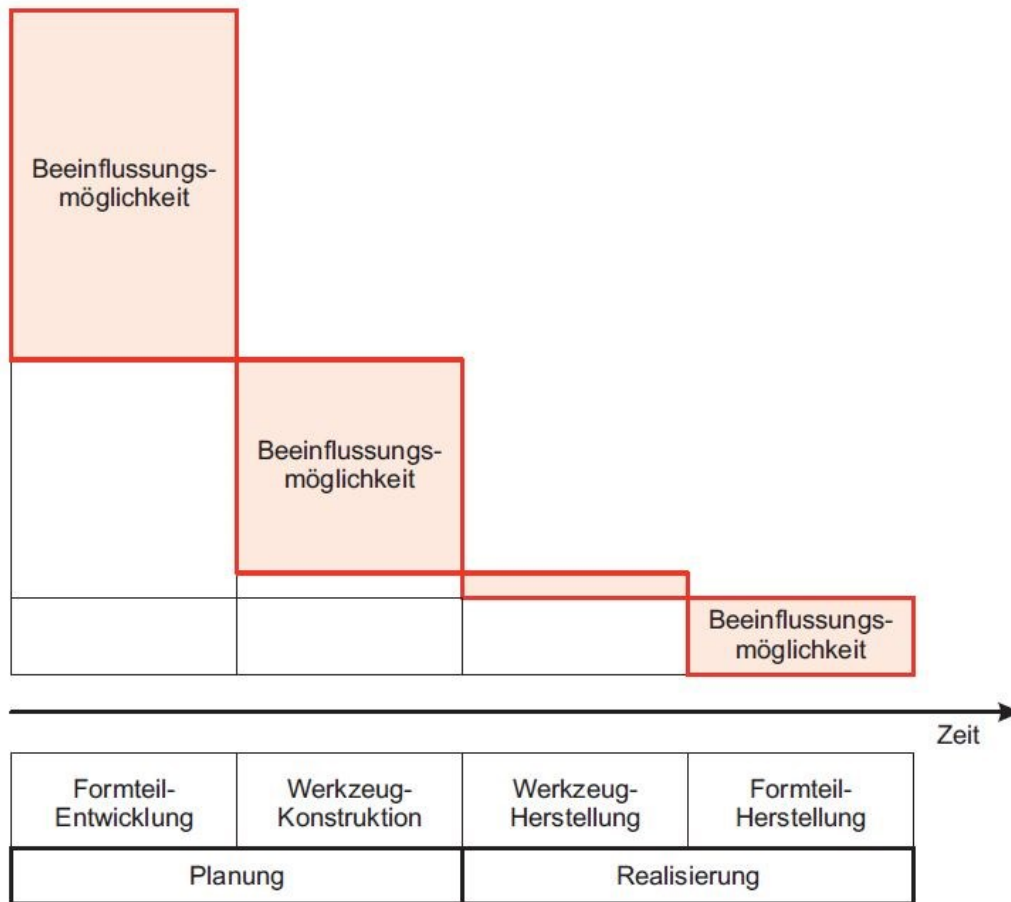


Abbildung 14: Beeinflussungsmöglichkeiten in Abhängigkeit vom Planungsstadium [7].

Mit Hilfe von systematischen Spritzgießsimulationen am Anfang eines Produktentwicklungsprozesses können so z.B. spätere Änderungsschleifen am Werkzeug vermieden werden, was nicht nur zu geringeren Gesamtproduktionskosten führt, sondern auch zu einer Verringerung der Zeit bis zum Start der Serienproduktion. Die Zeit zwischen Programmstart und Serienproduktion kann mit Frontloading gegenüber konventioneller Produktentwicklung somit ebenfalls verkürzt werden, wie in Abbildung 15 dargestellt ist.

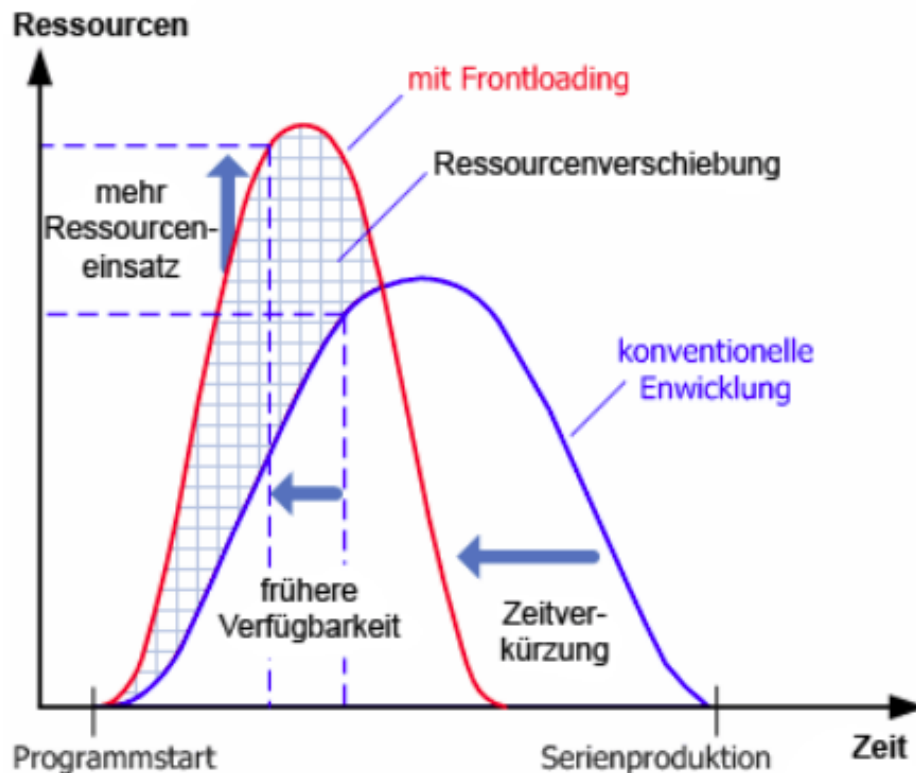


Abbildung 15: Ressourceneinsatz über die Zeit für konventionelle Entwicklung (blau) und Entwicklung mit Frontloading (rot) [12].

2.5 Statistische Versuchsplanung

Statistische Versuchsplanung oder „Design of Experiments“ (DoE) ist unter anderem ein Instrument zur Entwicklung und Optimierung von Produkten bzw. Prozessen. „Unter einem Versuchsplan (Design) versteht man ein standardisiertes, routinemäßig anwendbares Schema (Strukturschema), das dem Aufbau, der Kontrolle und der methodologischen Bewertung einer empirischen Untersuchung von unabhängigen (UV) und abhängigen (AV) Variablen sachlogisch zugrunde liegt“ [13]. Es ist eine empirische Methode, um das Verhalten technischer Systeme zu beschreiben und ermöglicht innerhalb dieses Planes folgende Phänomene aufzuzeigen:

- Optimale Lage des Mittelwertes,
- Reduzierung der Streuung,
- Wechselwirkungen und
- Einflussgröße bzw. Einflussrichtung wichtiger Einflussgrößen.

Es gibt verschiedene Arten von Versuchsplänen. Da in dieser Arbeit jedoch nur faktorielle bzw. Abwandlungen der faktoriellen Versuchspläne verwendet werden, wird in Folge nur auf diese eingegangen.

Vollfaktorielle Versuchspläne geben am meisten Auskunft über Wechselwirkungen und Abhängigkeiten. Zweifach oder mehrfache Wechselwirkungen lassen sich völlig unabhängig voneinander berechnen und eindeutig einem Einflussfaktor zuordnen. Es sind sogenannte n^k -Pläne, bei denen es n verschiedene Stufen bei k Einflussgrößen gibt. Ein solcher Versuchsplan, mit zwei Einstellstufen ($n = 2$, plus und minus) und unterschiedlicher Anzahl an Einstellgrößen ($k = 2/3/4$), ist in Abbildung 16 dargestellt [1].

Ver- suchs- Num- mer	2 ⁴ -Plan				...
	2 ³ -Plan				...
	2 ² -Plan				...
	A	B	C	D	...
1	-	-	-	-	...
2	+	-	-	-	...
3	-	+	-	-	...
4	+	+	-	-	...
5	-	-	+	-	...
6	+	-	+	-	...
7	-	+	+	-	...
8	+	+	+	-	...
9	-	-	-	+	...
10	+	-	-	+	...
11	-	+	-	+	...
12	+	+	-	+	...
13	-	-	+	+	...
14	+	-	+	+	...
15	-	+	+	+	...
16	+	+	+	+	...
...

Abbildung 16: Aufbau für vollfaktorielle Versuchspläne mit zwei Einstellstufen [1].

Bei zwei Einstellmöglichkeiten (z.B. plus und minus) und drei Einflussfaktoren (z.B.: A, B und C) ergibt sich ein 2³ Versuchsplan, also insgesamt 8 Versuche. Dieser Versuch ist in

Abbildung 16 mittels der strichlierten Linie gekennzeichnet. Mit der Anzahl der Einflussfaktoren erhöht sich auch sehr schnell die Anzahl der Versuche. Der Aufwand für einen vollfaktoriellen Versuchsplan ist also sehr schnell sehr hoch.

Mit teilfaktoriellen Versuchsplänen lässt sich die Anzahl der Versuche deutlich reduzieren. Es gibt verschiedene Arten von teilfaktoriellen Versuchsplänen. Es gibt z.B. die Möglichkeit, eine dreifach Wechselwirkung (ABC), welche nach Annahme vernachlässigbar klein ist, durch eine weitere Einflussgröße (D) zu ersetzen (es ergeben sich im Versuchsplan gleiche Vorzeichen). Nimmt man das vorangehende Beispiel als Grundlage, also einen vollfaktoriellen 2^3 Plan, so würde die Wechselwirkung ABC dem neuen Faktor D entsprechen. Es können somit vier Einflussgrößen mit nur acht Versuchen abgedeckt werden, also ein 2^{4-1} Plan. Nachteile der teilfaktoriellen Versuchspläne sind die Vermengungen der Effekte und Wechselwirkungen, welche durch die Reduzierung der Versuche nicht eigens betrachtet werden können [1].

Bei D-optimierten Versuchsplänen wird die Anzahl der Versuchspunkte unter jene der teilfaktoriellen Pläne reduziert. Ziel ist es, mit minimalem Aufwand die gewünschten Effekte und Wechselwirkungen zu beschreiben. Es werden in der Regel nur einfache Wechselwirkungen (z.B. AB, AC, AD, usw.) berücksichtigt und Wechselwirkungen höherer Ordnung (z.B. ABC, ABD, ABCD, usw.) werden vernachlässigt, da deren Einfluss gegenüber Faktoren und einfachen Wechselwirkungen geringer ist. Für D-optimierte Versuchspläne ist ein gutes Prozesswissen, d.h. Wissen über Wechselwirkungen und Einflüsse von Input auf Output, von Vorteil, da so die Vereinfachungen leichter getroffen werden können und der Informationsverlust dadurch minimiert wird. Die Generierung eines solchen Planes wird nicht nach einem festen Schema gemacht, sondern iterativ aufgebaut. Zur Erstellung eines D-optimierten Planes sind folgende Punkte wesentlich [3]:

- Maximierung der Determinante,
- Minimierung der Korrelationen sowie
- Gute Ausbalancierung (gleiche Anzahl von Stufen in den Randbereichen).

Die Auswertung erfolgt über multiple Regressionen. Vorteile der D-optimierten Versuchspläne sind die freie Wahl für die Anzahl der Stufen pro Einflussfaktor und die Erweiterungsmöglichkeiten durch neue Einflussfaktoren. Nachteile sind hingegen, dass ein Rechenalgorithmus zur Erstellung der Pläne notwendig ist, und dass der Versuchsplan nicht orthogonal ist [3].

2.6 Simulation

Bei der Simulation wird anhand von mathematischen Modellen versucht, die Realität zu beschreiben. Im Sinne der Frontloading Strategie versucht man, mit der Unterstützung von Simulationssoftware Kosten und Projektlaufzeiten zu minimieren. Simulationen werden in der Spritzgießtechnik schon seit über 20 Jahren angewendet und werden ständig weiterentwickelt. Spritzgießsimulationen begleiten heutzutage schon alle Phasen des Entwicklungsprozesses des Kunststoffteils und des Produktionswerkzeuges, um potentielle Fehler und Probleme frühzeitig zu erkennen und zu lösen.

Bauteil und Werkzeug (Kühlsituation) werden mittels eines CAD-Programms (computer aided design) konstruiert und in das Simulationsprogramm importiert. Dort wird das Bauteil vernetzt und die Prozesseigenschaften bzw. Materialeigenschaften (Bauteil und Werkzeug) werden definiert. Es ist darauf zu achten, dass die für die Berechnung notwendigen Daten (Geometrie und Materialeigenschaften) auch korrekt sind. Denn ganz nach dem Motto „garbage in, garbage out“ ist das Ergebnis einer Simulation nur so gut, wie die Eingabedaten es zulassen.

Die Simulation ermöglicht auch die Berechnung von sehr komplexen Bauteilen und hilft somit bei der Auslegung von Spritzgießwerkzeugen. Zum Beispiel besteht die Möglichkeit die Lage von Lufteinschlüssen oder Bindenähten zu berechnen. Anhand dieser Erkenntnisse kann man die Geometrie des Bauteiles so optimieren, dass durch Variation der Wandstärken oder durch Fließhilfen Bindenähte an weniger kritische Stellen verlagert werden können. Dies ist nur ein Beispiel wie man Simulation sinnvoll einsetzen kann, um spätere, kostenintensive Aufwendungen zu vermeiden [14].

Bei den Simulationsprogrammen gibt es verschiedene Berechnungsmethoden. Grundsätzlich unterscheiden man zwischen:

- 3D Berechnungen und
- 2,5D Berechnungen.

In den letzten Jahren werden vermehrt 3D-Simulationsprogramme für das Spritzgießen angeboten. 3D deshalb, weil die Geometrie dreidimensional vernetzt wird und somit auch Strömungsvorgänge in Bereichen mit Geometrieänderungen realitätsnäher simuliert werden können. Dies bietet gegenüber den herkömmlichen 2,5D-Programmen, welche nur zweidimensional vernetzen und Schicht für Schicht aneinanderreihen, deutliche Vorteile. 3D-Programme sind jedoch wesentlich teurer und benötigen zumeist auch mehr

Computerleistung zur Berechnung. Auch sind sie meist komplexer aufgebaut, was die Handhabung erschwert. Für weniger komplexe Bauteile und für schnelle, kostengünstige Berechnungen erweisen sich die 2,5D-Simulationsprogramme jedoch als vorteilhaft [14].

2.6.1 Cadmould 3D-F

In dieser Arbeit wird Cadmould 3D-F Version 6.0.0.20 der Firma Simcon kunststofftechnische Software GmbH als Simulationsprogramm verwendet. Cadmould 3D-F ist eine von Simcon patentierte Technologie, bei der ein dreidimensionales Fachwerk (3D-F) verwendet wird. Dies ist lediglich eine Erweiterung einer 2,5D-Simulation. Laut Simcon bietet Cadmould 3D-F dem Anwender:

- Einfache automatische Modellerstellung,
- schnelle Berechnungen und
- genaue Ergebnisse.

Bei der Simulation werden in Abhängigkeit des eingesetzten Materials und der Prozessparameter die Füllsituation und die Nachdruckphase berechnet. Weiters können Schwindung und Verzug des Formteils vorhergesagt werden. Weitere wichtige Ergebnisse sind Füllbild, Druckverbrauch, Schließkraft, Entformungszeit und Restkühlzeit. Cadmould bietet auch die Möglichkeit, komplexe Anguss- und Kühlsysteme zu gestalten.

Die Geometrie wird als STL-File (Stereolithographie) importiert und später vernetzt. Ein STL-File ist im Prinzip ein Schalen-Modell des Bauteiles. Es werden also nur Flächen importiert. Das Angussystem kann zwar mit der Bauteilgeometrie mit importiert werden, es zeigt sich jedoch, dass eine Nachbildung des Angusses im Simulationsprogramm mit den in Cadmould zur Verfügung stehenden Tools zu besseren Ergebnissen führt. Das Kühlsystem kann in Cadmould konstruiert werden oder vom CAD-System mittels IGES (Initial Graphics Exchange Specification) übernommen werden [14].

Nach der Erstellung des Modells müssen der Anspritzpunkt, die Prozessparameter und die Materialien definiert werden. Cadmould verfügt über eine Materialdatenbank, in welcher mehr als 1000 Materialdatensätze gespeichert sind. Abbildung 17 zeigt einen Screenshot der Materialdatenbank aus Cadmould.

2. Theorie

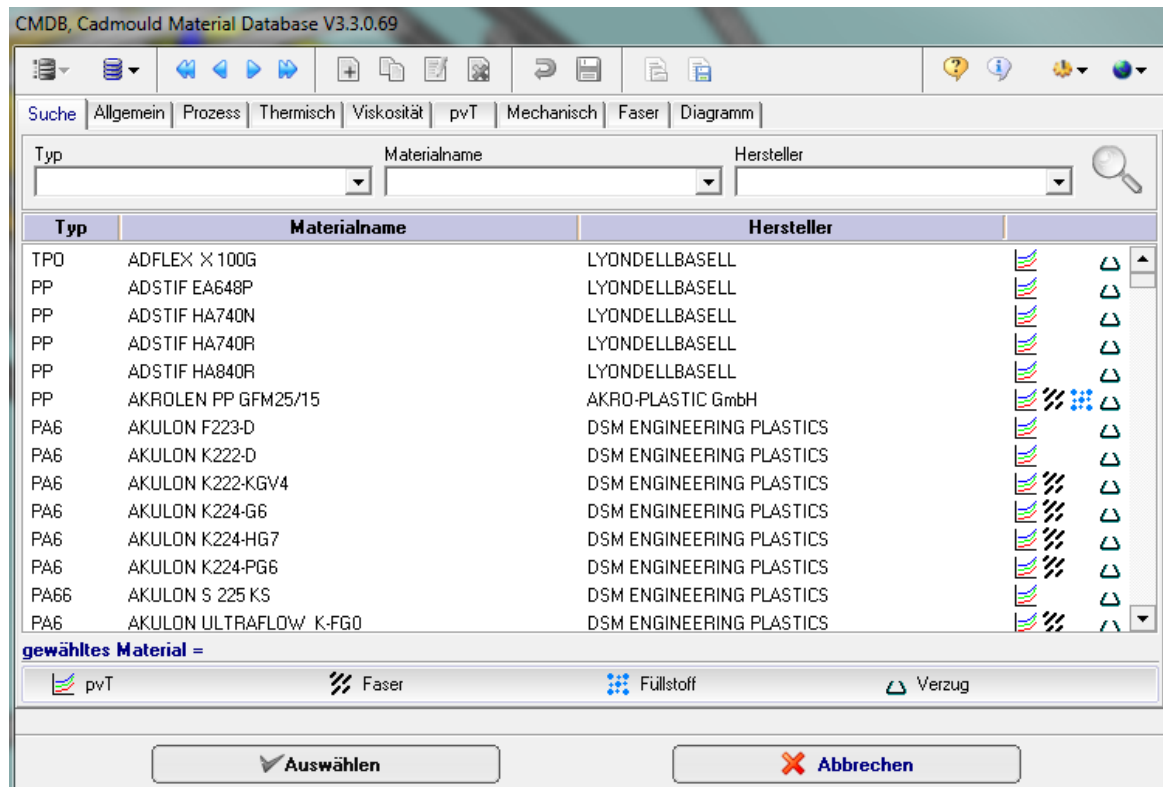


Abbildung 17: Cadmould Materialdatenbank [14].

Daten wie pvT- oder Viskositätsverhalten werden für jedes Material einzeln gespeichert. Es besteht die Möglichkeit, selbst Datensätze zu erstellen. Diese selbst konfigurierten Datensätze werden eigens in einer User-Datenbank gespeichert. Es ist nicht möglich, die Daten in der Cadmould Datenbank zu verändern.

Die Prozessparameter wie Verarbeitungstemperatur oder Nachdruckprofil werden im Prozessfenster eingegeben. Der Aufbau dieses Prozessfensters ist in Abbildung 18 dargestellt. Sind die realen Prozessdaten noch nicht bekannt, so kann man erste Simulationen mit Hilfe der vorgeschlagenen Standard-Einstellungen durchführen.

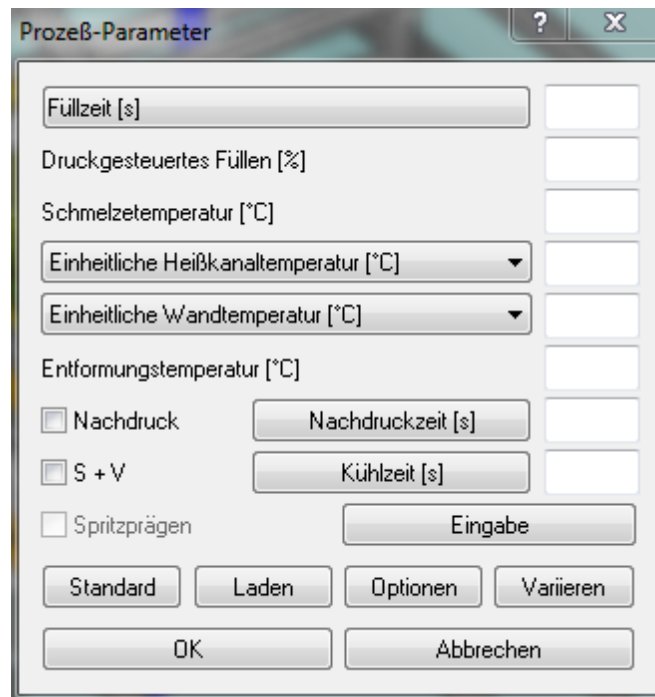


Abbildung 18: Cadmould Prozessfenster [14].

Die Einstellungen für das Kühlsystem müssen ebenfalls definiert werden. Parameter wie Durchflussrate, Kühlmedium und Vorlauftemperatur müssen deklariert werden. Zum Schluss muss auch noch ein Werkzeugmaterial festgelegt werden, um den Wärmetransport berechnen zu können. Auch dafür hat Cadmould eine eigene Datenbank, wo verschiedenste Werkzeugmaterialien vorab gespeichert sind.

Erst wenn alle Parameter und Materialdaten definiert sind, kann die Simulation gestartet werden.

2.6.2 CQC (Continuous Quality Control)

CQC V4.06.012 ist eine Software der Firma Dr. Gierth Ingenieurgesellschaft mbH und ist ein Statistik-Programm zur Prozessoptimierung und Qualitätssicherung. „*Ein neuartiger Lösungsansatz vereint die hohen technischen Anforderungen in der Kunststoffverarbeitung mit qualitätssichernden Maßnahmen, die nicht nur die Güte der Formteile gewährleisten, sondern diese auch nachvollziehbar dokumentieren*“ [5]. CQC ermöglicht laut Hersteller:

- Ermittlung der optimalen Maschineneinstellung.
- Ermittlung von Maschineneinstellregeln.
- Ermittlung von Werkzeugänderungsdaten.
- Vorhersage und Überwachung der Qualität.

- Regelung der Qualität.

Es soll mit Hilfe der Software möglich sein, einen optimalen Arbeitspunkt zu finden und diesen auch zu halten. Dazu werden vom Programm z.B. Bemusterungspläne erstellt, welche später analytisch ausgewertet werden. Die gesamte Datenverwaltung wird von CQC übernommen und durchgeführt. Der Benutzer kann Qualitätsmerkmale seines Formteiles vorgeben, welche nach Prioritäten geordnet werden können. Anhand all jener Informationen die man in das System eingibt, generiert CQC so einen optimalen Arbeitspunkt inklusive Prozessfenster, innerhalb dessen Gutteile gemäß den Qualitätsanforderungen produziert werden können. Ziel ist es einen Arbeitspunkt zu generieren, bei dem alle Qualitätsmerkmale in der Mitte des jeweiligen Toleranzfeldes liegen, um so den Produktionsprozess möglichst unempfindlich gegenüber äußeren Störgrößen, wie z.B. Schwankungen der Halltemperatur oder Chargenschwankungen, zu gestalten. Eine solche Einstellung wird häufig auch als „robuster Prozess“ beschrieben.

2.6.3 VARIMOS [14]

Varimos bedeutet „Virtual And Real Injection Moulding Optimisation System“ und ist ein Produkt der Firma Simcon kunststofftechnische Software GmbH. VARIMOS ist eine Kombination aus Cadmould und CQC und bietet die Vorteile beider Softwareprogramme. Wie der Name schon vermuten lässt, gibt es eine virtuelle Seite und eine reale Seite.

Virtuelle Seite

In Cadmould gibt es die Möglichkeit Prozessparameter systematisch zu variieren. Ausgehend von einer zentralen Stufe (0), kann man diese um einen bestimmten Wert sowohl positiv (+) als auch negativ (-) variieren. Hat man z.B. bei der Massetemperatur eine zentrale Stufe von 270 °C und variiert diese um +/- 20 °C, so erhält man eine Plusstufe von 290 °C und eine Minusstufe von 250 °C. Die Variation ermöglicht das Definieren eines Prozessfensters, indem später eine Vorhersage für einen optimalen Arbeitspunkt getroffen werden kann. Wurden alle gewünschten Parameter variiert, erstellt CQC mit den variierten Parametern einen D-optimierten Versuchsplan, welcher wiederum ins Cadmould importiert wird. Cadmould erstellt nun die einzelnen Simulationen laut Versuchsplan. Wurden alle Simulationen berechnet, werden die Ergebnisse im CQC eingelesen und ausgewertet. Anhand der mathematischen Modelle können z.B. die Haupteinflussgrößen auf das jeweilige Qualitätsmerkmal mit Einflussstärke und Einflussrichtung berechnet werden. Durch die vergebenen Prioritäten und

die Erkenntnisse zu den Einflussgrößen bei den Qualitätsmerkmalen kann CQC innerhalb des Prozessfensters ein Prozessoptimum errechnen.

Reale Seite

Bei der Anwendung von VARIMOS auf der realen Seite geht es primär um die systematische Einrichtung des Prozesses auf der Spritzgießmaschine mit dem vorgehaltenen Werkzeug und die nachweisbare prozesssichere Bauteilqualität. Das Programm begleitet und unterstützt den Benutzer von der Werkzeugherstellung bis zu Produktion. Für die optimale Maschineneinstellung und die Prozessüberwachung ist eine vorhergehende Bemusterung notwendig. Ähnlich zur virtuellen Seite wird von CQC ein Bemusterungsplan erstellt, welcher real an der Spritzgießmaschine abgefahren wird. Die Formteile der Bemusterung müssen anschließend gemäß den vorher definierten Qualitätsmerkmalen vermessen bzw. gewogen werden. Die erfassten Daten der Qualitätsmerkmale werden in das CQC-System eingetragen und daraus ergibt sich dann wieder eine optimale Maschineneinstellung. Mit Hilfe der Toleranzvorgaben der Qualitätsmerkmale errechnet VARIMOS ein Prozessfenster, innerhalb dessen alle Qualitätsmerkmale erfüllt sind. Ist die Produktionsmaschine permanent mit dem System verbunden, ermöglicht VARIMOS eine fortlaufende Prozessüberwachung. VARIMOS gestattet der Maschine die automatische Regulierung der Einstellparameter innerhalb des vorher bestimmten Prozessfensters unter Einhaltung aller Qualitätsmerkmale.

Die Kombination aus virtueller und realer Schiene bietet dem Anwender die Möglichkeit, von der Machbarkeit des Formteiles bis hin zur laufenden Produktion begleitet zu werden und so Kosten und Entwicklungszeit zu reduzieren bzw. eine hochwertige, automatische Qualitätsüberwachung und Produktionsdokumentation gewährleisten zu können.

3 Simulation des Ist-Zustandes

Für die Simulation des Ist-Zustandes mussten im Vorfeld mehrere Punkte beachtet bzw. mehrere Vorbereitungen getroffen werden. Diese beinhalten die Messung der Materialdaten des verwendeten PA 66, den Modellaufbau in Cadmould (inkl. Anguss- und Heißkanalsituation), die Nachbildung der tatsächlichen Kühlsituation in Cadmould und die Nachbildung der realen Maschineneinstellungen bzw. Prozessbedingungen.

3.1 Bauteil

Wie in der Einführung erwähnt, ist das zu untersuchende Bauteil ein siebenpoliger Stecker (Sicherungsdose) für Schmelzsicherungen in der Automobilindustrie. Das Bauteil wird derzeit aus PA 66 in mehreren Farben gefertigt. Abbildung 19 zeigt ein von DPA gefertigtes Bauteil aus blau gefärbtem PA 66.

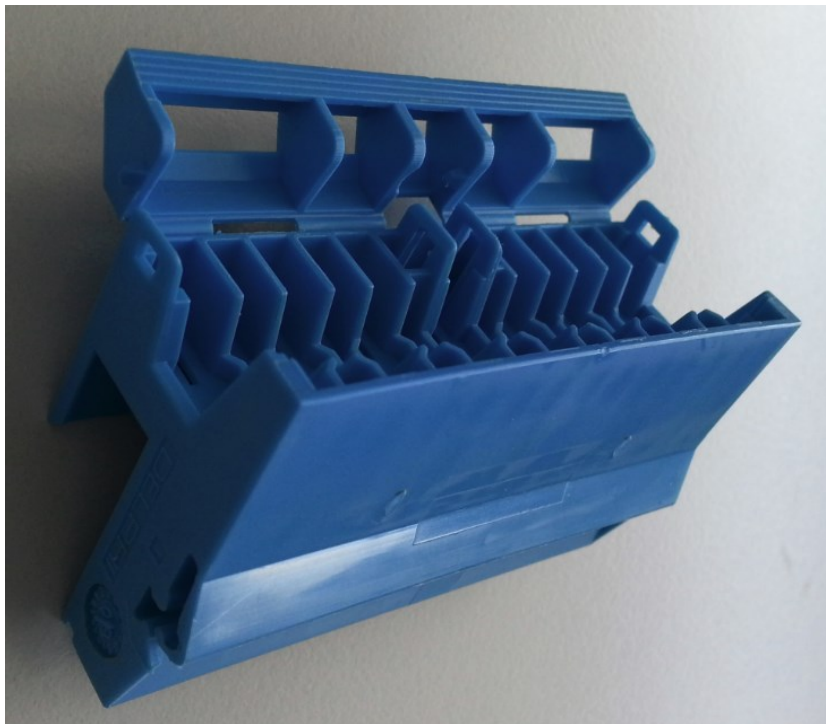


Abbildung 19: Reales Bauteil.

Das Bauteil dient zur Fixierung von Schmelzsicherungen (Abbildung 20) und deren zugeführte Kabelverbindungen (Abbildung 21).

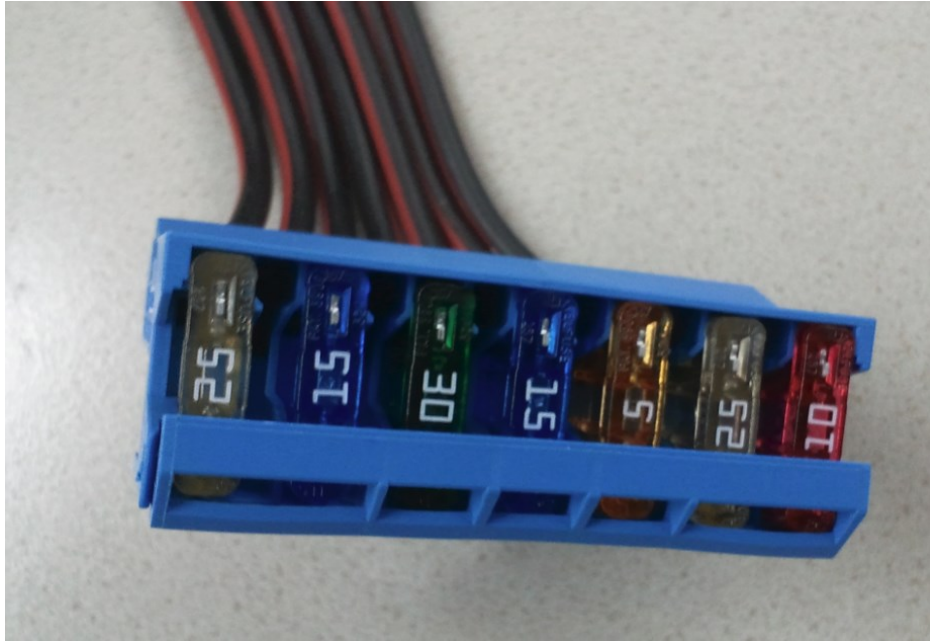


Abbildung 20: Schmelzsicherungen.

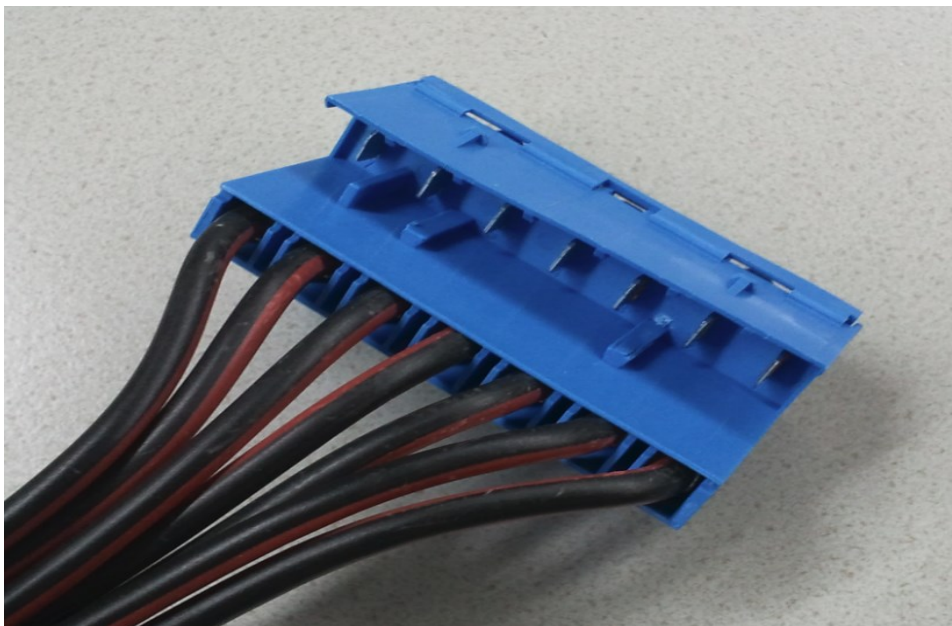


Abbildung 21: Zugeführte Kabelverbindungen.

Dazu verfügt das Bauteil über zwei Sicherungssysteme. Einerseits eine längs am Bauteil verlaufende Verriegelung zur sicheren Verankerung der zugeführten Kabel und andererseits eine auf der Oberseite platzierte Schnappsicherung zur Fixierung der einzelnen Schmelzsicherungen.

Das zu untersuchende Bauteil wird in weiterer Folge auf ein anderes Bauteil aufgesetzt. Die problemlose Montage ist nur möglich, wenn das Bauteil innerhalb der Toleranzen gefertigt

wird. Deshalb ist es notwendig, dass die Maßhaltigkeit bei der Bauteilproduktion stets gewährleistet ist. Abbildung 22 zeigt das gesamte System, also das zu untersuchende Bauteil (blau) inklusive Schmelzsicherungen, Kabelzuführungen und Trägerbauteil (schwarz).

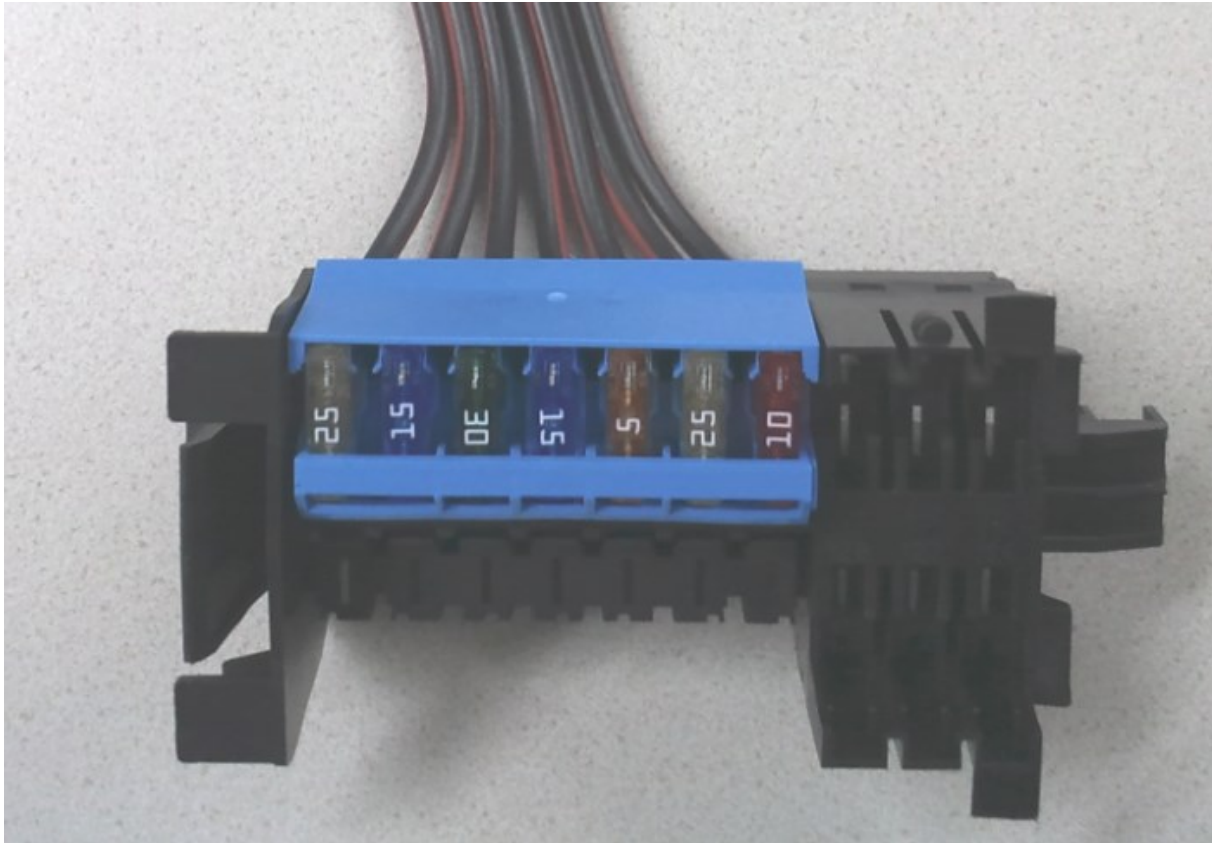


Abbildung 22: Bauteil inklusive Kabelzuführungen, Schmelzesicherungen und Trägerbauteil.

3.2 Materialdaten

Die von DPA zur Verfügung gestellten Materialien (PA 66/Durethan AC30 und PBT GF20/Pocan B 3225) wurden am Department Kunststofftechnik der Montanuniversität Leoben anhand von verschiedenen Materialtests analysiert und dokumentiert. Die gemessenen Materialkennwerte wurden ausgewertet und in die User-Materialdatenbank von Cadmould übertragen. Die Ergebnisse und Auswertungen von Viskositätskurven und pvT-Daten werden in diesem Abschnitt näher betrachtet.

3.2.1 Viskosität

Die Viskosität wird am Hochdruckkapillarrheometer (HKR) Rheograph 2002 der Firma Göttfert GmbH gemessen. Das Material wird bei verschiedenen Temperaturen mit einer bestimmten Kraft durch eine Kapillare gepresst. Dabei wird bei bestimmten

Schergeschwindigkeiten (Stempelgeschwindigkeiten) der Druck in der Kapillare gemessen. Aus dem Druckunterschied zwischen Atmosphärendruck und dem Druck in der Kapillare lässt sich die Schubspannung für die jeweilige Schergeschwindigkeit berechnen. Bei jeder Temperatur werden mehrere Messungen bei unterschiedlichen Kapillaren durchgeführt. Es werden Rundlochkapillaren mit einem Durchmesser von 1 mm und jeweils einer Länge von 10/20/30 mm verwendet. Anschließend wird eine Weissenberg-Rabinowitsch-Korrektur durchgeführt und der Einlaufdruckverlust laut Bagley berücksichtigt. Zur Beschreibung der Viskosität für unterschiedliche Temperaturen wird der Carreau-WLF-Ansatz verwendet.

3.2.1.1 PA 66

Für das PA 66 werden Messungen bei 280 °C und den oben angeführten Kapillarlängen durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Ergebnisse nahezu ident mit den Angaben des Materialherstellers (laut Cadmould Datenbank) sind und daher wird auf weitere Tests verzichtet. Die Viskositätsdaten des Herstellers werden für die Berechnungen herangezogen. Abbildung 23 zeigt den Vergleich der Viskositätsdaten zwischen den von der MUL ermittelten Werten und jener der Cadmould Datenbank bei 280 °C.

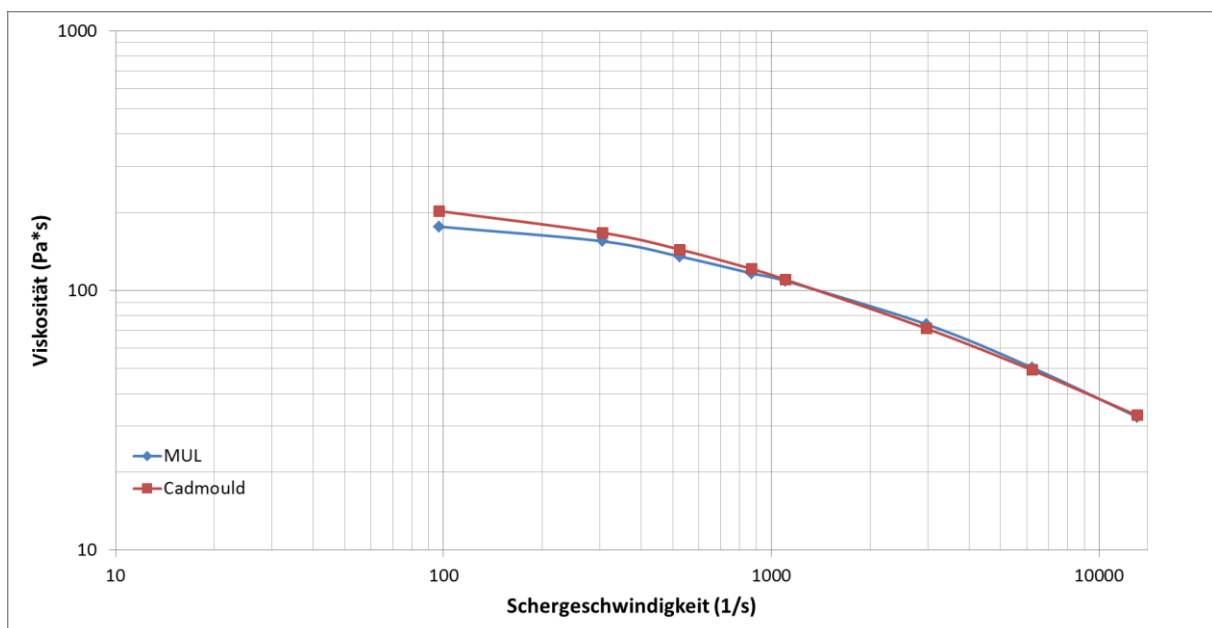


Abbildung 23: Vergleich der Viskositätsdaten für PA 66 (Durethan AC30) bei 280 °C.

Wie oben erwähnt und auch aus Abbildung 23 hervorgeht, ist der Unterschied sehr gering zwischen den beiden Datensätzen. Lediglich bei geringeren Schergeschwindigkeiten unterscheiden sich die Viskositätsdaten. Die Unterschiede von ca. 25 Pa s sind vernachlässigbar klein, und daher werden in weiterer Folge die Daten aus der Cadmould Datenbank verwendet.

3. Simulation des Ist-Zustandes

Die Viskositätskurven für die unterschiedlichen Temperaturen sind mittels Carreau-WLF-Ansatz approximiert. Dabei werden die Kurven über sieben Koeffizienten beschrieben. Die Koeffizienten sind im Anhang (vgl. Kap. 9.4.1) zu finden.

Abbildung 24 zeigt die temperaturabhängigen Viskositätskurven zu den in Tabelle 19 (Seite 97) angeführten Werten. Mit diesen Viskositätsdaten werden in Cadmould die Berechnungen durchgeführt.

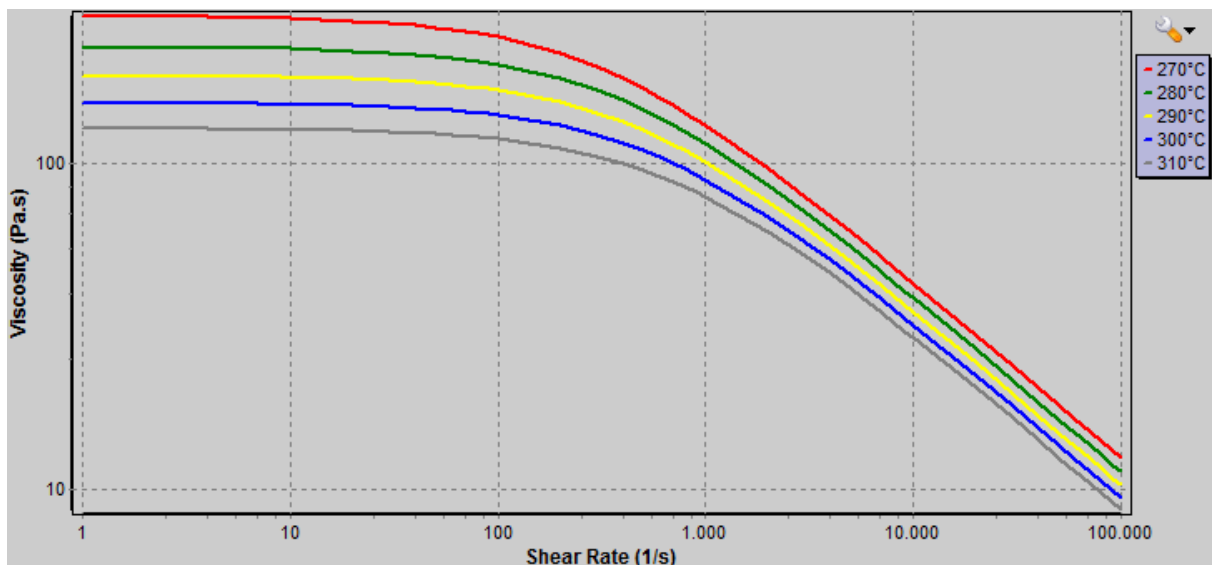


Abbildung 24: Viskositätskurven PA 66 (Carreau-WLF approximiert).

3.2.1.2 PBT GF20

Beim PBT GF20 werden ebenfalls die Viskositätsdaten bestimmt. Da im Vergleich mit den Daten der Cadmould Datenbank jedoch deutliche Unterschiede auftreten, wie Abbildung 25 zeigt, werden hier Materialtests bei drei unterschiedlichen Temperaturen (250/260/270 °C) durchgeführt. Es werden auch hier wieder die drei verschiedenen Düsenlängen verwendet.

3. Simulation des Ist-Zustandes

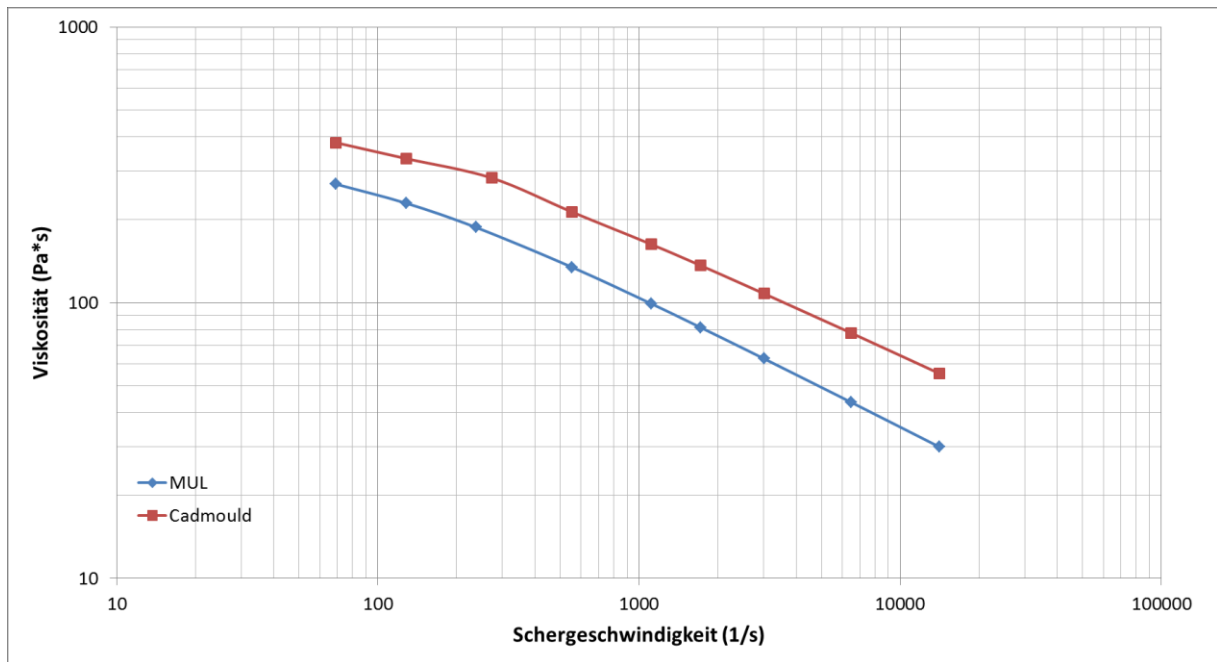


Abbildung 25: Vergleich der Viskositätskurven PBT GF20 (Pocan B 3225).

Es werden analog zum PA 66 die Carreau-WLF-Koeffizienten bestimmt und in die Cadmould User Datenbank übertragen. Die Koeffizienten für das PBT GF20 sind im Anhang (vgl. Kap. 9.4.2) zu finden. Die in die Datenbank eingetragenen Carreau-WLF Koeffizienten für PBT GF20 ergeben die temperaturabhängigen Viskositätskurven, welche in Abbildung 26 dargestellt sind.

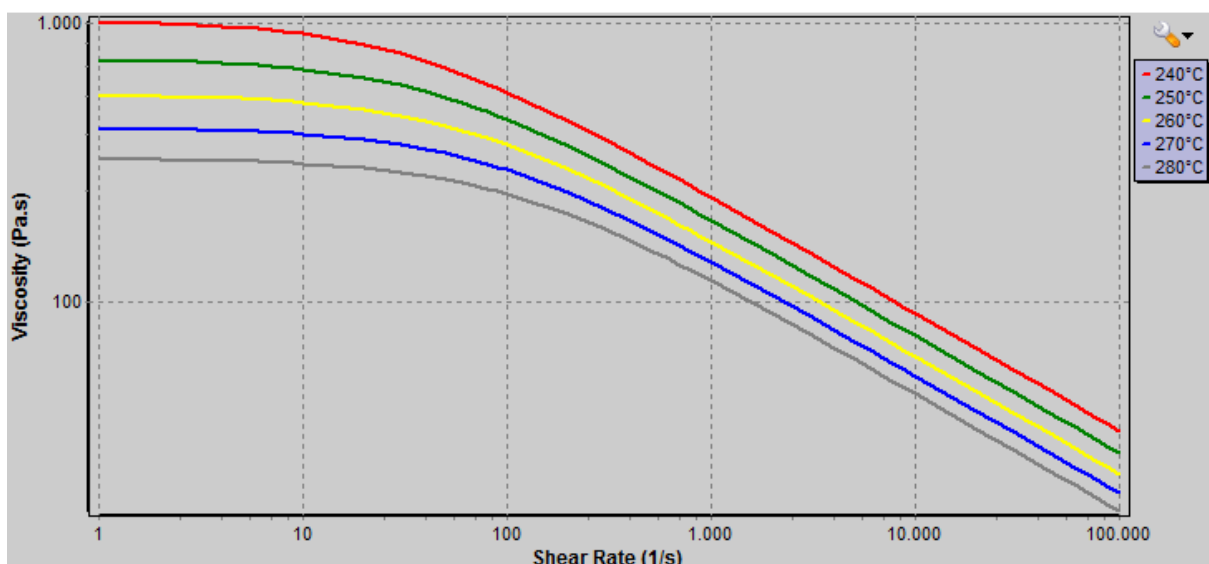


Abbildung 26: Viskositätskurven PBT GF20 (Carreau-WLF approximiert).

3.2.2 pvT

Für die Berechnung von Schwindung und Verzug benötigt Cadmould Informationen zum pvT-Verhalten. Die dafür notwendigen pvT-Daten werden mit dem pvT-Gerät mit der Bezeichnung pvT100 der Firma SWO Polymertechnik GmbH bestimmt. Die Messungen werden jeweils bei fünf verschiedenen Drücken (200/400/800/1200/1600 bar) durchgeführt. Auch hier werden wieder Koeffizienten, diesmal nach dem IKV-Ansatz, definiert, welche die approximierten Kurven für die unterschiedlichsten Drücke beschreiben.

3.2.2.1 PA 66

Die pvT-Messungen für PA 66 werden, wie oben beschrieben, am Department Kunststofftechnik durchgeführt. Die Ergebnisse werden approximiert, wobei sich die 13 Kennwerte für den IKV-Ansatz ergeben. Diese 13 Werte sind in Kap. 9.4.3 aufgelistet. Anhand der bestimmten Koeffizienten ergeben sich folgende pvT-Kurven für PA 66 (Abbildung 27). Im Übergangsbereich treten Abweichungen vom Kurvenverlauf auf. Dies sind Interpolationsfehler welche jedoch keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben.

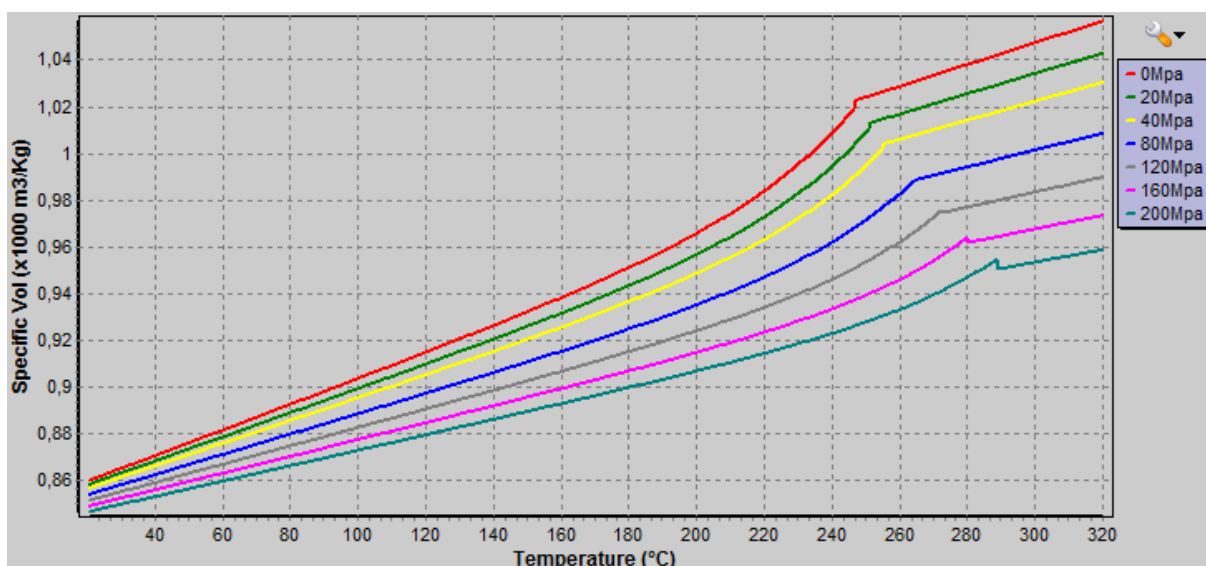


Abbildung 27: pvT-Kurven PA 66 (IKV-approximiert).

3.2.2.2 PBT GF20

Für das PBT GF20 werden ebenfalls Messungen durchgeführt. Analog zum anderen Material wird auch hier bei fünf verschiedenen Drücken isobar gemessen. Die IKV-Koeffizienten wurden ebenfalls erneut bestimmt und sind in Kap. 9.4.4 angeführt. Die approximierten pvT-Kurven sind in Abbildung 28 dargestellt. Anhand dieser Daten berechnet Cadmould die Schwindung bzw. den Verzug des Formteiles.

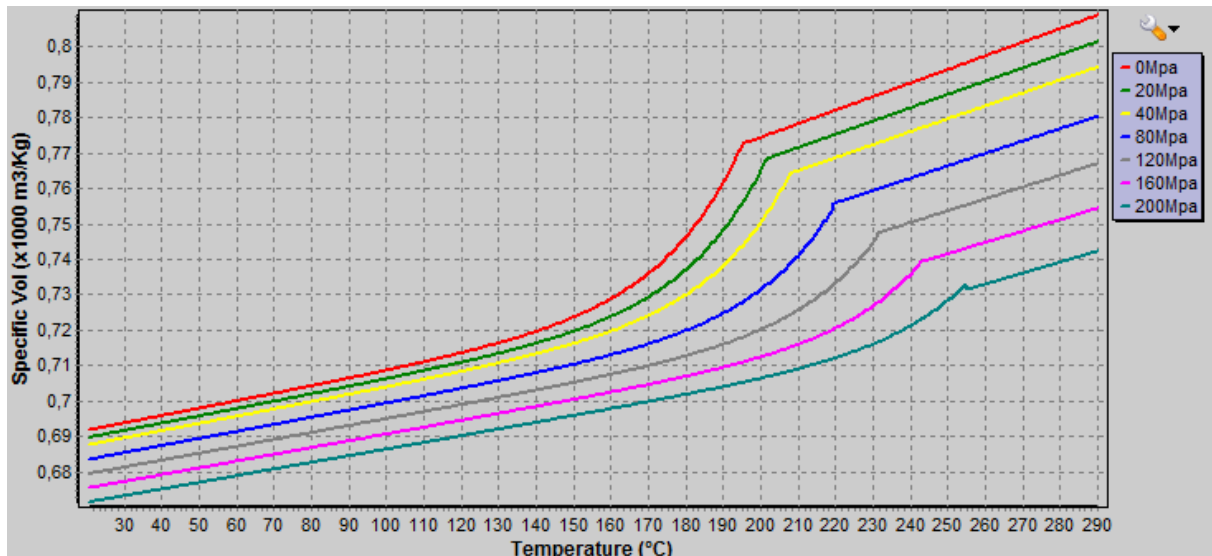


Abbildung 28: p v T -Kurven PBT GF20 (IKV-approximiert).

3.3 Modellaufbau

Die Simulation benötigt zur Berechnung ein exakt der Realität nachgebautes Simulationsmodell. Je besser dieses Modell der Realität entspricht, desto genauer sind die berechneten Ergebnisse. Das Modell beinhaltet die Bauteilgeometrie, das komplette Angussystem und die gesamte Kühlsituation.

Die notwendigen Bauteilgeometrien wurden von DPA im STEP-Format zur Verfügung gestellt (Abbildung 29).

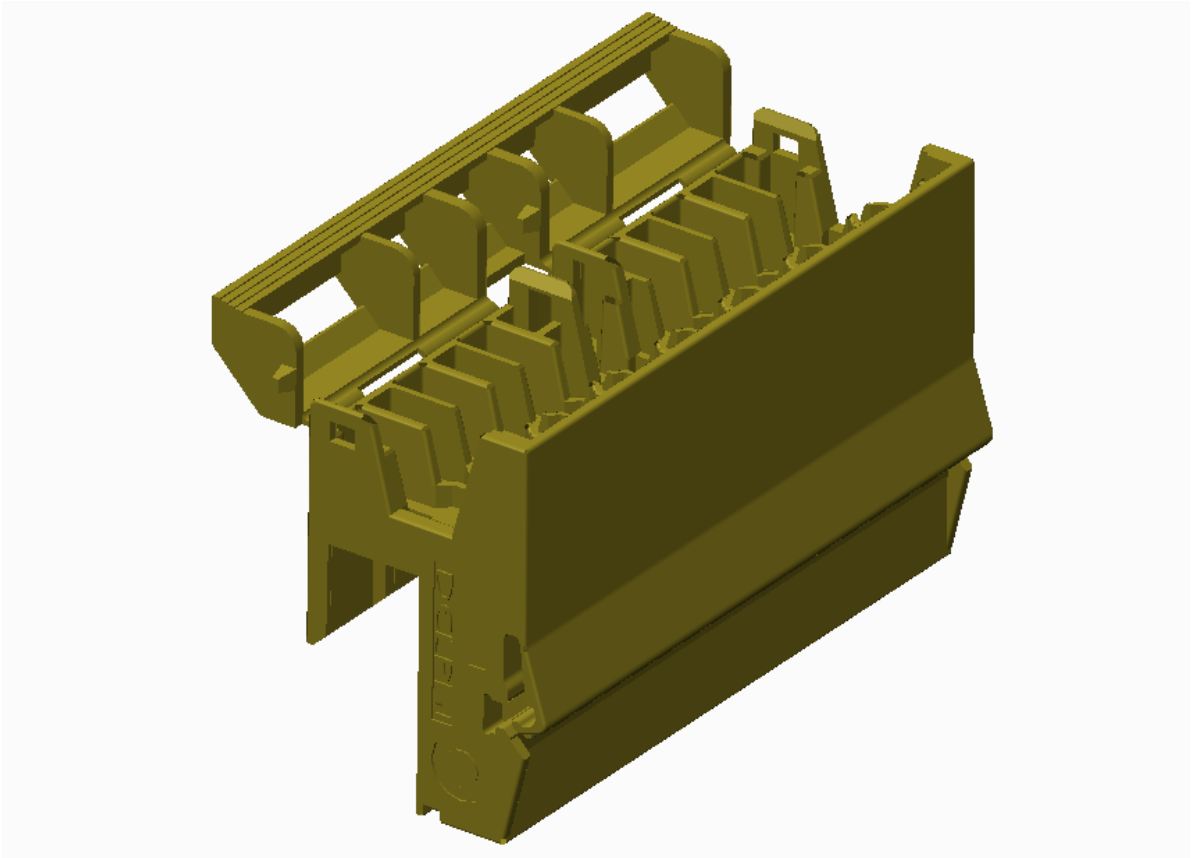


Abbildung 29: Bauteilgeometrie im STEP-Format.

Um die Bauteilgeometrie in Cadmould verwenden zu können, ist es notwendig, diese in ein STL-Format zu konvertieren. Dies wird mittels des 3D-CAD-Programms Creo Parametrics 1.0 durchgeführt. Die STL-Datei besteht ausschließlich aus dreieckigen Flächenelementen. Der Anguss wurde ebenfalls in Creo Parametrics laut Werkzeuggeometrie nachgebildet. Die dafür benötigte Werkzeuggeometrie wurde von DPA als STEP-Datei zur Verfügung gestellt. Die Nachbildung des Angusses ist in Abbildung 30 dargestellt.

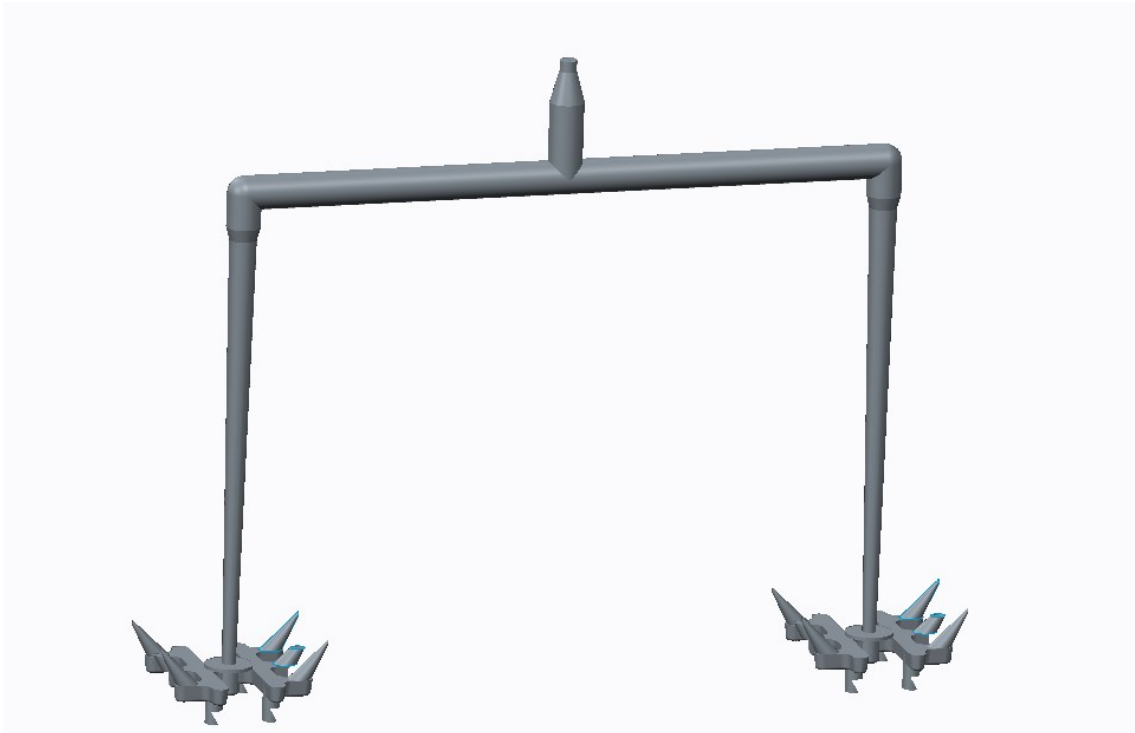


Abbildung 30: 3D Nachbildung des Angusses (STEP-Format).

Um genauere Simulationsergebnisse zu erhalten, wurde das Angussystem in Cadmould soweit sinnvoll nachgebildet. Cadmould besitzt zu diesem Zweck ein Konstruktionstool, welches zwischen Heiß- und Kaltkanal unterscheidet. Da bei diesem Bauteil sowohl Heißkanal als auch Kaltkanal zum Einsatz kommen, und diese unterschiedliche Simulationseigenschaften besitzen, ist es durchaus sinnvoll, den Anguss in Cadmould nach zu modellieren. In Cadmould stehen jedoch für die Nachbildung von Angusssegmenten nur "einfache" Konstruktionselemente zur Verfügung. So wurde z.B. der Kegelanschnitt, welcher einen elliptischen Querschnitt hat, durch einen Kegel mit Kreisquerschnitt mit gleichem hydraulischen Durchmesser ersetzt. Weiters wurden kleine „Nebenkavitäten“ im Bereich des Angussverteilers, welche den Berechnungsablauf nicht stören, entfernt. Dies ist zulässig, da deren Einfluss auf Füllzeit, Druckwirksamkeit und Druckbedarf vernachlässigbar klein ist. Lediglich bei einer eventuellen Materialbedarfsberechnung für Stückkostenermittlung müssten die Nebenkavitäten wieder berücksichtigt werden. Der vereinfachte in Cadmould modellierte Anguss ist in Abbildung 31 dargestellt.

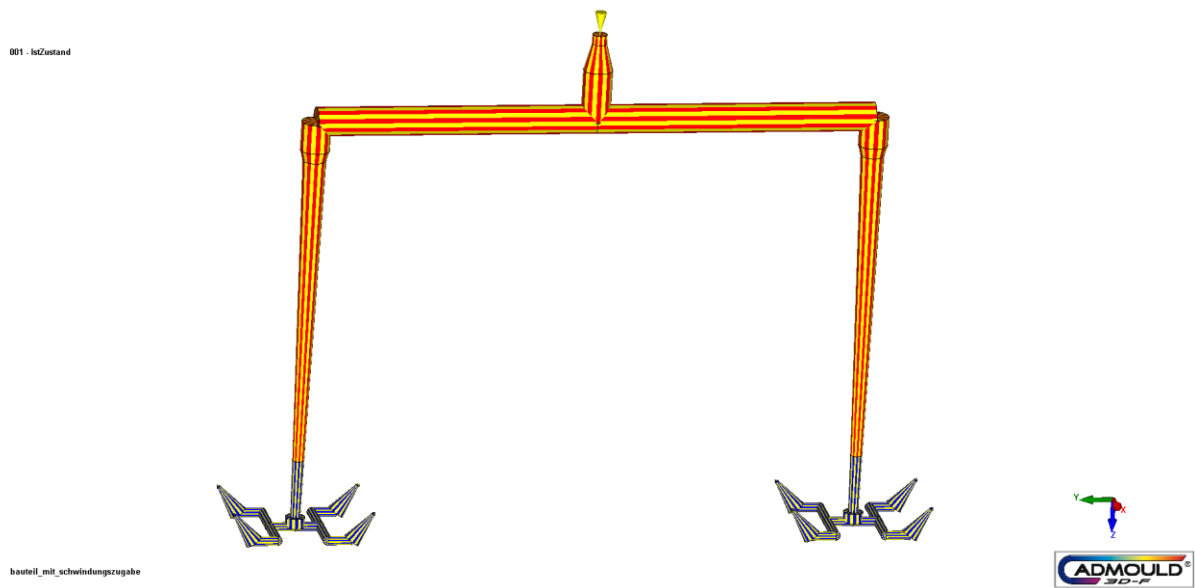


Abbildung 31: Cadmould Modell des Angussystems.

In Abbildung 31 erkennt man ebenfalls den Unterschied zwischen Heiß- und Kaltkanalanguss-Segmenten. Die rot-gelb gestreiften Bereiche sind dabei der Heißkanal und die blau-gelb gestreiften Bereiche Kaltkanal. Am oberen Rand der Abbildung erkennt man einen gelben Kegel. Dieser gibt jenen Punkt an, an dem die Schmelze mit einer homogenen Massetemperatur zugeführt wird.

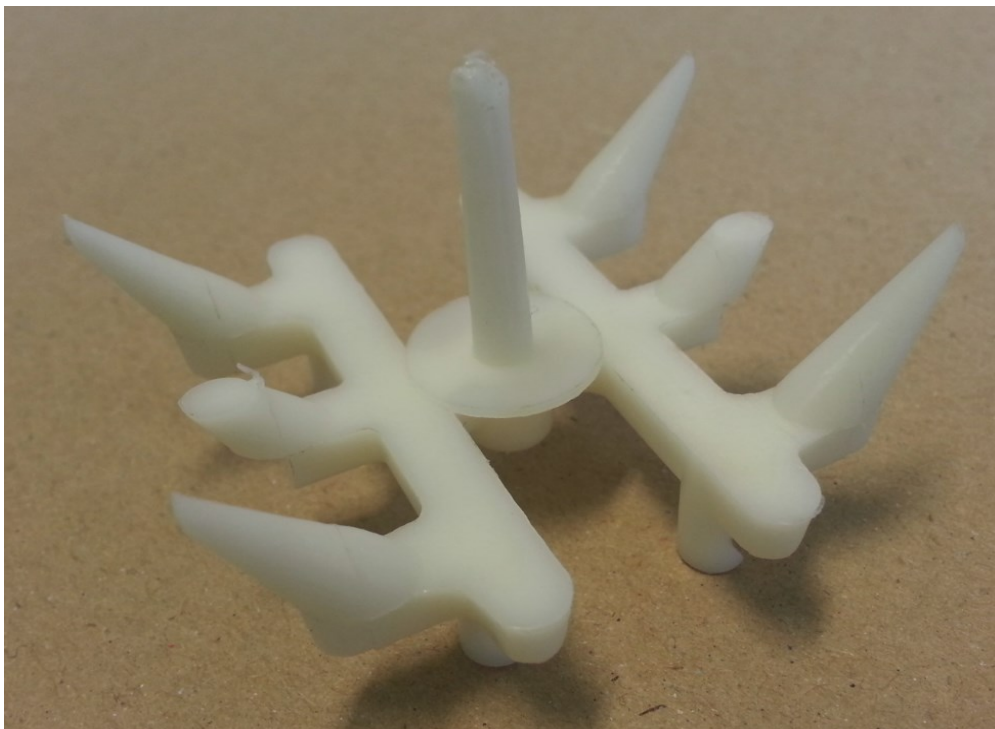


Abbildung 32: Realer Kaltkanal-Angussverteiler.

3. Simulation des Ist-Zustandes

Vergleicht man den realen Kaltkanal-Angussverteiler (Abbildung 32) mit dem virtuellen Kaltkanal-Angussverteiler (Abbildung 33), so erkennt man die Vereinfachung des virtuellen Angusses sehr deutlich.

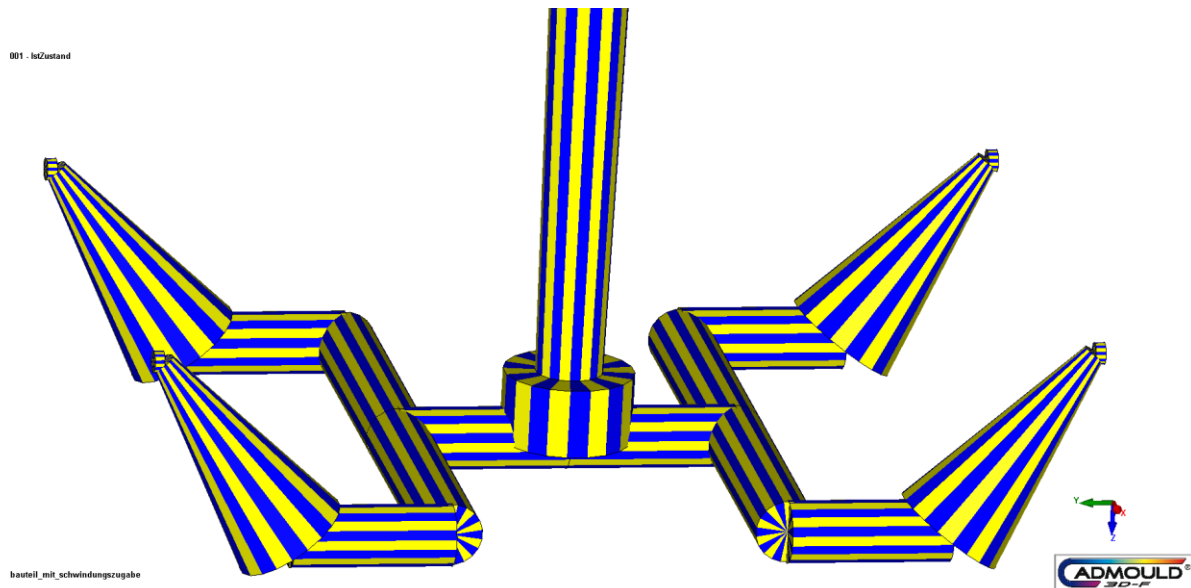


Abbildung 33: Modellierter Kaltkanalanguss im Detail.

Schließlich wird die Bauteilgeometrie mit dem Angussystem verbunden und der Anspritzpunkt, an welchem das Material dem System zugeführt wird, wird bestimmt.

Die Nachbildung des Kühlsystems erfolgt teilweise in Cadmould und teilweise im 3D-CAD-Programm Creo Parametrics. Wie beim Anguss wurde auch für die Nachbildung des Kühlsystems die Werkzeugzeichnung vermessen. Die Mittellinien der Kühlkanäle werden im 3D-CAD-Programm nachgezeichnet und anschließend als IGES exportiert und in Cadmould importiert. Diesen Mittellinien werden in Cadmould „Durchmesser“ zugeordnet. Das Kühlsystem besteht aus vier größeren Kreisläufen (8 mm Durchmesser) und acht kleineren Kreisläufen (5 mm Durchmesser), welche sich in den Schiebern befinden. In Abbildung 34 ist das Kühlsystem mit Ein- und Ausläufen farblich dargestellt. Jeder Kühlkreis ist in einer anderen Farbe dargestellt, was die Erkennung der einzelnen Kreisläufe erleichtern soll. Wie man sieht, ist die Kühlung zwar symmetrisch aber nicht für alle Bauteile gleich. Dies führt zwangsläufig zu unterschiedlichem Kühlverhalten und somit zu unterschiedlichen Bauteilqualitäten.

3. Simulation des Ist-Zustandes

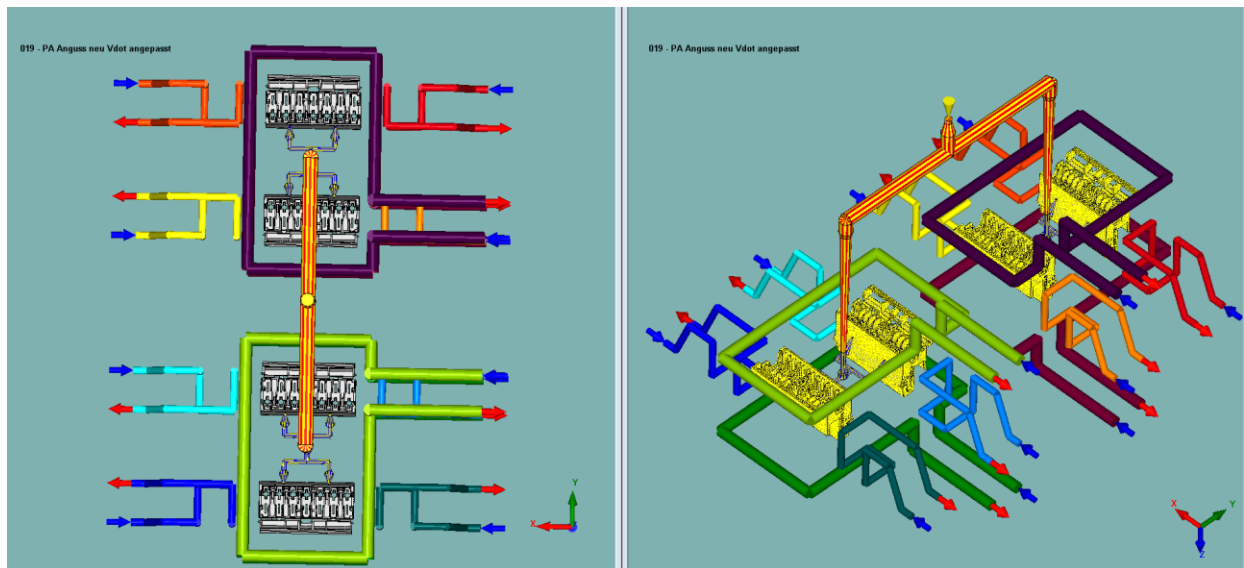


Abbildung 34: Färbige Darstellung der einzelnen Kühlkanäle.

Da für die reale Temperierung zwei Temperiergeräte eingesetzt werden, werden die Auswerfer- und die Spritzseite auch in der Simulation separat temperiert. Die verwendeten Temperiergeräte sind vom Typ Piovon THP6-ID. Es wurde eine Durchflussrate von 10 l/min pro Temperiergerät angenommen, welche laut Herstellerspezifikationen durchaus realistisch ist. Es wurde auch angenommen, dass die Kühlkreise parallel und nicht seriell versorgt werden. Zu diesem Zweck wurde eine „Batterie“ erstellt, wo die einzelnen Kreisläufe der Auswerfer- bzw. Spritzseite zusammengefasst werden. Somit hat das gesamte System nur mehr zwei Kühlkreisläufe mit je einem Einlauf und einem Auslauf. Das gesamte Modell ist in Abbildung 35 dargestellt.

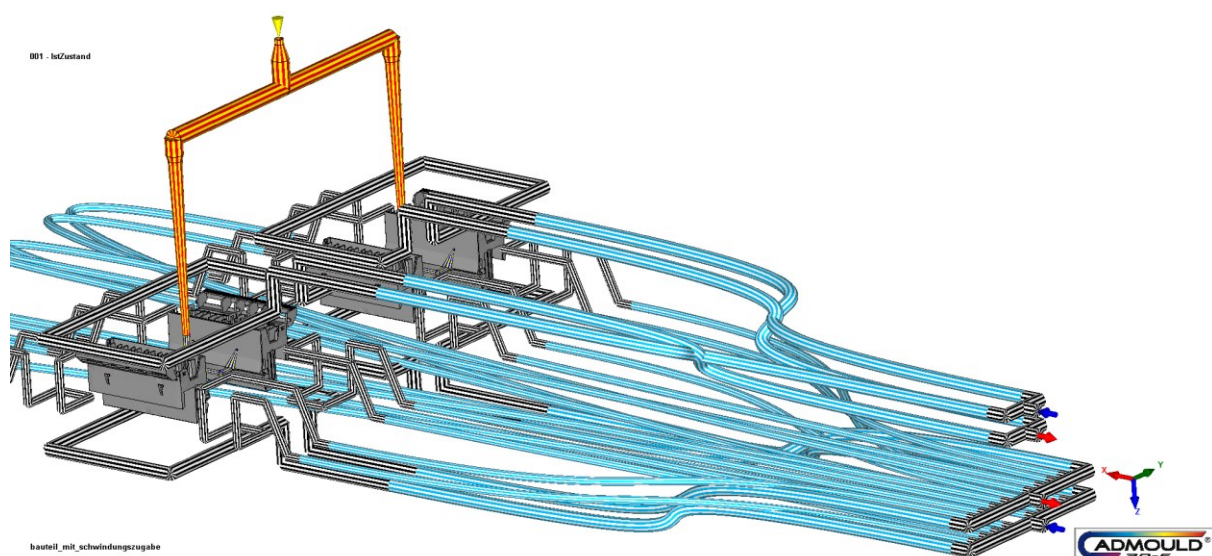


Abbildung 35: Gesamtes Modell.

Die Batterie, wo die Kühlkreisläufe zusammengefasst werden, ist soweit vom restlichen System entfernt, dass diese keinen Einfluss auf die Kühlsituation der Bauteile hat. Die Verbindungsschläuche (hellblau) zwischen den Kühlkreisläufen und der jeweiligen Batterie werden bei Berechnung nicht berücksichtigt. Sie dienen lediglich als Verbindung zwischen den Bohrungen und zur optischen Darstellung.

Die Schmelze wird real an der Spritzgießmaschine horizontal eingespritzt. Um die Darstellungen anschaulicher zu gestalten, wird in Folge bei den Abbildungen die Schmelze vertikal zugeführt.

3.4 Prozesseinstellungen

Für die Simulation werden folgende Einstellungen (Tabelle 1), welche sich an den realen Prozessdaten bei DPA orientieren, verwendet.

Tabelle 1: Eingestellte Parameter für die Simulation des Ist-Zustandes.

Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Füllzeit	t_F	0,8	s
Nachdruckzeit	t_N	3	s
Nachdruckprofil	p_N	350/300	bar
Kühlzeit	t_K	13	s
Nebenzeit	t_R	8	s
Zykluszeit	t_Z	21,8	s
Schmelzetemperatur (Düsentemperatur)	T_S	290	°C
Heißkanaltemperatur	T_{HK}	300	°C
Vorlauftemperatur Spritzseite	T_{VL1}	40	°C
Vorlauftemperatur Auswerferseite	T_{VL2}	30	°C

Vor der eigentlichen Füll- und Nachdrucksimulation wird eine Wandtemperaturanalyse durchgeführt. Bei dieser wird unter Annahme einer homogen mit Kunststoff gleicher Temperatur gefüllten Kavität und den gewählten Prozesszeiten die Verteilung der Kavitätswandtemperatur zu Beginn der Einspritzphase bzw. als zeitlicher Mittelwert in der Kühlphase berechnet. Diese Analyse wird so oft wiederholt, bis sich die berechneten Temperaturverteilungen zwischen zwei Iterationen nur mehr wenig unterscheiden ($< 2 \text{ °C}$), der simulierte Prozess also „stationär“ ist. Die beiden endgültigen Temperaturverteilungen für Einspritz- und Kühlphase werden schließlich als jeweils zeitlich konstante

Randbedingungen für die eigentliche Füll- und Nachdrucksimulation gesetzt. Diese in Cadmould vorgegebene Vereinfachung der Realität ist gegebenenfalls bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Als Material wird das PA 66 mit den Materialeigenschaften, welche an der Montanuniversität Leoben ermittelt werden, verwendet. Das eingestellte Werkzeugmaterial ist ein Stahl der Firma Böhler mit der Bezeichnung W400, welches aus der Cadmould Datenbank entnommen wird.

4 Simulationsergebnisse Ist-Zustand

Die Simulation wird für PA 66 mit den vorher genannten Annahmen und Parametern durchgeführt. Somit wird versucht, den realen "Ist-Zustand" virtuell nachzubilden. In den folgenden Abschnitten werden die Simulationsergebnisse für den Ist-Zustand dargestellt und diskutiert.

4.1 Füllprobleme

Das Bauteil konnte mit den vorgegebenen Material- und Prozessdaten laut Cadmould vollständig gefüllt werden. Cadmould unterscheidet zwischen vier verschiedenen Kategorien der Füllbarkeit:

- Keine Füllprobleme (grün),
- leichte Füllprobleme (gelb),
- schwere Füllprobleme (rot) sowie
- nicht füllbar (weiß).

Die einzelnen Formnester werden theoretisch unter gleichen Voraussetzungen gefüllt, da das Angussystem symmetrisch ist. Dies spiegelt sich auch in der Simulation wieder. Die Stellen wo Füllprobleme auftreten, sind bei allen vier Bauteilen an den gleichen Positionen. Abbildung 36 zeigt eines der vier Bauteile mit den auftretenden Füllproblemen.

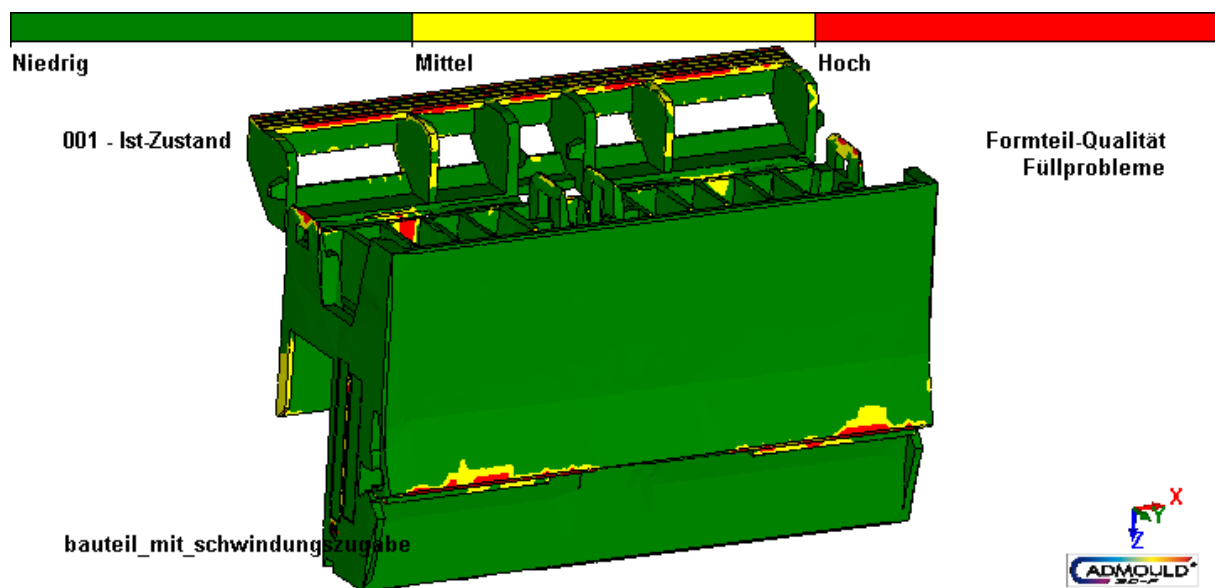


Abbildung 36: Füllprobleme beim Einspritzen.

Die Füllprobleme treten an jenen Stellen auf, die als letztes gefüllt werden. Diese Stellen werden erst in der Nachdruckphase gefüllt. Ist die Nachdruckhöhe bzw. die Nachdruckdauer zu gering, so sind diese Bereiche nicht vollständig ausgespritzt. Die Lage und Größe der Füllprobleme entsprechen den Reklamationen der Kunden für nicht ausgespritzte Teile. Es ist daher darauf zu achten, dass die Nachdruckphase an das Bauteil angepasst wird.

4.2 Wandtemperaturverteilung

Betrachtet man die Wandtemperaturverteilung der Kavität (auf das Bauteil projiziert) am Ende der Zykluszeit von 21,8 s (d.h. zu Beginn des nächsten Zyklusses), so sieht man, dass die Kavität sehr unterschiedliche Oberflächentemperaturen aufweist (Abbildung 37). Die durchschnittliche Oberflächentemperatur an den Außenflächen beträgt ca. 70 °C. Die kältesten Punkte der Werkzeugoberfläche in der Kavität weisen eine Temperatur von ca. 36 °C auf.

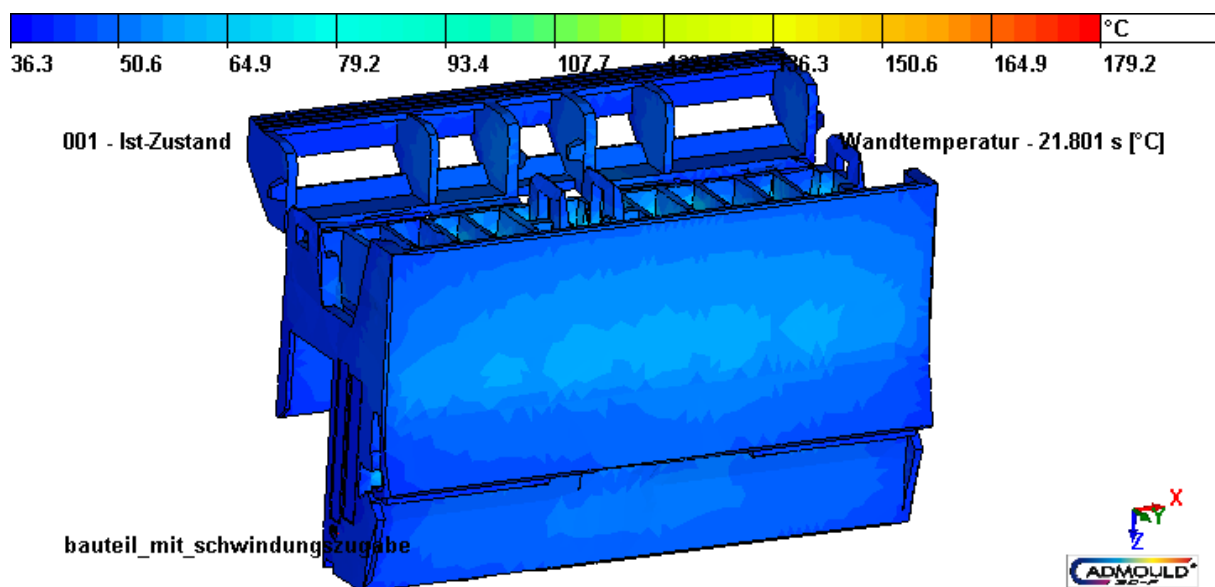


Abbildung 37: Wandtemperaturen am Ende der Berechnungszeit.

Neben den Bereichen mit 36 °C gibt es sogenannte Hot-Spots in den inneren Bereichen des Bauteils, wo berechnete Bauteiltemperaturen von bis zu 130 °C und mehr auftreten, wie in Abbildung 38 dargestellt ist. Der rote Punkt in der Abbildung 38 markiert jene Stelle an der die Hot Spot Temperatur von 130 °C festgestellt wurde. Diese Hot Spots ergeben sich, da die Kühlbohrungen nur außen um das Bauteil herum verlaufen und somit die Kerne aufgrund derer geringer Wärmeleitquerschnitte und großer Länge schlecht gekühlt werden. Zu diesem Zwecke sind in Abbildung 39 die Kerne des Werkzeuges dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Darstellung für die beiden Formnester unterschiedlich ist. Das rechte Formnest ist

4. Simulationsergebnisse Ist-Zustand

mit allen durchgehenden Kernen dargestellt, während das linke Formnest mit nur jeweils einem durchgehenden Kern abgebildet ist, um die einzelnen Kernzüge besser veranschaulichen zu können.

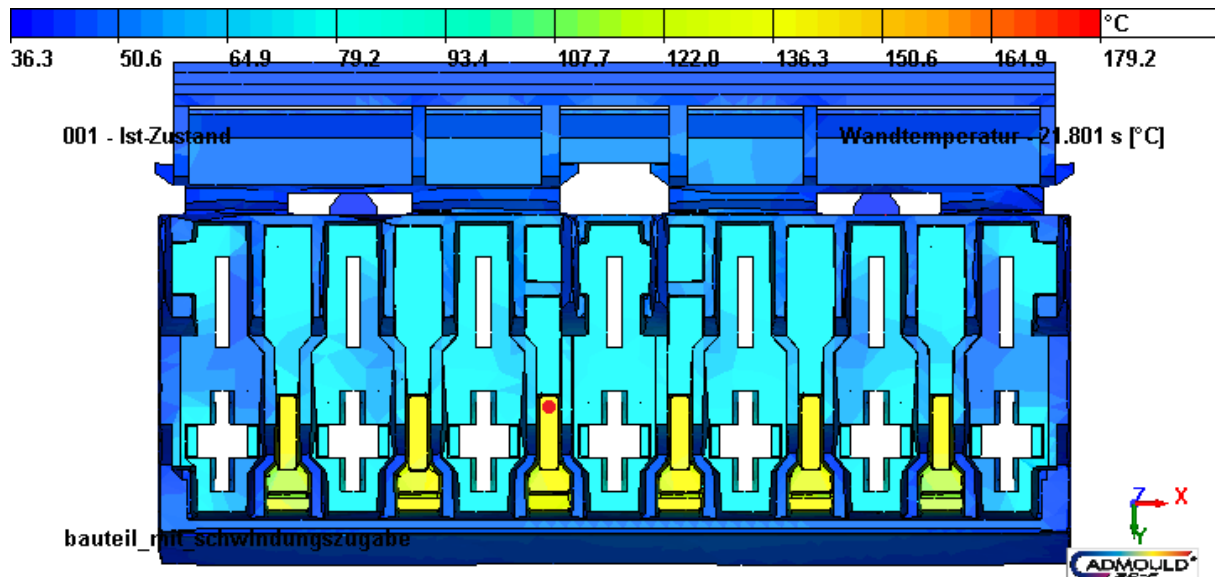


Abbildung 38: Hot-Spots in der Kavitätsoberflächentemperatur zu Beginn der Füllung (projiziert auf die Bauteiloberfläche).

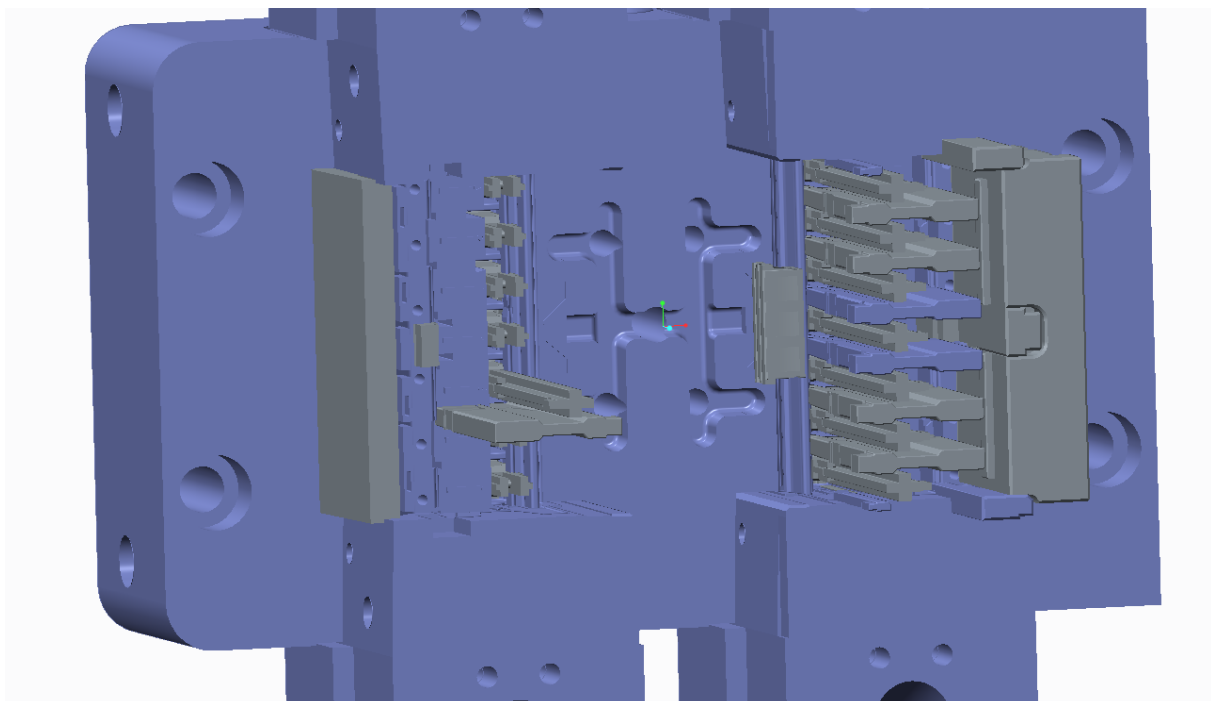


Abbildung 39: Kernzüge im Werkzeug.

Aufgrund dieser Wandtemperaturverteilung kann man darauf schließen, dass die Kühlsituation nicht optimal für dieses Bauteil ausgelegt wurde oder werden konnte. Separate

Kernkühlungen oder Kerne mit höherer Wärmeleitfähigkeit wären hierfür Lösungsansätze. Die Optimierung der Kühlsituation erfolgt jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt dieser Arbeit (vgl. Kap. 0). Zu beachten ist allerdings, dass die „schlechte Kühlung“ der Kernbereiche überhaupt erst eine Füllbarkeit der entsprechenden dünnwandigen Bauteilbereiche trotz der gewählten unterhalb der empfohlenen Temperaturen (vgl. Kap. 9.3) liegenden Vorlauftemperaturen ermöglichen könnte.

4.3 Bauteiltemperatur am Ende der Füllphase

Abbildung 40 zeigt die mittlere Temperatur über die Bauteildicke bzw. des Angussystems am Ende der Füllphase, also nach 0,8 s, projiziert auf die Außenhaut des Bauteiles. Wie erwartet weist der Anguss die höchste Temperatur auf, was durch die nachdrückende Masse erklärbar ist. Teile des Bauteils sind bereits am Ende der Füllphase auf ca. 59 °C abgekühlt, da sie an der kälteren Werkzeugwand anliegen. Dies hat unmittelbar Einfluss auf den verbleibenden flüssigen Bauteilquerschnitt (vgl. Kap. 4.7 Randschichtdicke), welcher noch für einen Massetransport und eine Druckübertragung in der Nachdruckphase und somit zur Schwindungskompensation zur Verfügung steht.

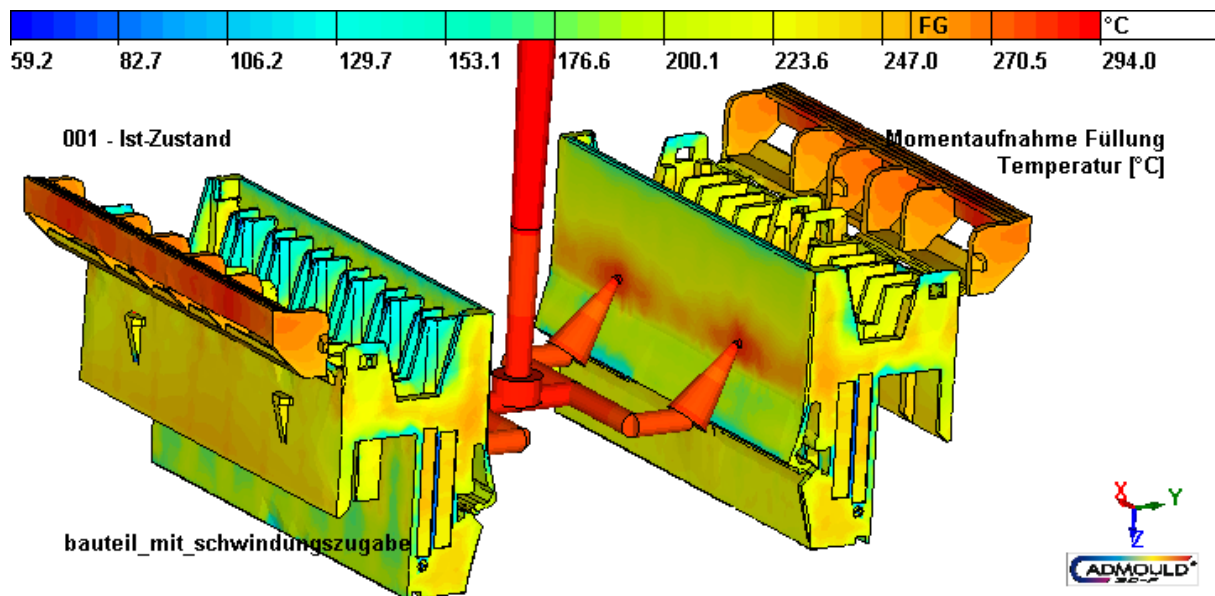


Abbildung 40: Mittlere Temperaturen über die Bauteildicke am Ende der Füllphase.

Ein weiterer interessanter Zeitpunkt für die Betrachtung der mittleren Temperaturen ist der Zeitpunkt bei der Entformung. Die verstrichene Zeit bis zu diesem Zeitpunkt beträgt 13,8 s. Wie Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen, ist das Bauteil schon deutlich abgekühlt. Die meisten Bereiche sind schon auf ca. 60 – 90 °C abgekühlt. Nur vereinzelte Bereiche auf Höhe des Angusses weisen noch mittlere Temperaturen von bis zu 136 °C auf. Im Bereich wo die

4. Simulationsergebnisse Ist-Zustand

Auswerfer ansetzen und das Bauteil von den Kernen schieben, sind mittlere Temperaturen von ca. 88 °C zu finden. Diese Temperaturen sollten also bei einer empfohlenen Entformungstemperatur von 185 °C ausreichend gering sein, um das Bauteil ohne Beschädigung zu entformen, vorausgesetzt die Entformungskräfte sind auf Grund des Schwindungsverhalten nicht zu hoch. Denn durch die niedrigen Vorlauftemperaturen wird das eingespritzte Material sehr rasch abgekühlt und es kommt zum Aufschumpfen der Formteile auf die Kernzüge, was die Entformungskräfte deutlich erhöht.

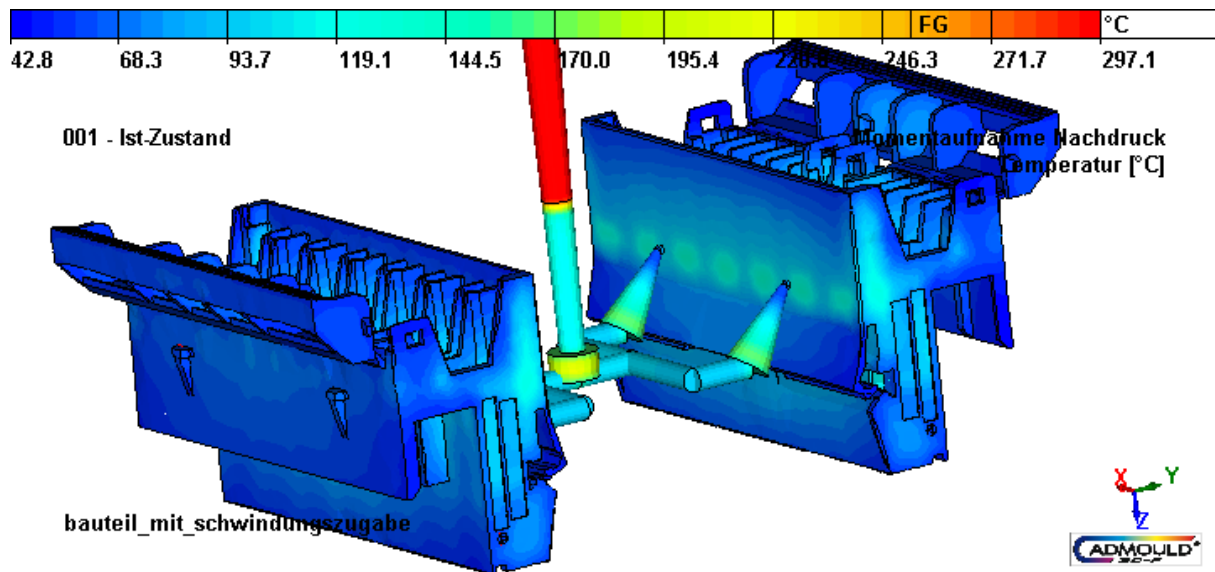


Abbildung 41: Mittlere Temperaturen über die Bauteildicke am Ende der Kühlphase.

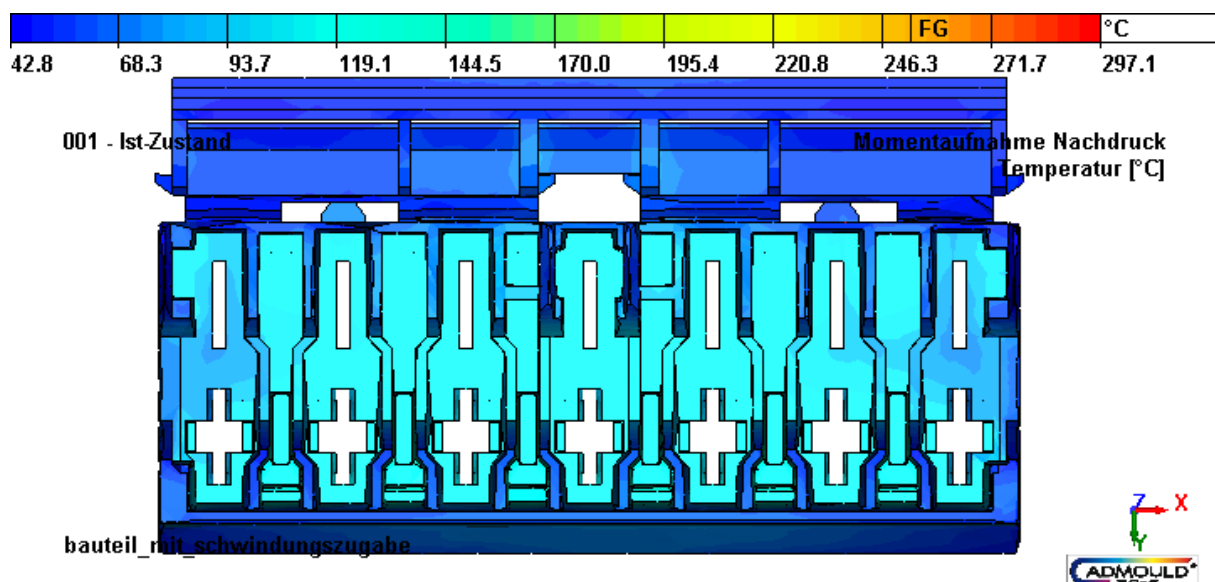


Abbildung 42: Mittlere Temperaturen über die Bauteildicke im Bereich der Kernzüge am Ende der Kühlphase.

4.4 Wärmestrom-Effizienz

Die Wärmestromeffizienz (E) beschreibt, ob ein Element der Kühlbohrung von der gesamt abgeführten Wärmemenge überdurchschnittlich oder unterdurchschnittlich viel aufnimmt. Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen die Wärmestrom-Effizienz aus zwei verschiedenen Blickwinkeln. Die Werte liegen hierbei ca. zwischen 0 und 2,3. Ein Wert von $E < 1$ bedeutet hier, dass das Element unterdurchschnittlich viel Wärme aufnimmt, bei einem Wert von $E = 1$ nimmt das Element durchschnittlich viel Wärme auf und bei $E > 1$ überdurchschnittlich viel. Das Kühlsystem wäre optimal ausgelegt, wenn alle Kanäle und Bereiche die Effizienz 1 hätten. Wie aus den beiden Abbildungen zu entnehmen ist, sind die kleineren Kühlkreise weniger effizient, als die größeren Kreisläufe. Dies ist durch die deutlich kleineren Durchmesser der Kühlkanäle sowie den geringeren Strömungsgeschwindigkeiten in den kleinen Kühlkanälen erklärbar, wodurch die Wärmeübergangskoeffizienten α deutlich geringer ist als jene der großen Kühlkanäle. Die größte Effizienz besitzen die großen Kühlkreisläufe der Auswerferseite.

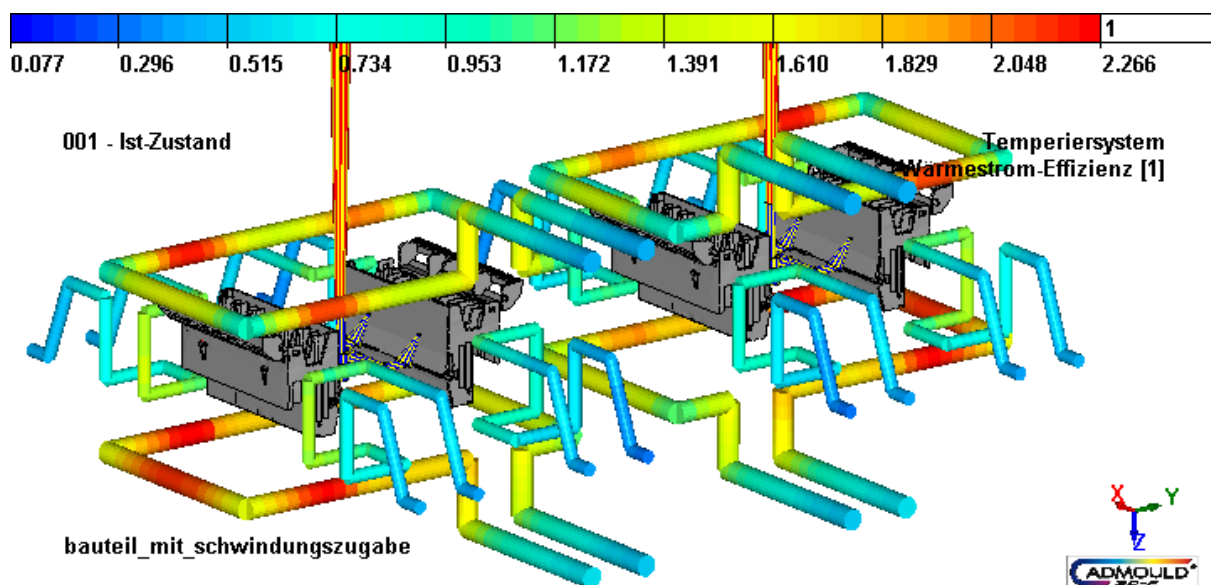


Abbildung 43: Wärmestrom-Effizienz der Kühlkanäle.

Abbildung 44 zeigt auch, dass die abgeführte Wärme bei den zwei äußeren Bauteilen höher ist, als bei den zwei inneren. Somit wird hier die unterschiedliche Kühlsituation der einzelnen Bauteile, wie bereits in Kap. 3.3 beschrieben, nochmals bestätigt.

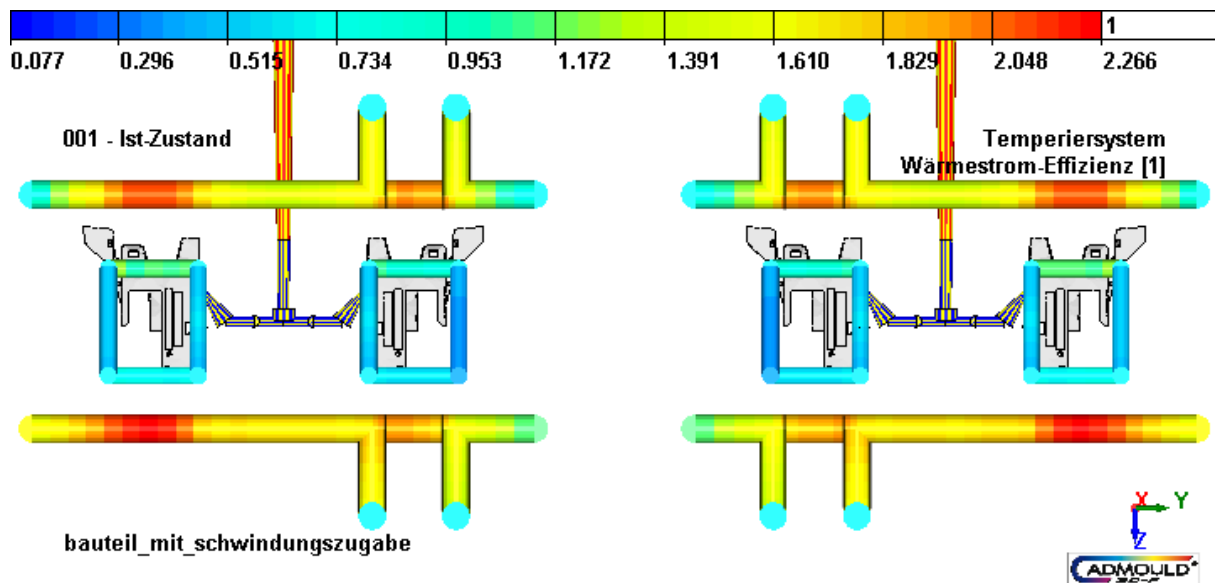


Abbildung 44: Wärmestrom-Effizienz der Kühlkanäle (anderer Blickwinkel).

Ein Grund für den unterschiedlichen Wärmeabtransport zwischen den äußeren und den inneren Bauteilen könnte sein, dass die inneren Bauteile auch von den Kühlkanälen der gegenüberliegenden Seite mitgekühlt werden. Durch den Einfluss der anderen Kühlkanäle sinkt die Wärmestromeffizienz in diesem Bereich.

4.5 Druckbedarf

Cadmould berechnet auch den für die Füllung erforderlichen Druckbedarf. Abbildung 45 zeigt den Druckverlust vom Beginn des Verteilersystems bis zum Bauteilende in bar. Dies entspricht dem Mindestfülldruck, den die Spritzgießmaschine zur Verfügung stellen können muss. Cadmould berechnet hier einen Druckverlust von 779 bar. Der reale Druckverlust beträgt ca. 800 bar. Da unsere Vereinfachungen im Kaltgussverteiler nicht berücksichtigt werden, ist der reale Druckverlust etwas höher als der virtuelle Druckverlust.

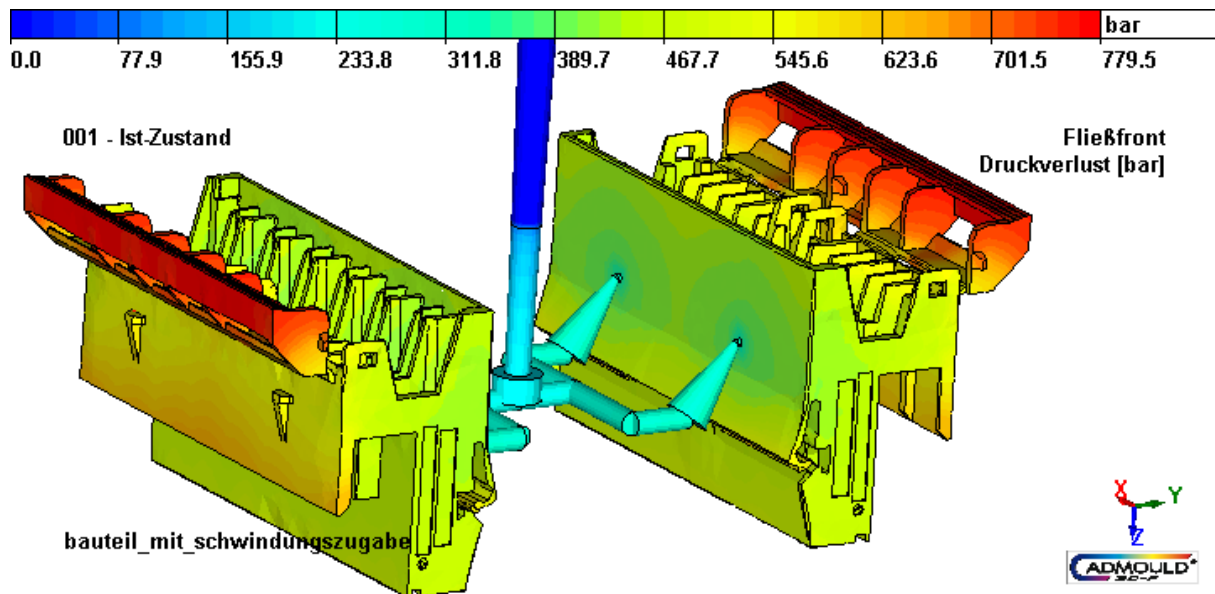


Abbildung 45: Druckverlust beim Einspritzen.

Bei jenen Bereichen, die zuletzt gefüllt werden, ergibt sich erwartungsgemäß der höchste Druckverlust. Die angussnahen Bereiche hingegen benötigen etwas weniger Fülldruck.

4.6 Siegelzeit, Einfrierzeit und Entformungszeit

Die Siegelzeit gibt an, nach welcher Zeit die schmelzflüssigen Verbindungen zum Anguss für den betrachteten Bauteilbereich über den Querschnitt erstarrt sind und daher keinen Druck mehr übertragen kann. Ist die Siegelzeit für den Anschnitt erreicht, kann kein Nachdruck mehr ans Bauteil übertragen werden, und somit findet kein Massefluss mehr statt. Die Nachdruckzeit beträgt bei der Simulation 3 s, und wie aus Abbildung 46 zu entnehmen ist, könnte noch weiter Nachdruck in angussnahe Bereiche des Bauteils eingebracht werden. Die Siegelzeit für den Anschnitt beträgt laut Simulation ca. 3,7 s.

4. Simulationsergebnisse Ist-Zustand

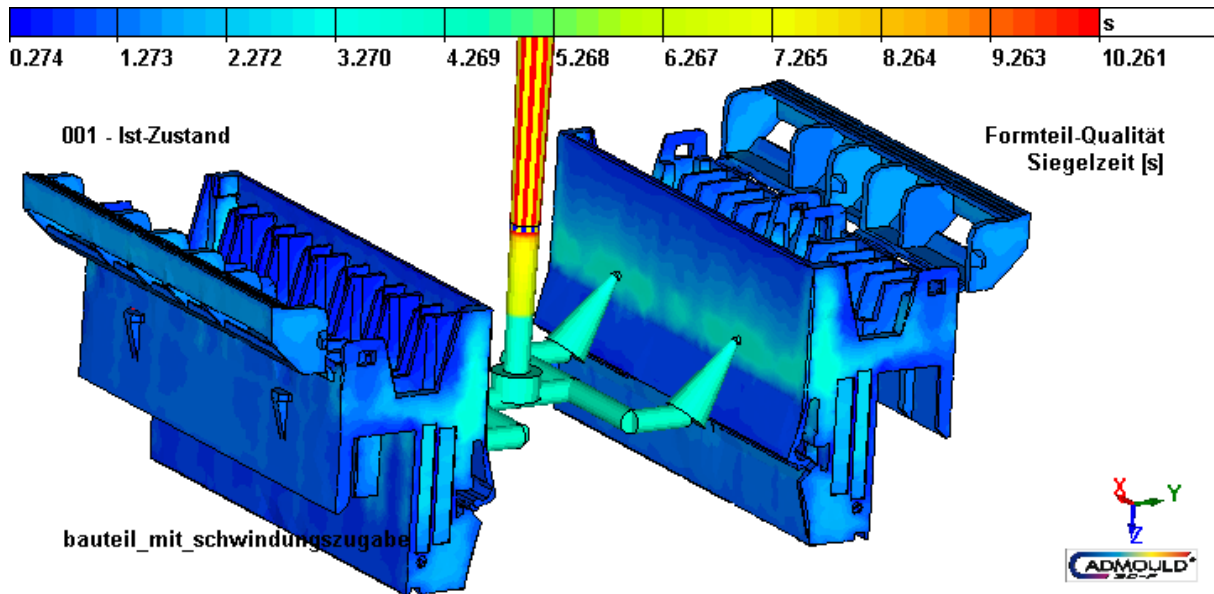


Abbildung 46: Siegelzeiten.

Die Werteskala für die Siegelzeit reicht bis 10 s. Dies ist dadurch zu begründen, dass beim Übergang vom Heißkanal zum Kaltkanal kaum Kühlung vorhanden ist und somit die Schmelze erst sehr spät einfriert. Es könnte sich allerdings auch um ein numerisches Problem handeln.

Betrachtet man nun die Siegelzeiten im Kernbereich sieht man in Abbildung 47, dass bereits nach ca. 0,4 s die ersten Bereiche der Kernzüge eingefroren sind. Alle färbig dargestellten Bereiche in Abbildung 47 haben die Siegelzeit bereits nach 0,8 s erreicht. Abbildung 48 zeigt all jene Bereiche, welche eine Siegelzeit zwischen 0 s und 1,8 s aufweisen.

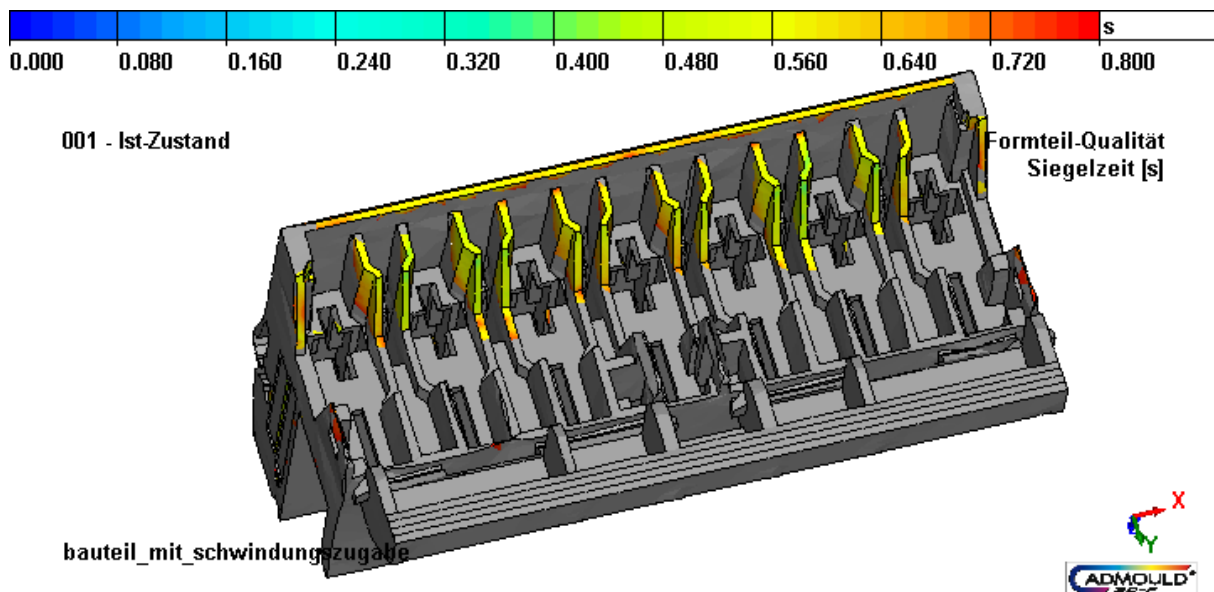


Abbildung 47: Detailansicht Kernbereich für Siegelzeiten zwischen 0 s und 0,8 s.

4. Simulationsergebnisse Ist-Zustand

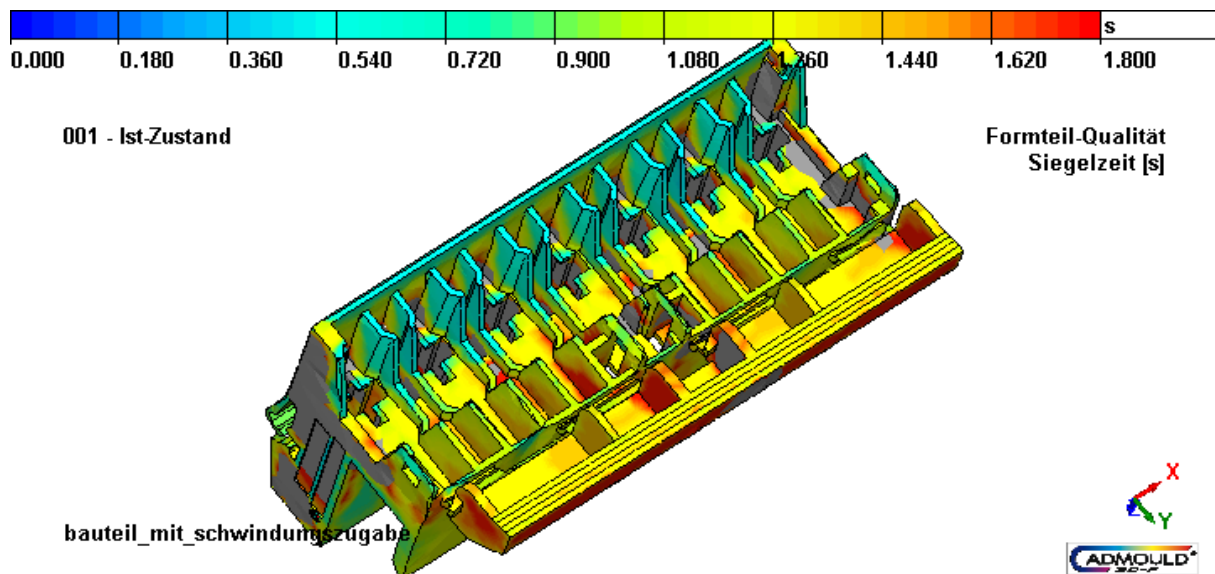


Abbildung 48: Detailansicht Kernbereich für Siegelzeiten zwischen 0 s und 1,8 s.

Die Einfrierzeit (Abbildung 49) ist der Zeitpunkt, ab dem jeder Punkt über die Dicke an der betrachteten Stelle die Fließgrenztemperatur unterschritten hat, d.h. über diesen Bauteilbereich kann keine Schmelze mehr zur Schwindungskompensation in dahinter liegende Bereiche fließen. Sind nun bereits eingefrorene Bereiche vor dem betrachteten Bereich vorhanden, so zeigt sich dies in der kürzeren lokalen Siegelzeit, d.h. obwohl der betrachtete Bauteilbereich noch Material zur Schwindungskompensation benötigen würde, erhält er keines mehr. Dies resultiert zumeist in größerem Verzug und Einfallstellen. Da im konkreten Berechnungsfall, Einfrierzeit und Siegelzeit nahezu ident sind, ist dies nicht der Fall.

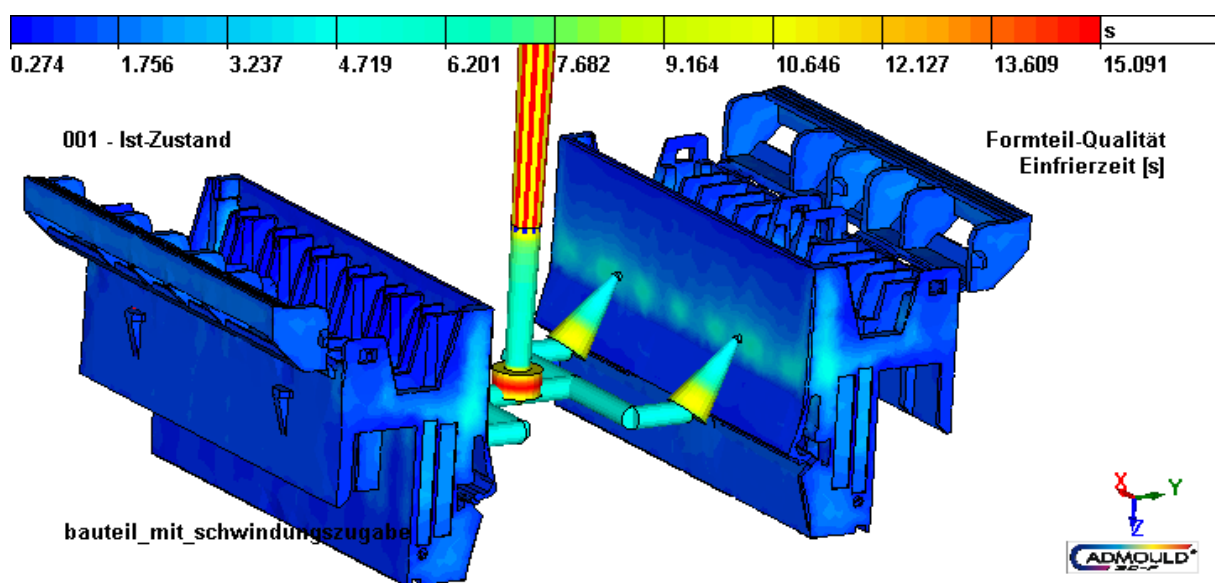


Abbildung 49: Einfrierzeiten.

4. Simulationsergebnisse Ist-Zustand

Die Entformungszeit ist die Zeit, zu der die mittlere Temperatur über der Höhe für den betrachteten Bauteilbereich die Entformungstemperatur unterschreitet. In der Abbildung 50 sind die Entformungszeiten dargestellt. Die ersten Bereiche sind bereits nach ca. 0,84 s unter die Entformungstemperatur gesunken. Dies sind vor allem äußere Ecken und Kanten, die eine geringe Bauteildicke aufweisen und sehr früh gefüllt werden. Es gibt aber auch Bereiche, welche erst nach ca. 8 s die Entformungstemperatur erreichen. Dies sind angussnahe Bereiche bzw. Eckbereiche in den Kernzügen wo die Wirkung der Kühlkreisläufe nur sehr gering ist, wie aus Abbildung 51 hervorgeht.

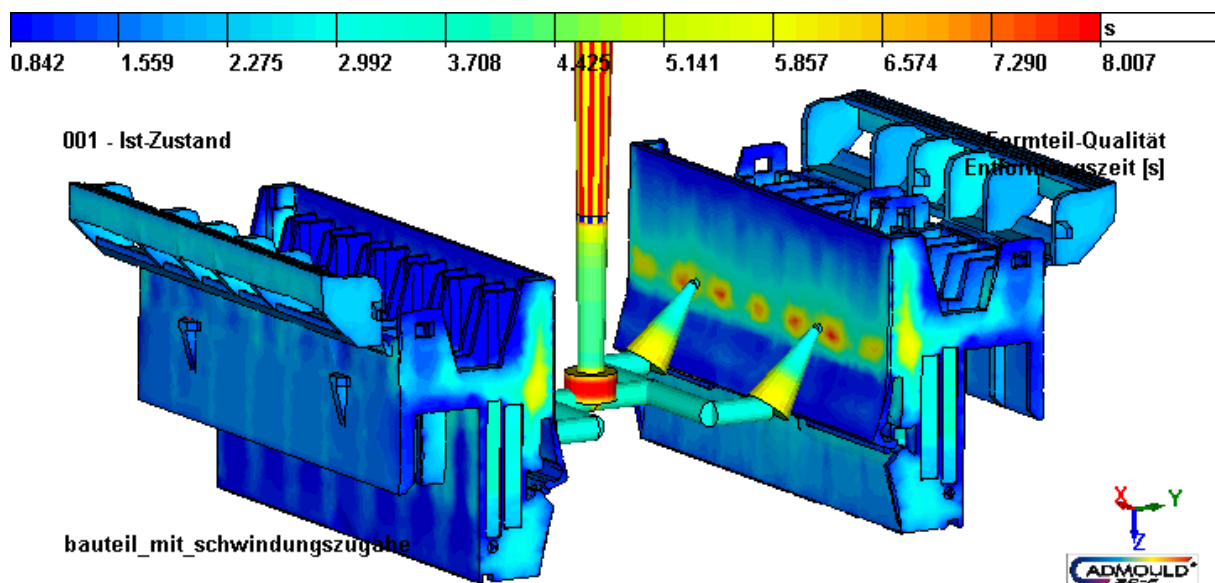


Abbildung 50: Entformungszeiten.

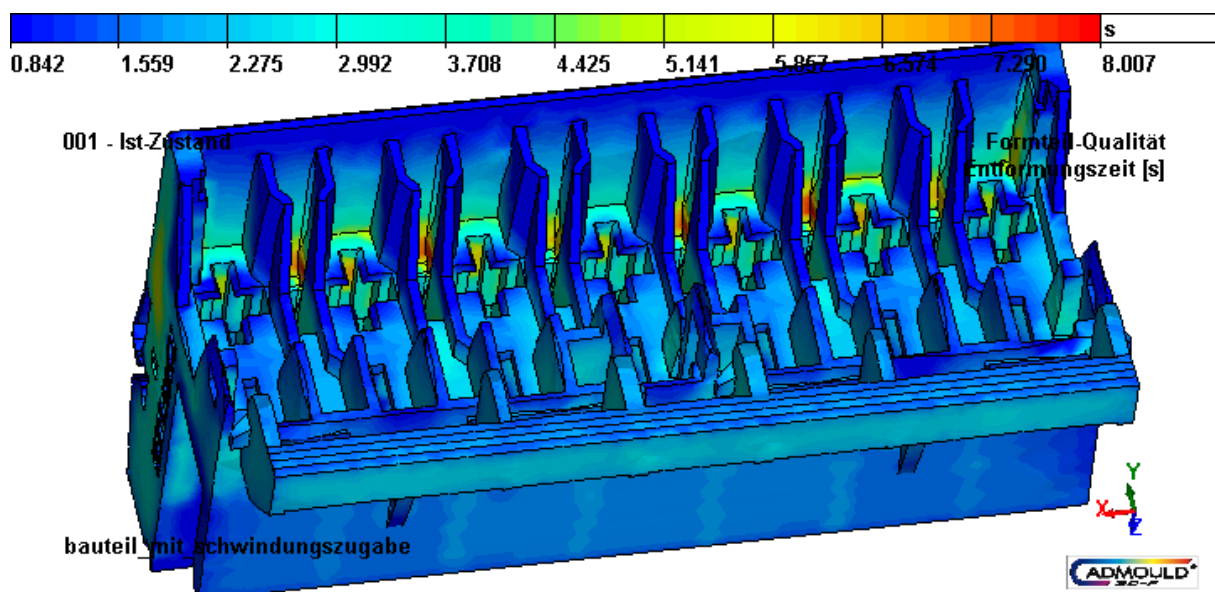


Abbildung 51: Entformungszeiten Detailansicht Kernbereiche.

4.7 Randschichtdicke am Ende der Füllzeit

Die Randschichtdicke ist ein Maß für den eingefrorenen Querschnitt. Sie ist die Dicke der eingefrorenen Randschicht in Prozent der jeweiligen Formteildicken. Abbildung 52 zeigt die Randschichtdicke in % am Ende der Füllzeit, d.h. zu Beginn der Nachdruckphase. Man erkennt, dass es Bereiche gibt, die eine Randschichtdicke unter 100 % aufweisen. Dies bedeutet, dass der Querschnitt noch nicht zur Gänze erstarrt ist und eine Übertragung des Nachdruckes in diesem Bereich noch möglich ist. Ebenso bedeutet es, dass noch ein Massefluss ins Bauteil möglich ist. Es gibt aber bereits Bereiche die nahezu eingefroren sind, d.h. die keiner Schwindungskompression in der Nachdruckphase mehr zugänglich sind.

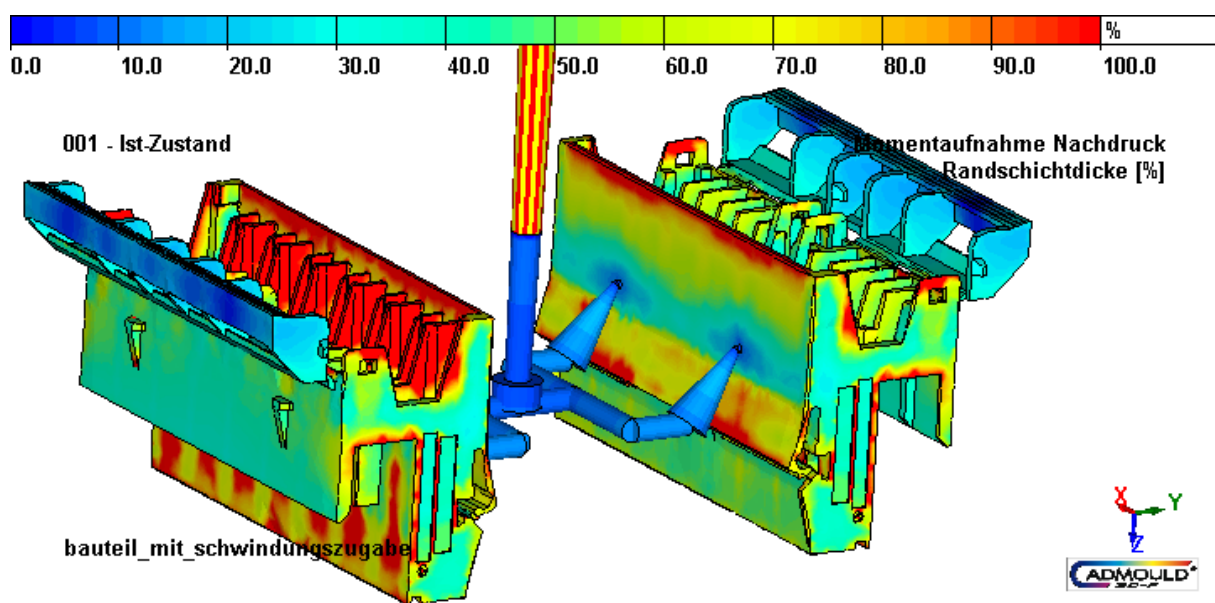


Abbildung 52: Randschichtdicke am Beginn der Nachdruckzeit.

Mit Hilfe des Nachdrucks wird also noch Material ins Bauteil gepresst, um damit die Schwindung zu reduzieren. Jedoch sind einige Bereiche bereits fast eingefroren, hier wird der Nachdruck also nicht mehr lange wirken können.

Betrachtet man die Randschichtdicke nach 3,8 s, also am Ende der Nachdruckphase, so sieht man, dass nur noch wenige kleine Bereiche noch nicht zur Gänze eingefroren sind. Kleine angussnahe Bereiche sowie Eckbereiche im Inneren des Bauteils sind nach 3,8 s noch nicht zu 100 % eingefroren, wie Abbildung 53 zeigt.

4. Simulationsergebnisse Ist-Zustand

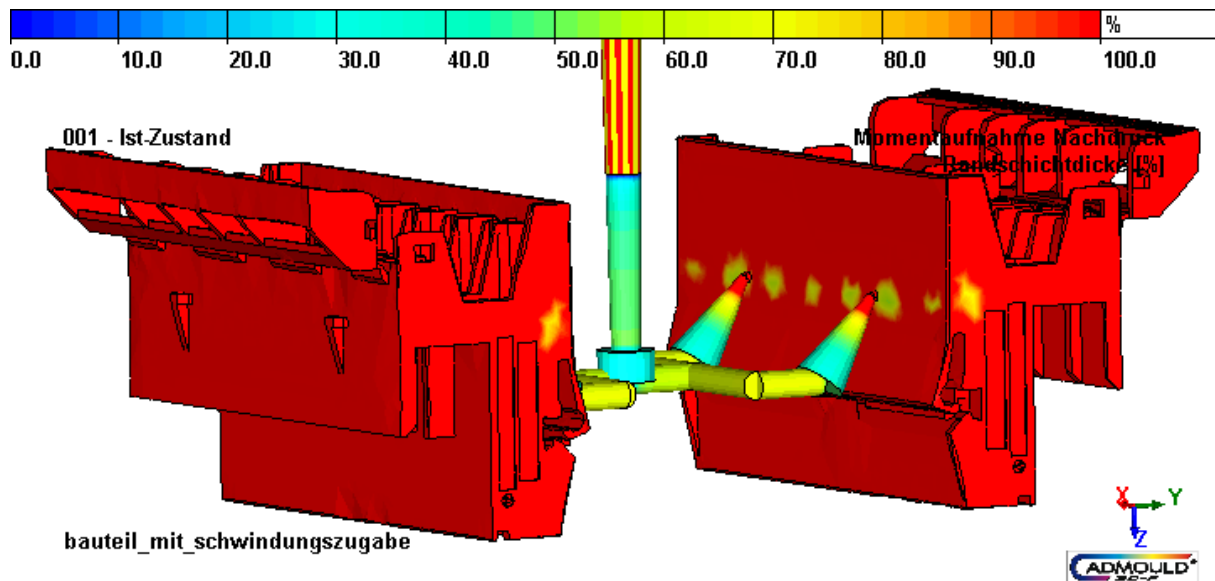


Abbildung 53: Dicke der eingefrorenen Randschicht nach 3,8 s.

Ist im gesamten Bauteil eine Randschichtdicke von 100 % erreicht, in unserem Fall nach ca. 6 s (Abbildung 54), ist das gesamte Material im Bauteil erstarrt und es kann im gesamten Bauteil kein Nachdruck mehr wirken.

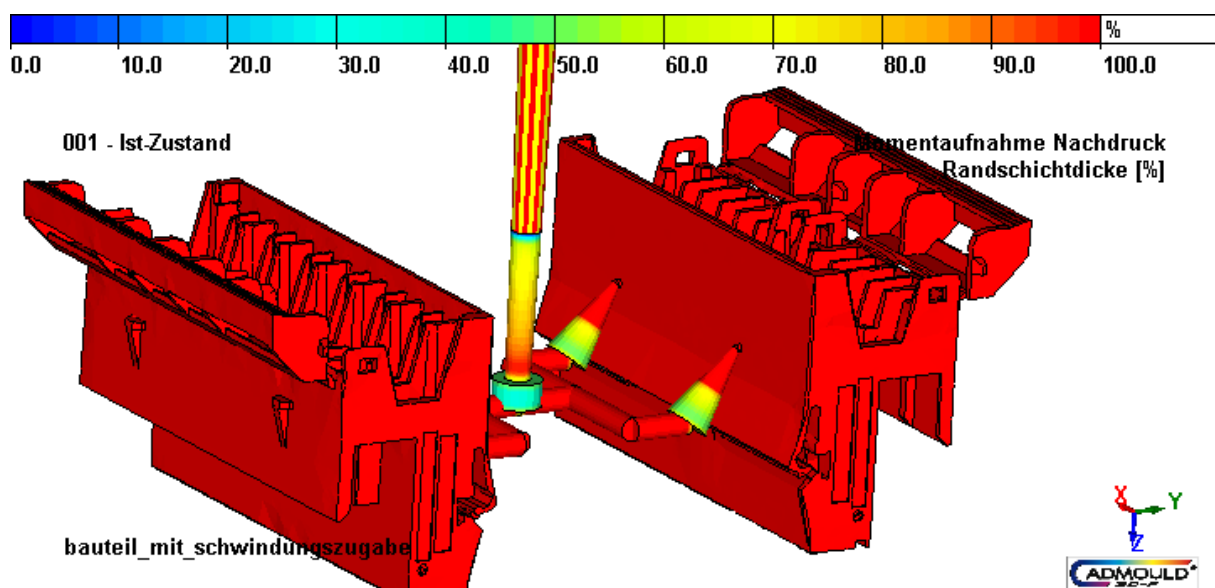


Abbildung 54: Dicke der eingefrorenen Randschicht nach 6 s.

Der Nachdruck ist einer der Haupteinflussfaktoren für die Bauteilqualität. Um also eine möglichst gute Bauteilqualität gewährleisten zu können, sollten Nachdruckhöhe und Nachdruckzeit entsprechend angepasst werden.

4.8 Schwindung und Verzug

Cadmould bietet die Möglichkeit, virtuelle Messinstrumente am Bauteil zu platzieren, um Schwindung und Verzug exakt darstellen zu können. In dieser Masterarbeit sind die beiden Optionen „projizierter Abstand“ und „Koordinate“ zum Einsatz gekommen. Dabei wird jeweils ein unabhängiges Koordinatensystem direkt auf der Bauteiloberfläche erstellt. Ausgehend von diesem Koordinatensystem werden zwei Messpunkte auf der Bauteiloberfläche, z.B. rechts und links am Bauteil um die Bauteilbreite zu bestimmen, definiert. Der projizierte Abstand dieser beiden Messpunkte wird nach der Simulation und Berechnung der Schwindung ausgewertet und als Qualitätsmerkmal herangezogen. Die folgenden Abbildungen zeigen, wie die Qualitätsmerkmale definiert werden. Die rot dargestellten Linien kennzeichnen die Position der Messung. Die Messung und Auswertung erfolgt in Millimeter.

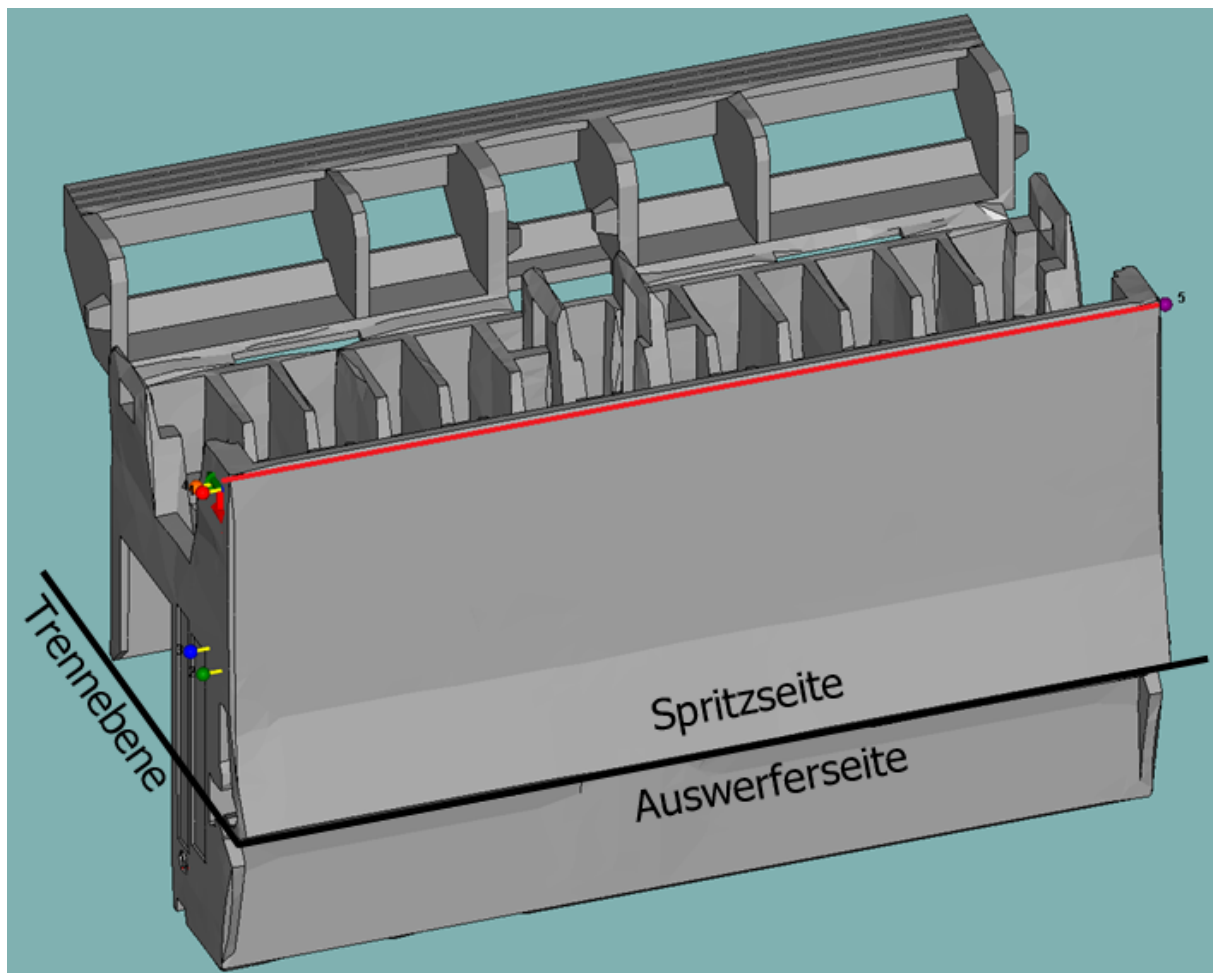


Abbildung 55: Definition des Qualitätsmerkmals Bauteilbreite.

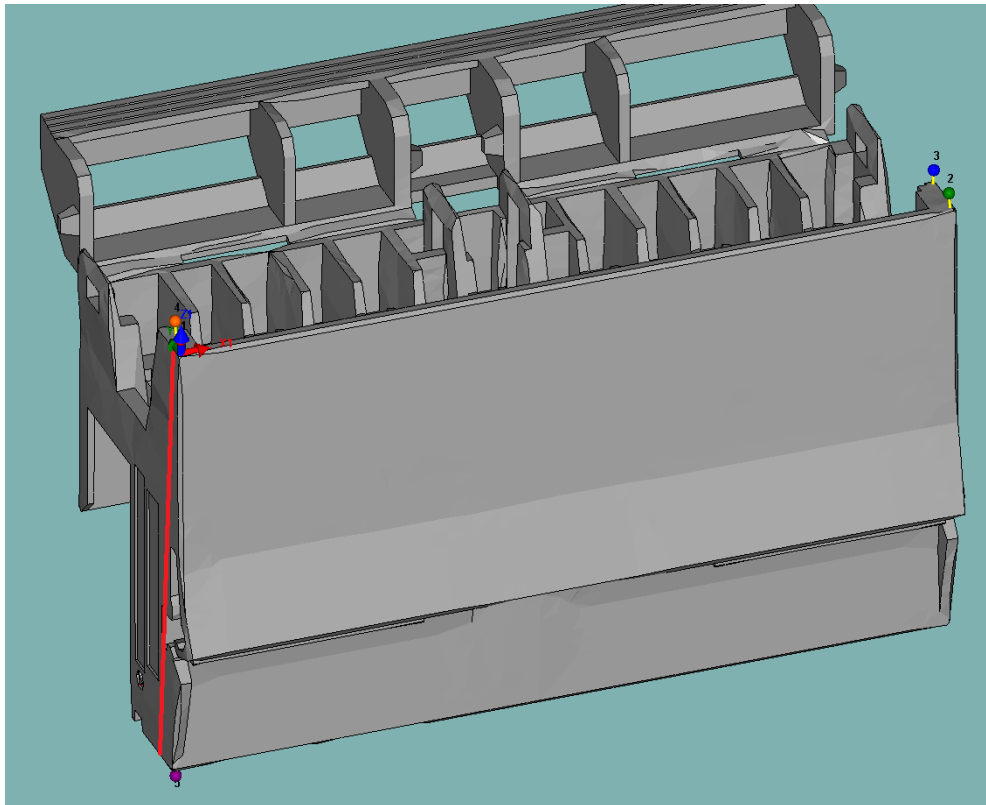


Abbildung 56: Definition des Qualitätsmerkmals Bauteilhöhe.

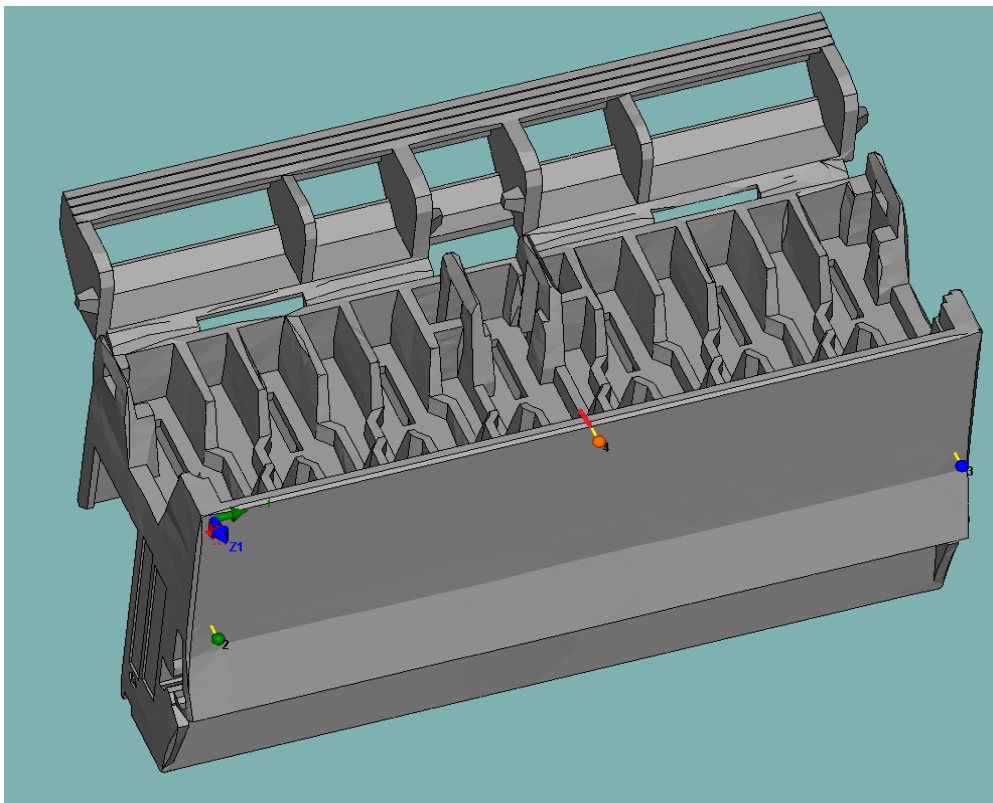


Abbildung 57: Definition des Qualitätsmerkmals (Abweichung von der ebenen Sollgeometrie)
Bauteilverzug.

4. Simulationsergebnisse Ist-Zustand

Die Abmaße der Bauteile inklusive Toleranzen wurden von DPA zu Verfügung gestellt. Die geforderten Spezifikationen sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Bauteil Spezifikationen.

Qualitätsmerkmal	Einheit	Sollmaß	Toleranz
Bauteilbreite	mm	62,80	-0,20
Bauteilhöhe	mm	37,10	±0,20
Verzug	mm	0	0,30

Die Simulation wird mit PA 66 durchgeführt und die Messinstrumente wie oben beschrieben platziert. Cadmould berechnet mittels pvT-Daten Schwindung und Verzug. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse dazu aufgelistet.

Tabelle 3: Simulierte Werte für Schwindung und Verzug, Ist-Zustand.

Qualitätsmerkmal	Einheit	Sollmaß	Istmaß
Bauteilbreite	mm	62,60 – 62,80	62,15
Bauteilhöhe	mm	36,90 – 37,30	36,56
Verzug	mm	0 – 0,30	0,23

Die Ergebnisse der Simulation liegen teilweise unter den Vorgaben. Cadmould rechnet Schwindung und Verzug nur auf Basis der pvT-Daten für das jeweilige Material. Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnt, ist die Feuchteaufnahme bei PA 66 zu beachten. Das fertige Formteil nimmt nach dem Entformen und Abkühlen auf Raumtemperatur Feuchte auf und ändert dadurch seine Abmaße. Nach [10], nimmt bei Normklima (23 °C und 50 % rel. Feuchte) PA 66 ca. drei Gewichtsprozent an Feuchte auf, was eine Vergrößerung der Abmessungen zufolge hat. Die Feuchteaufnahme ist auch von der Bauteilgeometrie abhängig. Die mittlere Längenzunahme der Bauteilbreite liegt bei 0,3 % (0,18 mm) je 1 % Wasseraufnahme. Bei der Bauteilhöhe ist die Längenzunahme etwas höher und liegt ca. bei 0,33 % (0,12 mm) [10]. Somit ergeben sich folgende Abmessungen (Tabelle 4) des Ist-Zustandes unter Berücksichtigung späterer Feuchteaufnahme.

Tabelle 4: Simulierte Werte der Abmaße mit Berücksichtigung der Feuchteaufnahme.

Qualitätsmerkmal	Einheit	Altes Sollmaß	Feuchteaufnahme	Neues Sollmaß
Bauteilbreite	mm	62,60 – 62,80	0,55	62,05 – 62,25
Bauteilhöhe	mm	36,90 – 37,30	0,36	36,54 – 37,04

Durch die neu angenommenen Spezifikationen sind die Ergebnisse der Simulation innerhalb der Toleranzen. In weiterer Folge (virtuelle Bauteil- und Prozessoptimierung) werden die neuen Spezifikationen unter Berücksichtigung der Feuchteaufnahme verwendet.

Diese angenommenen Werte wurden auch praktisch anhand von Vermessungen am gefertigten Bauteil vorgenommen. Die Prozesseinstellungen sind jedoch geringfügig anders als bei der Simulation des Ist-Zustandes. Es zeigte sich jedoch, dass die gemessenen Werte jenen der angenommenen ähneln. Abschließend sind in Tabelle 5 die Ergebnisse mit den neuen Spezifikationen nochmals angeführt.

Tabelle 5: Ergebnisse Schwindung und Verzug mit neuen Spezifikationen unter Berücksichtigung der Feuchteaufnahme von PA 66

Qualitätsmerkmal	Einheit	Neues Sollmaß	Istmaß
Bauteilbreite	mm	62,05 – 62,25	62,15
Bauteilhöhe	mm	36,54 – 37,04	36,56
Verzug	mm	0 – 0,3	0,23

5 Virtuelle Bauteil- und Prozessoptimierung PA 66

Mit Hilfe von VARIMOS soll ein virtuelles Prozessfenster erstellt werden, welches zur Findung eines Optimums dient. Dieses Prozessfenster wird über die Variation mehrerer Prozesseinstellungen erstellt. Wie in Kapitel 2.6.3 beschrieben, wird mit den variierten Einstellungen ein Versuchsplan von CQC erstellt und die Versuche in Cadmould simuliert. Die Ergebnisse werden ins CQC exportiert und anhand von mathematischen Modellen ausgewertet und beurteilt. Es ergeben sich somit drei verschiedene Einstellungsstufen pro Parameter, welche sich aus Ausgangswert (0), Ausgangswert plus Variationswert (+) und Ausgangswert minus Variationswert (-) darstellen lassen.

5.1 Versuchsplanung

Im ersten Schritt werden ausgehend vom Ist-Zustand die Prozessparameter laut Tabelle 6 variiert. Dies ist mittels des Buttons „Variieren“ vgl. Abbildung 18 (S. 27) möglich. Die eingegebenen Werte werden ausgehend vom Mittelwert addiert bzw. subtrahiert. So erhält man die Grenzwerte der jeweiligen Einstellung und zugleich die Grenzen des simulierten Prozessfensters.

Tabelle 6: Variationsparameter PA 66.

Parameter	Einheit	Ausgangswert	Variationswert \pm
Füllzeit (t_F)	s	0,8	0,2
Nachdruckzeit (t_N)	s	3	1
Nachdruckprofil (p_N)	bar	350/300	150/150
Kühlzeit (t_K)	s	13	3
Schmelze- Heißkanaltemperatur (T_S/T_{HK})	°C	290/300	10/10
Vorlauftemperatur Spritzseite (T_{VL1})	°C	40	20
Vorlauftemperatur Auswerferseite (T_{VL2})	°C	30	20

Da die unabhängige Variation von Schmelztemperatur und Heißkanaltemperatur nur bedingt sinnvoll wäre, werden diese beiden Parameter parallel auf die jeweilige Plus- bzw. Minusstufe gesetzt. Dies ist derzeit nur durch die manuelle Bearbeitung der Prozesseinstellung in jeder einzelnen von Cadmould erstellten Simulation des Versuchsplanes möglich. Es wird also nur einer der beiden Parameter in Cadmould variiert und der zweite

Parameter manuell angepasst. Gleiches gilt für das Nachdruckprofil. Cadmould erkennt die zwei Stufen als einzelne Parameter an und variiert sie unabhängig voneinander. Auch hier wird nur eine Stufe variiert und die zweite bei jedem einzelnen Versuch manuell angepasst. Somit ergeben sich sieben Parameter (t_F , t_N , p_N , t_K , T_S , T_{VL1} , T_{VL2}) die variiert werden. Die übrigen Einstellungen sind analog zur Simulation des Ist-Zustandes konstant.

Hierfür erstellt CQC einen D-optimalen Versuchsplan für sieben Parameter in 10 Versuchen. Der erste und letzte Versuch entspricht einen Zentralpunkt, d.h. jeweils alle Parameter in der Ausgangsstellung. Da die Simulation das exakt gleiche Ergebnis beim Versuch Nummer 1 und Versuch Nummer 10 ergeben würde, wird die Einstellung mit allen Parametern in der Ausgangsstellung (0) nur einmal als Versuch Nummer 1 durchgeführt. Bei realen Experimenten könnte man durch Wiederholung des Zentralpunktes die Reproduzierbarkeit abschätzen. Der von CQC generierte, D-optimale Versuchsplan ist in Tabelle 7 abgebildet.

Tabelle 7: D-optimaler Versuchsplan für 7 Parameter bei 10 Versuchen.

Versuch Nummer	t_F	T_S/T_{HK}	t_N	t_K	p_N	T_{VL1}	T_{VL2}
1	0	0	0	0	0	0	0
2	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	+	+	+	+
4	-	+	+	+	+	-	-
5	-	+	+	-	-	+	+
6	+	+	-	-	+	+	-
7	+	+	-	+	-	-	+
8	+	-	+	+	-	+	-
9	+	-	+	-	+	-	+

Die neun einzelnen Versuchseinstellungen werden mit Cadmould simuliert und die Ergebnisse nach CQC exportiert. Die Simulationsdaten werden mit Hilfe von mathematischen Regressionen ausgewertet und beschrieben. Die Ergebnisse der Auswertung werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

5.2 Haupteinflussgrößen

Die mathematischen Berechnungsmodelle in CQC ermöglichen eine Aussage über die Einflussgröße und Einflussrichtung der variierten Parameter auf die definierten Qualitätsmerkmale. In dieser Masterarbeit werden die Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Merkmale mittels linearer Regressionen berechnet. Es können nur jene Parameter und deren Einflussgröße bzw. Einflussrichtung bewertet werden, welche vorher im Versuchsplan variiert wurden. Eine Aussage über die restlichen Parameter und deren Auswirkungen kann nicht getroffen werden.

Da sich die Einflussgrößen und Einflussrichtungen für die einzelnen Bauteile kaum unterscheiden, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse von nur einem Bauteil präsentiert. Die sieben variierten Parameter werden nach ihrer relativen Einflusstärke auf die Bauteilbreite in Abbildung 58 färbig dargestellt. Es zeigt sich, dass die Vorlaufzeit der Spritzseite mit ca. 41,6 % den größten Einfluss auf die Bauteilbreite hat. Die Kühlzeit (19,7 %), die Vorlaufzeit der Auswerferseite (18 %) und die Nachdruckhöhe (12,5 %) haben ebenfalls noch maßgeblichen Einfluss auf die Bauteilbreite. Die Temperaturen der Schmelze bzw. des Heißkanals (3,9 %), sowie die Nachdruckzeit (2,4 %) und die Füllzeit (1,8 %) haben kaum Einfluss auf die Bauteilbreite.

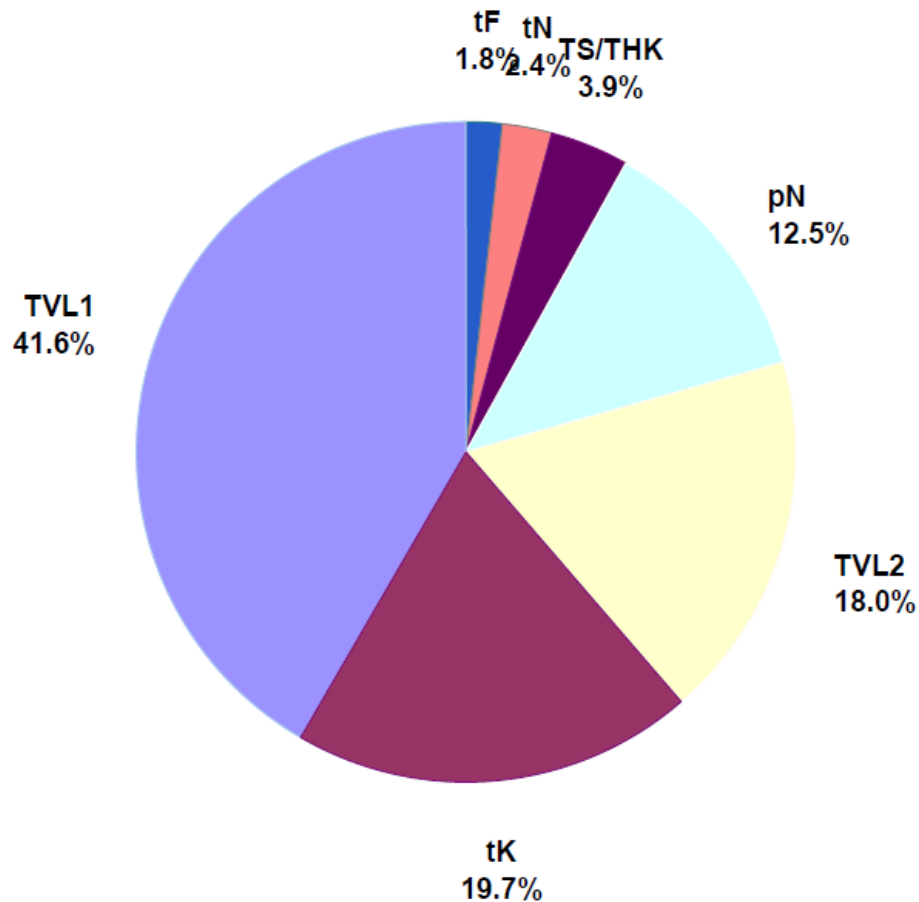


Abbildung 58: relative Einflussstärke auf die Bauteilbreite in Prozent.

Wie vorher erwähnt, bietet CQC die Möglichkeit, die Einflussrichtung des jeweiligen Parameters auf das Qualitätsmerkmal vorherzusagen. In der Abbildung 59 sind die Einflussrichtungen sowohl relativ als auch absolut dargestellt. Links in der Abbildung sind die einzelnen Parameter mit deren Kürzel angeführt. Die obere der horizontalen Achsen gibt den relativen Wert in Prozent an, die untere den absoluten Wert in Millimeter. Die Einflussrichtung bezieht sich jeweils auf die positive Veränderung des Parameters. Ist ein Wert positiv, so wird das Qualitätsmerkmal bei der Erhöhung des Parameters positiv beeinflusst. Ist der Wert negativ, so wird das Qualitätsmerkmal bei Erhöhung des Parameters negativ beeinflusst.

Betrachtet man nun unser konkretes Beispiel, so wird die Bauteilbreite bei einer Erhöhung der Vorlauftemperaturen geringer, da sowohl die Effekte von T_{VL1} als auch von T_{VL2} negative Werte aufweisen. Dies ist erklärbar, da bei höheren Temperaturen das Bauteil weniger rasch abkühlt und dadurch der Kunststoff eher sein natürliches Schwindungspotenzial erreicht. Konkret hieße das, dass bei einer Erhöhung der Vorlauftemperatur T_{VL1} von 20 °C auf 60 °C das Bauteil theoretisch um etwa 0,11 mm kleiner wird.

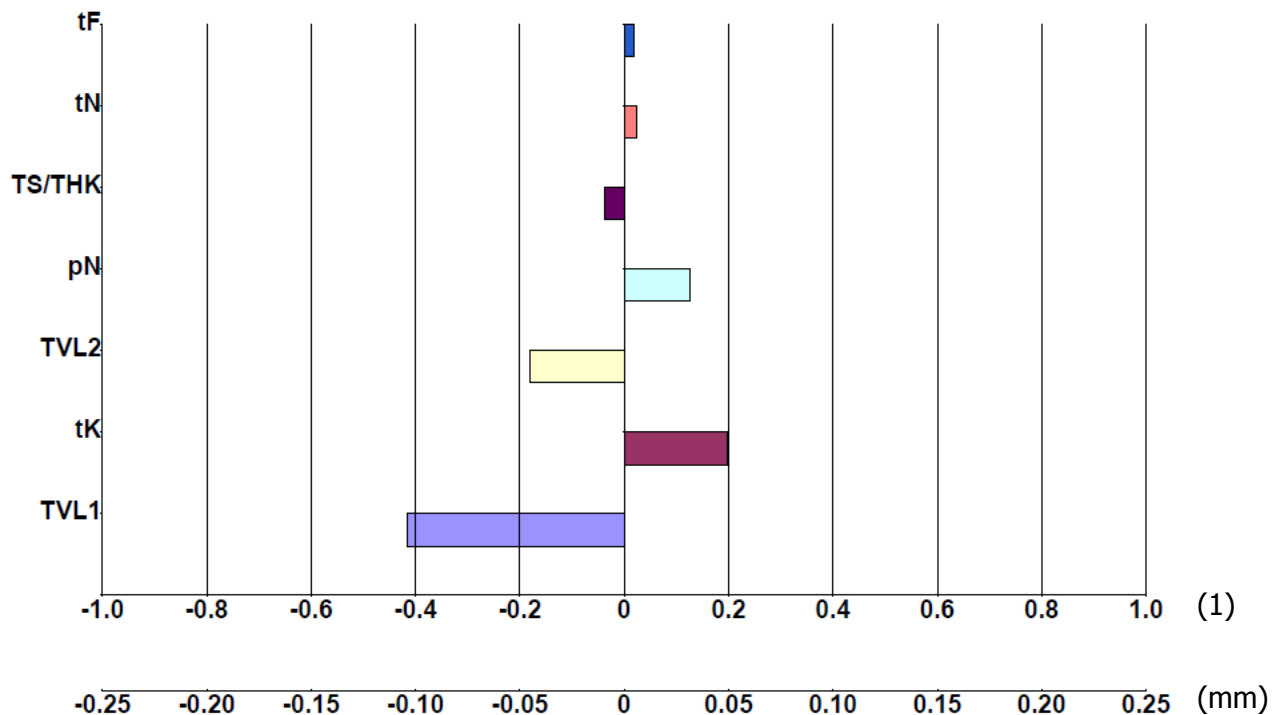


Abbildung 59: Relative und absolute Einflussrichtung der einzelnen Parameter auf die Bauteilbreite.

Die Einflussgrößen und Einflussrichtungen auf die Bauteilhöhe und den Bauteilverzug wurden analog zur Bauteilbreite ermittelt.

Bei der Bauteilhöhe weichen die Gewichtungen der einzelnen Einflussparameter von denen der Bauteilbreite ab, wie aus Abbildung 60 und Abbildung 61 hervorgeht. Den größten Einfluss auf die Bauteilhöhe hat laut CQC die Vorlaufzeit der Auswerferseite (27 %), gefolgt von der Kühlzeit (23,5 %), der Nachdruckhöhe (15,1 %), der Vorlaufzeit der Spritzseite (14,7 %) und der Nachdruckzeit (11,1 %). Anders als bei der Bauteilbreite, welche in einem Bauteilbereich gemessen wird, der primär von der Düsenseite (Spritzseite) gekühlt wird, wird der Bereich der Bauteilhöhe zum größeren Teil von der Auswerferseite gekühlt. Die Temperaturen der Schmelze bzw. des Heißkanals sowie die Füllzeit haben auch auf die Bauteilhöhe nur einen sehr geringen Einfluss.

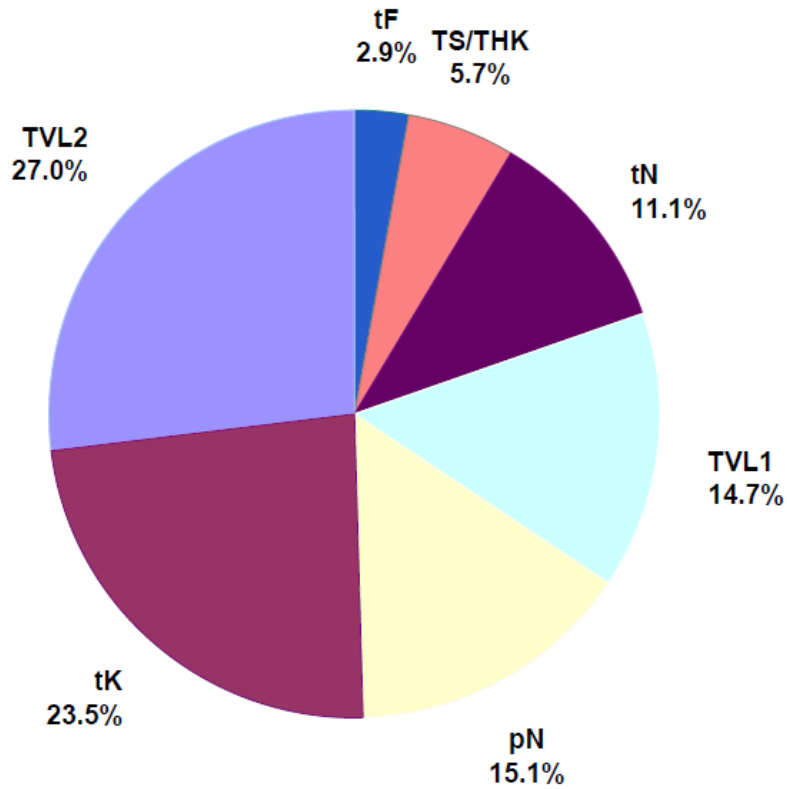


Abbildung 60: Relative Einflussstärke in Prozent auf die Bauteilhöhe.

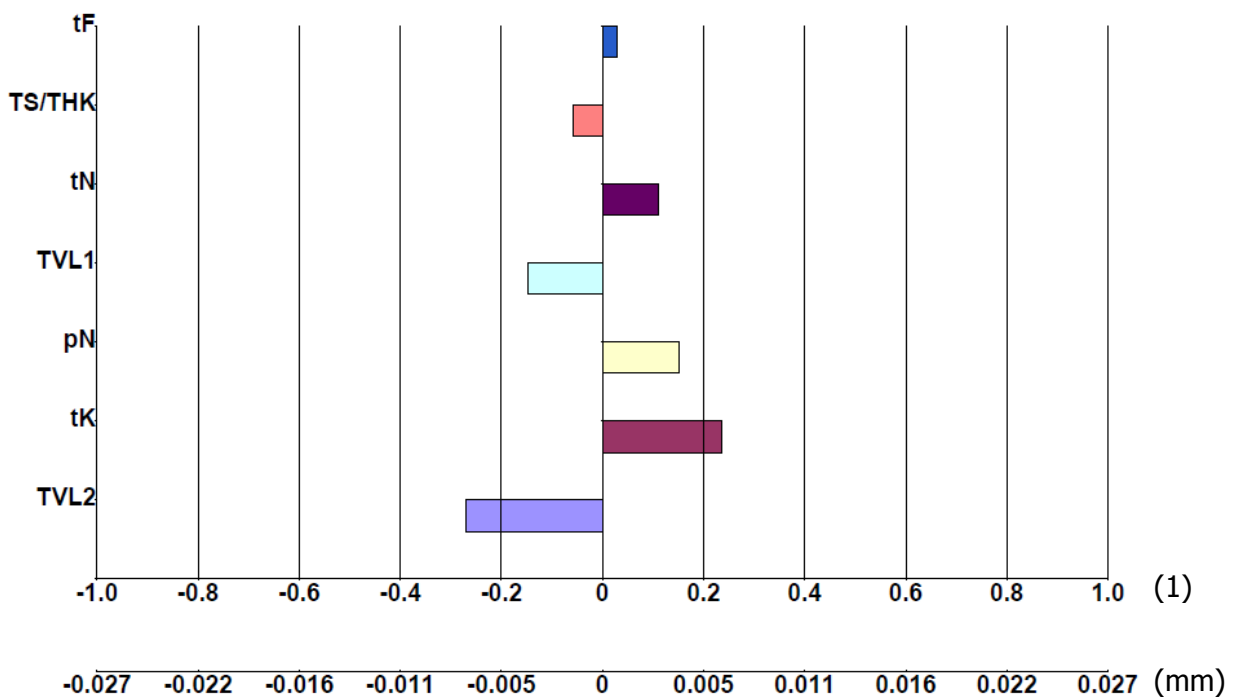


Abbildung 61: Relative und absolute Einflussrichtung der einzelnen Parameter auf die Bauteilhöhe.

Die Ergebnisse für den Bauteilverzug zeigen, dass hier ebenfalls die Vorlauftemperatur der Auswerferseite den größten Einfluss mit 48,4 % hat. Die Vorlauftemperatur der Spritzseite (13,8 %) sowie die Kühlzeit (13,5 %) haben nahezu gleich viel Einfluss. Die restlichen Parameter haben nur geringen Einfluss auf den Bauteilverzug, wie in Abbildung 62 und Abbildung 63 ersichtlich ist.

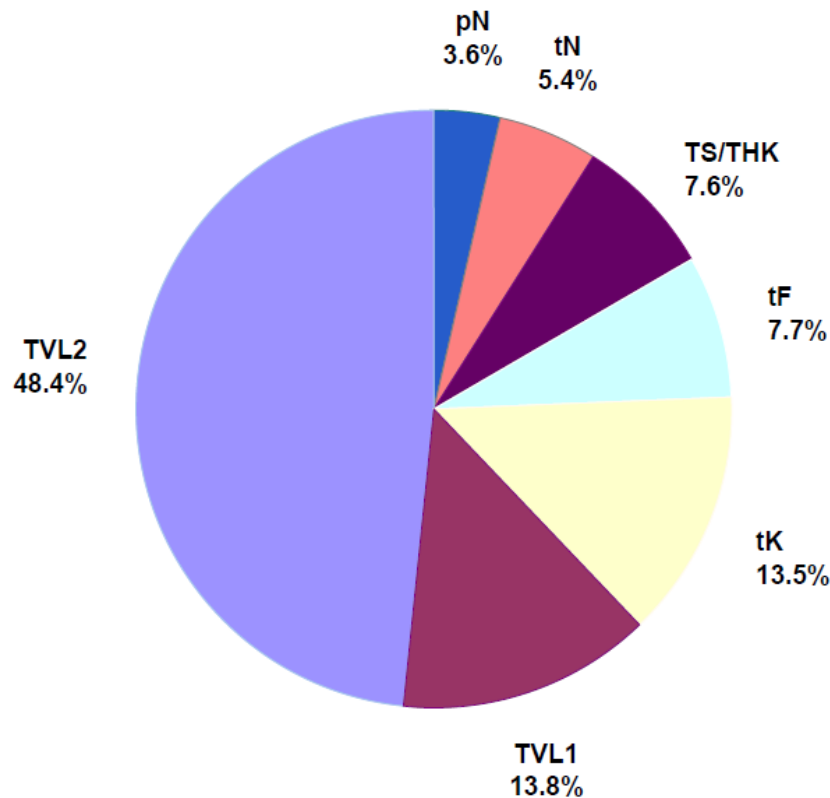


Abbildung 62: Relative Einflussstärke in Prozent auf den Bauteilverzug.

Durch die Definition des Verzugs als Abweichung der Sollgeometrie am Punkt 4 (vgl. Abbildung 57, S. 59) von einer Ebene, aufgespannt durch Punkte 1 bis 3, erklärt sich der größere Einfluss der T_{VL2} auf den Verzug.

Würde man lediglich die Abweichung der Kante (P1 bis P4 und darüber hinaus) betrachten, wären die Prozessabhängigkeiten vermutlich anders. Diese Analyse ist jedoch mit der verwendeten Version von Cadmould nicht möglich.

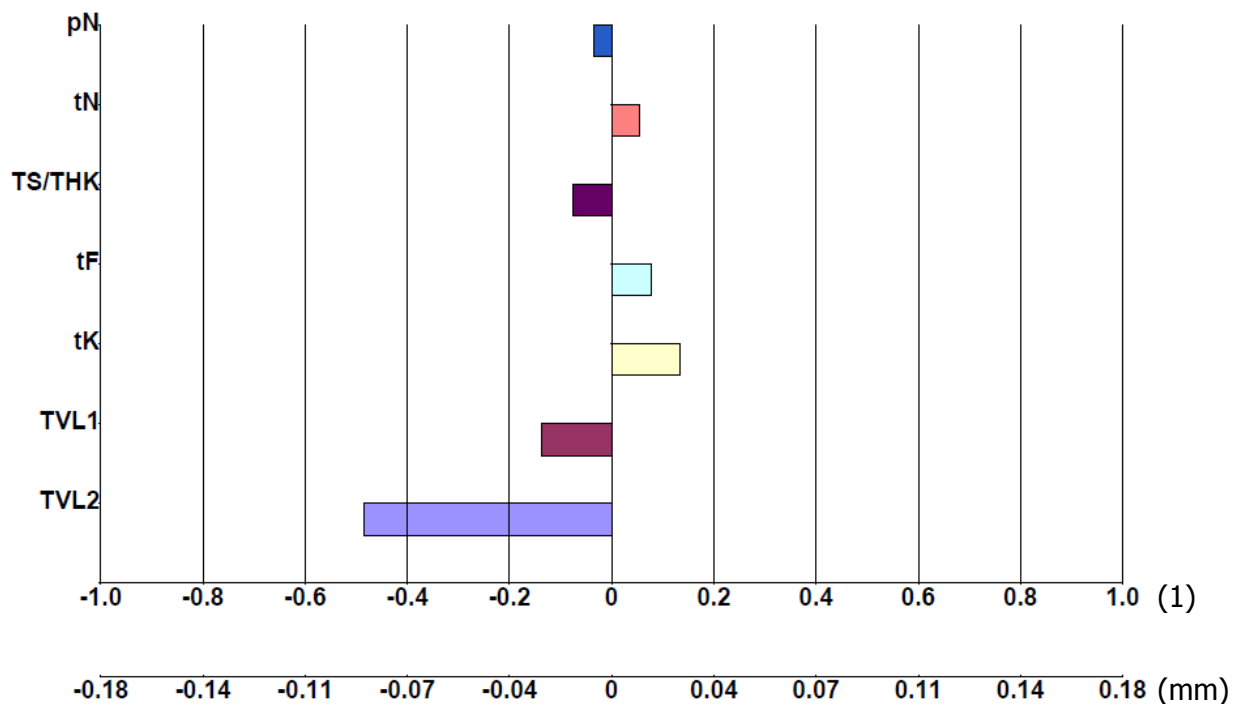


Abbildung 63: Relative und absolute Einflussrichtung der einzelnen Parameter auf den Bauteilverzug.

Betrachtet man alle drei Bauteilmerkmale, so ist zu erkennen, dass die Vorlauftemperaturen und die Kühlzeit mit Abstand den größten Einfluss auf die Qualitätsmerkmale haben (Haupteinflussgrößen). Es ist darauf zu achten, dass diese Prozessparameter maßgeblich die Bauteilqualität beeinflussen und daher an die jeweiligen Vorgaben angepasst werden müssen. Wichtig ist zu bemerken, dass diese Prozesseinstellungen sich unterschiedlich auf die Qualitätsmerkmale auswirken.

5.3 Virtuelles Optimum PA 66

Ausgehend von den vorher definierten Qualitätsmerkmalen und den Ergebnissen der Simulationen des Versuchsplanes ermöglicht CQC die Berechnung eines Optimums innerhalb des mit der Variation gewählten Prozessfensters. Durch das erworbene Wissen um die Haupteinflussgrößen und das Festlegen von Prioritäten, welche an die einzelnen Qualitätsmerkmale vergeben werden können, kann auf bestimmte, eventuell wichtigere, Merkmale hin optimiert werden.

Es werden bei unseren Einstellungen alle Qualitätsmerkmale mit einem Punkt versehen, d.h. sie besitzen alle dieselbe Priorität. Das Optimierungsfenster in CQC ist in Abbildung 64 dargestellt. Die Erklärung zu diesem Optimierungsfenster ist im Anhang unter Kapitel 9.6 zu

finden. CQC optimiert die einzelnen Parameter so, dass alle Qualitätsmerkmale möglichst nahe an deren Zielwert herangeführt werden, um so den Prozess so stabil als möglich zu gestalten. Es befinden sich alle Werte innerhalb der Toleranzen. Da bei der Simulation keine Streuung bei der Berechnung entsteht, sind in Abbildung 64 neben den grünen Punkten keine grünen Balken zu finden. Die Streuungsbalken resultierten aus den unterschiedlichen Messergebnissen bei einer Einstellung aus den praktischen Versuchen. Daraus ergibt sich eine optimale Einstellung für die variierten Parameter, welche in Tabelle 8 abgebildet ist.

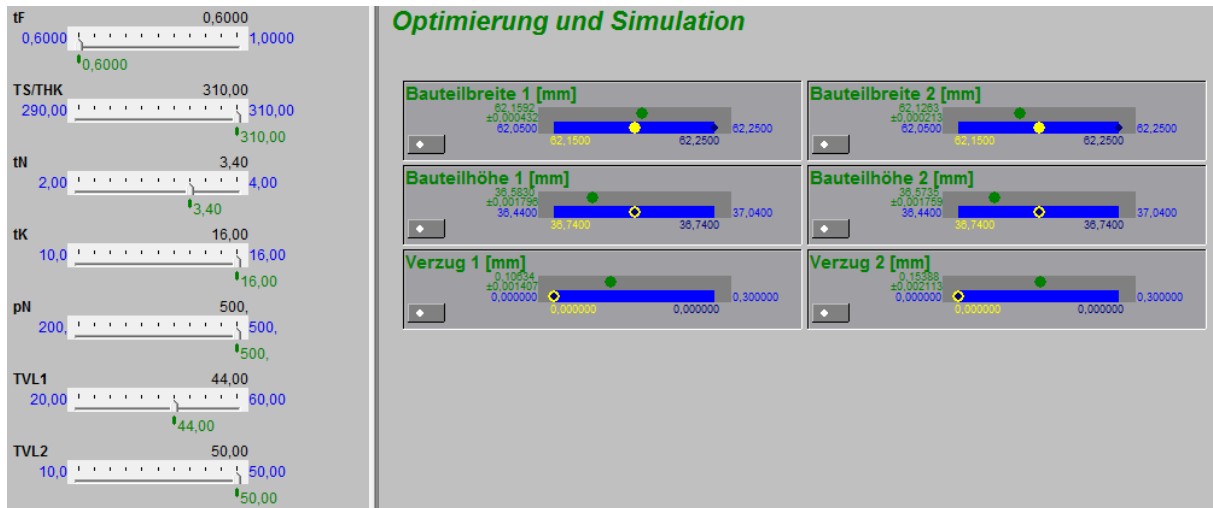


Abbildung 64: Optimierung in CQC.

Tabelle 8: Optimierte Parameterwerte PA 66.

Parameter	Abkürzung	Einheit	Wert
Füllzeit	t_F	s	0,6
Nachdruckzeit	t_N	s	3,4
Nachdruckprofil	p_N	bar	500/450
Kühlzeit	t_K	s	16
Schmelze- Heißkanaltemperatur	T_S/T_{HK}	°C	300/310
Vorlauftemperatur Spritzseite	T_{VL1}	°C	44
Vorlauftemperatur Auswerferseite	T_{VL2}	°C	50

Bei den aus Tabelle 8 eingestellten Parametern ergibt sich eine Zykluszeit von 24,6 s. Da eine möglichst kurze Zykluszeit erwünscht ist, wird eine weitere Optimierung mit minimaler Zykluszeit durchgeführt. Die im Prozessfenster minimalste Zykluszeit beträgt 18,6 s, bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 0,6 s und einer Kühlzeit von 10 s. Da bei der Optimierung der Zykluszeit in CQC Probleme auftraten, wird die Optimierung der Zykluszeit manuell

durchgeführt. Es werden diese beiden Parameter auf die minimalste Stufe gesetzt und manuell eine Einstellung gesucht, wo alle Qualitätsmerkmale innerhalb der Toleranzen und möglichst nahe am Zielwert des jeweiligen Qualitätsmerkmals sind. Das Ergebnis der manuellen Optimierung der Zykluszeit ist in Abbildung 65 dargestellt.

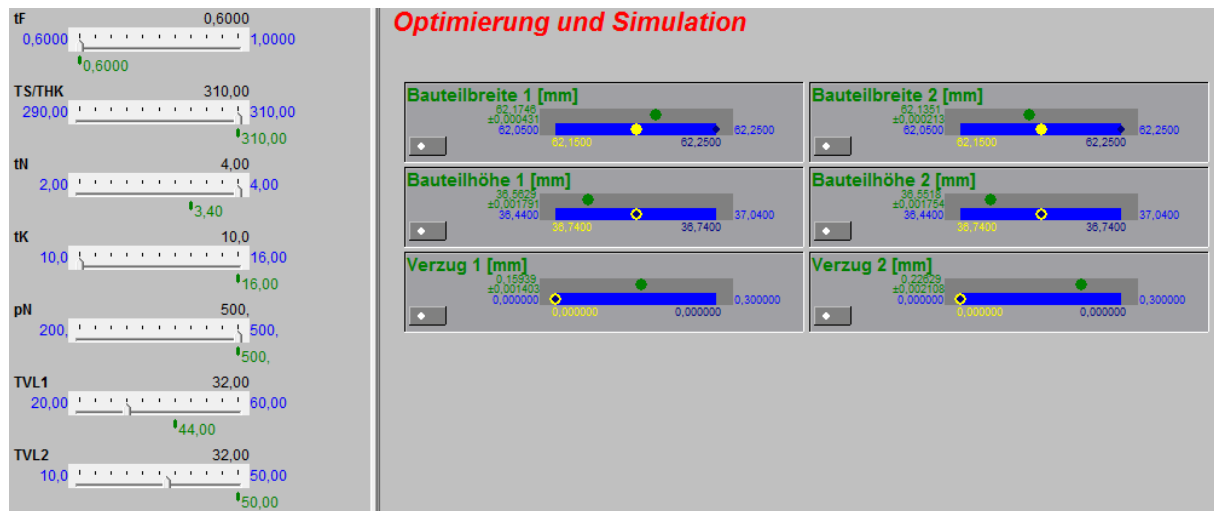


Abbildung 65: Manuelle Optimierung der Zykluszeit.

Für die minimale Zykluszeit von 18,6 s wurde eine Einstellung innerhalb der Toleranzvorgabe gefunden. Die Parameterwerte dieser Einstellung sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Parameterwerte der manuellen Optimierung der Zykluszeit.

Parameter	Abkürzung	Einheit	Wert
Füllzeit	t_F	s	0,6
Nachdruckzeit	t_N	s	4
Nachdruckprofil	p_N	bar	500/450
Kühlzeit	t_K	s	10
Schmelze- Heißkanaltemperatur	T_S/T_{HK}	°C	300/310
Vorlauftemperatur Spritzseite	T_{VL1}	°C	32
Vorlauftemperatur Auswerferseite	T_{VL2}	°C	32

Obwohl hier ein optimaler Arbeitspunkt vorhergesagt wird, kann nicht mit Garantie behauptet werden, dass dieser tatsächlich dauerhaft im realen Versuch funktionieren würde. Insbesondere auch bedingt durch die schlechtere Kernkühlung und die dadurch bedingte „asymmetrische“ Kühlung. In der Simulation können Störgrößen, wie z.B. Materialchargenschwankungen, oder Entformungsdeformationen bzw. Entformungskräfte

oder Verschleiß derzeit nicht vorhergesagt werden. Es bleibt also ein gewisses Restrisiko. Dennoch sollte bei der Methode der virtuellen Prozessoptimierung bei Neuentwicklungen zumindest einen guten Ausgangspunkt für die reale Prozessoptimierung liefern.

5.4 Weitere Optimierungsansätze

In den vorigen Kapiteln wurde der Prozess mittels Variation der Prozessparameter optimiert. Dieses Kapitel zeigt weitere Möglichkeiten auf, um die Fertigung des Formteiles zu optimieren. Ausgehend von verschiedenen Optimierungsansätzen werden mit Hilfe von Simulationen die einzelnen Ansätze ausgewertet und diskutiert. Die Prozessparameter sind analog zum Ist-Zustand (vgl. Kap. 3.4).

5.4.1 Formeinsätze aus einem Material mit höherer Wärmeleitfähigkeit

Ein Optimierungsansatz ist die Verwendung von Formeinsätzen mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit (λ) im Werkzeug. Die Einbringung dieser Einsätze soll die Wärme aus dem Inneren des Bauteiles schneller abtransportieren (Reduktion der Hot Spots, vgl. Kap. 4.2) und somit Bauteilverzug und Zykluszeit reduzieren. Zu diesem Zwecke werden in Cadmould Einsätze definiert, welchen eine höhere Wärmeleitfähigkeit zugewiesen wird. Aus diesem Grund wird in Cadmould ein neues Werkzeugmaterial mit den entsprechenden Materialparametern angelegt.

Wie bereits erwähnt, bestehen die Kavitäten des Werkzeuges aus einem Stahl der Firma Böhler, mit der Bezeichnung W400. Dieser Stahl besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von 32,1 W/(m K). Die Einsätze, welche in Cadmould definiert wurden, sind aus einem ähnlichen Stahl der annähernd die gleiche Dichte und die gleiche spezifische Wärmekapazität besitzt, aber eine höhere Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 42$ W/(m K)) aufweist. Die Einsätze sind im Inneren des Bauteiles positioniert und entsprechen den Kernen der einzelnen Kavitäten. In der Abbildung 66 sind jene Bereiche blau dargestellt, die als Einsätze definiert wurden.

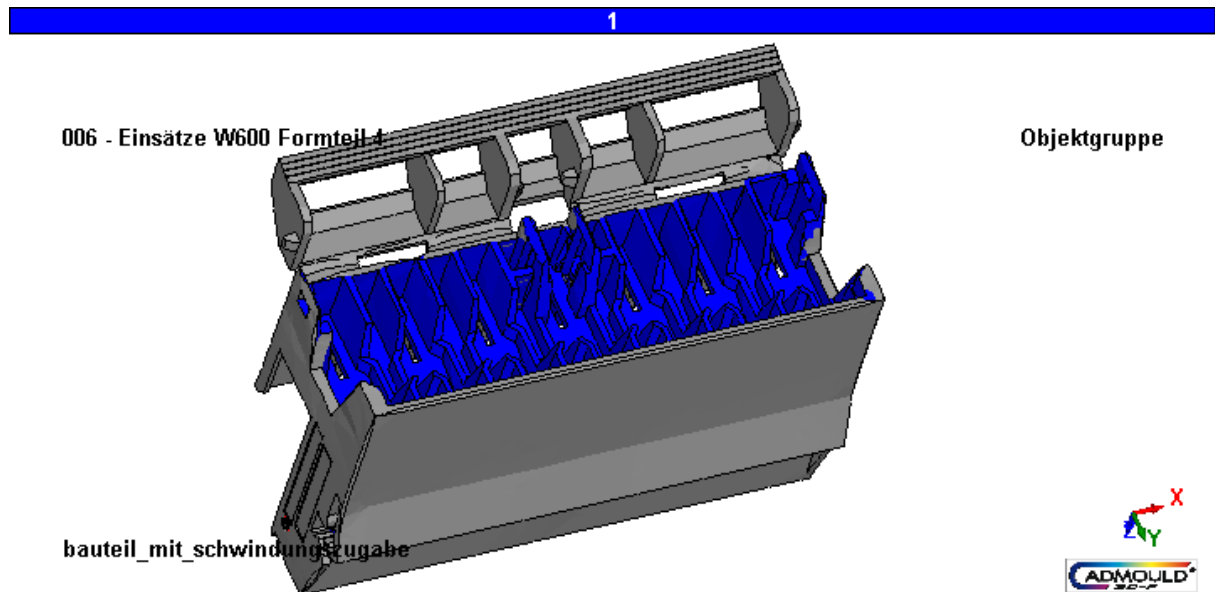


Abbildung 66: Definition der Einsätze.

Cadmould stellte keine weiteren Füllprobleme mit den Einsätzen fest. Denn auf Grund der geringen Wandstärken hätte die bessere Wärmeleitfähigkeit der Einsätze zu einem frühzeitigeren Erstarren der Schmelzefront führen können und somit wäre die Füllbarkeit nicht gegeben. Die Kernzüge besitzen somit eine höhere Wärmeleitfähigkeit und können dadurch die Wärme schneller nach außen hin abtransportieren, was wiederum zu einer rascheren Auskühlung des Bauteiles führt. Abbildung 67 zeigt die Hot Spots nochmal unter Verwendung der Einsätze.

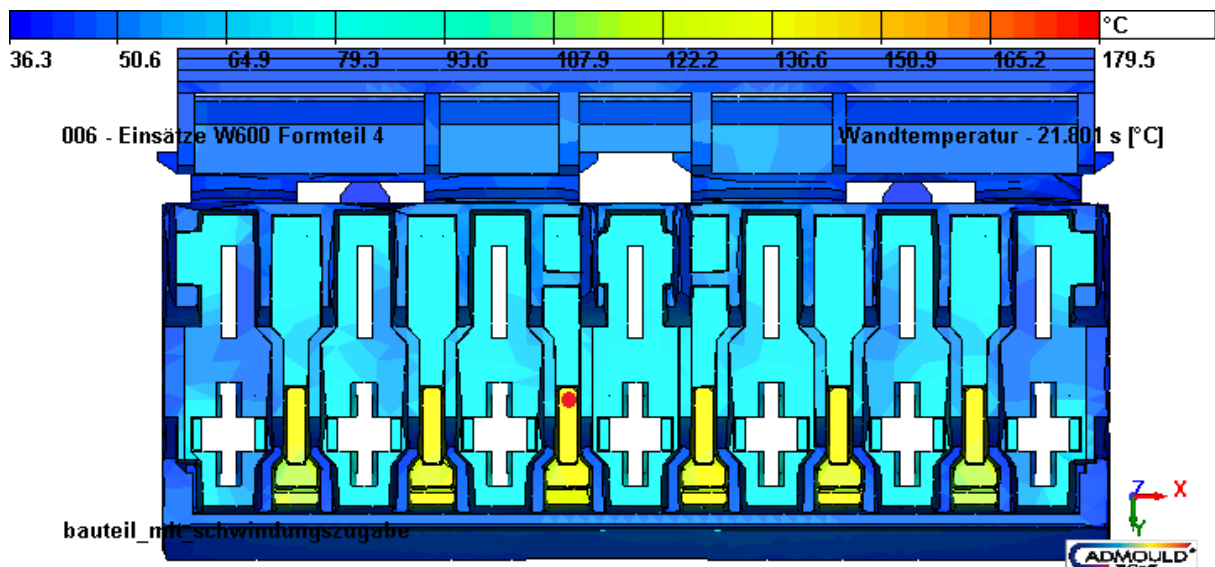


Abbildung 67: Hot Spots in der Kavitätsoberflächentemperatur zu Beginn der Füllung unter Berücksichtigung der Einsätze (projiziert auf die Bauteiloberfläche).

Der rote Punkt in der Abbildung 67 kennzeichnet wieder die ausgewertete Temperaturstelle. Im Vergleich zum Kapitel 4.2 wo eine Hotspottemperatur von 130 °C festgestellt wurde, ist hier die Temperatur im selben Auswertepunkt etwas geringer und liegt bei 123 °C. Die Temperaturen in den Hotspots konnten somit um 7 °C reduziert werden. Das Werkzeug ist hier somit im Vergleich zum Werkzeug mit den W400 Einsätzen um genau diese 7 °C kühler vor dem Beginn der Einspritzphase.

5.4.2 Gesamtes Werkzeug aus wärmeleitfähigerem Stahl

Im Gegensatz zum vorhergehenden Kapitel 5.4.1 wo nur die Formeinsätze aus einem Stahl mit höherer Wärmeleitfähigkeit simuliert sind, wird in diesem Abschnitt das gesamte Werkzeug aus diesem Stahl simuliert. Dadurch soll ein noch höherer Wärmeaustausch ermöglicht werden. In der Simulation wird somit als Werkzeugmaterial aus der Cadmould User Datenbank das vorher für die Einsätze erstellte Material ausgewählt. Es werden erneut die Hot Spot-Temperaturen im Inneren des Bauteiles betrachtet (Abbildung 68).

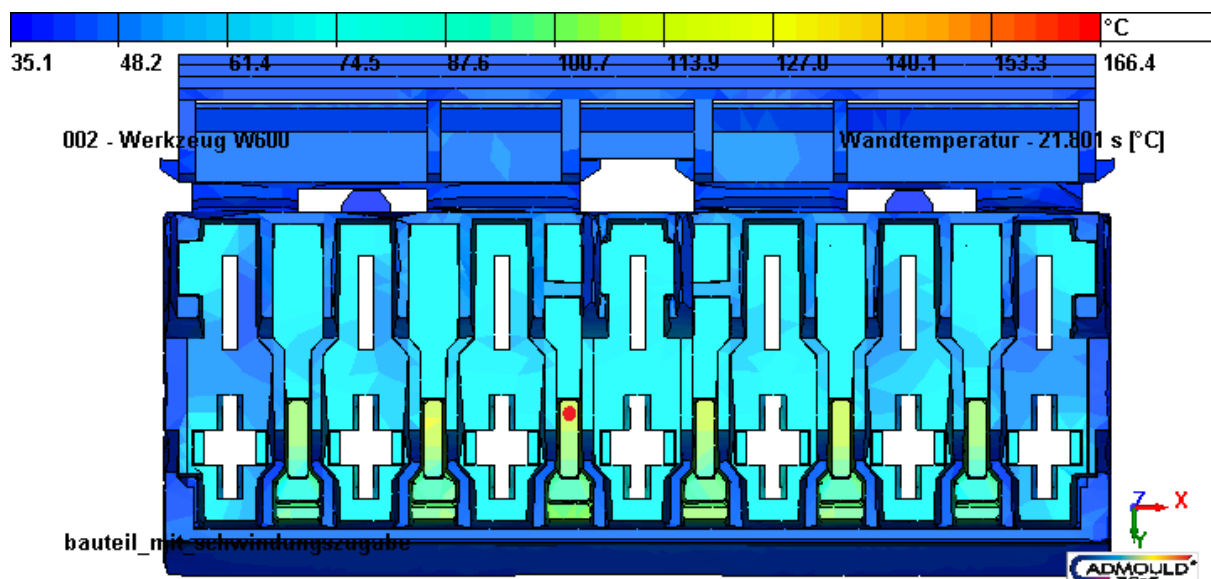


Abbildung 68: Hot Spots in der Kavitätsoberflächentemperatur zu Beginn der Füllung bei gesamtem Werkzeug aus einem Stahl mit höherer Wärmeleitfähigkeit (projiziert auf die Bauteiloberfläche).

Wie aus Abbildung 68 ersichtlich ist, sind die Temperaturen deutlich reduziert und die Füllbarkeit ist weiterhin gegeben. Der Wärmeaustausch zwischen Bauteil und Kühlmedium ist nun deutlich besser und die Wärme kann leichter aus dem Bauteil entweichen. Der Wert des rot markierten Punktes hat nunmehr eine Temperatur von 104 °C. Auch die umliegenden Bereiche haben eine deutlich geringere Temperatur im Vergleich zu Kapitel 4.3 und 5.4.2.

Betrachtet man die Qualitätsmerkmale der Bauteile, so sind hier ebenfalls geringe Verbesserungen in Richtung Sollmaß zu erkennen, wie aus Tabelle 10 hervorgeht. Durch die schnellere Abkühlung durch die geringeren Werkzeugtemperaturen hat das Material weniger Zeit für die Kristallisation, was zu einer geringeren Verarbeitungsschwindung führt.

Tabelle 10: Bauteilmaße mit Werkzeug aus dem neu definierten Werkzeugstahl.

Qualitätsmerkmal	Einheit	Neues Sollmaß	Sim. Istmaß NEU
Bauteilbreite	mm	62,05 – 62,25	62,2
Bauteilhöhe	mm	36,54 – 37,04	36,6
Verzug	mm	0 – 0,3	0,18

Die Fertigung eines Werkzeuges aus einem Material mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit hat somit mehrere Vorteile. Es ist jedoch zu beachten, dass eventuell durch die geringeren Werkzeugwandtemperaturen das Aufschrumpfen der Formteile auf die Kernzüge gefördert wird und somit die Entformungskräfte steigen. Es ist nicht möglich, die Entformungskräfte in Cadmould vorherzusagen, daher kann die Entformbarkeit für den Ansatz mit diesem Werkzeug nicht simulativ festgestellt werden.

5.4.3 Formeinsätze aus Aluminium

In diesem Kapitel werden diesmal Formeinsätze aus Aluminium simuliert. Das verwendete Material hat eine Wärmeleitfähigkeit von 150 W/(m K) und kann daher die Wärme noch schneller als die vorangegangenen Einsätze abtransportieren. Der Grund dieser Simulation war die Überlegung der Füllbarkeit, wenn das Material sehr schnell einfriert. Durch den schnellen Abtransport der Wärme aus dem Material könnte die Füllbarkeit nicht mehr gegeben sein.

Laut Simulation werden die Kavitäten mit den Aluminiemeinsätzen vollständig gefüllt. Wie aus Abbildung 69 hervorgeht, ist die Oberflächentemperatur im Auswertepunkt ca. 100 °C. Sie ist also im Bereich jener Temperatur wo das gesamte Werkzeug aus wärmeleitfähigerem Stahl simuliert wurde (vgl. Kapitel 5.4.2).

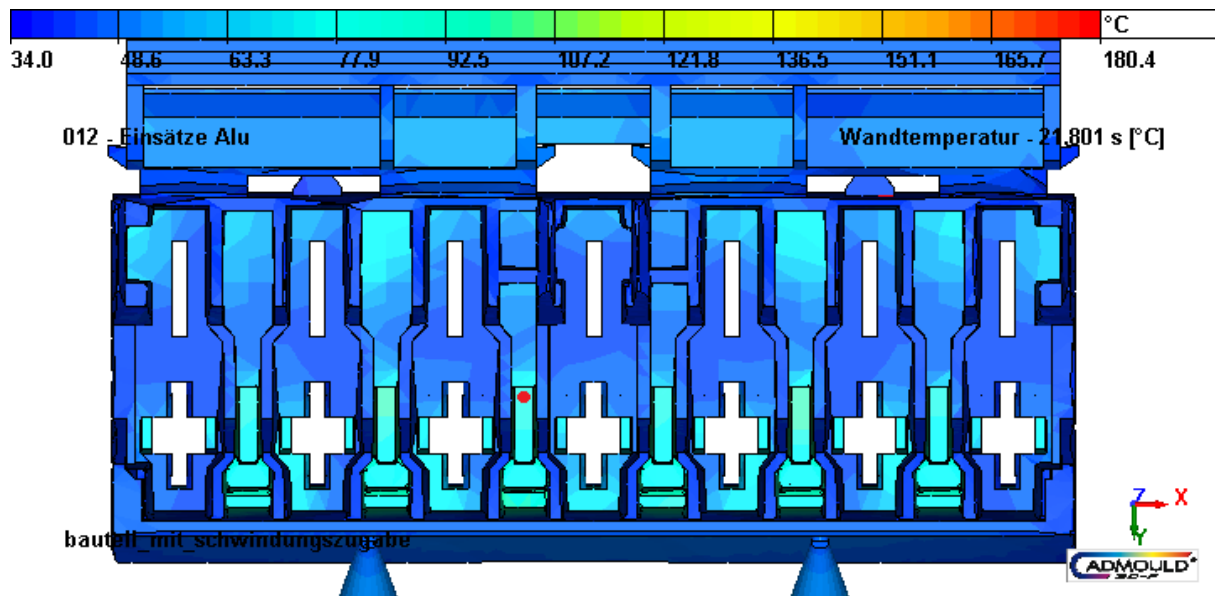


Abbildung 69: Hot Spots in der Kavitätsoberflächentemperatur zu Beginn der Füllung unter Berücksichtigung der Einsätze aus Aluminium (projiziert auf die Bauteiloberfläche).

5.4.4 Zusetzen der Temperierkanäle

Das Zusetzen der Temperierkanäle bzw. die Ablagerung von Kalk in den Temperierkanälen ist ein thermodynamisches Problem. Durch die zusätzliche Kalkschicht verringert sich der Kühlkanaldurchmesser, und der Wärmeaustausch zwischen Bauteil und Kühlmedium verschlechtert sich durch die isolierende Wirkung der Kalkschicht.

Cadmould bietet von sich aus keine Möglichkeiten, eine Kalkschicht zu berücksichtigen. Da sich auch die Wärmeübertragung vom Kühlmedium zum Werkzeugstahl nicht manuell definieren lässt, wird über andere Wege versucht, die Isolierwirkung der Kalkschicht zu berücksichtigen. Ausgehend von Abbildung 6 und [8] wird durch eine Reduzierung des Kühlkanalquerschnittes bzw. des Volumenstromes versucht, den Einfluss der Kalkschicht zu simulieren.

Unter Annahme einer 1 mm dicken Kalkschicht werden die Querschnitte der Kühlkanäle auf 6 mm bzw. 3 mm reduziert. Weiters werden die Volumenströme auf 9,13 l/min reduziert, da eine Kalkablagerung von 1 mm Wandstärke laut Abbildung 6 einen Übertragungsverlust von 7 % verursacht, was durch die Reduzierung des Volumenstromes berücksichtigt werden soll. Der Volumenstrom nimmt in Cadmould über die Reynolds- und Nusseltzahl Einfluss auf den berechneten Wärmeübergangskoeffizienten, welcher wiederum die Kühlleistung definiert. Die Berechnung des reduzierten Volumenstroms ist im Anhang unter Kapitel 9.5 zu finden.

Betrachtet man wieder die mittleren Temperaturen am Ende der Kühlphase, wie in Kapitel 4.3, so sind hier die Werte im Durchschnitt ca. um 10 °C höher im Vergleich zum Ist-Zustand, wie aus Abbildung 70 hervorgeht. Die Verringerung der Kühlkanalquerschnitte und die gleichzeitige Reduktion der Volumenströme führen zu einer schlechteren Abfuhr der Wärme aus dem Bauteil und somit zu höheren mittleren Temperaturen beim Zeitpunkt der Entformung, d.h. zu einer höheren Gefahr von Entformungsdeformationen.

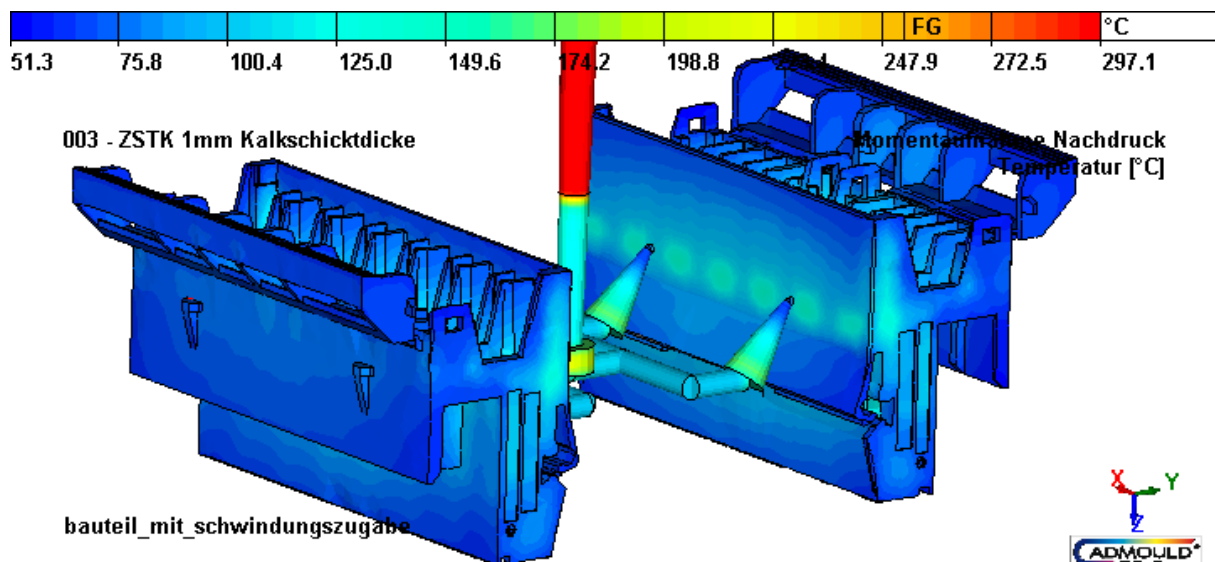


Abbildung 70: Mittlere Temperaturen über die Bauteildicke am Ende der Kühlphase bei reduzierten Volumenströmen bzw. Temperierkanaldurchmessern.

Auch bei den Wandtemperaturen, welche wie in Kapitel 4.2 auf die Bauteiloberfläche projiziert werden, gibt es eine Erhöhung der Temperaturen um ca. 5 °C. Bei Einfrier- und Siegelzeiten sind ebenfalls nur geringe Unterschiede im Vergleich zum Ist-Zustand erkennbar. Durch eine weitere Simulation mit einer Kalkschichtdicke von 2 mm ist jedoch bereits ein Trend hin zu höheren Temperaturen erkennbar. Bei einer Kalkschichtdicke von 2 mm würde sich z.B. die Bauteilbreite um ca. 0,2 mm verringern. Lagert sich weiterhin Kalk in den Kühlkanälen ab, so steigen die Temperaturen im Bauteil weiterhin an und es kommt zwangsläufig zu einer stärkeren Beeinflussung des Herstellungsprozesses und der damit verbundenen Bauteilqualität. Es sind in Cadmould die genauen Auswirkungen der Ablagerungen nicht feststellbar. Lediglich eine Annäherung wurde ermöglicht durch bestimmte Vereinfachungen und Annahmen, die getroffen wurden.

6 Machbarkeit in PBT GF20

Durch weitere Simulationen soll die Machbarkeit des Bauteiles in PBT GF20 mit dem vorhandenen Werkzeug überprüft werden. Derzeit wird das Bauteil aus PA 66 gefertigt. DPA hat das Anliegen, dieses Bauteil in Zukunft aus PBT GF20 zu fertigen. Das Werkzeug wurde jedoch für PA 66 ausgelegt. Anhand einer umfassenden Simulation mit den gemessenen Materialdaten für PBT GF20 soll eine Einstellung gefunden werden, bei der es möglich ist, das Bauteil innerhalb der Toleranzen mit der vorgegebenen Geometrie zu fertigen. Die Ergebnisse im Kapitel 6 beschränken sich auf Füllbarkeit und Einhaltung der Qualitätsmerkmale.

6.1 Einzelne Simulation PBT GF20

Wie bereits in Kapitel 2.6.1 erwähnt, verfügt Cadmould über eine Materialdatenbank, welche auch Verarbeitungsparameter vorschlägt. Mit Hilfe der von Cadmould vorgeschlagenen und an den PA 66-Prozess angenäherten Prozessparameter und den ermittelten Materialdaten wird eine Simulation mit der vorhandenen Geometrie durchgeführt. In der Tabelle 11 sind die eingestellten Parameter aufgelistet.

Tabelle 11: Eingestellte Prozessparameter PBT GF20.

Parameter	Abkürzung	Einheit	Wert
Füllzeit	t_F	s	0,8
Nachdruckzeit	t_N	s	3
Nachdruckprofil	p_N	bar	350/300
Kühlzeit	t_K	s	13
Nebenzeit	t_R	s	8
Zykluszeit	t_Z	s	21,8
Schmelzetemperatur (Düsentemperatur)	T_S	°C	260
Heißkanaltemperatur	T_{HK}	°C	270
Vorlauftemperatur Spritzseite	T_{VL1}	°C	40
Vorlauftemperatur Auswerferseite	T_{VL2}	°C	30

6.1.1 Füllbarkeit

Im ersten Schritt wird die Füllbarkeit des Formnestes näher betrachtet. Auf Grund der unterschiedlichen Fließeigenschaften von PA 66 und PBT GF20 könnten Probleme bei der Füllung der Kavität auftreten. Abbildung 71 zeigt färbig die Füllzeit bei Erreichen des jeweiligen Punktes. Es zeigt sich, dass die Kavität vollständig bei den eingestellten Parametern gefüllt werden konnte.

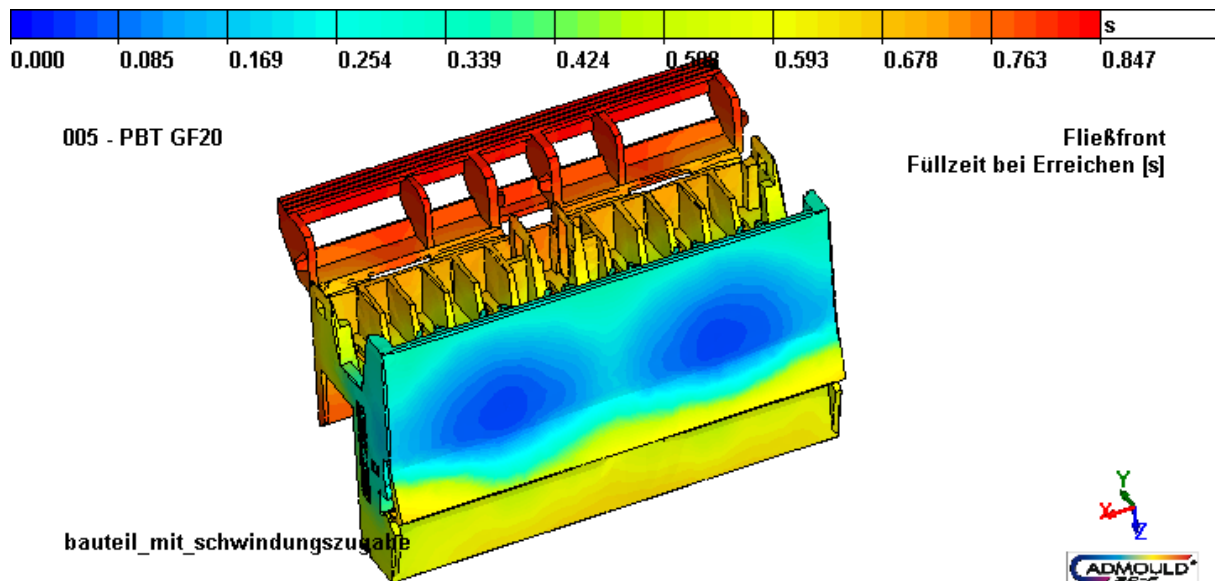


Abbildung 71: Füllstudie PBT GF20.

Alle vier Kavitäten wurden zur Gänze ausgefüllt, jedoch treten ähnliche Füllprobleme wie bei PA 66 auf im Bereich der vorderen Sicherungsleiste der Kabelzuführungen sowie bei den lamellenartigen Bereichen der oberen Sicherungsleiste. Da die Füllprobleme bei beiden Materialien auftreten, wäre es sinnvoll die Geometrie des Bauteiles zu überarbeiten bzw. wenn es möglich ist Fließhilfen einzuarbeiten, um die Füllprobleme zu minimieren. In der Abbildung 72 ist eine Kavität mit den auftretenden Füllproblemen dargestellt, analog zu PA 66.

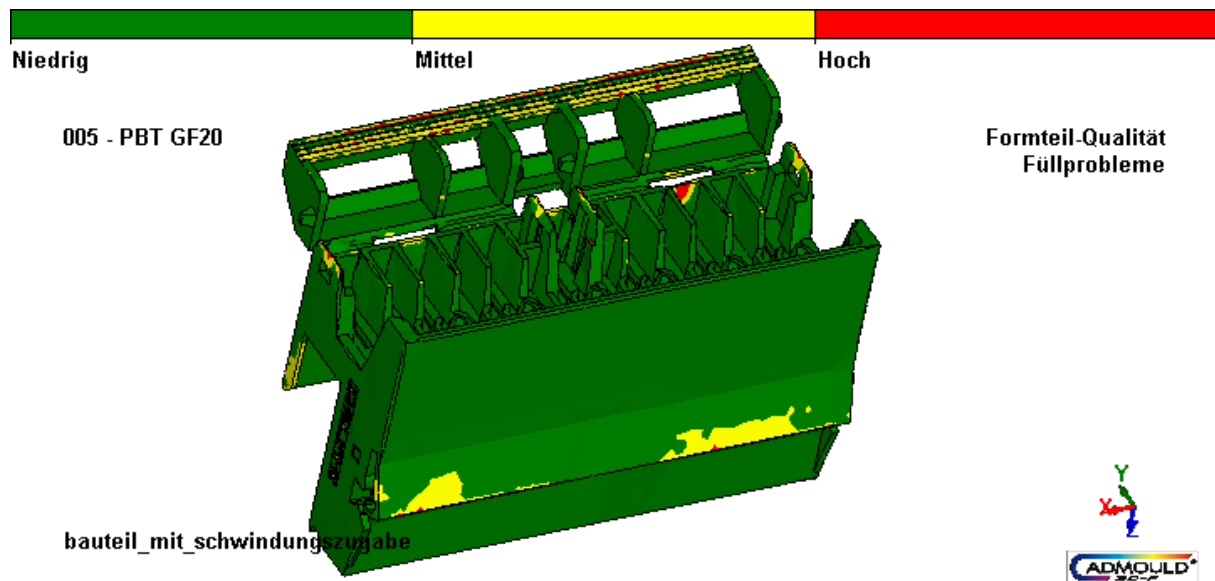


Abbildung 72: Füllprobleme PBT GF20.

6.1.2 Bauteilabmessungen PBT GF20

Nachdem die Füllbarkeit laut Kapitel 6.1.1 gegeben ist, werden die Bauteilspezifikationen in diesem Kapitel näher betrachtet. Die Messmethoden bzw. die Messpunkte sind analog zu PA 66 angeordnet. Es werden ebenfalls Bauteilbreite, Bauteilhöhe und Bauteilverzug in jenen Punkten ausgewertet. In der Tabelle 12 sind die Messwerte für PBT GF20 aufgelistet.

Tabelle 12: Simulierte Werte für Schwindung und Verzug für PBT GF20.

Qualitätsmerkmal	Einheit	Sollmaß	Sim. Istmaß
Bauteilbreite	mm	62,60 – 62,80	63,41
Bauteilhöhe	mm	36,90 – 37,30	37,72
Verzug	mm	0 – 0,3	0,13

Wie aus Tabelle 12 hervorgeht, sind die Bauteilabmessungen weit oberhalb der Spezifikation. Da PBT ein völlig unterschiedliches Schwindungsverhalten im Vergleich zu PA besitzt, ist es mit dieser Einstellung nicht möglich, Bauteile innerhalb der Toleranzen zu fertigen. Die Feuchteaufnahme bei PBT GF20 ist vernachlässigbar klein und beeinflusst daher die Abmaße der Bauteile nicht.

Im nächsten Kapitel soll daher mittels Versuchsplanung eine Prozesseinstellung gefunden werden, mit der es möglich ist, innerhalb der Toleranzen, ohne Geometrieänderungen, Gutteile zu fertigen.

6.2 Machbarkeit in PBT GF20 mittels Versuchsplanung

Analog zu Kapitel 5 werden auch in diesem Kapitel mittels Cadmould die Prozessparameter variiert und eine Einstellung gesucht, bei der es möglich ist, innerhalb der vorgegebenen Toleranzen das Bauteil aus PBT GF20 zu fertigen. Die Variationswerte sind ebenfalls analog zu jenen bei PA 66. Die Ausgangswerte werden aus Kapitel 6.1 übernommen. Daraus ergeben sich die in Tabelle 13 dargestellten Werte.

Tabelle 13: Variationsparameter für PBT GF20.

Parameter	Einheit	Ausgangswert	Variationswert \pm
Füllzeit (t_F)	s	0,8	0,2
Nachdruckzeit (t_N)	s	3	1
Nachdruckprofil (p_N)	bar	350/300	150/150
Kühlzeit (t_K)	s	13	3
Schmelze- Heißkanaltemperatur (T_S/T_{HK})	°C	260/270	10/10
Vorlauftemperatur Spritzseite (T_{VL1})	°C	40	20
Vorlauftemperatur Auswerferseite (T_{VL2})	°C	30	20

Der Versuchsplan wird von CQC automatisch erstellt und ist gleich aufgebaut wie jener bei PA 66, jedoch sind die letzten drei Parameteranordnungen vertauscht. Der Versuchsplan für die Simulationen mit dem Material PBT GF20 ist in Tabelle 14 abgebildet.

Tabelle 14: Versuchsplan für PBT GF20.

Versuch Nummer	t_f	T_s/T_{HK}	t_N	t_K	T_{VL1}	T_{VL2}	p_N
1	0	0	0	0	0	0	0
2	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	+	+	+	+
4	-	+	+	+	+	-	-
5	-	+	+	-	-	+	+
6	+	+	-	-	+	+	-
7	+	+	-	+	-	-	+
8	+	-	+	+	-	+	-
9	+	-	+	-	+	-	+

Die neun Simulationen zum Versuchsplan werden durchgeführt und die Ergebnisse wieder in CQC importiert. Es wird wieder eine Optimierung durchgeführt, wo alle Qualitätsmerkmale die gleiche Prioritätsstufe besitzen.

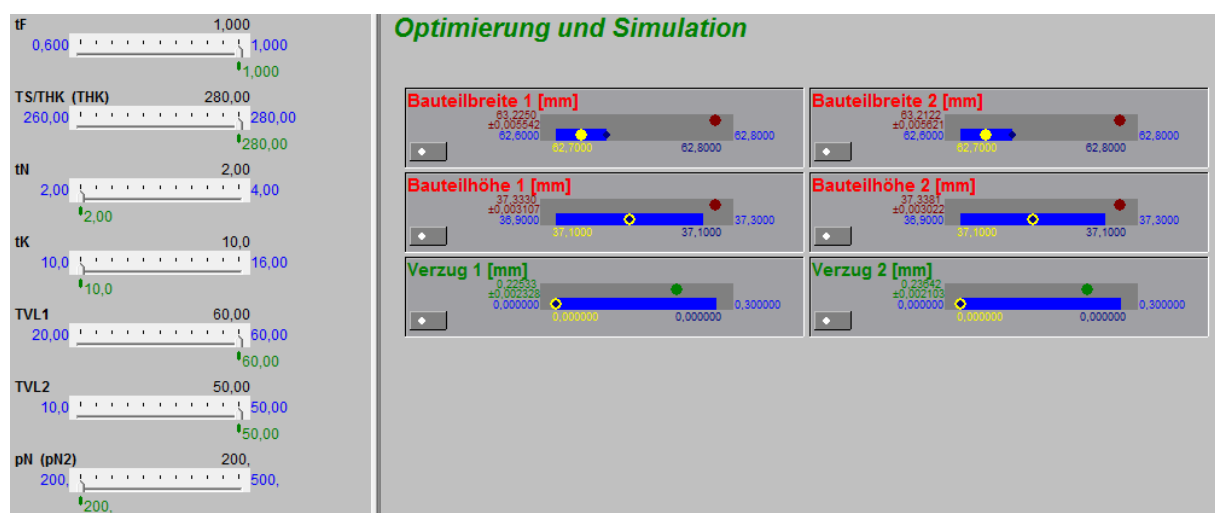


Abbildung 73: Optimierung für PBT GF20.

Wie aus Abbildung 73 ersichtlich ist, wurde keine Einstellung innerhalb des gewählten Prozessfensters gefunden, mit der eine Fertigung des Bauteiles unter Einhaltung aller

Toleranzen möglich ist. Die optimierten Maße liegen noch immer außerhalb der Toleranzen, wie aus Tabelle 15 hervorgeht.

Tabelle 15: Abmessungen nach Optimierung.

Qualitätsmerkmal	Einheit	Sollmaß	Sim. Istmaß	Optimierungsmaß
Bauteilbreite	mm	62,60 – 62,80	63,41	63,21
Bauteilhöhe	mm	36,90 – 37,30	37,72	37,33
Verzug	mm	0 – 0,3	0,13	0,22

Tabelle 16: Optimierte Parametereinstellung für PBT GF20.

Parameter	Abkürzung	Einheit	Wert
Füllzeit	t_F	s	1
Nachdruckzeit	t_N	s	4
Nachdruckprofil	p_N	bar	200/150
Kühlzeit	t_K	s	10
Schmelze- Heißkanaltemperatur	T_S/T_{HK}	°C	270/280
Vorlauftemperatur Spritzseite	T_{VL1}	°C	60
Vorlauftemperatur Auswerferseite	T_{VL2}	°C	50

Die Ergebnisse zeigen, dass es innerhalb dieses Versuchsplanes nicht möglich ist, das Bauteil mit diesem Werkzeug aus PBT GF20 unter Einhaltung aller Toleranzen zu fertigen. Die Schwindungsunterschiede der beiden Materialien sind zu groß. Durch die Auslegung des Werkzeuges für PA 66 wurde die Schwindungszugabe speziell für dieses Material gewählt. Da PBT GF20 weitaus weniger Schwindung zeigt, sind die Formnester sozusagen zu groß für dieses Material.

Daher wird ein weiterer Versuchsplan mit einem größeren Versuchsfenster simuliert. Die Parameter werden gemäß Tabelle 17 variiert und analog zum vorhergehenden Versuchsplan ausgewertet. Die Parameter werden bewusst um höhere Werte variiert, um eine mögliche, theoretische, Machbarkeit in PBT GF20 feststellen zu können.

Tabelle 17: Variationsparameter für großes Versuchsfenster für PBT GF20.

Parameter	Einheit	Ausgangswert	Variationswert ±
Füllzeit (t_F)	s	0,8	0,6
Nachdruckzeit (t_N)	s	2,5	2
Nachdruckprofil (p_N)	bar	300	200
Kühlzeit (t_K)	s	10	5
Schmelze- Heißkanaltemperatur (T_S/T_{HK})	°C	260/270	20/20
Vorlauftemperatur Spritzseite (T_{VL1})	°C	90	40
Vorlauftemperatur Auswerferseite (T_{VL2})	°C	80	40

Durch das neu gewählte Versuchsfenster ist es gelungen eine Einstellung zu finden (Abbildung 74), bei der eine theoretische Fertigung der Bauteile unter Einhaltung der Spezifikationen möglich ist. Durch die großen Variationswerte entsteht ein viel größeres Prozessfenster als beim vorhergehenden Versuchsplan.

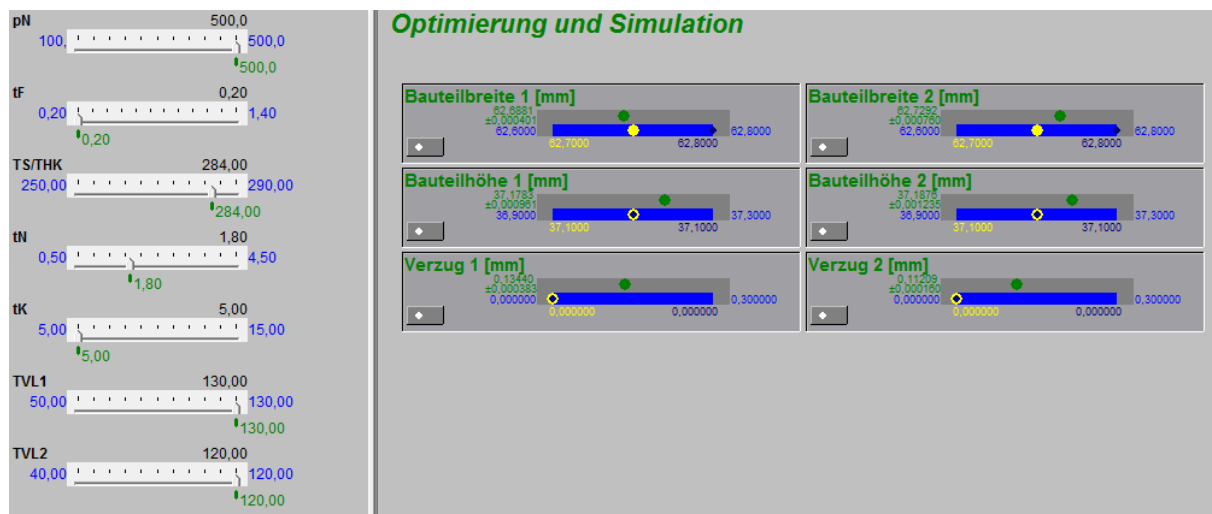


Abbildung 74: Optimierung mit neuem Versuchsfenster PBT GF20.

Die Parametereinstellungen der neuen Optimierung im größeren Versuchsfenster sind in Tabelle 18 aufgelistet. Diese Einstellungswerte sind jedoch eher theoretische Werte, welche in der Realität nur schwer zu erreichen sind. Die Vorlauftemperaturen haben sehr großen Einfluss auf die Bauteilmaße und sind mit 130 °C bzw. 120 °C sehr hoch und nur mit hohem Aufwand (Druckaufbringung im Kühlsystem) möglich. Die Einspritzzeit ist mit 0,2 s sehr gering und nur sehr schwer realisierbar. Weiters wird die Entformungstemperatur nicht von

CQC berücksichtigt, d.h. dass das Bauteil eventuell noch nicht ausreichend formstabil bei der Entformung ist.

Tabelle 18: optimierte Parametereinstellung im großen Versuchsfenster PBT GF20.

Parameter	Abkürzung	Einheit	Wert
Füllzeit	t_F	s	0,2
Nachdruckzeit	t_N	s	1,8
Nachdruckprofil	p_N	bar	500
Kühlzeit	t_K	s	5
Schmelze- Heißkanaltemperatur	T_S/T_{HK}	°C	274/284
Vorlauftemperatur Spritzseite	T_{VL1}	°C	130
Vorlauftemperatur Auswerferseite	T_{VL2}	°C	120

7 Zusammenfassung

Ein siebenpoliger Stecker der Firma Delphi Packard Austria wurde in dieser Masterarbeit anhand eines CAD-Modelles nachgebildet und der Ist-Zustand in Cadmould simuliert, d.h. der reale Prozess nachgebildet. Anhand eines Versuchsplanes wurden mit Hilfe von VARIMOS der Produktionsprozess optimiert und die Haupteinflussgrößen bestimmt. Es wurde nach weiteren Optimierungsmöglichkeiten gesucht, um die Qualität des Bauteiles zu erhöhen bzw. um die Zykluszeit zu senken. Das Bauteil wird derzeit aus PA 66 gefertigt. Die Firma ist bestrebt, das Bauteil in Zukunft aus PBT GF20 zu fertigen. Daher wurde die Machbarkeit in PBT GF20 mit dem gegebenen Spritzgießwerkzeug unter Einhaltung aller Qualitätsmerkmale untersucht.

Die beiden Materialien wurden am Department Kunststofftechnik anhand von Materialtest analysiert. Es wurden sowohl pvT- als auch Viskositätsdaten bestimmt und ausgewertet. Die aufbereiteten Daten wurden in die Cadmould User Datenbank eingetragen und jeweils als neues Material abgespeichert. Für die Erstellung des Simulationsmodelles wurden die CAD-Geometrie des Werkzeuges und des Bauteiles von DPA zur Verfügung gestellt. Das Bauteil wurde als STL-Datei in Cadmould importiert und das Angussystem in Cadmould mit den zur Verfügung stehenden Tools nachgebildet. Die Kühlkanäle wurden mit Creo Parametrics anhand von Mittellinien konstruiert und als IGES importiert. Weiters wurden abseits der Bauteile zwei Batterien konstruiert, wo die einzelnen Kühlkreisläufe auf insgesamt zwei Kreisläufe reduziert wurden. Dies soll die Situation der Praxis, wo zwei Temperiergeräte verwendet werden, eines für die Spritzseite und eines für die Auswerferseite, besser abbilden. Die Prozessparameter wurden an die von DPA zur Verfügung gestellten Produktionsaufzeichnungen angelehnt.

Mit dem vorher erstellten Modell wurde der Ist-Zustand simuliert und näher betrachtet. Es wurden teilweise Probleme bei der Füllbarkeit in jenen Bereichen, die als letztes gefüllt werden, festgestellt. Die Wandtemperaturverteilung, projiziert auf das Bauteil wurde betrachtet, um Hot Spots zu lokalisieren. Um das Kühlsystem genauer analysieren zu können, wurde die Wärmestromeffizienz der Kühlkreisläufe betrachtet und dabei festgestellt, dass die Kühlsituation der vier Bauteile unterschiedlich ist. Ein weiteres Augenmerk wurde auf die Einfrier- und Siegelzeiten des Bauteiles gelegt. Dabei wurde festgestellt, dass Einfrier- und Siegelzeiten für den jeweiligen Bauteilbereich nahezu ident sind und dass der Anschnitt ca. 3,7 s nach Beginn des Einspritzens eingefroren ist und die gewählte Nachdruckzeit somit ausreichend ist. Die Schwindungs- und Verzugsberechnung in Cadmould wurde ebenfalls für

den Ist-Zustand unter Berücksichtigung der Feuchteaufnahme von PA 66 durchgeführt. Das Bauteil konnte innerhalb der Spezifikationen simuliert werden.

Im nächsten Schritt wurde der Prozess mittels Variieren ausgewählter Prozessparameter optimiert. Dazu wurde mit Hilfe von CQC ein Versuchsplan mit sieben Parametern und neun Versuchen erstellt. Die Versuche wurden in Cadmould simuliert und anschließend mit CQC ausgewertet. Dabei stellte sich heraus, dass die Vorlauftemperaturen und die Kühlzeit den größten Einfluss auf die vorher definierten Qualitätsmerkmale des Bauteiles haben. Weiters wurde von CQC ein Prozessoptimum berechnet, wobei die Prozessparameter so gewählt wurden, dass die Simulationsergebnisse möglichst nahe an die realen Zielvorgaben herangeführt werden.

Um den Verzug zu minimieren und die Zykluszeit zu senken, wurden als weiterer Optimierungsansatz Teile des Werkzeuges aus einem Material mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit simuliert. Dabei konnte nur eine geringe Verbesserung in den Hot Spot Bereichen festgestellt werden. Bei einer weiteren Simulation mit dem gesamten Werkzeug aus dem Material mit der höheren Wärmeleitfähigkeit wurde eine klare Senkung der Temperaturen im Bauteil und an der Wandtemperaturverteilung beobachtet. Das Zusetzen der Temperierkanäle durch Kalkablagerungen wurde ebenfalls simuliert. Dabei wurden die Durchmesser der Kühlkanäle verkleinert und der Volumenstrom reduziert, um den schlechteren Wärmeübergang in der Simulation zu berücksichtigen. Schon bei einer geringen Kalkschichtdicke von 1 mm wurde eine Erhöhung der mittleren Bauteiltemperatur von 10 °C festgestellt.

Als letzter Punkt wurde die Machbarkeit des Bauteiles aus PBT GF20 überprüft. Die Prozessparameter wurden an jene von PA 66 angelehnt und auf PBT GF20 abgestimmt. Nachdem eine erste Simulation mit den gewählten Parametern keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte, wurden in weiterer Folge wieder die Prozessparameter variiert und ein Versuchsplan erstellt. Im ersten Versuchsplan konnte jedoch innerhalb des Prozessfensters keine Einstellung gefunden werden, mit der es möglich ist, unter Einhaltung aller Qualitätsmerkmale Gutteile zu produzieren. Durch eine weitere Variation in einem größeren Prozessfenster wurde eine theoretische Einstellung innerhalb der Toleranzen gefunden, jedoch ist diese kaum in der Realität umsetzbar und nicht sehr wirtschaftlich. Die Fertigung des Bauteiles in PBT GF20 innerhalb der Spezifikationen ist demnach mit diesem Werkzeug ohne weiteres nicht möglich. Grund dafür sind die großen Unterschiede im Schwindungsverhalten der beiden Materialien.

Experimentelle Versuche an der Spritzgießmaschine wurden ebenfalls durchgeführt. Es zeigte sich allerdings, dass das Werkzeug, welches mit Sensorik von DPA ausgestattet wurde, sehr empfindlich auf Prozessänderungen reagiert d.h., dass es nicht möglich war, ein ausreichend großes Prozessfenster auf diesem Werkzeug abzufahren, um die in der Simulation berechneten Ergebnisse verifizieren zu können. Auch ist davon auszugehen, dass die realen Maße der Werkzeugkavität durch den jahrelangen Produktionseinsatz nicht mehr den Maßen der Werkzeugzeichnung entsprechen, und daher ein Vergleich nur bedingt möglich wäre.

Weiterführend wäre ein erneuter Versuch erstrebenswert, praktische Versuche bei DPA an der Spritzgießmaschine zu fahren und die Ergebnisse mit in die Auswertung von CQC einfließen zu lassen. Das Simulationsprogramm Cadmould bietet kaum Möglichkeiten eine Kalkschicht in den Kühlkanälen zu berücksichtigen. Durch Simulationen in anderen Simulationsprogrammen könnten eventuell genauere Ergebnisse dazu erzielt werden.

Weiterführend wird auch empfohlen, die schlecht temperierten Kerne mit einen Reinkupfer-Inlet zu versehen, um die schlechte Kühlung im Kernbereich zu verbessern und so eventuell ein breites Prozessfenster zu erreichen.

8 Literaturangabe

- [1] *Adam M.:* Statistische Versuchsplanung und Auswertung (DoE Design of Experiments), Fachhochschule Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 2004.
- [2] *Carreau P. J.:* Rheological equations from molecular network theories, PhD thesis, University of Wisconsin, 1968.
- [3] *CRGfaph:* Versuchsplanung, D-optimierte Versuchspläne, www.crgfaph.de.
- [4] *Dimla D.E., Camilotto M., Miani F.:* Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools, Journal of Materials Processing Technology, 2005.
- [5] *Gierth M.:* CQC-System, Dr. Gierth Ingenieurgesellschaft mbH, <http://www.dr-gierth.de>.
- [6] *Grellmann W., Seidler S.:* Kunststoffprüfung, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [7] *Kaiser W.:* Kunststoffchemie für Ingenieure, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [8] *Kurz M.:* Energiesparer, Permatrade Wassertechnik GmbH, Leonberg, Deutschland.
- [9] *LANXESS:* LANXESS Deutschland GmbH, Produktdatenblätter, Homepage LANXESS, www.lanxess.de.
- [10] *LANXESS:* LANXESS Deutschland GmbH, Wasseraufnahme und Konditionieren von Formteilen aus Durethan, www.durethan.de.
- [11] *Michaeli W.:* Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2010.
- [12] *Ovtcharova J.:* Informationssysteme in der Produktions- und Konstruktionstechnik (Vorlesungsskript), Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion, TH Karlsruhe, Dissertation, 2003.
- [13] *Sarris V.:* Methodologische Grundlagen der Experimentalpsychologie, Band 2, Versuchsplanung und Stadien des psychologischen Experiments, 1992.
- [14] *Simcon:* Cadmould 3D-F Handbuch, Version 6.0, <http://www.simcon-worldwide.com>.

- [15] *Thomke S., Fujimoto T.:* The Effect of Front-Loading Problem-Solving on Product Development Performance. In: *Journal of Product Innovation Management* 17 (2000), S. 128–142.
- [16] *Zöllner O.:* Grundlagen zur Schwindung von thermoplastischen Kunststoffen, Bayer AG, Leverkusen.

9 Anhang

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau einer Spritzgießmaschine [7].	3
Abbildung 2:	Verfahrensablauf beim Spritzgießen [11].	4
Abbildung 3:	Schematischer Aufbau eines Spritzgießwerkzeuges [7].	7
Abbildung 4:	Interpretation einer Forminnendruckkurve [7].	8
Abbildung 5:	Ablagerungen im Kühlkanal (Kalandurchmesser 10 mm).	10
Abbildung 6:	Übertragungsverlust in Abhängigkeit der Kalkschichtdicke [8].	11
Abbildung 7:	Strukturformel PA 66 [7].	12
Abbildung 8:	Strukturformel PBT [7].	12
Abbildung 9:	Unterschiede in den Viskositätskurven [7].	13
Abbildung 10:	Beschreibung einer Viskositätskurve mit dem Carreau Modell [11].	14
Abbildung 11:	Zeitliche Änderung eines Formteilmaßes durch die Schwindung [16].	16
Abbildung 12:	Schematische Darstellung eines pvT-Diagramms für einen amorphen (links) und einen teilkristallinen (rechts) Kunststoff [16].	17
Abbildung 13:	Einflussgrößen auf die Formteilqualität [7].	18
Abbildung 14:	Beeinflussungsmöglichkeiten in Abhängigkeit vom Planungsstadium [7].	20
Abbildung 15:	Ressourceneinsatz über die Zeit für konventionelle Entwicklung (blau) und Entwicklung mit Frontloading (rot) [12].	21
Abbildung 16:	Aufbau für vollfaktorielle Versuchspläne mit zwei Einstellstufen [1].	22
Abbildung 17:	Cadmould Materialdatenbank [14].	26
Abbildung 18:	Cadmould Prozessfenster [14].	27
Abbildung 19:	Reales Bauteil.	30
Abbildung 20:	Schmelzsicherungen.	31
Abbildung 21:	Zugeführte Kabelverbindungen.	31
Abbildung 22:	Bauteil inklusive Kabelzuführungen, Schmelzesicherungen und Trägerbauteil.	32
Abbildung 23:	Vergleich der Viskositätsdaten für PA 66 (Durethan AC30) bei 280 °C.	33
Abbildung 24:	Viskositätskurven PA 66 (Carreau-WLF approximiert).	34
Abbildung 25:	Vergleich der Viskositätskurven PBT GF20 (Pocan B 3225).	35
Abbildung 26:	Viskositätskurven PBT GF20 (Carreau-WLF approximiert).	35
Abbildung 27:	pvT-Kurven PA 66 (IKV-approximiert).	36
Abbildung 28:	pvT-Kurven PBT GF20 (IKV-approximiert).	37
Abbildung 29:	Bauteilgeometrie im STEP-Format.	38
Abbildung 30:	3D Nachbildung des Angusses (STEP-Format).	39
Abbildung 31:	Cadmould Modell des Angussystems.	40
Abbildung 32:	Realer Kaltkanal-Angussverteiler.	40
Abbildung 33:	Modellierter Kaltkanalanguss im Detail.	41
Abbildung 34:	Färbige Darstellung der einzelnen Kühlkanäle.	42
Abbildung 35:	Gesamtes Modell.	42
Abbildung 36:	Füllprobleme beim Einspritzen.	45
Abbildung 37:	Wandtemperaturen am Ende der Berechnungszeit.	46
Abbildung 38:	Hot-Spots in der Kavitätsoberflächentemperatur zu Beginn der Füllung (projiziert auf die Bauteiloberfläche).	47
Abbildung 39:	Kernzüge im Werkzeug.	47
Abbildung 40:	Mittlere Temperaturen über die Bauteildicke am Ende der Füllphase.	48
Abbildung 41:	Mittlere Temperaturen über die Bauteildicke am Ende der Kühlphase.	49

Abbildung 42:	Mittlere Temperaturen über die Bauteildicke im Bereich der Kernzüge am Ende der Kühlphase	49
Abbildung 43:	Wärmestrom-Effizienz der Kühlkanäle.	50
Abbildung 44:	Wärmestrom-Effizienz der Kühlkanäle (anderer Blickwinkel).	51
Abbildung 45:	Druckverlust beim Einspritzen.	52
Abbildung 46:	Siegelzeiten.	53
Abbildung 47:	Detailansicht Kernbereich für Siegelzeiten zwischen 0 s und 0,8 s.	53
Abbildung 48:	Detailansicht Kernbereich für Siegelzeiten zwischen 0 s und 1,8 s.	54
Abbildung 49:	Einfrierzeiten.	54
Abbildung 50:	Entformungszeiten.	55
Abbildung 51:	Entformungszeiten Detailansicht Kernbereiche.	55
Abbildung 52:	Randschichtdicke am Beginn der Nachdruckzeit.	56
Abbildung 53:	Dicke der eingefrorenen Randschicht nach 3,8 s.	57
Abbildung 54:	Dicke der eingefrorenen Randschicht nach 6 s.	57
Abbildung 55:	Definition des Qualitätsmerkmals Bauteilbreite.	58
Abbildung 56:	Definition des Qualitätsmerkmals Bauteilhöhe.	59
Abbildung 57:	Definition des Qualitätsmerkmals (Abweichung von der ebenen Sollgeometrie) Bauteilverzug.	59
Abbildung 58:	relative Einflussstärke auf die Bauteilbreite in Prozent.	65
Abbildung 59:	Relative und absolute Einflussrichtung der einzelnen Parameter auf die Bauteilbreite.	66
Abbildung 60:	Relative Einflussstärke in Prozent auf die Bauteilhöhe.	67
Abbildung 61:	Relative und absolute Einflussrichtung der einzelnen Parameter auf die Bauteilhöhe.	67
Abbildung 62:	Relative Einflussstärke in Prozent auf den Bauteilverzug.	68
Abbildung 63:	Relative und absolute Einflussrichtung der einzelnen Parameter auf den Bauteilverzug.	69
Abbildung 64:	Optimierung in CQC.	70
Abbildung 65:	Manuelle Optimierung der Zykluszeit.	71
Abbildung 66:	Definition der Einsätze.	73
Abbildung 67:	Hot Spots in der Kavitätsoberflächentemperatur zu Beginn der Füllung unter Berücksichtigung der Einsätze (projiziert auf die Bauteiloberfläche).	73
Abbildung 68:	Hot Spots in der Kavitätsoberflächentemperatur zu Beginn der Füllung bei gesamtem Werkzeug aus einem Stahl mit höherer Wärmeleitfähigkeit (projiziert auf die Bauteiloberfläche).	74
Abbildung 69:	Hot Spots in der Kavitätsoberflächentemperatur zu Beginn der Füllung unter Berücksichtigung der Einsätze aus Aluminium (projiziert auf die Bauteiloberfläche).	76
Abbildung 70:	Mittlere Temperaturen über die Bauteildicke am Ende der Kühlphase bei reduzierten Volumenströmen bzw. Temperierkanaldurchmessern.	77
Abbildung 71:	Füllstudie PBT GF20.	79
Abbildung 72:	Füllprobleme PBT GF20.	80
Abbildung 73:	Optimierung für PBT GF20.	82
Abbildung 74:	Optimierung mit neuem Versuchsfenster PBT GF20.	84
Abbildung 75:	Produktdatenblatt für PA 66 (Durethan AC 30) [9].	94
Abbildung 76:	Produktdatenblatt für PBT GF20 (Pocan B 3225) Seite 1 [9].	95
Abbildung 77:	Produktdatenblatt für PBT GF20 (Pocan B 3225) Seite 2 [9].	96
Abbildung 78:	Beschreibung der Optimierung in CQC [5].	101

9.2 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1:</i>	<i>Eingestellte Parameter für die Simulation des Ist-Zustandes.</i>	43
<i>Tabelle 2:</i>	<i>Bauteil Spezifikationen.</i>	60
<i>Tabelle 3:</i>	<i>Simulierte Werte für Schwindung und Verzug, Ist-Zustand.</i>	60
<i>Tabelle 4:</i>	<i>Simulierte Werte der Abmaße mit Berücksichtigung der Feuchtaufnahme.</i>	61
<i>Tabelle 5:</i>	<i>Ergebnisse Schwindung und Verzug mit neuen Spezifikationen unter Berücksichtigung der Feuchtaufnahme von PA 66.</i>	61
<i>Tabelle 6:</i>	<i>Variationsparameter PA 66.</i>	62
<i>Tabelle 7:</i>	<i>D-optimaler Versuchsplan für 7 Parameter bei 10 Versuchen.</i>	63
<i>Tabelle 8:</i>	<i>Optimierte Parameterwerte PA 66.</i>	70
<i>Tabelle 9:</i>	<i>Parameterwerte der manuellen Optimierung der Zykluszeit.</i>	71
<i>Tabelle 10:</i>	<i>Bauteilmaße mit Werkzeug aus dem neu definierten Werkzeugstahl.</i>	75
<i>Tabelle 11:</i>	<i>Eingestellte Prozessparameter PBT GF20.</i>	78
<i>Tabelle 12:</i>	<i>Simulierte Werte für Schwindung und Verzug für PBT GF20.</i>	80
<i>Tabelle 13:</i>	<i>Variationsparameter für PBT GF20.</i>	81
<i>Tabelle 14:</i>	<i>Versuchsplan für PBT GF20.</i>	82
<i>Tabelle 15:</i>	<i>Abmessungen nach Optimierung.</i>	83
<i>Tabelle 16:</i>	<i>Optimierte Parametereinstellung für PBT GF20.</i>	83
<i>Tabelle 17:</i>	<i>Variationsparameter für großes Versuchsfenster für PBT GF20.</i>	84
<i>Tabelle 18:</i>	<i>optimierte Parametereinstellung im großen Versuchsfenster PBT GF20.</i>	85
<i>Tabelle 19:</i>	<i>Carreau-WLF Koeffizienten (Viskosität) für PA 66 (Durethan AC 30).</i>	97
<i>Tabelle 20:</i>	<i>Carreau-WLF Koeffizienten (Viskosität) für PBT GF20 (Pocan B 3225).</i>	97
<i>Tabelle 21:</i>	<i>IKV-Koeffizienten (pvT) für PA 66 (Durethan AC 30).</i>	97
<i>Tabelle 22:</i>	<i>IKV-Koeffizienten (pvT) für PBT GF20 (Pocan B 3225).</i>	98
<i>Tabelle 23:</i>	<i>Ausgangswerte für die Berechnung des reduzierten Volumenstromes unter Berücksichtigung einer 1 mm dicken Kalkschicht.</i>	99

9.3 Materialdatenblätter

9.3.1 Materialdatenblatt für PA 66

Durethan AC 30 DUS027 000000

PA 66, unverstärkt, Spritzguß, wärmostabilisiert, schlagzähmodifiziert

ISO Formmassenbezeichnung: ISO 1874-PA 66-HI,GHR,14-030

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Richtwert	
				spritzfisch	konditioniert
Rheologische Eigenschaften					
C Verarbeitungsschwindigkeit, parallel	60x60x2; 280 °C / WZ 80 °C; 600 bar	%	ISO 294-4	1.3	
C Verarbeitungsschwindigkeit, senkrecht	60x60x2; 280 °C / WZ 80 °C; 600 bar	%	ISO 294-4	2.0	
Nachschwindung, parallel	60x60x2; 120 °C; 4 h	%	ISO 294-4	0.2	
Nachschwindung, senkrecht	60x60x2; 120 °C; 4 h	%	ISO 294-4	0.2	
Mechanische Eigenschaften (23 °C/50 % r. F.)					
C Zug-Modul	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2800	1100
C Streckspannung	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	70	40
C Streckdehnung	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	6.0	25
C Nominelle Bruchdehnung	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	18	74
C Charpy-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	<10	25
C Charpy-Kerbschlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	<10	
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-1U	N	N
Izod-Schlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-1U	N	
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	<10	35
Izod-Kerbschlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	<10	
Biege-Modul	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	2500	1000
Biegefestigkeit	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	90	40
Randfaserdehnung bei Höchstkraft	2 mm/min	%	ISO 178-A	6.9	8.9
3.5 % - Biegespannung	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	75	30
Thermische Eigenschaften					
C Schmelztemperatur	10 °C/min	°C	ISO 11357-1,-3	261	
Sonstige Eigenschaften (23 °C)					
C Dichte		kg/m ³	ISO 1183	1110	
Herstellbedingungen für Probekörper					
C Spritzgießen-Massetemperatur		°C	ISO 294	280	
C Spritzgießen-Werkzeugtemperatur		°C	ISO 294	80	
Verarbeitungsempfehlungen					
Trocknungstemperatur Trockenlufttrockner		°C	-	80	
Trocknungszeit Trockenlufttrockner		h	-	2-6	
Restfeuchtigkeit		%	nach Karl Fischer	0.03-0.12	
Massetemperatur (Tmin - Tmax)		°C	-	270-290	
zulässige Verweilzeit bei Tmax		min	-	>=10	
Werkzeugtemperatur		°C	-	80-90	

Abbildung 75: Produktdatenblatt für PA 66 (Durethan AC 30) [9].

9.3.2 Materialdatenblatt für PBT GF20

Pocan B 3225 000000

PBT, 20 % Glasfasern, Spritzguss

ISO Formmassenbezeichnung: ISO 7792-1-PBT,GHMR,09-070,GF20

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Richtwert
Rheologische Eigenschaften				
C Schmelze-Volumenfließrate (MVR)	260 °C; 2.16 kg	cm ³ /(10 min)	ISO 1133	20
C Verarbeitungsschwindigkeit, parallel	60x60x2; 260 °C / WZ 80 °C; 600 bar	%	ISO 294-4	0.5
C Verarbeitungsschwindigkeit, senkrecht	60x60x2; 260 °C / WZ 80 °C; 600 bar	%	ISO 294-4	1.4
Nachschwindung, parallel	60x60x2; 120 °C; 4 h	%	ISO 294-4	0.1
Nachschwindung, senkrecht	60x60x2; 120 °C; 4 h	%	ISO 294-4	0.1
Mechanische Eigenschaften (23 °C/50 % r. F.)				
C Zug-Modul	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	7100
C Bruchspannung	5 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	120
C Bruchdehnung	5 mm/min	%	ISO 527-1,-2	3.4
C Zug-Kriech-Modul	1 h	MPa	ISO 899-1	6900
C Zug-Kriech-Modul	1000 h	MPa	ISO 899-1	6300
C Charpy-Schlagzähigkeit	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	50
C Charpy-Schlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	45
C Charpy-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	< 10
C Charpy-Kerbschlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	< 10
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-1U	45
Izod-Schlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-1U	40
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	< 10
Izod-Kerbschlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	< 10
Izod-Kerbschlagzähigkeit	-40 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	< 10
Biege-Modul	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	7000
Biegefestigkeit	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	195
Randfaserdehnung bei Höchstkraft	2 mm/min	%	ISO 178-A	4.0
3.5 % - Biegespannung	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	190
Kugeldruckhärte		N/mm ²	ISO 2039-1	180
Thermische Eigenschaften				
C Schmelztemperatur	10 °C/min	°C	ISO 11357-1,-3	225
C Formbeständigkeitstemperatur	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	205
C Formbeständigkeitstemperatur	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	220
C Formbeständigkeitstemperatur	8.00 MPa	°C	ISO 75-1,-2	140
Vicat-Erweichungstemperatur	50 N; 120 °C/h	°C	ISO 306	215
C Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient, parallel	23 bis 55 °C	10 ⁻⁷ /K	ISO 11359-1,-2	0.3
C Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient, senkrecht	23 bis 55 °C	10 ⁻⁷ /K	ISO 11359-1,-2	1.1
C Brennverhalten UL 94 (1.6 mm)	1.6 mm	Klasse	UL 94	HB
C Brennverhalten UL 94	0.8 mm	Klasse	UL 94	HB

Abbildung 76: Produktdatenblatt für PBT GF20 (Pocan B 3225) Seite 1 [9].

Pocan B 3225 00000

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Richtwert
C Sauerstoff-Index	Verfahren A	%	ISO 4589-2	20
Wärmeleitfähigkeit	23 °C	W/(m·K)	ISO 8302	0.26
Wärmesicherheit (Kugeleindruckversuch)		°C	IEC 60695-10-2	215
Temperaturindex (Zugfestigkeit)	20000 h	°C	IEC 60216-1	150
Halbzeitintervall (Zugfestigkeit)		°C	IEC 60216-1	14
Relativer Temperaturindex (Zugfestigkeit)		°C	UL 746B	140
Temperaturindex (Schlagzugzähigkeit)	20000 h	°C	IEC 60216-1	140
Halbzeitintervall (Schlagzugzähigkeit)		°C	IEC 60216-1	9.3
Relativer Temperaturindex (Schlagzugzähigkeit)		°C	UL 746B	125
Temperaturindex (elektrische Festigkeit)	20000 h	°C	IEC 60216-1	160
Halbzeitintervall (elektrische Festigkeit)		°C	IEC 60216-1	11.4
Relativer Temperaturindex (elektrische Festigkeit)		°C	UL 746B	140
Glühdrahtprüfung (GWFI)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	650
Brennverhalten US-FMVSS302			ISO 3795	passed
Elektrische Eigenschaften (23 °C/50 % r. F.)				
C Relative Dielektrizitätszahl	100 Hz	-	IEC 60250	3.8
C Relative Dielektrizitätszahl	1 MHz	-	IEC 60250	3.6
C Spezifischer Durchgangswiderstand		Ohm·m	IEC 60093	>1E13
C Spezifischer Oberflächenwiderstand		Ohm	IEC 60093	>1E15
C Elektrische Festigkeit	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	30
C Vergleichszahl zur Kriechwegbildung CTI	Prüflösung A	Stufe	IEC 60112	350
Elektrolytische Korrosionswirkung		Stufe	IEC 60426	A 1
Sonstige Eigenschaften (23 °C)				
C Wasseraufnahme (Sättigungswert)	Wasser bei 23 °C	%	ISO 62	0.4
C Wasseraufnahme (Gleichgewichtswert)	23 °C; 50 % r.F.	%	ISO 62	0.2
C Dichte		kg/m ³	ISO 1183	1460
Schüttdichte		kg/m ³	ISO 60	700
Formmasse-spezifische Eigenschaften				
C Viskositätszahl		cm ³ /g	ISO 1628-5	100
Herstellbedingungen für Probekörper				
C Spritzgießen-Massetemperatur		°C	ISO 294	260
C Spritzgießen-Werkzeugtemperatur		°C	ISO 294	80
Verarbeitungsempfehlungen				
Trocknungszeit Umlufttrockner		h	-	4-8
Trocknungstemperatur Umlufttrockner		°C	-	120
Restfeuchtigkeit		%	nach Karl Fischer	0-0.02
Massetemperatur (Tmin - Tmax)		°C	-	250-270
Werkzeugtemperatur		°C	-	80-100

Abbildung 77: Produktdatenblatt für PBT GF20 (Pocan B 3225) Seite 2 [9].

9.4 Koeffizienten

9.4.1 Carreau-WLF-Koeffizienten für PA 66

Tabelle 19: Carreau-WLF Koeffizienten (Viskosität) für PA 66 (Durethan AC 30).

Koeffizient	Wert	Einheit
P1	205,48	Pa s
P2	22,83E-04	s
P3	54,19E-02	1
T ₀	285	°C
T _s	68,12	°C

9.4.2 Carreau-WLF-Koeffizienten für PBT GF20

Tabelle 20: Carreau-WLF Koeffizienten (Viskosität) für PBT GF20 (Pocan B 3225).

Koeffizient	Wert	Einheit
P1	556,22	Pa s
P2	16,94E-03	s
P3	42,14E-02	1
T ₀	260	°C
T _s	91,96	°C

9.4.3 IKV-Koeffizienten für PA 66

Tabelle 21: IKV-Koeffizienten (pvT) für PA 66 (Durethan AC 30).

Koeffizient	Wert	Einheit
PM1	45391	bar cm ³ /g
PM2	1,27	bar cm ³ /(g K)
PM3	2730,3	bar
PM4	50014	bar
PS1	160950	bar cm ³ /g

PS2	1,6536	bar cm ³ /(g K)
PS3	3023,8	bar
PS4	189620	bar
PS5	11,01E-06	cm ³ /g
PS6	32,79E-03	1/K
PS7	98,23E-05	1/bar
PS8	246,86	°C
PS9	20,96E-03	1/bar

9.4.4 IKV-Koeffizienten für PBT GF20

Tabelle 22: IKV-Koeffizienten (pvT) für PBT GF20 (Pocan B 3225).

Koeffizient	Wert	Einheit
PM1	20329,64	bar cm ³ /g
PM2	3,13	bar cm ³ /(g K)
PM3	8163,55	bar
PM4	29138,276	bar
PS1	46070,891	bar cm ³ /g
PS2	4,03	bar cm ³ /(g K)
PS3	19468,64	bar
PS4	67004,68	bar
PS5	38,83E-07	cm ³ /g
PS6	47,90E-03	1/K
PS7	18,91E-04	1/bar
PS8	195,70	°C
PS9	29,53E-03	1/bar

9.5 Berechnungsbeispiel zur Reduzierung des Volumenstromes

Tabelle 23: Ausgangswerte für die Berechnung des reduzierten Volumenstromes unter Berücksichtigung einer 1 mm dicken Kalkschicht.

Volumenstrom	Kanaldurchmesser	Kinematische Viskosität	Prandlt Zahl	Verlustfaktor
Vdot	d	ν	Pr	ρ
(l/min)	(mm)	$10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$	(1)	%
5	8	0,658	4,36	7

Die in Tabelle 23 aufgelisteten Werte beziehen sich auf das Kühlmedium Wasser bei 40 °C. In den folgenden Gleichungen wird der in Kapitel 5.4.4 erwähnte reduzierte Volumenstrom von 9,13 l/min berechnet. λ bezieht sich auf die Wärmeleitfähigkeit des Wassers und beträgt 0,627 W/(mK) bei einer Wassertemperatur von 40 °C. Der Volumenstrom von 5 l/min entspricht dem Volumenstrom in einem der beiden Kühlkanäle der Spritzseite. Das Ergebnis wird mit zwei multipliziert um wieder auf den Volumenstrom des Kühlgeräts zu kommen. Alle Einheiten wurden auf SI-Einheiten umgerechnet und eingesetzt.

Berechnung der Geschwindigkeit v :

$$v = \frac{4 * \dot{V}}{d^2 * \pi} \quad (3)$$

$$v = 1,65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Berechnung der Reynolds-Zahl Re :

$$Re = \frac{v * d}{\nu} \quad (4)$$

$$Re = 20156,40 \text{ (20124 laut Simulation)}$$

Berechnung der Nusselt-Zahl Nu :

$$Nu = 0,0214 * Re^{0,8} * Pr^{0,37} \quad (5)$$

$$Nu = 102,46$$

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α :

$$\alpha = \frac{\text{Nu} * \lambda}{d}$$

$$\alpha = 8030,30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (6)$$

Berechnung des reduzierten Wärmeübergangs α_{neu} :

$$\alpha_{\text{neu}} = \alpha * (1 - \rho)$$

$$\alpha_{\text{neu}} = 7468,18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (7)$$

Berechnung von Nu_{neu} :

$$\text{Nu}_{\text{neu}} = \frac{\alpha_{\text{neu}} * d}{\lambda}$$

$$\text{Nu}_{\text{neu}} = 95,29 \quad (8)$$

Berechnung von Re_{neu} :

$$\text{Re}_{\text{neu}} = \left(\frac{\text{Nu}_{\text{neu}}}{0,0214 * \text{Pr}^{0,37}} \right)^{0,8}$$

$$\text{Re}_{\text{neu}} = 1840843 \quad (9)$$

Berechnung von v_{neu} :

$$v_{\text{neu}} = \frac{\text{Re}_{\text{neu}} * \nu}{d}$$

$$v_{\text{neu}} = 1,51 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (10)$$

Berechnung des neuen, reduzierten Volumenstromes:

$$\dot{V}_{\text{neu}} = \frac{d^2 * \pi * v_{\text{neu}} * 2}{4}$$

$$\dot{V}_{\text{neu}} = 9,13 \frac{\text{l}}{\text{min}} \quad (11)$$

9.6 Erläuterung des Optimierungsfensters in CQC

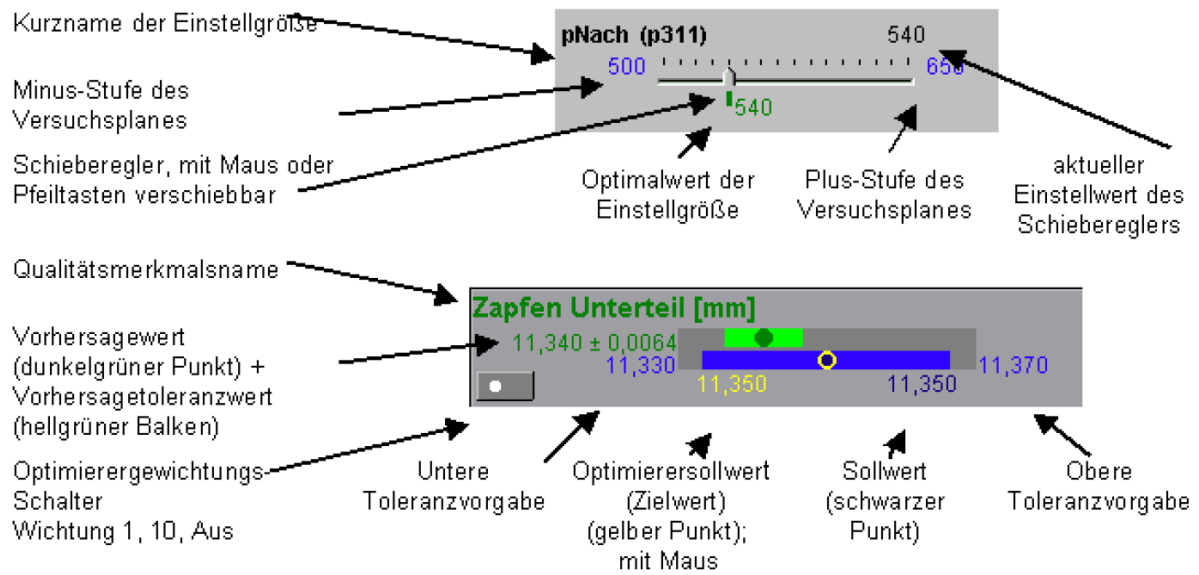


Abbildung 78: Beschreibung der Optimierung in CQC [5].