



Masterarbeit

Heizzeitverkürzung für den Elastomerspritzguss mittels eines Heiz-Scher-Mischteiles

verfasst von

Leonhard Perko, Bsc

eingereicht am 15.06.2009



Institut für Kunststoffverarbeitung

Vorstand: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Clemens H. Holzer

Montanuniversität Leoben

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.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Auftrag der **Firma Engel Austria GmbH** in Zusammenarbeit mit dem **Institut für Kunststoffverarbeitung** an der **Montanuniversität Leoben**.

Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Clemens H. Holzer, dem Vorstand des Institutes für Kunststoffverarbeitung, gilt mein Dank für die Durchsicht dieser Arbeit.

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Walter Friesenbichler und **Dipl.-Ing Artur Fertschej** danke ich für die Betreuung dieser Arbeit seitens der Universität.

Von der **Firma Engel Austria GmbH** danke ich besonders Herrn **Dipl.-Ing Dr. Georg Steinbichler** für die Vermittlung und der Unterstützung bei der Durchführung, sowie Herrn **Ing. Friedrich Kühberger** und Herrn **Dipl.-Ing. Erich Hochreiter** für die Betreuung der Diplomarbeit.

Den Mitarbeiterinnen des physikalischen Labors der **Firma Semperit Technische Produkte GmbH** danke ich für die Unterstützung bei der Prüfung der produzierten Formteile.

Den Institutsangehörigen **Dipl.-Ing Ivica Duretek**, **Dipl.-Ing. Stephan Schuschnigg**, **Ing. Rudolf Schatzer**, **Anja Germuth** sowie den Mitarbeitern der **Firma Engel Austria GmbH** **Ing. Andreas Brunner**, **Reiner Langohr** und **Thomas Gradl** danke ich für die Unterstützung in den verschiedenen Phasen der Arbeit.

Ich danke **meinen Eltern**, die mir dieses Studium ermöglicht haben, und mir nicht nur in dieser Zeit stets mit Rat und Unterstützung zur Seite standen.

Kurzfassung

Das Spritzgießen ist eines der am weitest verbreiteten Verfahren zur Herstellung von Formteilen aus Gummi. Bei Elastomeren stellt die Heizzeit den größten Anteil an der Zykluszeit dar, die aufgrund von Maschinenstunden und Arbeitszeit ein maßgeblicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit einer Produktion ist.

Um eine Reduktion der Heizzeit zu erreichen, wird eine Vorwärmung des Materials während des Einspritzens angestrebt. Die dazu benötigte Energie soll durch Scherung bzw. Wärmeleitung eingebracht werden.

Für die durchgeführten Versuche wurde ein am IKV Leoben entwickeltes Heiz-Scher-Mischteil verwendet. Es ist auf einem Werkzeug montiert, das zur rheologischen Charakterisierung von Kautschuken konzipiert ist.

In den Versuchen wurden die Einflüsse des Materials, diverser Mischteilmodifikationen, der Zylindertemperatur sowie der Einspritzgeschwindigkeit betrachtet. Anschließend wurden die produzierten Formteile auf Härte, Druckverformungsrest, Reißfestigkeit und Reißdehnung untersucht, um die erreichbaren Heizzeitverkürzungen an diesen Materialien festlegen zu können.

Die Versuche zeigten, dass mit dem vorhandenen Mischteil eine erhebliche Heizzeitverkürzung realisierbar ist. Es wurden je nach Schärfe der gewählten Bedingungen signifikante Temperaturerhöhungen im eingespritzten Material festgestellt, dadurch ist eine Heizzeitverkürzung von bis zu 50% möglich. Dieser Wert ist allerdings stark von der Kautschukmischung und der Dicke des Formteils abhängig.

Eine direkte maschinenbauliche Umsetzung dieses Werkzeugkonzeptes scheitert momentan jedoch am zu großen Materialverlust durch den Anguss.

Im Anschluss an die Versuche wurde eine Simulation mit der Software Polyflow durchgeführt. Dazu wurde einerseits das Mischteil vereinfacht dargestellt und andererseits wurde ein kurzer, intensiver Scherschlitz modelliert. Es zeigte sich, dass mit dem Schlitz ähnliche Temperaturerhöhungen wie mit dem Mischteil möglich sind, allerdings treten hier höhere Druckverluste auf.

Abstract

Injection moulding is one of the most used methods to produce rubber parts. For rubbers the curing time is the biggest part of the cycle time, which is an important factor for the efficiency of the production due to machine and working hours.

For the reduction of the curing time preheating of the material during the injection process is needed. The energy is brought into the rubber by shearing and heat conduction.

For the experiments a shear-heat-mixing device is used. It was developed at the IKV Leoben. It is mounted on a mould that was used for the rheological characterization of rubber compounds.

In the experiments the influence of the material, modifications of the mixing device, the barrel temperature and the injection speed were investigated. After this the hardness, the compression set, the tensile strength and the elongation at break of the produced parts were tested to determine the reduction of the curing time in dependence of the material.

The experiments proved that a significant reduction of curing time can be realized with the mixing device used. Depending on the modification of the device relevant rises in the melt temperature were detected, which lead to a cure time reduction up to 50%. But these values are strongly dependent on the rubber compound and the part's thickness.

A direct constructive realization of this mixing device is not possible at the moment because of the material loss in the gate and the mixing device.

After the experiments a simulation was done using the simulation software Polyflow. The mixing device and another unheated, short and intense shear gap were modelled. The simulation showed that similar temperatures can be realized with both geometries but the short gap causes higher losses in pressure.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2	GRUNDLAGEN UND THEORIE	3
2.1	VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON ELASTOMERFORMTEILEN [2].....	3
2.1.1	<i>Spritzgießen von Elastomeren</i>	5
2.2	SYSTEME ZUR HEIZZEITVERKÜRZUNG.....	6
2.2.1	<i>EFE Spritzsystem [3]</i>	7
2.2.2	<i>FlowControl+ [4]</i>	8
2.3	VULKANISATIONSVERHALTEN [1]	8
2.4	MESSMETHODE ZUR MESSUNG DER MASSETEMPERATUR.....	11
2.4.1	<i>Infrarotsensoren (IRS) [6]</i>	11
2.5	PRÜFMETHODEN ZUR UNTERSUCHUNG DER FORMTEILE.....	12
2.5.1	<i>Shore Härte nach DIN 53505</i>	12
2.5.2	<i>Druckverformungsrest (DVR) nach DIN 52517</i>	13
2.5.3	<i>Zugversuch nach ISO 37.....</i>	14
3	EXPERIMENTELLER TEIL.....	15
3.1	MASCHINEN UND WERKZEUGE	15
3.1.1	<i>Spritzgießmaschine</i>	15
3.1.2	<i>Werkzeug.....</i>	15
3.1.3	<i>Heiz-Scher-Mischteil.....</i>	17
3.2	MESSENSORIK.....	20
3.2.1	<i>Infrarotfühler</i>	20
3.2.2	<i>Drucksensoren.....</i>	21
3.2.3	<i>Messdatenüberwachungssystem</i>	22
3.2.4	<i>Einbauschema der Sensoren</i>	22
3.2.5	<i>Auswertung der Ergebnisse</i>	23
3.3	VERWENDETE MATERIALIEN.....	27
4	VERSUCHE.....	28
4.1	VORVERSUCHE	28
4.1.1	<i>Durchführung.....</i>	28
4.1.2	<i>Messwerte</i>	28
4.1.3	<i>Interpretation.....</i>	32
4.2	HAUPTTEIL.....	33
4.2.1	<i>Durchführung.....</i>	33
4.2.2	<i>Messwerte aus dem Prozess</i>	34
4.2.3	<i>Messwerte aus der Formteilprüfung</i>	37
4.2.4	<i>Heizzeitverkürzung</i>	44
4.3	ZUSATZVERSUCHE	50
4.3.1	<i>Durchführung.....</i>	50
4.3.2	<i>Ergebnisse.....</i>	51

Inhaltsverzeichnis

4.3.3	<i>Interpretation</i>	52
4.4	SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN VERSUCHEN.....	53
5	SIMULATION UND BERECHNUNGEN	54
5.1	SIMULATION	54
5.1.1	<i>Geometrie</i>	54
5.1.2	<i>Materialdaten</i>	55
5.1.3	<i>Durchführung</i>	57
5.1.4	<i>Ergebnisse</i>	57
5.1.5	<i>Interpretation</i>	61
5.2	BERECHNUNGEN	62
5.2.1	<i>Formeln</i>	62
5.2.2	<i>Durchführung</i>	64
5.2.3	<i>Ergebnisse</i>	64
5.2.4	<i>Interpretation</i>	66
6	ZUSAMMENFASSUNG	67
7	LITERATURANGABEN	68
8	VERWENDETE ABKÜRZUNGEN	70
9	ANHANG	73
9.1	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	73
9.2	DATEN	77
9.3	PROGRAMMCODE	84

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Spritzgießen ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung von Formartikeln aus Gummi. Das Material wird durch eine Schnecke gefördert und anschließend kalt in ein heißes Werkzeug eingespritzt, um dort vulkanisiert zu werden. Die Heizzeit ist dabei der für die Zykluszeit maßgebliche Teil. Aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Materials dauert das Heizen durch reine Wärmeleitung gerade bei dicken Bauteilen extrem lange und wirkt sich dabei stark auf die gesamte Zykluszeit aus. Eine möglichst niedrige Zykluszeit hat in der Praxis eine wichtige Bedeutung. Durch Maschinenstunden und Arbeitszeit wirkt sie sich direkt auf die Herstellungskosten von Formteilen aus und ist maßgeblich für eine wirtschaftliche Produktion.

Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Arbeit mit der Reduzierung der Heizzeit im elastomeren Spritzguss. Das verwendete Prinzip ist das Vorwärmen der Kautschukmischung mittels Schererwärmung und Wärmeleitung während des Einspritzens. Dazu wird ein an der Montanuniversität Leoben entwickeltes Werkzeugkonzept wieder aufgegriffen.

Im Jahre 1996 wurde am Institut für Kunststoffverarbeitung ein Spritzgießmaschinenrheometer zur praxisnahen Charakterisierung von Kautschuken entwickelt [1]. Um eine genaue Messung der temperaturabhängigen Viskosität zu gewährleisten, musste man eine thermisch homogene Schmelze im Messspalt voraussetzen. Um dies auch in der Praxis zu gewährleisten, wurde eigens für dieses Rheometer ein Scher-Mischteil entwickelt, das für eine ausgeglichene Temperaturverteilung im Schmelzefluss sorgen soll. Als weiterer Effekt war die Vorwärmung des Materials beim Durchfließen des Mischteils erwünscht, um die Kautschukmischung auf Werkzeugtemperatur zu bringen.

In der Dissertation von Holzer [1] wird von potenziellen Heizzeitreduktionen durch das Mischteil von rund 10% berichtet. Diese Angaben beziehen sich jedoch auf eine grob vereinfachte Berechnung mit der Software Mathcad.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wird das Mischteil auf seine Tauglichkeit für den Einsatz in der Praxis der Kautschukverarbeitung geprüft. Als Versuchsgerät dient das originale Spritzgießmaschinenrheometer, jedoch wird auf dessen ursprüngliche Funktion der Viskositätsmessung kein Wert gelegt. Einzig das Mischteil selbst wird untersucht. Dabei soll herausgefunden werden, wie weit die Heizzeit in

der Praxis wirklich herabgesetzt werden kann und welche Einflüsse sich auf die Qualität des produzierten Formteils ergeben.

Als weiteres Werkzeug für diese Arbeit steht die Simulation mittels Polyflow zur Verfügung. Mit ihrer Hilfe sollen die Versuchsergebnisse überprüft werden bzw. ein neuer Weg der Umsetzung eines Systems zur Heizzeitverkürzung gefunden werden.

Ziel dieser Arbeit ist, die Funktionsweise und die Wirkung des Heiz-Scher-Mischteils im Hinblick auf die praktische Anwendung in der Elastomerverarbeitung zu untersuchen und zu charakterisieren. Weiters soll ein Konzept für eine Anwendung in der Praxis entworfen werden, wenn entsprechende Heizzeitverkürzungen möglich sind.

2 Grundlagen und Theorie

2.1 Verfahren zur Herstellung von Elastomerformteilen [2]

Das Spitzgießen ist neben dem Pressen und dem Transferpressen eines der häufigsten Verfahren zur Herstellung von Formartikeln im Elastomerbereich. Es eignet sich hervorragend zur Herstellung kleiner bis mittelgroßer Formteile in einem zyklischen Prozess von Plastifizieren, Einspritzen, Vulkanisieren und Entformen.

Die primären Vorteile gegenüber dem Pressen liegen in der Erzielung kürzerer Vulkanisations- bzw. Zykluszeiten und den besseren Möglichkeiten zur Automatisierung.

Beim Pressen wird ein Rohling aus Gummimischung in die Form eingelegt und mittels Hydraulik verpresst. Die benötigte Wärmemenge zur Vulkanisation wird in diesem Verfahren rein durch Wärmeleitung hinzugeführt, was speziell bei dicken Formteilen zu sehr langen Zykluszeiten führt. Des Weiteren ist manuelles Handling notwendig und die Vorbereitung des Rohlings ist meist recht aufwändig. Die Formgenauigkeit der produzierten Formteile ist außerdem nicht hoch. Als Vorteile des Pressverfahrens seien die niedrigen Investitionskosten in Maschine und Werkzeug angeführt. Abbildung 1 zeigt eine Prinzipskizze des Pressvorgangs.

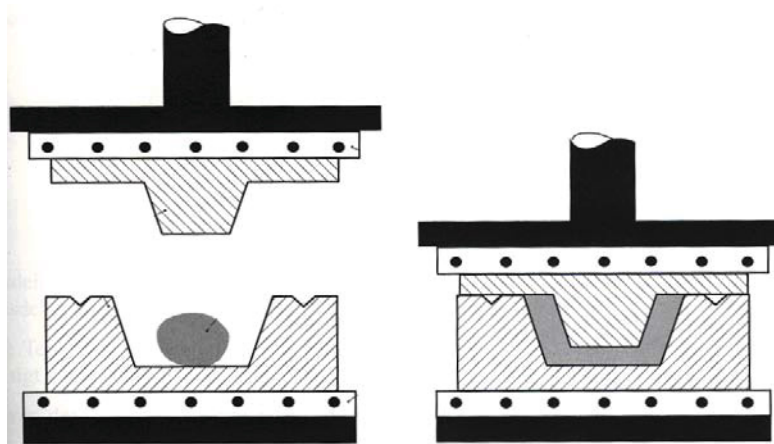


Abbildung 1: Prinzip des Pressens von Kautschukmischungen [2]

Das Transferpressen funktioniert ähnlich wie das Pressen, jedoch besteht das Werkzeug aus drei Platten, wobei der Rohling zwischen oberster und mittlerer Platte eingebracht und während des Verpressens durch Schmelzkanäle in die untere Kavität gelangt, in der das eigentliche Formteil ausgeprägt wird. Die Vorteile

gegenüber dem einfachen Pressen liegen in den erheblich kürzeren Zykluszeiten, die darauf zurückzuführen sind, dass die Masse beim Durchfließen der Schmelzkanäle durch Scherung erwärmt wird und so weniger Heizzeit für die vollständige Durchwärmung des Formteils nötig ist. Abbildung 2 verdeutlicht dieses Prinzip. Ein erheblicher Nachteil ist der Abfall, der durch den im oberen Bereich zurückbleibenden Restkuchen entsteht.

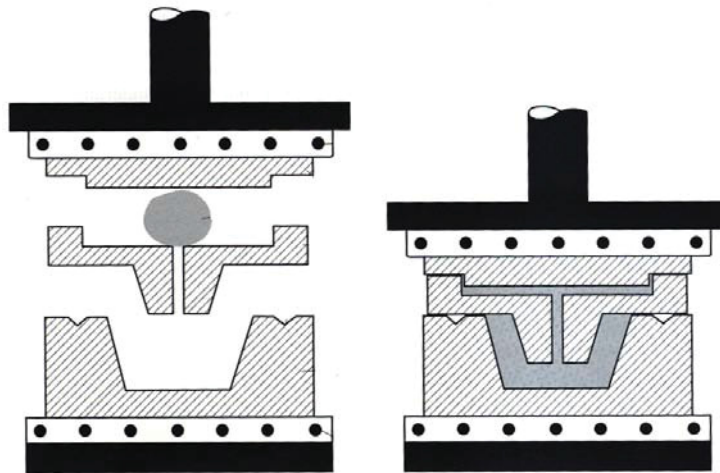


Abbildung 2: Prinzip des Transferpressens von Kautschuken [2]

Das Spritzgießverfahren ermöglicht die höchste Präzision bei der Maßhaltung sowie die kürzesten Zykluszeiten im Bereich der Formteilmfertigung von Elastomeren. Die Kautschukmischung wird durch eine Schnecke gefördert und dabei durch Einwirkung mechanischer und thermischer Energie plastifiziert. Bereits hier findet die Einbringung der zur Verarbeitung notwendigen Energie nicht nur durch Wärmeleitung, sondern vor allem durch Reibungsarbeit („Dissipation“) statt. Anschließend wird in die heiße Kavität eingespritzt. Auch hier wird Energie durch Scherung in die Mischung eingebracht, wobei weit höhere Drücke als beim Transferpressen möglich sind, da der zum Einspritzen benötigte Druck von einer separaten Hydraulikeinheit aufgebracht wird. Entsprechend höher sind die Temperaturen der Mischung zu Beginn der Heizzeit. Anschließend werden die Formteile teils händisch, teils automatisch entformt. Abbildung 3 veranschaulicht das Spritzgießverfahren.

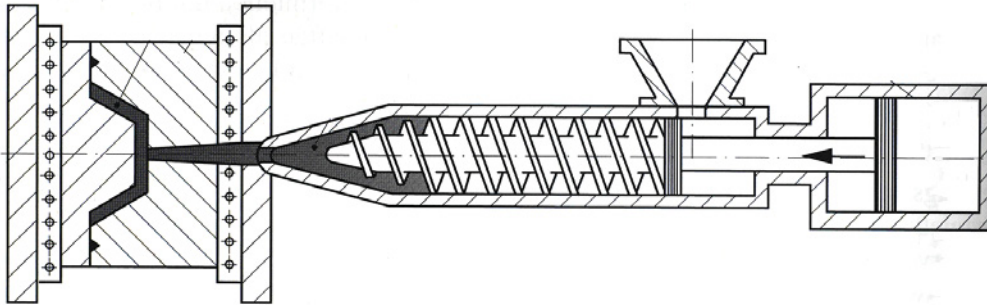


Abbildung 3: Prinzip des Spritzgießens von Kautschukmischungen [2]

Die Vorteile des Spritzgießverfahrens gegenüber den anderen Verfahren zur Herstellung von Formteilen im Elastomerbereich liegen klar auf der Hand:

- ✓ höhere Maßgenauigkeit,
- ✓ kürzere Zykluszeiten,
- ✓ bessere Automatisierbarkeit,
- ✓ gute Eignung zur Massenfertigung großer Stückzahlen.

2.1.1 Spritzgießen von Elastomeren

Wie bereits erwähnt, besteht ein Zyklus des Spritzgießens aus Plastifizieren, Einspritzen, Vulkanisieren und Entformen. Diese Teilschritte werden in diesem Kapitel näher betrachtet und die Unterschiede zur Verarbeitung von Thermoplasten aufgezeigt.

Der Rohstoff, also die Kautschukmischung, wird in Form eines Streifens oder manchmal auch in Form von Granulat bereitgestellt. Wesentlicher Unterschied zur Thermoplastverarbeitung ist, dass man es nicht immer mit fertigen Rohstoffmischungen zu tun hat. In der Gummiindustrie ist es durchaus üblich, dass die Verarbeiter den Kautschuk und die diversen anderen Bestandteile einer Mischung (Vernetzer, Stabilisatoren, etc.) selbst kaufen und im eigenen Betrieb vor der eigentlichen Verarbeitung selbst abmischen. Daraus ergibt sich, dass es am Markt eine unüberschaubare Zahl an verwendeten Mischungen gibt, die sich sowohl chemisch, als auch physikalisch stark unterscheiden.

Der Rohstoff wird zuerst von der Schnecke eingezogen und dann gegen den einstellbaren Staudruck gefördert. Dabei wird das Material durch den Wärmestrom

von der Zylinderwand her und durch die Scher- und Reibungsarbeit der Schnecke erwärmt und plastifiziert. Der einzige Unterschied zur Verarbeitung von Thermoplasten stellt sich in der Wahl der Temperatur dar. Bei Thermoplasten muss man Temperaturen jenseits der Schmelztemperatur erreichen, um eine fließfähige Schmelze zu erhalten. Bei Elastomeren ist es wichtig, dass das Material unter der Vulkanisationstemperatur bleibt, um frühzeitiges Anvulkanisieren zu verhindern.

Es gibt sowohl Aggregate, die in einen Schneckenorraum fördern, als auch solche, die in einen separaten Einspritzzylinder fördern. Hier spricht man von Kolbeninjektion mit Schneckenvorplastifizierung.

Nach erfolgter Plastifizierung wird eingespritzt. Hierbei erhöht sich die Massetemperatur ein weiteres Mal durch erneuter Umsetzung von Reibungs-, Scher- und Druckenergie. Es werden hier weit höhere Drücke (bis zu 2000 bar) als beim Transferpressen erzielt, da diese durch ein separates Hydraulikaggregat aufgebracht werden. Aus diesem Grund ist die Temperatur der Schmelze am Beginn des Heizens höher als beim Pressen oder Transferpressen.

Danach wird das Formteil geheizt, bis die Vulkanisation abgeschlossen ist. Die Temperierung erfolgt mittels Öl-Temperiergerät oder mittels im Werkzeug platzierten elektrischen Heizungen. Hier zeigt sich erneut ein wesentlicher Unterschied zur Verarbeitung von Thermoplasten. Thermoplaste werden zuerst aufgeschmolzen, dann eingespritzt und anschließend vom Werkzeug bis zur Erstarrung gekühlt. Bei der Verarbeitung von Gummi wird die Kautschukmischung zuerst nur vorgewärmt und relativ kalt (ca. 80°C) eingespritzt und dann im Werkzeug zur Vulkanisation aufgeheizt.

Die Entformung geschieht, indem sich das Werkzeug öffnet und das Formteil manuell oder durch ein entsprechendes Handlingsystem entnommen wird. Es bleibt noch zu erwähnen, dass die Automatisierung an dieser Stelle in der Kautschukindustrie noch nicht so weit fortgeschritten ist wie im Thermoplastbereich.

2.2 Systeme zur Heizzeitverkürzung

Um die Vorteile des Spritzgussprozesses weiter auszubauen, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Verkürzung der Heizzeit für Elastomeranwendungen. Die Idee ist es, möglichst viel Energie während des Einspritzvorganges in das Material einzubringen, damit die anschließend benötigte Heizzeit möglichst gering ausfällt.

Hierzu sind bereits einige Konzepte auf dem Markt, die nach eben diesem Prinzip funktionieren. Da diese Systeme erst seit kurzem erhältlich sind, gibt es dazu keinerlei Veröffentlichungen. Die einzig zugänglichen Informationen, auf die hier Bezug genommen wird, sind Datenblätter, die der Anwerbung von Kunden dienen und leider nur grobe Informationen über die Funktionsweise dieser Systeme geben.

2.2.1 EFE Spritzsystem [3]

Die Firma LWB Steinl (Altdorf, Deutschland) bietet das so genannte Spritzsystem EFE an. Es besteht aus einem FIFO (First In- First Out) Aggregat (Abbildung 4, Position 2) zur Plastifizierung der Gummimischung. Anschließend wird durch einen Scherspalt (Abbildung 4, Position 3) in einen evakuierten Zylinder eingespritzt. Dadurch wird das Material weiter erwärmt und näher an die Vulkanisationstemperatur heran gebracht. Anschließend wird durch einen Kolben (Abbildung 4, Position 4) sämtliches Material mit hohem Druck aus dem Zylinder ausgespritzt und das Werkzeug gefüllt. Dieser Zylinder wird auch als „All Out“-Aggregat bezeichnet, da laut Hersteller kein restliches Material im Zylinder zurück bleibt, das ggf. anvulkanisieren könnte. Dieses System wird mit dem Argument der Heizzeitverkürzung von bis zu 50% vermarktet. Die Abbildung 4 veranschaulicht das Prinzip des „All Out“-Aggregats.

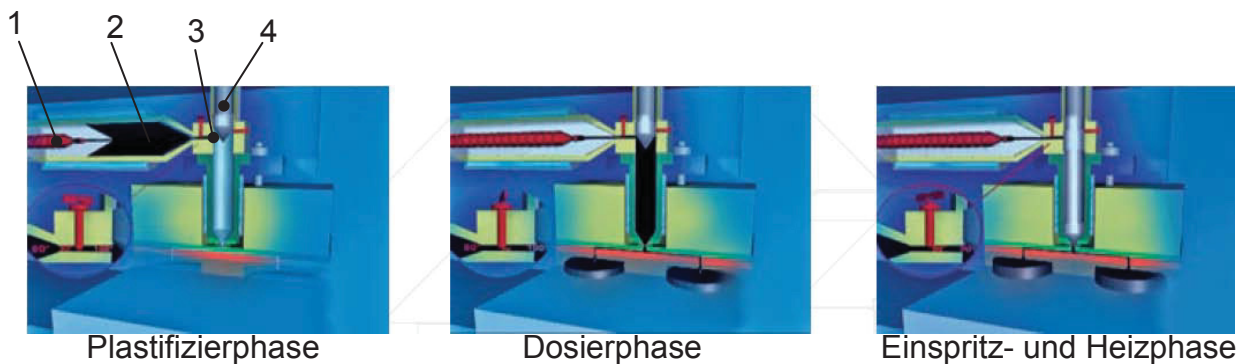


Abbildung 4: Prinzip des EFE Spritzsystems [3], 1 Plastifizierschnecke, 2 FIFO-Aggregat, 3 Scherspalt, 4 Einspritzkoben (evakuierter Zylinder)

Fraglich bleibt hier, wie groß die Gefahr der vorzeitigen Vulkanisation ist, da das Material einen erheblich längeren Fließweg zurücklegt. Es wird zweimal durch einen kurzen intensiven Scherspalt eingespritzt. Einmal von der Plastifiziereinheit in das „All Out“-Aggregat und ein zweites Mal von dort aus in die Kavität. Dabei wird das Material für eine kurze Zeit immensen Scherbelastungen ausgesetzt, deren Einfluss auf die Formteilqualität noch weitgehend ungeklärt ist.

Außerdem werden keinerlei Maßnahmen zur thermischen Homogenisierung der Mischung getroffen. Wird die Erhöhung des Drucks und damit der Scherbeanspruchung der Schmelze nur durch enge Querschnitte erzielt, kann das zu Problemen führen, da in einem einfachen Scherspalt kein homogenes Temperaturfeld herrscht. Das bedeutet ungleichmäßige Erwärmung der verschiedenen Schichten, was zu Temperaturspitzen in den Randbereichen führen kann [2].

2.2.2 FlowControl+ [4]

Die Firma Desma (Fridingen, Deutschland) bietet das System FlowControl+ an. Dies ist ein umfassendes Kaltkanalsystem, das über mehrere Nadelverschlussdüsen verfügt. Jede dieser Verschlussdüsen wird separat über einen Hydraulikzylinder angesteuert. Das System kennt jedoch nicht nur die beiden Positionen „auf“ und „zu“, sondern es können auch sämtliche Zwischenpositionen auf 0,1 mm genau angesteuert werden. So kann der Druckverlust an der Düsenspitze genau geregelt werden und damit auch die durch den Druckverlust erzeugte Erwärmung der Gummimischung.

Die exakte Regulierung des Schmelzefflusses und der damit verbundenen Schererwärmung, die dieses System ermöglicht, bringt etliche Vorteile mit sich. Jedoch wurden auch hier keinerlei Maßnahmen zur Schmelzehomogenisierung getroffen, was zu lokalen Überhitzungen und einer generellen Temperaturinhomogenität führen kann. Außerdem bewirken halb geschlossene Nadelverschlussdüsen einen erheblichen Druckverlust, der durch eine erhöhte Einspritzleistung ausgeglichen werden muss [2].

2.3 Vulkanisationsverhalten [1]

Neben den rheologischen Eigenschaften, die auch bei Thermoplasten gemessen werden, ist bei Gummi auch das Vulkanisationsverhalten von Bedeutung. Dies ist ein entscheidender Faktor in der Prozessführung und hat starken Einfluss auf die Verarbeitung und die Qualität der erhaltenen Formteile.

Die Vulkanisation teilt man im Allgemeinen in drei Phasen:

- Inkubationsphase,
- Vernetzungsphase,
- Kühlphase.

Die Inkubationsphase ist die Zeit, in der bereits die für die Vulkanisation benötigten Randbedingungen herrschen, jedoch noch keine Reaktion stattfindet. Die Vernetzungsphase ist die Phase der eigentlichen Reaktion und die Kühlphase ist die Zeit, in der nicht mehr geheizt wird.

Die Inkubations- und die Vernetzungsphase können durch Zugabe von Verzögerern und Beschleunigern gesteuert werden. Verzögerer sollen das vorzeitige ungewollte Anvulkanisieren der Mischung verhindern. Beschleuniger hingegen setzen die Vernetzung nach erfolgter Aktivierung erst richtig in Gang. Diese Komponenten sollten möglichst exakt aufeinander abgestimmt werden, um eine vorzeitige Vernetzung in der Plastifiziereinheit zu verhindern, jedoch sollte das Material nach dem Einspritzen möglichst schnell ausvulkanisiert sein. Dies alles sind entscheidende Faktoren für die Prozess-Sicherheit und die Wirtschaftlichkeit der Verarbeitung.

Gemessen wird das Vulkanisationsverhalten mithilfe eines Vulkameters. Für diese Messung wird das Material bei einer bestimmten Temperatur vorgelegt und oszillierend belastet. Die Apparatur kann als Linearschub- oder Torsionsschubvulkameter ausgeführt sein. Gemessen wird jeweils die Schubkraft bzw. das Drehmoment. Aufgezeichnet werden so genannte Vernetzungsisotherme oder auch Vulkanisationskurven. So wird die Einhüllende der zeitlichen Änderung des Drehmoments bezeichnet. Abbildung 5 zeigt das Schema einer Vulkameterkurve bei zwei verschiedenen Temperaturen.

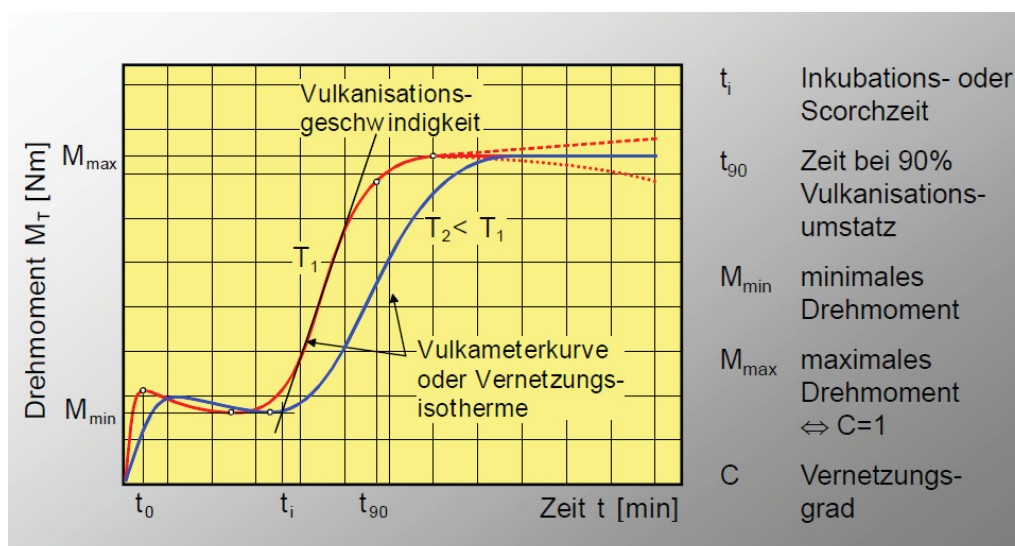


Abbildung 5: Reaktionsumsatz anhand von Vulkameterkurven [5]

Anhand dieser Vukameterkurven kann das Vulkanisationverhalten veranschaulicht werden. Man erkennt sehr schön die Inkubationszeit t_i , da es eine Zeit lang dauert, bis die Reaktion richtig in Gang kommt. Weiters ist hier die Einwirkung unterschiedlicher Temperaturen verdeutlicht. Mit der Temperatur ändern sich auch die Inkubationszeit, die Zeit, die für die gesamte Vernetzung benötigt wird, und auch die Steigung der Vernetzungsisothermen.

Die Inkubationszeit wird durch den Scorch-Index beschrieben. Dieser ist in Gleichung 1 definiert.

$$S = \int_t \frac{dt}{t_i(T)} \quad (1)$$

S Scorch-Index

t Zeit in s

t_i Inkubationszeit in s

T Temperatur in K

Gleichung 2 beschreibt weiters die Temperaturabhängigkeit der Inkubationszeit.

$$t_i(T) = t_i(T_0) \cdot e^{-\frac{E_{t_i}}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (2)$$

E_{t_i} Aktivierungsenergie für die Inkubationszeit in J/mol

R Universelle Gaskonstante, 8,31 J/(mol*K)

T_0 Bezugstemperatur in K

Ist die Inkubationszeit erreicht, also wenn der Scorch Index 1 beträgt, beginnt die Vernetzungsphase. Hier findet die Brückenbildung zwischen den Makromolekülen statt. Man beschreibt diese Reaktion durch die Änderung des Reaktionsumsatzes (Gleichung 3).

$$x = 100 \cdot \left(1 - e^{-k \cdot (t - t_i)} \right) \quad (3)$$

x Reaktionsumsatz in %

k Temperaturabhängige Vernetzungsgeschwindigkeitskonstante in s

Die Vernetzungsgeschwindigkeit ist wie die Inkubationszeit ebenfalls temperaturabhängig, was ebenfalls durch eine Arrhenius-Funktion beschrieben wird (Gleichung 4).

$$k(T) = k(T_0) \cdot e^{-\frac{E_k}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (4)$$

E_k Aktivierungsenergie für die Vernetzungsgeschwindigkeitskonstante in J/mol

In der Kühlphase, also nach Entformen des Formteils, finden noch Nachvernetzungsreaktionen statt. Es ist also nicht notwendig, bis zur vollständigen Durchvernetzung zu heizen, sondern es kann bereits früher entformt werden. Aufgrund der nur schwer zu erfassenden Randbedingungen verzichtet man jedoch auf eine Simulation dieser dritten Phase. In der Praxis behilft man sich meist mit Erfahrungswerten. Dünne Bauteile (bis 5 mm Dicke) entformt man bei ca. 85% mittleren Reaktionsumsatz, dicke Bauteile sollten im Zentrum mindestens 50% Umsatz erreicht haben, bevor sie entformt werden.

2.4 Messmethode zur Messung der Massetemperatur

2.4.1 Infrarotsensoren (IRS) [6]

Aufgrund der Wärmebewegung seiner Moleküle sendet jeder Körper elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich aus. Die Intensität der Strahlung hängt von der Temperatur T , dem Emissionskoeffizienten ε und der Wellenlänge λ ab. Das Plancksche Gesetz (Gleichung 5) beschreibt den Zusammenhang zwischen Temperatur und Wärmestrahlung für den Schwarzen Strahler ($\varepsilon=1$). Bei realen Körpern liegt der Emissionskoeffizient unter 1.

$$L_{\lambda s} = \frac{c_1}{\pi \cdot \lambda^5 \cdot \left[e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right]} \quad (5)$$

$L_{\lambda s}$ wellenlängenabhängige Strahlungsintensität für den schwarzen Körper in W/m^2m

$c_1=2 \cdot \pi^2 \cdot h^3 \cdot c_0^2$ erste Plancksche Strahlungskonstante in Wm^2

$c_2 = h \cdot c_0 / k$ zweite Plancksche Strahlungskonstante in mK

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ Plancksches Wirkungsquantum

$k_b = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ Boltzmann-Konstante

$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

Infrarotsensoren messen genau diese emittierte Strahlung und können so die Temperatur des Mediums bestimmen. Dieses Prinzip hat gegenüber der herkömmlichen Temperaturmessung mittels Thermoelement den entscheidenden Vorteil, dass Ansprechzeiten extrem kurz sind (ca. 10 ms) und somit zum Beispiel der Temperaturverlauf über einen Spritzgusszyklus exakt bestimmt werden kann.

Kunststoffe sind für Infrarotstrahlung teilweise durchlässig. Somit kann Strahlung von entfernteren Schichten zum Fühler gelangen. Daher messen IR-Sensoren nicht die Oberflächentemperatur von Schmelzen, sondern den Mittelwert über eine bestimmte Schichtdicke. Es kann in manchen Fällen sogar vorkommen, dass die gegenüberliegende Werkzeugwand mit gemessen wird. Bei rußgefüllten Kautschuken ist diese Gefahr jedoch weniger gegeben, da der Absorptionsgrad dieser Materialien sehr hoch ist. Die von den IR-Sensoren gemessenen Schichten liegen daher sehr nahe der Oberfläche.

Bei der Kalibrierung von IR-Sensoren wird die Ist-Temperatur der Ausgangsspannung des Infrarotfühlers gegenübergestellt und somit eine Kalibrierkurve gezeichnet. Im Normalfall sollte diese Funktion linear sein. Die Kalibrierung der in dieser Arbeit verwendeten IR-Sensoren erfolgte mit derselben Apparatur, die in [6] verwendet wurde.

2.5 Prüfmethoden zur Untersuchung der Formteile

2.5.1 Shore Härte nach DIN 53505

Als Härte bezeichnet man den Widerstand gegen das Eindringen eines Körpers bestimmter Form.

Die Härte Shore A wird zur Bestimmung der Härte von Probekörpern und Erzeugnissen aus Elastomeren verwendet. Sie wird üblicherweise im Bereich von 10 - 90 Shore A angegeben. Für härtere Elastomere verwendet man die Härte Shore D.

Der Eindringkörper für Shore A hat die Form eines Kegelstumpfes und die Federcharakteristik bewegt sich von 550 mN bis 8065 mN. Der Wert wird 3 Sekunden, nachdem der Eindringkörper den Probekörper berührt hat, abgelesen. Die Probekörper weisen eine Dicke von ≥ 6 mm und einen Durchmesser von ≥ 35 mm auf.

2.5.2 Druckverformungsrest (DVR) nach DIN 52517

Der DVR untersucht die elastischen Eigenschaften von Elastomeren bei konstanter Druckverformung und vorgegebener Temperatur. Der Versuch kann bei Elastomeren aller Härten im Bereich von 30 bis 95 Shore A durchgeführt werden.

Die Prüfung eignet sich für alle möglichen Anwendungen von Bauteilen unter Druckbelastung (Dichtungen, Böden, Beläge, Dämpfungselemente etc.). Weiters kann der Vulkanisationszustand sowie das Einfrier- und Kristallisationsverhalten untersucht werden.

Das verwendete Prüfgerät besteht aus mindestens zwei Platten, zwischen denen die Prüfkörper zusammengedrückt werden (Abbildung 6). Die Verformung ist durch Distanzstücke exakt vorgegeben.

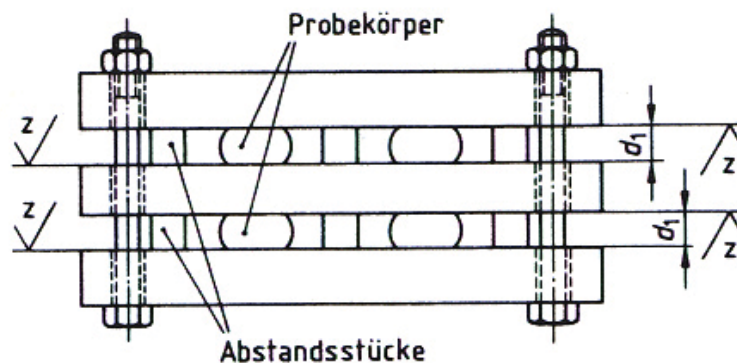


Abbildung 6: Prüfgerät für die DVR-Prüfung nach DIN 52517 [7]

Als Prüfkörper werden zylindrische Scheiben mit einem Durchmesser von 13 mm und einer Dicke von 6 mm aus dem Formteil herausgeschnitten.

Die Dicke der Prüfkörper wird exakt vermessen und anschließend werden sie in der oben gezeigten Vorrichtung auf eine vorher definierte Stauchung zusammengedrückt (25% bei bis zu 80 Shore A). Anschließend wird die Form in einem Wärmeschrank bei einer vorher definierten Temperatur eine bestimmte Zeit gelagert. Die Prüfbedingungen hängen von gestellten Anforderungen ab. Anschließend werden

die Proben entnommen und nach 30 Minuten wird erneut die Dicke vermessen. Der DVR errechnet sich mit der Gleichung 6.

$$DVR = \frac{d_0 - d_2}{d_0 - d_1} \cdot 100 \quad (6)$$

DVR.. Druckverformungsrest

d_0 ursprüngliche Dicke des Probekörpers in mm

d_1 Dicke des Probekörpers im verformten Zustand in mm

d_2 Dicke des Probekörpers nach Entspannung in mm

Die normierten Lagerzeiten sind 24, 72, 168 oder ein Vielfaches von 168 Stunden. Die Temperaturen liegen je nach Anwendung zwischen -25°C und 200°C. Höhere und niedrigere Werte sind nach Norm ebenfalls vorgesehen.

In dieser Arbeit wurde der DVR nach 24 Stunden bei 70°C betrachtet.

2.5.3 Zugversuch nach ISO 37

Der Zugversuch wurde nach ISO 37 mit dem Prüfkörper Type 2 bei einer Prüfgeschwindigkeit von 500 mm/min durchgeführt. Ausgewertet wurden die Reißfestigkeit sowie die Reißdehnung.

3 Experimenteller Teil

3.1 Maschinen und Werkzeuge

3.1.1 Spritzgießmaschine

Für die Versuche wurde eine Maschine der Type VC 650H/ 220W/ 330L/ 220 Combi der Firma Engel Austria GmbH verwendet (Abbildung 7). Es handelt sich um eine holmlose Maschine mit 2200 kN Schließkraft und 3 Spritzaggregaten. Als Spritzeinheit wurde ausschließlich das dritte Aggregat in L-Stellung verwendet, da das verwendete Werkzeug ursprünglich für eine Maschine mit vertikaler Spritzeinheit konzipiert ist und in der Trennebene angespritzt werden muss. Dieses wurde mit einer Schnecke für die Kautschukverarbeitung mit dem Durchmesser $d=35$ mm ausgerüstet.



Abbildung 7: Verwendete Spritzgießmaschine

3.1.2 Werkzeug

Das verwendete Werkzeug wurde im Rahmen der Dissertation von Holzer [1] entwickelt. Es diente als Spritzgießmaschinenrheometer zur Messung praxisnaher Viskositätskurven für die Kautschukverarbeitung. Das Werkzeug wird in der

Trennebene angespritzt und das Scher-Mischteil ist ihm vorgelagert. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 8 veranschaulicht.

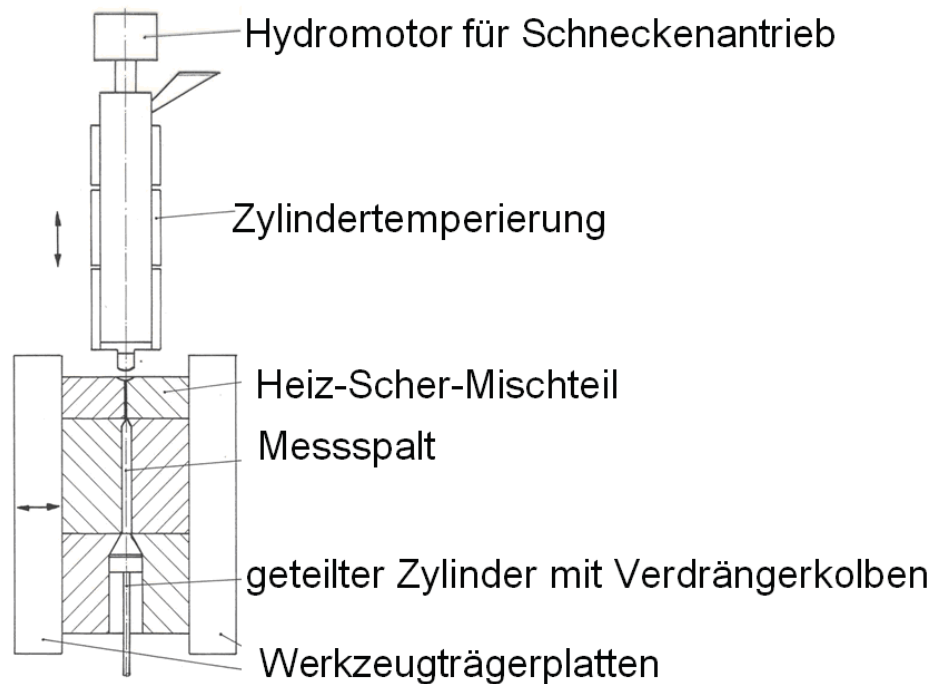


Abbildung 8: Prinzipieller Aufbau des Spritzgießmaschinenrheometers [1,8]

Beim Öffnen und Schließen werden zwei seitliche Schieber betätigt, die den rechteckigen Messspalt bilden. An den Seiten des Werkzeuges befinden sich je vier standardisierte Aufnahmebohrungen (UNF-Gewinde, 1/2“) für Temperatur- und Druckfühler. Der Messkanal ist zusätzlich noch mittels Keramikplatten vom Rest des Werkzeuges thermisch entkoppelt. Abbildung 9 zeigt eine Skizze des Werkzeuges von oben.

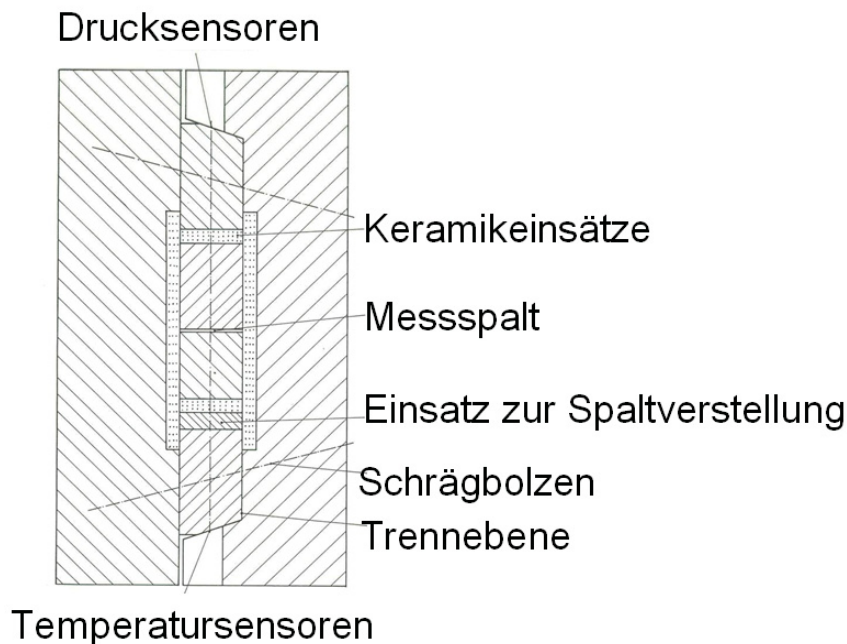


Abbildung 9: Skizze des Rheometerwerkzeuges von oben [1]

Nach dem Messspalt ist ein Verdrängerkolben angebracht. Dieser hatte ursprünglich die Aufgabe, das Material aufzunehmen und den Volumenstrom zu messen. Für diese Arbeit wurde er aus Einbaugründen weggelassen. Vor dem Kolben befindet sich noch eine Bohrung, an der Vakuum zur Evakuierung der Kavität angelegt werden kann, damit kein Luftpolster im Werkzeug verbleibt.

Die Beheizung des Rheometerwerkzeuges erfolgt mittels eines Öl-Temperiergerätes.

3.1.3 Heiz-Scher-Mischteil

Wie schon erwähnt, ist die Vorwärmung des Materials während des Einspritzvorganges ein wichtiger Aspekt des Spritzgießens. Die Idee war, Viskositätsmessungen an nichtvernetzenden und auch vernetzenden Kautschukmischungen möglichst isotherm durchzuführen. Hierzu ist das Material von der Temperatur im Spritzgießzylinder (ca. 80°C-100°C) noch vor Eintritt in den rheologischen Messspalt auf Messtemperatur (ca. 130°-180°C) möglichst homogen zu erwärmen. Dies führte zur hier verwendeten Kalottengeometrie des Mischteils. Es ist dazu konzipiert, die Kautschukmischung möglichst schonend mittels Scherung und Wärmeleitung über die vergrößerte Oberfläche zu erhitzen.

Für die Entwicklung waren folgende Eigenschaften maßgeblich:

- möglichst große Oberfläche (Einbringung von Wärme),
- Druckbedarf niedrig halten,
- geringe Baulänge,
- gute Mischwirkung,
- Möglichkeit der Entformung zur Vermeidung von Anvulkanisation.

Letztendlich ergab sich folgende Geometrie. Es wurde ein breiter Rechtespalt gewählt, welcher durch eine Art Fischechwanzverteiler beschickt wird. In dem Spalt befinden sich Kalotten, die auf der einen Hälfte positiv heraus- und in die andere Hälfte negativ hineinragen. Damit erreicht man eine Vergrößerung der Oberfläche um den Faktor 1,5. Zusätzlich sind die Kalotten über die Breite so angeordnet, dass sie, in Längsrichtung betrachtet, auf Lücke stehen. Das ergibt einen zusätzlichen distributiven Mischeffekt. Veranschaulicht wird diese Geometrie in Abbildung 10, links. Die Skizze rechts daneben zeigt die Form der positiven und negativen Kalotten mit den unterschiedlichen Dicken im Berg- bzw. Talbereich. Man erkennt hier auch die Einsätze aus Kupfer-Beryllium. Dieses Material weist eine besonders hohe Wärmeleitfähigkeit auf. Dahinter sind Heizelemente für die Temperierung angebracht. Diese Ausführung erlaubt es, die Einsätze jederzeit gegen solche mit anderer Geometrie auszutauschen.

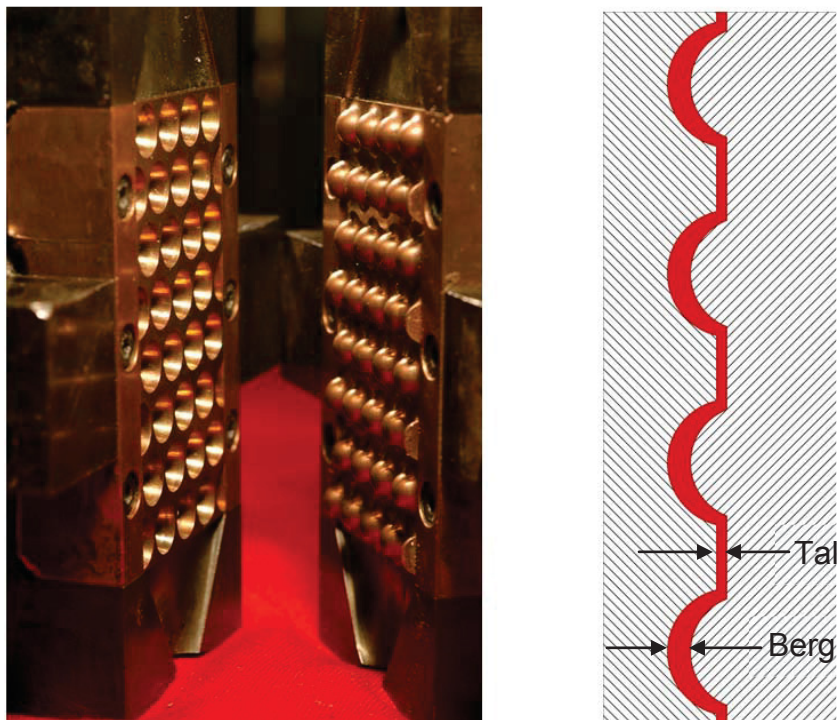


Abbildung 10: Foto und Profilskizze des Scher-Mischteils [8]

Das Mischteil öffnet sich beim Entformen mit dem Werkzeug. Dadurch kann die darin verbleibende Kautschukmischung einfach mit dem Formteil entnommen werden, und es bleiben keine Reste zurück.

Die Mischwirkung wird dadurch erzielt, dass die Kalotten versetzt angeordnet sind, was zu einer mehrfachen Umlenkung und Aufteilung des Schmelzestroms führt. Weiters ändert sich, wie in Abbildung 10 rechts ersichtlich, die Spaltweite, wenn der Strom auf eine Kalotte trifft. Dies führt zu einer Änderung der Fließgeschwindigkeit und damit auch zu einer weiteren Durchmischung.

Bei der Entwicklung dieses Mischteils wurde eine vereinfachte Geometrie mittels FEM-Simulation berechnet. Das dabei verwendete Programm wurde auf der Montanuniversität Leoben entwickelt [9]. Gerechnet wurden 2 Reihen mit je 2 Pyramidenstümpfen, wobei das Mischteil selbst aus 8 Reihen mit je 4 Kalotten besteht. Daraus lässt sich schließen, dass mit einem grob vereinfachten Modell gerechnet wurde, was mit der eingeschränkten Rechenleistung der damals verfügbaren Computer zu erklären ist.

Die Ergebnisse der Berechnung waren, dass man die Spaltweite in den Tälern zwischen den Kalotten herabsetzte, um ein Voreilen des Materials in eben diesen zu verhindern. Es wurde außerdem eine Vergleichmäßigung der Fließgeschwindigkeit und der Temperaturverteilung errechnet, womit man die Mischwirkung des Teils als bestätigt betrachtete. Die endgültige Ausführung mit Kalotten wurde gewählt, um Totstellen im Schmelzefluss zu vermeiden.

Für die Versuche wurden die Spaltweiten variiert. Es wurde laut Tabelle 1 vorgegangen, wobei die gezeigten 3 Mischergeometrien zum Einsatz kamen. Die Spalthöhe „Tal“ bezeichnet die Spalthöhe im ebenen Spaltbereich, „Berg“ bezieht sich auf das Maß auf der Spitze der Kalotte (Abbildung 10). Zu Vergleichszwecken wurde ein Versuch ohne Mischteil durchgeführt.

Tabelle 1: Überblick über die verwendeten Mischteilvarianten

Bezeichnung	Spalthöhe Tal (mm)	Spalthöhe Berg (mm)	Notiz
MT 1:3	1	3	Kalottenmischteil
MT 2:4	2	4	Kalottenmischteil
Spalt 2mm	2	2	ebener Scherspalt
Ohne MT	-	-	Kein Mischteil

3.2 Messsensorik

3.2.1 Infrarotfühler

Für die Messung der Massetemperatur im Werkzeug waren ursprünglich 2 IR-Sensoren (IRS) der Firma FOS geplant. Es handelt sich dabei um die hier als IRS 1 und IRS 2 benannte Sensoren. Leider erwies sich der Fühler IRS 2 am Beginn der Versuchsreihe als defekt. Somit wurden die Versuche mit nur einem Infrarotfühler im Werkzeug durchgeführt.

Die Massetemperatur wurde ebenfalls mithilfe eines Infrarotsensors der Firma FOS überwacht. Dieser war in einer Bohrung am Flansch der Düse angebracht und wird hier als IRS-Düse bezeichnet. Abbildung 11 zeigt eine vereinfachte Skizze der Anbringung des Düsen-IR-Sensors. Er befindet sich am Scheitelpunkt der Bohrung und ragt nicht in diese hinein. Dies führt zu Totstellen am Rand des Sensors, die aber mangels Alternativen in Kauf genommen wurden.

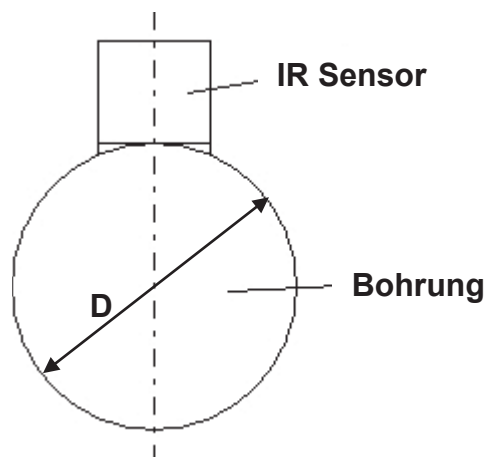


Abbildung 11: Skizze: Sitz des Düsen-IR-Sensors; $D = 35 \text{ mm}$

In Tabelle 2 sind die verwendeten Sensoren aufgelistet.

Tabelle 2: Daten der verwendeten IR-Sensoren

Bezeichnung	Modell	Seriennummer	Verstärker	Netzteil
IRS 1	IR Therm 2003 (FOS)	17140	IMT-A2-S	NG-SPS-24
IRS 2	IR Therm 2003 (FOS)	17139	IMT-A2-S	NG-SPS-24
IRS-Düse	NTS2-IR-A2 (FOS)	16011	NTS2-IR-A2	-

3.2.1.1 Kalibrierung der Infrarotfühler

Zur Erhöhung der Genauigkeit wurde der Sensor IRS 1 nach [6] kalibriert. Dabei wurde das am Institut für Kunststoffverarbeitung vorhandene Kalibrierwerkzeug verwendet, das bereits in [6] Anwendung gefunden hat. Leider konnte der IRS-Düse nicht auf diese Weise kalibriert werden, da es sich hier um eine andere Bauart handelt, die nicht in das Werkzeug des Instituts passte. Es wurde daher direkt an der Maschine kalibriert. Hierfür wurde die Massetemperatur zwischen zwei Schüssen nach einiger Wartezeit zur Temperaturhomogenisierung mittels Einstich-Thermoelement auf der Höhe des Messfühlers gemessen und diese Temperatur mit der angezeigten Spannung am Messfühler gleichgesetzt. Den zweiten Punkt dieser Kalibrierung stellte der vom Hersteller angegebene Nullpunkt des Fühlers dar.

Da die Kalibrierung an der Maschine mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet ist, können die Werte nicht direkt mit der in der Kavität gemessenen Temperatur verglichen werden. Dieser Fühler diene lediglich der Überwachung der Massetemperatur, um die Temperatur-Konstanz während der Schüsse zu gewährleisten.

3.2.2 Drucksensoren

Zur Messung des Werkzeuginnendrucks kamen zwei Sensoren der Firma GEFRAN (Provaglio d'Iseo, Italien) zum Einsatz (Tabelle 3).

Tabelle 3: Daten der verwendeten Drucksensoren

Bezeichnung	Modell	Serial	Code
P 1, P 2	MN-1-1-6-M-B01M-1-4-D	D09040346	F008288

3.2.3 Messdatenüberwachungssystem

Die oben angeführten Sensoren und die Ausgänge der Maschinenüberwachungsdaten wurden alle am Messdatensystem der Firma Engel Austria GmbH angeschlossen. Es handelt sich dabei um ein DEWE MDAQBOOK-PCI-3216 der Firma Dewetron (Graz, Austria). Die Auswertung der aufgezeichneten Daten erfolgte mittels Famos (1990-2006 IMC Messsysteme GmbH; Version 5.0 Rev 5 vom 13. Jänner 2006) und Microsoft Excel 2003.

3.2.4 Einbauschema der Sensoren

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, wo welche Messsensoren angeordnet sind. Der IRS-Düse befindet sich an der Düse. IRS 1 befindet sich in der Kavität auf Position 2 von der Düse aus gesehen. Die Position 1 wäre besser geeignet, da man sich näher am Mischteil befindet. Jedoch konnte dies nicht realisiert werden, da ein Schlauch der Werkzeugtemperierung den Einbau im Werkzeug behinderte. Aus diesem Grund wurde Position 2 als die nächst bessere verwendet.

Die Drucksensoren befinden sich an den Positionen 1 und 3.

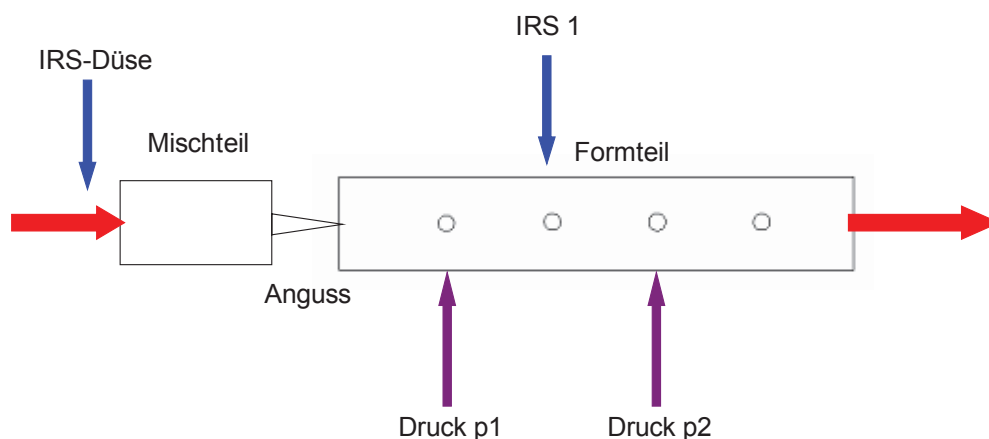


Abbildung 12: Prinzipskizze der verwendeten Messsensorik

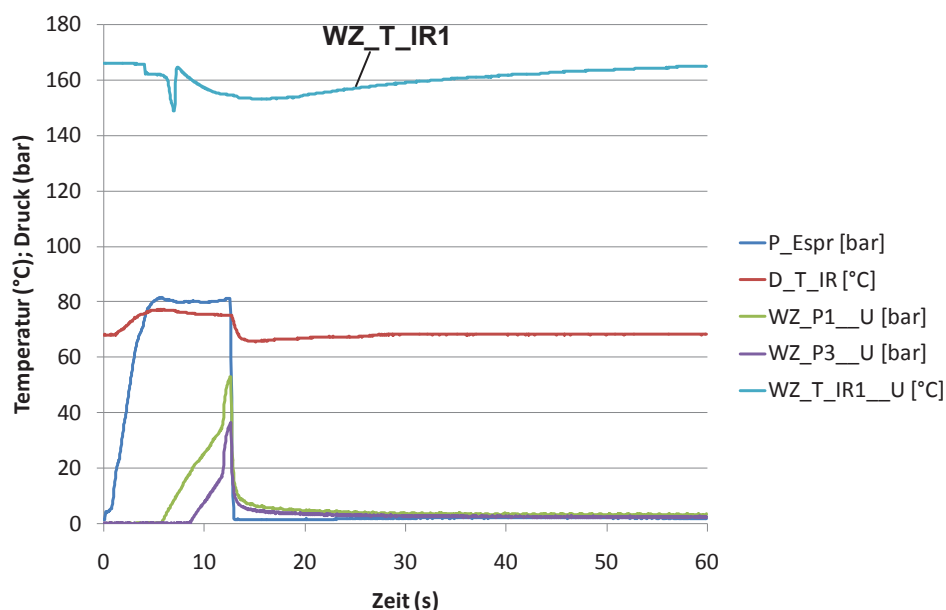
3.2.5 Auswertung der Ergebnisse

Neben den Daten von den Messfühlern wurden folgende Überwachungsdaten aus der Spritzgussmaschine aufgezeichnet:

- Schneckenweg,
- hydraulischer Einspritzdruck und
- Schneckengeschwindigkeit.

Der Schneckenweg und die Schneckengeschwindigkeit dienen der Prozessüberwachung und wurden nicht weiter in der Auswertung berücksichtigt.

Die wichtigsten Messwerte sind in den Abbildungen 13 bis 16 dargestellt. Diese Kurven wurden jeweils mit und ohne Mischteil bei zwei verschiedenen Einspritzgeschwindigkeiten aufgenommen. Dargestellt ist jeweils der hydraulische Einspritzdruck, die beiden Werkzeuginnendrucke und die Temperaturen von IR Düse und IRS 1.



*Abbildung 13: Aufgezeichnete Werte für MT 1:3 bei 10 mm/s
Einspritzgeschwindigkeit $T_z = 70^\circ\text{C}$, $T_w = 180^\circ\text{C}$; P_{Espr}
hydraulischer Einspritzdruck, WZ_{P1} sowie WZ_{P3}
Werkzeuginnendrucke an den Positionen 1 und 3, $WZ_{T_{IR1}}$
Massetemperatur im Werkzeug, $D_{T_{IR}}$ Massetemperatur in
der Düse*

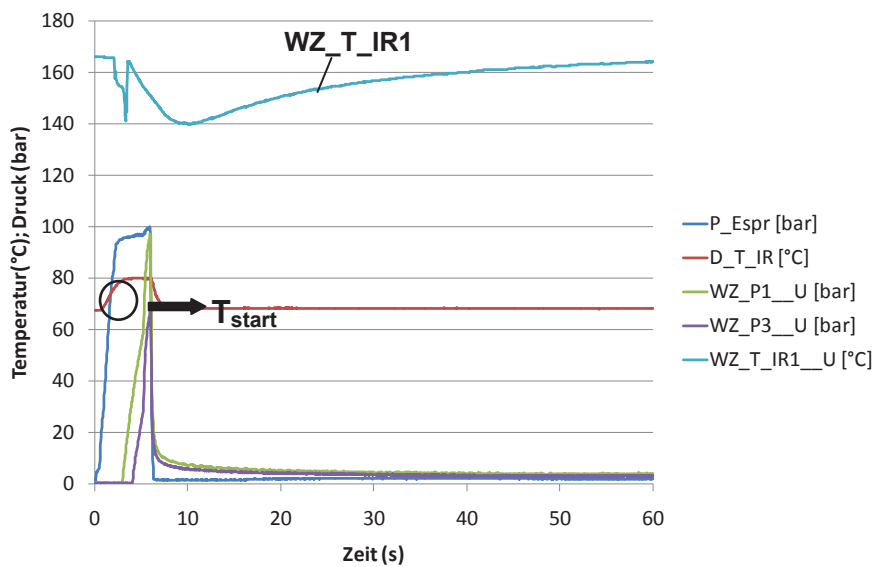


Abbildung 14: Aufgezeichnete Werte für MT 1:3 bei 20 mm/s
 Einspritzgeschwindigkeit $T_z = 70^\circ\text{C}$, $T_w = 180^\circ\text{C}$; P_{Espr}
 hydraulischer Einspritzdruck, WZ_{P1} sowie WZ_{P3}
 Werkzeuginnendrucke an den Positionen 1 und 3, $WZ_{T_{IR1}}$
 Massetemperatur im Werkzeug, $D_{T_{IR}}$ Massetemperatur in
 der Düse

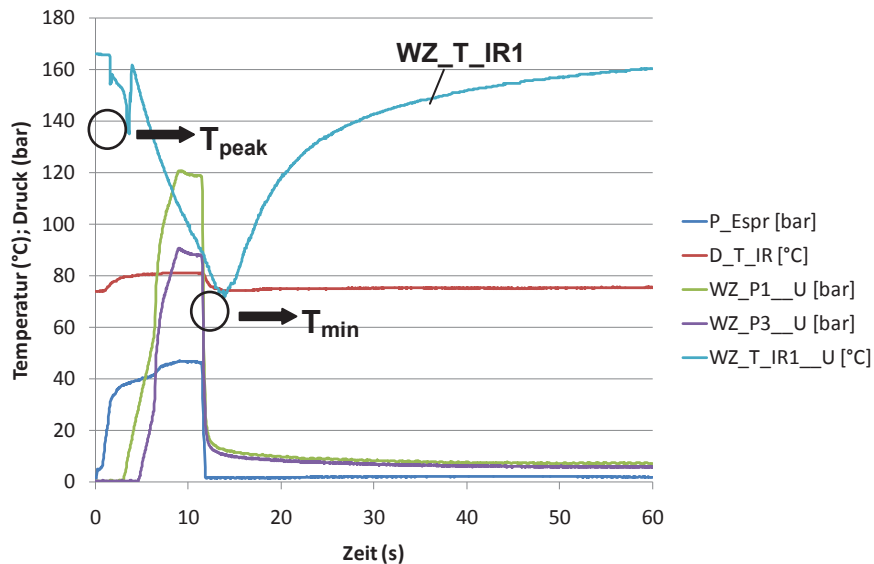


Abbildung 15: Aufgezeichnete Werte ohne MT bei 10 mm/s
 Einspritzgeschwindigkeit $T_z = 70^\circ\text{C}$, $T_w = 180^\circ\text{C}$; P_{Espr}
 hydraulischer Einspritzdruck, WZ_{P1} sowie WZ_{P3}
 Werkzeuginnendrucke an den Positionen 1 und 3, $WZ_{T_{IR1}}$
 Massetemperatur im Werkzeug, $D_{T_{IR}}$ Massetemperatur in
 der Düse

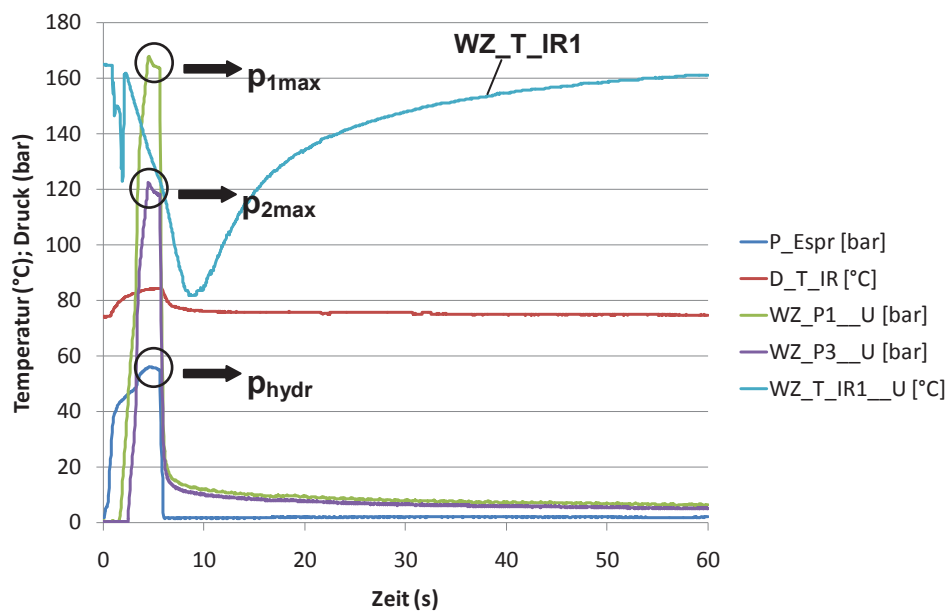


Abbildung 16: Aufgezeichnete Werte ohne MT bei 20 mm/s
 Einspritzgeschwindigkeit $T_z = 70^\circ\text{C}$, $T_w = 180^\circ\text{C}$; P_Espr
 hydraulischer Einspritzdruck, WZ_P1 sowie WZ_P3
 Werkzeuginnendrucke an den Positionen 1 und 3, WZ_T_IR1
 Massetemperatur im Werkzeug, D_T_IR Massetemperatur in
 der Düse

Betrachtet man den Temperaturverlauf für IRS 1, beispielhaft in Abbildung 15 dargestellt, sieht man, dass anfangs die Werkzeugtemperatur angezeigt wird. An dem Punkt, an dem das Material den Fühler erreicht, kann ein kurzer Einschwingvorgang mit einem Minimalwert (T_{peak}) beobachtet werden. Anschließend fällt die Temperatur bis zu einem Minimum ab (T_{min}), danach steigt sie wieder langsam bis auf Werkzeugtemperatur.

Wie in 2.4.1 erwähnt, misst ein Infrarotfühler nicht die Oberflächentemperatur, sondern einen Mittelwert über eine bestimmte Schichtdicke. Rußgefüllte Kautschuke haben einen sehr hohen Absorptionskoeffizienten für Wärmestrahlung. Daher ist anzunehmen, dass die Eindringtiefe der Infrarotsensoren sehr gering ist und in den Versuchen annähernd die Oberflächentemperatur gemessen wurde [10].

Erreicht das Material den Fühler, legt sich zuerst eine Randschicht am Werkzeug an, die diesen gemessenen Temperaturabfall bewirkt (T_{peak}). Diese Randschicht erwärmt sich aber schnell wieder auf Werkzeugtemperatur. Währenddessen strömt immer

noch kälteres Material im Inneren des Formteils am Fühler vorbei, was über die Wärmeleitung zu einem erneuten Temperaturabfall in den Randschichten führt. Dieser Abfall läuft solange weiter, bis ein Tiefpunkt erreicht ist (T_{\min}) und das Formteil wieder langsam durchgewärmt wird.

Für die weitere Auswertung der Messergebnisse wurde jeweils der Tiefpunkt dieses Temperaturverlaufes (T_{\min}) (vgl. Abbildung 15) als Repräsentant für die durchschnittliche Schmelztemperatur herangezogen. Weiters wurde in den Vorversuchen der erste Peak (T_{peak}) (vgl. Abbildung 15) ausgewertet, um die Aussagekraft dieses Wertes zu überprüfen.

Der Verlauf der Massetemperatur am IRS-Düse zeigt sich auch wie erwartet. Während des Einspritzens sieht man einen Anstieg, der auf die Erwärmung des Materials zufolge der Druckerhöhung und Scherung zurückzuführen ist. Somit ist der Ausschlag des Fühlers IRS-Düse auf jedem der vier Diagramme unterschiedlich, da es sich um einen druckabhängigen Wert handelt. Während des restlichen Zyklus bleibt der Wert konstant auf der eingestellten Zylindertemperatur. Ausgewertet wurde in den Vorversuchen der Temperatureauschlag beim Ausspritzen ins Freie ($T_{\text{ausspritz}}$) und der Temperatureauschlag beim Einspritzen in die Kavität (T_{start}) (vgl. Abbildung 14).

Für die Auswertung der Werkzeuginnendrucke wurde jeweils das Maximum der Druckkurve herangezogen ($p_{1\max}$, $p_{2\max}$, vgl. Abbildung 16).

Der Einspritzdruck wurde ebenfalls am Maximum der Kurve ausgewertet (p_{hydr} , vgl. Abbildung 16) und mit dem Übersetzungsverhältnis [11] in den jeweiligen spezifischen Spritzdruck umgerechnet (p_{spritz}).

Abbildung 17 zeigt den Druckverlauf über die Spritzlänge für ein Material mit und ohne Mischteil. Der hier gezeigte Verlauf konnte der Tendenz nach bei allen Versuchen beobachtet werden. Die jeweiligen Werte verschieben sich nur nach verwendetem Material und eingestellter Spritzgeschwindigkeit. Als Spritzlänge „null“ wird der Eintrittsort der Kautschukmasse in das Werkzeug festgelegt.

Man sieht hier sehr gut, dass der größte Teil des Spritzdruckes auf den ersten 250 mm des Weges abfällt. Hier befinden sich der Anguss sowie das Mischteil. Der Druckverlust zwischen den Fühlern p_1 und p_2 fällt dagegen eher gering aus. Es ist auch zu beobachten, dass man ohne Mischteil einen niedrigeren Spritzdruck benötigt, aber dennoch ein höherer Druck in der Kavität herrscht.

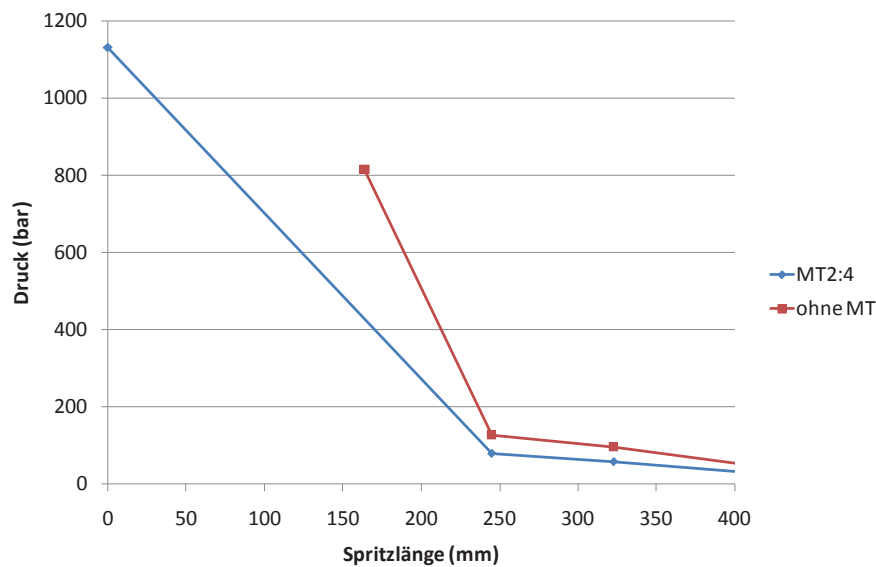


Abbildung 17: Forminnendruck über die Spritzlänge für NBR bei 10 mm/s Spritzgeschwindigkeit

Um den Druckverlust des Angussystems inklusive Mischteil zu isolieren, wurde ein weiterer Wert Δp berechnet. Dieser ergibt sich aus der Differenz zwischen spezifischem Spritzdruck (p_{spritz}) und dem Werkzeuginnendruck an der Position 1 ($p_{1\text{max}}$).

3.3 Verwendete Materialien

Tabelle 4 zeigt die beiden verwendeten Materialien.

Tabelle 4: Verwendete Materialien

Material	Hersteller	Mischungsbezeichnung	Lot Nummer	Härte laut Hersteller (ShoreA)
EPDM	Kraiburg (Waldkraiburg, Deutschland)	AA4BRZ	103175	43
NBR	Kraiburg (Waldkraiburg, Deutschland)	SPP9507/01	103448	76

Die Datenblätter aus der physikalischen Prüfung sind im Anhang als Tabelle 17 und Tabelle 18 gegeben.

4 Versuche

4.1 Vorversuche

4.1.1 Durchführung

Zuerst wurde das Werkzeug aufgespannt und die Messsensorik montiert und verkabelt. Anschließend wurde die Maschine in Betrieb genommen und die Messanzeigen überprüft. Zum Einstieg wurden einige Prozessvariablen, wie die Zylindertemperatur und die Einspritzgeschwindigkeit variiert, um das Verhalten des Systems zu testen und die Parameter für den Hauptteil festzulegen. Aus den in Tabelle 5 angegebenen Parametern ergeben sich 12 verschiedene Kombinationen.

Tabelle 5: Versuchsp Parameter für die Vorversuche

Material	EPDM	
Mischteile	MT 1:3; ohne MT	
Werkzeugtemperatur	180	°C
Mischteilterperatur	180	°C
Zylindertemperatur	70; 80	°C
Einspritzgeschwindigkeit	10; 20; 30	mm/s
Heizzeit	150	s

Es wurde während des Ablaufs darauf geachtet, dass die thermischen Bedingungen stabil sind. Nach Änderung der Zylindertemperatur wurden erst nach Erreichen stationärer Bedingungen wieder Messwerte aufgenommen.

Zwischen den Versuchen wurde wiederholt ins Freie ausgespritzt, um die Stabilität der Massetemperatur mittels des Fühlers IRS-Düse zu überprüfen.

4.1.2 Messwerte

Die erhaltenen Daten wurden nach 3.2.5 ausgewertet. Die gesammelten Werte sind im Anhang in Tabelle 19 dargestellt.

Für die Abbildungen 18 bis 22 gilt, dass die aufgetragenen Werte jeweils die berechneten Mittelwerte von drei Schüssen darstellen. Dies ist für eine statistische Betrachtung der Messwerte zwar eine relativ geringe Anzahl, sie erwies sich aber in

den Versuchen als ausreichend genau. Die Balken an den Punkten geben die Standardabweichungen wieder.

Die Massetemperatur hat sich als sehr stabil erwiesen. Abbildung 18 zeigt die gemessenen Massetemperaturen während des Einspritzens. Die Schwankungen bei gleichen Bedingungen sind sehr gering und spielen sich im Bereich von unter einem Grad Celsius ab. Es lassen sich auch Massetemperaturunterschiede bei gleichen Zylindertemperaturen erkennen, wenn ein Mischteil bzw. kein Mischteil verwendet wurde. Diese sind auf die Druckerwärmung während des Einspritzvorganges zurückzuführen. Bemerkenswert ist, dass sich bei 80°C und Verwendung des Mischteils 1:3 eine nicht mehr von der Einspritzgeschwindigkeit abhängige Massetemperatur einstellt.

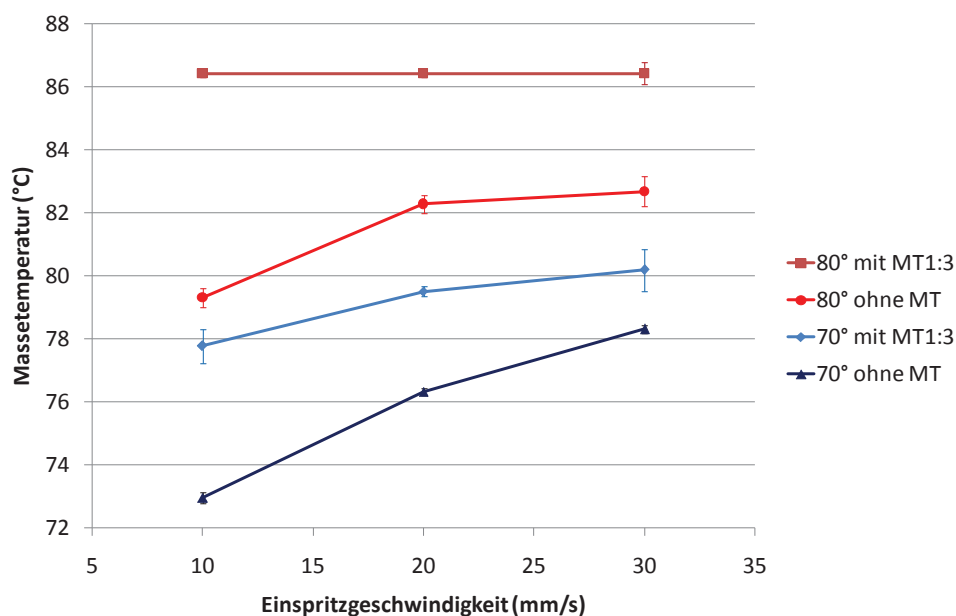


Abbildung 18: Massetemperaturen bei unterschiedlichen Zylindertemperaturen und Mischteilen

Abbildung 19 zeigt die beim Ausspritzen ins Freie gemessenen Massetemperaturen. Sie wurden zu verschiedenen Zeitpunkten während des Ablaufes der Versuche gemessen. Diese Werte sind als annähernd frei von Druckeinflüssen zu betrachten. Auch hier sind die Messwertstreuungen äußerst gering und spielen sich im Bereich von einem Grad Celsius ab. Der Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit auf die Massetemperatur wird mit zunehmender Einspritzgeschwindigkeit deutlich geringer.

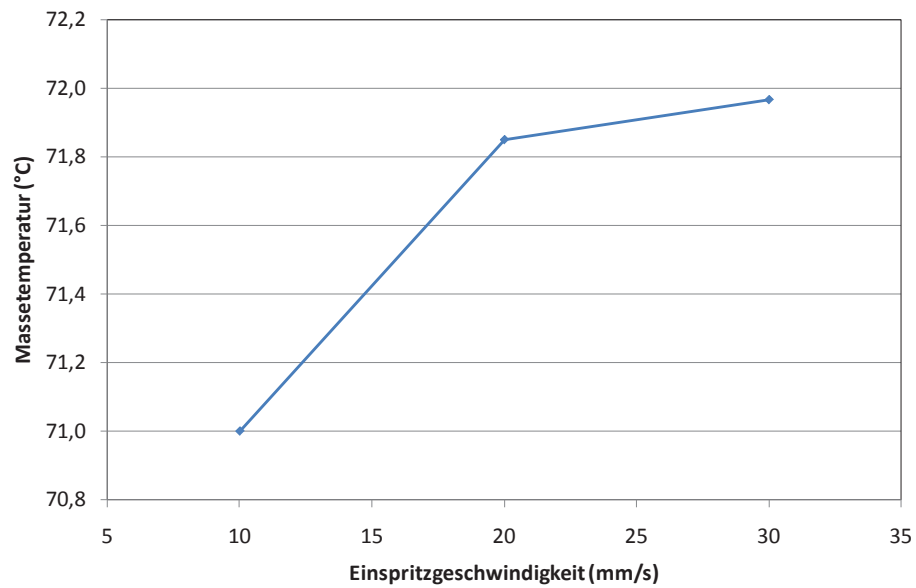


Abbildung 19: Während des Ausspritzens ins Freie gemessene Masstemperaturen ($T_{\text{ausspritz}}$)

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die in den Vorversuchen am Sensor IRS 1 ermittelten Temperaturdaten (T_{peak} , T_{min}) in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit.

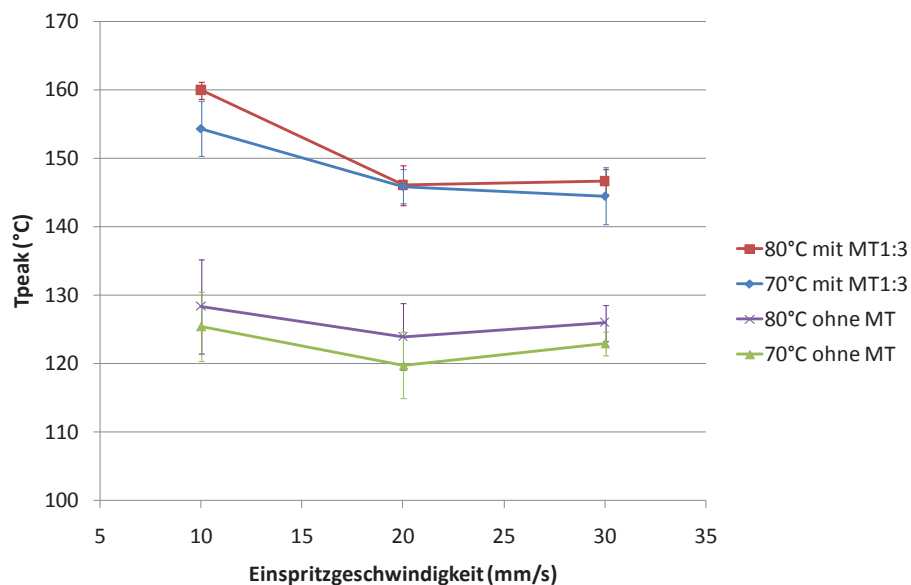


Abbildung 20: T_{peak} aus den Vorversuchen in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit

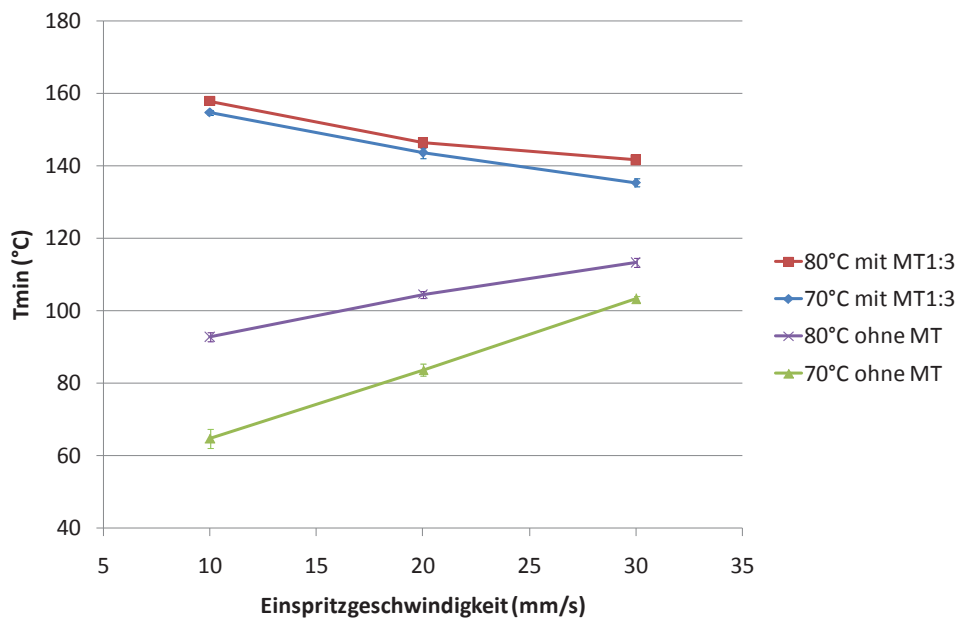


Abbildung 21: T_{min} aus den Vorversuchen in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit

Abbildung 22 zeigt die dazugehörigen Einspritzdrücke.

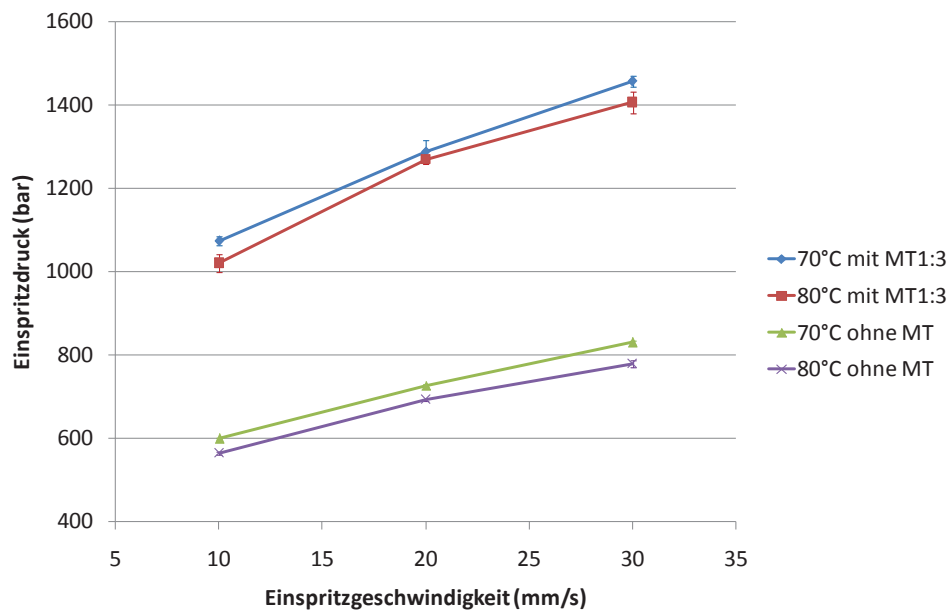


Abbildung 22: In den Vorversuchen gemessene Einspritzdrücke in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit

4.1.3 Interpretation

In den Diagrammen ist ersichtlich, dass die Standardabweichungen für T_{\min} und den Einspritzdruck sehr gering sind, was für eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse spricht.

Es ist zu beobachten, dass T_{\min} sich besser für die Auswertung der Temperaturkurve als T_{peak} eignet. Die Standardabweichung ist viel geringer und die Werte zeigen eindeutigere Tendenzen. T_{\min} gibt somit deutlichere Hinweise auf die erzielte Massetemperatur und die Wirkung der eingesetzten Mischteile.

An T_{\min} ist zu sehen, dass bei Verwendung des Mischteils die gemessene Temperatur mit steigender Spritzgeschwindigkeit abnimmt, aber zunimmt, wenn man kein Mischteil einsetzt. Dies weist darauf hin, dass ein Großteil der erzielten Massetemperaturerhöhung auf Wärmeleitung vom Mischteil in die Kautschukmasse zurückzuführen ist. Ohne Mischteil hingegen überwiegt der Anteil der dissipativen Erwärmung und die höhere Massetemperatur erklärt sich durch die Friktion im Anguss.

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen auch, dass die Temperaturwerte mit Mischteil deutlich weniger von der Zylindertemperatur abhängig sind, wohingegen ohne Mischteil ein starker Einfluss feststellbar ist. Dies ist auf den längeren Fließweg und die Vorerwärmung des Materials durch das Mischteil zurückzuführen. Man erreicht hier also eine gewisse Entkopplung von der thermischen Vorgeschichte des Materials.

Abbildung 22 gibt Aufschluss über den Druckverbrauch des Mischteils. Die Drücke bewegen sich bei Verwendung eines Mischteils ca. 450 bar über denen, die ohne Mischteil benötigt werden. Da die Drucksensoren für die Werkzeuginnendrucke bei den Vorversuchen noch nicht vorhanden waren, konnten hier leider nur die Bruttowerte des Druckverbrauchs betrachtet werden. Es ist aber bereits ersichtlich, dass man sich die erhöhte Massetemperatur mitunter durch einen erhöhten Druckverbrauch erkauft.

Für den Hauptteil der Versuchsreihe wurden folgende Einschränkungen getroffen:

1. Die dritte Einspritzgeschwindigkeit (30 mm/s) wird nicht mehr für die Versuche herangezogen, da sie nach Rücksprache mit der Anwendungstechnik der Firma Engel Austria GmbH als praxisfern zu betrachten ist und zu erwarten ist, dass Füllschwierigkeiten mit dem schwerer fließenden NBR zu erwarten sind.

2. Die Zylindertemperaturen werden nicht variiert, da die zu erwartenden Informationen nicht den erhöhten Zeitaufwand rechtfertigen. Als Zylindertemperatur wurde 70°C gewählt.

4.2 Hauptteil

4.2.1 Durchführung

Der Hauptteil wurde nach den in Tabelle 6 gegebenen Parametern durchgeführt.

Tabelle 6: Versuchsplan für den Hauptteil

T _{zyl} = 70°C		EPDM	T _w =180°C, TMT=180°C	v _E = 10 mm/s	MT 1:3	tH= 120s	Nr
						tH= 150s	1
		EPDM	T _w =180°C, TMT=180°C	v _E = 10 mm/s	MT 1:3	tH= 180s	2
						tH= 120s	3
						tH= 150s	4
					MT 2:4	tH= 120s	5
						tH= 150s	6
						tH= 180s	7
				Spalt 2 mm	tH= 120s	8	
					tH= 150s	9	
					tH= 180s	10	
				ohne MT	tH= 120s	11	
					tH= 150s	12	
					tH= 180s	13	
					tH= 120s	14	
					tH= 150s	15	
					tH= 180s	16	
				v _E = 20 mm/s	MT 1:3	tH= 120s	17
						tH= 150s	18
						tH= 180s	19
					MT 2:4	tH= 120s	20
						tH= 150s	21
						tH= 180s	22
					Spalt 2 mm	tH= 120s	23
						tH= 150s	24
						tH= 180s	25
		ohne MT	tH= 120s		26		
			tH= 150s		27		
			tH= 180s		28		
			tH= 120s	29			
			tH= 150s	30			
			tH= 180s	31			
		NBR	T _w =160°C, TMT=160°C	v _E = 10 mm/s	MT 1:3	tH= 120s	32
						tH= 150s	33
						tH= 180s	34
					MT 2:4	tH= 120s	35
						tH= 150s	36
						tH= 180s	37
				Spalt 2 mm	tH= 120s	38	
					tH= 150s	39	
					tH= 180s	40	
				ohne MT	tH= 120s	41	
					tH= 150s	42	
					tH= 180s	43	
			tH= 120s		44		
			tH= 150s		45		
			tH= 180s		46		
			v _E = 20 mm/s	v _E = 10 mm/s	MT 1:3	tH= 120s	47
						tH= 150s	48
						tH= 180s	49
MT 2:4	tH= 120s				50		
	tH= 150s				51		
	tH= 180s				52		
Spalt 2 mm	tH= 120s			53			
	tH= 150s			54			
	tH= 180s			55			
ohne MT	tH= 120s	56					
	tH= 150s	57					
	tH= 180s	58					
	tH= 120s	59					
	tH= 150s	60					
	tH= 180s	61					

Damit ergaben sich 48 mögliche Kombinationen. Es wurden alle Temperatur- und Druckdaten, die während des Prozesses aufgenommen wurden, ausgewertet. Um den Einfluss der Heizzeit herauszuarbeiten und eine mögliche Heizzeitverkürzung festzustellen, wurden die Formteile hinsichtlich der in 2.5 vorgestellten Prüfungen untersucht.

4.2.2 Messwerte aus dem Prozess

Die erhaltenen Daten wurden nach 3.2.5 ausgewertet. Die gesammelten Werte sind im Anhang in Tabelle 20 dargestellt.

Die ausgewerteten Temperaturwerte (T_{min}) sind in den Abbildung 23 und Abbildung 24 für beide Materialien dargestellt.

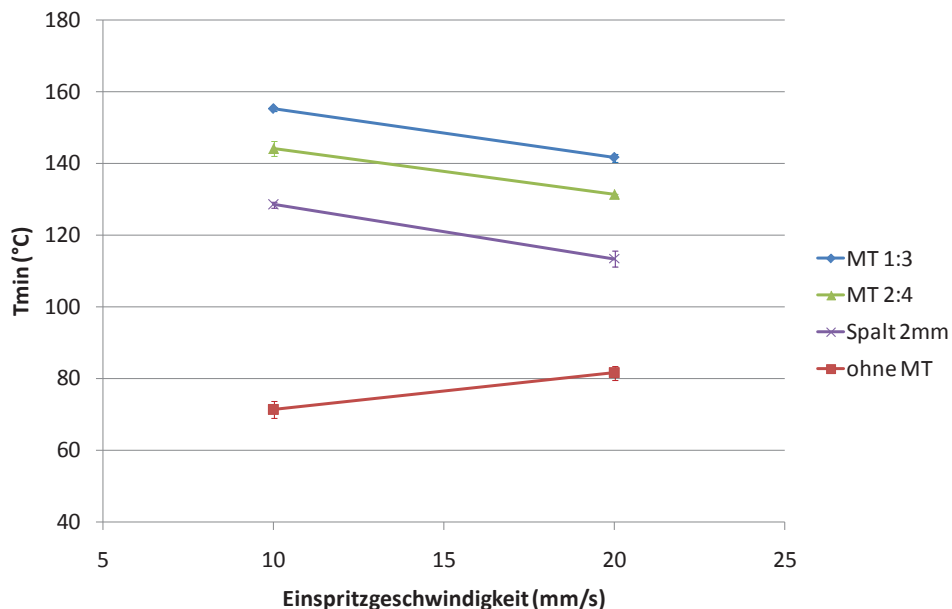


Abbildung 23: T_{min} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM

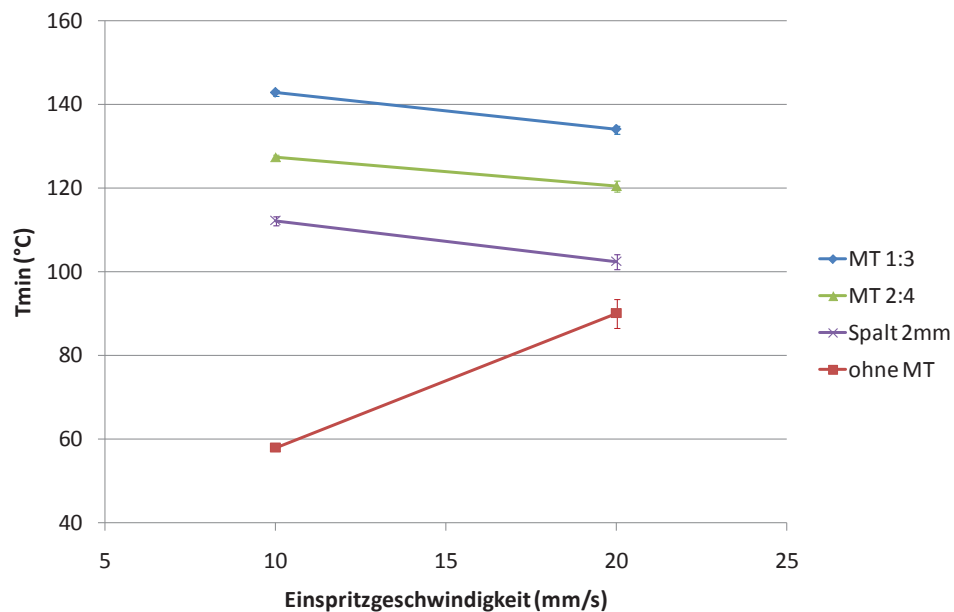


Abbildung 24: T_{min} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR

Die Ergebnisse von der Temperaturmessung verhalten sich, wie es zu erwarten war. Je enger die Spaltweiten, desto höher ist die Erwärmung (Abbildung 23, Abbildung 24) Die höchsten Temperaturen wurden bei Verwendung des MT 1:3 beobachtet, gefolgt von MT 2:4. Etwas geringer fällt der Temperaturgewinn bei Verwendung des 2 mm Scherspalts aus. Die geringsten Temperaturen wurden ohne Mischteil gemessen. Die Abhängigkeit der gemessenen Temperatur von der Spritzgeschwindigkeit verhält sich genau so, wie bereits in den Vorversuchen festgestellt wurde. Mit Mischteil fällt die Temperatur bei höheren Spritzgeschwindigkeiten, ohne Mischteil steigt sie. Wie zuvor schon erwähnt, ist dies auf die unterschiedlichen Einflüsse von Wärmeleitung und Friktion zurückzuführen. Die beobachteten Tendenzen sind bei beiden Materialien die gleichen.

In Abbildung 25 und Abbildung 26 finden sich die dazugehörigen Druckdifferenzen (Δp). Δp stellt den Nettodruckverlust des Mischteils mit Angussystem dar. Es errechnet sich aus dem erforderlichen spezifischen Spritzdruck abzüglich des ersten Werkzeuginnendrucks.

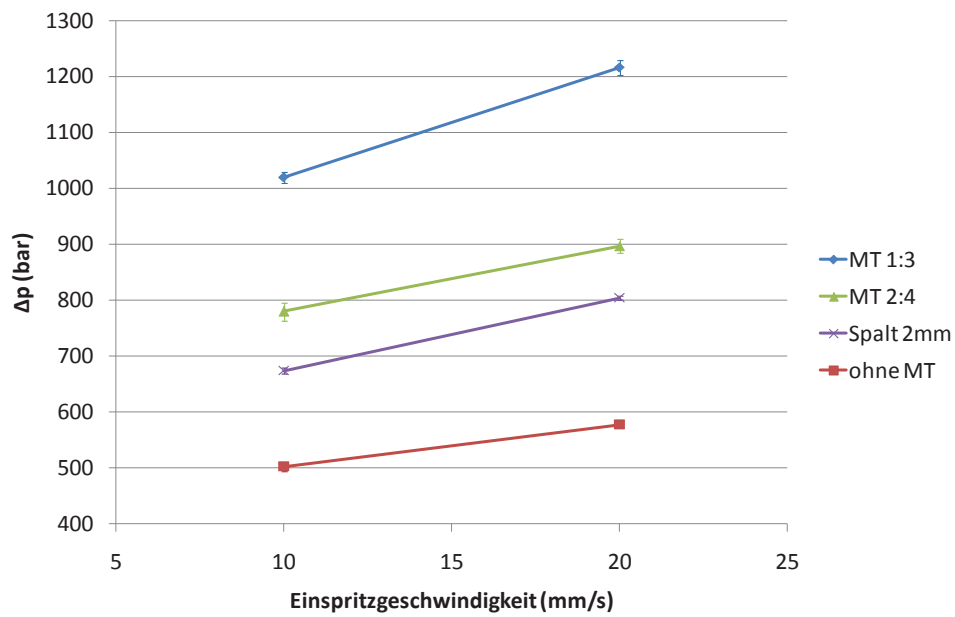


Abbildung 25: Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM

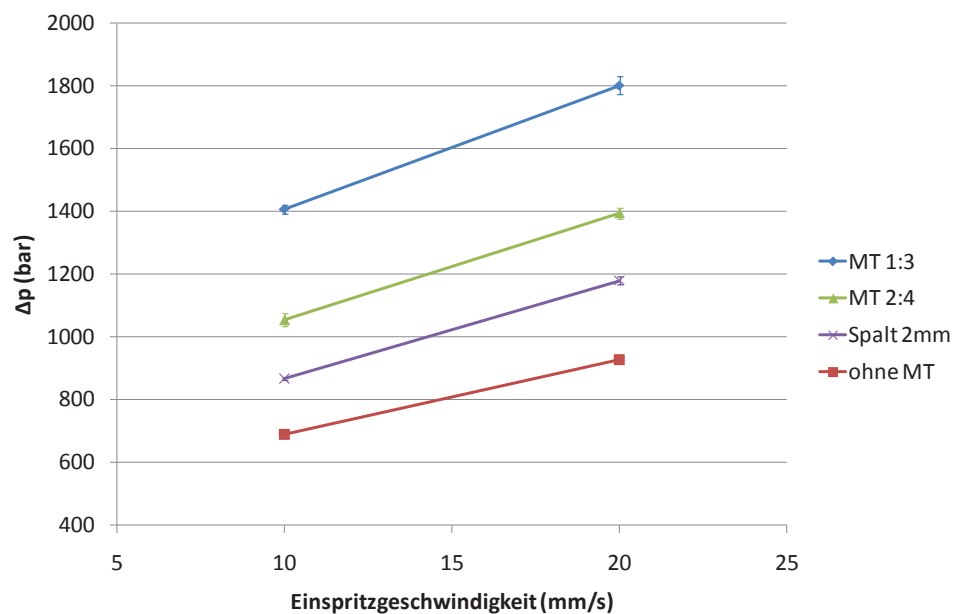


Abbildung 26: Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR

Die gemessenen Druckabfälle steigen mit der Einspritzgeschwindigkeit (Abbildung 25, Abbildung 26). NBR verursacht prinzipiell einen höheren Druckverlust als EPDM. Spitzenwerte liegen für NBR bei 20 mm/s Einspritzgeschwindigkeit und Mischteil 1:3 bei 1800 bar. EPDM zeigt bei gleichen Bedingungen einen Druckverlust von über 1200 bar. Die grundlegenden Tendenzen im Druckverbrauch sind bei beiden Materialien gleich, wobei der Druckverlust von NBR bei gleicher Bedingung immer um etwa 400 bar höher liegt. Je höher der Temperaturgewinn bei einem Mischteil, desto höher ist auch der Druckverlust. Zu erwähnen ist allerdings, dass die Mischteile bei höheren Spritzgeschwindigkeiten zusehends uneffektiver werden (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24), wenn man den Temperaturgewinn dem jeweiligen Druckverlust gegenüberstellt. Je schneller man einspritzt, desto niedriger ist die Massetemperatur, wohingegen der Druckverbrauch ansteigt ist. Dies zeigt, dass die Mischteile nur bei niedrigen Spritzgeschwindigkeiten effektiv arbeiten.

4.2.3 Messwerte aus der Formteilprüfung

Die gesamten Daten befinden sich im Anhang in den Tabellen 24 bis 26. Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die Härte-Werte für EPDM bei verschiedenen Heizzeiten und Spritzgeschwindigkeiten, Abbildung 29 und Abbildung 30 die Werte für NBR.

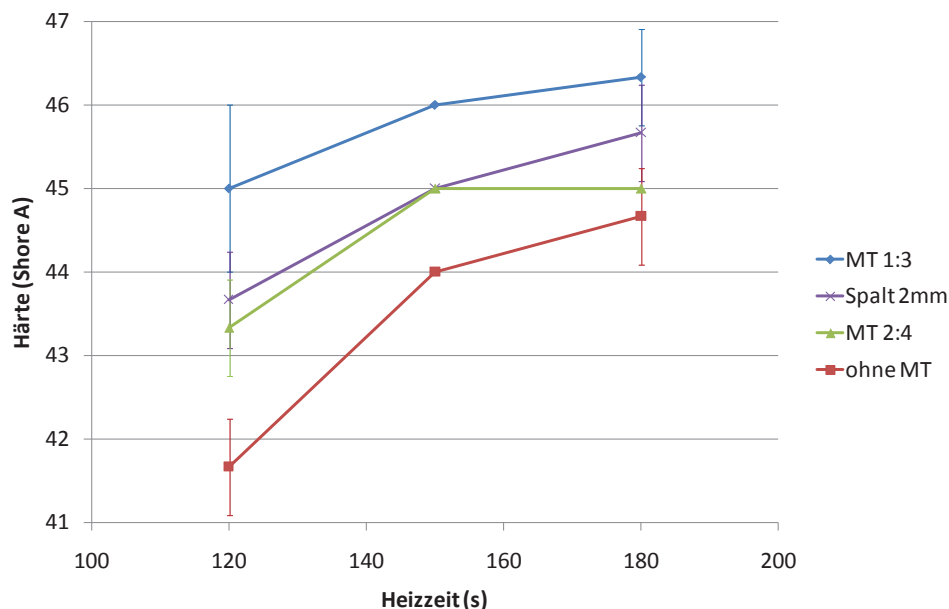


Abbildung 27: Härte in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischteilgeometrien für das Material EPDM bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s

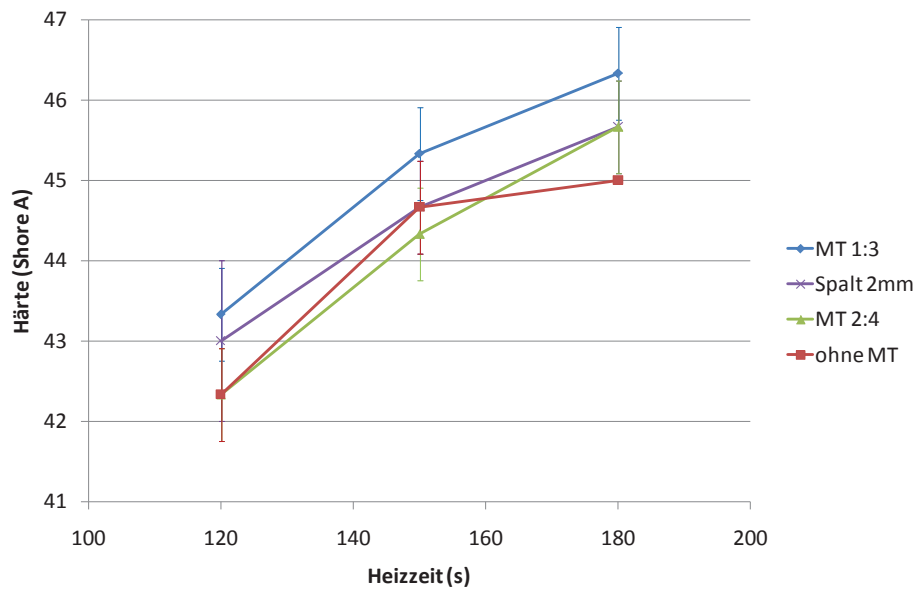


Abbildung 28: Härte in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s

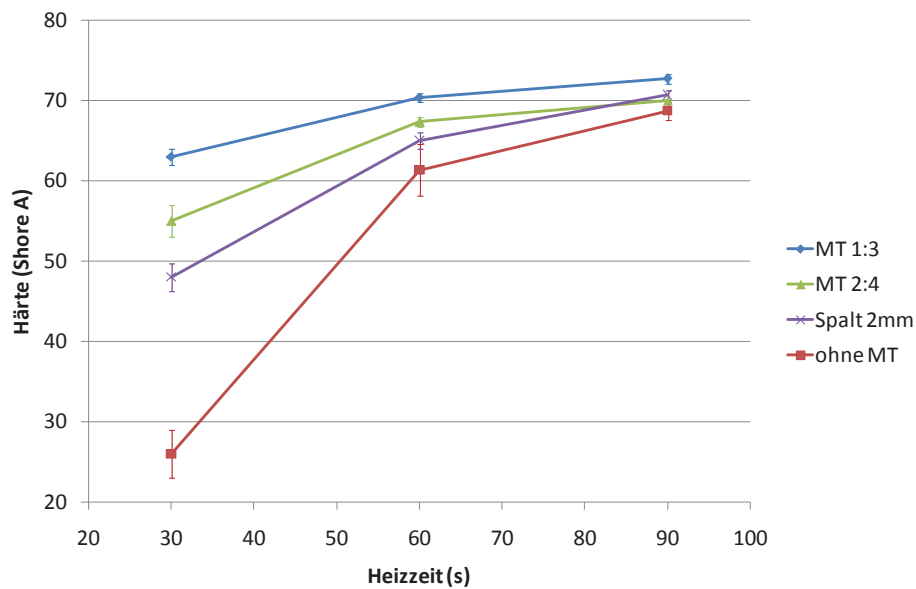


Abbildung 29: Härte in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s

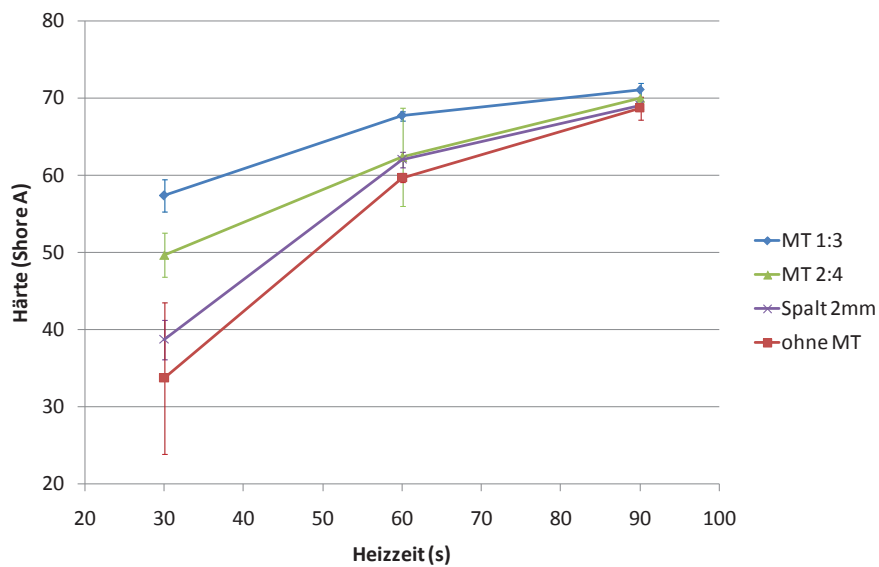


Abbildung 30: Härte in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischteilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s

Analoge Diagramme für den Druckverformungsrest sind in den Abbildungen 31 bis 34 dargestellt.

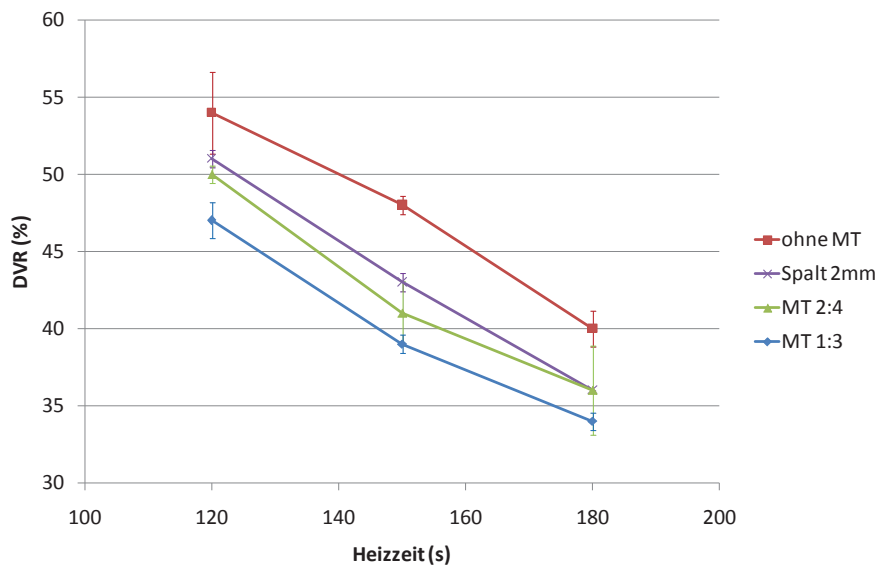


Abbildung 31: DVR in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischteilgeometrien für das Material EPDM bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s

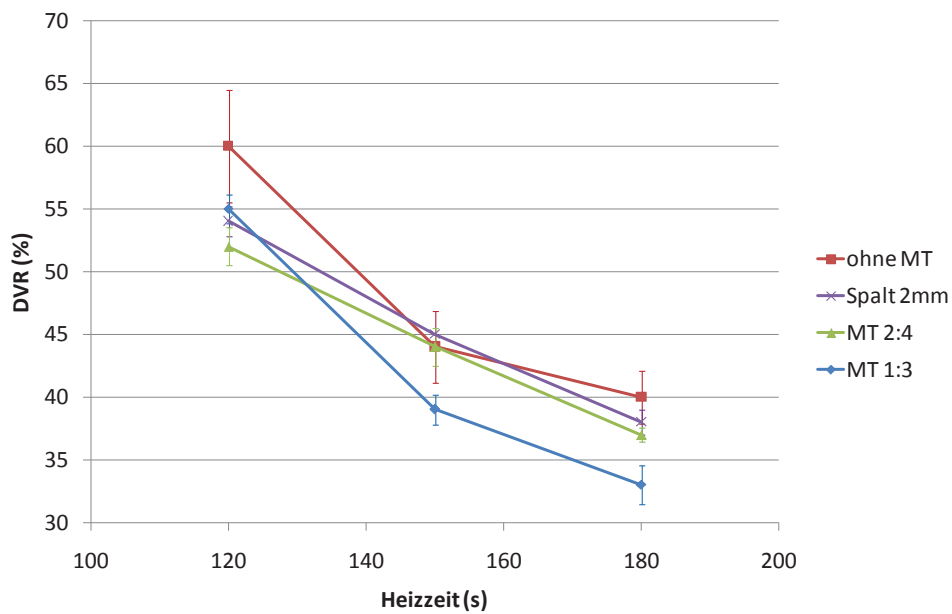


Abbildung 32: DVR in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s

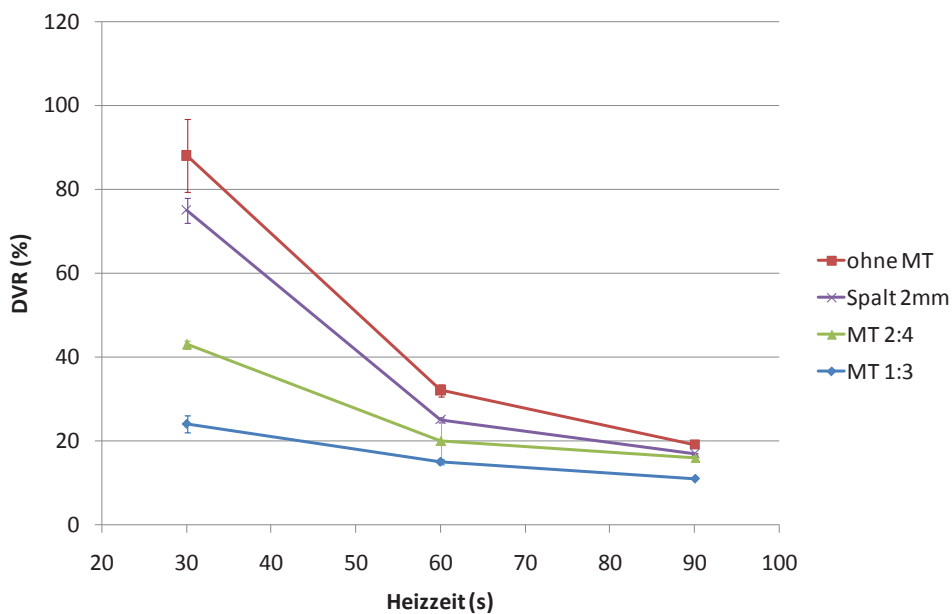


Abbildung 33: DVR in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s

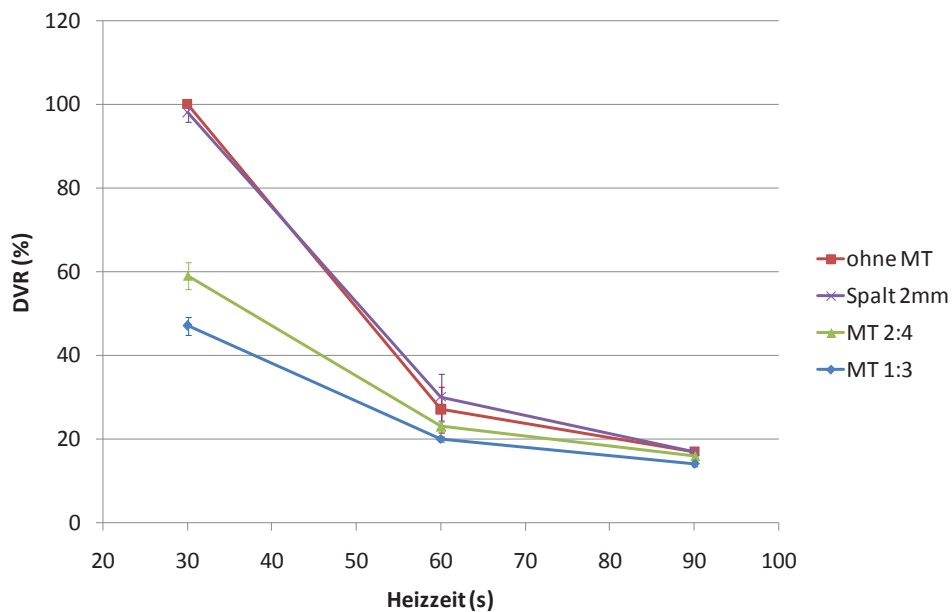


Abbildung 34: DVR in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s

Die aufgenommenen Messwerte entsprechen weitgehend den Erwartungen. Die Härte nimmt mit steigender Heizzeit zu und der Druckverformungsrest ab, was auf einen höheren Vernetzungsgrad hindeutet. Die Einspritzgeschwindigkeit wirkt sich entgegengesetzt aus. Erhöht sich diese, vermindert sich die Härte und der Druckverformungsrest steigt. Der Grund dafür dürfte in der verminderten Wirksamkeit des Mischteils bei hohen Einspritzgeschwindigkeiten zu suchen sein (vgl. 4.2.2). Der Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit ist stärker wahrzunehmen, wenn die Heizzeiten kurz sind.

Für den Zugversuch mussten Normprüfkörper (S2) hergestellt werden. Dazu musste das 6 mm dicke Formteil mittels Spaltmaschine aufgespalten werden. Aus den so erhaltenen 2 mm dicken Platten konnte der Zugprüfstab ausgestanzt werden. Beim NBR funktionierte dies ohne Probleme. Das EPDM jedoch war sehr schwer zu spalten. Da es sehr weich war, blieb es oft in den Walzen der Spaltmaschine hängen und es war keine glatte Schnittfläche zu bewerkstelligen. Die somit eingebrachte Oberflächenschädigung bewirkte eine sehr große Streuung im Zugversuch. Somit konnten keine eindeutigen Tendenzen festgemacht werden, und die Daten mussten verworfen werden. Der Zugversuch erzielte daher nur bei NBR aufschlussreiche Ergebnisse.

Die Reißfestigkeiten der NBR-Mischung sind in Abbildung 35 und Abbildung 36 dargestellt, die Reißdehnungen in Abbildung 37 und Abbildung 38. Der Zugversuch wurde bei einer Prüfgeschwindigkeit von 500 mm/min durchgeführt.

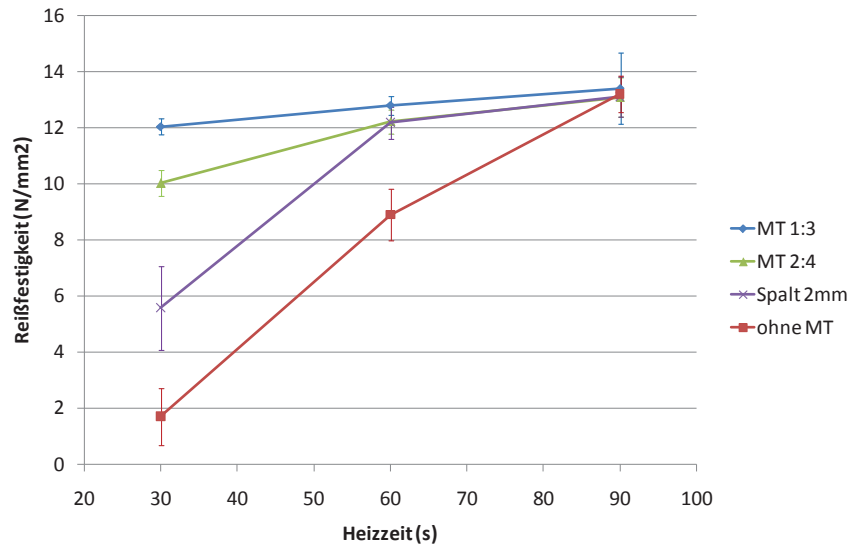


Abbildung 35: Reißfestigkeit in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s

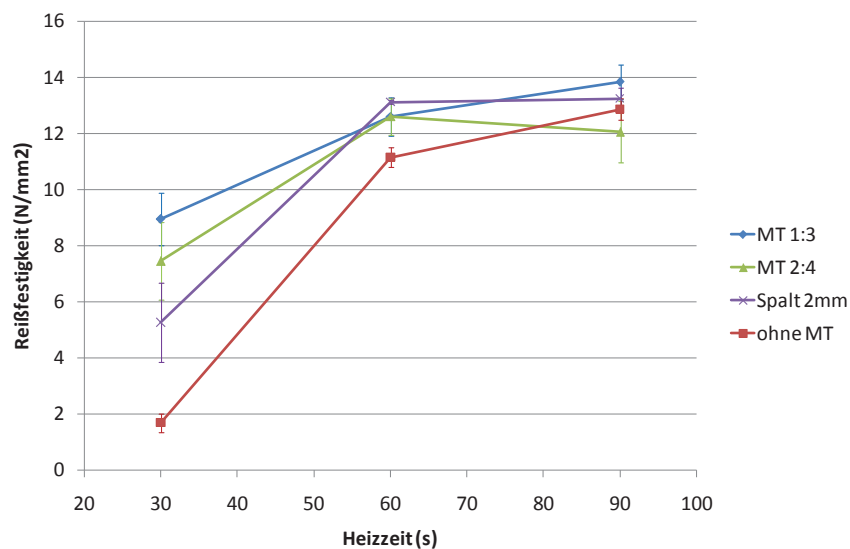


Abbildung 36: Reißfestigkeit in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s

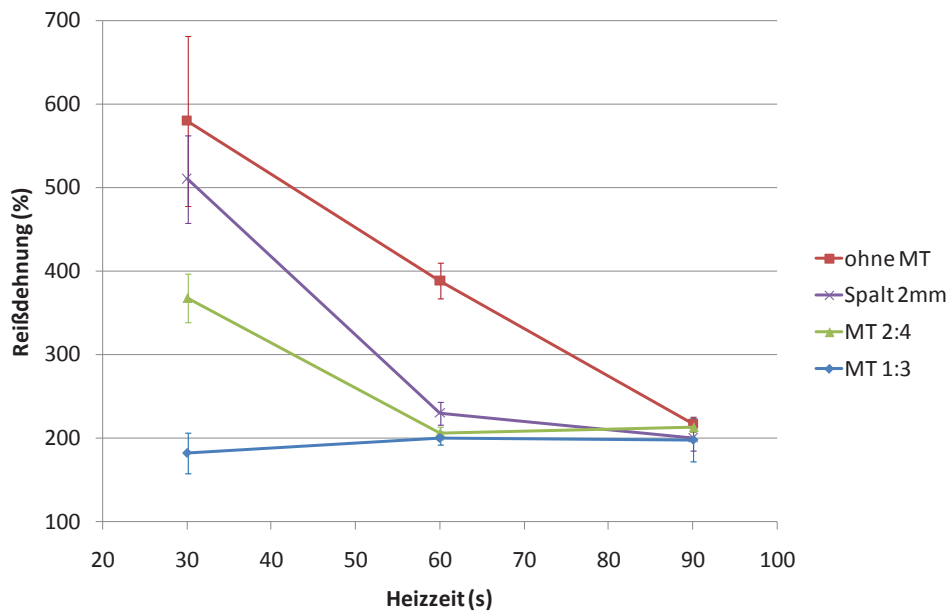


Abbildung 37: Reißdehnung in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischteilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s

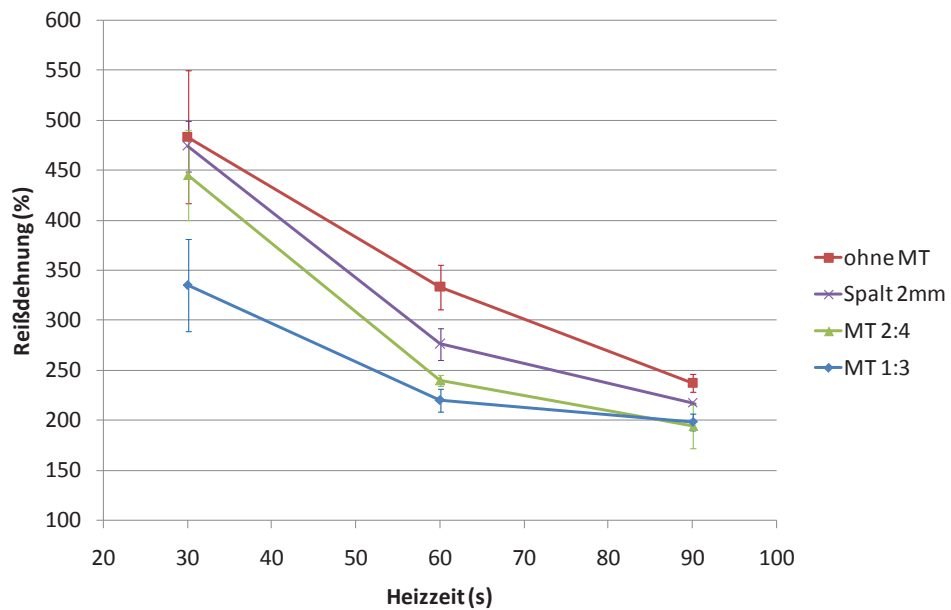


Abbildung 38: Reißdehnung in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischteilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s

Nach der Fertigung der Formteile stellte sich die Frage, ob die gemessenen Temperaturwerte mit den Werten aus der Formteilprüfung korrelieren. Höhere Temperaturen sollten zu einer höheren Härte und zu einem geringeren DVR führen. Die Ergebnisse zeigten, je höher die gemessene Temperatur bei der Anfertigung eines Formteils war, desto besser waren die gemessenen Werte bei der qualitativen Formteilüberprüfung, was im Allgemeinen auf einen höheren Vulkanisationsgrad schließen lässt (Abbildung 27 bis Abbildung 38).

4.2.4 Heizzeitverkürzung

Für die Berechnungen von konkreten Heizzeitverkürzungen gestaltet sich die Interpretation der Messwerte des EPDMs schwierig. Wie zuvor erwähnt, sind nur Werte für die Härte und den DVR vorhanden.

Für beide Materialien mussten zuerst die zu erreichenden Sollwerte für Härte, DVR, etc. festgelegt werden, um im nächsten Schritt die kürzest mögliche Heizzeit berechnen zu können, in der diese Eigenschaften erreicht werden.

Die Sollwerte für diese Auswertung zu finden, gestaltete sich schwierig, da die auf den Material-Datenblättern vorgegebenen Werte nicht immer erreicht wurden. Zwar wurden diese Daten mit denselben Mischungen aus derselben Charge ermittelt, jedoch wurden die Prüfkörper gepresst und 10-15 Minuten ausgeheizt. Somit sind die Verarbeitungsbedingungen nicht miteinander vergleichbar.

Da nach Angaben des Materialherstellers eine mögliche Applikation für beide Mischungen eine Dichtung ist, wurde als weiterer Anhaltspunkt für die Auswertung die DIN EN 681 herangezogen. In dieser Norm sind die Anforderungen an Wasserrohrdichtungen festgeschrieben, die in Tabelle 7 gegeben sind. Diese Werte sind als Anhaltspunkt zu sehen, da die verwendeten Materialien nicht hundertprozentig in die Norm fallen.

Tabelle 7: *Materialanforderungen laut DIN EN 681*

Härtekategorie (IRHD)	40	70
Härtetoleranz (IRHD)	±5	±5
Maximaler DVR 24h/70° (%)	20	20
Minimale Zugfestigkeit (N/mm²)	9	9
Minimale Reißdehnung (%)	400	200

Für die Härte des EPDMs wurde als zu erreichender Wert 45 ShoreA angenommen, da mit dem vom Hersteller angegebenen Wert von 43 ShoreA keine Auswertung möglich ist. Bei fast allen Heizzeiten hatten die Probekörper diesen Wert bereits überschritten. Weder der Normwert von 20 % noch der Wert laut Hersteller von 7,7% DVR wurden in den Versuchen erreicht. Dies ist auf die Verarbeitungsbedingungen zurückzuführen. Der Probekörper des Materialherstellers wurde deutlich länger geheizt als es beim gespritzten Formteil der Fall war. Dies dürfte auch zu einer vollkommenen Vulkanisation der inneren Schichten führen, was den DVR erhöht. Für die Auswertung wurde der Sollwert 40% DVR gewählt, da dieser eine gute Vergleichbarkeit gewährleistet und auch ohne Mischteil erreicht wurde.

Ähnliche Kompromisse mussten auch beim NBR getroffen werden. Als Sollwert für die Härte wurde 65 ShoreA gewählt, da dies der Untergrenze der Normtoleranz entspricht. Für den DVR wurde der Normwert 20% festgelegt, weil die Herstellerangaben von 6% wiederum nicht erreicht wurden. Für die Zugfestigkeit wurden die Normwerte deutlich überschritten und der vom Hersteller angegebene Wert von 12,7 N/mm² erreicht. Als Sollwert wurde 12 N/mm² verwendet. Die Reißdehnung laut Hersteller wurde kaum erreicht, jene der Norm nur unter gewissen Bedingungen. Mit einem Sollwert von 250% wurde die Reißdehnung etwas niedriger angesetzt, um eine Auswertung möglich zu machen.

Prinzipiell fällt auf, dass die Vorgaben des Herstellers mit den Verarbeitungsbedingungen der Versuche meistens nicht erreicht wurden. Dies ist aber eher auf das Verfahren des Spritzgusses als auf die Einwirkung des Mischteils zurückzuführen, da die Werte bei Verwendung des Mischteils tendenziell besser waren als ohne. Die Proben des Labors der Firma Kraiburg werden im Pressverfahren unter Laborbedingungen hergestellt und dabei deutlich länger ausgeheizt, als es im Spritzguss passiert (vgl. Tabelle 17, Tabelle 18 im Anhang).

In den Tabellen 8 bis 11 wurden mithilfe der gemessenen Materialdaten Rückschlüsse auf eine erzielbare Heizzeitverkürzung getroffen.

Es wurde aus den Abbildung 27 bis Abbildung 38 jene Heizzeiten ermittelt, bei denen der Sollwert der gewünschten Eigenschaft (Härte, DVR, Reißdehnung, Reißfestigkeit) erreicht wird. Die mögliche Heizzeitverkürzung berechnet sich aus dem Verhältnis zur Heizzeit, die ohne Verwendung des Mischteils für die entsprechende Eigenschaft notwendig ist.

Tabelle 8: Ermittlung der Heizzeitverkürzungen für EPDM bei einer Spritzgeschwindigkeit von 10 mm/s

EPDM bei 10 mm/s			
	Härte (Shore A)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	45	120	33
MT 2:4	45	150	17
Spalt	45	150	17
ohneMT	45	180	
	DVR (%)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	40	145	19
MT 2:4	40	155	14
Spalt	40	165	8
ohneMT	40	180	
durchschnittliche Verkürzung (%)			
MT 1:3			26
MT 2:4			15
Spalt			13

Tabelle 9: Ermittlung der Heizzeitverkürzung für EPDM bei einer Spritzgeschwindigkeit von 20 mm/s

EPDM bei 20 mm/s			
	Härte (Shore A)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	45	145	19
MT 2:4	45	165	8
Spalt	45	160	11
ohneMT	45	180	
	DVR (%)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	40	150	17
MT 2:4	40	170	6
Spalt	40	172	4
ohneMT	40	180	
durchschnittliche Verkürzung (%)			
MT 1:3			18
MT 2:4			7
Spalt			8

Tabelle 10: Ermittlung der Heizzeitverkürzung für NBR bei einer Spritzgeschwindigkeit von 10 mm/s

NBR bei 10 mm/s			
	Härte (Shore A)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	65	37	51
MT 2:4	65	55	27
Spalt	65	60	20
ohneMT	65	75	
	DVR (%)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	20	43	51
MT 2:4	20	60	31
Spalt	20	77	11
ohneMT	20	87	
	Reißfestigkeit (N/mm²)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	12	30	63
MT 2:4	12	58	28
Spalt	12	59	27
ohneMT	12	81	
	Reißdehnung (%)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	250	30	64
MT 2:4	250	53	37
Spalt	250	57	32
ohneMT	250	84	
durchschnittliche Verkürzung (%)			
MT 1:3			57
MT 2:4			31
Spalt			23

Tabelle 11: Ermittlung der Heizzeitverkürzung für NBR bei einer Spritzgeschwindigkeit von 20 mm/s

NBR bei 20 mm/s			
	Härte (Shore A)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	65	53	32
MT 2:4	65	70	10
Spalt	65	72	8
ohneMT	65	78	
	DVR (%)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	20	60	25
MT 2:4	20	72	10
Spalt	20	82	-3
ohneMT	20	80	
	Reißfestigkeit (N/mm²)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	12	55	27
MT 2:4	12	56	25
Spalt	12	55	27
ohneMT	12	75	
	Reißdehnung (%)	Heizzeit (s)	Verkürzung (%)
MT 1:3	250	53	38
MT 2:4	250	58	33
Spalt	250	73	15
ohneMT	250	86	
durchschnittliche Verkürzung (%)			
MT 1:3			31
MT 2:4			20
Spalt			12

Die durchschnittliche Verkürzung stellt den Mittelwert aller Verkürzungen pro Eigenschaft für jede einzelne Geometrie dar. Müssten alle Eigenschaften erfüllt werden, ist der Wert der geringsten Verkürzung (entspricht der längsten Heizzeit) die maximal mögliche Heizzeitverkürzung.

Zum Überblick sind die tabellarischen Werte in Abbildung 39 graphisch dargestellt.

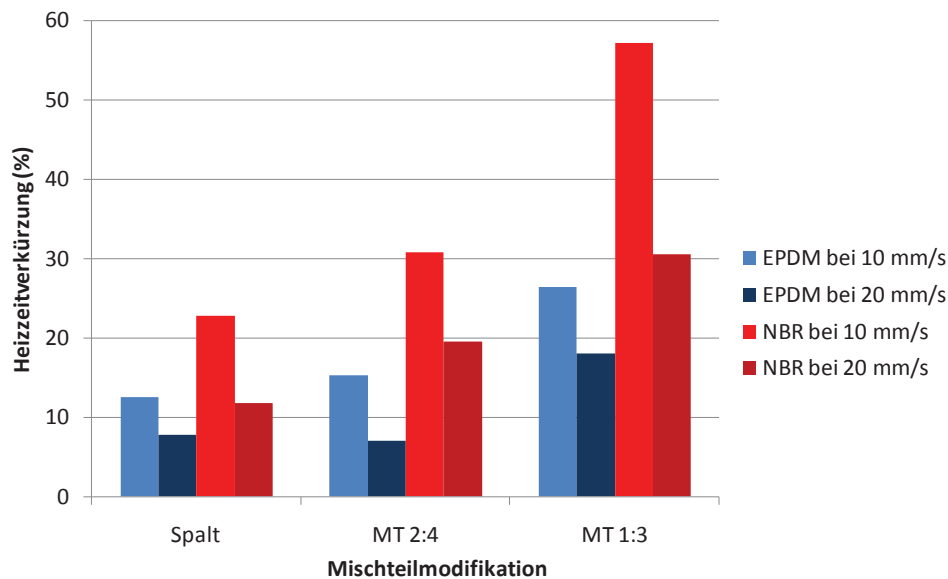


Abbildung 39: Errechnete Heizzeitverkürzungen

Die errechneten Heizzeitverkürzungen für EPDM sind prinzipiell mit Vorsicht zu betrachten, da das Spektrum der Eigenschaften für die verwendeten Heizzeiten sehr schmal ist (Abbildung 27 und Abbildung 28). Man befindet sich bereits in einem Heizzeitbereich, in dem das Material schon relativ weit ausvulkanisiert ist und in dem die Ergebnisse zwischen den Mischteilen nicht allzu unterschiedlich sind. Auch die Standardabweichungen sind vor allem bei der Shore-Härte ziemlich hoch, was auch daran liegt, dass diese üblicherweise als Median dreier Messungen ohne Kommastellen angegeben wird, was leicht eine Abweichung von einem ganzen Härtegrad bewirkt.

Die Heizzeitverkürzungen für EPDM bei 10 mm/s liegen zwischen 26% für MT 1:3 und 13% für den Scherspalt. Betrachtet man die Heizzeitersparnis bei der höheren Einspritzgeschwindigkeit, schrumpft sie auf etwa die Hälfte. Dies entspricht auch den Tendenzen, die bereits in der Betrachtung der Prozessdaten festgestellt wurden. Die beste Wirkung erzielt das engste Mischteil bei der niedrigsten Geschwindigkeit. Erhöht man die Einspritzgeschwindigkeit, wird mehr Temperatur durch Friktion im Anguss erzeugt, wohingegen die Heizwirkung des Mischteils sich nicht mehr so stark auswirkt.

Die Werte für NBR zeichnen ein klareres Bild, da das ganze Spektrum der Vulkanisation mit diesen Werten gezeichnet werden konnte (Abbildung 29 und

Abbildung 30). Die Heizzeitverkürzung fiel mit 23-57% bei einer Spritzgeschwindigkeit von 10 mm/s deutlich höher aus, was einerseits durch die unterschiedliche Viskosität des Materials bedingt sein dürfte. Ein weiterer Grund könnte in der unterschiedlichen Wahl der betrachteten Heizzeiten liegen. Obwohl das EPDM deutlich langsamer vulkanisierte, wurden doch relativ hohe Heizzeiten für die Betrachtung gewählt.

Bei NBR kann ebenfalls beobachtet werden, dass die erreichte Heizzeitreduktion mit steigender Einspritzgeschwindigkeit abnimmt. Die Gründe dafür sind dieselben wie für EPDM.

4.3 Zusatzversuche

4.3.1 Durchführung

In diesem Zusatzversuch sollte abgeklärt werden, inwieweit sich das vorhandene Mischteil für eine eventuelle Kaltkanalanwendung eignet. Es sollte geklärt werden, wie sich Druckverlust und Temperaturgewinn bei nicht beheiztem Mischteil auswirken. Die Zusatzversuche konnten nur mit EPDM durchgeführt werden, da das NBR zu zähfließend war und somit das „kalte“ Mischteil einen zu hohen Fließwiderstand darstellte, um die Form füllen zu können. Tabelle 12 zeigt die verwendeten Versuchsparameter.

Tabelle 12: Versuchsparameter für die Zusatzversuche

Material	EPDM	
Mischteile	MT 2:4 unbeheizt;	
Werkzeugtemperatur	180	°C
Mischteilmperatur	ca. 110	°C
Zylindertemperatur	70	°C
Einspritzgeschwindigkeit	10; 20	mm/s

Es wurde zunächst das Werkzeug aufgeheizt, ohne die separate elektrische Beheizung des Mischteils einzuschalten. Dann wurden einige Schuss gefahren und die Oberflächentemperatur der Mischteileinsätze wiederholt gemessen. Es stellte sich eine relativ stabile Temperatur von etwa 110°C ein. Den Haupteinfluss auf diese Temperatur dürfte die Wärmeübertragung vom Werkzeug zum Mischteil ausüben, da das Mischteil am Werkzeug angeschraubt wird und somit keine thermische Entkopplung gegeben ist.

Die Versuche wurden zweimal durchgeführt. Beim zweiten Durchgang wurde auf das Reinigen des Mischteils verzichtet und der nächste Schuss einfach durchgespritzt. Dies sollte quasi ähnliche Bedingungen, die in einem Kaltkanal herrschen, simulieren.

4.3.2 Ergebnisse

Bei der Formteilkfüllung traten einige Schwierigkeiten auf. Das „kalte“ Mischteil zeigte einen höheren Fließwiderstand, der eine komplette Füllung der Formteile unmöglich machte. Die Messungen konnten dennoch verwendet werden. Die Auswertung erfolgt analog zu den zuvor angeführten Versuchsreihen. Die gesammelten Werte finden sich im Anhang in Tabelle 24. Die Temperaturkurven finden sich in Abbildung 40, die Druckkurven in Abbildung 41. Zum Vergleich wurden jeweils die Kurven für das Mischteil 2:4 und ohne Mischteil aus dem Hauptversuch ebenfalls in die Diagramme eingetragen.

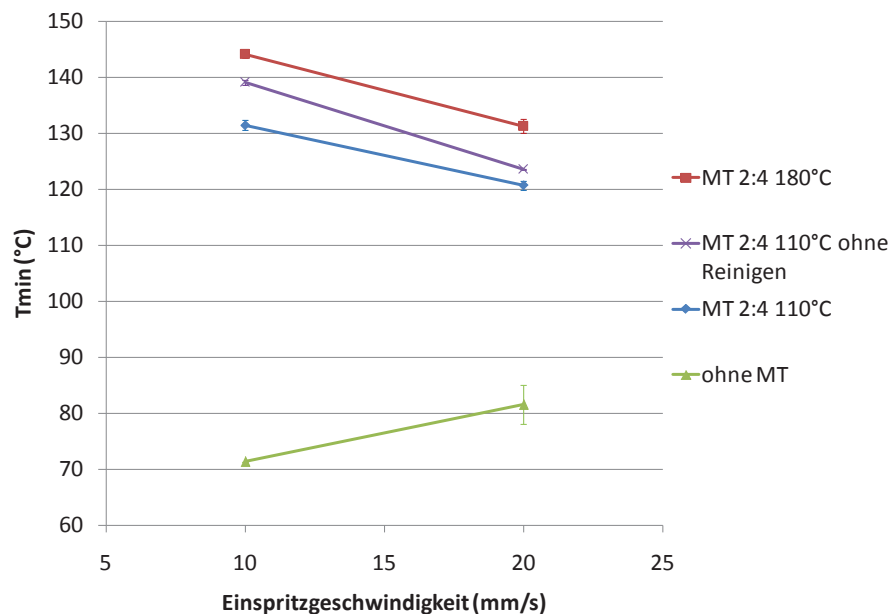


Abbildung 40: T_{min} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und Mischteilmperatur für das Material EPDM

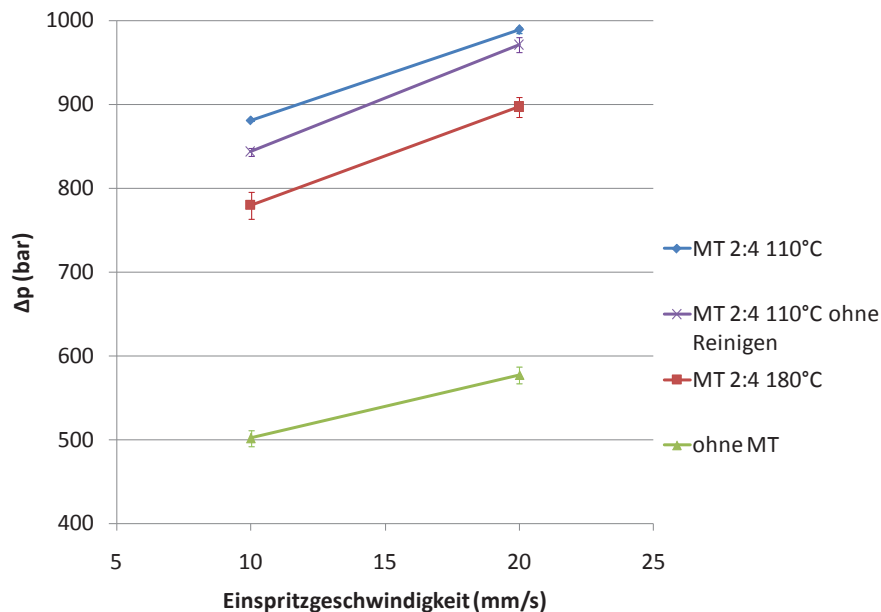


Abbildung 41: Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und Mischteilterperatur für das Material EPDM

4.3.3 Interpretation

Die erhaltenen Werte entsprechen wieder den Erwartungen. Das „kalte“ Mischteil bewirkt einen nicht ganz so hohen Temperaturgewinn wie das heiße. Der Unterschied liegt hier bei etwa 14°C. Ohne Reinigen sind die Werte etwas besser, was auf eine Vorwärmung des Materials im Mischteil während der Heizzeit des vorangegangenen Schusses zurückzuführen ist.

Die Druckwerte zeigen ein gegenläufiges Bild. Das kältere Mischteil zeigt einen Druckverlust, der um etwa 100 bar höher ist als die heiße Variante. Etwas bessere Werte ergeben sich, wenn man zwischen den Schüssen auf eine Reinigung des Mischteils verzichtet.

Das führt zu dem Schluss, dass das vorhandene Mischteil für eine Kaltkanalanwendung nicht geeignet ist. Je kälter es temperiert wird, desto ineffektiver arbeitet es. Der Druckverbrauch steigt weiter an, wobei der Temperaturgewinn abnimmt. Eine Temperatur von 110°C ist außerdem für eine Kaltkanalanwendung sehr hoch. Hier arbeitet man normalerweise mit ähnlichen Temperaturen, wie bei der Zylindertemperierung (70-80°C). Es ist also anzunehmen, dass sich der hier beobachtete Effekt mit niedrigeren Mischteilterperaturen noch weiter verstärkt.

4.4 Schlussfolgerungen aus den Versuchen

Es wurde bewiesen, dass mit dem am Institut für Kunststoffverarbeitung entwickelten Heiz-Scher-Mischteil eine erhebliche Temperaturerhöhung realisierbar ist, die sich auch direkt auf die Formteileigenschaften auswirkt. Diese Temperaturerhöhung ist stark abhängig von den verwendeten Einsätzen im Mischteil sowie der eingestellten Spritzgeschwindigkeit.

Das Mischteil wirkt umso effektiver, je kleiner der Scherspalt ist und je langsamer eingespritzt wird. Dies zeigt sich in der erzielten Temperatur sowie in den Werten aus der Qualitätsüberprüfung der Formteile. Auch die Druckwerte haben dieselbe Tendenz. Je langsamer eingespritzt wird, umso geringer ist der Druckverlust am Mischteil.

Wird kein Mischteil eingesetzt, bewirkt einzig die Dissipationserwärmung den Anstieg der Massetemperatur. Diese ist umso höher, je schneller eingespritzt wird.

Die erzielbaren Heizzeitreduktionen sind mit bis zu maximal 50% erheblich, allerdings auch nicht allgemein umlegbar, da ein starker Einfluss des Materials zu beobachten ist.

Die hier erzielten Ergebnisse beziehen sich auf ein Formteil von 6 mm Dicke. Bekanntlich fließt die Formteildicke quadratisch in die Heizzeit ein (ein doppelt so dickes Formteil benötigt die vierfache Heizzeit). Da das hier betrachtete System die Starttemperatur des gesamten Materials zu Beginn der Heizzeit erhöht, erreicht man damit auch eine frühere Vernetzung des Materials in der Formteilmittte, was bei dickwandigen Formteilen im herkömmlichen Verfahren die meiste Zeit in Anspruch nimmt. Somit werden die potentiellen Heizzeitverkürzungen mit steigender Formteildicke immer größer.

Ein großes Problem ergibt sich jedoch bei der praktischen Anwendbarkeit des Mischteiles. Ein grundlegendes Problem stellt die Tatsache dar, dass das Mischteil nach jedem Schuss separat entformt werden muss. Dies ist in Zeiten von Kaltkanal und angusslosem Spritzguss nicht mehr zeitgemäß. Somit wäre das Mischteil nur in einem Bruchteil der Anwendungen einsetzbar, wohingegen eine Konzipierung für das gesamte Sortiment an Gummi-Spritzgussmaschinen wünschenswert wäre.

Die Anwendung in einem Kaltkanal ist nach den Ergebnissen der Zusatzversuche ebenfalls auszuschließen. Je kälter das durch das Mischteil gespritzte Material ist, desto höher ist der Druckverlust, den das Mischteil verursacht, und desto niedriger ist der dadurch erzielte Temperaturgewinn. Für eine Kaltkanalanwendung müsste eine andere Geometrie entwickelt werden, die eher einem kurzen, aber intensiven Scherspalt entsprechen würde.

5 Simulation und Berechnungen

5.1 Simulation

5.1.1 Geometrie

Die Simulation wurde anschließend an die Versuche mittels Polyflow (Ansys Inc., Version 3.12) durchgeführt. Da sich das gegebene Mischteil für die Firma Engel als nicht direkt einsetzbar gezeigt hat (vgl. 4.4), wird auf eine genaue Nachbildung der Versuche verzichtet. Viel mehr sollen Hinweise für eine mögliche Umgestaltung des Konzepts gesucht werden. Wie in den Versuchen erwähnt, ist eine Kaltkanalanwendung eines Systems zur Heizzeitverkürzung nur sinnvoll, wenn die verwendeten Komponenten alle unbeheizt sind. So führen die Überlegungen eher zu einem System ähnlich den auf dem Markt vorhandenen Produkten (vgl. 2.2). Aus diesem Grund wurden in der Simulation zwei verschiedene Geometrien erzeugt (Tabelle 13).

Tabelle 13: Geometrien für die Simulation

Bezeichnung	Länge (mm)	Breite (mm)	Höhe (mm)	Tw (°C)	Tm (°C)
“Mischteil”	80	40	1,5	180	70
Schlitz	5	5	0,61(NBR)/ 0,465(EPDM)	70	70

Das Mischteil ist hier unter Anführungszeichen gesetzt, da es sich nicht um das Mischteil aus den Versuchen handelt, sondern um einen Scherspalt. Dieses Mischteil wird mit einer Wandtemperatur von 180°C beheizt. Der Schlitz entspricht einem kurzen Scherspalt, in dem die Temperaturerhöhung nur durch Schererwärmung vonstatten geht und keine Energie durch Wärmeleitung eingebracht wird. Die Spalthöhen wurden für die beiden Materialien unterschiedlich gewählt, um ähnliche Temperaturwerte wie mit dem Mischteil zu bekommen.

5.1.2 Materialdaten

Die in der Simulation verwendeten Materialdaten wurden von der Anwendungstechnik der Firma Engel Austria GmbH zur Verfügung gestellt. Sie stammen allerdings nicht von den im Versuch verwendeten Materialien, sondern aus der Datenbank der Berechnungssoftware Rubber-Soft (Krehwinkel & Schneider GmbH, Köln) und sind als 2-Punkt-Werte gegeben. Für die Temperaturverschiebung ist ein weiterer Punkt bei einer höheren Temperatur angegeben. Aus diesen Kurven wurden die Parameter des Potenzansatzes ausgerechnet. Die übrigen benötigten Daten sind als Punktwerte gegeben (Tabelle 14 und Tabelle 15).

Tabelle 14: Materialdaten für NBR 70ShA

NBR 70ShA		
Viskositätsdaten		
	$\dot{\gamma}$ (1/s)	η (Pa*s)
80°C	20	8000
	60	4500
100°C	15	7000
Potenzansatz		
k	38412	(Pa*s ⁿ)
n	0,476	
Temperaturverschiebung nach Arrhenius		
T ₀	80	(°C)
E ₀	32661	(J/mol)
Thermodynamische Daten		
Dichte	1,25	(g/cm ³)
spez. Wärmekapazität	1,65	(J/(g*K))
Temperaturleitzahl a	0,16	(mm ² /s)

Tabelle 15: Materialdaten für EPDM 50ShA

EPDM 50ShA		
Viskositätsdaten		
	$\dot{\gamma}$ (1/s)	η (Pa*s)
80°C	150	1500
	400	800
100°C	120	1200
Potenzansatz		
k	37217	(Pa*s ⁿ)
n	0,359	
Temperaturverschiebung nach Arrhenius		
T ₀	80	(°C)
E ₀	55809	(J/mol)
Thermodynamische Daten		
Dichte	1,12	(g/cm ³)
spez. Wärmekapazität	1,3	(J/(g*K))
Temperaturleitzahl a	0,12	(mm ² /s)

In Abbildung 42 sind die gegebenen Viskositätskurven der Übersicht halber noch einmal aufgezeichnet. Es ist zu beachten, dass sich die beiden Materialien bei niedrigen Schergeschwindigkeiten annähernd gleich verhalten, jedoch die beiden Kurven eine unterschiedliche Steigung haben. So ist das NBR bei hohen Schergeschwindigkeiten deutlich zähfließender.

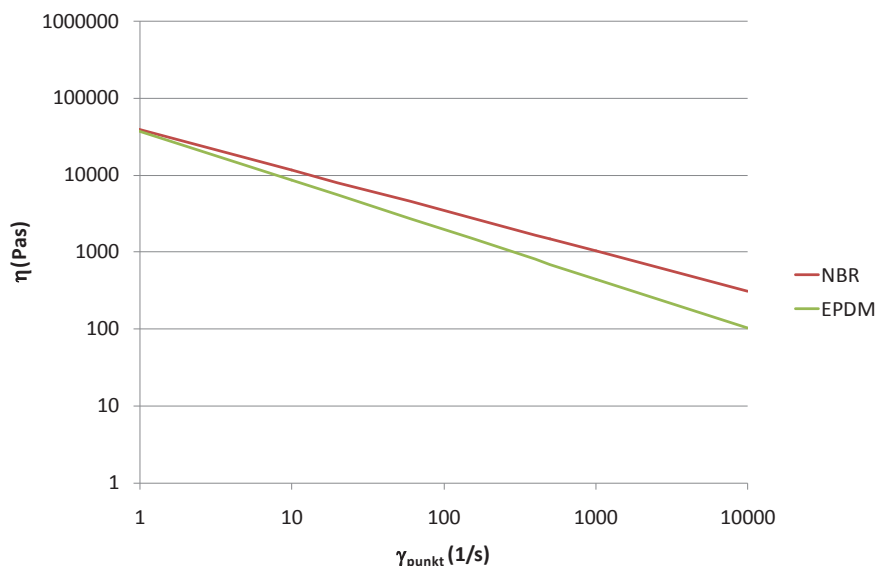


Abbildung 42: Viskositätskurven der in der Simulation verwendeten Materialien

5.1.3 Durchführung

Die Geometrien wurden erstellt, vernetzt und die entsprechenden Randbedingungen gesetzt. Der vorzugebende Volumenstrom wurde aus den Versuchen rechnerisch ermittelt. Er ergibt sich aus dem Schneckendurchmesser und der Einspritzgeschwindigkeit. In den Ergebnissen wird jeweils die Einspritzgeschwindigkeit angegeben, um die Vergleichbarkeit mit den Versuchen zu wahren. Durchgeführt wurden die Berechnungen jeweils bei 10, 20 und 30 mm/s Einspritzgeschwindigkeit.

Das Mischteil wurde zur Zeitersparnis in 2D simuliert. Eine 3D-Vergleichsrechnung ergab annähernd dieselben Werte. In der 3D-Berechnung waren die Temperaturen am Austrittsquerschnitt in etwa 2°C höher, was auf die Randeinflüsse zurückzuführen ist.

Der Schlitz hingegen wurde vollständig in 3D simuliert.

5.1.4 Ergebnisse

Für die Auswertung der Berechnungen wurden die Knotenpunkte am Austrittsquerschnitt (Outflow) betrachtet. Der Wert T_{mittel} bezeichnet somit die mittlere Temperatur der Knotenpunkte am Outflow des Mischteils bzw. des Schlitzes. Abbildung 43 zeigt T_{mittel} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit für NBR, Abbildung 44 für EPDM.

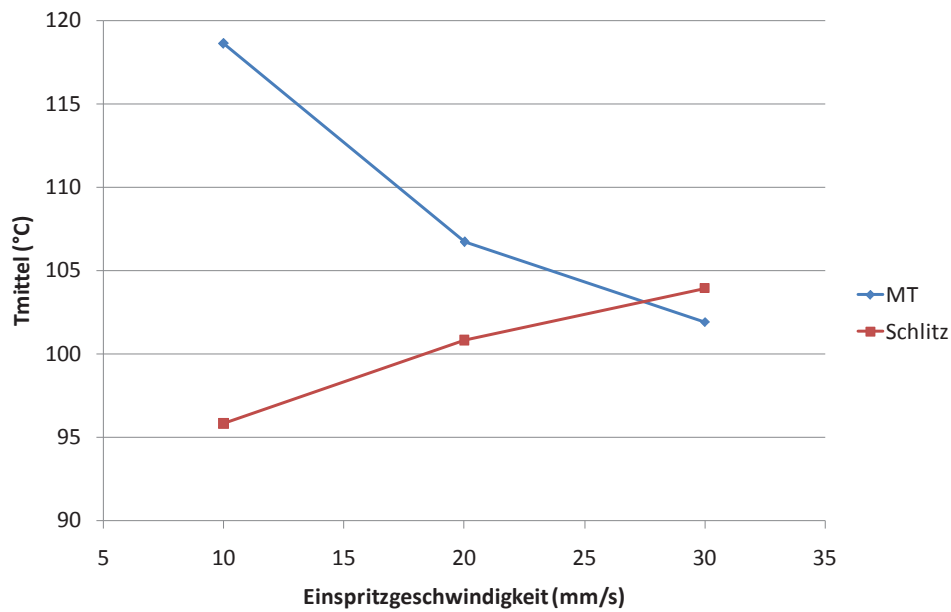


Abbildung 43: T_{mittel} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit für NBR

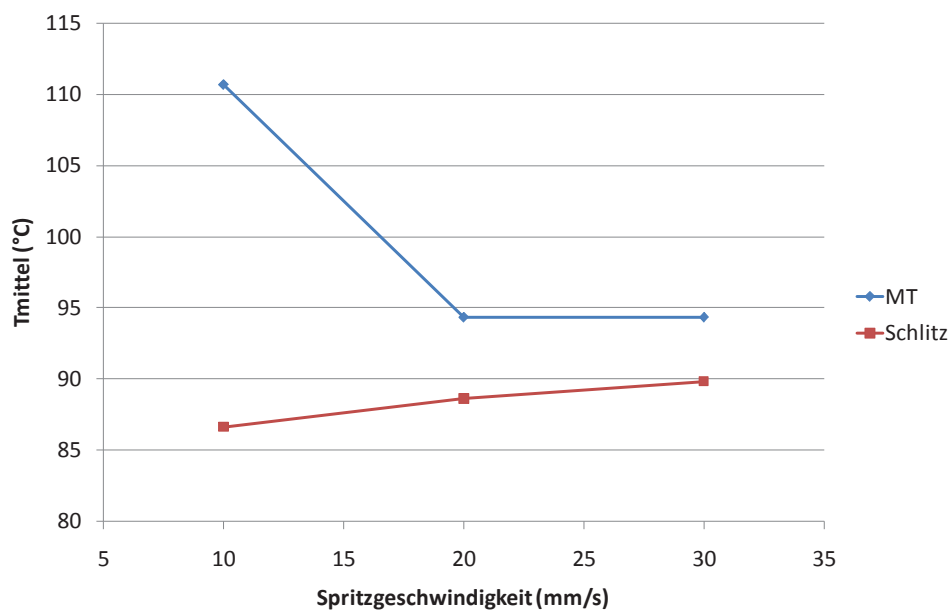


Abbildung 44: T_{mittel} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit für EPDM

Die Verteilung der Temperatur im Scherspalt war allerdings in beiden Fällen keineswegs homogen. Um dies genauer betrachten zu können, wurden axiale Schnittbilder der Simulation angefertigt (Abbildung 45, Abbildung 46).

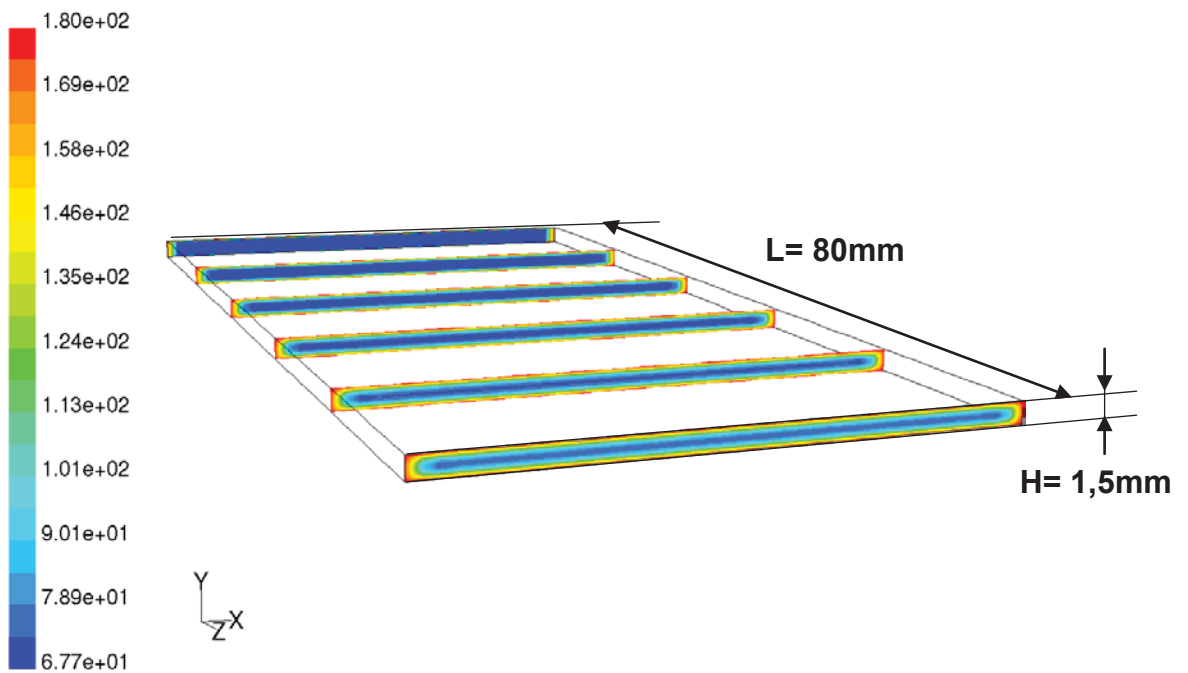


Abbildung 45: Temperaturverteilung für das Mischteil mit dem Material EPDM bei der Einspritzgeschwindigkeit 10 mm/s; Werte in °C

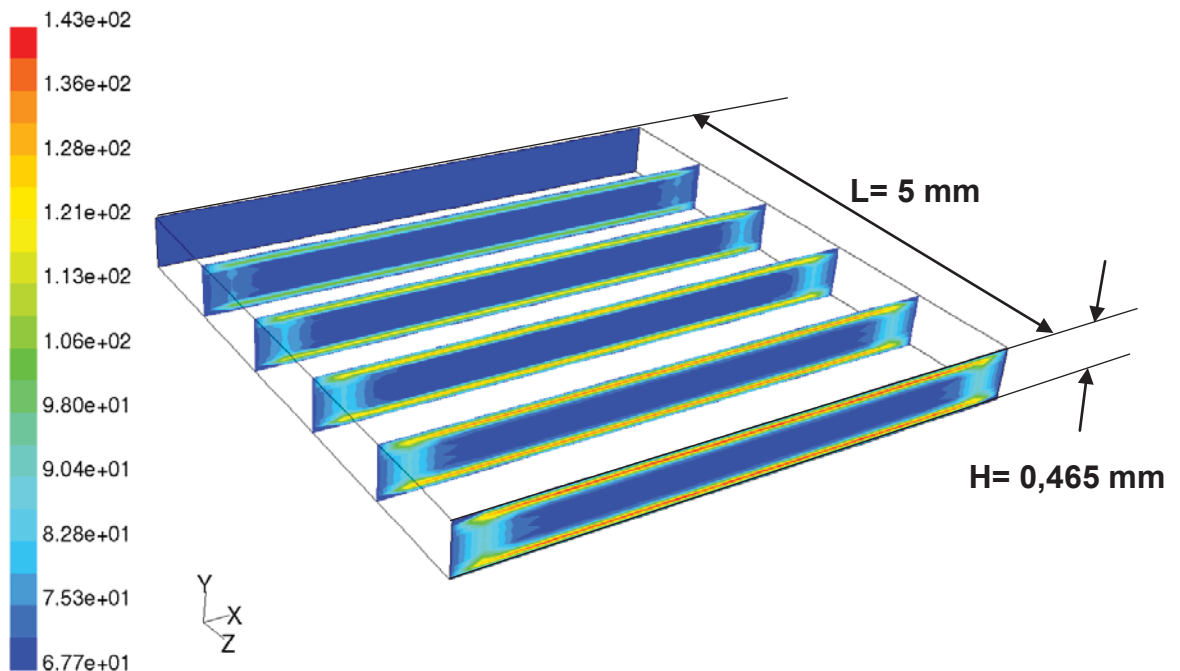


Abbildung 46: Temperaturverteilung für den Schlitz mit dem Material EPDM bei der Einspritzgeschwindigkeit 10 mm/s; Werte in °C

Die Druckverluste der Geometrien konnte direkt aus den Ergebnissen der Simulationen ausgelesen werden und sind in Abbildung 47 und Abbildung 48 dargestellt.

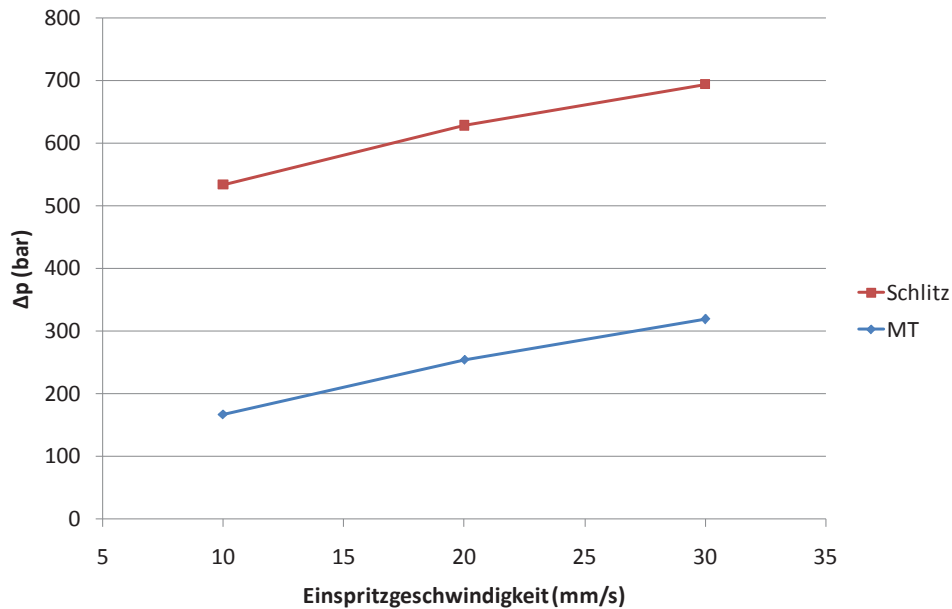


Abbildung 47: Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit für NBR

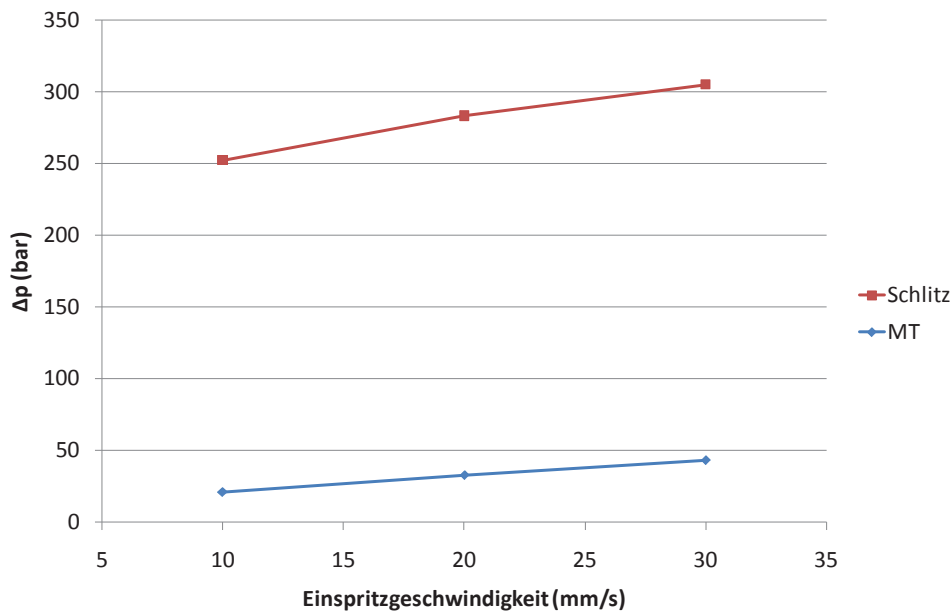


Abbildung 48: Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit für EPDM

Die Ergebnisse für NBR waren analog denen für EPDM.

5.1.5 Interpretation

In der Simulation konnten die gleichen Tendenzen wie in den Versuchen festgestellt werden. Das „Mischteil“ der Simulation verhält sich weitgehend wie das Mischteil der Versuche. Je schneller gespritzt wird, desto niedriger ist der erzielte Temperaturgewinn, jedoch steigt der Druckverlust weiter an. Der Schlitz wiederum verhält sich in seiner Charakteristik ähnlich wie der Anguss in den Versuchen. Hier steigt die Temperatur mit der Einspritzgeschwindigkeit. Dies ist auf die höhere Schererwärmung zurückzuführen. Die absoluten Temperaturwerte gestalten sich hier allerdings anders, was aber klar ist, da die Versuchsbedingungen nicht direkt in der Simulation abgebildet wurden. Sowohl die Geometrien als auch die Materialien sind hier unterschiedlich.

Es ist zu beachten, dass mit dem Schlitz ähnliche Temperaturerhöhungen wie mit dem „Mischteil“ erreichbar sind. Es spielt nur die Höhe der Einspritzgeschwindigkeit eine Rolle (Abbildung 43). In Abbildung 44 lässt sich darüber hinaus erkennen, dass sich das beheizte „Mischteil“ bei entsprechenden Einspritzgeschwindigkeiten adiabat verhält. Der Anteil der Wärmeleitung verliert hier zusehends seine Bedeutung.

Mit dem Schlitz lassen sich also ebenfalls ähnliche Temperaturen wie mit dem „Mischteil“ erzielen. Allerdings erhöht sich der Druckverlust für diese Erwärmung beträchtlich, was sich im Einsatzfall auf einen erhöhten Einspritzdruck auswirkt. Dies erklärt auch, warum die Firma IWB Steinl für diesen Zweck einen eigenen Einspritzzylinder verwendet (vgl. 2.2.1). Auf diese Weise muss der erhöhte Druckbedarf nicht vom Spritzaggregat alleine bewältigt werden.

Auffallend sind in dieser Simulation auch die äußerst inhomogenen Temperaturverteilungen in den Scherspalten beider Systeme. Im Falle des „Mischteils“ sind die höchsten Temperaturen direkt an der Wand zu finden, da diese konstant beheizt wird. Beim Schlitz hingegen findet man die höchsten Temperaturen im Bereich der größten Scherung in Wandnähe. In beiden Fällen fließt die Masse in der Mitte der Spalte fast ohne Temperaturerhöhung durch. Dies wirft die Gefahr von lokalen Überhitzungen des Materials auf, die besonders beim Schlitz gegeben ist. Gestaltet sich die Maximaltemperatur in Abbildung 46 mit 143°C noch recht moderat, könnten bei hohen Volumenströmen mitunter Temperaturen auftreten, die weit über der Werkzeugtemperatur liegen. Sollte ein System wie der Schlitz in Anwendung

kommen, müssten die Einflüsse dieser möglichen Überhitzungen auf die Formteileigenschaften untersucht werden.

5.2 Berechnungen

Erweiternd zu der Simulation wurden einige analytische Berechnungen angestellt. Ziel war es, ein einfaches Hilfsmittel für die Abschätzung der erzielten Temperaturerhöhung und des Druckverlustes zu kreieren.

5.2.1 Formeln

Die Berechnung wurde nach Agassant [13] durchgeführt. Die Herleitung der Formeln für die durchschnittlichen Temperaturen stammen aus [14].

Zunächst werden aus dem Schneckendurchmesser (35 mm) und aus der Geometrie des gewählten Mischteils der Volumenstrom \dot{V} und die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit \bar{v} im Mischteil berechnet (Gleichung 7 und 8).

$$\dot{V} = v_{\text{Schnecke}} \cdot \frac{D^2 \pi}{4} \quad (7)$$

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}}{B \cdot H} \quad (8)$$

Anschließend wird der Düsenleitwert eines rechteckigen Spaltes berechnet (Gl. 9),

$$K = \frac{B \cdot H^{m+2}}{2^{m+1} \cdot (m+2) \cdot L^m} \quad \text{für } \frac{B}{H} > 20 \quad (9)$$

um wiederum mit Gleichung 10 den Druckverlust zu errechnen.

$$\Delta p = \left(\frac{\dot{V}}{\Phi \cdot K} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (10)$$

Für die weiteren Berechnungen wird die Cameronzahl (Gl. 11) benötigt. Diese bezeichnet das Verhältnis der Wärmeleitung quer zur Strömungsrichtung zur konvektiv transportierten Wärme.

$$Ca = \frac{\lambda \cdot L}{\rho \cdot c_p \cdot \bar{v} \cdot H^2} \quad (11)$$

Die Brinkmanzahl ist in Gleichung 12 gegeben. Sie gibt das Verhältnis der Dissipation zur Wärmeleitung in radialer Richtung an.

$$Br = \frac{k \cdot \bar{v}^{1+n}}{(T - T_0) \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{1-n} \quad (12)$$

Für die Berechnung der mittleren Temperatur am Austrittsquerschnitt des Mischteils \bar{T} gibt es drei verschiedene Fälle, die nach der Höhe der Cameronzahl unterschieden werden.

- $Ca > 1$, voll entwickeltes Temperaturprofil:

In diesem Fall überwiegt die Wärmeleitung und die Austrittstemperatur ist gleich der Werkzeugtemperatur $\bar{T} = T_w$.

- $0,01 < Ca < 1$ Übergangsregion:

In diesem Bereich sind beide Mechanismen an der Temperaturerhöhung beteiligt. Die dazugehörige Formel ist in Gleichung 13 dargestellt.

$$\bar{T}(z) = T_0 + \left(\frac{k \cdot \bar{v}^{1+n}}{\lambda} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{1-n} \left[\left(\frac{1+2n}{n}\right)^n \cdot \frac{2n(1+3n)}{(1+4n) \cdot (2+5n)} \right] \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{\left[\left(\frac{1+2n}{n}\right)^n \cdot \frac{2n(1+3n)}{(1+4n) \cdot (2+5n)} \right] \cdot Br} \right) \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-4}{\left[\left(\frac{1+2n}{n}\right)^n \cdot \frac{2n(1+3n)}{(1+4n) \cdot (2+5n)} \right] \left(\frac{n}{1+2n}\right)^n} Ca \cdot \frac{z}{L} \right) \right] \quad (13)$$

- $Ca < 0,01$, adiabate Temperaturentwicklung:

Es hat nur mehr die dissipative Erwärmung Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung. Es findet hier keinerlei Temperatureaustausch zwischen Werkzeugwand und Masse mehr statt. Gleichung 14 beschreibt diese Vorgänge.

$$\bar{T}(z) = T_0 + \frac{\Delta p}{\rho \cdot c_p} \frac{z}{L} \quad (14)$$

5.2.2 Durchführung

Es werden dieselben Angaben wie in der Simulation herangezogen. Diese finden sich in den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2.

Die einfache Berechnung selbst erfolgte mittels Software Excel (Microsoft, 2007). Als Erweiterung wurde ein Berechnungsprogramm in Visual Basic 6.5 (Microsoft, 2006) geschrieben, das auch die Temperaturverschiebung der Viskosität berücksichtigt sowie die Aufteilung der Gesamtlänge in beliebige Abschnitte ermöglicht, um diese einzeln zu berechnen. Der Programmcode befindet sich im Anhang in 9.3.

5.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 16 zusammengefasst. In „Analytische Berechnung“ wurde das einfache Excel-Sheet verwendet. Die Werte „mit Temperaturverschiebung“ wurden mithilfe des Berechnungsprogramms ohne Unterteilung in Abschnitte ermittelt. „Mit 10 Abschnitten“ entspricht dem vollen Einsatz des Programms.

Tabelle 16: Ergebnisse der analytischen Berechnungen

		Polyflow		Analytische Berechnung		mit Temperaturverschiebung 1 Abschnitt		mit Temperaturverschiebung 10 Abschnitte		
	Einspritzgeschw. (mm/s)	deltap (bar)	Tquer (°C)	deltap (bar)	Tquer (°C)	deltap (bar)	Tquer (°C)	deltap (bar)	Tquer (°C)	
MT	NBR	10	167	118,6	1033	164,4	744	136,6	350	197,0
		20	254	106,7	1437	163,2	1036	136,4	451	218,2
		30	318,2	101,9	1743	169,6	1230	139,7	507	237,3
	EPDM	10	20,7	110,7	478	147,2	342	126,6	135	189,4
		20	32,7	94,3	613	136,8	461	120,8	176	199,1
		30	42,9	94,3	710	118,7	586	110,3	580	109,8
Schlitz	NBR	10	533	95,8	1043	120,6	860	111,7	854	111,4
		20	628	100,8	1451	140,3	1103	123,5	1092	122,9
		30	694	104,0	1760	155,3	1267	131,4	1253	130,7
	EPDM	10	252	86,6	481	103,1	431	99,6	428	99,4
		20	283	88,6	617	112,4	521	105,8	516	105,5
		30	305	89,8	714	119,0	581	109,9	574	109,4

Die Werte „mit Temperaturverschiebung“ hatten die geringste Abweichung von der Polyflow-Berechnung, auch wenn der Unterschied noch ziemlich groß ist. Diese

Werte sind in Abbildung 49 und Abbildung 50 der Anschaulichkeit halber noch einmal dargestellt.

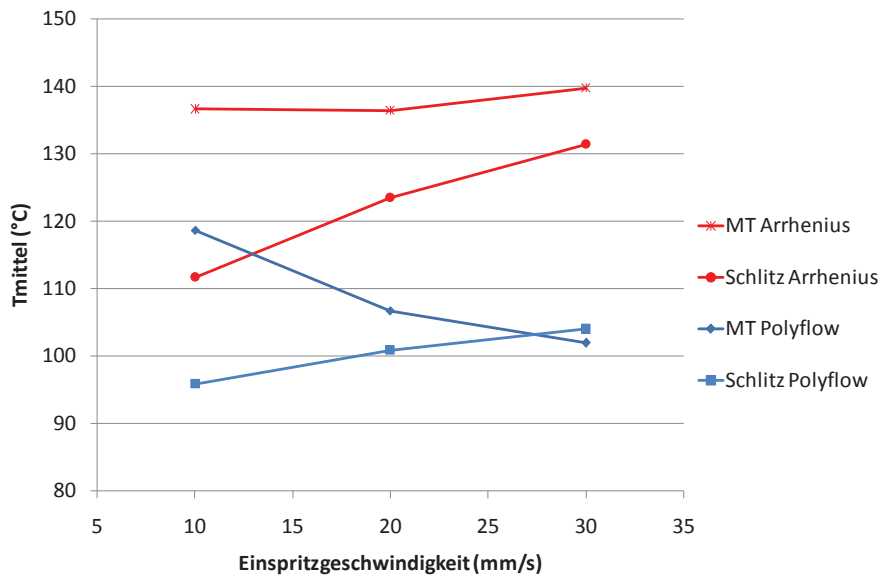


Abbildung 49: Vergleich der mittleren Temperaturen aus Polyflow und der analytischen Berechnung mit Berücksichtigung der Temperaturverschiebung für NBR

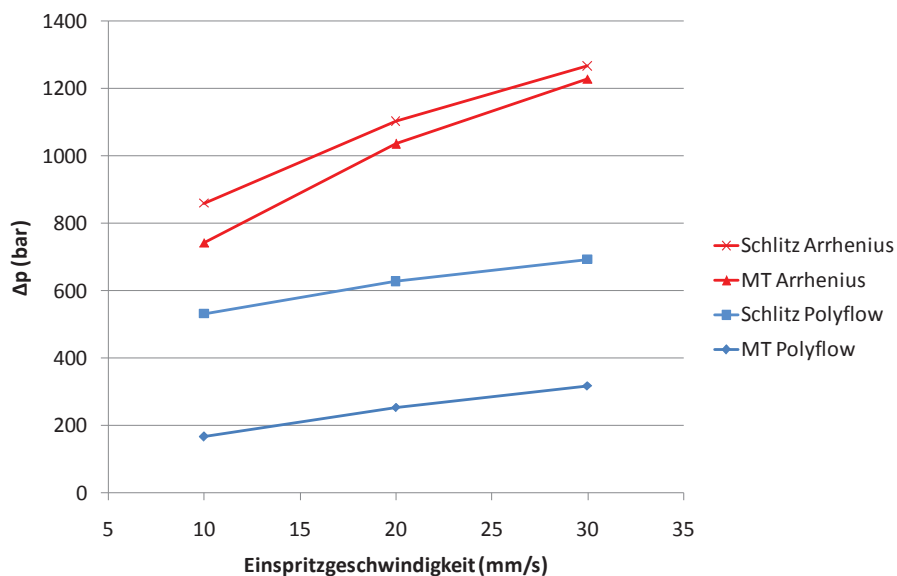


Abbildung 50: Vergleich der Druckverluste aus Polyflow und der analytischen Berechnung mit Berücksichtigung der Temperaturverschiebung für NBR

5.2.4 Interpretation

Die Berechnung des Druckverlustes über den Düsenleitwert setzt repräsentative Größen voraus und ist deswegen nur eine Näherungsformel. Außerdem wird im Falle der einfachen analytischen Rechnung die Temperaturverschiebung vernachlässigt, was zu einer noch größeren Abweichung der Werte führt.

Betrachtet man die Werte der mittleren Temperatur, sieht man ebenfalls eine große Abweichung von der Simulation. Diese ist etwas geringer bei Berücksichtigung der Temperaturverschiebung, beträgt aber jeweils mindestens 10°C .

Bei der Berechnung mit zehn Abschnitten treten weiters erhebliche Schwierigkeiten auf. Wie in Tabelle 16 ersichtlich, sind die berechneten Temperaturen extrem hoch und die Tendenz der Werte ist auch nicht richtig. Bei Verwendung des Mischteils steigt die Temperaturerhöhung mit der Einspritzgeschwindigkeit, obwohl sie hier fallen sollte, wie auch in den Versuchen bewiesen wurde. Eine grundlegende Überarbeitung des Rechenalgorithmus ist hier nötig. Die Cameronzahl muss zuerst für die gesamte Düse berechnet werden. Dann werden die Massetemperaturen in den Abschnitten einzeln berechnet. Am Ende muss die Cameronzahl wieder neu ermittelt werden. Nun muss erneut die Berechnung der Temperaturen erfolgen. Dieser Vorgang sollte wiederholt werden bis sich die Temperatur und die Cameronzahl nicht mehr ändert.

Leider lassen die Ergebnisse zu wünschen übrig. Die beste Näherung wurde mit Einbeziehung der Temperaturverschiebung erreicht, jedoch weichen die Werte noch immer stark von der Simulation ab. Es ist nur eine ungefähre Abschätzung der Tendenzen möglich, für genauere Betrachtungen müssen weiterhin die Simulation bzw. Versuche herangezogen werden.

Der Grund für die Unzulänglichkeiten der analytischen Berechnungen dürfte in der unterschiedlichen Problemstellung in [14] und diesem Fall liegen.

6 Zusammenfassung

Die Heizzeit ist ein wichtiger Faktor in der Elastomerverarbeitung. Sie wirkt sich direkt auf die Wirtschaftlichkeit des Prozesses aus. Es wird daher immer eine Verkürzung der Heizzeit und somit der gesamten Zykluszeit angestrebt.

Diese Zeitersparnis soll durch ein Vorwärmen des Kautschuks während des Einspritzvorganges erreicht werden. Es wurden dazu Versuche mit einem am IKV Leoben entwickelten Heiz-Scher-Mischteil durchgeführt. Dies ist Teil eines Werkzeuges, das als Spritzgießmaschinenrheometer verwendet wurde und die genaue Überwachung der Temperatur und Druckverhältnisse innerhalb des Formnestes zulässt.

Es wurden die Einflüsse des Materials, der Zylindertemperatur, der Einspritzgeschwindigkeit, sowie diverser Modifikationen des Mischteils untersucht. Anschließend wurden die Härte, der Druckverformungsrest sowie die Werte der Zugprüfung an den produzierten Formteilen gemessen, um an diesen Werten die erzielbaren Heizzeitverkürzungen festzulegen.

Es konnten mit dem untersuchten Mischteil erhebliche Heizzeitreduzierungen von bis zu 50% realisiert werden. Die besten Werte konnten bei möglichst kleinem Spalt im Mischteil und niedriger Einspritzgeschwindigkeit erreicht werden. Es zeigte sich zudem noch ein starker Einfluss des verwendeten Materials auf die erzielbaren Verkürzungen. Die in der Kavität gemessenen Temperaturwerte zeigten das gleiche Bild. Es wurden erhebliche Erhöhungen der Massetemperatur festgestellt, die sich analog zu den erzielten Heizzeitverkürzungen verhielten.

Die direkte Umsetzung dieses Werkzeugkonzeptes in der Praxis scheitert jedoch am erheblichen Materialverlust durch den im Mischteil entstehenden Anguss. Es wurde im Anschluss mittels der Simulationssoftware Polyflow nach einem alternativen Konzept gesucht. Es zeigte sich, dass mit einem unbeheizten, kurzen, sehr engen Scherschlitz ähnliche Massetemperaturen wie mit dem Heiz-Scher-Mischteil möglich sind. Allerdings muss hierfür ein erheblich höherer Druckverlust in Kauf genommen werden.

Die analytische Berechnung der Schererwärmung gestaltete sich schwierig, da sich die Werte der Simulation für Temperaturerhöhung und Druckverlust des Mischteils zwar tendenziell nachvollziehen ließen, sich aber von den absoluten Werten deutlich unterscheiden. Zur Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit ist der gesamte Berechnungsalgorithmus zu überarbeiten.

1 Literaturangaben

- [1] *Holzer, C.H.*: Ein Messverfahren zur praxisnahen Charakterisierung von Kautschuken, Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 1996
- [2] *Röthemeyer, F; Sommer, F*: Kautschuk-Technologie, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [3] *N.N.*: Spritzsystem EFE, Prospekt der Firma LWB Steinl, 2007
- [4] *N.N.*: Produktivitätssteigerung durch FlowControl+, K-Zeitung, 6, 2008
- [5] *Schöppner, V.*: Kautschukverarbeitung, Vorlesung am Institut für Kunststofftechnik, Universität Paderborn, SS2008
- [6] *Döller, H.D.*: Kalibrierversuche für Infrarot-Massetemperaturfühler mit einem neuen Kalibrierwerkzeug, Diplomarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 1998
- [7] *N.N.*: DIN 53517, April 1987
- [8] *Langecker, G.*: Praxisnahe rheologische Charakterisierung von Kautschukmischungen, Vortrag am Symposium zu Ehren von Hon. Prof. Dr. phil. Franz Sommer, Montanuniversität Leoben, 2006
- [9] *Rois, G.*: Finite Elemente Berechnung von Extrusionswerkzeugen, Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 1993
- [10] *Obendrauf, W.*: Neue Methoden zur Temperatur- und Dehnviskositätsmessung für die Simulation von Kunststoffverarbeitungsprozessen, Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 1996
- [11] *N.N.*: Datenblatt Spritzaggregat 330, Fa. Engel, Schwertberg, 2007
- [12] *Michaeli, W., Dombrowski, U.*: Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk, Carl Hanser Verlag, München, 1991

- [13] *Agassant, J.F.: Polymer Processing: Principles & Modelling*, Carl Hanser Verlag; München, Vienna, New York, 1991
- [14] *Schuschnigg, S.: Rheologische Untersuchungen bei hohen Schergeschwindigkeiten mit Hilfe eines Mikrorheologie-Schlitzdüsen-Messsystems*, Diplomarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 2004

2 Verwendete Abkürzungen

$\dot{\gamma}_{rep}$	repräsentative Schergeschwindigkeit in 1/s
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit in 1/s
ε	Emissionskoeffizient (-)
$\bar{\varepsilon}$	Durchschnittliche Dehngeschwindigkeit in 1/s
$\eta; \eta_s$	Scherviskosität in Pas
η_{rep}	repräsentative Viskosität in Pas
λ	Wellenlänge in m
ρ	Dichte in g/cm ³
τ_w	Wandschubspannung in Pa
Φ	Konstante des Potenzansatzes
B	Breite des Spaltes in mm
c_p	Wärmekapazität in J/gK
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, 2,998*10 ⁸ m/s
c_1	erste Plancksche Strahlungskonstante in Wm ²
c_2	zweite Plancksche Strahlungskonstante in mK
D	Schneckendurchmesser in mm
DVR	Druckverformungsrest
d_0	ursprüngliche Dicke des Probekörpers in mm
d_1	Dicke des Probekörpers im verformten Zustand in mm
d_2	Dicke des Probekörpers nach Entspannung in mm
E_k	Aktivierungsenergie für die Vernetzungsgeschwindigkeitskonstante in J/mol
E_{ti}	Aktivierungsenergie für die Inkubationszeit in J/mol

2. Verwendete Abkürzungen

H	Höhe des Spaltes in mm
H ₀	Eingangsspalthöhe des konischen Spaltes in mm
H ₁	Ausgangsspalthöhe des konischen Spaltes in mm
h	Plancksches Wirkungsquantum, $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
K	Düsenleitwert in m ³
k	Temperaturabhängige Vernetzungsgeschwindigkeitskonstante in s
k _b	Boltzmann-Konstante, $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K
L	Länge des Spaltes in mm
L _{λ,s}	wellenlängenabhängige Strahlungsintensität für den schwarzen Körper in W/m ² m
m	Konstante des Potenzansatzes
M _{max}	maximales Drehmoment in Nm
M _{min}	minimales Drehmoment in Nm
p _{1max}	am Drucksensor P1 gemessener maximaler Druck in bar
p _{2max}	am Drucksensor P2 gemessener maximaler Druck in bar
p _{hydr}	hydraulischer Spritzdruck
p _{spritz}	spezifischer Spritzdruck
Δp	Druckverlust in bar
R	Universelle Gaskonstante, 8,31 J/(mol*K)
S	Scorch-Index (-)
T	Temperatur in K
T ₀	Bezugstemperatur in K
T _{ausspritz}	an der Düse mit IRS-Düse gemessene maximale Temperatur während des Ausspritzens ins Freie in °C
T _{min}	niedrigste am IRS 1 gemessene Temperatur in °C
T _{mittel}	Durchschnittliche Temperatur der Knotenpunkte am Outflow in °C
T _{MT}	Mischteilmperatur in °C
T _{peak}	Höhe der Temperatur des ersten Ausschlages am IRS 1 in °C

2. Verwendete Abkürzungen

T_{start}	Temperaturausschlag am IRS_Düse während des Einspritzens in °C
T_W	Werkzeugtemperatur in °C
T_{zyl}	Zylindertemperatur in °C
t	Zeit in s
t_H	Heizzeit in s
t_i	Inkubationszeit in s
t_{90}	Zeit bis 90% Reaktionsumsatz in s
\dot{V}	Volumenstrom in mm ³ /s
\bar{v}	durchschnittliche Geschwindigkeit in mm/s
v_E	Einspritzgeschwindigkeit in mm/s
v_{Schnecke}	Schneckenvorlaufgeschwindigkeit in mm/s
x	Reaktionsumsatz in %

3 Anhang

3.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzip des Pressens von Kautschukmischungen [2].....	3
Abbildung 2:	Prinzip des Transferpressens von Kautschuken [2].....	4
Abbildung 3:	Prinzip des Spritzgießens von Kautschukmischungen [2].....	5
Abbildung 4:	Prinzip des EFE Spritzsystems [3], 1 Plastifizierschnecke, 2 FIFO-Aggregat, 3 Scherspalt, 4 Einspritzkoben (evakuierter Zylinder) ...	7
Abbildung 5:	Reaktionsumsatz anhand von Vulkameterkurven [5].....	9
Abbildung 6:	Prüfgerät für die DVR-Prüfung nach DIN 52517 [7]	13
Abbildung 7:	Verwendete Spritzgießmaschine	15
Abbildung 8:	Prinzipieller Aufbau des Spritzgießmaschinenrheometers [1,8]... ..	16
Abbildung 9:	Skizze des Rheometerwerkzeuges von oben [1]	17
Abbildung 10:	Foto und Profilskizze des Scher-Mischteils [8].....	18
Abbildung 11:	Skizze: Sitz des Düsen-IR-Sensors; D= 35 mm.....	20
Abbildung 12:	Prinzipskizze der verwendeten Messsensorik.....	22
Abbildung 13:	Aufgezeichnete Werte für MT 1:3 bei 10 mm/s Einspritzgeschwindigkeit $T_z= 70^\circ\text{C}$, $T_w= 180^\circ\text{C}$; P_{Espr} hydraulischer Einspritzdruck, WZ_{P1} sowie WZ_{P3} Werkzeuginnendrucke an den Positionen 1 und 3, WZ_{T_IR1} Massetemperatur im Werkzeug, D_{T_IR} Massetemperatur in der Düse.....	23
Abbildung 14:	Aufgezeichnete Werte für MT 1:3 bei 20 mm/s Einspritzgeschwindigkeit $T_z= 70^\circ\text{C}$, $T_w= 180^\circ\text{C}$; P_{Espr} hydraulischer Einspritzdruck, WZ_{P1} sowie WZ_{P3} Werkzeuginnendrucke an den Positionen 1 und 3, WZ_{T_IR1} Massetemperatur im Werkzeug, D_{T_IR} Massetemperatur in der Düse.....	24
Abbildung 15:	Aufgezeichnete Werte ohne MT bei 10 mm/s Einspritzgeschwindigkeit $T_z= 70^\circ\text{C}$, $T_w= 180^\circ\text{C}$; P_{Espr}	

	hydraulischer Einspritzdruck, WZ_P1 sowie WZ_P3 Werkzeuginnendrucke an den Positionen 1 und 3, WZ_T_IR1 Massetemperatur im Werkzeug, D_T_IR Massetemperatur in der Düse.....	24
Abbildung 16:	Aufgezeichnete Werte ohne MT bei 20 mm/s Einspritzgeschwindigkeit $T_z = 70^\circ\text{C}$, $T_w = 180^\circ\text{C}$; P_Espr hydraulischer Einspritzdruck, WZ_P1 sowie WZ_P3 Werkzeuginnendrucke an den Positionen 1 und 3, WZ_T_IR1 Massetemperatur im Werkzeug, D_T_IR Massetemperatur in der Düse.....	25
Abbildung 17:	Forminnendruck über die Spritzlänge für NBR bei 10 mm/s Spritzgeschwindigkeit	27
Abbildung 18:	Massetemperaturen bei unterschiedlichen Zylindertemperaturen und Mischteilen	29
Abbildung 19:	Während des Ausspritzens ins Freie gemessene Massetemperaturen ($T_{\text{ausspritz}}$).....	30
Abbildung 20:	T_{peak} aus den Vorversuchen in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit.....	30
Abbildung 21:	T_{min} aus den Vorversuchen in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit.....	31
Abbildung 22:	In den Vorversuchen gemessene Einspritzdrücke in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit.....	31
Abbildung 23:	T_{min} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM.....	34
Abbildung 24:	T_{min} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR	35
Abbildung 25:	Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM.....	36
Abbildung 26:	Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR	36
Abbildung 27:	Härte in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s	37

Abbildung 28:	Härte in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s	38
Abbildung 29:	Härte in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s	38
Abbildung 30:	Härte in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s	39
Abbildung 31:	DVR in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s	39
Abbildung 32:	DVR in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material EPDM bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s	40
Abbildung 33:	DVR in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s	40
Abbildung 34:	DVR in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s	41
Abbildung 35:	Reißfestigkeit in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s	42
Abbildung 36:	Reißfestigkeit in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s	42
Abbildung 37:	Reißdehnung in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 10 mm/s	43
Abbildung 38:	Reißdehnung in Abhängigkeit der Heizzeit und der verwendeten Mischeilgeometrien für das Material NBR bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 mm/s	43

Abbildung 39:	Errechnete Heizzeitverkürzungen.....	49
Abbildung 40:	T_{\min} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und Mischteilmperatur für das Material EPDM.....	51
Abbildung 41:	Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit und Mischteilmperatur für das Material EPDM.....	52
Abbildung 42:	Viskositätskurven der in der Simulation verwendeten Materialien	56
Abbildung 43:	T_{mittel} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit für NBR.....	58
Abbildung 44:	T_{mittel} in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit für EPDM.....	58
Abbildung 45:	Temperaturverteilung für das Mischteil mit dem Material EPDM bei der Einspritzgeschwindigkeit 10 mm/s; Werte in °C.....	59
Abbildung 46:	Temperaturverteilung für den Schlitz mit dem Material EPDM bei der Einspritzgeschwindigkeit 10 mm/s; Werte in °C.....	59
Abbildung 47:	Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit für NBR.....	60
Abbildung 48:	Δp in Abhängigkeit der Einspritzgeschwindigkeit für EPDM.....	60
Abbildung 49:	Vergleich der mittleren Temperaturen aus Polyflow und der analytischen Berechnung mit Berücksichtigung der Temperaturverschiebung für NBR.....	65
Abbildung 50:	Vergleich der Druckverluste aus Polyflow und der analytischen Berechnung mit Berücksichtigung der Temperaturverschiebung für NBR.....	65

3.2 Daten

Tabelle 17: Datenblatt des EPDM

Ideas and solutions in rubber compounding



TECHNISCHES DATENBLATT TECHNICAL DATA SHEET

Mischung	Compound:		AA4BRZ			
Basispolymer, Farbe	Base polymer, colour		EPDM, schwarz (black)			
Vulkanisationsbed.	Vulcanisation Conditions		Probekörper	Ring R1	15 Min / min	170°C
			Test specimen	Stab S2 Dumbbell	10 Min / min	170°C
Prüfmerkmale	Properties		Einheiten	Soll – Werte	Ist – Werte	
			Units	Desired val.	Actual value	
Reißfestigkeit (S2)	Tensile Strength (S2)		DIN 53504	MPa	13,0	
Reißdehnung (S2)	Elongation at break (S2)		DIN 53504	%	690	
Spannungswert 100% (S2)	Modulus 100% (S2)		DIN 53504	MPa	1,1	
Härte (R1)	Hardness (R1)		DIN 53505	Shore A	43	
Rückprallelastizität (R1)	Rebound Resilience (R1)		DIN 53512	%	50	
Weiterreißwiderstand (R1)	Tear strength (R1)		DIN ISO 34-1 A	N/mm	6,7	
Dichte	Specific Gravity		DIN 53479	g /cm ³	1,048	
Druckverformungsrest (R1)	Compression Set (R1)	72 h 23°C	DIN ISO 815	%	7,1	
Druckverformungsrest (R1)	Compression Set (R1)	24 h 70°C	DIN ISO 815	%	7,7	
Druckverformungsrest (R1)	Compression Set (R1)	24 h 100°C	DIN ISO 815	%	43,3	
Beständigkeit gegen Heißluft	Resistance against hot air		DIN 53508		Zeit : 6 Tage Time: Days	Temp. 100 °C
Reißfestigkeit (S2)	Tensile Strength (S2)		DIN 53504	MPa	9,7	
Reißdehnung (S2)	Elongation at break (S2)		DIN 53504	%	464	
Härteänderung (S2)	Hardness change (S2)		DIN 53505	Shore A	+6	
Rheologische Daten	Rheological properties					
Mooney-Viskosität (ML1+4; 100°C)	Mooney Viscosity (ML1+4; 100°C)		DIN 53523	ME	31	
Rheometer Monsanto 2000 E	Rheometer Monsanto 2000 E		DIN 53529		Zeit: 8 min Time: min	Temp. 170°C
Drehmomentminimum	Minimum torque			dNm	0,73	
t10	t10			min	1,34	
t90	t90			min	3,96	
Drehmomentmaximum	Maximum torque			dNm	9,60	

Datum Date: 04.03.2009

MW

Seite 1/1 (Page 1/1)

Unsere Prüfberichte beruhen auf Messungen an Stichproben und stellen nur eine technische Beschreibung unserer Produkte dar. Sie entbinden nicht von der Prüfung der Ware für ihre Zwecke und Verfahren.
Our test reports are based on random measurements and are meant to be nothing but a technical description of our products. They do not relieve our customers from checking the goods for their purpose and procedures.



Gummiwerk KRAIBURG
GmbH & Co. KG
Tepitzer Str. 20
84478 Waldviertel / Germany

Tel. +49 (0) 8638 / 01-0
Fax +49 (0) 8638 / 01-310
info@kraiburg.de
www.kraiburg-rubber-compounds.com

Handelregister Traunstein HRA 8828
PhG.: Gummiwerk KRAIBURG Verwaltungs GmbH
Handelregister Traunstein HRS 16108
Stz Waldviertel, GF: Helmut Esfeld

Tabelle 18: Datenblatt des NBR

Ideas and solutions in rubber compounding


TECHNISCHES DATENBLATT
TECHNICAL DATA SHEET

Mischung	Compound:	SPP9507/01			
Basispolymer, Farbe	Base polymer, colour	NBR, schwarz (black)			
Vulkanisationsbed.	Vulcanisation Conditions	Probekörper	Ring R1	Min / min	°C
		Test specimen	Stab S2 Dumbbell	15 Min / min	170°C
Prüfmerkmale	Properties		Einheiten Units	Soll – Werte Desired val.	Ist – Werte Actual value
Reißfestigkeit	Tensile Strength	DIN 53504	MPa		12,7
Reißdehnung	Elongation at break	DIN 53504	%		130
Spannungswert 100%	Modulus 100%	DIN 53504	MPa		9,9
Härte	Hardness	DIN 53505	Shore A		78
Rückprallelastizität	Rebound Resilience	DIN 53512	%		35
Weiterreißwiderstand	Tear strength	DIN ISO 34-1 A	N/mm		3,5
Dichte	Specific Gravity	DIN 53479	g /cm ³		1,26
Druckverformungsrest	Compression Set 72 h 23°C	DIN ISO 815	%		8,8
Druckverformungsrest	Compression Set 24 h 70°C	DIN ISO 815	%		6,0
Druckverformungsrest	Compression Set 24 h 100°C	DIN ISO 815	%		10,2
Rheologische Daten	Rheological properties				
Mooney-Viskosität (ML1+4; 100°C)	Mooney Viscosity (ML1+4; 100°C)	DIN 53523	ME		28
Rheometer Monsanto 2000 E	Rheometer Monsanto 2000 E	DIN 53529		Zeit: 6 min Time: min	Temp. 180°C
Drehmomentminimum	Minimum torque		dNm		1,05
t10	t10		min		0,20
t90	t90		min		1,09
Drehmomentmaximum	Maximum torque		dNm		28,74

Datum Date: 30.03.2009MW

Seite 1/1 (Page 1/1)

Unsere Prüfberichte beruhen auf Messungen an Stichproben und stellen nur eine technische Beschreibung unserer Produkte dar. Sie entbinden nicht von der Prüfung der Ware für ihre Zwecke und Verfahren.

Our test reports are based on random measurements and are meant to be nothing but a technical description of our products. They do not relieve our customers from checking the goods for their purpose and procedures.



Gummiwerk KRAIBURG
GmbH & Co. KG
Tepitzer Str. 20
84478 Waldviertel / Germany

Tel. + 49 (0) 8638 / 61-0
Fax + 49 (0) 8638 / 61-310
info@kraiburg.de
www.kraiburg-rubber-compounds.com

Handelsregister Traunstein HRA 8626
PHG: Gummiwerk KRAIBURG Verwaltungs GmbH
Handelsregister Traunstein HRS 18108
Stz. Waldviertel, GF: Helmut Eberfeld

Tabelle 19: Ergebnisse aus den Vorversuchen (Prozessdaten)

Mat	Twz(°C)	Tzy(°C)	Vsch(mm/s)	MT	Hzz(s)	No	Tausspritz (°C)	Tstart (°C)	Stabw	Tpeak (°C)	Stabw Tpeak	Tmin (°C)	Stabw	phidr (bar)	pspritz (bar)	Stabw	p1maxwz (bar)	p2maxwz (bar)		
EPDM	180°	70°	10	1.3	150	1	71.4	78.2		157.2		154.5		81	1074					
						2	70.6	77.3		156.1		155.6		80	1061					
						3		77.2		149.7		154.2		82	1082					
							71.0	77.8	0.54	154.3	4.06	154.7	0.72	81	1072	10.7				
EPDM	180°	70°	20	1.3	150	1	72	79.5		146.1		144.8		95	1269					
						2	71.7	79.5		148.3		143.3		99	1312					
						3		79.8		143.3		142.2		98	1295					
							71.9	79.5	0.16	145.9	2.50	143.4	1.32	97	1289	26.4				
EPDM	180°	70°	30	1.3	150	1	71.7	79.5		148.3		134.0		109	1444					
						2	71.8	80.2		140.0		135.9		111	1469					
						3	72.4	80.8		145.1		136.0		110	1455					
							72.0	80.2	0.66	144.5	4.16	135.3	1.12	110	1456	12.7				
EPDM	180°	80°	30	1.3	150	1	78.5	86.2		144.7		141.3		107	1419					
						2	78.5	86.2		146.9		142.1		104	1377					
						3	78.8	86.8		148.3		141.3		107	1423					
							78.6	86.4	0.36	146.6	1.79	141.5	0.49	106	1406	25.7				
EPDM	180°	80°	20	1.3	150	1		85.0		144.2		146.1		95	1259					
						2		84.9		149.4		146.5		97	1280					
						3		85.2		144.5		146.1		96	1268					
							78.6	86.4	0.13	146.0	2.89	146.2	0.24	96	1269	10.6				
EPDM	180°	80°	10	1.3	150	1		82.4		159.3		157.3		78	1029					
						2		82.6		159.0		157.7		78	1036					
						3		82.4		161.4		158.5		75	996					
							78.6	86.4	0.14	159.9	1.31	157.8	0.60	77	1020	21.3				
EPDM	180°	70°	10	ohne	150	1	71.6	72.8		120.3		64.6		45	599		128	99		
						2	71.6	72.9		130.4		62.1		45	597		128	100		
						3		73.1		125.5		67.4		45	601		127	99		
							71.6	72.9	0.17	125.4	5.06	64.7	2.68	45	599	2.0	127	99		
EPDM	180°	70°	20	ohne	150	1		76.4		117.4		85.6		55	724		174	133		
						2		76.3		116.6		82.9		55	725		174	133		
						3		76.2		125.3		82.5		55	731		173	132		
							71.6	76.3	0.10	119.8	4.82	83.7	1.68	55	727	3.5	173	132		
EPDM	180°	70°	30	ohne	150	1		78.2		124.6		103.8		63	834		197	150		
						2		78.2		123.0		102.4		63	829		200	151		
						3		78.5		121.1		103.3		62	826		202	151		
							71.6	78.3	0.14	122.9	1.74	103.2	0.70	63	830	4.1	200	151		
EPDM	180°	80°	30	ohne	150	1		82.1		122.9		111.8		59	786		197	147		
						2		82.9		127.0		113.5		58	769		200	149		
						3		83.0		127.9		114.4		59	781		200	149		
							78.6	82.7	0.47	125.9	2.65	113.2	1.28	59	779	8.8	199	148		
EPDM	180°	80°	20	ohne	150	1		82.1		122.9		105.4		52	694		169	129		
						2		82.6		129.2		104.5		52	694		172	129		
						3		82.1		119.6		103.4		52	690		170	130		
							78.6	82.3	0.27	123.9	4.86	104.5	1.00	52	692	2.3	170	129		
EPDM	180°	80°	10	ohne	150	1		78.9		124.0		91.4		43	566		124	96		
						2		79.4		124.7		92.6		42	561		123	96		
						3		79.5		136.3		93.9		43	565		123	95		
							78.6	79.3	0.31	128.3	6.91	92.6	1.26	43	564	2.8	123	96		

3. Anhang

Tabelle 20: Ergebnisse aus dem Hauptteil (Prozessdaten)

Mat	Twz (°C)	Tzyl (°C)	Vsch (mm/s)	MT	Hzz (s)	No	Tmin (°C)	Stabw	phyr (bar)	pspritz (bar)	Stabw	p1maxwz (bar)	Stabw	p2maxwz (bar)	Delta p (bar)	Stabw	Delta p Werkz (bar)
EPDM	180	70	10	1.3	120-150-180	1	155.7		81	1075		51		34	1025		17
						2	154.5		80	1060		52		36	1008		17
						3	155.1		81	1078		53		36	1025		17
							155.1	0.6	81	1071	9.6	52	1.2	35	1019	9.8	17
EPDM	180	70	20	1.3	120-150-180	1	142.7		97	1288		86		38	1202		48
						2	141.6		100	1324		97		37	1227		60
						3	140.4		99	1315		95		36	1219		59
							141.6	1.2	99	1309	18.6	93	5.7	37	1216	12.9	56
NBR	160	70	10	1.3	30-60-90	1	141.9		110	1481		43		26	1418		17
						2	143.1		107	1423		32		15	1391		18
						3	143.3		109	1446		34		16	1413		17
							142.8	0.7	109	1444	18.9	36	5.7	19	1407	14.3	17
NBR	160	70	20	1.3	30-60-90	1	134.7		138	1833		52		26	1781		26
						2	134.2		142	1885		51		26	1834		25
						3	132.9		138	1835		48		22	1787		26
							133.9	0.9	140	1851	29.6	50	1.8	25	1801	29.2	26
NBR	160	70	30	1.3	30-60-90	1	132.2		153	2030		70		37	1950		33
						2	132.8		158	2091		67		33	2024		34
						3	131.3		153	2030		56		25	1973		31
							132.1	0.7	155	2050	35.3	64	7.3	32	1986	34.0	33
NBR	160	70	10	ohne	30-60-90	1	57.8		62	824		126		97	698		30
						2	57.8		61	813		126		96	686		30
						3	57.8		61	804		125		95	679		30
							57.8	0.0	61	814	10.5	126	0.9	96	688	9.7	30
NBR	160	70	20	ohne	30-60-90	1	93.1		84	1117		179		134	938		45
						2	90.7		83	1096		177		133	919		44
						3	86.2		83	1097		177		133	920		44
							90.0	3.5	83	1093	11.9	179	1.4	133	928	10.5	45
EPDM	180	70	10	ohne	120-150-180	1	69.9		46	614		121		91	463		30
						2	74.1		47	627		120		90	507		30
						3	69.9		47	624		119		90	505		29
							71.3	2.4	47	622	6.9	120	0.8	90	502	7.3	30
EPDM	180	70	20	ohne	120-150-180	1	83.7		57	751		168		122	583		46
						2	80.5		56	742		167		122	574		45
						3	80.4		56	743		169		124	574		45
							81.5	1.9	56	745	4.8	168	1.1	123	577	4.8	45
EPDM	180	70	10	2.4	120-150-180	1	144.4		61	814		53		35	761		18
						2	141.8		65	858		67		47	791		20
						3	146.0		64	854		68		49	786		19
							144.1	2.2	63	842	24.0	62	8.3	44	779	15.9	19
EPDM	180	70	20	2.4	120-150-180	1	131.5		73	972		81		54	891		27
						2	131.5		75	996		86		58	911		28
						3	130.9		73	965		76		51	889		25
							131.3	0.3	74	978	16.4	81	4.8	54	897	11.9	27
NBR	160	70	10	2.4	30-60-90	1	127.7		83	1105		73		53	1032		21
						2	126.7		87	1155		82		61	1072		21
						3	127.7		85	1134		79		58	1055		21
							127.3	0.6	85	1131	25.0	78	4.6	57	1053	20.4	21
NBR	160	70	20	2.4	30-60-90	1	121.4		112	1487		112		80	1375		33
						2	120.8		115	1522		120		89	1402		31
						3	119.1		115	1522		117		83	1406		34
							120.4	1.2	114	1511	20.2	116	3.9	84	1394	16.8	33
EPDM	180	70	10	Spalt 2n	120-150-180	1	127.7		56	738		60		39	678		20
						2	129.4		55	732		58		39	674		19
						3	128.3		55	725		57		37	668		19
							128.5	0.9	55	731	6.7	58	1.5	39	673	5.2	20
EPDM	180	70	20	Spalt 2n	120-150-180	1	110.8		68	902		98		66	804		32
						2	115.1		68	902		102		71	800		31
						3	114.3		69	910		103		73	807		31
							113.4	2.3	68	905	4.9	101	2.8	70	804	3.7	31
NBR	160	70	10	Spalt 2n	30-60-90	1	110.8		71	937		68		45	869		23
						2	112.3		70	930		66		44	864		22
						3	113.1		70	931		70		48	861		22
							112.1	1.2	70	933	3.7	68	1.6	46	865	4.2	22
NBR	160	70	20	Spalt 2n	30-60-90	1	103.4		95	1256		91		59	1166		32
						2	103.4		97	1288		98		66	1190		32
						3	100.3		96	1272		93		61	1178		33
							102.3	1.8	96	1272	16.1	94	3.8	62	1178	12.3	32

Tabelle 21: Messwerte Härte (Shore A) aus der Formteiluntersuchung

Material	MT	Geschw (mm/s)	Heizz (s)	Shore A			MW	Stabw
				nahe	mitte	fern		
EPDM	1:3	10	120	44	45	46	45	1,0
			150	46	46	46	46	0,0
			180	46	46	47	46	0,6
		20	120	43	43	44	43	0,6
			150	45	45	46	45	0,6
			180	46	46	47	46	0,6
	ohne	10	120	42	41	42	42	0,6
			150	44	44	44	44	0,0
			180	44	45	45	45	0,6
		20	120	42	43	42	42	0,6
			150	44	45	45	45	0,6
			180	45	45	45	45	0,0
	2:4	10	120	43	43	44	43	0,6
			150	45	45	45	45	0,0
			180	45	45	45	45	0,0
		20	120	42	43	42	42	0,6
			150	44	44	45	44	0,6
			180	46	46	45	46	0,6
	Spalt	10	120	43	44	44	44	0,6
			150	45	45	45	45	0,0
			180	45	46	46	46	0,6
		20	120	42	43	44	43	1,0
			150	44	45	45	45	0,6
			180	45	46	46	46	0,6
2:4 kalt	10	150	44	45	44	44	0,6	
		180	45	46	45	45	0,6	
2:4 kalt	20	150	41	44	44	43	1,7	
		180	44	46	45	45	1,0	
2:4 kalt OR	10	120	41	43	44	43	1,5	
		150	43	45	46	45	1,5	
2:4 kalt OR	20	180	44	46	45	45	1,0	
		150	43	45	46	45	1,5	
			180	44	45	46	45	1,0
NBR	1:3	10	30	62	63	64	63	1,0
			60	71	70	70	70	0,6
			90	72	73	73	73	0,6
		20	30	55	58	59	57	2,1
			60	68	67	68	68	0,6
			90	70	71	72	71	1,0
	ohne	10	30	23	26	29	26	3,0
			60	59	60	65	61	3,2
			90	68	68	70	69	1,2
		20	30	28	28	45	34	9,8
			60	60	59	60	60	0,6
			90	67	69	70	69	1,5
	2:4	10	30	53	55	57	55	2,0
			60	67	67	68	67	0,6
			90	70	70	70	70	0,0
		20	30	48	48	53	50	2,9
			60	55	66	66	62	6,4
			90	70	70	70	70	0,0
	Spalt	10	30	47	47	50	48	1,7
			60	64	65	66	65	1,0
			90	70	71	71	71	0,6
		20	30	39	41	36	39	2,5
			60	61	63	62	62	1,0
			90	69	69	69	69	0,0

Tabelle 22: Messwerte DVR aus der Formteiluntersuchung

Material	MT	Geschw (mm/s)	Heizz (s)	DVR 24h/70° (%)	DVR1	DVR2	DVR3	Stabw	
EPDM	1:3	10	120	47	47	47	49	1,2	
			150	39	40	39	39	0,6	
			180	34	34	33	34	0,6	
		20	120	55	55	57	55	1,2	
			150	39	39	39	37	1,2	
			180	33	34	33	31	1,5	
	ohne	10	120	54	53	58	54	2,6	
			150	48	48	48	47	0,6	
			180	40	42	40	40	1,2	
		20	120	60	64	55	60	4,5	
			150	44	40	45	40	2,9	
			180	40	40	36	39	2,1	
	2:4	10	120	50	50	50	49	0,6	
			150	41	44	40	41	2,1	
			180	36	36	31	36	2,9	
			20	120	52	50	52	53	1,5
				150	44	42	45	44	1,5
				180	37	37	38	37	0,6
		Spalt	10	120	51	50	51	51	0,6
				150	43	43	42	43	0,6
				180	36	36	36	36	0,0
			20	120	54	52	54	54	1,2
				150	45	45	45	45	0,0
				180	38	37	39	38	1,0
2:4 kalt	10	150	46	44	47	46	1,5		
		180	38	38	38	39	0,6		
		20	150	47	47	47	47	0,0	
	180		38	38	39	38	0,6		
	2:4 kalt OR		10	120	54	56	54	52	2,0
		150		45	45	45	45	0,0	
180		37		37	38	37	0,6		
2:4 kalt OR	20	150	45	46	44	45	1,0		
		180	40	39	40	40	0,6		
	NBR	1:3	10	30	24	27	24	23	2,1
				60	15	14	15	15	0,6
				90	11	11	11	11	0,0
20			30	47	44	47	48	2,1	
			60	20	19	20	20	0,6	
			90	14	14	13	14	0,6	
ohne		10	30	88	88	83	100	8,7	
			60	32	34	31	32	1,5	
			90	19	18	19	19	0,6	
		20	30	100	100	100	100	0,0	
			60	27	32	21	27	5,5	
			90	17	17	17	17	0,0	
2:4	10	30	43	42	43	44	1,0		
		60	20	29	20	20	5,2		
		90	16	17	16	16	0,6		
		20	30	59	58	64	59	3,2	
			60	23	21	23	23	1,2	
			90	16	16	16	16	0,0	
	Spalt	10	30	75	72	78	75	3,0	
			60	25	24	25	25	0,6	
			90	17	17	17	17	0,0	
		20	30	98	98	94	98	2,3	
			60	30	21	30	31	5,5	
			90	17	17	17	18	0,6	

Tabelle 23: Messwerte aus dem Zugversuch

Material	MT	Geschw (mm/s)	Heizz (s)	Reißfestigkeit (N/mm2)	Reißdehnung (%)	RF1	RF2	RF3	Stabw	RD1	RD2	RD3	Stabw	
EPDM	1:3	10	120	12,78	790	13,3	10,74	12,8	1,4	809	770	790	19,5	
			150	17	846	12,24	17,08	17	2,8	767	866	846	52,3	
			180	13,18	777	10,15	16,43	13,2	3,1	712	843	777	65,5	
		20	120	11,59	767	11,39	11,59	11,9	0,3	764	774	767	5,1	
			150	15,15	872	16,13	15,15	15	0,6	899	872	871	15,9	
			180	13,24	751	12,66	13,24	16,8	2,2	741	751	806	35,0	
	ohne	10	120	15,37	889	14,04	16,85	15,4	1,4	898	889	878	10,0	
			150	15,74	848	15,15	15,74	16,4	0,6	825	848	854	15,3	
			180	13,01	794	10,08	13,01	16,3	3,1	741	794	815	38,1	
		20	120	13,74	933	13,74	14,18	12,2	1,0	950	905	933	22,7	
			150	15	856	14,6	15	16,1	0,8	856	853	870	9,1	
			180	14,65	799	15,7	14,65	14,4	0,7	791	808	799	8,5	
	2:4	10	120	16,9	874	16,9	15,54	17,2	0,9	874	836	874	21,9	
			150	15,53	810	16,59	14,68	15,5	1,0	825	803	810	11,2	
			180	13,36	752	11,09	13,36	15,4	2,2	704	752	788	42,1	
		20	120	14,49	902	15,13	14,49	13,9	0,6	893	902	918	12,7	
			150	16,42	828	16,42	16,5	15,9	0,3	828	813	830	9,3	
			180	15,98	814	15,98	12,94	17,7	2,4	814	751	818	37,6	
	Spalt	10	120	15,52	854	15,52	15,44	15,7	0,1	873	854	852	11,6	
			150	14,87	813	11,07	14,87	16,6	2,8	735	813	847	57,4	
			180	14,95	783	12,04	14,95	16,4	2,2	735	783	816	40,7	
		20	120	15,01	878	16,03	14,88	15	0,6	881	863	878	9,6	
			150	17,03	848	16,52	17,03	17,6	0,6	830	848	854	12,5	
			180	14,7	796	15,79	14,7	14,2	0,8	806	758	796	25,3	
	2:4 kalt	10	150	14	809	15,44	12,13	14	1,7	837	768	809	34,7	
			180	14,33	807	16,58	13,93	13,3	1,7	813	807	780	17,6	
		20	150	14,72	852	15,77	14,72	11,5	2,2	860	852	761	55,0	
			180	14,28	767	16,11	13,42	14,3	1,4	801	734	767	33,5	
		2:4 kalt OR	10	120	7,83	680	6,84	14,79	7,83	4,3	602	878	680	142,3
				150	12,66	779	13,1	12,66	11	1,1	779	798	745	26,9
	2:4 kalt OR	20	180	13,18	740	11,13	13,88	13,2	1,4	696	763	740	34,0	
			150	14,86	819	15,24	14,57	14,9	0,3	830	806	819	12,0	
				180	16,23	796	15,79	16,23	17,1	0,7	796	798	793	2,5
	NBR	1:3	10	30	12,04	182	12,04	11,84	12,4	0,3	172	218	182	24,2
				60	12,79	200	12,79	12,36	13	0,3	200	186	200	8,1
				90	13,4	198	11,41	13,4	13,8	1,3	156	198	203	25,8
			20	30	8,94	335	10,09	8,24	8,94	0,9	335	305	395	45,8
				60	12,6	220	11,78	12,6	13,1	0,7	207	229	220	11,1
				90	13,83	198	13,9	13,83	12,8	0,6	198	203	186	8,7
		ohne	10	30	1,7	580	1,7	3,12	1,16	1,0	580	408	588	101,7
				60	8,9	388	10,33	8,9	8,58	0,9	388	357	398	21,4
				90	13,19	217	13,19	13,44	12,2	0,7	225	217	207	9,0
			20	30	1,68	483	1,63	2,22	1,68	0,3	597	481	483	66,4
				60	11,15	333	11,69	11,03	11,2	0,4	297	333	338	22,4
				90	12,86	237	12,86	12,28	13	0,4	237	227	245	9,0
		2:4	10	30	10,02	368	10,67	10,02	9,78	0,5	321	368	375	29,4
				60	12,23	206	12,9	12,1	12,2	0,4	206	219	206	7,5
				90	13,09	213	13,09	12,19	13,6	0,7	213	204	213	5,2
20			30	7,45	445	7,45	5,54	8,2	1,4	445	502	412	45,5	
			60	12,6	240	11,84	13,13	12,6	0,6	240	246	235	5,5	
			90	12,05	194	10,41	12,05	12,5	1,1	157	194	196	22,0	
Spalt		10	30	5,57	510	4,71	7,59	5,57	1,5	510	419	511	52,8	
			60	12,17	230	12,06	13,11	12,2	0,6	230	228	253	13,9	
			90	13,1	200	13,48	13,1	12,1	0,7	213	200	182	15,6	
		20	30	5,26	474	5,26	5,57	2,99	1,4	474	459	508	25,1	
			60	13,12	276	13,12	13,14	13	0,1	281	276	252	15,5	
			90	13,24	217	12,85	13,24	13,7	0,4	216	217	217	0,6	

Tabelle 24: Ergebnisse aus den Zusatzversuchen (Prozessdaten)

Mat	Tw (°C)	Tzyl (°C)	Vsch (mm/s)	MT	Hzz (s)	No	Tmin (°C)	Stabw	phyr (bar)	pspritz (bar)	Stabw	p1maxwz (bar)	p2maxwz (bar)	Delta p (bar)	Stabw	
EPDM	180	70	10	2.4kalt(ca 110°C)	120-150-180	1	130,9		69	910		28,7	9,6	881		
						2	130,9		69	909		29,1	10,5	879		
						3	132,5	0,9	69	910		29,0	9,7	881		
								131,5		69	910	0,9	28,9	9,9	881	1,0
	EPDM	180	70	20	2.4kalt(ca 110°C)	120-150-180	1	121,6		78	1036		47,7	18,5	988	
							2	120,2		78	1032		47,4	17,6	985	
							3	120,2		78	1039		46,7	16,7	992	
								120,6	0,8	78	1036	3,4	47,3	17,6	988	3,7
	EPDM	180	70	20	kalt(ca 110°C)ohne Rein	120-150-180	1	123,6		80	1058		79,2	51,4	979	
2							123,7		79	1053		81,8	53,9	971		
3							123,5		78	1039		76,9	48,7	962		
							123,6	0,1	79	1050	10,0	79,3	51,3	971	8,6	
EPDM	180	70	10	kalt(ca 110°C)ohne Rein	120-150-180	1	139,5		66	872		24,2	7,5	848		
						2	139,1		65	866		23,7	7,5	842		
						3	138,6		65	863		23,3	7,0	840		
							139,1	0,4	65	867	4,7	23,7	7,3	843	4,3	

3.3 Programmcode

```
VERSION 1.0 CLASS
BEGIN
    MultiUse = -1    'True
END
Attribute VB_Name = "Tabelle1"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = True
Private Sub Start_Click()

Dim breite, laenge As Integer
Dim hoehe As Double
Dim vquer As Double
Dim lambda As Double
Dim rho As Double
Dim cp As Double
Dim eta As Double
Dim n As Double
Dim k As Double
Dim alpha As Double
Dim T0 As Double
Dim TMasse As Double
Dim TWerkzeug As Double
Dim unterteilung As Integer
Dim m As Double
Dim phi As Double
Dim deltap As Double
Dim cameron As Double
Dim brinkmann As Double
Dim Tquer As Double
Dim Tquer_neu As Double

'Dim duesenleitwert As Double

Const pi = 3.141592654

laenge = Cells(2, 2).Value
breite = Cells(3, 2).Value
hoehe = Cells(4, 2).Value
vquer = (Cells(5, 2).Value) ^ 2 * pi / 4 * Cells(6, 2).Value / (hoehe *
breite)

lambda = Cells(7, 2).Value * 1000000#
rho = Cells(8, 2).Value * 0.001
cp = Cells(9, 2).Value * 1000000#

k = Cells(10, 2).Value
n = Cells(11, 2).Value
alpha = Cells(12, 2).Value

T0 = Cells(13, 2).Value + 273.15
TMasse = Cells(14, 2).Value + 273.15
```

3. Anhang

```
TWerkzeug = Cells(15, 2).Value + 273.15

unterteilung = Cells(16, 2).Value

Tquer_neu = TMasse      ' Wert definieren
epsilon = 1 'irgendein Wert definieren
'gammapunkt = vquer / hoehe
'eta = Potenzgesetz
m = 1 / n
phi = k ^ (-1 / n)
cameron = lambda * (laenge) / (rho * cp * vquer * hoehe ^ 2)
'duesenleitwert = breite * hoehe ^ (m + 2) / (2 ^ (m + 1) * (m + 2) *
laenge ^ m)

For i = 1 To unterteilung

    While (Abs(epsilon) > 0.001)
        arrhenius = Exp(alpha * (1 / Tquer_neu - 1 / T0))
        'phi_neu = phi / arrhenius

        k_neu = k * arrhenius ^ n
        phi_neu = k_neu ^ (-1 / n)
        deltap = (vquer * hoehe * breite / phi_neu * 2 ^ (m + 1) * (m + 2)
* (laenge / unterteilung) ^ m / breite / hoehe ^ (m + 2)) ^ (1 / m)
        'cameron = lambda * (laenge / unterteilung) / (rho * cp * vquer *
hoehe ^ 2)
        brinkmann = k_neu * vquer ^ (1 + n) / ((TWerkzeug - Tquer_neu) *
lambda) * (hoehe / 2) ^ (1 - n)
        If (cameron > 1) Then Tquer = TWerkzeug + 0.01
        If (cameron > 0.01) And (cameron <= 1) Then
            Term1 = k_neu * vquer ^ (1 + n) / lambda * (hoehe / 2) ^ (1 -
n) * (((1 + 2 * n) / n) ^ n) * 2 * n * (1 + 3 * n) / (1 + 4 * n) / (2 +
5 * n)
            Term2 = 1 + 1 / (((1 + 2 * n) / n) ^ n) * 2 * n * (1 + 3 * n)
/ (1 + 4 * n) / (2 + 5 * n) * brinkmann)
            Term3 = 1 - Exp(-4 * cameron / (((1 + 2 * n) / n) ^ n) * 2 * n
* (1 + 3 * n) / (1 + 4 * n) / (2 + 5 * n) * ((n / (1 + 2 * n)) ^ n)))
            Tquer = TMasse + Term1 * Term2 * Term3
            End If
        If (cameron <= 0.01) Then Tquer = TMasse + deltap / (rho * cp)
        epsilon = Tquer - Tquer_alt
        Tquer_neu = (Tquer + TMasse) / 2
        Tquer_alt = Tquer
    Wend

    'Ausgabe
    Cells(18 + i, 2).Value = Tquer - 273.15
    Cells(18 + i, 4).Value = cameron
    TMasse = Tquer
    Tquer_neu = TMasse
    Cells(18 + i, 3).Value = deltap / 100000#
    epsilon = 1
Next i

End Sub
```