



Lehrstuhl für Spritzgießen von Kunststoffen

Masterarbeit



Experimentelle Validierung eines neu
entwickelten Verarbeitungsverfahrens für
Elastomere

Manuel Treitler, BSc

März 2020

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 08.03.2020



Unterschrift Verfasser/in
Manuel, Treitler

Danksagung

Univ.-Prof. DI Dr. mont. Walter Friesenbichler danke ich für die Möglichkeit, diese Arbeit im Rahmen des RubExject-Projekts durchzuführen und bei assoz.Prof. DI Dr. mont. Gerald R. Berger-Weber bedanke ich mich für die Abnahme der Masterarbeit.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich Herrn DI DI Sebastian Stieger aussprechen, einerseits für die Möglichkeit diese Arbeit im Rahmen seiner Dissertation durchzuführen, aber besonders für die hilfsbereite Art und außerordentlich gute Zusammenarbeit.

Herrn DI Thomas Hutterer möchte ich ebenso einen besonderen Dank für die Bereitstellung der Messeinrichtungen zur Bestimmung der Masse- und Dosier-temperatur aussprechen.

Ich möchte mich auch bei Eduard Leitner herzlich für die Unterstützung bei den praktischen Arbeiten bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben und mich stets unterstützen. Lisa danke ich für ihre Unterstützung und Verständnis in den stressigen Zeiten meines Maserstudiums.

Diese Arbeit ist im Rahmen des FFG Bridge Projekts „RubExject“ am Lehrstuhl für Spritzgießen von Kunststoffen der Montanuniversität Leoben entstanden. Ich möchte mich hier bei allen involvierten Partnern bedanken.

Kurzfassung

Elastomere besitzen ein Eigenschaftsprofil, welches die Anforderungen aus der Dichtungsbranche optimal erfüllt. Ihre Herstellung ist jedoch, speziell bei großen Abmessungen und komplexen Geometrien, mit überdurchschnittlich hohen Kosten verbunden. Im Rahmen des FFG Bridge Projekts „RubExject“ (Projektnummer: 855873) erfolgte die Entwicklung eines neuen Verarbeitungsverfahrens für Elastomere, das auf der Exjection®-Technologie beruht und die Nachteile der derzeitigen Herstellungsmethoden kompensiert. Die Exjection®-Technologie ist eine Kombination von Extrusion und Spritzguss, bei der die Kavität in einem beweglichen Verschiebeschlitten eingeformt ist. Vorteil ist die Möglichkeit der Ausformung komplexer Geometrien mit hoher Maßgenauigkeit und gleichzeitig niedrigem Bedarf an Spritzdruck und Schließkraft.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden zur experimentellen Validierung des RubExject-Verfahrens zuerst die Systemgrenzen und das mögliche Prozessfenster für eine rußgefüllte, schwefelvernetzende Acrylnitril-Butadien-Kautschukmischung (Nitrile Butadiene Rubber – NBR) ermittelt. Dies ergab, dass nur bei geschlossener Kavität und Einspritzzeiten kleiner als die Scorchzeit Gutteile produziert werden können.

Mithilfe eines systematischen Versuchsplans wurden die Auswirkungen der Vulkanisationszeit sowie des Einspritzvolumenstroms auf dichtungsrelevante Zielgrößen wie den Druckverformungsrest, die Bruchspannung und die Bruchdehnung der hergestellten Bauteile untersucht.

Längere Prozesszeiten des Verfahrens führen zu niedrigeren Druckverformungsresten das heißt zu höheren Vernetzungsgraden unabhängig von der Zusammensetzung der Prozesszeit (Einspritzzeit und Vulkanisationszeit). Der Vergleich von RubExject-Bauteilen mit im Pressverfahren hergestellten Referenzplatten zeigte, dass mit dem RubExject-Verfahren ähnliche Bauteileigenschaften erzielt werden können. Ferner wurden deutlich niedrigere Spritzdrücke und Forminnendrucke als beim klassischen Spritzguss von Elastomeren gemessen.

Obwohl mit dem RubExject-Verfahren erfolgreich Bauteile herstellbar sind, eignet es sich noch nicht für die Herstellung von Großdichtungen. Allerdings besteht das Potential, das Verfahren auch auf andere Bauteilgeometrien zu übertragen.

Abstract

Rubbers exhibit a property profile that optimally meets the requirements of the sealing industry. However, production of seals is associated with above-average costs, especially in the case of large dimensions and complex geometries. As part of the FFG Bridge project "RubExject" (project number: 855873), a new processing method for rubber parts was developed which is based on Exjection®-Technology and compensates for the disadvantages of current manufacturing methods. The Exjection®-Technology is a combination of extrusion and injection molding, in which the cavity is integrated into a movable sliding carriage. The major benefit is the possibility of forming complex geometries with high dimensional accuracy, and at the same time, low injection pressure and clamping force.

Within the scope of this master thesis, the system limits and the possible process window of the RubExject process for a carbon black filled, sulfur-curing Nitrile Butadiene Rubber (NBR) were first determined for the subsequent experimental validation of the RubExject process. This showed that good parts can only be produced with a closed cavity and injection times shorter than the scorch time.

Using a statistical design of experiments (DoE), the effects of the vulcanization time and the injection volume flow on sealing-relevant target parameters such as compression set, tensile stress at break and elongation at break of the manufactured parts were investigated.

Longer process times lead to lower compression set, i.e. to higher degrees of cross-linking, independent of the composition of the process time (injection time and vulcanization time). The comparison of RubExject parts with compression molded reference plates showed that similar part properties can be achieved with the RubExject process. Moreover, significantly lower injection pressures and cavity pressures were measured compared to the classic injection molding of rubbers.

Although the RubExject process can be used successfully to produce parts, it is not yet suitable for manufacturing large seals. However, there is the potential to transfer the process to other part geometries.

Inhaltsverzeichnis

1	MOTIVATION UND ZIELSETZUNG	1
2	GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK	2
2.1	ELASTOMERE	2
2.2	VERNETZUNGSVERHALTEN	3
2.3	ELASTOMERVERARBEITUNG	5
2.3.1	Pressen	6
2.3.2	Transferpressen	7
2.3.3	Spritzgießen	7
2.3.4	Extrusion	9
2.3.5	Herausforderungen	11
2.4	EXJECTION®-TECHNOLOGIE FÜR THERMOPLASTE	11
2.5	GROßDICHTUNGEN	13
2.6	DVR – ZUSAMMENHANG MIT DEM VERNETZUNGSGRAD	13
2.7	VERSUCHSPLANUNG	14
3	EXPERIMENTELLES	18
3.1	MATERIAL	18
3.2	RPA MESSUNGEN	18
3.3	REFERENZPLATTENHERSTELLUNG	19
3.4	RUBEXJECT-WERKZEUG UND MASCHINENKONFIGURATION	20
3.5	OBERFLÄCHENTEMPERATURMESSUNG	24
3.6	RUBEXJECT-VERFAHRENSABLAUF UND PROZESSVARIANTEN	25
3.7	RUBEXJECT-VERSUCHE	28
3.7.1	Spritzversuche zur Ermittlung der Systemgrenzen	28
3.7.2	Systematische Versuche innerhalb des Prozessfensters	29
3.8	WEITERFÜHRENDE EXPERIMENTE	31
3.8.1	Ausspritzversuche	31
3.8.2	Dosiertemperaturmessungen	32
3.8.3	Massetemperaturmessungen	32
3.9	REFERENZPLATTEN- UND BAUTEILPRÜFUNG	33
3.9.1	DVR	34
3.9.2	Zugprüfung	34
3.9.3	Bauteilvermessung	34
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	35
4.1	VULKANISATIONSKURVEN	35
4.2	ERGEBNISSE DER REFERENZPLATTEN	36
4.3	FÜLLSTUDIE	38
4.4	ERSTES GUTTEIL DES RUBEXJECT-VERFAHRENS	40
4.5	ERMITTLUNG DES MÖGLICHEN PROZESSFENSTERS	42
4.6	FESTLEGUNG DES VERSUCHSPLANES	47
4.7	VERSUCHSPLANERGEBNISSE	48
4.7.1	DVR	48
4.7.2	Zugprüfung	50
4.7.3	Sensordaten	52

4.7.4	Bauteilvermessung	55
4.7.5	Dosiertemperaturmessung und Massetemperaturmessung	55
4.8	VERGLEICH DER RUBEXJECT-BAUTEILE MIT DEN REFERENZPLATTEN.....	56
5	ZUSAMMENFASSUNG	62
6	ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE.....	65
7	TABELLENVERZEICHNIS	67
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	68
9	ANHANG	71
10	LITERATURVERZEICHNIS	76

1 Motivation und Zielsetzung

Elastomere besitzen Festigkeits- und Dichtungseigenschaften, welche die Anforderungen in der Dichtungsbranche optimal erfüllen. Speziell für die Herstellung von Großdichtungen wie sie in der Tunnelbautechnik oder bei Windkraftanlagen eingesetzt werden, stoßen die derzeitigen Herstellungsverfahren an ihre Grenzen oder sind mit einem hohen Aufwand verbunden.

Im Spritzguss wird die Bauteillänge beziehungsweise der Bauteildurchmesser durch den Spritzdruck limitiert. Die Extrusion ermöglicht keine komplexen 3D-Geometrien und erfüllt oft nicht die erforderlichen Maßtoleranzen. Derzeit werden Großdichtungen im Pressverfahren auf Großpressen hergestellt. Den Hauptnachteil dieses Herstellungsverfahrens bilden die Kosten für die Presse und das entsprechende Werkzeug. Des Weiteren können Großdichtungen spanend aus Halbzeugen gefräst werden. Dies ist ein zeitintensiver Prozess mit hohen Abfallmengen. Die Dichtungsbranche ist deshalb ständig auf der Suche nach wirtschaftlicheren Verarbeitungsverfahren.

Im Rahmen des FFG Bridge Projekts „RubExject“ (Projektnummer: 855873) erfolgte durch DI Sebastian Stieger die Entwicklung eines neuen Verarbeitungsverfahrens für Elastomere, das auf der patentierten Exjection[®]-Technologie beruht. Die Exjection[®]-Technologie ist eine Kombination von Extrusion und Spritzguss. Durch die Exjection[®]-Technologie ist es möglich sehr lange Bauteile herzustellen. Bei dieser Technologie ist die gesamte Kavität in einem beweglichen Schlitten eingeformt, der während des Einspritzvorgangs verschoben wird. Dadurch wird der Druckbedarf von der Fließweglänge entkoppelt und der notwendige Spritzdruck sinkt. Der geringere Druckbedarf durch die kürzeren Fließwege reduziert auch die Schließkraft. Niedrigere Einspritzdrücke und Schließkräfte erlauben die Verwendung kompakterer Maschinenausführungen, wodurch sich auch der Energieverbrauch verringern lässt.

Ziel dieser Masterarbeit ist die experimentelle Validierung dieses Verarbeitungsverfahrens. Hauptaufgaben sind dabei:

1. Das mögliche Prozessfenster ermitteln.
2. Innerhalb des Prozessfensters systematische Versuche durchzuführen.
3. Den Einfluss verschiedener Prozesseinstellungen auf ausgewählte mechanische Zielgrößen untersuchen.
4. Die Bauteilqualität nach quantitativen und qualitativen Kriterien mit konventionellen Verarbeitungsverfahren vergleichen.

Alle in dieser Masterarbeit beschriebenen Versuche wurden im Rahmen der Dissertation von DI Sebastian Stieger und unter seiner Anleitung durchgeführt.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Elastomere

Elastomere, auch Gummi oder Vulkanisate genannt, sind thermostabile, weitmaschig vernetzte Stoffe. Die untere Einsatztemperatur wird durch die Glasübergangstemperatur ($< 0\text{ °C}$) begrenzt. Die obere Einsatztemperatur für NBR liegt bei ca. 100 °C für langfristige und 130 °C für kurzfristige Einsätze [3, 37 - 39]. Bei höheren Temperaturen (über ca. 200 °C [35] bei NBR) kommt es zur Zersetzung. Elastomere sind inkompressibel und besitzen üblicherweise einen E-Modul im Bereich zwischen 10^1 MPa und 10^2 MPa . Sie sind formfest, jedoch elastisch verformbar. Die hohen Dehnungen von 100% bis 1000% beruhen auf der Änderung der Entropie. Im ungedehnten Zustand bestehen Elastomere aus Makromolekülketten, die im Zustand ihrer maximalen Entropie angeordnet sind (Knäuelstruktur). Unter Dehnung nehmen die Molekülketten einen statistisch geordneteren Zustand an, wodurch die Entropie abnimmt. Bei Entlastung streben die Ketten wieder in den ungeordneten Zustand der maximalen Entropie zurück [17, 39, 42].

Ein Elastomer besteht aus bis zu 20 Komponenten, wovon jede ihren bestimmten Zweck erfüllt. Hauptbestandteile einer schwefelvernetzenden Rezeptur sind: Kautschuk, Füllstoffe (Ruß), Weichmacher, Verarbeitungshilfsmittel, Schutzmittel gegen schädliche äußere Einflüsse (Ozon-, Flammenschutz), Zinkoxid, Aktivatoren (Stearinsäure), Beschleuniger und Vernetzer (Schwefel) [17, 39].

Acrylnitril-Butadien-Kautschuk – Nitrile Butadiene Rubber (NBR)

NBR ist ein Copolymer aus Acrylnitril und Butadien und den Synthesekautschuken zugehörig. NBR besitzt eine herausragende Öl- und Kraftstoffbeständigkeit sowie eine geringe Permeabilität von Gasen. Mit steigendem Acrylnitrilgehalt erhöhen sich Öl- und Kraftstoffbeständigkeit, Dichte, Abriebwiderstand, Härte, Festigkeit und Verarbeitbarkeit. Es sinken Elastizität, Gasdurchlässigkeit und Kälteflexibilität. Durch sein Eigenschaftsprofil lässt sich NBR besonders gut als Dichtung in Ölpumpen, Kraftstoffpumpen, Sprühdosen, Gasleitungsdichtungen, Ventilen, Radialwellendichtringen oder Melkbechern einsetzen. NBR-Schläuche sind als Kraftstoffschläuche, Kühlerschläuche, Ölschläuche, Hydraulikschläuche oder Lebensmittelschläuche in Verwendung. Eine Schwefelvernetzung ist durch die Doppelbindung im Butadien-Abschnitt möglich. Der optimale Vernetzungsgrad für NBR ist 95% [39]. Abbildung 1 zeigt die Strukturformel von NBR [8, 39, 40].

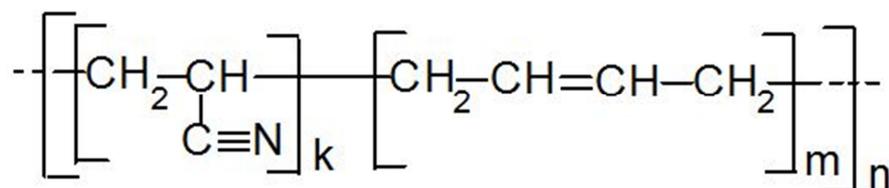


Abbildung 1: NBR Strukturformel; Acrylnitril (links), Butadien (rechts) [8].

2.2 Vernetzungsverhalten

Durch die chemische Vernetzungsreaktion entsteht aus der Kautschukmischung ein Elastomer. Dies erfolgt durch die Ausbildung eines weitmaschigen Netzwerks mit einer Netzstelle pro 30 bis 100 Monomereinheiten [39]. Neben der Schwefelvulkanisation werden Kautschuke häufig auch durch organische Peroxide vernetzt. Aus der weichen Mischung entsteht so bei erhöhter Temperatur ein formstabiles Bauteil. Die Anzahl der Vernetzungsstellen hat einen maßgeblichen Einfluss auf Werkstoffeigenschaften wie Reißdehnung, Zugfestigkeit, Härte oder Setzverhalten. Über Vernetzungstemperatur und Vulkanisationszeit ist neben der Vernetzungsdichte und Geschwindigkeit auch die Netzwerkstruktur der Schwefelbrücken beeinflussbar. So gibt es bei schwefelvernetzenden Systemen die Möglichkeiten von mono-, di- oder polysulfidischen Brücken. Kürzere Vernetzungsbrücken haben eine geringere bleibende Verformung zur Folge. Längere Brücken bewirken typischerweise eine höhere Reißfestigkeit, Reißdehnung, Weiterreißwiderstand und Elastizität [39].

Der Vernetzungsgrad in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur kann mit Hilfe eines Vulkameters ermittelt werden. Die gängigste und einfachste Art zur Ermittlung ist mithilfe eines Rubber Process Analyzer (RPA). Dieses rheologische Prüfverfahren beruht auf der Annahme, dass der Anstieg des übertragenen Drehmoments in Phase proportional zur Vernetzungsdichte ist. Dabei lässt sich die ermittelte Vulkameterkurve in drei Hauptbereiche gliedern (Abbildung 2):

1. In der Induktionsperiode (Scorch-Phase) erreicht die Messkurve einen Minimalwert proportional zur Viskosität der unvernetzten Probe. Die Inkubationszeit (t_i) gibt Auskunft über das Verarbeitungsfenster der Kautschukmischung.
2. Während der Vernetzungsperiode reagiert das Vernetzungsmittel mit dem Kautschuk. Die Dauer dieser Phase gibt jene Zeit an, die zum Erreichen eines formstabilen Zustandes notwendig ist.
3. In der Nachheizperiode kann es zur Ausbildung eines Plateaus, eines Maximum mit anschließender Abnahme (Reversion) oder eines Anstiegs mit geringerer Geschwindigkeit (marching modulus) kommen [17, 20, 39].

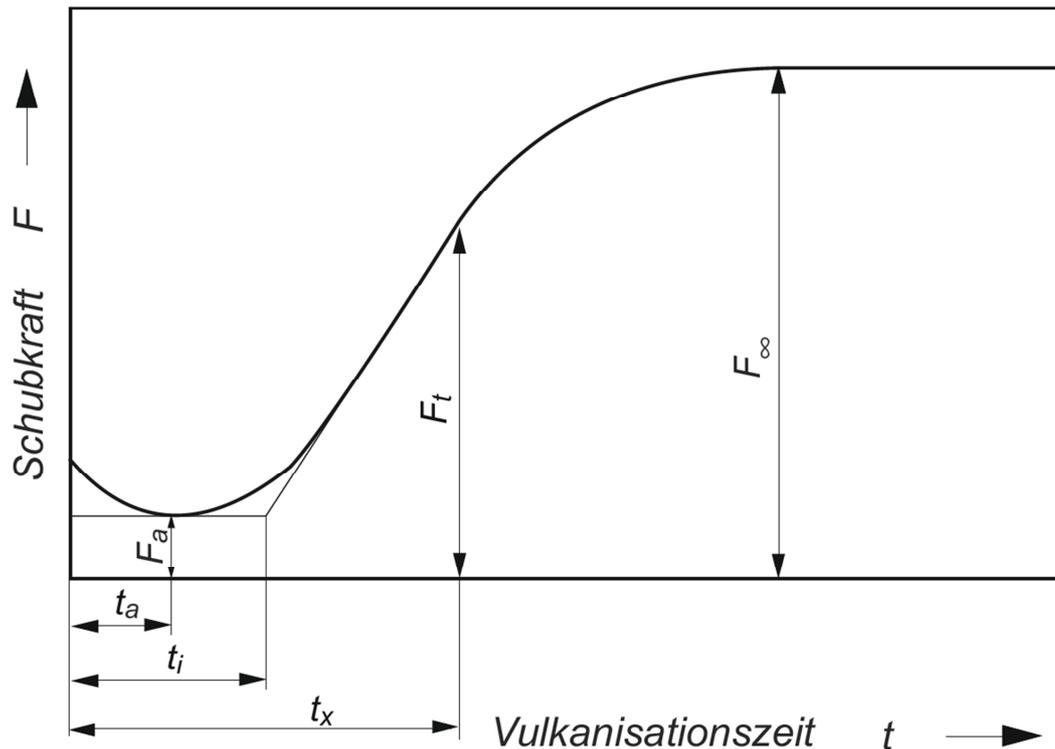


Abbildung 2: Vulkameterkurve einer Kautschukmischung mit Plateau; F_a Minimalkraft, F_t Schubkraft bei der Zeit t_x ; F_∞ Maximalkraft, t_a Zeit bis F_a ; t_i Inkubationszeit; t_x Umsatzzeit oder Vulkanisationszeit; $t_x - t_a$ Reaktionszeit; in Anlehnung an [39].

Der Vernetzungsgrad x lässt sich mit Gleichung (1) errechnen und somit die Vulkanisationskurve ermitteln:

$$x = \frac{F_t - F_a}{F_\infty - F_a} \quad (1).$$

In der Elastomerbranche wird t_x auch dazu verwendet, um einen bestimmten Vernetzungsgrad anzugeben [1]. 70 % Vernetzungsgrad kann demnach auch mit t_{70} bezeichnet werden.

In der Praxis verlaufen die meisten Vernetzungsvorgänge anisotherm. Bei den in Kap. 2.3 vorgestellten gängigen Verarbeitungsmethoden unterscheidet sich die Starttemperatur von der Endtemperatur des zu vulkanisierenden Bauteils. Hinzu kommt in der Regel ein Temperaturgradient im Bauteil. Speziell 3D-Geometrien mit dünnen und dicken Bereichen stellen hierbei eine Herausforderung dar. Der relative Reaktionswert (RRW) gibt den aktuellen Reaktionswert (RW), bezogen auf den für das jeweilige Material angestrebten Reaktionswert an. Ein durchgehender RRW von 1 wäre optimal. Ein RRW über 1 bedeutet eine Übervernetzung. Vor allem bei dickwandigen Bauteilen kann es vorkommen, dass die Oberfläche übervulkanisiert ist und die Bauteilmitte erst einen RRW von 0,5 aufweist [39].

Eine Vorwärmung des Rohlings beziehungsweise Wärmeeintrag durch Vorscherung erhöht die Starttemperatur bei der die Vulkanisation in der Kavität beginnt. Bei einer höheren Massetemperatur ist der relative Reaktionswert größer. Die Vernetzungsreaktion läuft somit

schneller ab und es muss weniger Zeit in Wärmeleitungsvorgänge zur Masseerwärmung investiert werden. Dieser Effekt wird sich speziell beim Transferpressen und Spritzgießen zunutze gemacht. Zusätzlich ergibt sich dadurch auch ein geringerer Unterschied im RRW zwischen Bauteiloberfläche und -mitte. Eine kleinere Differenz des RRW führt speziell bei dickwandigen Bauteilen zu einem geringeren Unterschied des Vernetzungsgrades zwischen Bauteiloberfläche und -mitte. Abbildung 3 zeigt den Einfluss der Vorwärmung (links) beziehungsweise Vorscherung (rechts). In diesem Beispiel war durch die Wärmedissipation beim Einspritzen (Spritzgießen) eine Reduktion der Vulkanisationszeit um über drei Minuten möglich. Die Starttemperatur hat jedoch auch eine obere Grenze. Sie ist so auszulegen, dass die gesamte Kavität ohne frühzeitige Anvulkanisation vollständig gefüllt werden kann [39].

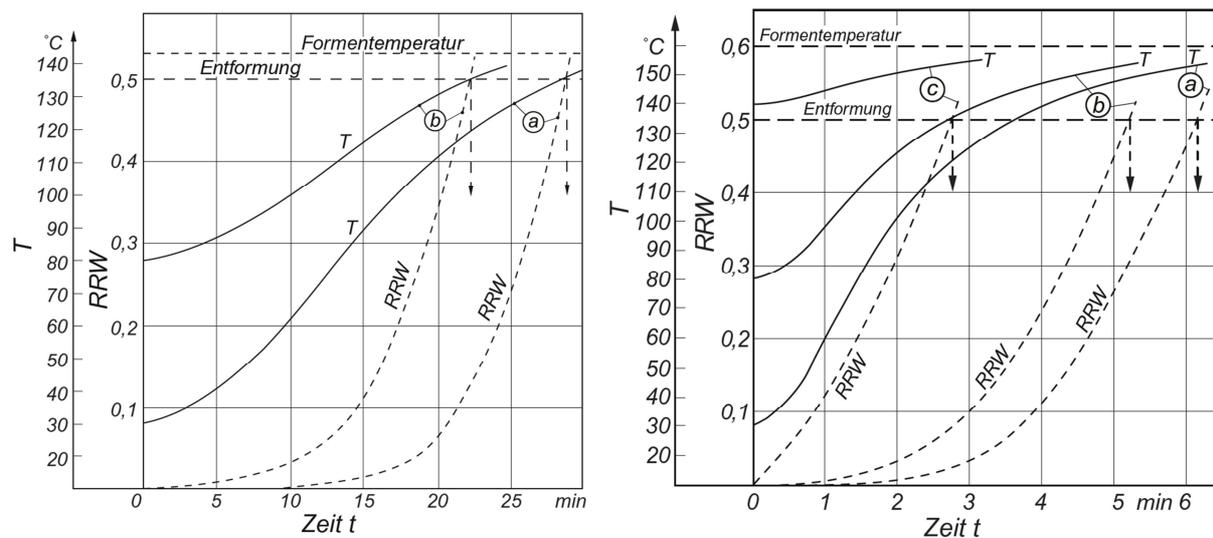


Abbildung 3: Temperatur- und Reaktionswertverlauf (Naturkautschuk); Einfluss der Rohlingvorwärmung bei Pressenvulkanisation (links): (a) ohne Rohlingvorwärmung (30 °C), (b) mit Rohlingvorwärmung (80 °C); Vergleich der Formgebungsverfahren (rechts): (a) Pressverfahren, (b) Transferpressverfahren, (c) Spritzgießverfahren [39].

2.3 Elastomerverarbeitung

Elastomere entstehen in mehreren Schritten. Am Beginn steht das Zer- und Verteilen der Mischungskomponenten, das (1) Mischen. Es bilden sich Wechselwirkungen des Polymers mit den Hauptkomponenten, besonders mit aktiven Füllstoffen wie Ruß. Weichmacher haben hier, sowie auch in den nachfolgenden Schritten die wichtige Aufgabe die Viskosität zu reduzieren. Einerseits explizit um die Verarbeitung zu erleichtern, andererseits indirekt um ein vorzeitiges Vernetzen durch Schererwärmung zu verhindern. Der Mischvorgang läuft industriell üblicherweise diskontinuierlich in Innenmischern ab. Das Produkt des Mischvorgangs ist ein großer, homogener Klumpen. Diesen verarbeiten Folgeanlagen zu (2) Halbzeugen in Form von Streifen oder Fellen weiter. Durch die nachfolgend aufgelisteten (3) Formgebungsverfahren entsteht der Rohling. Die im Anhang befindliche Abbildung 51 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Formgebungsverfahren samt deren Eigenschaften. Durch Energieeintrag (4) vulkanisiert dieser Rohling, in der Regel noch im selben Schritt, zu

einem formstabilen Bauteil aus. Dabei ist es noch bis zum Erreichen der Scorchzeit – t_{scorch} (= Anvulkanisationszeit) möglich, die Formmasse ohne Defekte zu verformen [39].

2.3.1 Pressen

Beim Pressverfahren wird ein Rohling mit Volumensüberschuss aus einem Halbzeug ausgestanzt und anschließend in die Kavität eines Werkzeugs eingelegt. Das Werkzeug besteht aus zwei beheizten Platten und einer Austriebsrille in welche überschüssiges Material austreten kann. Beim Zusammenpressen der Werkzeugplatten fließt die Formmasse unter dem Druck in die Hohlräume der Kavität. Dabei muss die Presskraft auf die Viskosität des Materials ausgelegt werden. Die beheizten Platten erwärmen das Material, wodurch es zur Erhöhung des spezifischen Materialvolumens kommt. Das überschüssige Material fließt über die Austriebsrille ab. Etwaige eingeschlossene Luft kann durch Druckentlastungshübe entweichen. Dies wirkt sich allerdings negativ auf die Bauteiltoleranzen aus [1, 39].

Durch den Wärmeeintrag der Platten kommt es zur Vulkanisation. Die niedrige Wärmeleitung von Kautschukmischungen (typischerweise $0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bis $0,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [28]) führt allerdings zu langen Vulkanisationszeiten und somit Zykluszeiten. Besonders bei dickwandigen Teilen stellt dies einen wirtschaftlichen Nachteil dieses Verfahrens dar. Da die Vernetzungsreaktion erst ab höheren Temperaturen (bei NBR beispielsweise $> 130 \text{ }^\circ\text{C}$) relevante Reaktionsgeschwindigkeiten annimmt, besteht bei diesem Verarbeitungsverfahren üblicherweise keine Gefahr einer vorzeitigen Vernetzung. Durch Vorwärmen des Rohlings kann die Heizzeit um bis zu 25 % reduziert und somit die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens erhöht werden. Weiters besteht auch die Möglichkeit das Bauteil bereits bei niedrigeren Vernetzungsgraden zu entformen (Formstabilität muss gegeben sein). Eine nachfolgende Tempervorrichtung dient anschließend zur vollständigen Vernetzung des Bauteilkerns. Abbildung 4 zeigt schematisch alle Verfahrensschritte [1, 39].

Das Pressverfahren zeichnet sich durch niedrige Investitionskosten für Werkzeug und Maschine aus. Weiters ist der Verfahrensablauf einfach und flexibel für verschiedene Werkstoffe einsetzbar. Die Fertigungskosten sind aufgrund aufwendiger Rohlingsvorbereitung, manuellen Handlings, Nacharbeit sowie langen Zykluszeiten hoch. Häufig findet das Pressverfahren in Kleinserien und zur Herstellung von Prüfkörpern Anwendung [1, 39].

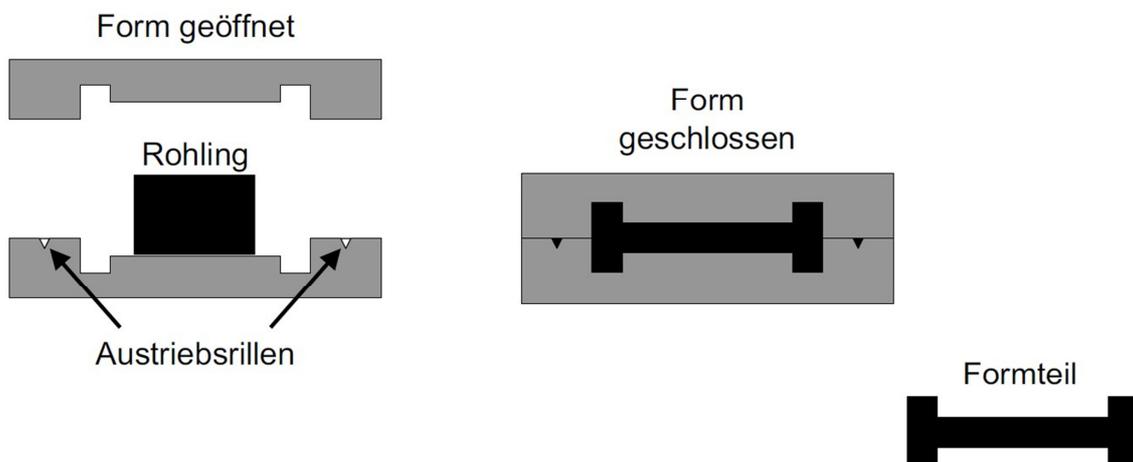


Abbildung 4: Pressverfahren für Elastomere [1].

2.3.2 Transferpressen

Beim Transferpressen wird ein Massekuchen in einen Transferzylinder eingelegt. Dieser bildet das Mittelstück einer Presse mit drei Platten. Der Transferzylinder besitzt einen Einspritzkanal. Beim Zusammenfahren drückt ein am Oberteil befindlicher Stempel den Massekuchen durch diesen Kanal in die Kavität. Das transferierte Material erwärmt sich zusätzlich zu der beheizten Kavität durch (Wärme)dissipation. Der Einspritzdruck und Schließdruck sind bei diesem Verfahren voneinander abhängig. Dies impliziert die Forderung, dass der Zylinderquerschnitt größer als die projizierte Formteilfläche sein muss. Ansonsten wäre ein unerwünschtes Öffnen des Werkzeugs durch den Einspritzvorgang möglich. Nach Ablauf der Vulkanisation fährt die Presse auf und es erfolgt die Bauteilentnahme aus der Kavität. Abschließend ist ein Restmassekuchen (Angussabfall) zu entfernen, der sich im Einspritzzylinder befindet. Abbildung 5 zeigt schematisch das Transferpressverfahren [1, 39].

Ein Vorteil gegenüber dem Pressverfahren ist die Formfüllung mit einer bereits auf moderate Temperaturen gebrachten Formmasse. Daraus ergibt sich die Möglichkeit auch komplexere Kavitäten auszufüllen. Auch die Vulkanisationszeit verringert sich dadurch um 20 % bis 50 %. Durch eine während dem Einspritzen geschlossene Form, lassen sich auch genauere Bauteiltoleranzen als beim Pressverfahren erzielen. Neben den höheren Werkzeugkosten hat das Transferpressen auch den Nachteil des Angussabfalls. Typische Anwendungsgebiete sind mittlere Serien von rotationssymmetrischen Teilen wie Dichtringe oder Membranen [1, 39].

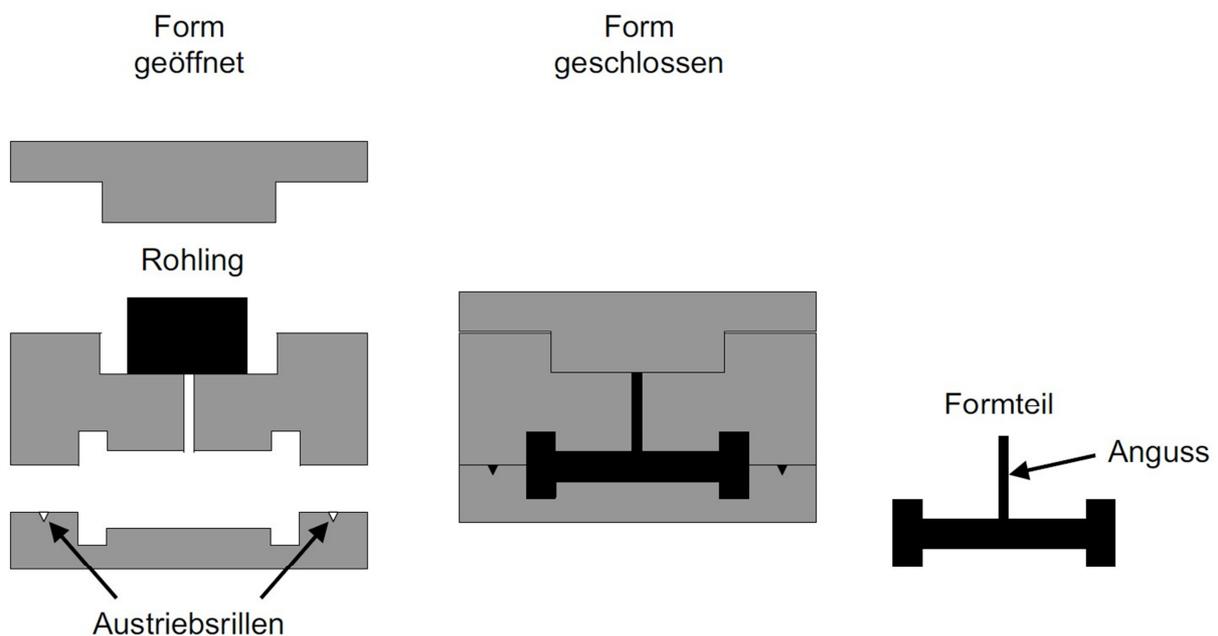


Abbildung 5: Transferpressverfahren für Elastomere [1].

2.3.3 Spritzgießen

Der Herstellprozess spritzgegossener Elastomerbauteile (Abbildung 6) erfolgt ähnlich wie für Thermoplaste. Ein Unterschied liegt beim Plastifizieren. Während bei thermoplastischen Kunststoffen das Rohmaterial in Granulatform über einen Trichter zugeführt wird, zieht bei Kautschukmischungen eine Förderschnecke (3-Zonen Schnecke bei Thermoplasten) das Rohmaterial in Streifenform ein. Das Material erwärmt sich aufgrund von Reibung und

Wärmeleitung über die beheizten Zylinderwände. Diese sind im Vergleich zum Thermoplastspritzgießen meist wassertemperiert (ca. 60 °C bis 100 °C). Höhere Temperaturen sind aufgrund der drohenden Anvulkanisation des Materials zu vermeiden [1, 39].

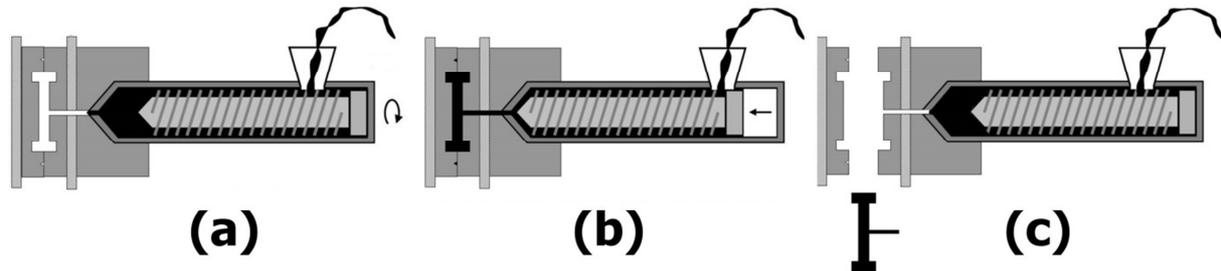


Abbildung 6: Spritzgusszyklus für Elastomere; (a) Aufdosieren von streifenförmigen Material, (b) Einspritzen in das beheizte Werkzeug, (c) Auswerfen des vulkanisierten Bauteils und Aufdosieren von neuem Material; in Anlehnung an [1].

Bei der gängigen Schneckenkolben-Spritzeinheit (Abbildung 7-b) fördert die Schnecke die plastifizierte Masse in einen Schneckenorraum. Vorteil dieser Variante ist die bewährte Bauweise sowie eine ständige Freispülung und somit Vermeidung von toten Ecken. Trotz des vorhandenen „first in - first out“ (FIFO) Prinzips herrscht wegen der veränderlichen wirksamen Schneckenlänge kein ideales Massetemperaturprofil. Eine andere Variante ist die Kolbeneinspritzung mit Schneckenvorplastifizierung (Abbildung 7-a). Hier fördert eine Schnecke die plastifizierte Masse in einen separaten Einspritzzylinder. Dies ermöglicht neben getrennten Einstellungen für Plastifizieren und Einspritzen auch größere Schussvolumina. Jedoch ist bei dieser Variante der Übergangsbereich von Schnecke zu Kolben aus rheologischer Sicht problematisch (Schererwärmung). Außerdem wird das zuerst eingespritzte Material zuletzt ausgespritzt (first in - last out – FILO). Die größten Vorteile des Spritzgießens gegenüber dem Press- und Transferpressverfahren liegen in der deutlich höheren Automatisierbarkeit und besseren Wirtschaftlichkeit bei Großserien. Beim Durchströmen der Maschinendüse und Angusskanäle entsteht Reibungswärme. Das dadurch erwärmte Material resultiert in kürzeren Vulkanisationszeiten (Zykluszeiten) und somit in einer besseren Wirtschaftlichkeit [1, 39].

Im elektrisch- oder ölt temperierten Werkzeug vernetzt der Kautschuk zu einem formstabilen Bauteil. Eine hohe Werkzeugwandtemperatur verkürzt dabei die Vulkanisationszeit. Die Werkzeugtemperatur kann jedoch nicht unbegrenzt erhöht werden, da einerseits die gesamte Kavität vor Ablauf der Inkubationszeit gefüllt sein muss und andererseits Reversionseffekte zu vermeiden sind. Anschließend öffnet die Schließereinheit das Werkzeug und das Bauteil wird entformt. Elastomerspritzgießmaschinen sind in klassischen horizontalen Ausführungen und vertikalen Bauweisen erhältlich. Eine vertikale Ausführung erleichtert manipulative Tätigkeiten. Dies kann das Einlegen zu umspritzender Metallteile oder das Entformen von komplexen, großen Bauteilen betreffen. Horizontalmaschinen finden ihre Anwendung für Kleinteile, die mithilfe von Auswerfern oder Ausbürsteinrichtungen (Abbildung 7-c) entformt werden. Ausbürsteinrichtungen eignen sich auch um häufig vorhandene Ablagerungen von vernetzten und unernetzten Resten zu beseitigen. Außerdem neigen Elastomere zur Freistrahlbildung. Durch eine Anbindung an einer Dünnstelle oder

gegenüber einer Prallfläche kann die Freistrahlbildung jedoch oftmals unterbunden werden [1, 39].

Einen erheblichen Nachteil stellen die hohen Werkzeugkosten beim Spritzgießen dar. Spritzgegossene Elastomerbauteile rentieren sich erst ab mittelgroßen bis großen Stückzahlen (ab ca. 300 Stück [39]). Eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit um bis zu 70 % ist durch den Einsatz von Zwei-Plattenformen mit einem Zwei-Ebenen-Kaltkanalsystem und eintauchender Maschinendüse erreichbar [9]. Speziell in der Dichtungsproduktion bietet sich diese Variante an, da so in zwei Werkzeugebenen gleichzeitig produziert werden kann. Eine Entkopplung des Einspritzens vom Vulkanisieren in der geschlossenen Form ermöglicht einen zusätzlichen Spielraum für individuelle Optimierung [1, 9, 39].

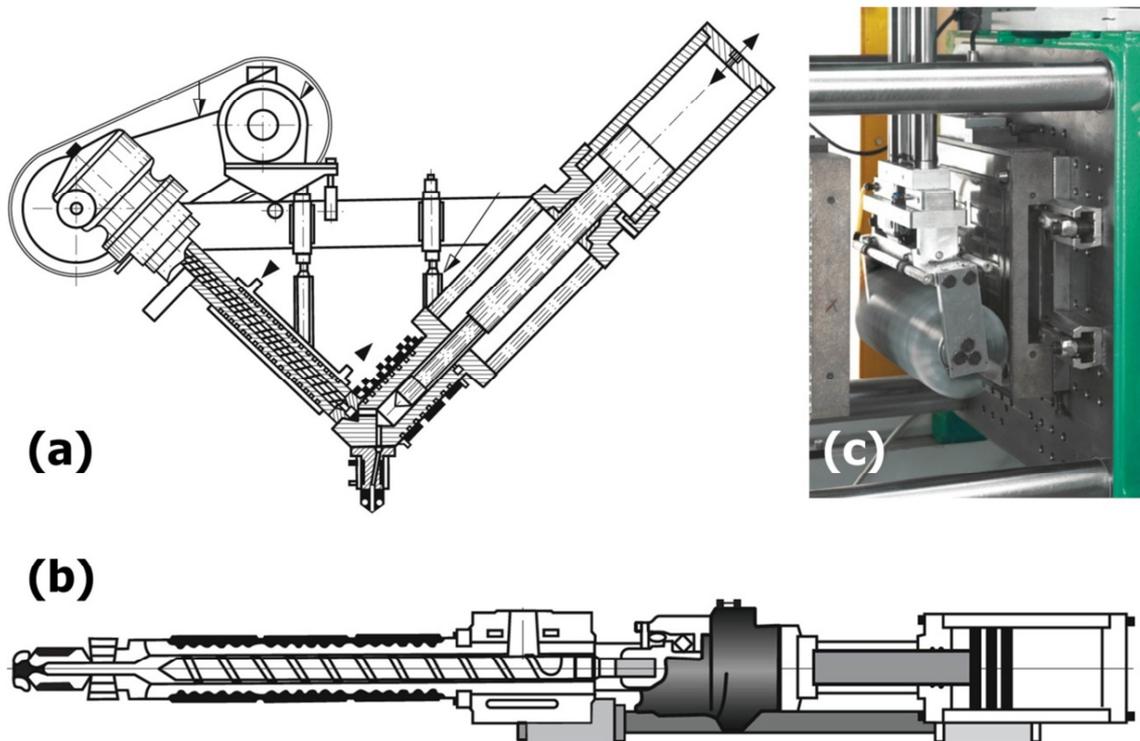


Abbildung 7: (a) Kolbenspritzeinheit mit Schneckenvorplastifizierung [39]
(b) Schneckenkolben Spritzeinheit [39]
(c) Ausbürsteinrichtung zum Entformen von Elastomerteilen [2].

2.3.4 Extrusion

Mit dem Extrusionsverfahren werden Elastomerprofile hergestellt. Bei einer dem Stand der Technik entsprechenden kontinuierlichen Extrusionsanlage sind Extruder, Vulkanisier-einrichtung, Kühlstrecke, Abzug und Bearbeitungseinrichtung hintereinander geschaltet [1, 39].

Am Anlagenbeginn befindet sich ein Extruder mit Fütturvorrichtung. Dessen Aufgabe ist es, eine thermisch und rheologisch homogene Masse dem Extrusionwerkzeug und Mundstück mit ausreichend Druck zu liefern. Das Mundstück ist variabel in seiner Geometrie, um die entstehende Profilgeometrie an die engen Toleranzvorgaben anzupassen. Aufgrund der Strangaufweitung (elastischen Rückstellkräfte der Makromolekülketten) muss dies leicht korrigierbar sein. Weiters bieten variable Mundstücke die Möglichkeit, Wandstärken zu

verändern und Profildbereiche zu verlagern. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass sich durch das Abziehen, Vernetzen und Abkühlen Maße und Geometrie noch verändern [1, 39]. Vulkanisation im Salzbad (Abbildung 8-a) ist die häufigste Vernetzungsmethode. Da sie unter Ausschluss von Luftsauerstoff stattfindet, ist sie auch für peroxidisch vernetzende Systeme geeignet. Die Vernetzung läuft bei atmosphärischem Druck oder bei einem Druck von 5 bar bis 10 bar in einem 20 m bis 40 m langen Vulkanisationsrohr ab. Als zweithäufigste Methode werden Heißluftanlagen (Abbildung 8-b) verwendet. Die notwendige Energie führen elektrische Luftheritzer, Infrarotstrahler, dampfbeheizte Wärmetauscher, direkte Verbrennungsgase oder eine vorgeschaltete UHF (Ultra High Frequency) Anlage zu. Da die Vulkanisation viel Zeit benötigt, kann die Vulkanisationseinheit bis zu 24 m lang sein. Dabei durchläuft das Profil meist in einer schleifenförmigen Führung bis zu dreimal die Vulkanisationseinheit. Die Heißluftvulkanisation findet immer unter atmosphärischen Druck statt [1, 39].

Üblicherweise ist eine Kühlstrecke der Vulkanisationseinrichtung nachgeschaltet. Sie hat die Aufgabe, das Profil unter eine kritische Temperatur zu kühlen, damit durch die verbleibende Restwärme keine unerwünschte Nachvernetzung stattfinden kann. Das Abziehen erfolgt meist mit einem Bandabzug oder Raupenabzug. Je nach Anwendungszweck sind zusätzliche Bearbeitungs-, Trenn-, Ablege- oder Aufrolleinrichtungen nachgeschaltet. Dadurch ergeben sich Gesamtanlagenlängen von bis zu 85 m. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt der Extrusion (= Vulkanisation) ermöglicht Fertigungsgeschwindigkeiten von maximal 8 m/min bis 20 m/min [1, 39].

Extrudierte Elastomerprofile finden hauptsächlich Einsatz in der Dichtungstechnik. Um den hohen Anforderungen zu entsprechen, können Profile aus bis zu drei verschiedenen Elastormischungen bestehen. Weiters sind Einlagen wie Metalldrähte und Fäden aus Textil oder Kunststoff eine gängige Methode um Profile zu verstärken. Ein Nachteil der sehr wirtschaftlichen Extrusion ist, dass keine Hinterschnitte oder 3D-Geometrien damit hergestellt werden können. Da diese in der Dichtungstechnik oft gefordert sind, kann ein spanender Bearbeitungsschritt der Profile hinzukommen. Außerdem erreichen extrudierte Profile durch die niedrigen Extrusionsdrücke sowie Vulkanisation ohne Formzwang gelegentlich nicht die hohen Maß- und Geometrieanforderungen der Dichtungsbranche [1, 21, 39].

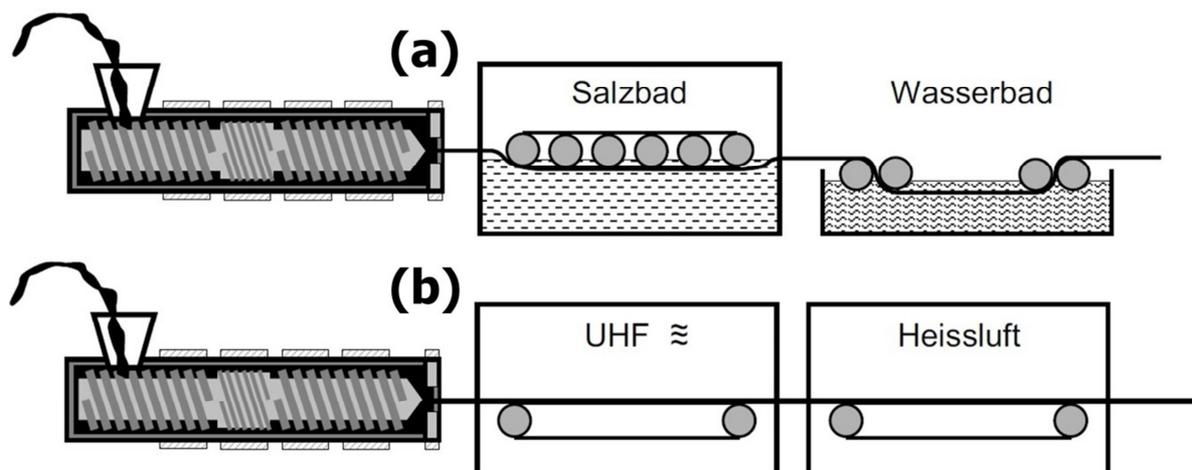


Abbildung 8: Extrusionsanlagen für Elastomere mit Extruder und Vulkanisationseinheit: (a) Salzbad, (b) Heißluft mit vorgeschalteter UHF-Anlage [1].

2.3.5 Herausforderungen

Eine Herausforderung der Elastomerverarbeitung liegt bei den langen Zykluszeiten, verglichen mit Thermoplasten. Sie resultieren aus der langen Vulkanisationszeit und haben eine generell schlechtere Wirtschaftlichkeit zur Folge. Weiters ist die thermische Materialausdehnung während der Vernetzungsphase ein kritischer Punkt. Im Elastomerwerkzeugbau sind deshalb Spaltmaße $< 2 \mu\text{m}$ erforderlich um die Gratbildung am Bauteil zu minimieren. Für längliche Elastomerbauteile stellt außerdem die generell sehr hohe Viskosität ein Hindernis dar. Durch die hohen Spritzdrücke werden oft große Maschinen und Spezialkonstruktionen benötigt. Außerdem muss bei der Werkzeugkonstruktion darauf geachtet werden, potentielle Freistrahlbildung zu kontrollieren beziehungsweise falls möglich zu unterbinden. Da die Vulkanisation in der Regel durch Wärmeleitung von außen nach innen abläuft, kann es speziell bei dickwandigen Bauteilen zu großen Unterschieden im Vernetzungsgrad zwischen Bauteiloberfläche und -mitte kommen. Weitere Herausforderungen für die Verarbeitung von Kautschukmischungen sind eine homogene Prozess- und Temperaturführung im Werkzeug [1, 39, 41, 43].

2.4 Exjection[®]-Technologie für Thermoplaste

Die Exjection[®]-Technologie, schematisch skizziert in Abbildung 9, überwindet die Nachteile von Extrusion und Spritzguss. Sie wurde von DI Gottfried Steiner, Ingenieurbüro für Kunststofftechnik (IB STEINER, AT), erfunden, entwickelt und am Markt eingeführt. Die Technologie beruht auf den Patentfamilien, die von den bereits erteilten österreichischen Patenten AT 504 904 B1 (Verfahren zur Herstellung langgestreckter Profile und Leisten, "Offenes Formnest"), AT 503 968 B1 (Spritzgießanlage, integrierte Formmodule, Integration von Formkomponenten), AT 500 932 B1 (Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen profilierter zumindest abschnittsweise länglicher Bauteile, Ausdehnung des Formnestes) und AT 519 256 B1 (Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Bauteilen oder Profilen, "Verteilerkanal mit Anbindungen zu Kavitäten") ausgehen. Bei dieser Technologie ist die gesamte Kavität in einen beweglichen Verschiebeschlitten eingeformt. Dieser steht zu Beginn des Füllvorgangs still, bis sich eine einheitliche Fließfront in Form einer Quellströmung ausbildet (Vorspritzen). Danach verschiebt ein Motor den Schlitten entgegen der Spritzrichtung, wodurch sich der Druckbedarf von der Fließweglänge entkoppelt. Die vorgespitzte Masse erzeugt den nötigen Druck um die Kavität vollständig zu füllen. Wichtig ist, dass Einspritzvolumenstrom und Schlittenbewegung aufeinander als auch auf die lokale Abkühlung des Bauteils abgestimmt sind. Für Thermoplaste gibt es dieses Verfahren seit seiner erstmaligen Vorstellung auf der K2007. Die lineare Schlittenbewegung kann dabei vertikal [48] oder horizontal [49] erfolgen. Die Spritzgießmaschinenhersteller ENGEL (ENGEL AUSTRIA GmbH) und ARBURG (ARBURG GmbH + Co KG, DE) bieten diese Konzepte an. Ein Anwender der Exjection[®]-Technologie fertigt auf einer zwei Komponenten-Spritzgießmaschine längliche Bauteile aus zwei Thermoplasten. Eine dritte Variante mit rotierender [51] Schlittenbewegung und horizontaler Schließenheit wurde ebenfalls mit beiden Herstellern auf zwei Komponenten-Spritzgießmaschinen entwickelt. Dieses Konzept ermöglicht eine Fertigung endloser Spritzgießbauteile (Abbildung 10). Voraussetzung für die Endlosvariante ist, dass das erstarrte Bauteil während des Prozesses die Kavität ohne Bauteildefekte verlassen kann. Die Exjection[®]-Technologie entkoppelt den Druckbedarf von

der Fließweglänge und benötigt deshalb weniger Spritzdruck zum Füllen der Kavität. Es entsteht ein quasistationärer Prozess. Ebenso reduziert sie durch den geringeren Druckbedarf, die Schließkraft länglicher Bauteile erheblich. Niedrigere Einspritzdrücke und Schließkräfte erlauben somit die Verwendung einer kompakteren Maschinenausführung, wodurch sich der Energieverbrauch um bis zu 80 % verringern lässt [36, 49, 50].

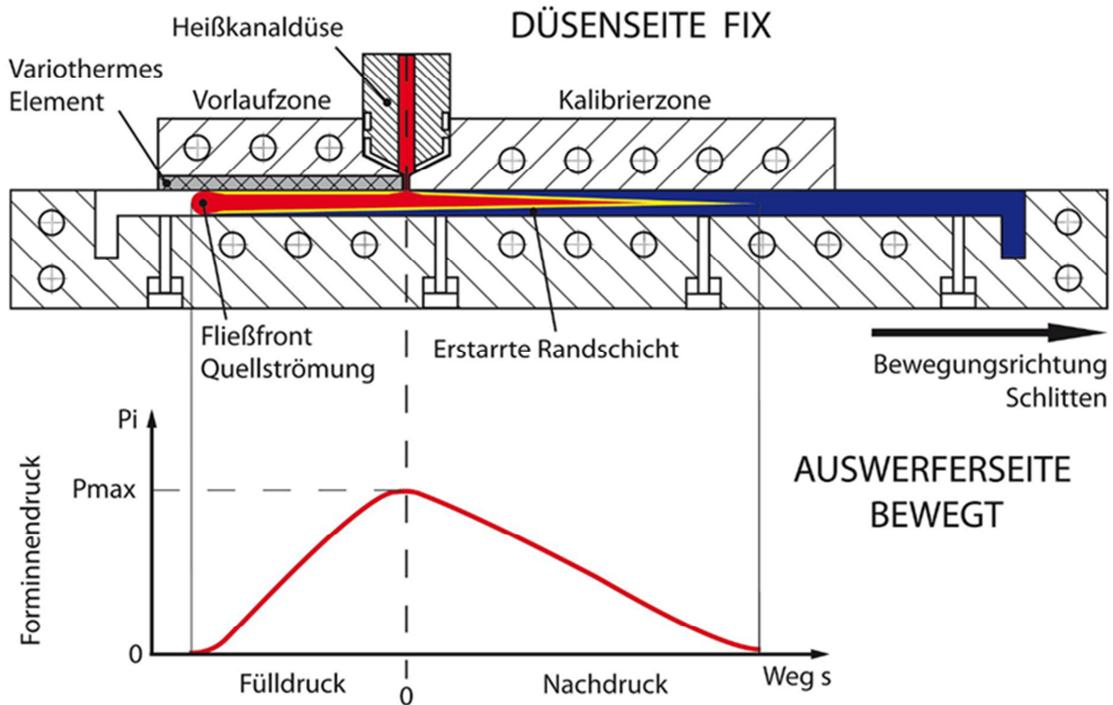


Abbildung 9: Prinzipskizze der Exjection[®]-Technologie für Thermoplaste [49].

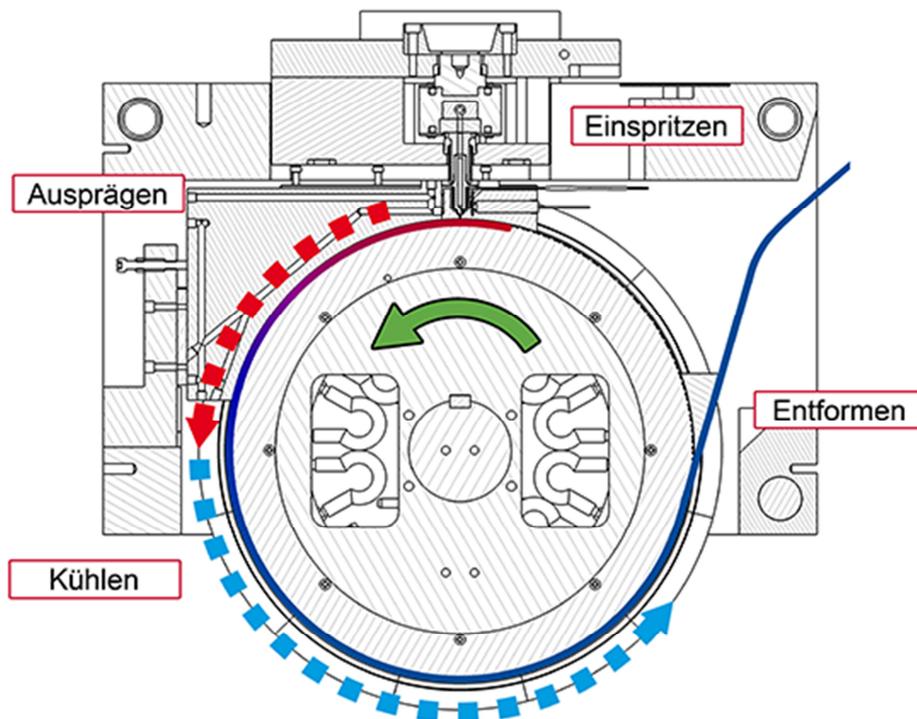


Abbildung 10: Endloskonzept der Exjection[®]-Technologie [27].

2.5 Großdichtungen

Großdichtungen sind in der heutigen Zeit gefragter als jemals zuvor. Durch die immer größeren Maschinen und extremeren Einsatzbedingungen steigen auch die Anforderungen an die Dichtungen. Anwendungsgebiete von Großdichtungen liegen in der Energieversorgung (Wind- und Wasserkraftanlagen), in der Stahlindustrie, dem Schiffsbau, der chemischen Industrie, dem allgemeinen Maschinenbau und in der Tunnelbautechnik [33, 44, 45, 53].

Ab einem Durchmesser von ca. 0,5 m wird von einer „Großdichtung“ gesprochen [47]. Im Vergleich zu konventionellen Dichtungen werden sie in deutlich geringeren Stückzahlen produziert (oft auch Einzelstücke oder Kleinstserien). Mit dem Extrusionsverfahren können in vielen Fällen nicht die erforderlichen komplexen 3D-Geometrien und engen Toleranzen der Dichtungsprofile erzeugt werden. Großdichtungen werden derzeit meist im Pressverfahren auf Großpressen hergestellt. Dies ist mit hohen Kosten für Presse und Werkzeug in den entsprechenden Dimensionen verbunden. Fallweise werden Dichtprofile auch aus Halbzeugen auf einem CNC-Drehautomaten ausgefräst. Halbzeuge werden mittels Spritzgießen, Pressen oder Wickeln hergestellt. Beim Wickeln werden mehrere Lagen von dünnen kalandrierten Matten um Stahlzylinder gewickelt und anschließend im Autoklaven (limitierender Faktor) vulkanisiert. Die bei der spanenden Bearbeitung anfallenden hohen Mengen an Spangut (mit Schneid- und Kühlflüssigkeiten kontaminiert) sowie die Entsorgung dieses, wirken sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit aus. Vorteil der spanenden Bearbeitung ist neben der Sicherstellung enger Toleranzen, die Möglichkeit jede Geometrie als Einzelstück und ohne großen Mehraufwand zu fertigen. Bis zu einem Durchmesser von ca. 4000 mm sind Großdichtungen aus Gießpolyurethan noch nahtlos erhältlich. Größere Dichtungsdurchmesser entstehen durch Verschweißen mehrerer Segmente. Bei Gummidichtungen werden die Segmente miteinander verklebt. Die Verbindung kann beim Hersteller oder am Einsatzort erfolgen. Eine Klebeverbindung bildet allerdings insbesondere bei dynamischer Belastung eine mechanische Schwachstelle. Eine Herstellung von Großdichtungen ist zusammengefasst derzeit nur durch große, teure Pressen und Werkzeuge oder mehrere aufwendige und kostenintensive Verarbeitungsschritte möglich. Die Dichtungsbranche ist deshalb stets auf der Suche nach wirtschaftlicheren Methoden Großdichtungen in großer Stückzahl herzustellen [21, 41, 45 - 47].

Die Anwendung der Exjection®-Technologie auf Elastomere soll die beschriebenen Nachteile beheben und somit eine Herstellung von maßgenauen Großdichtungen mit komplexen 3D-Profilen wirtschaftlich ermöglichen. Schlüsselpunkt zur erfolgreichen Umsetzung ist neben den geringen Spaltmaßen (Schwimmbildung) die Gewährleistung der Füllung durch eine Quellströmung (Vermeidung von Freistrahlbildung). Für die Durchführung des Verfahrens im Endloskonzept muss es zusätzlich noch möglich sein, dass das Bauteil die Kavität ohne Defekte verlässt.

2.6 DVR – Zusammenhang mit dem Vernetzungsgrad

Der Druckverformungsrest ist als das Ausmaß der bleibenden Verformung nach dem Entfernen einer für einen bestimmten Zeitraum aufgetragenen statischen Last definiert. In der DIN ISO 815 ist der Messablauf genormt. Die verwendeten Proben sollten einen Durchmesser von 13 mm und eine Ausgangsdicke h_0 von 6,3 mm aufweisen. In einer

Vorrichtung werden sie zusammengepresst und für ein Vielfaches von 24 Stunden bei konstanter Temperatur ausgelagert. Nach der Entlastung kommt es zur erneuten Vermessung der Höhe. Gleichung (2) zeigt die Berechnung des DVR [16, 39]:

$$\text{DVR} = \frac{h_0 - h_1}{h_0 - h_s} \cdot 100\% \quad (2).$$

DVR	Druckverformungsrest	%
h_0	ursprüngliche Dicke des Probenkörpers	mm
h_1	Dicke des Probenkörpers nach der Erholung	mm
h_s	Höhe des Abstandstückes	mm

Mit steigendem Vernetzungsgrad nimmt die Elastizität zu. Dies spiegelt sich in einem niedrigeren DVR wider. Verschiedene Arbeiten zeigen diesen Zusammenhang des DVR mit dem Vernetzungsgrad [10, 11, 19, 22, 34, 39, 54]. Ein niedriger DVR-Wert bedeutet besonders bei Dichtungsanwendungen eine bessere mechanische Performance. Deshalb werden oft DVR-Werte zur Charakterisierung eines Elastomers in der Dichtungstechnik herangezogen. Eine besondere Eigenschaft des DVR ist, dass er sich auch nach Abschluss der Vulkanisation keinem Minimum annähert. Der DVR kann somit auch eine Übervernetzung eindeutig abbilden. Mit alternativen Methoden wie Quell- oder Zugversuchen ist dies nicht möglich [4 - 7, 11, 22, 39].

2.7 Versuchsplanung

Um Versuche durchzuführen, gibt es verschiedene Methoden. Ziel aller Methoden der Versuchsplanung ist es, schnell und ressourcensparend viel Information über ein System zu erhalten. Diese Informationen sind notwendig um Produkte kundengerecht und mit stets steigender Qualität herzustellen. In der Normenreihe ISO 9000 [14] (speziell ISO 9004 [15]) sind diese Ziele festgelegt.

Um die Ursache-Wirkungs-Beziehungen in einem System zu verstehen, sind die Einflussgrößen des Systems bewusst zu ändern und die Änderungen der Systemausgabe zu beobachten. Für das vorliegende System sind zunächst alle möglichen Einflussgrößen zu identifizieren. Diese können bewusst steuerbar sein, wie beispielsweise Einspritzvolumenstrom, Werkzeugtemperatur, Vulkanisationszeit oder auch Materialtype. Hier ist wiederum zwischen quantitativen (zähl- oder messbar z. B.: Einspritzvolumenstrom) und qualitativen (kategorisierbar z. B.: Materialtyp) Einflussgrößen zu unterscheiden. Nicht variierbare Einflussgrößen haben einen Einfluss, sind während der Versuchsdurchführung jedoch nicht veränderbar. Ein Beispiel dafür ist das Werkzeugdesign. Ein weiterer wichtiger Begriff ist die Störgröße. Dazu zählen Chargenschwankungen, Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit (in nicht klimatisierter Umgebung) aber auch nicht erkannte Einflussgrößen. Aus allen Einflussgrößen sind nun jene auszuwählen, die einen relevanten Einfluss auf die Zielgrößen haben. Dabei ist wiederum zu unterscheiden, ob diese während der Versuche verändert oder ob sie konstant gehalten werden können. Das konstant-Halten gewisser

Einflussgrößen kann beispielsweise aus kostentechnischen oder zeitlichen Gründen erfolgen. So ist es bei trägen Temperiersystemen nicht empfehlenswert, ständig die Werkzeugtemperatur zu variieren [24, 25, 30, 32].

Ist noch zu wenig Systemkenntnis vorhanden um die relevanten Einflussgrößen zu identifizieren, so gibt es die Möglichkeit durch Screening-Versuchspläne mit relativ wenig Aufwand zu überprüfen, ob eine Einflussgröße auf die Zielgrößen einen signifikanten Einfluss hat. Jene Einflussgrößen werden auch als Faktoren bezeichnet. Für alle Faktoren sind Stufen festzulegen. Dabei wird bei zweistufigen Faktoren die hohe Faktorstufe mit 1 oder + und die niedrige Faktorstufe mit -1 oder - in kodierter Schreibweise bezeichnet. Bei der Auswahl der Stufenwerte ist eine große Spannweite empfehlenswert. Bei geringer Systemkenntnis ist zu überprüfen ob, diese Stufenwerte realisierbar sind. Dies kann durch Testen von Extremwerten erfolgen [24, 25, 30, 32].

Die Zielgrößen können ebenfalls quantitativ (DVR) oder qualitativ (Oberflächendefekte) sein. Wenn möglich sind quantitative zu bevorzugen. Bei ihrer Auswahl ist darauf zu achten welche Änderungen zu erfassen sind und ob die Genauigkeit der Messmittel ausreicht um überhaupt signifikante Aussagen treffen zu können [24, 25, 30, 32].

Die Auswirkung eines Faktors auf eine Zielgröße wird als Effekt bezeichnet. Hier ist zwischen Haupteffekten und Wechselwirkung (Wechselwirkungseffekten) zu unterscheiden. Der Einfluss den die Variation eines einzelnen Faktors auf die Zielgröße ausübt, wird Haupteffekt bezeichnet. Wechselwirkungen sind hingegen Veränderungen der Zielgröße bei gleichzeitiger Variation mehrerer Faktoren. Sie sind also nur dann möglich, wenn mindestens zwei Faktoren ihre Stufenhöhe variieren [24, 25, 30, 32].

Zu den Strategien der Systemanalyse zählen „best-guess-approach“, „One Factor at A Time“ (OFAT) und Faktorenversuchspläne. Beim „best-guess-approach“ kommt es zur willkürlichen Variation der Faktoren. Mit dem „best-guess-approach“ ist es nur unter großem Prozesswissen und Know-how möglich in annehmbarer Zeit das gewünschte Resultat zu erzeugen. Es sind damit jedoch keine Prozessinformationen, Optima oder Wechselwirkungen erfassbar. Der OFAT Ansatz erlaubt immer nur die Veränderung eines einzelnen Faktors. Ergebnisse sind einzelne Grafen ohne Informationen zu Wechselwirkungen. Bei den „best-guess-approach“ und der OFAT Strategie, welche auf das Prinzip von Versuch und Irrtum („trail-and-error“) setzen, sind für die Gewinnung weniger Systeminformationen viele Versuche notwendig [24, 25, 30, 32].

Mithilfe von Faktorenversuchsplänen ist es dagegen möglich, Systeme gezielt zu analysieren und zu optimieren. Die Auswahl einer geeigneten Strategie hat eine erhebliche Reduktion des Versuchsaufwandes zur Folge. Vollfaktorielle Versuchspläne berücksichtigen alle möglichen Kombinationen und ermöglichen so die Erfassung aller Effekte und aller Wechselwirkungen. Weitere Vorteile sind eine hohe Aussagekraft, Übersichtlichkeit und Dokumentation. Ein Versuchsplan mit zwei Stufen pro Faktor und n Faktoren wird als 2^n -Versuchsplan bezeichnet. Es ergeben sich für einen 2^2 -Versuchsplan vier, für einen 3^3 -Versuchsplan bereits 27 verschiedene Versuchseinstellungen. Zur statistischen Beurteilung ist jede Versuchseinstellung zu wiederholen. Eine randomisierte Durchführung ist die zufällige Reihenfolge der systematischen Versuche. Sie sollte – sofern keine gravierenden Gründe, wie zu hohe Kosten oder Zeitaufwand, dagegen sprechen – immer angewendet werden. Eine Replikation der Versuche steigert die Aussagekraft noch weiter. Der Einbau von Zentralpunkten (Versuche mit mittlerer Faktorstufe) erlaubt die Kontrolle, ob bei

Versuchsplänen mit zwei Faktorstufen die lineare Modellannahme Gültigkeit besitzt. Liegt der Zentralpunkt außerhalb der Modellvorhersage, deutet dies auf einen nicht linearen Zusammenhang hin [24, 25, 30, 32].

Entscheidend für die Auswahl und den Aufwand des Versuchsplans ist auch welche Aussagen aus den Ergebnissen getroffen werden sollen. Sie sind beispielsweise zur umfassenden Beschreibung eines vorliegenden Sachverhaltes oder zur Bestätigung aufgestellter Hypothesen verwendbar [24, 25, 30, 32].

Ein wesentliches Ziel ist es, aus allen identifizierten, steuerbaren Einflussgrößen, Einstellungen für das System zu finden, damit dieses unempfindlich auf Schwankungen der Einflussgrößen und Störgrößen reagiert. Dieser Bereich der Systemeinstellungen wird auch stabiler Bereich genannt. In Abbildung 11 ist dieser Bereich, der in weiterer Folge zu einem robusten Prozess führt, durch $X_{1(+)}$ gekennzeichnet. Selbst größere Schwankungen der Einflussgrößen haben hier nur geringe Auswirkungen auf die Zielgröße. Im zweiten markierten Bereich $X_{1(-)}$ kommt es bereits bei kleinsten Änderungen der Einflussgrößen zu enormen Auswirkungen auf die Zielgröße [24, 32].

Aus den Versuchsergebnissen kann ein empirisches Modell durch eine Regressionsanalyse erzeugt werden. Mit der Anzahl der Faktorstufen steigt auch die Ordnung der Regressionsgleichung. In Gleichung (3) ist eine allgemeine Form einer linearen Regressionsgleichung dargestellt, wie sie für die Modellierung aus einem 2²-Faktoriellen Versuchsplan angewendet wird. Die darin enthaltenen Koeffizienten werden zuvor durch eine Regressionsanalyse ermittelt. Das Modell ist nur für jenen Bereich gültig, der innerhalb der Werte der Einflussgrößen liegt. Eine Extrapolation des Modells über die Bereichsgrenzen hinweg bietet keine Sicherheit auf Richtigkeit [24, 25, 30, 32].

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \text{Störgröße} \quad (3).$$

Y	Zielgröße
b_0	Mittelwert aller Messungen
b_1, b_2	Regressionskoeffizienten für Haupteffekte
b_{12}	Regressionskoeffizient für Wechselwirkung
x_1, x_2	Faktor 1, 2

Mathematisch empirischen Modellen gelingt es in der Regel nicht die tatsächlichen Werte exakt vorherzusagen. Eine Auskunft über die Güte des Modells liefert das Bestimmtheitsmaß R^2 . Es gibt an wie gut die unabhängigen Variablen geeignet sind die Abhängigen zu beschreiben. Anders ausgedrückt gibt R^2 den Anteil an wie gut das Verhalten durch das Modell beschreibbar ist. R^2 kann nur Werte zwischen 0 (das Modell ist nicht geeignet) und 1 (das Modell eignet sich perfekt) annehmen [24, 25, 30, 32].

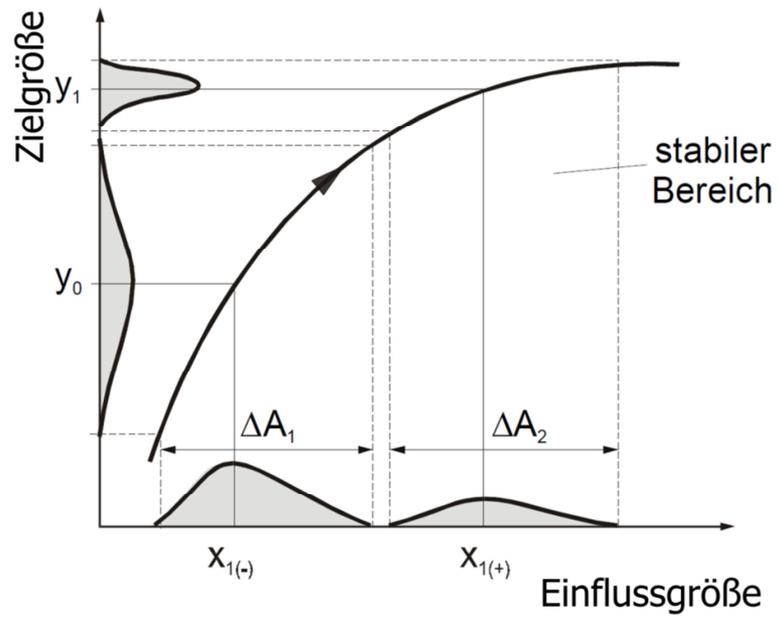


Abbildung 11: Darstellung des stabilen Prozessbereichs; in Anlehnung an [24].

3 Experimentelles

3.1 Material

Für die experimentellen Versuche stellte SKF Sealing Solutions Austria GmbH, AT, eine rußgefüllte Acrylnitril-Butadien-Kautschukmischung (NBR) zur Verfügung. Der im industriellen Maßstab hergestellte Batch wurde in Streifenform angeliefert (Abbildung 12). Das Material ist schwefelvernetzend und weist eine Dichte bei Raumtemperatur von $1,22 \text{ g/cm}^3$ sowie eine Shore A Härte von 75 auf.



Abbildung 12: Streifenförmiger NBR Batch.

3.2 RPA Messungen

Die Ermittlung des Vernetzungsverhaltens erfolgte mit dem D-RPA 3000 (MonTech Werkstoffprüfmaschinen GmbH, DE) in Anlehnung an DIN 53529 [13]. Bei der RPA Messung befindet sich die Probe in einer beheizbaren bikonischen Prüfkammer. Über einen Spalt kann überschüssiges Probenmaterial aus der Prüfkammer entweichen. Durch die untere Prüfkammerhälfte wird eine Deformation mit konstanter Frequenz vorgegeben. An der oberen Prüfkammerhälfte wird das übertragene Drehmoment mit einer Kraftmessdose abgegriffen. Das übertragene Drehmoment in Phase als Funktion der Zeit bildet die Vulkameterkurve. Die Messeinstellungen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Der Aufbau der RPA Messung ist in Abbildung 13 dargestellt.

Tabelle 1: Gewählte Einstellungen am D-RPA 3000.

Frequenz	1,67	Hz
Auslenkung	0,5	°
Messzeit	120	min

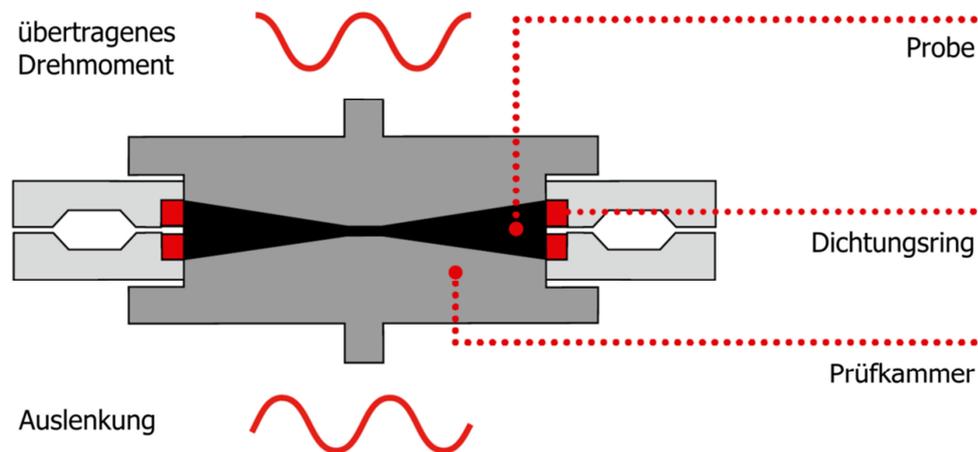


Abbildung 13: Messanordnung am D-RPA 3000; in Anlehnung an [31].

3.3 Referenzplattenherstellung

Eine Pressform diente zur Herstellung von Referenzplatten (Abbildung 14). Die mechanischen Eigenschaften der entnommenen Prüfkörper sollen dabei als Referenzwerte beziehungsweise Vergleichswerte zur späteren RubExject-Bauteilprüfung dienen. Dadurch können die Bauteileigenschaften des RubExject-Verfahrens mit einem konventionellen Verarbeitungsverfahren der Elastomerbranche verglichen werden. Bei der Herstellung wurde der NBR Kautschuk mit Volumsüberschuss in das temperierte Werkzeug eingelegt. Anschließend fuhr die Presse (Schließeinheit der Maplan MTF 160 Spritzgießmaschine; MAPLAN GmbH, AT) für die Dauer der vorgegebenen Vulkanisationszeit zusammen. Die Vulkanisationszeit entspricht jener Zeit, welche für den gewünschten Vernetzungsgrad aus der Vulkanisationskurve abgelesen wurde. Nach Erreichen dieser Zeit öffnete die Presse. Die Prüfplatte wurde entnommen und sofort in einem Eiswasser abgekühlt, um den gewünschten reaktionskinetischen Zustand zu konservieren. In Tabelle 2 sind die verwendeten Einstellungen aufgelistet. Bei der Temperatur handelt es sich um die Werkzeugoberflächentemperatur. Die Überprüfung erfolgte durch das Temperaturmessgerät testo 925 mit Oberflächenfühler (Testo SE & Co. KGaA, DE) auf $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ genau.

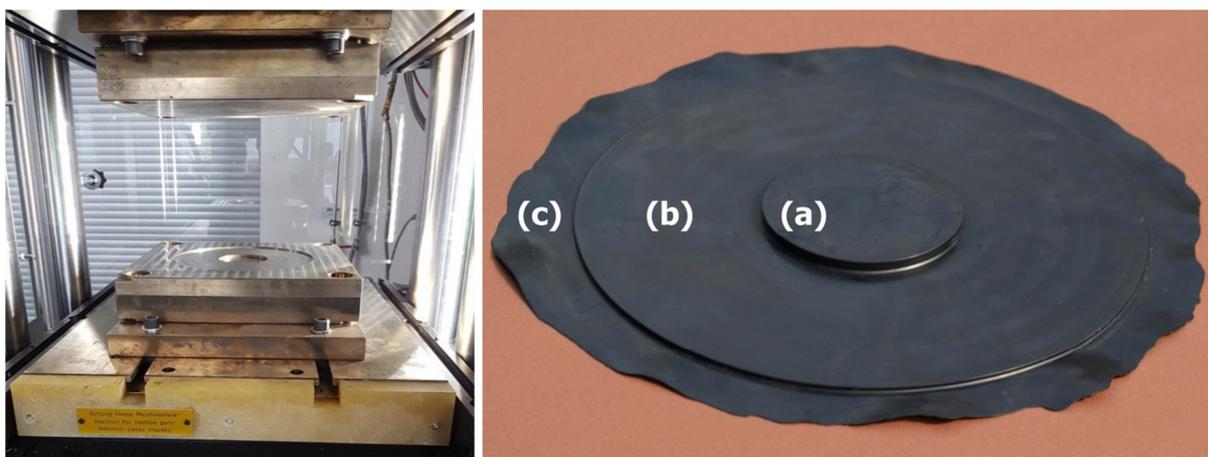


Abbildung 14: Presswerkzeug (links) zur Herstellung von Referenzplatten (rechts) mit den Bereichen zur (a) Entnahme von DVR-Prüfkörper, (b) Entnahme von Zugprüfkörper, (c) Schwimmhaut.

Tabelle 2: Einstellungen zur Herstellung der Referenzplatten.

Vernetzungsgrad	Vulkanisationszeit	Werkzeugoberflächentemperatur	Schließkraft
%	s	°C	kN
25	824	130	1591
50	908		
60	961		
70	1052		
75	1131		
80	1249		
85	1433		
90	1747		
95	2402		
100	5812		

3.4 RubExject-Werkzeug und Maschinenkonfiguration

Das RubExject-Werkzeug wurde von ELMET Elastomere, Produktions- und Dienstleistungs-GmbH (AT) mit Unterstützung von Ing. Bertold Wiesenegger (PPTD GmbH, AT) unter Nutzung des Know-hows von IB STEINER (AT) nach der grundsätzlichen Verfahrensidee der Exjection®-Technologie für Thermoplaste konstruiert und gebaut. Abbildung 15 zeigt das Werkzeug im aufgespannten Zustand auf der holmlosen Spritzgussmaschine Engel Victory Electric 940/130 (ENGEL AUSTRIA GmbH, AT). Die Spritzgießmaschine leistet eine Schließkraft von 1300 kN und einen maximalen Spritzdruck von 2400 bar. Für die Verarbeitung von Elastomeren wurde ein geeignetes Spritzaggregat montiert. Der Schneckendurchmesser von 50 mm ermöglicht ein maximales Dosiervolumen von 432 cm³.



Abbildung 15: Spritzgießmaschine mit RubExject-Werkzeug; (a) Elektromotor, (b) Führungselemente, (c) auswerferseitige Aufspannbacke, (d) zusätzliche horizontale Führung, (e) Bedieneinheit, (f) Arbeitsplatz für Messtechnik, (g) Freiraum für Temperierschläuche, (h) Spritzeinheit mit streifenförmigen Material.

Abbildung 16 (bzw. Abbildung 52 und Abbildung 53 im Anhang) zeigt Renderings der Werkzeughälften und des gesamten RubExject-Werkzeugs. Der bewegliche Verschiebeschlitten beinhaltet die gesamte Kavität. In Abbildung 16 beziehungsweise Abbildung 17-5 ist diese vertikal bewegliche Einheit durch eine cremefarbige Isolierung umgeben. Die thermische Trennung zwischen öltemperierten und wassertemperierten Bereichen erfolgt durch diese Isolierungsplatten, die aus einem Verbundwerkstoff (harzgebundenen Glasfasern) bestehen. Das für die RubExject-Versuche notwendige komplexe Temperieresetup ist in Tabelle 3 und Abbildung 17 übersichtlich zusammengefasst. Verwendet wurden dazu Temperiergeräte von WITTMANN Kunststoffgeräte GmbH, AT und TOOL-TEMP AG, CH.

Die Vertikalbewegung entsteht durch einen Spindelantrieb, der von einem Elektromotor (SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, DE) (Abbildung 15-a) angetrieben wird. Die Spindel (Abbildung 17-3) bildet dabei das Verbindungsglied zwischen den fixen Werkzeugteilen und dem beweglichen Verschiebeschlitten. Horizontale Führungselemente (Abbildung 15-b) verbinden die düsenseitige und auswerferseitige Schlittenhälfte und übertragen dadurch die Schlittenbewegung. Die vertikale Führung des Verschiebeschlittens ist durch Gleitführungen (Abbildung 17-2) sichergestellt. Das Werkzeuggewicht beträgt ca. 1000 kg. Um eine Neigung des Verschiebeschlittens unter dieser Last an der holmlosen Spritzgießmaschine auszuschließen, stützen zusätzliche Führungen (Abbildung 15-d) die auswerferseitige Werkzeughälfte (Abbildung 15-c) ab.

Die Kavität ist mit zwei kombinierten Druck- und Temperatursensoren und einem empfindlicheren Drucksensor ausgestattet. In Tabelle 4 sind die wichtigsten Sensordaten zusammengefasst (Sensoren von Kistler Instrumente AG, CH). Die Druckmessung beruht für alle drei Sensoren auf dem piezoelektrischen Prinzip. Ein 1-Kanal Labor-Ladungsverstärker Typ 5018A (Kistler Instrumente AG, CH) übernahm die Messverstärkung des Drucksensors. Die Verstärkung der kombinierten Druck-, Temperatursensoren erfolgte über einen 2-Kanal Ladungsverstärker, Typ 5073A (Kistler Instrumente AG, CH). Die Messdaten wurden mit einem Spider8-Modul an einem Laptop mit der Software catman easy V5.0.2 erfasst (beide von Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, CH). Auch alle weiteren Sensordaten der Spritzgussmaschine (spezifischer Spritzdruck, Schneckenposition, Verschiebeschlittenposition und ein Digitalsignal für das Schließen des Werkzeugs) wurden nach diesem Prinzip erfasst. Die eben beschriebene Messtechnik wurde direkt neben der Spritzgießmaschine aufgebaut (Abbildung 15-f).

Piezoelektrische Sensoren sind im Gegensatz zu den piezoresistiven über den gesamten Messbereich linear. Durch eine kleinere Baugröße können piezoelektrische Sensoren leichter im Werkzeug untergebracht werden. Nachteil piezoelektrischer Sensoren ist ihre Drift, die sich speziell bei statischer Belastung und niedrigen Drücken bemerkbar macht [18, 23, 29]. Funktionierende und korrekt eingebaute Forminnendrucksensoren weisen eine maximale Drift von 0,05 pC/s auf [18, 29]. Die verwendeten Sensoren haben eine Sensitivität von 10 pC/bar beziehungsweise 16 pC/bar. Bei 200 s Messzeit kann die Drift also maximal 1 bar beziehungsweise 1,6 bar erreichen. Dies ergibt auch gleichzeitig die Unsicherheit der Forminnendruckmessungen.

Die Kavität formt eine Bauteilgeometrie ähnlich einem einfachen Dichtprofil mit der Möglichkeit, Proben für DVR- und Zugprüfung zu entnehmen. Abbildung 18 zeigt dieses Bauteil mit seinen Abmessungen. Der grün markierte Grat erweitert das Bauteil um die Breite

der Kalibrierzone. Ausschließlich dieser Bereich der Bauteiloberfläche ist einer Relativbewegung zum Verschiebeschlitten ausgesetzt. Die Schwimmhäute am Grat ergeben sich durch den für die Relativbewegung notwendigen Spalt. Dieser konnte durch iteratives Abschleifen der Kalibrierzonenelemente beziehungsweise der Vorlaufzone auf 2/100 mm eingestellt werden. Am Kavitätsanfang und -ende befindet sich jeweils ein begrenzender Kavitätsansatz mit der Bauteilgeometrie ohne den Grat (Abbildung 20-e). Der Schließ- und Entformungsmechanismus des RubExject-Werkzeugs erfolgt mechanisch durch ein Backen-Schließkonzept (Abbildung 17-6). So ist es möglich den Hinterschnitt im Übergang zwischen dem dünnwandigen und dem dickwandigen Bauteilbereich zu entformen. Ein Kaltkanal (Abbildung 17-1) verbindet Kavität und Spritzaggregat. Die Anbindung muss dabei über die Dünnstelle der Kavität erfolgen, um eine Kavitätsfüllung durch eine Quellströmung sicherzustellen beziehungsweise eine Freistrahlförmigkeit zu vermeiden.

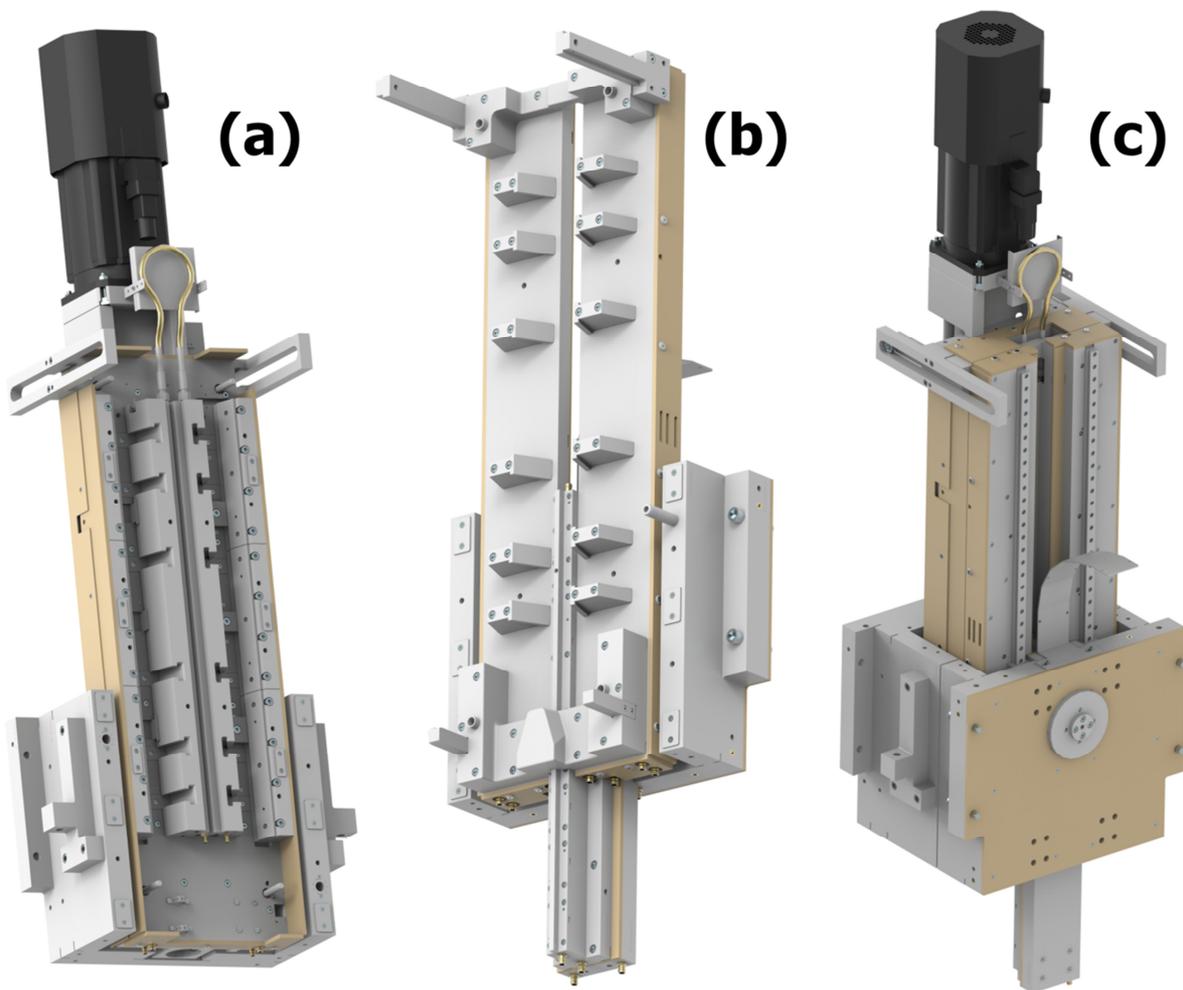


Abbildung 16: RubExject-Werkzeug (a) Auswerferseitige Werkzeughälfte, (b) düsenseitige Werkzeughälfte, (c) düsenseitige Ansicht auf das gesamte geschlossene Werkzeug [52].

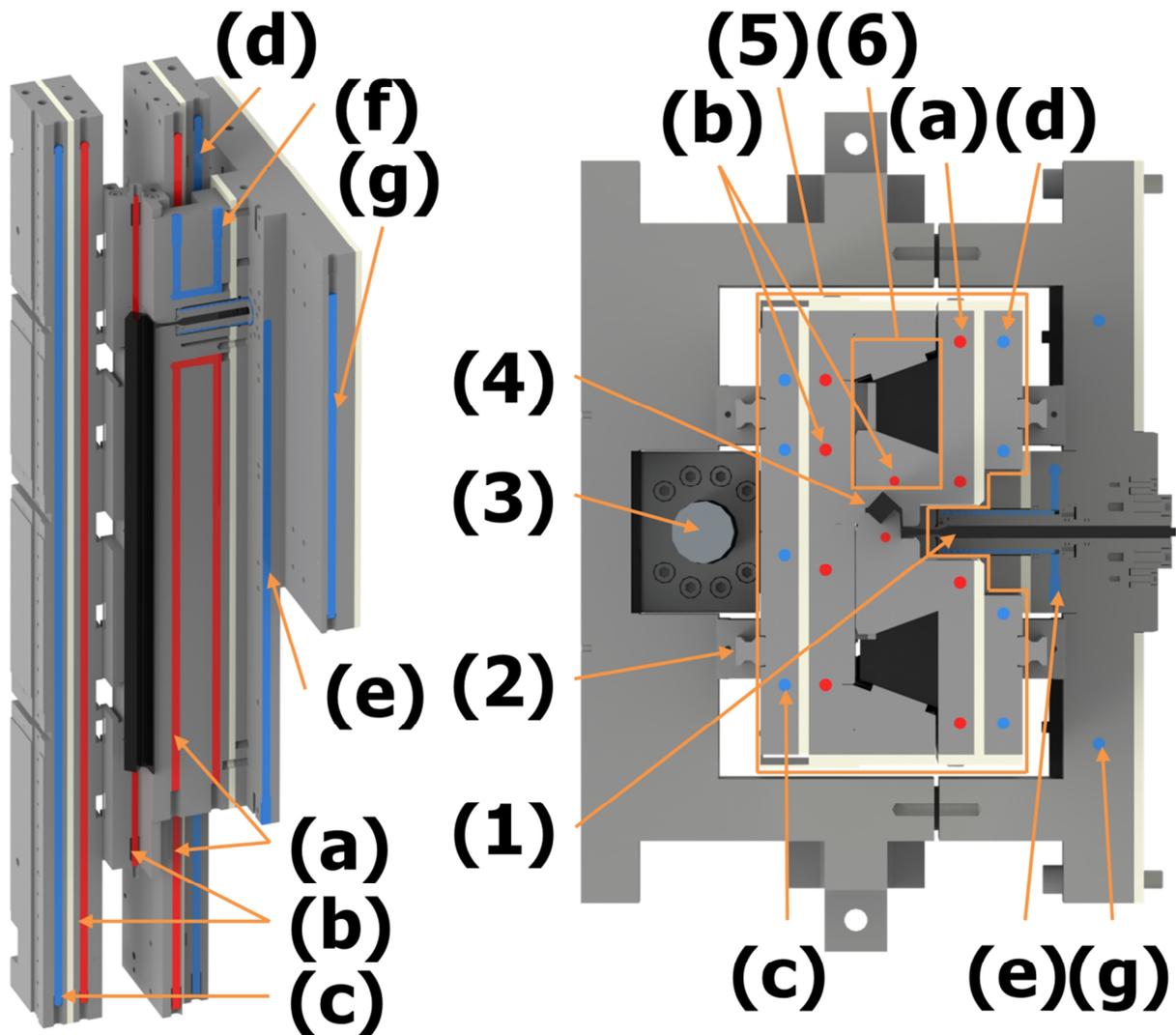


Abbildung 17: Werkzeugtemperierung mit Ölkreisläufen (Rot) und Wasserkreisläufen (Blau); Erklärung zur Beschriftung von a) bis g) in Tabelle 3.

(1) Kaltkanal, (2) Gleitführungen, (3) Spindel, (4) Kavität, (5) Verschiebeschlitten (bewegliche Teile), (6) Backen-Schließkonzept.

Tabelle 3: Temperiersetup der Spritzversuche.

Temperier-Bereich		Vorlauftemp.	Temperiergerät	Medium
a)	Kalibrierzone + Heizplatten DS	160 °C	TEMPRO plus 1-250	Öl
b)	Backen + Heizplatte AWS	160 °C	TEMPRO plus 1-250	
c)	Montageplatte AWS	60 °C	Einkreis-TEMPRO plus D160	
d)	Montageplatten DS	70 °C	Zweikreis-TEMPRO plus D160	Wasser
e)	Kaltkanaldüse	70 °C		
f)	Vorlaufzone	80 °C	TT-139	
g)	Aufspannplatte DS	70 °C	TT-139	
h)	Zylinderwand – Spritzaggregat	70 °C	TT-139	

Tabelle 4: Daten der in die Kavität eingebauten Druck- und Temperatursensoren.

Position in Kavität		unten	mitte	oben
Position am Bauteil		Anfang (A)	Mitte (M)	Ende (E)
Bezeichnung		6167AE	6190CA1,6	6190CA1,6
SN		5374420	5383819	5383820
Temperatur bis	°C	-	200	200
Druck bis	bar	200	2000	2000
Empfindlichkeit	pC/bar	-15,33	-9,275	-9,383

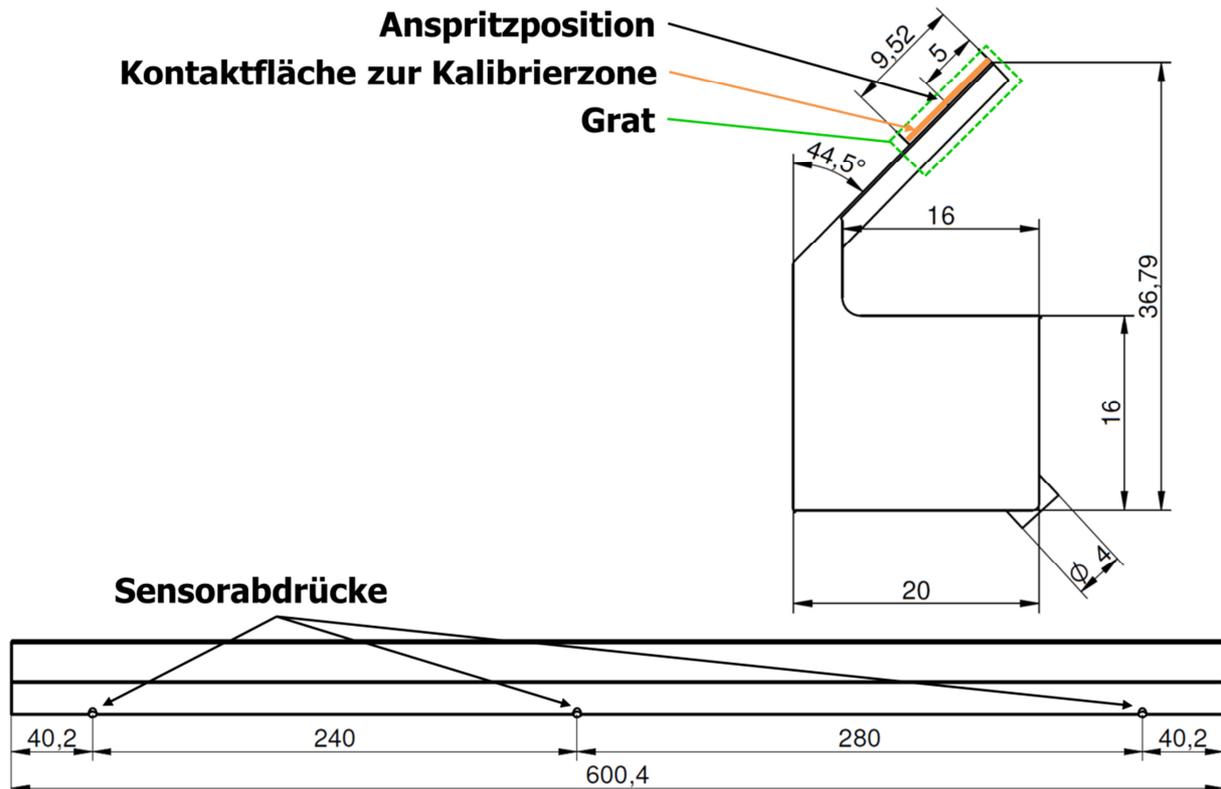


Abbildung 18: Bauteilabmessungen (in mm); Seitenansicht (unten) und Bauteilquerschnitt (oben).

3.5 Oberflächentemperaturmessung

Die Messung der Oberflächentemperatur am Werkzeug erfolgte mit dem Temperaturmessgerät testo 925 mit Oberflächenfühler (Testo SE & Co. KGaA, DE) beziehungsweise den eingebauten Druck- und Temperatursensoren im Kavitätseinsatz (grün markiert). Nach Erreichen eines stationären Zustands (mindestens 2,5 h Temperierung) wurde das Werkzeug geöffnet und die Oberflächentemperaturmessung durchgeführt. Der notierte Wert des eingebauten Temperatursensors ist jener vor der Werkzeugöffnung. Während der Werkzeugöffnung und Oberflächentemperaturmessung mit dem Taster sank der Wert des Temperatursensors um bis zu 4 K ab. Deshalb erfolgte nach der auswerferseitigen Oberflächentemperaturmessung eine 20-minütige Formschießung um das

stationäre Temperaturniveau möglichst wiederzuerlangen. Abbildung 19 zeigt die Messergebnisse samt den Messpositionen für das gewählte Setup der Spritzversuche (Tabelle 3). Auf Grund der hohen Wärmeverluste über die Temperierleitungen und der Werkzeugoberfläche war es notwendig, die Öltemperiergeräte um ca. 20 K höher als die gewünschte Werkzeugoberflächentemperatur einzustellen.

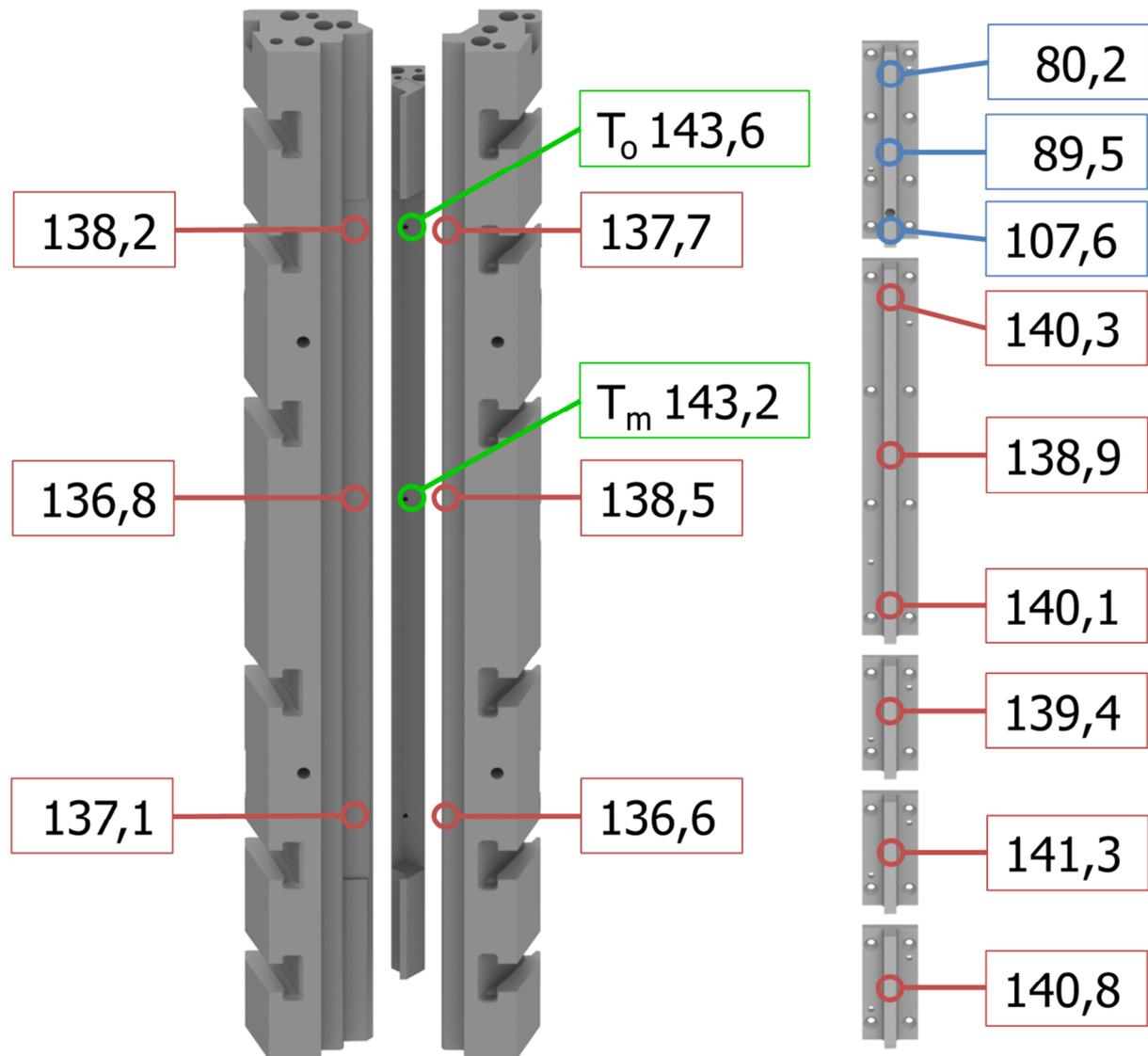


Abbildung 19: Oberflächentemperatur am Werkzeug in °C; Auswerferseite mit Backe links, Kavität (Temperatursensoren grün markiert) und Backe rechts (links); Kalibrierzonenelemente und Vorlaufzone (blau markiert) (rechts).

3.6 RubExject-Verfahrensablauf und Prozessvarianten

Abbildung 20 zeigt schematisch den RubExject-Verfahrensablauf. Zu Beginn befindet sich der geschlossene Verschiebeschlitten in seiner obersten Position. Das angepresste Spritzaggregat

beginnt die aufdosierte Kautschukmischung durch die Kaltkanaldüse in die Kavität zu fördern. Die Angussposition befindet sich dabei 15 mm oberhalb des Kavitätsanfangs (Abbildung 20-a). Bis ein definiertes Vorspritzvolumen erreicht ist, bleibt der Verschiebeschlitten in dieser Position. Nach dem Vorspritzen bewegt der Motor über die Spindel den Verschiebeschlitten um 605 mm nach unten. Dabei bleiben Verschiebeschlittengeschwindigkeit und der Einspritzvolumenstrom stets konstant. Sie sind so aufeinander abzustimmen, dass während des gesamten Einspritzvorgangs der durch das Vorspritzen erzeugte Massepolster konstant bleibt (Abbildung 20-b). Bevor die Angussposition den oberen Kavitätseinsatz erreicht, ist die Form bereits durch die vorgespitzte Masse gefüllt (Abbildung 20-c). Bei anliegendem Nachdruck (um Rückfluss in den Kaltkanal zu vermeiden) verfährt der Verschiebeschlitten weiter nach unten, bis das Kavitätsende (Abbildung 20-e) um 20 mm überschritten wird (Abbildung 20-d). Nach Ablauf der Vulkanisation öffnet das Werkzeug 10 mm und der Verschiebeschlitten fährt in eine mittlere Position. Während dieses ca. 15 s langen Vorgangs befindet sich das Bauteil teilweise noch im Kontakt zur Werkzeugwand. Erst in der mittleren Position wird das Werkzeug vollständig zur Bauteilentnahme geöffnet.

Die Konstruktion des RubExject-Werkzeugs ermöglicht es zwei verschiedene Prozessvarianten zu untersuchen. Der Unterschied liegt dabei beim letzten Kalibrierzonenelement (Abbildung 19 rechts unten). Bei der ersten Variante ist dieses Element am Werkzeug montiert (Abbildung 20-d gelb markiert). So ergibt sich auch in der Vulkanisationsposition stets eine geschlossene Kavität (= Verfahrenseinstellung „geschlossene Kavität“). Für die zweite Variante ist dieses Kalibrierzonenelement abmontiert (Abbildung 20-f). Ab einer Bauteilfüllung von ca. 80% wird somit der Gratbereich des Bauteils (Abbildung 18) nicht mehr von der Kalibrierzone bedeckt (= Verfahrenseinstellung „offene Kavität“), d.h. die Kavität ist nicht mehr abgedichtet.

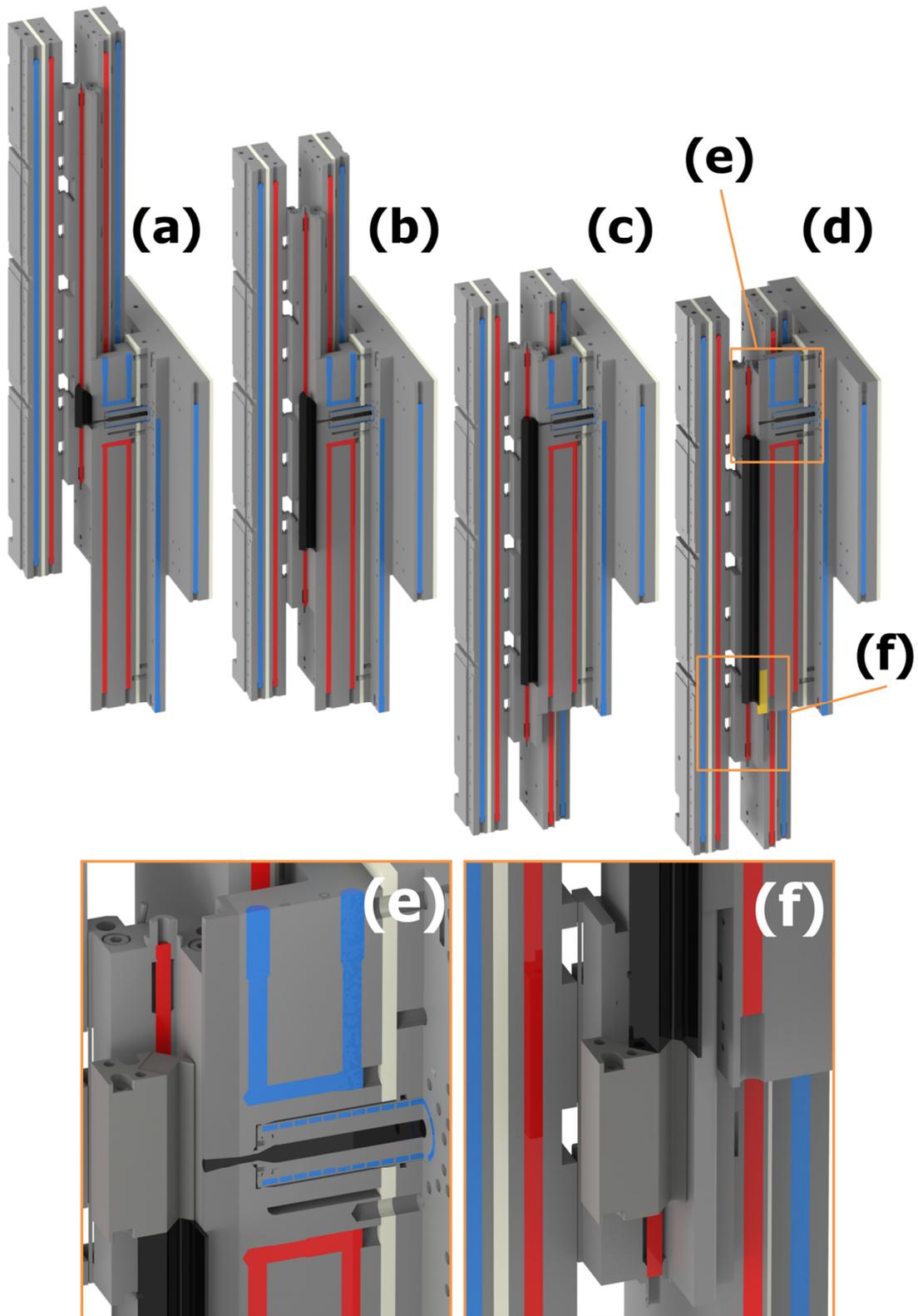


Abbildung 20: Verfahrenspositionen des RubExject-Werkzeugs (a) Vorspritzen, (b) Einspritzen bei mittlerer Bauteilfüllung, (c) vollständig eingespritzt, d) Vulkanisationsposition – letztes Kalibrierzonelement gelb markiert, (e) Detailansicht des Bauteilendes, (f) Detailansicht des Bauteilanfangs für die Verfahrensvariante „offene Kavität“.

3.7 RubExject-Versuche

3.7.1 Spritzversuche zur Ermittlung der Systemgrenzen

Um erste Erkenntnisse über die Systemgrenzen dieses Verfahrens zu erlangen, wurden zuerst unsystematische Spritzversuche durchgeführt. Ein Auszug der wichtigsten Einstellungen ist in Tabelle 5 zu finden.

Die Ermittlung des optimalen Vorspritzvolumens erfolgte im Rahmen einer Füllstudie. Dazu wurde ohne Schlittenbewegung das Einspritzvolumen variiert. Durch optische Beurteilung der vernetzten Vorspritzteile, erfolgte die Auswahl eines geeigneten Vorspritzvolumens. Mit diesem Vorspritzvolumen erfolgte anschließend die Herstellung von „Short Shots“. Hier wurde der Zyklus bei unterschiedlichen Einspritzvolumina manuell abgestoppt, um das optimale Verhältnis aus Einspritzvolumenstrom zu Schlittengeschwindigkeit zu ermitteln. Es wurden außerdem Spritzversuche zur Ermittlung des optimalen Einspritzvolumens durchgeführt. Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgten Versuche mit geschlossener und offener Kavität zur Ermittlung der Systemgrenzen beziehungsweise jenem Prozessfenster, in welchem optisch einwandfreie Bauteile produziert werden können.

Tabelle 5: Auszug aus dem unsystematischen Versuchsplan der NBR Spritzversuche.

Versuch	Einspritz- volumenstrom	Schlitten- geschwindigkeit	Bemerkung
#	cm ³ /s	mm/s	
25	2,0	-	65 cm ³ Vorspritzvolumen
24	2,0	-	55 cm ³ Vorspritzvolumen
28	2,0	-	45 cm ³ Vorspritzvolumen
27	2,0	-	35 cm ³ Vorspritzvolumen
50	2,0	5,2	nach 60 cm ³ gestoppt
49	2,0	5,2	nach 120 cm ³ gestoppt
33	2,0	5,2	nach 180 cm ³ gestoppt
36	1,2	3,1	defektfreies Bauteil
37	1,1	2,9	knapp defektfreies Bauteil
38	1,0	2,6	minimal verformter Anfang
39	0,9	2,4	minimal verformter Anfang
40	0,8	2,1	leicht verformter Anfang
41	0,5	1,3	verformter Anfang
51	2,0	5,2	KZ offen -Wulstbildung bei Grat
45	0,8	2,1	KZ offen – Grat deformiert; Oberflächendefekte (zerrieben)
60	0,2	0,5	KZ offen; Bauteil stark verformt; Pfropfen
55	0,5	1,3	KZ offen – Kavität 140 °C Öltemp.; Wulstbildung bei Grat; Oberflächendefekte
57	0,3	0,8	KZ offen – Kavität 140 °C Öltemp.; Anfang nicht vollständig gefüllt; Oberflächendefekte; Pfropfen
56	0,2	0,5	KZ offen – Kavität 140 °C Öltemp.; Anfang nicht vollständig gefüllt; Oberflächendefekte; Risse

3.7.2 Systematische Versuche innerhalb des Prozessfensters

Die Durchführung der systematischen RubExject-Versuche erfolgte nach dem in Tabelle 6 festgelegten 2²-vollfaktoriellen Versuchsplan mit repliziertem Zentralpunkt.

Tabelle 6: Versuchsplan (140 °C Werkzeugwandtemperatur).

Versuchs-		Vulkanisationszeit		Einspritzvolumenstrom	
Tag	#	kodiert	s	kodiert	cm ³ /s
1	1	0	870,5	0	5,6
	2	1	1196,0	1	10,0
2	3	0	870,5	0	5,6
	4	-1	545,0	-1	1,2
	5	-1	545,0	1	10,0
3	6	1	1196,0	-1	1,2
	7	0	870,5	0	5,6

Zu Beginn wurde das Werkzeug für 2 h temperiert. Vor jeder Versuchseinstellung wurden drei Anfahrteile produziert, um einen eingeschwungenen, homogenen Prozess sicherzustellen. Dieser war nach den drei Teilen bereits erreicht. Mehr Anfahrteile hätten zudem, aufgrund der sehr langen Zykluszeiten, nur eine Versuchseinstellung pro Tag zugelassen. Es wurden jeweils drei Gutteile für die Zentralpunkt-Einstellungen und sechs Gutteile für alle weiteren Kombinationen hergestellt. Die Zeiten der Prozessphasen sind in Tabelle 7 aufgelistet. Die Gesamtzeit beinhaltet die 15 s der Schlittenaufwärtsbewegung, wo der Schließdruck nicht mehr wirkt, das Bauteil aber noch von den heißen Werkzeugoberflächen umgeben ist. Der Vorgang der vollständigen Werkzeugöffnung und Bauteilentnahme wird nicht mehr berücksichtigt, da dies ähnlich lange wie bei der Herstellung der Referenzplatten dauerte. Der exakte Ablauf des RubExject-Zyklus ist durch Abbildung 21 übersichtlich dargestellt. Der Zyklus wurde in einem halbautomatischen Betrieb ausgeführt. Die während des Zurückfahrens geänderten Schritte sind hellgrau-punktiert markiert und jene der manuell ausgeführten Schritte grau-strichliert. Vor jedem Versuchsstart wurde stehendes Material aus dem Angusssystem ausgespritzt. So konnte verhindert werden, dass vorvernetztes Material die Bauteilqualität des nächsten Schusses mindert. Die Bauteile wurden sofort nach der Entnahme für mindestens 30 min in ein Eisbad getaucht, um wie bei den Referenzplatten den gewünschten reaktionskinetischen Zustand zu konservieren. Bis zur Prüfung blieben die Bauteile bei ca. 5 °C trocken gelagert. An allen drei aufeinanderfolgenden Versuchstagen waren die Umgebungsbedingungen nahezu ident. Jeder Versuch wurde messtechnisch erfasst und aufgezeichnet. Weitere wichtige Maschineneinstellungen sind im Anhang in Tabelle 11 zu finden. Als Zielgrößen des Versuchsplans wurden DVR, Bruchspannung und -dehnung ausgewählt. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgte mithilfe einer Regressionsanalyse (schrittweise Rückwärtselimination mit Alpha für Ausschluss $\alpha = 0,1$) in der Statistik-Software Minitab (Minitab LLC, US). Bei der schrittweisen Rückwärtselimination werden solange Terme entfernt, bis im Modell keine Variablen mehr enthalten sind, die einen p-Wert größer dem Alpha für Ausschluss aufweisen. Zusätzlich wurde die Entformungsschwindung und Verarbeitungsschwindung (nach 72 h) ermittelt.

Tabelle 7: Zeiten der Bewegungsabläufe für die verschiedenen Einstellungen des Versuchsplans.

Vulkanisationszeit		Einspritzvolumenstrom		Geschwindigkeit Verschiebeschlitten	Versuch	Vorspritzen	Schlittenbewegung	Zeit bis vollständig Eingespritzt	Einspritzzeit gesamt	Schlittenstopp - Einspritzen	Schlittenposition bei Einspritzstopp	Gesamt (inklusive. 15 s Schlittenaufwärtsbewegung)
-	s	-	cm ³ /s	mm/s	#	s	s	s	s	s	mm	s
0	870,5	0	5,6	14,6	1,3,7	6,3	41,4	42,9	47,7	4,8	534,5	933,2
-1	545	1	10	26,0	5	3,5	23,3	24,0	26,8	2,8	533,0	586,8
1	1196	-1	1,2	3,1	6	29,2	195,2	200,0	224,3	24,3	529,6	1435,3
1	1196	1	10	26,0	2	3,5	23,3	24,0	26,8	2,8	533,0	1237,8
-1	545	-1	1,2	3,1	4	29,2	195,2	200,0	224,3	24,3	529,6	784,3

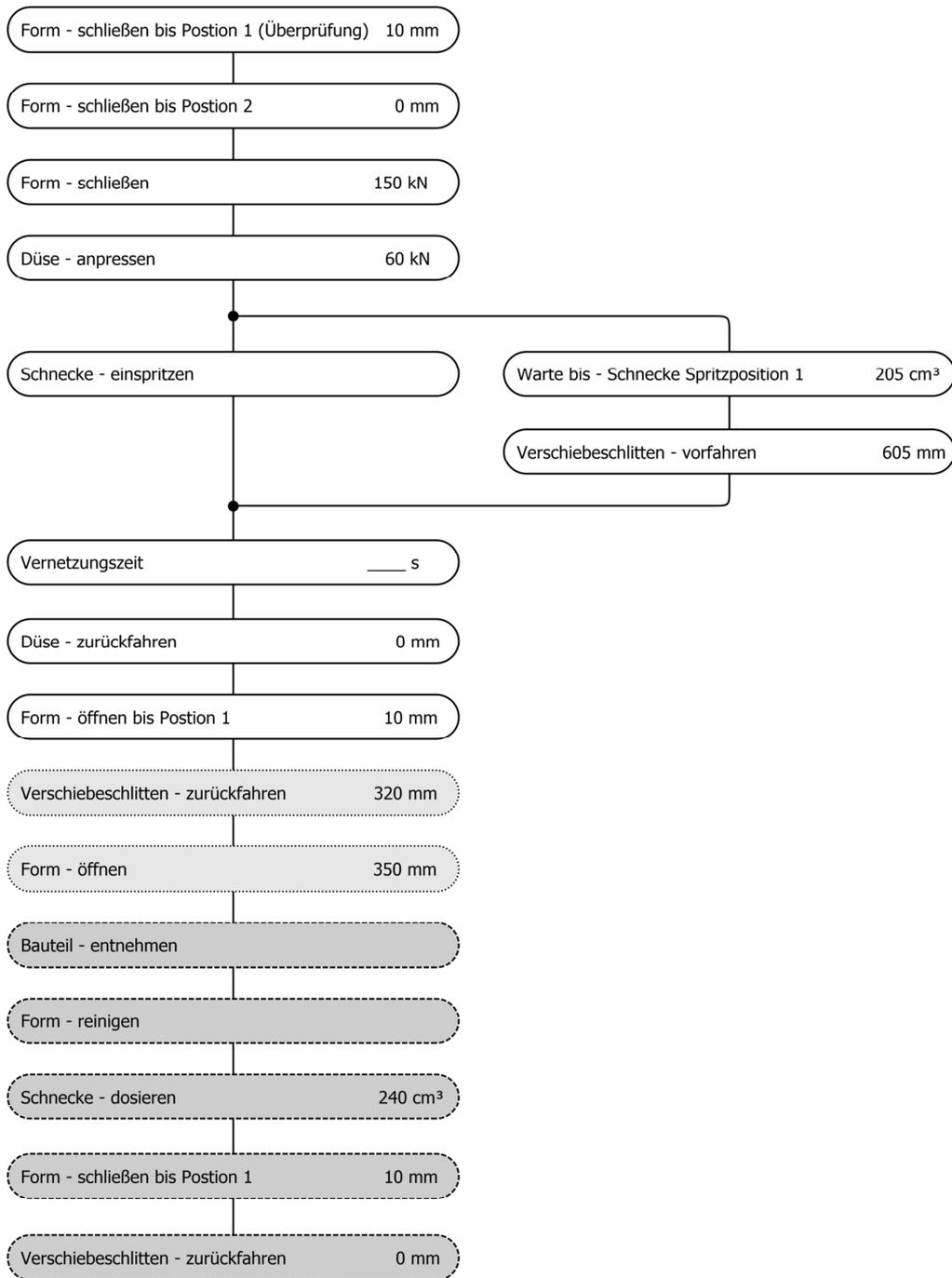


Abbildung 21: Ablauf des RubExject-Zyklus; während des Zurückfahrens geänderte Werte – hellgrau-punktiert, manuell ausgeführte Schritte – grau-strichliert.

3.8 Weiterführende Experimente

3.8.1 Ausspritzversuche

Ausspritzversuche dienen zur Ermittlung des Druckverlusts im Kaltkanal samt Maschinendüse. Das Versuchsetup wurde ident zu den systematischen Versuchen (siehe Kap. 3.7.2) gewählt. Das Ausspritzen erfolgte manuell bei offenem Werkzeug (Abbildung 22-a). Jede Einstellung wurde mindestens viermal wiederholt.

3.8.2 Dosiertemperaturmessungen

Dosiertemperaturmessungen dienen zur Ermittlung der tatsächlichen Temperatur der aufdosierten Masse. Dafür kam eine auf die Aufspannplatte der Auswerferseite montierte Apparatur zum Einsatz. Auf dieser war ein Stahlrohr mit einem Messkopf aus PEEK montiert. An dessen Spitze befand sich ein Typ K Thermoelement (zur Verfügung gestellt von DI Thomas Hutterer [26]). Um konstante Versuchsbedingungen sicherzustellen, wurde das Spritzaggregat zwei Stunden temperiert und anschließend der Ablauf mehrerer Zyklen (ausspritzen; temperieren; dosieren) nachgestellt. Die Messung erfolgte 200 mm tief im Zylinder (ca. 35 mm vor der Schneckenspitze). Zwischen den Messungen wurde neu aufdosiert und 10 min temperiert. Abbildung 22-c zeigt den Messaufbau.

3.8.3 Massetemperaturmessungen

Durch diese Messung wurde die tatsächliche Temperatur ermittelt, mit der die Formmasse bei jeder Versuchseinstellung in die Kavität eintritt. Hier wurde ebenfalls das Versuchssetup der systematischen Versuche (siehe Kap. 3.7.2) beibehalten. Für die Temperaturermittlung kam eine Wärmebildkamera Seek RevealPro (Seek Thermal Inc., US) mit einer Makrolinse zum Einsatz. Bei offenem Werkzeug und demontierten Vorlaufzonenelement (Abbildung 22-b) wurde dazu der Zyklus bei 120 cm³ und 230 cm³ Ausspritzvolumen gestoppt, der Ausspritzstrang abgestochen und sofort ein Bild aufgenommen. Dieses Bild ordnet der Materialoberfläche je nach Temperatur unterschiedliche Grauwerte zu. Jede Versuchseinstellung wurde viermal wiederholt. Durch eine Auswerteroutine (zur Verfügung gestellt von DI Thomas Hutterer [26]) in MATLAB (MathWorks Inc., US) war es möglich von den Grauwerten auf die mittlere Massetemperatur zu schließen.

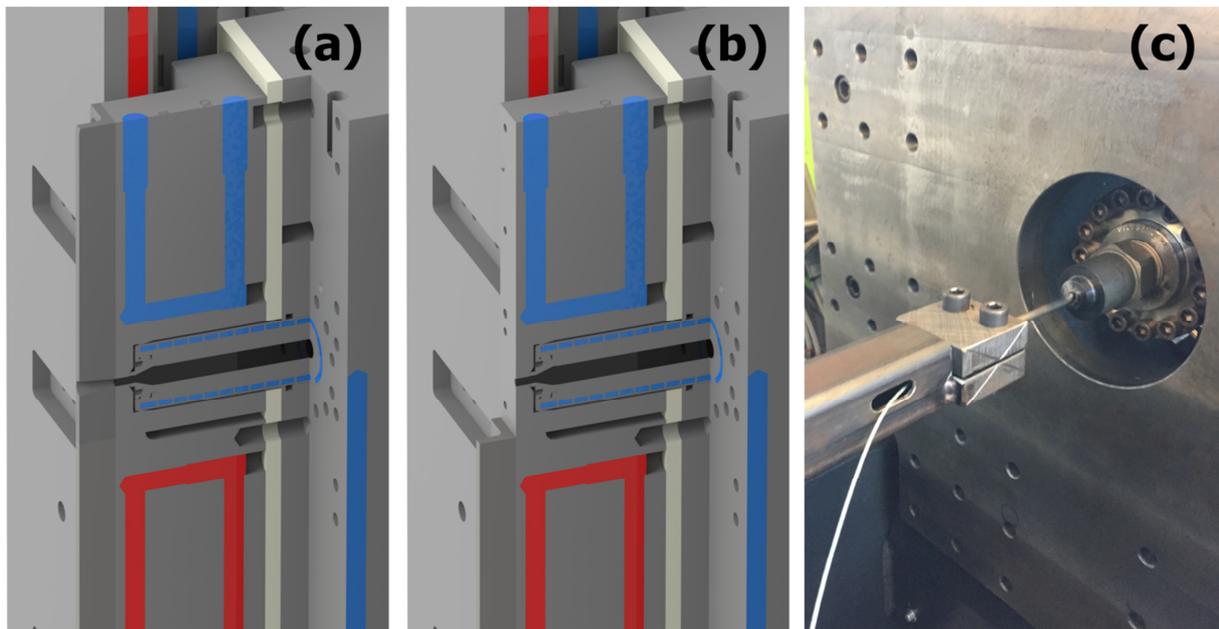


Abbildung 22: Setup der (a) Ausspritzversuche und (b) Massetemperaturmessung; (c) eingestochener Lanzenfühler zur Dosiertemperaturmessung.

3.9 Referenzplatten- und Bauteilprüfung

Die Systemgrenzen des RubExject-Verfahrens und somit das zur Verfügung stehende Prozessfenster wurden durch eine optische Begutachtung der Bauteile ermittelt. Innerhalb des RubExject-Prozessfensters wurden systematische Versuche (Tabelle 6) durchgeführt und mit den aus den Bauteilen extrahierten Prüfkörpern anschließend DVR- und Zugprüfungen durchgeführt. Zum Vergleich erfolgten die Prüfungen auch an den Referenzplatten.

Abbildung 23 zeigt die Entnahmepositionen der DVR- und Zugprüfkörper aus den Referenzplatten und Abbildung 24 aus den RubExject-Bauteilen. Aus der Referenzplatte wurden die DVR- und Zugprüfkörper direkt ausgestanzt. Bei der Extraktion des DVR Prüfkörpers aus dem RubExject-Bauteil wurde zuvor der dickwandige Bereich des Bauteils mit einer Schneidevorrichtung auf eine Solldicke von 6,3 mm zugeschnitten. Für die Herstellung der Zugprüfkörper aus den RubExject-Bauteilen wurde zuvor ein Rechteck aus dem dünnwandigen Bauteilbereich herausgeschnitten. Das Stanzwerkzeug für die DVR-Proben besitzt einen Durchmesser von 13 mm und jenes der Zugproben entspricht der Geometrie für den Schulterstab Typ S2 (DIN 53504).

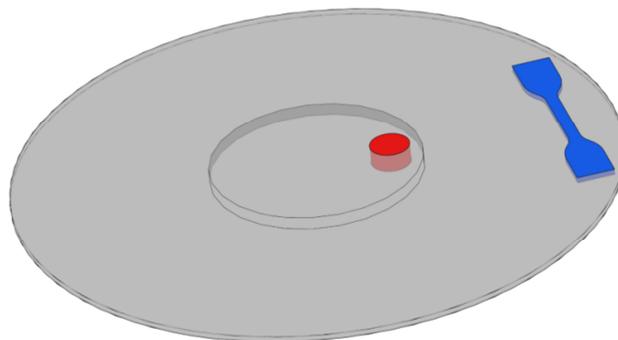


Abbildung 23: Entnahmepositionen der DVR- und Zugprüfkörper aus der Referenzplatte.

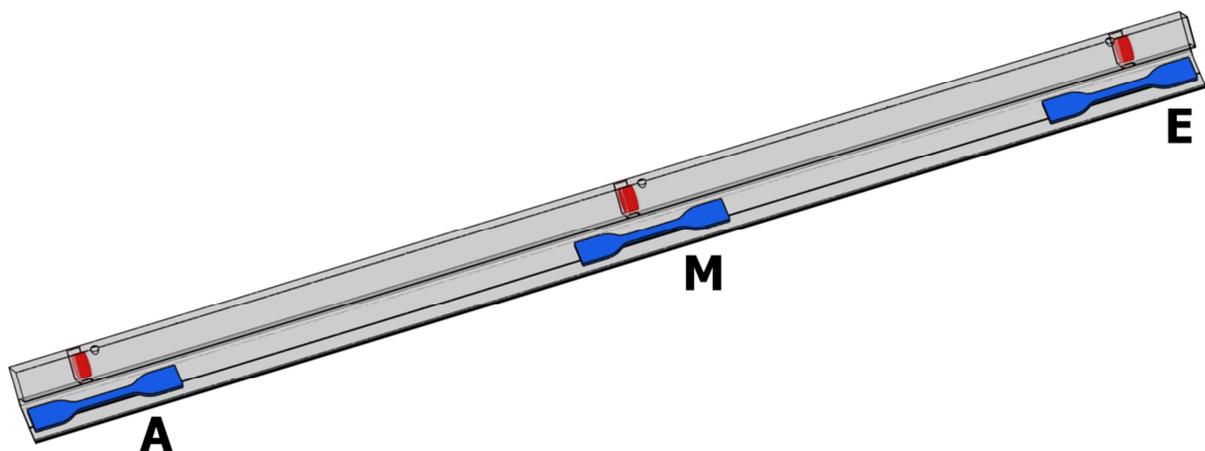


Abbildung 24: Entnahmepositionen der DVR- und Zugprüfkörper aus dem RubExject-Bauteil;
A = Bauteilanfang, M = Bauteilmitte, E = Bauteilende.

3.9.1 DVR

Die Bestimmung des DVR erfolgte in Anlehnung an DIN ISO 815-1 Methode A [16]. Mit einer Messuhr wurde die Dicke an der Probenmitte auf 0,01 mm genau gemessen. Durch eine kreisrunde Spannvorrichtung mit vier Ebenen war es möglich mehrere Proben (ohne Gleitmittel) gleichzeitig zu verspannen. Die Distanzscheiben waren so angepasst, dass die aufgebrachte Verformung ca. 15 % der gemessenen Anfangsprobendicken entspricht. In einem Wärmeschrank lagerten die verspannten Proben bei 100 °C für 24 h. Anschließend wurden sie im entspannten Zustand für 2 h auf Raumtemperatur abgekühlt und erneut vermessen. Pro Entnahmeposition wurden mindestens drei Bauteile je Verfahrenseinstellung geprüft.

3.9.2 Zugprüfung

Die Durchführung der Zugversuche erfolgte in Anlehnung an DIN 53504 [12]. Dabei kam eine Z020 Zugprüfmaschine (ZwickRoell GmbH & Co. KG, DE) mit einer 20 kN Kraftmessdose und optischem Extensiometer zum Einsatz. Die Stegbreite war durch eine Stanzvorrichtung (S2 Prüfkörper) vorgegeben. Mit einem Messschieber erfolgte die Dickenmessung des Stegs auf 0,01 mm genau. Die Vorkraft für die Vorspannung der Stäbe betrug 1 N und die anschließende Prüfgeschwindigkeit 200 mm/min. Über die testXpert II Prüfsoftware (ZwickRoell GmbH & Co. KG, DE) erfolgte nach DIN 53504 die Auswertung. Pro Entnahmeposition wurden mindestens drei Bauteile je Verfahrenseinstellung geprüft.

3.9.3 Bauteilvermessung

Um die Schwindung am Bauteil beurteilen zu können, erfolgte eine Vermessung der wichtigsten Positionen. Abbildung 25 zeigt die exakten Messpositionen am Bauteil. Mit einem Messschieber wurden die Bereiche a, d, f, g und h vermessen, die restlichen mit einem Rollmaßband. Die Messung erfolgte an sieben Bauteilen unmittelbar nach der Entformung (Entformungsschwindung) und nach ca. 72 h bei ca. 25 °C Umgebungstemperatur ausgelagert.

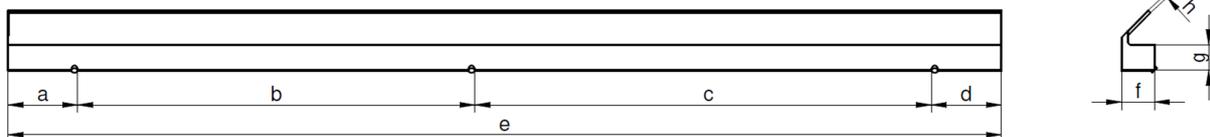


Abbildung 25: Messbereiche der Bauteilvermessung.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Vulkanisationskurven

Aus den gemessenen Rohdaten des RPA und Gleichung (1) wurden Vulkanisationskurven erstellt (Abbildung 26). Hier ist der Vernetzungsgrad in Abhängigkeit der Reaktionszeit ($t_x - t_a$) dargestellt. Eine andere Darstellungsform, in welcher der Vernetzungsgrad in Abhängigkeit der Umsatzzeit (t_x) aufgetragen ist, beinhaltet auch noch die Zeit bis zum Erreichen der Minimalkraft (t_a). In dieser Zeit sinkt das Drehmoment bis zur Minimalkraft ab, da die Viskosität der Probe durch den Aufheizvorgang sinkt [1]. Da bei den RubExject-Versuchen bereits eine vorgewärmte Masse in die Kavität eingespritzt wird, repräsentiert die Darstellung in Abhängigkeit der Reaktionszeit das Vulkanisationsverhalten besser.

Bei höheren Temperaturen zeigen die Vulkanisationskurven einen sehr steilen Anstieg während der Vernetzungsperiode. Die Scorchzeit verringert sich dabei so sehr, dass eine vollständige Füllung der Kavität ohne vorzeitige (An-)Vulkanisation nur durch sehr hohe Volumenströme garantiert werden kann. Das mögliche Prozessfenster ist somit bei diesen Kurven sehr klein. Je kleiner das Prozessfenster, desto schwieriger ist es auch einen stabilen Prozessbereich zu finden. Ab 160 °C sind bereits erste Reversionseffekte ersichtlich. Niedrigere Temperaturen besitzen ein breites Verarbeitungsfenster. Eine Reduktion der Temperatur um 10 K verdoppelt jedoch die Vernetzungszeit (Faustformel in der Elastomerbranche [39]). Bei 130 °C beträgt die Zeit zur hundertprozentigen Vernetzung ca. 6000 Sekunden. Bei 140 °C dauert es ca. 3000 Sekunden um eine hundertprozentige Vernetzung zu erreichen und ca. 1200 Sekunden für den optimalen Vernetzungsgrad von 95 %. Die Vulkanisationskurve mit 140 °C besitzt den besten Kompromiss zwischen breiten Prozessfenster und Vernetzungsdauer und eignet sich somit optimal für die Werkzeugtemperatur der RubExject-Versuche.

Abbildung 26 macht außerdem deutlich, dass im Bereich des steilen Anstiegs der Vernetzungsperiode wenige Sekunden Unterschied in der Vulkanisationszeit einen großen Einfluss auf den Vernetzungsgrad haben. Am Ende der Vernetzungsperiode flacht die Vulkanisationskurve ab. Hier wirken sich Unterschiede in der Vulkanisationszeit nur mehr geringfügig auf den Vernetzungsgrad aus.

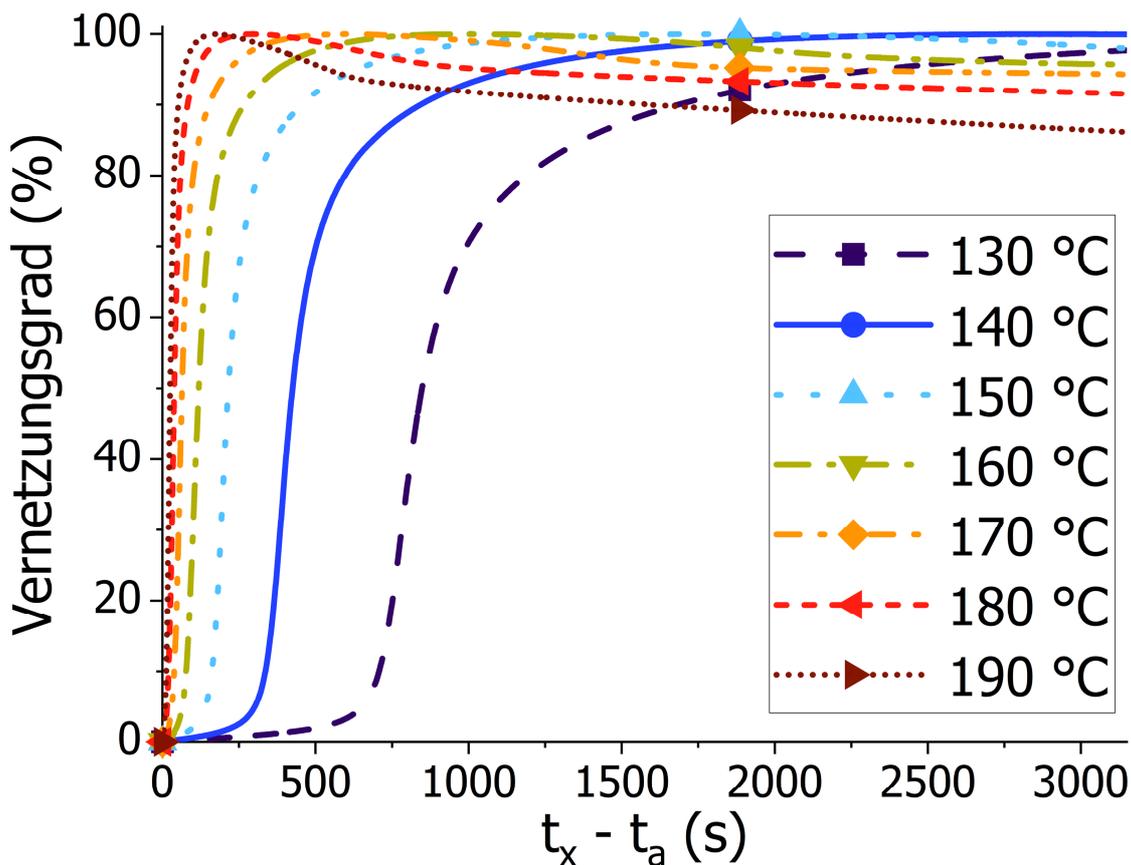


Abbildung 26: Vulkanisationskurven bei verschiedenen Temperaturen.

4.2 Ergebnisse der Referenzplatten

Die Ergebnisse der Referenzplattenprüfung sind in Abbildung 27 für den DVR und Abbildung 28 für die Bruchspannung und -dehnung über dem Vernetzungsgrad dargestellt (tabellarisch in Tabelle 12 und Tabelle 13 im Anhang). In Abbildung 27 ist eine Abnahme des DVR mit steigendem Vernetzungsgrad (steigender Vulkanisationszeit) ersichtlich. Die Ergebnisse wurden durch einen Kurvenfit (Gleichung in Abbildung 27) interpoliert. Dieser verdeutlicht den Trend des sinkenden DVR mit steigendem Vernetzungsgrad. Eine steigende Vernetzungsdichte leistet nach der Probenentlastung einen größeren Beitrag zur elastischen Rückverformung, wodurch sich geringere DVR-Werte ergeben.

Die niedrige Standardabweichung der Ergebnisse ist mit jenen aus der Literatur vergleichbar [21] und kann hauptsächlich auf die sorgfältige Plattenherstellung zurückgeführt werden. Ausnahme ist der Wert bei 25 % Vernetzungsgrad. Hier befindet sich die Vernetzungsreaktion gerade im Bereich des steilen Anstiegs. Minimale Unterschiede in den Prozesszeiten (Bauteilentnahme) wirken sich hier stark auf Vernetzungsgrad und somit DVR aus.

Die Bruchspannungen befinden sich alle im Bereich zwischen 14 N/mm² und 20 N/mm². Der Mittelwert variiert für verschiedene Vernetzungsgrade nicht weit um 17,7 N/mm². Zwischen 175 % und 310 % liegen die Werte der Bruchdehnungen. Die Messkurven der Bruchspannung und -dehnung zeigen im Gegensatz zum DVR allerdings keinen eindeutigen Trend in Abhängigkeit des Vernetzungsgrades.

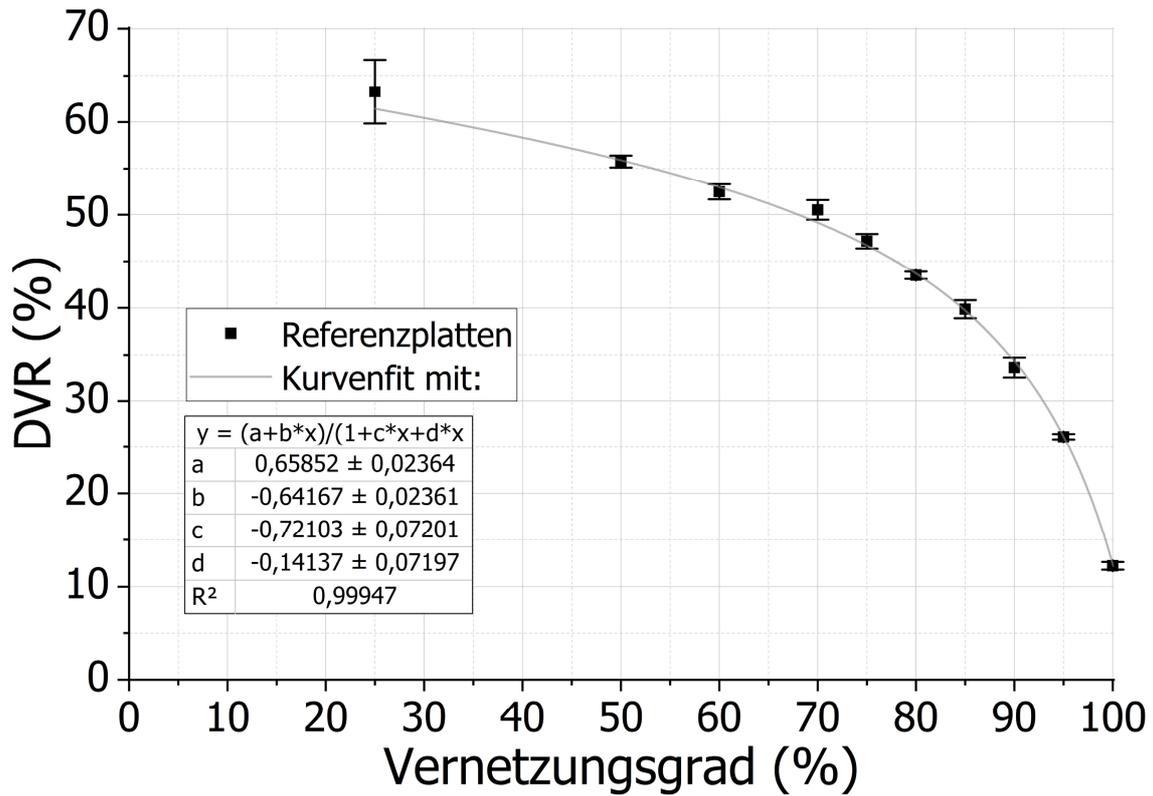


Abbildung 27: DVR-Werte der Referenzplatten und dazu passender Kurvenfit.

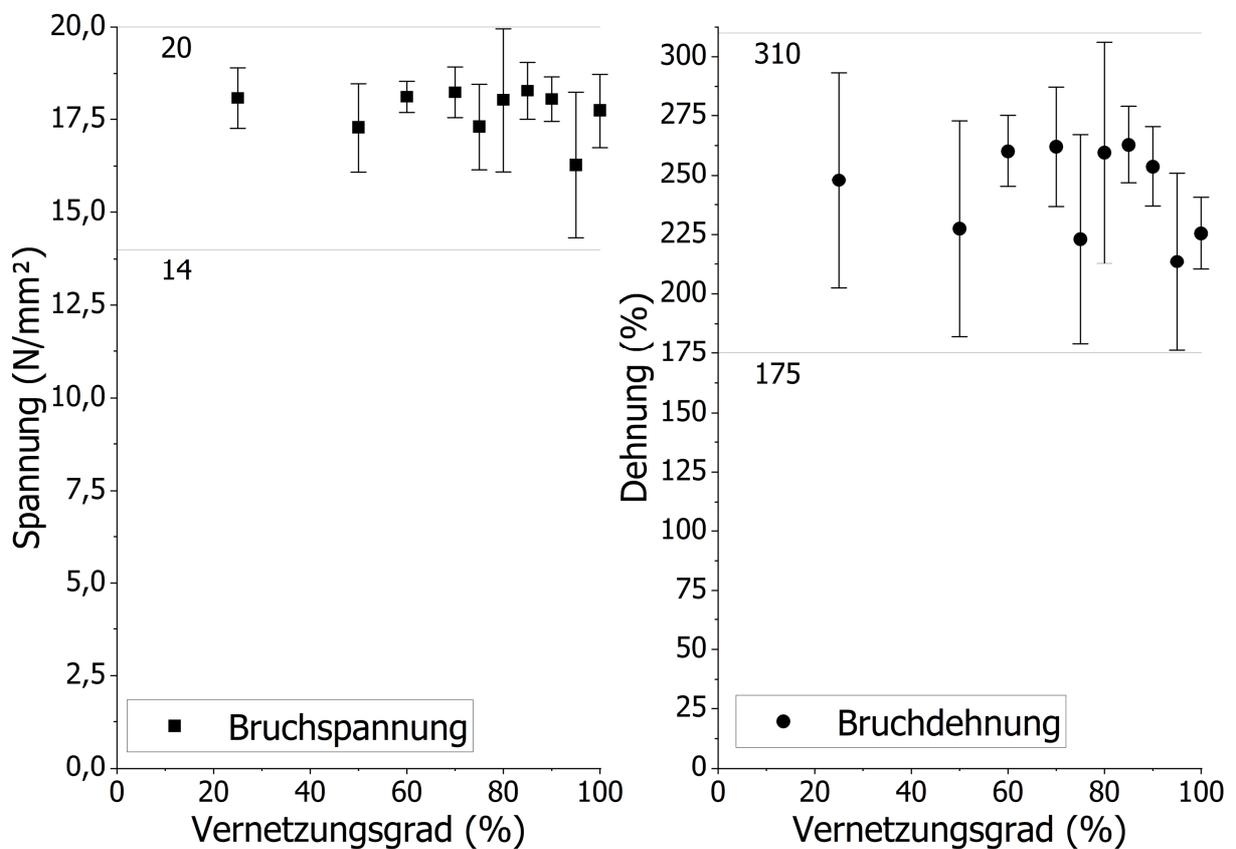


Abbildung 28: Bruchspannung und Bruchdehnung der Zugproben aus den Referenzplatten.

4.3 Füllstudie

Im Zuge einer Füllstudie erfolgte die Ermittlung des optimalen Vorspritzvolumens. Abbildung 29 zeigt eine Auswahl dieser Versuchsreihe. Mit steigendem Vorspritzvolumen ist eine Zunahme des Abstands von Anschnitt bis zur Fließfront (Fließfrontabstand) zu erkennen. Tabelle 8 verdeutlicht dies anhand der gemessenen Fließfrontabstände.

An den markierten Bereichen (Abbildung 29-a) ist ersichtlich, dass der Beginn der Füllung nicht durch eine reine Quellströmung erfolgt. Eine Freistrahlbildung ist auf den ersten Blick ebenfalls nicht zu erkennen. Es ist anzunehmen, dass die Füllung durch eine Mischung aus Quellströmung und Freistrahlbildung erfolgt. Die Kautschukmasse fließt in Form einer Quellströmung im dünnwandigen Bereich der Kavität. Beim Übergang in den dickwandigen Bereich bildet sich eine Mischung aus Quellströmung und einem breiten Freistrah, welche sich im dickwandigen Bereich zu der in Abbildung 29-a erkennbaren Form zusammenfaltet (= Falten). Mit steigendem Vorspritzvolumen ähnelt die Fließfront immer mehr einer Quellströmung. Während bei niedrigen Vorspritzvolumina die Fließfront im dünn- und dickwandigen Bereich noch gleich ist, beginnt sie mit steigendem Vorspritzvolumen im dickwandigen Bereich (mit geringerem Fließwiderstand) vorzueilen.

In Abbildung 29-b sind an der Bauteiloberfläche viele kleine Dellen (= Dellenstruktur) ersichtlich, welche mit steigendem Vorspritzvolumen leicht abnehmen. Diese Dellenstruktur ist jedoch auch bei hohen Vorspritzvolumen immer noch vorhanden.

Aufgrund der einheitlichen Fließfront wurde für die weitere Füllstudie ein Vorspritzvolumen von 35 cm^3 (wie Bauteil #27) gewählt.

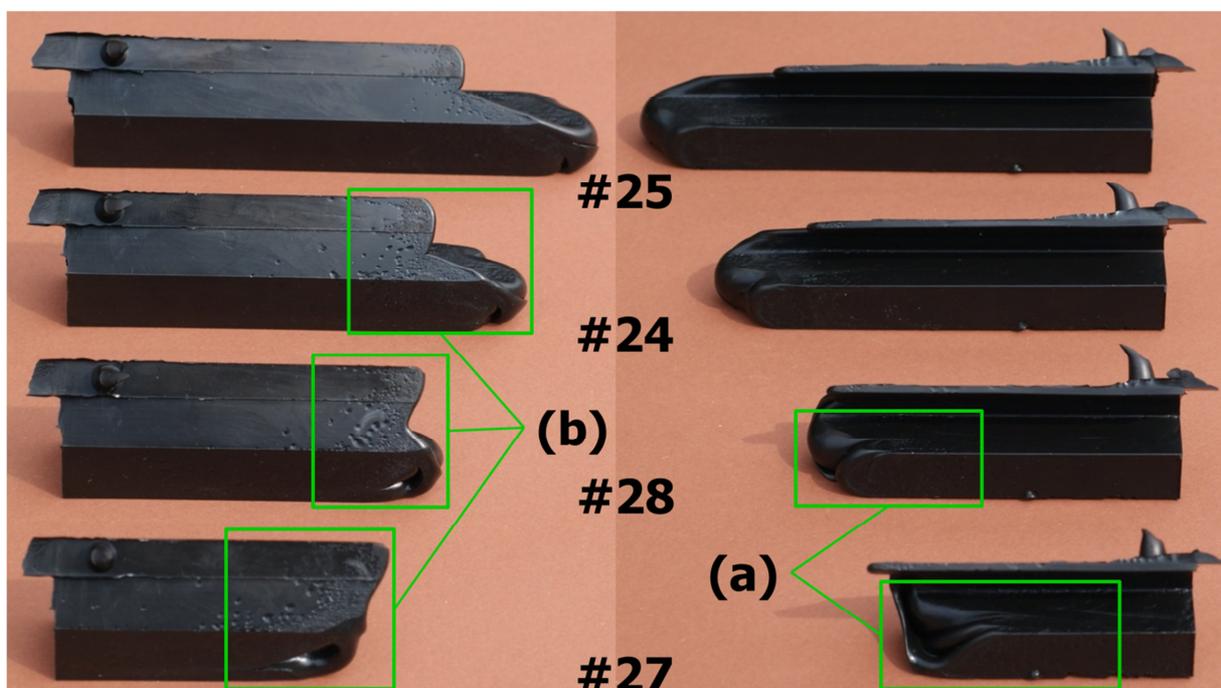


Abbildung 29: Füllstudie; Vorderseite (links), Rückseite (rechts); (a) Falten, (b) Dellenstruktur; Versuchseinstellungen in Tabelle 5.

Tabelle 8: Fließfrontabstände bei unterschiedlichem Vorspritzvolumen.

Versuch	Vorspritzvolumen	Fließfrontabstand
#	cm ³	mm
25	65	139
24	55	114
28	45	87
27	35	70

In einer zweiten Füllstudie wurden Short Shots durchgeführt, um das optimale Verhältnis zwischen Einspritzvolumenstrom und Verschiebeschlittengeschwindigkeit zu ermitteln. Abbildung 30 zeigt eine Auswahl an Short Shots, die mit einem Verhältnis von $1 \text{ cm}^3/\text{s} : 2,6 \text{ mm/s}$ (Einspritzvolumenstrom zu Verschiebeschlittengeschwindigkeit) hergestellt wurden. Es ist zu sehen, dass der Fließfrontabstand (durch vertikale Linien markiert) bei allen Bauteilen nahezu ident ist. Tabelle 9 verdeutlicht dies anhand der gemessenen Fließfrontabstände. Bei einem größeren Verhältnis nimmt der Fließfrontabstand mit steigendem Einspritzvolumen zu. Umgekehrt nimmt der Fließfrontabstand bei höheren Verschiebeschlittengeschwindigkeiten (kleineres Verhältnis) ab. Für einen gleichbleibenden Fließfrontabstand während der Verschiebeschlittenbewegung stellte das in Abbildung 30 gezeigte Verhältnis von $1 \text{ cm}^3/\text{s} : 2,6 \text{ mm/s}$ die optimale Einstellung dar.

In Abbildung 30-a ist der Bauteilanfang markiert. Mit Zunahme des eingespritzten Volumens reduziert sich das Material in diesem Bereich. Bei Bauteil #33 fehlt bereits so viel Material, dass der Grat (Abbildung 18) nicht mehr vollständig ausgefüllt ist. Alle Bauteile zeigen über die gesamte Bauteillänge eine ähnliche Dellenstruktur wie die Vorspritzteile aus Abbildung 29. Speziell sind diese aber im Bereich des vorgespitzten Volumens vorzufinden.

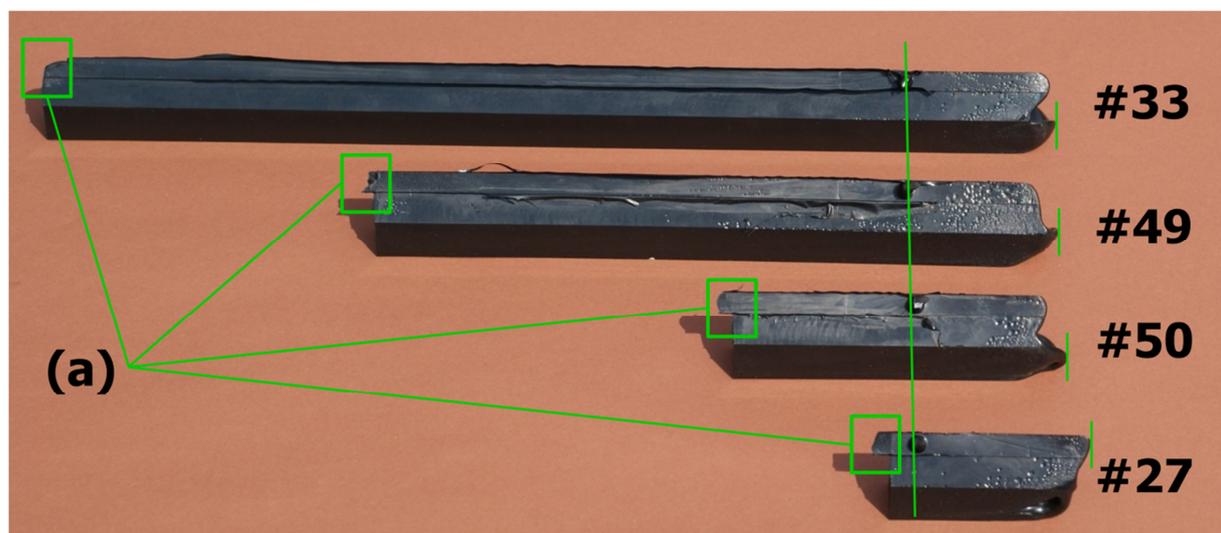


Abbildung 30: Short Shots mit 35 cm^3 Vorspritzvolumen; (a) Anfangsbereich; Versuchseinstellungen in Tabelle 5.

Tabelle 9: Fließfrontabstände der Short Shots mit 35 cm³ Vorspritzvolumen.

Versuch	Einspritzvolumen	Fließfrontabstand
#	cm ³	mm
33	180	69
49	120	68
50	60	65
27	35	70

4.4 Erstes Gutteil des RubExject-Verfahrens

Mit 35 cm³ Vorspritzvolumen, 1,1 cm³/s Einspritzvolumenstrom, 2,9 mm/s Verschiebeschlingengeschwindigkeit und 240 cm³ Einspritzvolumen konnte das erste Gutteil mit dem RubExject-Verfahren hergestellt werden. Dieses Bauteil ist in Abbildung 31 abgebildet. Es sind keine der zuvor beschriebenen Defekte erkennbar.



Abbildung 31: Perfektes Bauteil (#37).

Im Zuge der Herstellung dieses Bauteils wurden Defekte wie Dellenstruktur und nicht vollständig ausgefüllte Bauteilbereiche für Einspritzvolumina ≤ 230 cm³ (Bauteilvolumen = 230 cm³) festgestellt. Deshalb wurde das Einspritzvolumen schrittweise erhöht. Ab einem Einspritzvolumen von 240 cm³ (#37) waren keine Defekte mehr sichtbar.

Abbildung 32 zeigt den Forminnendruckverlauf des Bauteils #37. Der Prozess beginnt mit dem Vorspritzen, wo bei stehendem Schlitten zunächst ein gewisses Volumen eingespritzt wird (Bereich-a). Dabei baut sich ein Vorspritzvolumen wie in Abbildung 29 #27 auf. Für diese Formmasse am Bauteilanfang startet mit Beginn der Einspritzzeit zugleich die Reaktionszeit. Ist das Vorspritzvolumen eingespritzt, beginnt sich der Verschiebeschlitten nach unten zu bewegen. Kurz danach erreicht die Fließfront den unteren Sensor, welcher einen Druckanstieg verzeichnet. Während der konstanten Bewegung des Verschiebeschlittens (Bereich-b und Bereich-c) erreicht die Fließfront zunächst den mittleren und anschließend oberen Drucksensor. Gegen Ende des Bereichs-b (Ende des Einspritzens) verzeichnen alle Sensoren einen deutlichen Druckanstieg. Hier ist die Kavität bereits vollständig gefüllt und es kommt zum leichten Überspritzen (Kompressionshub). Die Versuche mit geringerem Einspritzvolumen als 240 cm³, welche allesamt Defekte aufwiesen,

hatten keinen beziehungsweise nur einen geringen Druckanstieg in ihren Forminnendruckkurven. Somit wurde festgestellt, dass dieser abschließende Kompressionshub maßgeblich für eine komplette Ausfüllung der Kavität samt Produktion von Gutteilen ist. Im Bereich-c fährt der Verschiebeschlitten in die unterste Position. Hier verlässt auch das Bauteilende die Vorlaufzone und wird anschließend vollständig von der Kalibrierzone bedeckt. Mit dem Erreichen der untersten Position endet die Einspritzzeit (t_e) und die Vulkanisationszeit (Bereich-d) beginnt. Der Verschiebeschlitten verweilt in der untersten Position bis die Vulkanisationszeit abgelaufen ist.

Trotz des notwendigen Überspritzens um genügend Forminnendruck für eine vollständige Kavitätsfüllung zu erreichen, konnte die Schwimmhaut am Grat sehr gering gehalten werden. Durch iteratives Abschleifen der Kalibrierzonenelemente beziehungsweise der Vorlaufzone konnte ein Spaltmaß von ca. 2/100 mm im Bereich der Relativbewegung erreicht werden. Gänzlich vermeiden lässt sich die Schwimmhaut nicht, da der Spalt für die Relativbewegung notwendig ist. Eine Steigerung des Einspritzvolumens über 240 cm³ brachte keine optisch erkennbare Verbesserung der Bauteilqualität, sondern führte nur zur Ausbildung größerer Schwimmhäute. Für alle weiteren Versuche wurde somit das ideale Einspritzvolumen von 240 cm³ beibehalten.

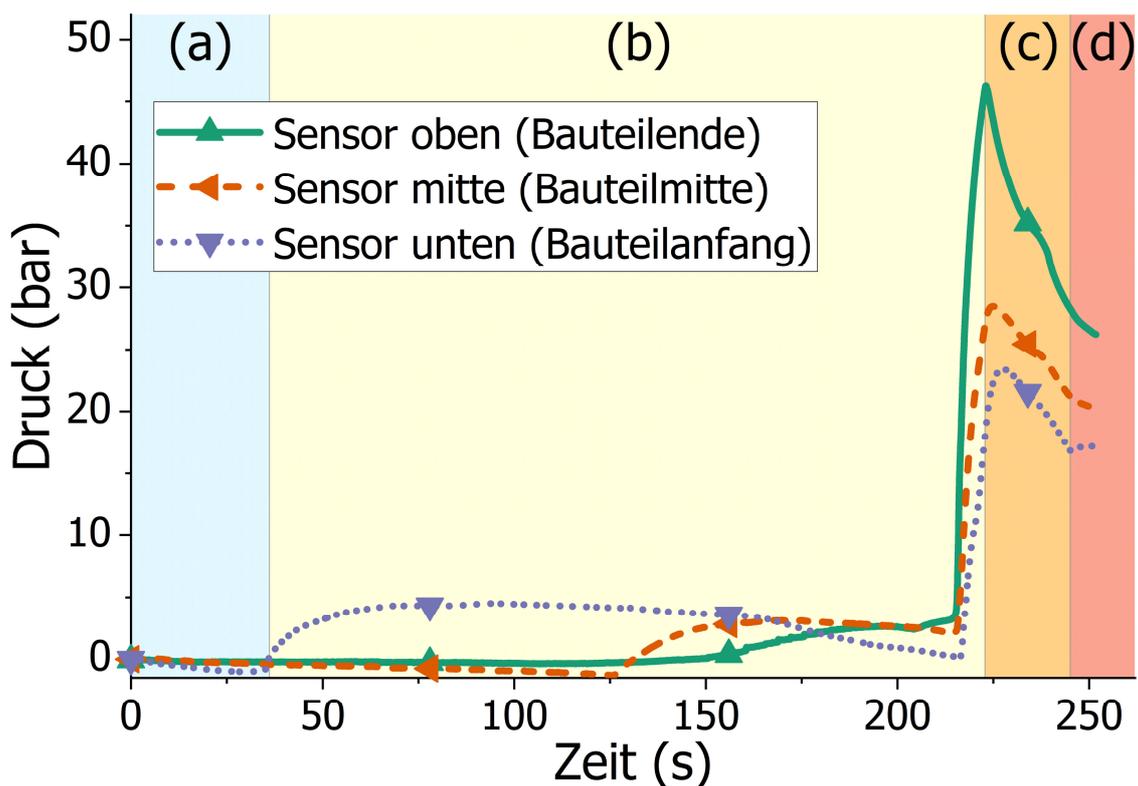


Abbildung 32: Forminnendruckverlauf eines Gutteils (#37); (a) Vorspritzen, (b) Einspritzen, (c) restliche Schlittenbewegung, (d) Beginn Vulkanisationszeit.

Nach der Erkenntnis, dass ein Kompressionshub notwendig ist, um Gutteile herzustellen, konnte auch für das Vorspritzvolumen bestätigt werden, dass größere Vorspritzvolumina auf die Bauteilqualität von Gutteilen keinen Einfluss haben. Demzufolge wurde das Vorspritzvolumen von 35 cm³ für alle weiteren Versuche beibehalten.

4.5 Ermittlung des möglichen Prozessfensters

Zuerst wurde bei geschlossener Kavität der Einspritzvolumenstrom (ausgehend vom ersten Gutteil) schrittweise verringert. Abbildung 33 zeigt einen Vergleich von Bauteilen mit abnehmendem Einspritzvolumenstrom. Ab Einspritzvolumenströmen $\leq 1,0 \text{ cm}^3/\text{s}$ sind Defekte sichtbar. Die markantesten befinden sich am Bauteilanzug und sind in Abbildung 33 eingrahmt. Die grün markierten Bereiche an der Vorderseite des Grats sind Reibspuren. Diese nehmen mit sinkendem Einspritzvolumen deutlich zu. An der Bauteilrückseite wurden Kerben im dickwandigen Bauteilbereich und nicht vollständig ausgefüllte Bereiche in der Dünnstelle identifiziert. Auch hier ist ersichtlich, dass diese Defekte mit sinkendem Einspritzvolumenstrom ($\leq 1,0 \text{ cm}^3/\text{s}$) zunehmen. Bei einem Einspritzvolumenstrom von $0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ sind sogar Bindenähte (#41 rechts unten) sichtbar. Abbildung 33-a zeigt den nicht vollständig ausgefüllten Bauteilanzug mit sinkendem Einspritzvolumenstrom.

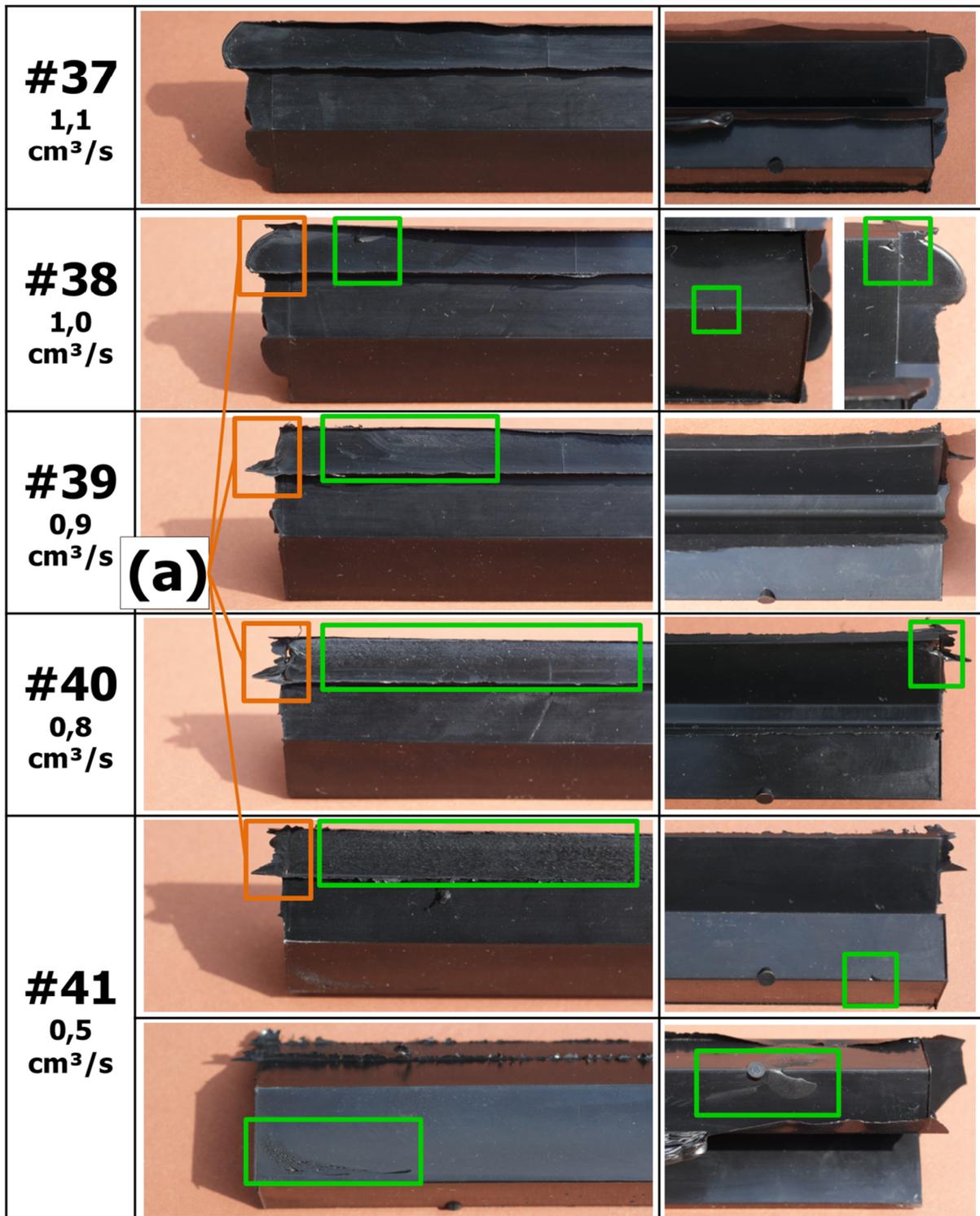


Abbildung 33: Studie zum Einspritzvolumenstrom bei geschlossener Kavität mit eingerahmten Defekten; Vorderseite (links), Rückseite (rechts); Versuchseinstellungen in Tabelle 5.

Ab einer Einspritzzeit von 267 s (entspricht einem Einspritzvolumenstrom von 1,0 cm³/s) weisen die Bauteile speziell am Bauteilanzfang Defekte auf. Bei Einspritzzeiten ≤ 240 s (entspricht einem Einspritzvolumenstrom $\geq 1,1$ cm³/s) sind an den Bauteilen keine Defekte ersichtlich. Diese Zeit stellt somit eine Grenze des Prozessfensters dar (= Scorchzeit). In

Abbildung 34 ist diese Grenze in der Vulkanisationskurve eingetragen. Folglich lässt sich aus der Vulkanisationskurve ableiten, dass sich ab einem Vernetzungsgrad von ca. 2,2 % bereits so viele Netzstellen gebildet haben, dass es nicht mehr möglich ist, die Formmasse ohne Defekte zu verformen. Die Einspritzzeiten der Bauteile #38, #39 und #40 sind ebenfalls in Abbildung 34 eingezeichnet. Es ist klar erkennbar, dass sie außerhalb des Verarbeitungsfensters liegen.

Bei Einspritzzeiten größer als die Scorchzeit ($t_e > t_{\text{scorch}}$) kommt es zu einer Relativbewegung zwischen einer bereits anvulkanisierten Bauteiloberfläche und der Metalloberfläche der Kalibrierzonenelemente. Dadurch entstehen die Reibspuren. Durch die thermisch bedingte Materialausdehnung wird ein zusätzlicher Forminnendruck erzeugt, mit dem die anvulkanisierte Bauteiloberfläche an die Metalloberfläche gepresst wird. Bindenähte bleiben bestehen, wenn bereits anvulkanisierte Fließfronten aufeinandertreffen.

Ein nicht vollständig ausgefüllter Bauteilanzug (Abbildung 33-a) bei $t_e > t_{\text{scorch}}$ ist dem nicht mehr wirksamen Kompressionshub geschuldet. Nach der Ausbildung erster Netzstellen kann die Kavität durch den Kompressionshub nicht mehr vollständig gefüllt werden.

Die untere Einspritzvolumenstromgrenze ergibt sich somit mit $1,1 \text{ cm}^3/\text{s}$.

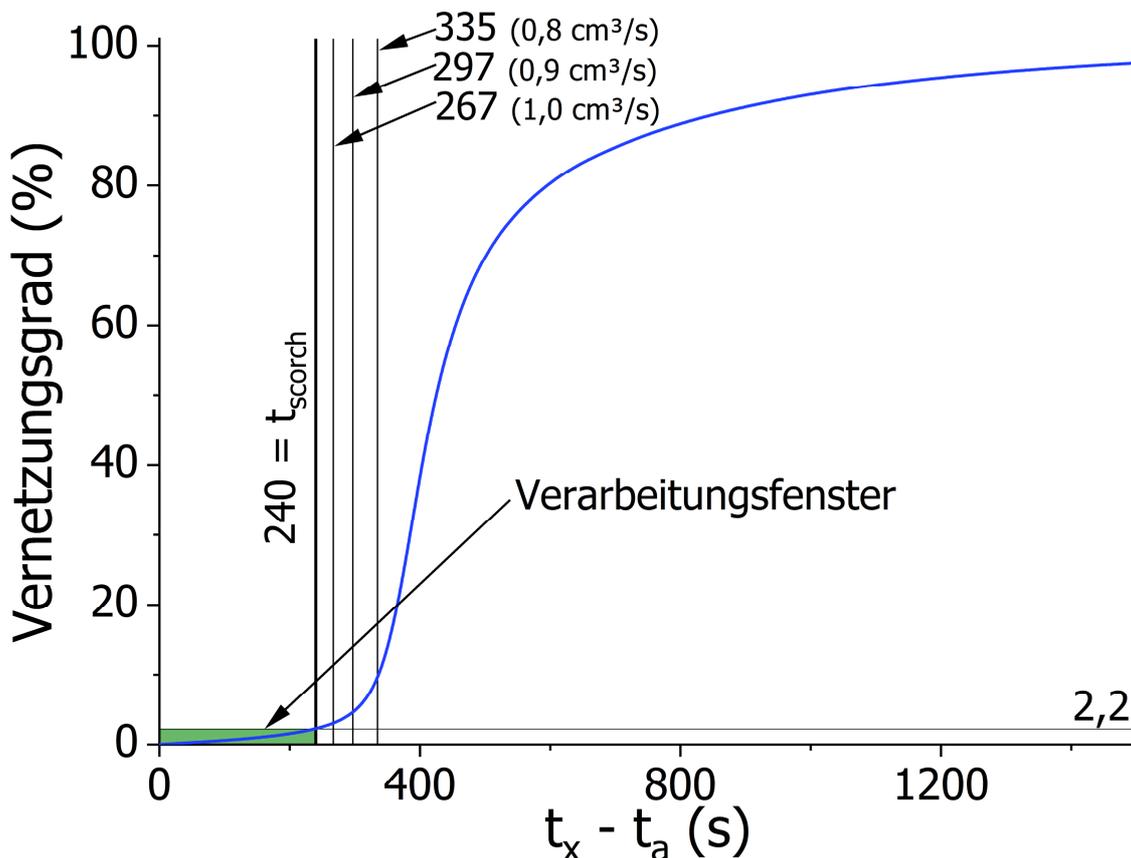


Abbildung 34: Verarbeitungsfenster und Scorchzeit bei $140 \text{ }^\circ\text{C}$.

Als nächstes erfolgte die Ermittlung der oberen Einspritzvolumenstromgrenze. Größere Einspritzvolumenströme haben kürzere Einspritzzeiten und befinden sich deshalb alle im Verarbeitungsfenster. Alle Bauteile, die mit einem Einspritzvolumenstrom $\geq 1,1 \text{ cm}^3/\text{s}$ hergestellt wurden, waren somit Gutteile. Ein Einspritzvolumenstrom von $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ besitzt

eine Einspritzzeit von 24 s, was dem klassischen Spritzgießen bereits sehr nahe ist. Eine weitere Erhöhung ist somit mit keinem Erkenntniszugewinn verbunden.

Im nächsten Schritt wurde für die Verfahrensvariante mit offener Kavität ebenfalls ein mögliches Prozessfenster gesucht. Abbildung 35 zeigt eine Auswahl dieser Studie. Da dasselbe Material unter gleichen Temperaturbedingungen verarbeitet wurde, liegt die zuvor ermittelte Scorchzeit auch hier bei 240 s. Niedrigere Einspritzzeiten führen bei offener Kavität zur Bildung eines Wulsts, wie er in Abbildung 35 am Bauteil #51 ersichtlich ist. Im Bereich des Grats verlässt eine noch unzureichend vernetzte Formmasse den offenen Bereich der Kavität. Durch den Kompressionshub wird zusätzlich Material über die offene Fläche aus der Kavität herausgepresst.

Bei $t_e > t_{\text{scorch}}$ verlässt ein zumindest anvulkanisiertes Bauteil die Kavität. Es bilden sich ähnliche Defekte wie bei $t_e > t_{\text{scorch}}$ und geschlossener Kavität. Diese Reibspuren, Kerben und Bindenähte sind in Abbildung 35 für die Bauteile #45 und #60 markiert. An Bauteil #45 ist zusätzlich zu den Reibspuren auch noch ein deformierter Grat erkennbar. Diese Einstellung stellt somit genau den Übergang zwischen starker Wulstbildung und Reibspuren dar. Bereits vor dem Verlassen der Kavität ist die Bauteiloberfläche anvulkanisiert (\rightarrow Reibspuren). Die Bauteilmitte ist hingegen noch nicht formstabil. Nachdem der Grat die Kavität verlässt, ist kein Formzwang mehr gegeben. Der Grat kann sich während der weiteren Vernetzung frei verformen (\rightarrow deformierter Grat).

Bauteile mit sehr langen Einspritzzeiten sind beim Verlassen der Kavität zwar formstabil, weisen jedoch neben den Reibspuren viele Bindenähte und sichtbare Falten im Material auf (Bauteil #60, $t_e = 1985$ s). Geringste mechanische Belastung (Entformung per Hand) führte bei diesen Bauteilen bereits zur Rissbildung (Bauteil #60 links oben).

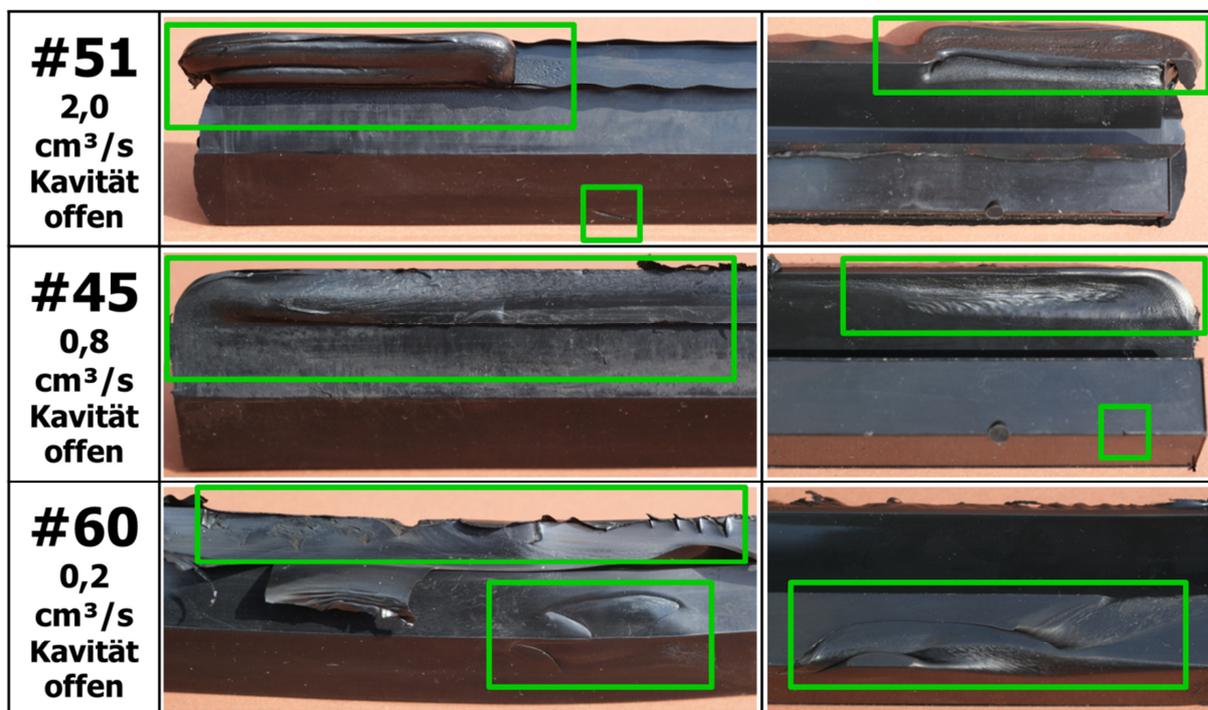


Abbildung 35: Studie zum Einspritzvolumenstrom bei offener Kavität; Vorderseite (links), Rückseite (rechts); Versuchseinstellungen in Tabelle 5.

Somit konnte unter diesem Setup kein einziges Gutteil bei offener Kalibrierzone hergestellt werden. In einer weiteren Versuchsreihe wurden deshalb Spritzversuche mit separat beheizter Kalibrierzone durchgeführt. Als Oberflächentemperatur wurde hierbei ca. 140 °C auf der Kalibrierzone sowie ca. 120 °C in der Kavität und auf den Backen gemessen (Vorlauftemperatur 160 °C bzw. 140 °C). Das Ziel dieser Versuchsreihen war es, die Defekte ausschließlich auf den Bereich des Grats zu beschränken.

Abbildung 35 zeigt eine Auswahl der in dieser Versuchsreihe hergestellten Bauteile. Auch unter diesem Setup konnten nur Bauteile mit den zuvor beschriebenen Defekten produziert werden.

Für die Verfahrensvariante mit offener Kavität war es somit unter keinem Setup möglich, Gutteile herzustellen. Daraus resultiert, dass auch eine Endlosvariante mit dem derzeitigen RubExject-Konzept nicht denkbar ist.

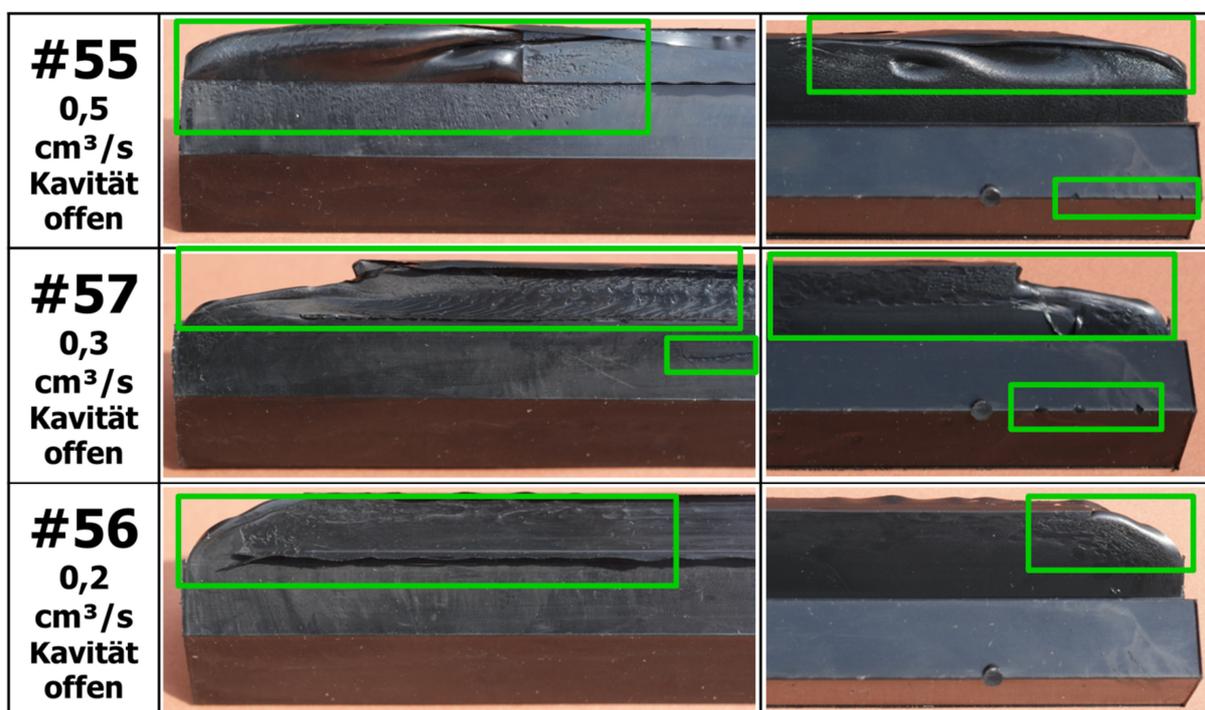


Abbildung 36: Studie zum Einspritzvolumenstrom bei offener Kavität und unterschiedlich temperierten Werkzeugbereichen; Vorderseite (links), Rückseite (rechts); Versuchseinstellungen in Tabelle 5.

Die Versuchsergebnisse des Kapitels 4.5 lassen sich in einer Matrix zusammenfassen (Abbildung 37): **Nur bei geschlossener Kalibrierzone und $t_e < t_{\text{scorch}}$ ist es möglich Gutteile ohne Defekte zu produzieren.**

Einstellungen mit offener Kalibrierzone führen immer zu Schlechtteilen. Bei $t_e < t_{\text{scorch}}$ erreicht das Material keine ausreichende Vernetzung und es kommt zur Bildung eines Wulsts.

Schlechtteile durch Reibspuren an der Oberfläche und offensichtlichen Bindenähten entstehen bei offener und geschlossener Kalibrierzone, wenn $t_e > t_{\text{scorch}}$. Eine Relativbewegung zwischen vulkanisierter Bauteil- und Metalloberfläche beziehungsweise das Aufeinandertreffen anvulkanisierter Fließfronten führen zu diesen Defekten.

Kalibrierzone	offen	Schlechtteil Wulst	Schlechtteil Reibspuren Bindenähte
	geschlossen	Gutteil	Schlechtteil Reibspuren Bindenähte
		$t_e < t_{\text{scorch}}$	$t_e > t_{\text{scorch}}$
Einspritzzeit			

Abbildung 37: Prozessbereiche des RubExject-Verfahrens.

4.6 Festlegung des Versuchsplans

Innerhalb des in Kapitel 4.5 ermittelten Prozessfensters zur Herstellung von Gutteilen wurde ein Versuchsplan erstellt. Dazu erfolgte zuerst eine Definition der wichtigsten Einflussgrößen und Zielgrößen sowie die Festlegung der zugehörigen Faktorstufen. Untersuchungen von Fasching [22] zeigten, dass Werkzeugtemperatur, Einspritzvolumenstrom und Vernetzungszeit einen signifikanten Einfluss auf die Bauteileigenschaften im Elastomerspritzguss haben. Die optimale Werkzeugtemperatur ergab sich aus der Vulkanisationskurve (Kap. 4.1) mit 140 °C. Sie wurde für alle systematischen Versuche nicht variiert und bei 140 °C konstant gehalten.

Um alle Haupteffekte und Wechselwirkungen der weiteren signifikanten Einflussgrößen identifizieren zu können, wurde ein 2² vollfaktorieller Versuchsplan mit Zentralpunkt (Tabelle 6) erstellt. Die untere Grenze des Einspritzvolumenstroms (1,2 cm³/s) ergibt sich aus den Erkenntnissen des Kapitels 4.5. Um das Fenster des Versuchsplans möglichst breit aufzuspannen, wurde die obere Faktorstufe mit 10 cm³/s (Einspritzzeit dem klassischen Spritzguss bereits sehr nahe) festgelegt.

Die Faktorstufen der Vulkanisationszeiten wurden so gewählt, dass die niedrige Einstellung (545 s = t_{70}) eine sichere Entformung ermöglicht. Die hohe Faktorstufe von 1196 s (= t_{95}) entspricht jener Vulkanisationszeit die zum Erreichen des optimalen Vernetzungsgrads von 95 % notwendig ist.

Die Zentralpunkteinstellung ergibt sich aus den Mittelwerten der Faktorstufen zu 870,5 s (=t₉₀) Vulkanisationszeit und 5,6 cm³/s Einspritzvolumenstrom.

Aufgrund der langen Temperierung und Zykluszeiten sowie den notwendigen manuellen Tätigkeiten zwischen den Versuchen musste der Versuchsplan auf drei Tage aufgeteilt werden.

Der DVR dient zur Beurteilung für den Einsatz in der Dichtungstechnik und lässt auf den Vernetzungsgrad im Bauteil schließen. Durch Bruchspannung und Bruchdehnung wird die mechanische Performance des Bauteils repräsentiert. DVR, Bruchspannung und Bruchdehnung eignen sich somit ideal um einsatzrelevante Aussagen treffen zu können. Sie bilden die Zielgrößen des Versuchsplans.

4.7 Versuchsplanergebnisse

4.7.1 DVR

Die Wechselwirkungsdiagramme der RubExject-Bauteile mit dem DVR als Zielgröße sind in Abbildung 38 dargestellt. In Tabelle 14 (siehe Anhang) sind außerdem die zugehörigen Werte der DVR-Proben aufgelistet.

Die Diagramme zeigen, dass die Vulkanisationszeit einen Effekt auf den DVR ausübt. Längere Vulkanisationszeiten führen unabhängig vom Einspritzvolumenstrom zu einem geringeren DVR. Die mittlere Gesamtzeit (Tabelle 7) ergibt sich unter niedrigen Vulkanisationszeiten zu 686 s (Arithmetische Mittel aus Versuch #4 und #5) und unter hohen Vulkanisationszeiten zu 1337 s (Arithmetische Mittel aus Versuch #2 und #6). Die Differenz beträgt 651 s und entspricht fast einer Verdopplung der Gesamtzeit. Die längere Zeit zum Ausbilden der Netzstellen spiegelt sich in einer Reduktion des DVR von ca. 39 % auf ca. 22 % (im Mittel) wider. Der Einspritzvolumenstrom besitzt einen geringen Effekt. Größere Einspritzvolumenströme resultieren in etwas höheren DVR.

In den Wechselwirkungsdiagrammen ist an den Positionen M und E eine Wechselwirkung zwischen Einspritzvolumenstrom und Vulkanisationszeit erkennbar. Bei langen Vulkanisationszeiten macht es fast keinen Unterschied, ob der Einspritzvolumenstrom hoch oder niedrig ist. Bei kurzen Vulkanisationszeiten ist jedoch zu erkennen, dass ein niedrigerer Einspritzvolumenstrom zu einem geringeren DVR führt.

Unter langen Vulkanisationszeiten erreicht die Vernetzungsreaktion in jedem Fall den oberen, abflachenden Bereich der Vulkanisationskurve (Abbildung 26). Dort wirken sich Änderungen in der Vulkanisationszeit nur minimal auf den Vernetzungsgrad aus. Bei kurzen Vulkanisationszeiten bewirkt die um ca. 200 s längere Gesamtzeit (resultiert aus dem niedrigen Einspritzvolumenstrom) eine Reduzierung des DVR um ca. 8 %. Die Wechselwirkungseffekte der Proben vom Bauteilanfang (A) haben eine ähnliche Tendenz, die Terme sind jedoch nicht mehr in der Regressionsgleichung enthalten (p-Wert > 0,1 = Alpha für Ausschluss).

Der DVR-Wert der Zentralpunkteinstellung liegt für die Entnahmeposition A und M innerhalb der Regressionsgleichung (kein Ausschluss bei $\alpha = 0,1$). An der Endposition (E) liegt er außerhalb. Dies deutet auf einen nicht linearen Zusammenhang der Einflussgrößen auf den DVR hin. Die Vulkanisationskurve weist im Versuchsfenster ebenfalls einen nicht linearen

Zusammenhang auf. Nach reichlicher Überlegung wurde allerdings gegen die Durchführung eines Versuchsplans welcher einen nicht linearen Zusammenhang abbilden kann entschieden (durch Hinzufügen nach innen gerichteter Sternpunkte wäre dies möglich gewesen). Aufgrund der schwierigen Probenpräparation ist die Auflösung der Ergebnisse durch die Messmittel begrenzt. Durch die sehr langen Zykluszeiten sind pro Versuchstag nur zwei (in speziellen Konstellationen drei) verschiedene Einstellungen durchführbar.

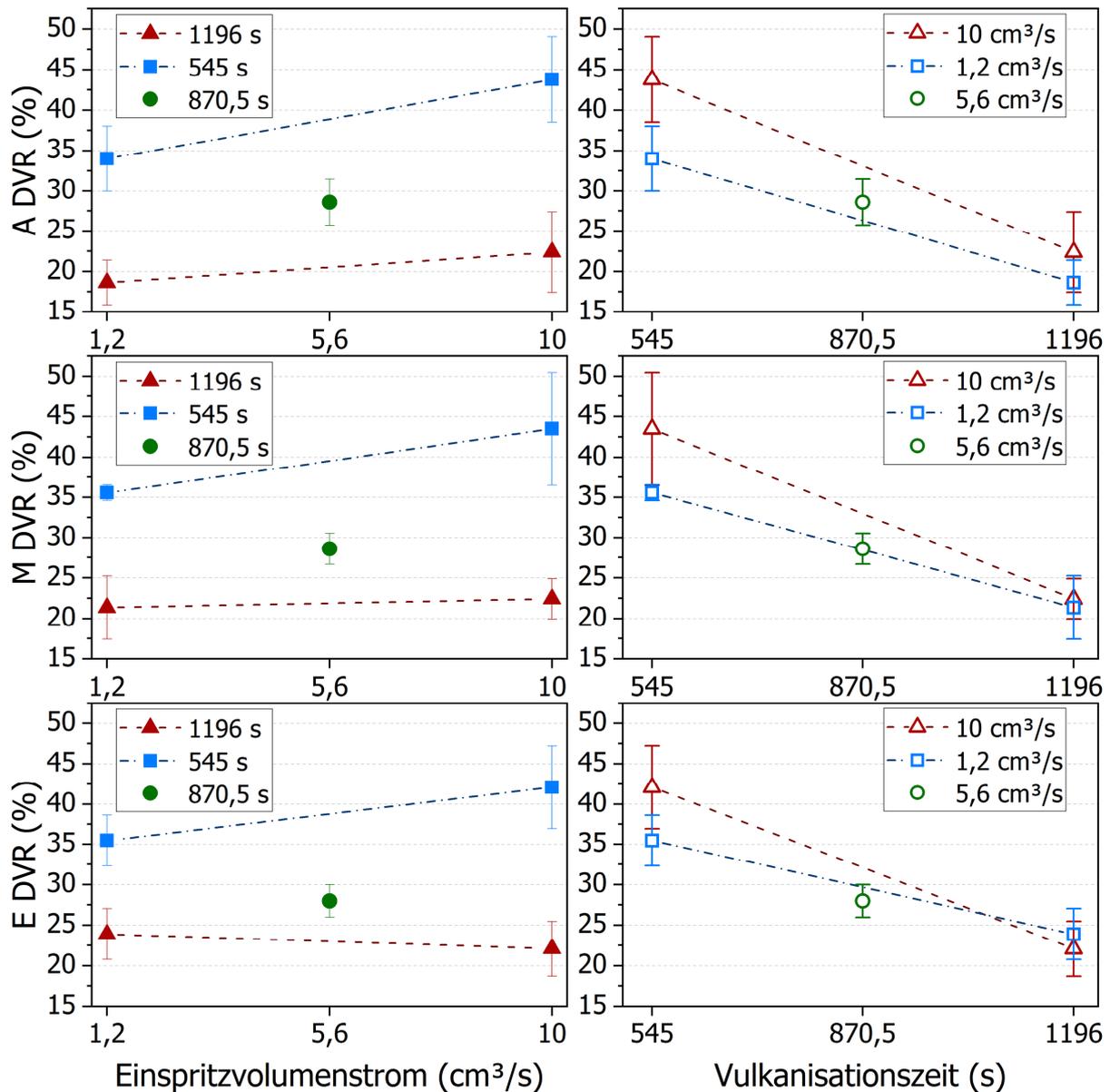


Abbildung 38 Wechselwirkungsdiagramm der RubExject-Bauteile mit dem Druckverformungsrest (DVR) als Zielgröße.

4.7.2 Zugprüfung

In Abbildung 39 ist eine Messkurve des Bauteils # 4.3 (Probe aus dem Bauteilanfang entnommen) repräsentativ für alle Zugprüfungen dargestellt. Nachfolgend wurde stets Spannung beziehungsweise Dehnung beim Bruch ausgewertet (= Zielgrößen). Im Anhang sind alle Zugprüfungsergebnisse in Tabelle 15 und Tabelle 16 aufgelistet. Abbildung 40 beziehungsweise Abbildung 41 zeigen die Wechselwirkungsdiagramme der RubExject-Bauteile mit der Bruchspannung beziehungsweise der Bruchdehnung als Zielgröße.

Die mittleren Bruchspannungen aller Versuchseinstellungen befinden sich zwischen 16 N/mm^2 und 18 N/mm^2 . Bei den Bruchdehnungen wurden stets Werte zwischen ca. 220 % und 280 % gemessen. Die Regressionsanalyse der verschiedenen Zugprüfungsresultate lieferte mit $\alpha = 0,1$ teilweise keine, aber auch Regressionsgleichungen mit allen Termen. Es zeigt allerdings keines der Wechselwirkungsdiagramme praktisch relevante Effekte oder Wechselwirkungen.

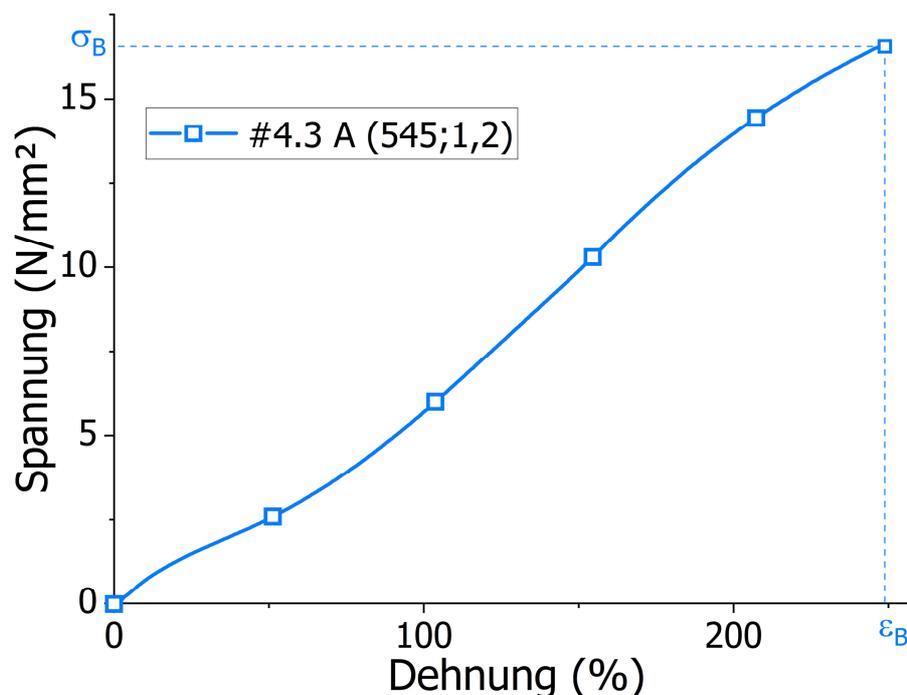


Abbildung 39: Repräsentative Messkurve der Zugversuche.

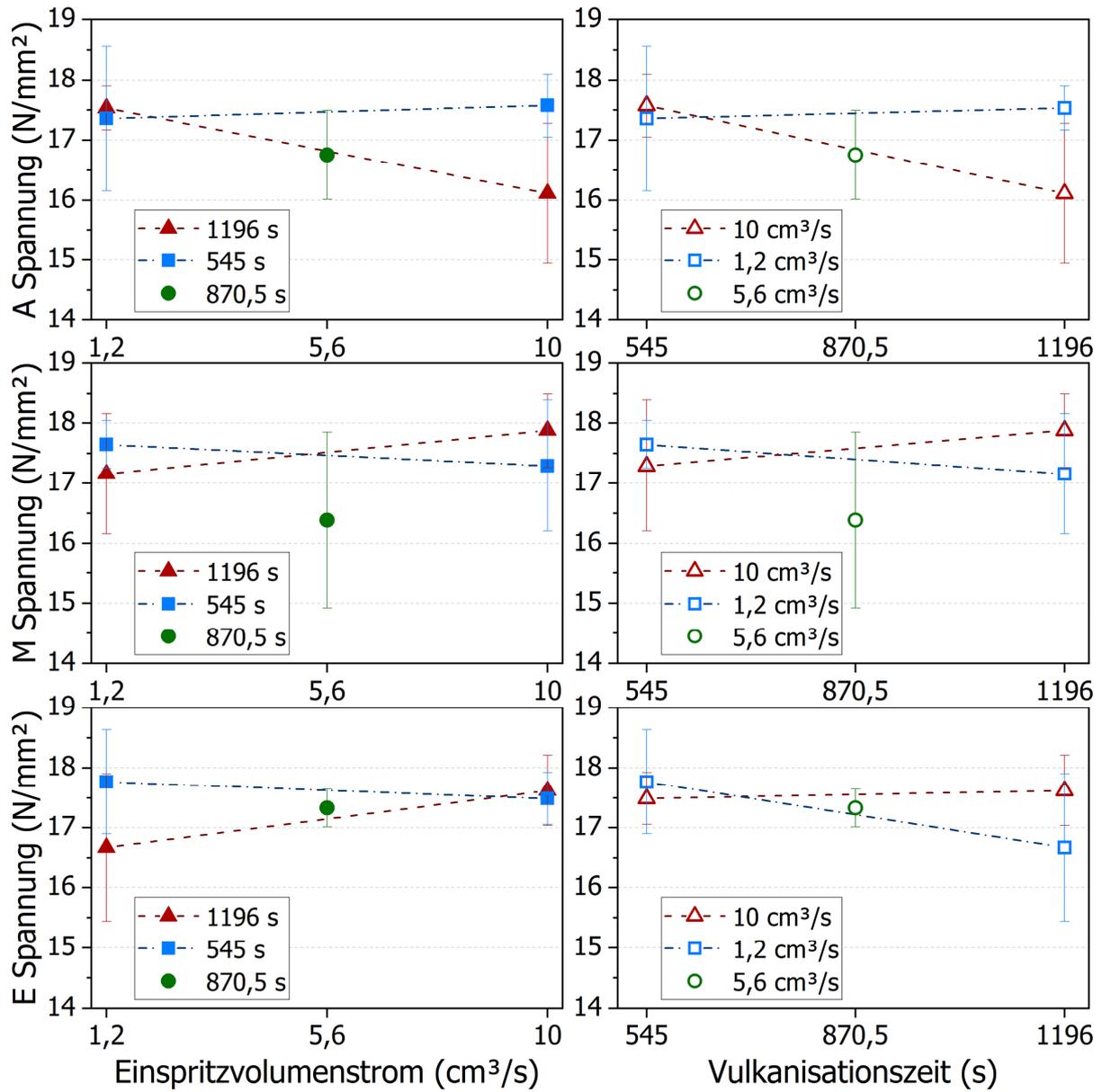


Abbildung 40: Wechselwirkungsdiagramm der RubExject-Bauteile mit der Bruchspannung als Zielgröße.

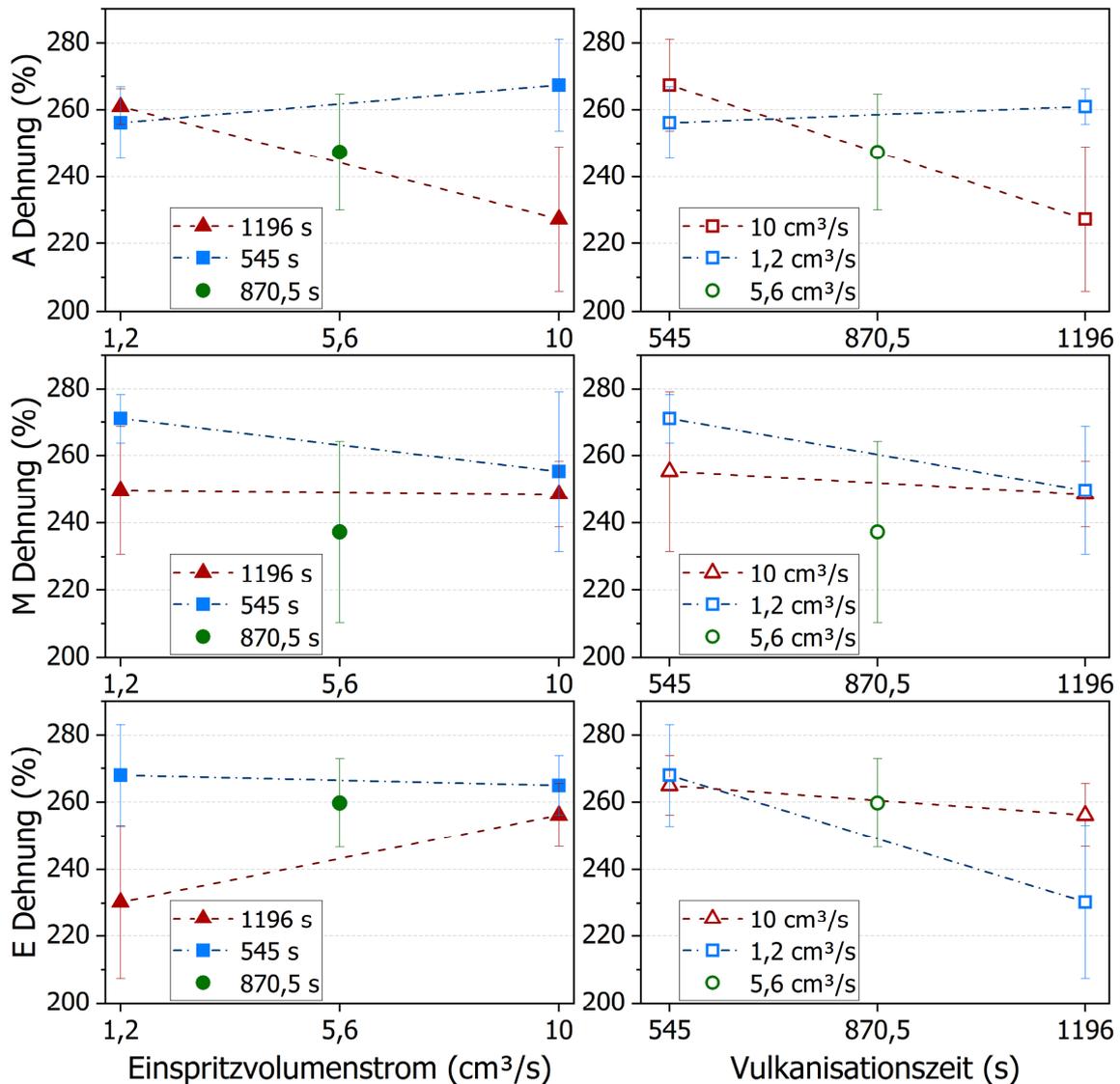


Abbildung 41: Wechselwirkungsdiagramm der RubExject-Bauteile mit der Bruchdehnung als Zielgröße.

4.7.3 Sensordaten

In Abbildung 42 ist der Verlauf des spez. Spritzdrucks für alle drei Faktorstufen des Einspritzvolumenstroms dargestellt. Die Kurven steigen zunächst an, wobei sie bei 10 cm³/s und 5,6 cm³/s Einspritzvolumenstrom ein ausgeprägtes Maximum erreichen. Der Zeitpunkt, des Maximums entspricht dem Abschließen des Vorspritzens und somit dem Start der Schlittenbewegung (3,5 s bei 10 cm³/s und 6,3 s bei 5,6 cm³/s). Bei 1,2 cm³/s ist zu diesem Zeitpunkt (29,2 s) zwar kein Maximum vorhanden, dennoch steigt der spez. Spritzdruck ab diesem Zeitpunkt nicht mehr. Alle Kurven erreichen anschließend ein relativ konstantes Druckniveau. Genau dieses Verhalten zeigt einen großen Vorteil der Exjection[®]-Technologie. Mit einsetzender Verschiebeschlittenbewegung kommt es zur Entkopplung des Druckbedarfs von der Fließweglänge. Es wird nur der Druckbedarf für die vorgespitzte Masse benötigt (entspricht dem konstanten Niveau). Gegen Ende jeder Kurve kommt es zu einem Druckanstieg von ca. 40 bar. Dieser Druckanstieg beginnt bei vollständiger Füllung der

Kavität (= Kompressionshub). Aus dem Vergleich der Kurven ist ersichtlich, dass mit sinkendem Einspritzvolumenstrom auch der spez. Spritzdruck deutlich abnimmt.

In Abbildung 42 ist außerdem der Ausspritzdruck sowie die Differenz aus spez. Spritzdruck und Ausspritzdruck (= Kavitätsfülldruck) eingetragen. Der Ausspritzdruck gibt den Druckverlust im Kaltkanal samt Maschinendüse wieder. Wird er vom spez. Spritzdruck subtrahiert, ergibt sich jener Druck der nur für die Füllung der Kavität benötigt wird. Aus der Abbildung ist erkennbar, dass ein Großteil des spez. Spritzdrucks im Kaltkanal und in der Maschinendüse verbraucht wird. Die Kavitätsfüllung während der Verschiebeschlittenbewegung erfolgt mit ca. 265 bar bei 10 cm³/s und 5,6 cm³/s und mit ca. 150 bar bei 1,2 cm³/s.

Aus einer Literaturstudie [39] (Chloropren-Kautschukmischung mit 55 Shore A) lässt sich abschätzen, dass im klassischen Spritzguss ca. 1300 bar spez. Spritzdruck notwendig sind um ein Bauteil mit sehr ähnlicher Querschnittsfläche (25 mm x 25 mm) jedoch nur 100 mm Länge herzustellen. Der Druckverlust durch das Angussystem ist bei dieser Studie jedoch nicht bekannt. Je nach Geometrie kann dieses mehr oder weniger Druck als jenes des vorhandenen RubExject-Werkzeugs verbrauchen.

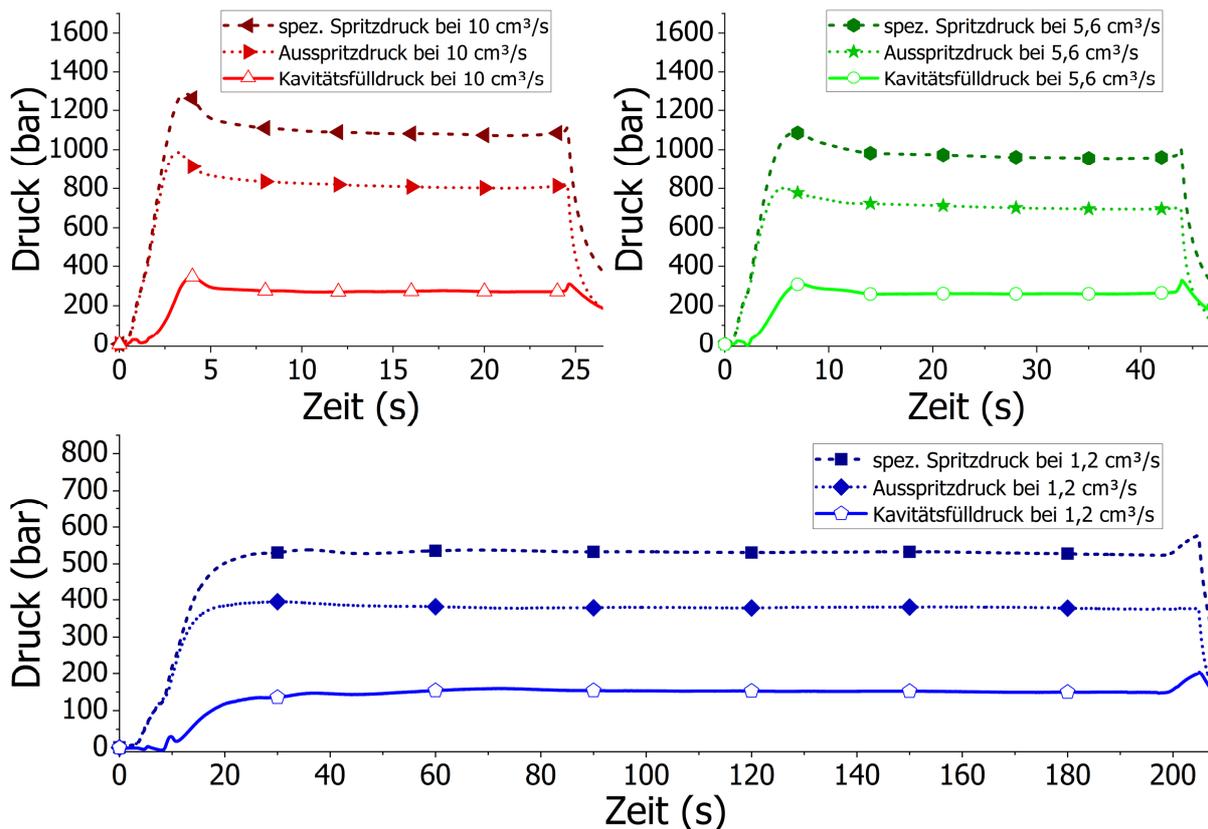


Abbildung 42: Verläufe der spez. Spritzdrücke, der Ausspritzdrücke sowie der Kavitätsfülldrücke.

Ein Vergleich der spez. Spritzdruckverläufe des RubExject-Verfahrens (Abbildung 42) mit einem typischen Verlauf aus dem klassischen Spritzguss (Abbildung 43) zeigt zwei deutliche Unterschiede auf. In der Einspritzphase steigt der Druck beim klassischen Spritzgießen ständig an. Beim RubExject-Verfahren erreicht er einen konstanten Plateauwert bis zum abschließenden Kompressionshub. Der zweite Unterschied liegt beim Nachdruck. Im klassischen Spritzgießen muss er so lange aufgebracht werden bis der Angussquerschnitt vulkanisiert ist. Beim RubExject-Verfahren verhindert er nur für wenige Sekunden den Masserückfluss bis der Anschnitt die Kavität verlassen hat.

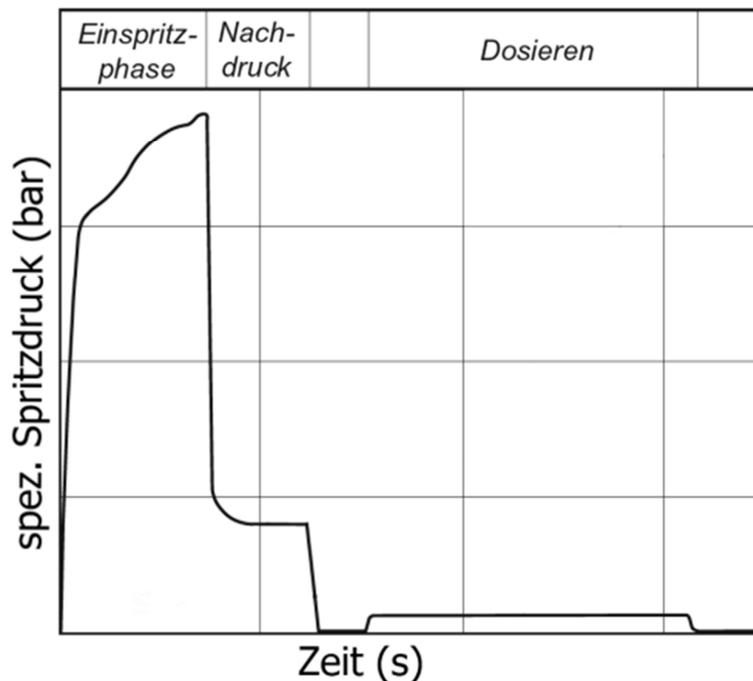


Abbildung 43: Spez. Spritzdruckverlauf beim klassischen Spritzguss; in Anlehnung an [39].

Die aufgezeichneten Forminnendrucke sind in Abbildung 44 dargestellt. Sie besitzen einen ähnlichen Verlauf wie jener des ersten Gutteils (siehe Kap. 4.4; Verfahrensbereiche durch vertikale Linien getrennt). Während des Einspritzens beträgt der Forminnendruck ca. 5 bar bis 10 bar. Durch den Kompressionshub steigt der maximale Forminnendruck auf ca. 40 bar bis 55 bar an. Diese Werte liegen unter den üblichen Forminnendrucke von ca. 80 bar [3] des klassischen Spritzgusses.

Der Vergleich der Kavitätsfülldrücke (ca. 150 bar bis 265 bar) mit den Forminnendrucke während des Einspritzens (ca. 5 bar bis 10 bar) zeigt eine Druckdifferenz von ca. 145 bar bis 255 bar. Dieser Druck wird im dünnwandigen Bauteilbereich verbraucht.

Beim mittleren, vor allem aber beim unteren Sensor nimmt der Forminnendruck nach dem ersten Anstieg bis zum Erreichen der vollständigen Bauteilfüllung um bis zu ca. 8 bar ab. Dieser Druckabfall könnte auf einen Materialaustritt über den Spalt für die Relativbewegung zurückzuführen sein.

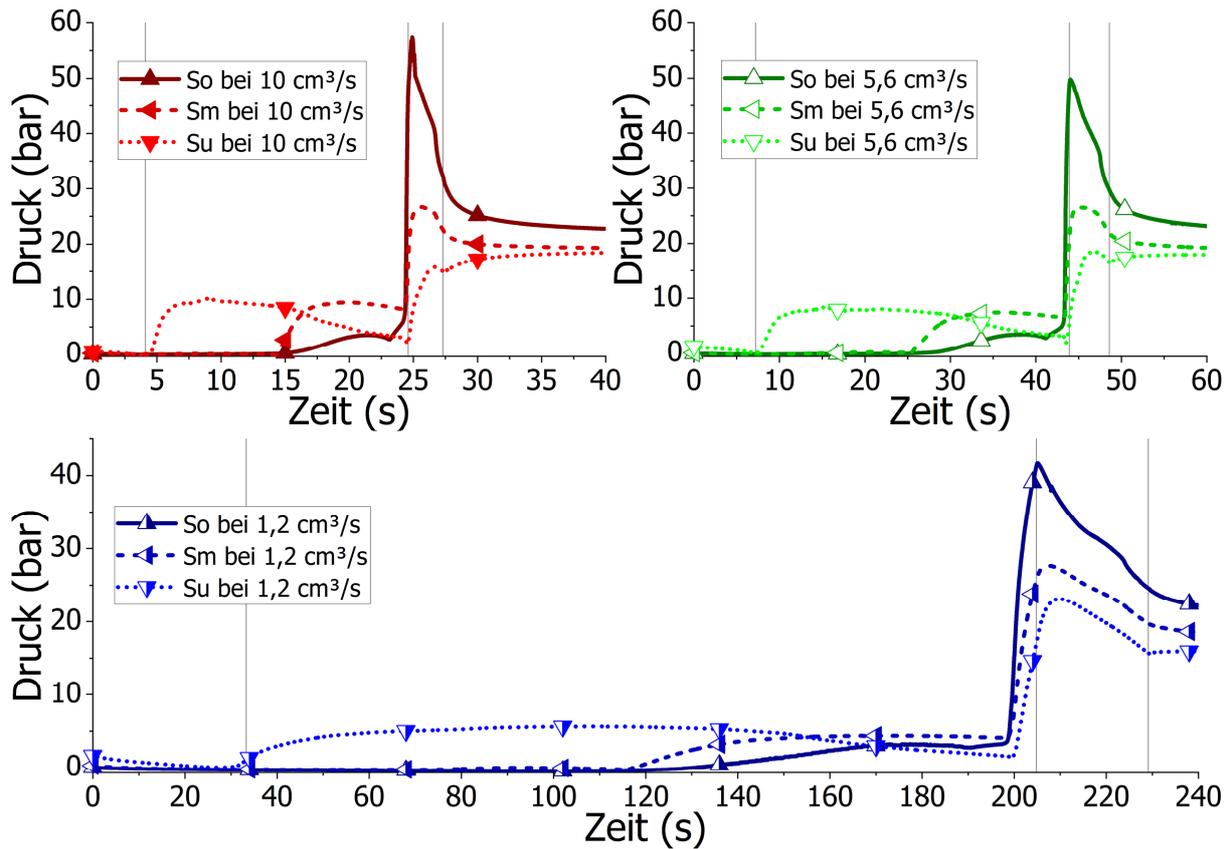


Abbildung 44: Forminnendruckverlauf; S = Sensor, o = oben, m = mitte, u = unten.

4.7.4 Bauteilvermessung

In Tabelle 10 sind die notierten Bauteilabmessungen und deren Schwindung aufgelistet. Die Entformungsschwindung beläuft sich auf ca. 0,4 %. Für Längsschwindungen ergab sich ein Wert von ca. 2 % nach Auslagerung von 72 Stunden bei 25 °C. Der negative Wert bei der Querschwindung bedeutet eine Ausdehnung.

Tabelle 10: Ergebnisse der Bauteilvermessung; Messbereiche a bis h in Abbildung 25.

Mittelwerte aus 7 Bauteilen		a	b	c	d	e	f	g	h
Kavitätsmaß	mm	42,20	240,0	276,0	42,20	600,4	20,00	16,00	2,00
sofort nach Entformung	mm	41,90	239,1	275,0	42,09	599,9	20,04	15,87	2,09
Lagerung bei ca. 25 °C für 72 h	mm	41,36	235,0	271,0	41,39	589,1	19,85	15,85	2,16
Entformungsschwindung	%	0,70	0,4	0,4	0,26	0,1	-0,19	0,79	-4,57
Verarbeitungsschwindung _{72 h}	%	1,99	2,1	1,8	1,93	1,9	0,74	0,96	-8,21

4.7.5 Dosiertemperaturmessung und Massetemperaturmessung

Die Dosiertemperatur gibt die Temperatur der im Schneckenorraum befindlichen Masse wieder. Sie entspricht, wie Abbildung 45 zeigt, nicht der an der Spritzeinheit eingestellten Zylinderwandtemperatur von 70 °C. Beim Aufdosieren kommt es zur Materialerwärmung

durch Dissipation. Die dadurch eingebrachte Energie erwärmt die Masse so hoch, dass ihre Temperatur um 8 K bis 10 K über der Zylinderwandtemperatur liegt.

Als Massetemperatur wird diejenige Temperatur bezeichnet, mit der die Formmasse in die Kavität eintritt. Wie Abbildung 45 zeigt, liegt sie deutlich höher als die Dosiertemperatur. Des Weiteren ist eine lineare Abhängigkeit ($R^2 = 0,995$ bei 120 cm^3 und $R^2 = 0,989$ bei 230 cm^3) vom Einspritzvolumenstrom erkennbar. Größere Einspritzvolumenströme resultieren in einer höheren Massetemperatur. Bei einem Volumenstrom von $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ erreicht die Massetemperatur bereits eine um bis zu 30 K höhere Temperatur als an der Zylinderwand ($70 \text{ }^\circ\text{C}$) eingestellt wurde. Beim Ausspritzen durch die Maschinendüse und durch den Kaltkanal kommt es somit zu einem beträchtlichen Energieeintrag durch Scher- und Dehnerwärmung.

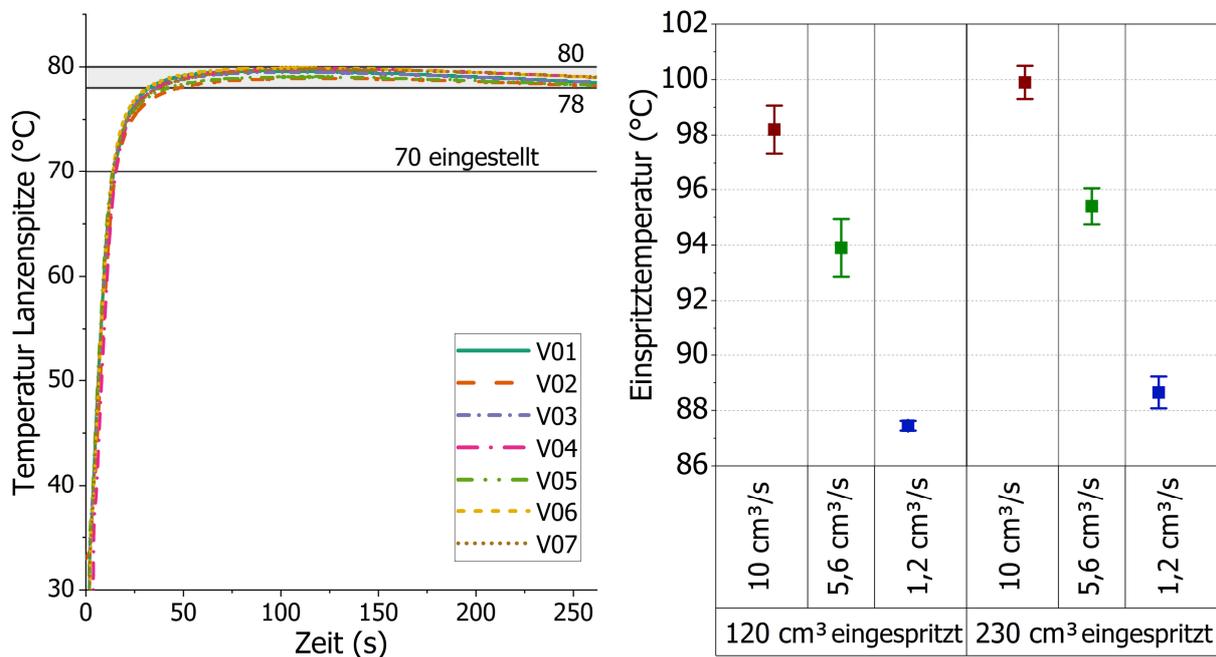


Abbildung 45: Dosierte Temperaturmessung (links), Massetemperaturmessung (rechts).

4.8 Vergleich der RubExject-Bauteile mit den Referenzplatten

In Abbildung 46 werden DVR-Ergebnisse miteinander verglichen. Vergleichbar sind stets jene Ergebnisse, welche den gleichen Vernetzungsgrad besitzen (z. B. t_{95} – RubExject-Bauteile mit t_{95_P} – Referenzplatten). Der Vergleich zeigt, dass die DVR-Werte der RubExject-Bauteile unter jenen der entsprechenden Referenzplatten liegen.

Der Bereich, aus dem die DVR Prüfkörper bei den RubExject-Bauteilen entnommen wurden, ist im Vergleich zu jenem der Referenzplatten deutlich dickwandiger. Aufgrund der schlechten Wärmeleitung der Kautschukmasse wäre somit ein niedrigerer Vernetzungsgrad (höherer DVR) bei den RubExject-Bauteilen zu erwarten. Während beim Pressen die Kautschukmasse bei Raumtemperatur eingelegt wird, kommt beim RubExject-Verfahren eine durch das Aufdosieren und Einspritzen vorgewärmte und vorgescherte Kautschukmasse in der Kavität an. Die Temperatur beträgt bereits zwischen $87 \text{ }^\circ\text{C}$ und $101 \text{ }^\circ\text{C}$ (siehe Kap. 4.7.5). Eine höhere Massetemperatur besitzt einen größeren relativen Reaktionswert.

Dadurch ist auch der Unterschied im RRW zwischen Bauteiloberfläche und -mitte geringer. Die Vernetzungsreaktion läuft somit schneller und gleichmäßiger ab, da weniger Zeit in die Wärmeleitungsvorgänge zur Masseerwärmung investiert werden muss. Dadurch erzielen die RubExject-Bauteile bei gleichen Vulkanisationszeiten niedrigere DVR-Werte.

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Verarbeitungsverfahren ist, dass beim RubExject-Prozess die Einspritzzeit noch nicht zur Vulkanisationszeit zählt, der Wärmeeintrag von der Werkzeugwand jedoch bereits stattfindet. Je nach Einspritzvolumenstrom ist der Anfang der RubExject-Bauteile 26,8 s, 47,7 s bzw. 224,3 s (Einspritzzeit gesamt; Tabelle 7) länger in der beheizten Kavität als die Referenzplatten. Die Masse am Bauteilende ist ebenso etwas länger in der beheizten Kavität als die Referenzplatten. Die Zeitspannen sind hier aber mit 2,8 s, 4,8 s bzw. 24,3 s (Schlittenstopp - Einspritzen; Tabelle 7) so klein, dass sie keinen praktisch relevanten Unterschied ausmachen.

Der Anfang der RubExject-Bauteile befindet sich länger in der beheizten Kavität als das Ende. Bei niedrigen Einspritzvolumenströmen beträgt die Zeitspanne ca. 200 s. Aus diesem Grund wurde vor Versuchsstart ein unterschiedlicher Vernetzungsgrad beziehungsweise DVR über die Bauteillänge erwartet. Abbildung 46 zeigt jedoch gut, dass die RubExject Bauteile im Prozessfenster über der Bauteillänge keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Bei t_{95} und einem niedrigen Einspritzvolumenstrom von $1,2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ist zwar ein Trend erkennbar, der durch die hohe Standardabweichung allerdings nicht signifikant ist.

Abbildung 46 zeigt, dass sich mit zunehmender Gesamtzeit die Auswirkung der Einspritzzeit auf den DVR verringert. Während sich der mittlere Wert des DVR (Arithmetische Mittel aus A, M und E) zwischen den kurzen Vulkanisationszeiten (t_{70}) um ca. 8 % Punkte unterscheidet, ist bei den langen Vulkanisationszeiten (t_{95}) kein Unterschied vorhanden.

RubExject-Bauteile zeigen im Vergleich mit den Referenzplatten eine deutlich höhere Standardabweichung. Sie kann hauptsächlich auf die Extraktion der Prüfkörper zurückgeführt werden. Während sie bei den Referenzplatten nur ausgestanzt wurden (Solldicke = Plattendicke), mussten sie bei den RubExject-Bauteilen zuvor aus dem dickwandigen Bereich auf die Solldicke zugeschnitten werden. Da sich der Bauteilquerschnitt, trotz Verwendung einer Schneidevorrichtung mit frisch geschliffener Schneide, während des Zuschnitts verformte, war die Ebenheit und Parallelität der Schnittflächen nicht so gut wie bei den Referenzplatten.

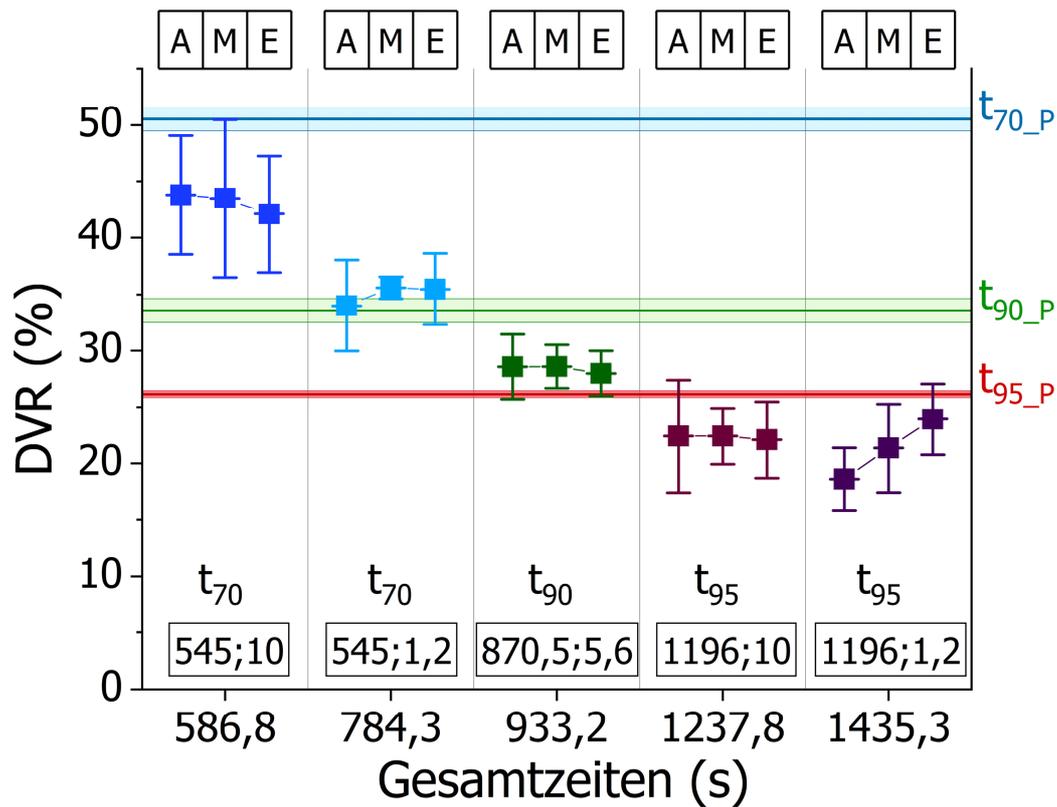


Abbildung 46: DVR-Werte der RubExject-Bauteile im Vergleich zu jenen der Referenzplatten (_P).

In Abbildung 47 werden die Bruchspannungen der RubExject-Bauteile mit jenen der Referenzplatten verglichen. Diese Abbildung zeigt erneut, dass weder ein Trend noch ein signifikanter Einfluss der Versuchseinstellungen auf die Bruchspannungen der RubExject-Bauteile vorliegt.

Der Mittelwert der Bruchspannungen liegt mit ca. 17,2 N/mm² knapp unter jenem der Referenzplatten von ca. 17,7 N/mm². Die Bruchspannungen der RubExject-Bauteile bei niedrigeren Gesamtzeiten liegen etwas unter und bei höheren Gesamtzeiten leicht über jenen der Referenzplatten. Die Standardabweichung ist allerdings zu hoch, um eine Signifikanz festzustellen.

Der Vergleich der Bruchdehnungen ist in Abbildung 48 dargestellt. Auch hier ist kein signifikanter Unterschied der RubExject-Bauteile für die verschiedenen Versuchseinstellungen ersichtlich. Die Tendenz, dass kürzere Gesamtzeiten im Mittel etwas höhere Bruchdehnungen (263,8 %) erzielen als längere (245,5 %), wird durch die hohen Standardabweichungen relativiert. Im Mittel liegen die Bruchdehnungen der RubExject-Bauteile vor allem bei längeren Vernetzungszeiten über jenen der Referenzplatten (mit Ausnahme der Zentralpunkteinstellung wo sie nahezu gleich sind).

Diese Vergleiche zeigen, dass Bauteile, welche mit dem RubExject-Verfahren hergestellt wurden, sehr ähnliche mechanische Eigenschaften wie konventionell hergestellte aufweisen. Für den optimalen Vernetzungsgrad von 95 % wurden tendenziell bessere mechanische Eigenschaften (höhere Bruchspannung und -dehnung) mit dem RubExject-Verfahren erzielt.

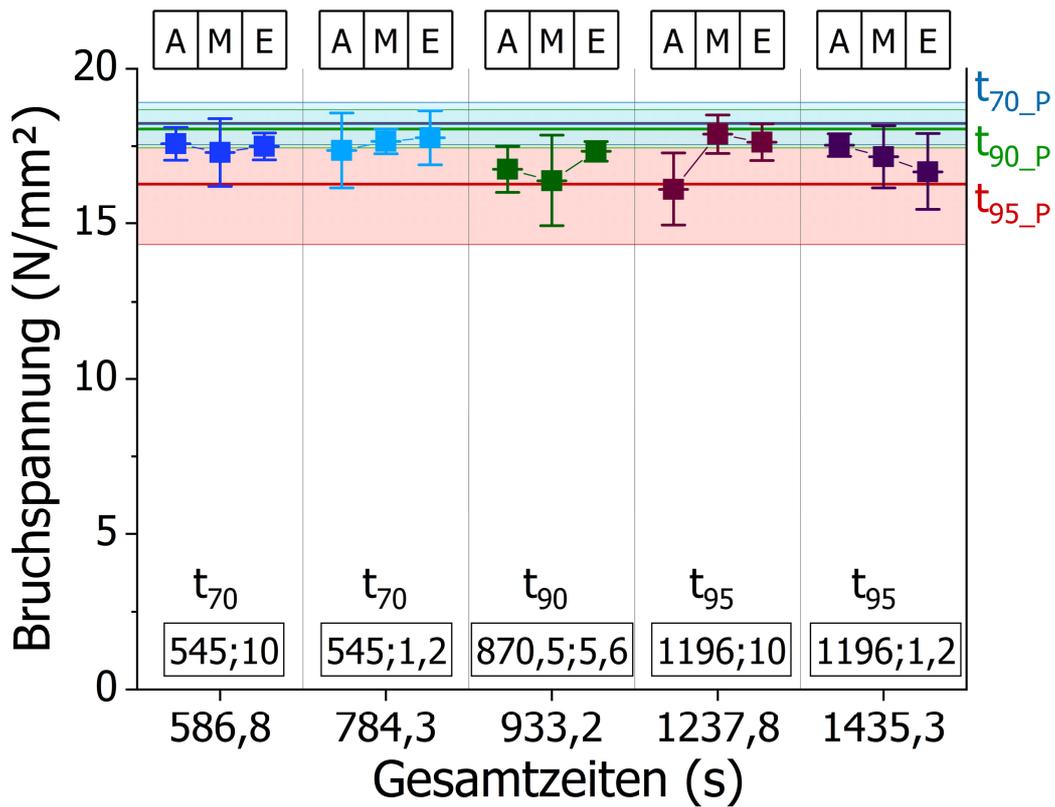


Abbildung 47: Bruchspannungen der RubExject-Bauteile im Vergleich zu jenen der Referenzplatten (_P).

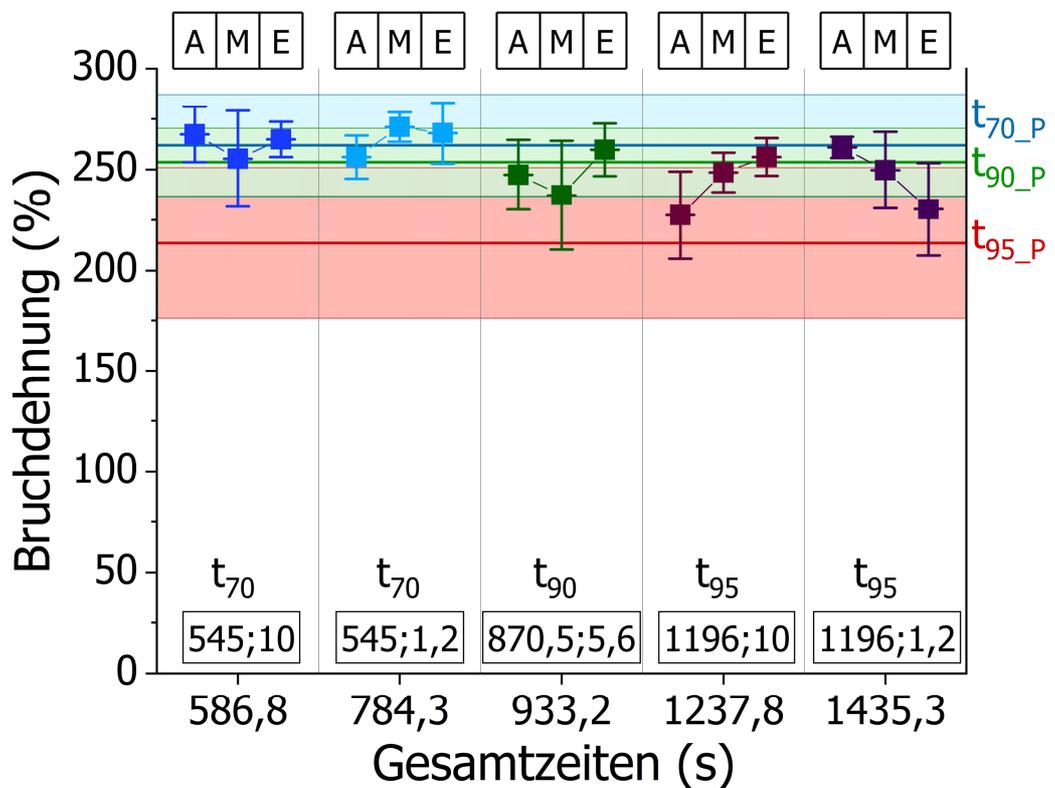


Abbildung 48: Bruchdehnungen der RubExject-Bauteile im Vergleich zu jenen der Referenzplatten (_P).

Unter der Annahme, dass beide Verarbeitungsverfahren bei gleichen Prozessbedingungen gleiche Bauteileigenschaften liefern, können die DVR-Werte der RubExject-Bauteile über den Kurvenfit der Referenzplatten (Abbildung 27) einem eindeutigen Vernetzungsgrad zugeordnet werden. Die berechneten Umsätze sind in Abbildung 49 und in Tabelle 17 (Anhang) dargestellt. In der Abbildung ist der bereits erwähnte Einfluss der Gesamtzeiten auf den DVR beziehungsweise auf den Vernetzungsgrad noch einmal gut zu erkennen. Längere Gesamtzeiten führen zu höheren Vernetzungsgraden (beziehungsweise zu niedrigeren DVR). Dabei ist es irrelevant, zu welchen Anteilen an Einspritzzeit und Vulkanisationszeit sich die Gesamtzeit zusammensetzt.

In Abbildung 49 ist noch einmal die deutlich höhere Standardabweichung der RubExject-Bauteile im Vergleich zu den Referenzplatten ersichtlich.

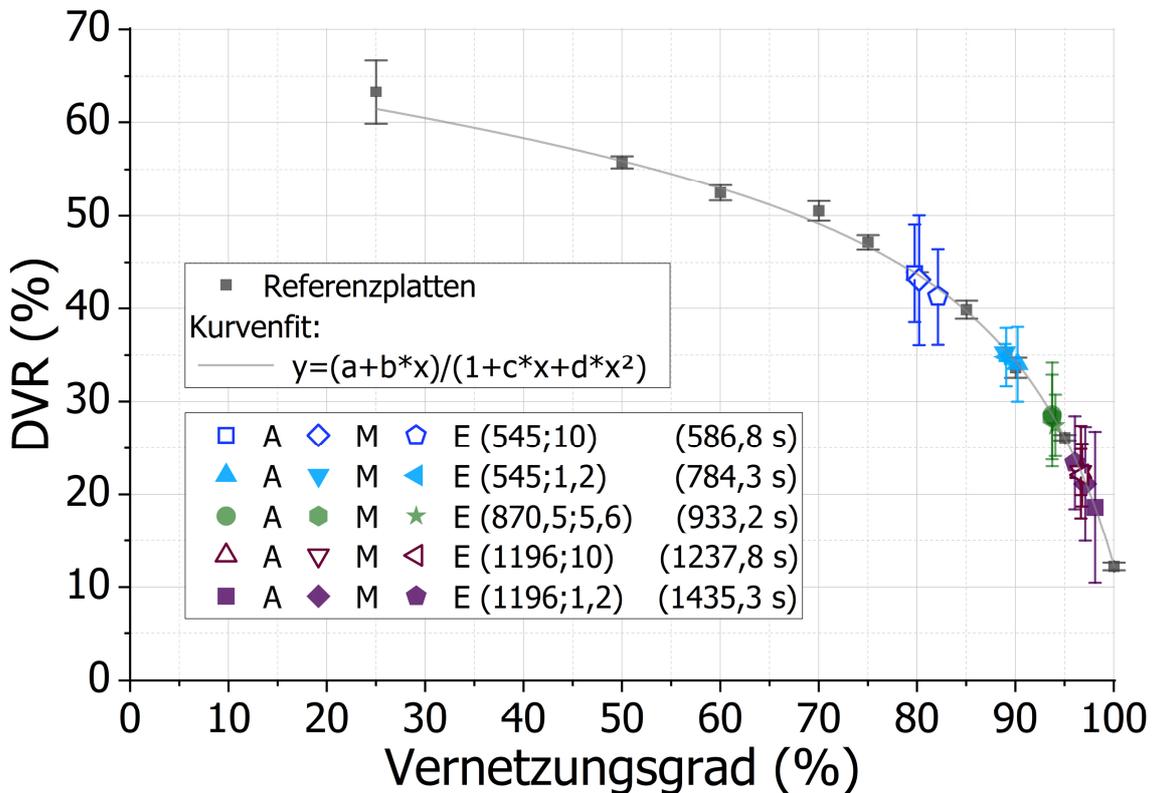


Abbildung 49: Gemessene und ermittelte DVR-Werte der Referenzplatten und der RubExject-Bauteile.

Abbildung 50 zeigt die Vulkanisationskurve mit den eingezeichneten Gesamtzeiten aller Versuchseinstellungen. Der Vernetzungsgrad, welcher sich aus der jeweiligen Gesamtzeit herauslesen lässt, stimmt sehr gut mit dem ermittelten Vernetzungsgrad aus Abbildung 49 überein.

Die Kurvenform zeigt, dass mit steigenden Reaktionszeiten die Auswirkung auf den Vernetzungsgrad abnimmt. Zwischen den beiden kürzesten Gesamtzeiten als auch den beiden längsten Gesamtzeiten liegen jeweils ca. 200 s. Diese ca. 200 s Unterschied bewirken bei den kürzesten Gesamtzeiten 9 % Änderung im Vernetzungsgrad. Bei den längsten Gesamtzeiten ändert sich der Vernetzungsgrad um nur 1 %. Da der DVR mit dem Vernetzungsgrad korreliert, erklärt dies auch, warum mit zunehmender Gesamtzeit sich die Auswirkung auf den DVR verringert.

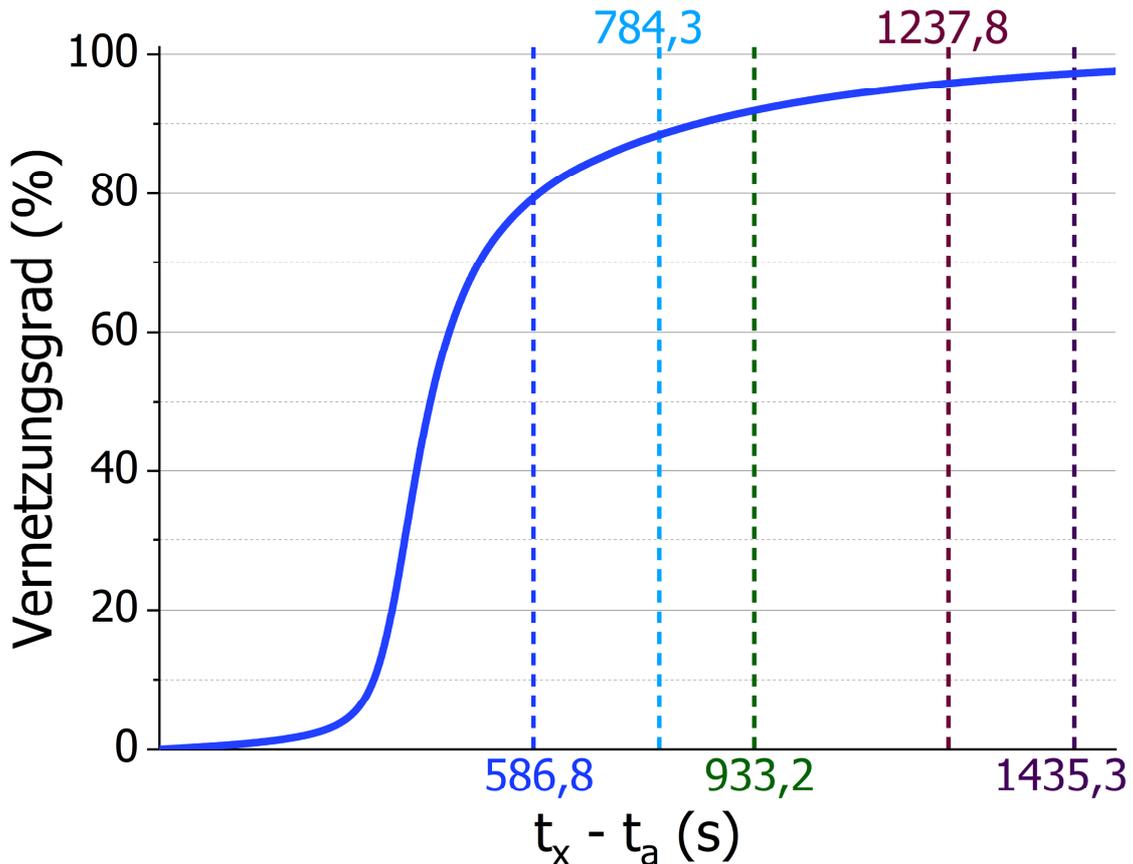


Abbildung 50: Vulkanisationskurve bei 140 °C mit eingezeichneten Gesamtzeiten der Versuchseinstellungen.

Aus allen Ergebnissen und Vergleichen ist abzuleiten, dass ab Vulkanisationszeiten über ca. 850 s der Einspritzvolumenstrom keine relevanten Auswirkungen auf den DVR beziehungsweise auf den Vernetzungsgrad ausübt. Darüber hinaus erzielen Einstellungen mit Vulkanisationszeiten über 850 s immer einen Vernetzungsgrad über 90 %, selbst unter größeren Schwankungen der Einflussgrößen und Störgrößen. Es wurde somit ein stabiler Bereich des RubExject-Verfahrens gefunden, in dem ein robuster Prozess betrieben werden kann.

5 Zusammenfassung

Elastomere besitzen ein Eigenschaftsprofil, welches die Anforderungen aus der Dichtungsbranche optimal erfüllt. Ihre Herstellung ist jedoch, speziell bei großen Abmessungen (über ca. 0,5 m) und komplexen Geometrien, mit einem überdurchschnittlich hohen Aufwand verbunden.

Gängige Verarbeitungsmethoden besitzen allesamt Nachteile, welche keine ideale Herstellung ermöglichen. Aktuell werden Großdichtungen auf Großpressen mit entsprechenden Werkzeugen (hohe Anschaffungskosten) oder in einem sehr aufwendigen und ressourcenintensiven Verfahren spanend aus Halbzeugen hergestellt. Aus diesem Grund ist die Dichtungsbranche immer auf der Suche nach neuen, alternativen Verarbeitungsverfahren.

Im Rahmen des FFG Bridge Projekts „RubExject“ erfolgte die Entwicklung eines neuen Verarbeitungsverfahrens für Elastomere, das auf der patentierten Exjection[®]-Technologie beruht. Dieses soll bei der späteren industriellen Umsetzung die Herstellung von großen, komplexen 3D-Profilen unter Wahrung kleinster Maßtoleranzen ermöglichen.

Die Exjection[®]-Technologie ist eine Kombination von Extrusion und Spritzguss und überwindet deren Nachteile. Bei dieser Technologie ist die gesamte Kavität in einem beweglichen Schlitten eingeformt, welcher zu Beginn des Füllvorgangs still steht. Nachdem sich eine einheitliche Fließfront in Form einer Quellströmung ausgebildet hat (Vorspritzen) verschiebt ein Motor den Schlitten mit einer auf den Einspritzvolumenstrom abgestimmten Geschwindigkeit. Dadurch entkoppelt sich der Druckbedarf von der Fließweglänge. Der sinkende Spritzdruck ermöglicht so die Herstellung längerer Bauteile. Die kürzeren Fließwege und der dadurch geringere Druckbedarf bei der Exjection[®]-Technologie reduziert die Schließkraft, speziell bei langen Bauteilen erheblich. Niedrigere Einspritzdrücke und Schließkräfte erlauben somit die Verwendung kompakterer Maschinenausführungen, wodurch sich auch der Energieverbrauch verringern lässt.

Das Ziel dieser Masterarbeit war es, dieses neu entwickelte Verfahren experimentell zu validieren und das mögliche Prozessfenster für verschiedene Prozessvarianten zu ermitteln. Im Rahmen eines systematischen Versuchsplans wurden die Auswirkung verschiedener Prozesseinstellungen auf einsatzrelevante Größen (= Zielgrößen) wie Druckverformungsrest (DVR) sowie Spannungs- und Dehnungswerte untersucht. Durch gepresste Referenzplatten konnten die mechanischen Eigenschaften der RubExject-Bauteile mit jenen konventionell hergestellter Bauteile verglichen werden.

Die Konstruktion des RubExject-Werkzeugs ermöglicht es zwei verschiedene Prozessvarianten zu untersuchen. Bei der ersten Variante ist die Kavität während des gesamten Verfahrens geschlossen (= Verfahrenseinstellung „geschlossene Kavität“). Bei der zweiten Variante ist das letzte Kalibrierzonenelement abmontiert (= Verfahrenseinstellung „offene Kavität“). Ab einer Bauteilfüllung von ca. 80 % wird somit der Gratbereich des Bauteils nicht mehr von der Kalibrierzone bedeckt.

Im Rahmen einer Füllstudie wurden die optimalen Werte für Vorspritzvolumen, Einspritzvolumen und das Verhältnis zwischen Einspritzvolumenstrom und Verschiebeschlingengeschwindigkeit festgelegt. Anschließend wurde das mögliche Prozessfenster beider

Prozessvarianten ermittelt. Das wichtigste Resultat daraus war, dass es nur bei geschlossener Kalibrierzone und Einspritzzeiten kleiner als die Scorchzeit möglich ist Gutteile zu produzieren –Mit Ablauf der Scorchzeit ist die Viskosität der Schmelze durch Vulkanisation soweit angestiegen, dass der weitere Füllvorgang unmöglich wird–. Einspritzzeiten kleiner als die Scorchzeit führen bei offener Kalibrierzone zu einer Wulstbildung im Bereich wo das Bauteil die Kavität verlässt (das Material ist noch nicht ausreichend vernetzt). Bei beiden Prozessvarianten entstehen unter Einspritzzeiten größer als die Scorchzeit Bindenähte und Reibspuren (aufgrund der Relativbewegung zwischen vulkanisierter Bauteil- und Metalloberfläche).

Innerhalb des möglichen Prozessfensters wurde ein systematischer Versuchsplan abgefahren, wobei Vulkanisationszeit und Einspritzvolumenstrom variiert wurden. Die Auswertung der Zielgrößen zeigte, dass längere Vulkanisationszeiten bei allen Einspritzvolumenströmen zu geringeren DVR führen. Während es bei langen Vulkanisationszeiten keinen Unterschied macht, ob langsam oder schnell eingespritzt wird, erzeugen langsame Einspritzvolumenströme unter kurzen Vulkanisationszeiten einen niedrigeren DVR.

Ein markanter Einfluss der Gesamtzeiten (Einspritzzeit und Vulkanisationszeit) spiegelt sich in allen Ergebnissen wider. Längere Gesamtzeiten führen zu niedrigeren DVR beziehungsweise zu höheren Vernetzungsgraden. Dabei ist es irrelevant, aus welchen Anteilen sich die Gesamtzeit zusammensetzt.

Ab Vulkanisationszeiten über ca. 850 s haben die Einspritzgeschwindigkeit aber auch längere Vulkanisationszeiten keine relevanten Auswirkungen auf den DVR und somit auf den Vernetzungsgrad. Die Vulkanisation befindet sich bereits in einem stabilen Prozessbereich, wo Änderungen der Einflussgrößen nur minimale Auswirkungen auf die Zielgrößen haben.

Die Eigenschaften der RubExject-Bauteile waren über die gesamte Bauteillänge homogen. Durch Prozessüberwachung mithilfe von Sensorik wurde nachgewiesen, dass die Entkopplung des Spritzdrucks von der Fließweglänge zu deutlich niedrigeren Spritzdrücken und Forminnendrücken als beim klassischen Spritzguss von Elastomeren führt.

Ein Eigenschaftsvergleich der RubExject-Bauteile mit jenen der Referenzplatten zeigt, dass mit dem RubExject-Verfahren ein tendenziell geringerer DVR und somit bessere Bauteileigenschaften erzielt werden können. Beim RubExject-Verfahren kommt eine vorgewärmte und vorgescherte Kautschukmasse in der Kavität an. Die dadurch höhere Massetemperatur besitzt einen höheren relativen Reaktionswert. Dieser bewirkt, dass die Vernetzung schneller und gleichmäßiger abläuft. Die Bruchspannungen und Bruchdehnungen sind bei beiden Verfahren sehr ähnlich und liegen bei ca. 17 N/mm² bzw. ca. 250 %.

Unter der Annahme, dass beide Verarbeitungsverfahren bei gleichen Prozessbedingungen gleiche Bauteileigenschaften liefern, wurden die DVR-Werte der RubExject-Bauteile über einen Kurvenfit der Referenzplatten einem eindeutigen Vernetzungsgrad zugeordnet. Aus der Vulkanisationskurve lässt sich mit der jeweiligen Gesamtzeit ebenfalls ein Vernetzungsgrad bestimmen. Diese ermittelten Vernetzungsgrade stimmen für die jeweilige Versuchseinstellung sehr gut miteinander überein.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der experimentellen Validierung des RubExject-Verfahrens sind:

1. Gutteile können nur bei geschlossener Kalibrierzone und Einspritzzeiten kleiner als die Scorchzeit hergestellt werden.
2. Die Bauteileigenschaften der RubExject-Bauteile sind im Vergleich zu den konventionell hergestellten Referenzplatten ähnlich aber tendenziell besser (niedriger DVR der RubExject-Bauteile).
3. Die Gesamtzeit hat einen wesentlichen Einfluss auf den DVR.

Es wurde bewiesen, dass mit dem RubExject-Verfahren erfolgreich Bauteile (mit bemerkenswert geringer Schwimmhautbildung) herstellbar sind. Das ermittelte Prozessfenster eignet sich allerdings nicht für die Herstellung von Großdichtungen, da eine Endlosproduktion nicht möglich ist. Es besteht jedoch das Potential, das RubExject-Verfahren für derzeit noch nicht fertigbare beziehungsweise noch nicht entwickelte Bauteilgeometrien einzusetzen.

6 Abkürzungen und Symbole

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
AWS	Auswerferseite	
b_0	Mittelwert aller Messungen	
$b_{1,} b_2$	Regressionskoeffizient für Haupteffekte	
b_{12}	Regressionskoeffizient für Wechselwirkung	
DoE	design of experiments	
DS	Düsenseite	
DVR	Druckverformungsrest	%
F_a	Minimalkraft	N
FIFO	first in - first out	
FILO	first in - last out	
F_t	Schubkraft	N
F_∞	Maximalkraft	N
h_0	ursprüngliche Dicke des Probenkörpers	mm
h_1	Dicke des Probenkörpers nach der Erholung	mm
h_s	Höhe des Abstandstückes	mm
NBR	Nitrile Butadiene Rubber	
RRW	relativer Reaktionswert	
RW	Reaktionswert	
R^2	Bestimmtheitsmaß	-
t_a	Zeit bis F_a	s
t_e	Einspritzzeit	s
t_i	Inkubationszeit	s
t_{scorch}	Scorchtime	s
t_x	Umsatzzeit	s
$t_x - t_a$	Reaktionszeit	s
UHF	Ultra High Frequency	
x	Vernetzungsgrad	%
x_1, x_2	Faktor 1, 2	
Y	Zielgröße	

6. Abkürzungen und Symbole

α	Alpha für Ausschluss	-
ε_B	Bruchdehnung	%
σ_B	Bruchspannung	N/mm ²

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gewählte Einstellungen am D-RPA 3000.....	18
Tabelle 2:	Einstellungen zur Herstellung der Referenzplatten.....	20
Tabelle 3:	Temperiersetup der Spritzversuche.....	23
Tabelle 4:	Daten der in die Kavität eingebauten Druck- und Temperatursensoren.	24
Tabelle 5:	Auszug aus dem unsystematischen Versuchsplan der NBR Spritzversuche. ...	28
Tabelle 6:	Versuchsplan (140 °C Werkzeugwandtemperatur).....	29
Tabelle 7:	Zeiten der Bewegungsabläufe für die verschiedenen Einstellungen des Versuchsplans.....	30
Tabelle 8:	Fließfrontabstände bei unterschiedlichem Vorspritzvolumen.	39
Tabelle 9:	Fließfrontabstände der Short Shots mit 35 cm ³ Vorspritzvolumen.	40
Tabelle 10:	Ergebnisse der Bauteilvermessung; Messbereiche a bis h in Abbildung 25. ...	55
Tabelle 11:	Einstellungen an der Engel Victory Electric 940/130 für systematische Versuche, Ausspritzversuche, Dosier- und Massetemperaturmessung.....	71
Tabelle 12:	Ergebnisse der DVR-Prüfungen aus den Referenzplatten.....	71
Tabelle 13:	Ergebnisse der Zugprüfungen aus den Referenzplatten.	71
Tabelle 14:	DVR-Ergebnisse der RubExject-Bauteile.....	72
Tabelle 15:	Bruchspannungsergebnisse aus den Zugversuchen der RubExject-Bauteile...	72
Tabelle 16:	Bruchdehnungsergebnisse aus den Zugversuchen der RubExject-Bauteile. ...	72
Tabelle 17:	Gemessene DVR der RubExject-Bauteile und (aus Kurvenfit der Referenzplatten) errechneter zugehöriger Vernetzungsgrad.	72

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: NBR Strukturformel; Acrylnitril (links), Butadien (rechts) [8].	2
Abbildung 2: Vulkameterkurve einer Kautschukmischung mit Plateau; F_a Minimalkraft, F_t Schubkraft bei der Zeit t_x ; F_∞ Maximalkraft, t_a Zeit bis F_a ; t_i Inkubationszeit; t_x Umsatzzeit oder Vulkanisationszeit; $t_x - t_a$ Reaktionszeit; in Anlehnung an [39].	4
Abbildung 3: Temperatur- und Reaktionswertverlauf (Naturkautschuk); Einfluss der Rohlingvorwärmung bei Pressenvulkanisation (links): (a) ohne Rohlingvorwärmung (30 °C), (b) mit Rohlingvorwärmung (80 °C); Vergleich der Formgebungsverfahren (rechts): (a) Pressverfahren, (b) Transferpressverfahren, (c) Spritzgießverfahren [39].	5
Abbildung 4: Pressverfahren für Elastomere [1].	6
Abbildung 5: Transferpressverfahren für Elastomere [1].	7
Abbildung 6: Spritzgusszyklus für Elastomere; (a) Aufdosieren von streifenförmigen Material, (b) Einspritzen in das beheizte Werkzeug, (c) Auswerfen des vulkanisierten Bauteils und Aufdosieren von neuem Material; in Anlehnung an [1].	8
Abbildung 7: (a) Kolbenspritzeinheit mit Schneckenvorplastifizierung [39] (b) Schneckenkolben Spritzeinheit [39] (c) Ausbürsteinrichtung zum Entformen von Elastomerteilen [2].	9
Abbildung 8: Extrusionsanlagen für Elastomere mit Extruder und Vulkanisationseinheit: (a) Salzbad, (b) Heißluft mit vorgeschalteter UHF-Anlage [1].	10
Abbildung 9: Prinzipskizze der Exjection [®] -Technologie für Thermoplaste [49].	12
Abbildung 10: Endloskonzept der Exjection [®] -Technologie [27].	12
Abbildung 11: Darstellung des stabilen Prozessbereichs; in Anlehnung an [24].	17
Abbildung 12: Streifenförmiger NBR Batch.	18
Abbildung 13: Messanordnung am D-RPA 3000; in Anlehnung an [31].	19
Abbildung 14: Presswerkzeug (links) zur Herstellung von Referenzplatten (rechts) mit den Bereichen zur (a) Entnahme von DVR-Prüfkörper, (b) Entnahme von Zugprüfkörper, (c) Schwimmhaut.	19
Abbildung 15: Spritzgießmaschine mit RubExject-Werkzeug; (a) Elektromotor, (b) Führungselemente, (c) auswerferseitige Aufspannbacke, d) zusätzliche horizontale Führung, (e) Bedieneinheit, (f) Arbeitsplatz für Messtechnik, (g) Freiraum für Temperierschläuche, (h) Spritzeinheit mit streifenförmigen Material.	20
Abbildung 16: RubExject-Werkzeug (a) Auswerferseitige Werkzeughälfte, (b) düsenseitige Werkzeughälfte, (c) düsenseitige Ansicht auf das gesamte geschlossene Werkzeug [52].	22

Abbildung 17: Werkzeugtemperierung mit Ölkreisläufen (Rot) und Wasserkreisläufen (Blau); Erklärung zur Beschriftung von a) bis g) in Tabelle 3. (1) Kaltkanal, (2) Gleitführungen, (3) Spindel, (4) Kavität, (5) Verschiebeschlitten (bewegliche Teile), (6) Backen-Schließkonzept.	23
Abbildung 18: Bauteilabmessungen (in mm); Seitenansicht (unten) und Bauteilquerschnitt (oben).....	24
Abbildung 19: Oberflächentemperatur am Werkzeug in °C; Auswerferseite mit Backe links, Kavität (Temperatursensoren grün markiert) und Backe rechts (links); Kalibrierzonenelemente und Vorlaufzone (blau markiert) (rechts).	25
Abbildung 20: Verfahrenspositionen des RubExject-Werkzeugs (a) Vorspritzen, (b) Einspritzen bei mittlerer Bauteilfüllung, (c) vollständig eingespritzt, d) Vulkanisationsposition – letztes Kalibrierzonenelement gelb markiert, (e) Detailansicht des Bauteilendes, (f) Detailansicht des Bauteilanfangs für die Verfahrensvariante „offene Kavität“.	27
Abbildung 21: Ablauf des RubExject-Zyklus; während des Zurückfahrens geänderte Werte – hellgrau-punktiert, manuell ausgeführte Schritte – grau-strichliert.	31
Abbildung 22: Setup der (a) Ausspritzversuche und (b) Massetemperaturmessung; (c) eingestochener Lanzenfühler zur Dosiertemperaturmessung.	32
Abbildung 23: Entnahmepositionen der DVR- und Zugprüfkörper aus der Referenzplatte.	33
Abbildung 24: Entnahmepositionen der DVR- und Zugprüfkörper aus dem RubExject-Bauteil; A = Bauteilanfang, M = Bauteilmitte, E = Bauteilende.	33
Abbildung 25: Messbereiche der Bauteilvermessung.	34
Abbildung 26: Vulkanisationskurven bei verschiedenen Temperaturen.	36
Abbildung 27: DVR-Werte der Referenzplatten und dazu passender Kurvenfit.....	37
Abbildung 28: Bruchspannung und Bruchdehnung der Zugproben aus den Referenzplatten.	37
Abbildung 29: Füllstudie; Vorderseite (links), Rückseite (rechts); (a) Falten, (b) Dellenstruktur; Versuchseinstellungen in Tabelle 5.....	38
Abbildung 30: Short Shots mit 35 cm ³ Vorspritzvolumen; (a) Anfangsbereich; Versuchseinstellungen in Tabelle 5.	39
Abbildung 31: Perfektes Bauteil (#37).....	40
Abbildung 32: Forminnendruckverlauf eines Gutteils (#37); (a) Vorspritzen, (b) Einspritzen, (c) restliche Schlittenbewegung, (d) Beginn Vulkanisationszeit.	41
Abbildung 33: Studie zum Einspritzvolumenstrom bei geschlossener Kavität mit eingerahmten Defekten; Vorderseite (links), Rückseite (rechts); Versuchseinstellungen in Tabelle 5.	43
Abbildung 34: Verarbeitungsfenster und Scorchzeit bei 140 °C.....	44
Abbildung 35: Studie zum Einspritzvolumenstrom bei offener Kavität; Vorderseite (links), Rückseite (rechts); Versuchseinstellungen in Tabelle 5.	45

Abbildung 36: Studie zum Einspritzvolumenstrom bei offener Kavität und unterschiedlich temperierten Werkzeugbereichen; Vorderseite (links), Rückseite (rechts); Versuchseinstellungen in Tabelle 5.	46
Abbildung 37: Prozessbereiche des RubExject-Verfahrens.	47
Abbildung 38 Wechselwirkungsdiagramm der RubExject-Bauteile mit dem Druckverformungsrest (DVR) als Zielgröße.	49
Abbildung 39: Repräsentative Messkurve der Zugversuche.....	50
Abbildung 40: Wechselwirkungsdiagramm der RubExject-Bauteile mit der Bruchspannung als Zielgröße.	51
Abbildung 41: Wechselwirkungsdiagramm der RubExject-Bauteile mit der Bruchdehnung als Zielgröße.	52
Abbildung 42: Verläufe der spez. Spritzdrücke, der Ausspritzdrücke sowie der Kavitätsfülldrücke.	53
Abbildung 43: Spez. Spritzdruckverlauf beim klassischen Spritzguss; in Anlehnung an [39].	54
Abbildung 44: Forminnendruckverlauf; S = Sensor, o = oben, m = mitte, u = unten.	55
Abbildung 45: Dosiertemperaturmessung (links), Massetemperaturmessung (rechts).	56
Abbildung 46: DVR-Werte der RubExject-Bauteile im Vergleich zu jenen der Referenzplatten (_P).	58
Abbildung 47: Bruchspannungen der RubExject-Bauteile im Vergleich zu jenen der Referenzplatten (_P).	59
Abbildung 48: Bruchdehnungen der RubExject-Bauteile im Vergleich zu jenen der Referenzplatten (_P).	59
Abbildung 49: Gemessene und ermittelte DVR-Werte der Referenzplatten und der RubExject-Bauteile.	60
Abbildung 50: Vulkanisationskurve bei 140 °C mit eingezeichneten Gesamtzeiten der Versuchseinstellungen.	61
Abbildung 51: Verfahren zur Herstellung von Elastomerformteilen [39] o neutrale Aussage; + Hauptvorteile; - Hauptnachteile.	73
Abbildung 52: RubExject-Werkzeug in geschlossener oberer Position (links) und Schnittansicht der Düsenseite (rechts) [52].	74
Abbildung 53: RubExject-Werkzeug in geschlossener Position; Ansicht von oben (links) und unten (rechts) [52].....	75

9 Anhang

Tabelle 11: Einstellungen an der Engel Victory Electric 940/130 für systematische Versuche, Ausspritzversuche, Dosier- und Massetemperaturmessung.

Dosiergeschwindigkeit	0,1	m/s
Spez. Staudruck	50	bar
Dosiervolumen	240	cm ³
Vorspritzvolumen	35	cm ³
Nachdruck	50	bar
Schneckendurchmesser	50	mm
Verschiebeschlittengeschwindigkeit bei 1 cm ³ /s	2,6	mm/s
Verschiebeschlittengeschwindigkeit bei 10 cm ³ /s	26	mm/s
Verschiebeschlittengeschwindigkeit bei 1,2 cm ³ /s	3,1	mm/s
Verschiebeschlittengeschwindigkeit bei 5,6 cm ³ /s	14,6	mm/s
Schnecken Anpressdruck	60	kN

Tabelle 12: Ergebnisse der DVR-Prüfungen aus den Referenzplatten.

x	Mittelwert DVR	Standardabweichung
%	%	%
25	63,27	3,42
50	55,76	0,64
60	52,47	0,82
70	50,53	1,06
75	47,15	0,77
80	43,46	0,39
85	39,86	0,96
90	33,57	1,07
95	26,15	0,29
100	12,23	0,40

Tabelle 13: Ergebnisse der Zugprüfungen aus den Referenzplatten.

x	Mittelwert σ_B	Standardabweichung σ_B	Mittelwert ε_B	Standardabweichung ε_B
%	N/mm ²	N/mm ²	%	%
25	18,1	0,8	247,9	45,4
50	17,3	1,2	227,5	45,3
60	18,1	0,4	260,0	15,0
70	18,2	0,7	261,9	25,3
75	17,3	1,2	223,1	43,9
80	18,0	1,9	259,5	46,6
85	18,3	0,8	262,7	16,1
90	18,1	0,6	253,6	16,7
95	16,3	2,0	213,6	37,4
100	17,7	1,0	225,4	15,1

Tabelle 14: DVR-Ergebnisse der RubExject-Bauteile.

Vulkanisationszeit		Einspritzvolumenstrom		Versuch	Druckverformungsrest DVR			Stabw. von DVR		
					A	M	E	A	M	E
-	s	-	cm ³ /s	#	%			%		
0	870,5	0	5,6	1,3,7	28,6	28,6	28,0	2,9	1,9	2,0
-1	545	1	10	5	43,8	43,5	42,1	5,3	7,0	5,2
1	1196	-1	1,2	6	18,6	21,4	23,9	2,7	3,9	3,1
1	1196	1	10	2	22,4	22,4	22,1	5,0	2,5	3,4
-1	545	-1	1,2	4	34,0	35,6	35,5	4,0	1,0	3,2

Tabelle 15: Bruchspannungsergebnisse aus den Zugversuchen der RubExject-Bauteile.

Vulkanisationszeit		Einspritzvolumenstrom		Versuch	Bruchspannung σ_B			Stabw. von σ_B		
					A	M	E	A	M	E
-	s	-	cm ³ /s	#	N/mm ²			N/mm ²		
0	870,5	0	5,6	1,3,7	16,8	16,4	17,3	0,7	1,5	0,3
-1	545	1	10	5	17,6	17,3	17,5	0,5	1,1	0,4
1	1196	-1	1,2	6	17,5	17,2	16,7	0,4	1,0	1,2
1	1196	1	10	2	16,1	17,9	17,6	1,2	0,6	0,6
-1	545	-1	1,2	4	17,4	17,6	17,8	1,2	0,4	0,9

Tabelle 16: Bruchdehnungsergebnisse aus den Zugversuchen der RubExject-Bauteile.

Vulkanisationszeit		Einspritzvolumenstrom		Versuch	Bruchdehnung ε_B			Stabw. von ε_B		
					A	M	E	A	M	E
-	s	-	cm ³ /s	#	%			%		
0	870,5	0	5,6	1,3,7	247,4	237,3	259,7	17,3	26,9	13,0
-1	545	1	10	5	267,4	255,3	264,9	13,7	23,8	8,7
1	1196	-1	1,2	6	261,0	249,7	230,3	5,2	18,9	22,9
1	1196	1	10	2	227,4	248,5	256,2	21,5	9,7	9,3
-1	545	-1	1,2	4	256,2	271,0	268,0	10,7	7,3	15,1

Tabelle 17: Gemessene DVR der RubExject-Bauteile und (aus Kurvenfit der Referenzplatten) errechneter zugehöriger Vernetzungsgrad.

Vulkanisationszeit		Einspritzvolumenstrom		Versuch	DVR	x	DVR	x	DVR	x
					A		M		E	
-	s	-	cm ³ /s	#	%	%	%	%	%	%
0	870,5	0	5,6	1,3,7	28,6	93,7	28,6	93,7	28,0	94,5
-1	545	1	10	5	43,8	79,8	43,5	80,2	42,1	82,1
1	1196	-1	1,2	6	18,6	98,1	21,4	97,1	22,1	96,8
1	1196	1	10	2	22,4	96,7	22,4	96,7	22,1	96,8
-1	545	-1	1,2	4	34,0	90,2	35,6	88,9	35,5	89,0

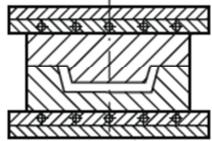
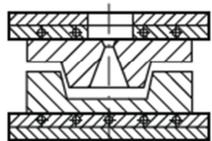
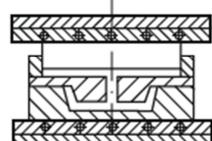
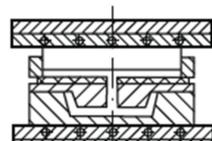
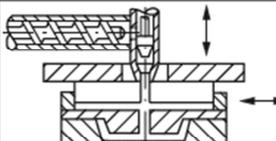
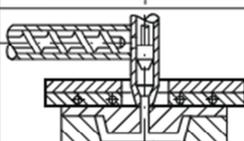
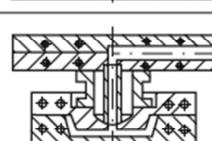
	Verfahren	Symbol	Hauptmerkmale	Hauptanwendungen
Preßverfahren (CM)	Pressen (CM)		<ul style="list-style-type: none"> o Verpressen eines vorgeformten Rohlings im Werkzeug + Investitionskosten - Fertigungskosten 	<ul style="list-style-type: none"> o Kleine Serien, große Teile o Probekörper o Muster
	Spritzprägen (ICM)		<ul style="list-style-type: none"> o Verpressen der vorplastifizierten Mischung + Mischungsverteilung ohne Kanäle - Werkzeug-Know-How 	<ul style="list-style-type: none"> o Flächige Membranen und Dichtungen o kleine Präzisionsformteile o hohe Werkzeugteiligkeiten
Transferpreßverfahren (TM)	Transferpressen (TM)		<ul style="list-style-type: none"> o Transferieren der dosierten Mischung in den Formhohlraum + Maßgenauigkeit - Mischungsabfall 	<ul style="list-style-type: none"> o Komplizierte Präzisionsformteile o nacharbeitfreie Teile, wenn Flashless-Ausführung
	Transferpressen mit Kaltkanal (TM-K)		<ul style="list-style-type: none"> o Transferieren der vorgewärmten Mischung + geringer Mischungsabfall - Verfahrenssicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> o Komplizierte Präzisionsformteile o nacharbeitfreie Teile, wenn Flashless-Ausführung
	Transferspritzpressen (ITM / ITM-K)		<ul style="list-style-type: none"> o Transferieren der vorplastifizierten Mischung + gleiche Fließgeschichte - Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> o Große Serien kleiner Formteile, auch Gummi-Metall o nacharbeitfreie Teile, wenn Flashless-Ausführung
Spritzgießverfahren (IM)	Spritzgießen (IM)		<ul style="list-style-type: none"> o Einspritzen der vorplastifizierten Mischung + Fertigungskosten - Werkzeugkosten 	<ul style="list-style-type: none"> o je nach Teilgebiet mittlere bis große Serien normaler Formteile o Gummi-Metall-Teile o automatisierte Fertigungen
	Spritzgießen mit Kaltkanal (IM-K)		<ul style="list-style-type: none"> o Einspritzen der vorplastifizierten Mischung durch temperierte Verteilerkanäle + Materialabfall - Werkzeugkosten 	<ul style="list-style-type: none"> o große Serien normaler Formteile o hohe Werkzeugteiligkeiten o hoher Werkstoffpreis
	Spritzgießen mit Mehrstationen (IM-M)		<ul style="list-style-type: none"> o Trennen von Einspritz- und Vulkanisierstationen + Fertigungskosten bei Großserien - Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> o sehr große Serien o automatisierte Fertigungen o nacharbeitsfreie Teile wenn Einnest-Werkzeuge

Abbildung 51: Verfahren zur Herstellung von Elastomerformteilen [39]
 o neutrale Aussage; + Hauptvorteile; - Hauptnachteile.

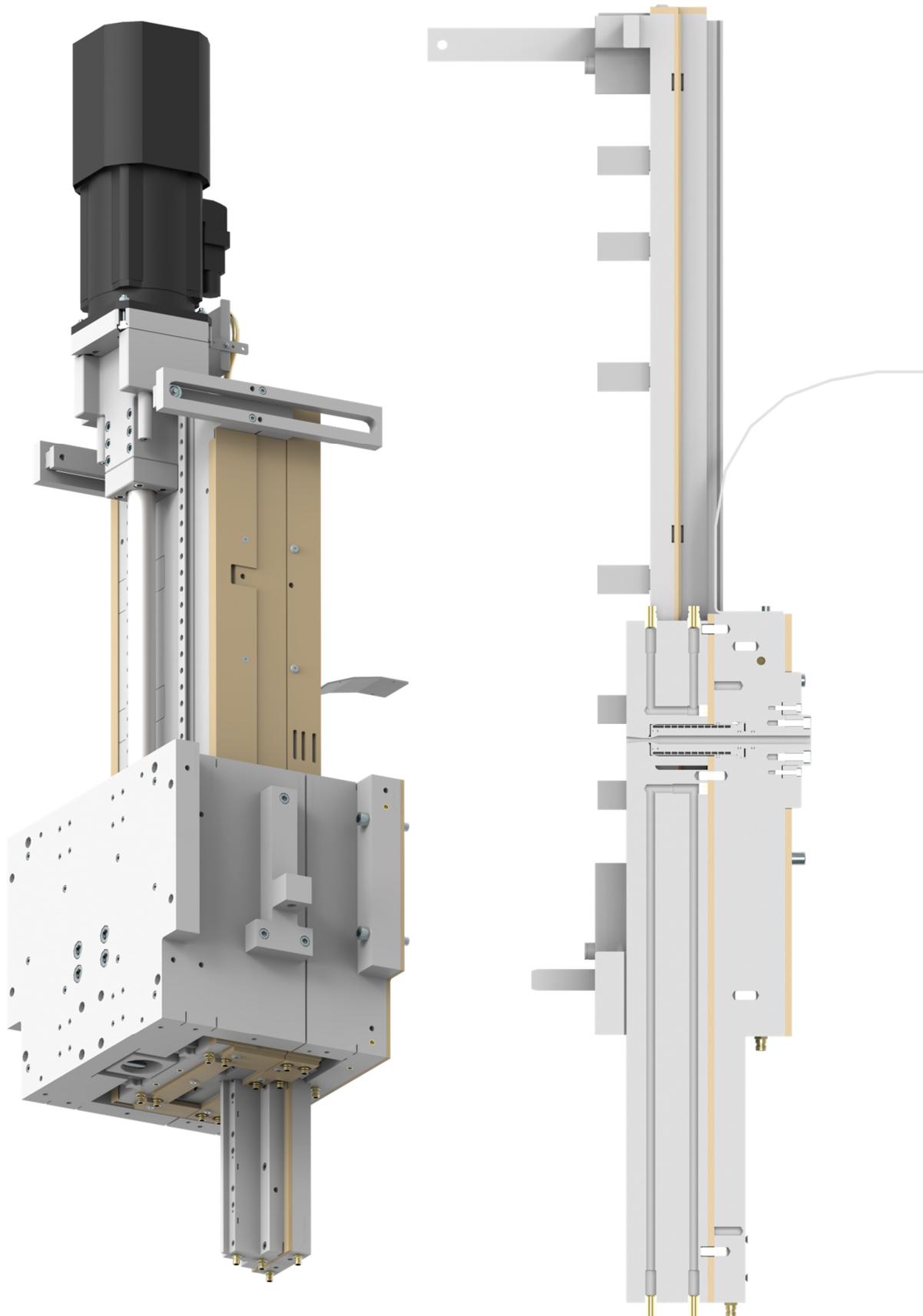


Abbildung 52: RubExject-Werkzeug in geschlossener oberer Position (links) und Schnittansicht der Düsenseite (rechts) [52].

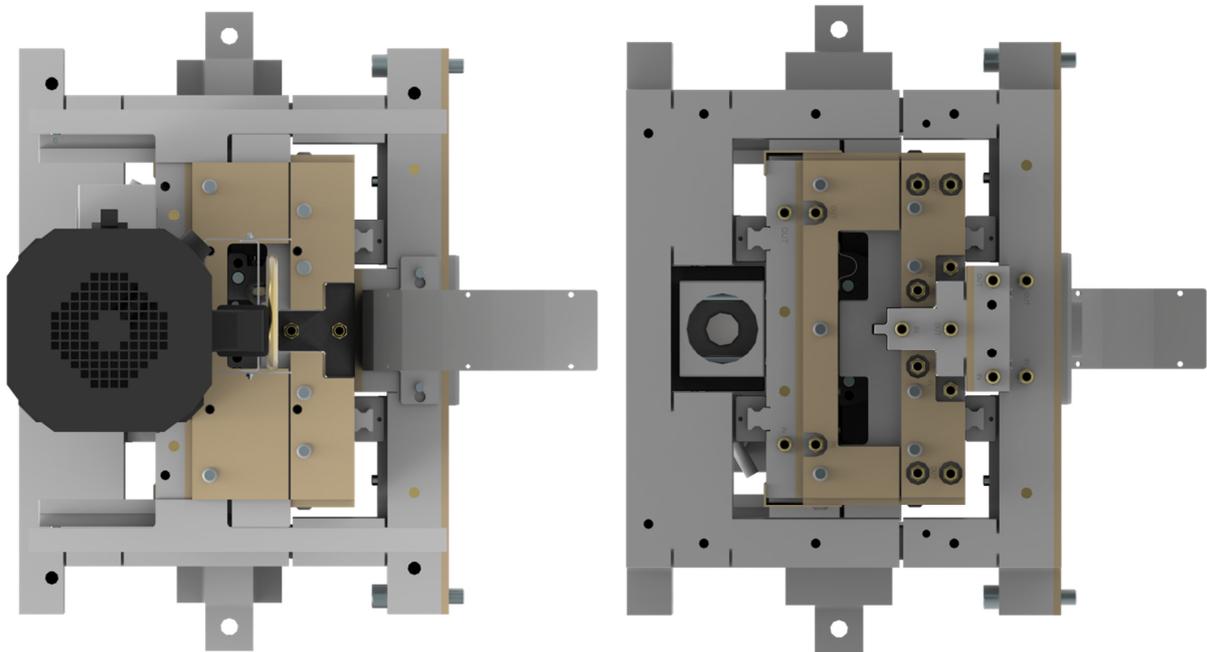


Abbildung 53: RubExject-Werkzeug in geschlossener Position; Ansicht von oben (links) und unten (rechts) [52].

10 Literaturverzeichnis

- [1] Abts G.: Einführung in die Kautschuktechnologie, 2. Aufl., Hanser, München, 2019
- [2] ARBURG GmbH + Co KG: Elastomere in Form gebracht, Standard-SGM+Ausstattungspaket=Elastomer-Spritzgießen, Kautschuk, Gummi, Kunststoffe (10), 2005, S. 492–493
- [3] Beitz F.: 1000 Tipps zum Spritzgießen, Band 10: Kautschuk (Gummi) - Thermoplastische Elastomere, Beuth Praxis, 1. Aufl., Beuth Verlag, Berlin, 2017
- [4] Blobner U., Richter B.: Druckverformungsrestprüfung (DVR Prüfung): Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung, 2015
- [5] Blobner U., Richter B.: Prüfmethode zu Sondereigenschaften der wichtigsten Dichtungswerkstoffe, 2015
- [6] Blobner U., Richter B.: Zugversuch: Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung 2014
- [7] Brown R.: Physical testing of rubber, 4. Aufl., Springer, New York, NY, 2006
- [8] Chemietechnik R.: Acrylnitril-Butadien-Kautschuk, <https://www.rct-online.de/de/RctGlossar/detail/id/34> (Zuletzt abgerufen: 02.12.2019)
- [9] DESMA: Produktion in zwei Ebenen senkt Kosten, 2018, <https://www.desma.biz/en/desma-news/news-archive/newsdetails/article/produktion-in-zwei-ebenen-senkt-kosten.html> (Zuletzt abgerufen: 22.01.2020)
- [10] Diekmann J.: Der Einfluss der Netzknotendichte von peroxidisch vernetztem EPDM auf die thermisch-oxidative Alterungseigenschaft und den Druckverformungsrest, GRIN Verlag GmbH, München, 2008
- [11] Dijkhuis K.A.J., Noordermeer J.W.M., Dierkes W.K.: The relationship between crosslink system, network structure and material properties of carbon black reinforced EPDM, European Polymer Journal 45 (11), 2009, S. 3302–3312
- [12] DIN 53504:2017-03, Prüfung von Kautschuk und Elastomeren_ - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch
- [13] DIN 53529-1:1983-03, Prüfung von Kautschuk und Elastomeren; Vulkametrie; Allgemeine Arbeitsgrundlagen
- [14] DIN EN ISO 9000:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme_ - Grundlagen und Begriffe (ISO_9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_9000:2015
- [15] DIN EN ISO 9004:2018-08, Qualitätsmanagement_ - Qualität einer Organisation_ - Anleitung zum Erreichen nachhaltigen Erfolgs (ISO_9004:2018); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_9004:2018
- [16] DIN ISO 815-1:2016-09, Elastomere oder thermoplastische Elastomere_ - Bestimmung des Druckverformungsrestes_ - Teil_1: Bei Umgebungstemperaturen oder erhöhten Temperaturen (ISO_815-1:2014)
- [17] Domininghaus H., et al.: Kunststoffe, Eigenschaften und Anwendungen, VDI-Buch, 8. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, 2012
- [18] Ecker H.: Drift bei Forminnendruckensensoren, mündlich, Petersbaumgarten, 2020
- [19] Ehab E.E., Farid S.A.: Chemical kinetics of vulcanisation and compression set, European Polymer Journal 37 (2), 2001, S. 329–334
- [20] Farid A.S., Arunashanthi K.D.: Analysis of Marching-modulus Rubber Rheograms, Polymers and Polymer Composites 21 (6), 2013, S. 377–386

- [21] Fasching M.: Herstellung von Großdichtungen, mündlich, Judenburg, 2020
- [22] Fasching M.: Robust Processing in Rubber Injection Molding Using Advanced Simulation Methods and Material Data, Doctoral Thesis an der Montanuniversität Leoben, Leoben, 2015
- [23] Gevatter H.-J., Grünhaupt U.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion, VDI-Buch, 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2006
- [24] Gundlach C.: Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung, Zugl.: Kassel, Univ., Diss, 2004, Kassel Univ. Press, Kassel, 2004
- [25] Hedderich J., Sachs L.: Angewandte Statistik, Methodensammlung mit R, 16. Aufl., Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2016
- [26] Hutterer T.: laufende Dissertation, Montanuniversität Leoben, Leoben
- [27] IB STEINER: IB STEINER | Polymer engineering and EXJECTION technology, <http://www.ibsteiner.com/index.php/de/> (Zuletzt abgerufen: 28.01.2020)
- [28] Kerschbaumer R.C., et al.: Comparison of steady-state and transient thermal conductivity testing methods using different industrial rubber compounds, Polymer Testing 80, 2019, S. 106121
- [29] Kistler Group: Test & Measurement Druck, Messausrüstung für anspruchsvolle T&M-Anwendungen, <https://www.kistler.com/?type=669&fid=542&model=download&callee=frontend> (Zuletzt abgerufen: 24.12.2019)
- [30] Kleppmann W.: Versuchsplanung, Produkte und Prozesse optimieren, 10. Aufl., Hanser, Carl, München, 2020
- [31] MonTech Rubber Testing Solutions: Moving Die Rheometer, https://www.rubber-testing.com/wp-content/uploads/EN_MonTech-Moving-Die-Rheometer_low.pdf (Zuletzt abgerufen: 30.11.2019)
- [32] Montgomery D.C.: Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2017
- [33] Mülner M.: Großdichtungen stellen besondere Anforderungen, Bewährte und neue Verarbeitungstechniken und neue Materialien sinnvoll kombinieren, DICHT!digital 01/2018 |
- [34] Pazur R.J., Walker F.J.: State of cure measurements in peroxide and sulfur cured EPDM, Rubber World (240), 2009, S. 25–34
- [35] Pruneda F., et al.: Thermal characterization of nitrile butadiene rubber (NBR)/PVC blends, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 80 (1), 2005, S. 187–190
- [36] Pühl T., Steiner G.: Die Kavität kommt zum Anschnitt, Exjection: Reif für die Serie, Plastverarbeiter, 2009, S. 76–78
- [37] Richter B., Blobner U.: FACHWISSEN SCHADENSANALYSE VON ELASTOMERBAUTEILEN, Thermische Überbeanspruchung "Überhitzung", 2017
- [38] Rinnbauer M.: Technische Elastomerwerkstoffe, Basis für Hightech-Lösungen in der Dichtungs- und Schwingungstechnik, Die Bibliothek der Technik, Bd. 293, Verl. Moderne Industrie, Landsberg, 2006
- [39] Röthemeyer F., Sommer F.: Kautschuk-Technologie, Werkstoffe - Verarbeitung - Produkte, Hanser eLibrary, 3. Aufl., Hanser, München, 2013

- [40] Sattler GmbH: NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk), 2019, <https://www.sattler-scm.de/lexikon/nbr/> (Zuletzt abgerufen: 02.12.2019)
- [41] Schwarz T.: Herstellung geometrisch komplexer Geometrien mit Hinterschneidungen, Judenburg, 2015
- [42] Schwarzl F.R.: Polymermechanik, Struktur und mechanisches Verhalten von Polymeren, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1990
- [43] Seal Maker Produktions- und Vertriebs GmbH: Dichtungsschweißen, https://www.seal-maker.com/fileadmin/user_upload/downloads/info_center/Werkzeuge/Werkzeugkoffer_Schweissen/Infoblatt_Schweissen_v17_01_web_de.pdf (Zuletzt abgerufen: 17.12.2019)
- [44] SKF Sealing Solutions Austria GmbH: Industrielösungen, <https://www.skf.com/at/industry-solutions/index.html> (Zuletzt abgerufen: 01.12.2019)
- [45] SKF Sealing Solutions Austria GmbH: Kundenspezifisch gedrehte Dichtungen, Kernkompetenzen, <https://www.skf.com/binary/78-129114/0901d19680197619-11311-DE-Kundenspezifisch-gedrehte-Dichtungen---Kernkompetenzen.pdf> (Zuletzt abgerufen: 02.12.2019)
- [46] SKF Sealing Solutions Austria GmbH: SKF SEAL JET, NG 040 / NG 060 machines, https://www.skf.com/binary/78-209941/0901d19680389fc9-12602_1_EN_2017_SKF-SEAL-JET-040-060-machines.pdf
- [47] SKF Sealing Solutions Austria GmbH: Wellendichtringe mit großem Durchmesser, <https://www.skf.com/at/products/seals/industrial-seals/machined-seals/large-diameter-seals/index.html> (Zuletzt abgerufen: 01.12.2019)
- [48] Steiner G., Eichler H.: Dem Spritzgießen um Längen voraus, *Kunststoffe* (4), 2008
- [49] Steiner G., Krivec T.: Exjection®: Spritzguss und Extrusion als Einheit erfolgreich, *Österr. Kunststoff-Zeitschrift* 40 (3/4), 2009, S. 48–52
- [50] Steiner G.: Anwendung der Exjection-Technologie, E-Mail (Zuletzt abgerufen: 02.03.2020)
- [51] Steiner G.: Dreidimensional endlos Spritzgießen, *Österr. Kunststoff-Zeitschrift* 43 (9/10), 2012, S. 216–218
- [52] Stieger S.: laufende Dissertation, Montanuniversität Leoben, Leoben
- [53] xpress seals GmbH: Großdichtungen für Industrie & Handel, https://www.xpress-seals.com/de/do_detail.php?ListID=8&JoinTo=1&language=de (Zuletzt abgerufen: 01.12.2019)
- [54] Zaimova D., Bayraktar E., Dishovsky N.: State of cure evaluation by different experimental methods in thick rubber parts, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* (44/2), 2011, S. 161–167