

**Verfahrenstechnische Analyse eines
integrierten Systems zur
beschleunigten Rezepturentwicklung auf
Basis einer vollelektrischen 2K-Spritzgießmaschine und
der Methoden des HTS (High Throughput Screening)**

Diplomarbeit

von

Johannes Brunmayr



Betreuung: Prof. Walter Friesenbichler, Dr. Erwin Bacher, DI Gerhard Bäck

Leoben, Dezember 2009

Verfahrenstechnische Analyse eines integrierten Systems zur beschleunigten Rezepturentwicklung auf Basis einer vollelektrischen 2K-Spritzgießmaschine und der Methoden des HTS (High Throughput Screening)

Kurzfassung

Die Firma Polymaterials AG (Kaufbeuren, DE) entwickelte in Zusammenarbeit mit der Firma Engel GmbH (Schwertberg, AT) ein System zur beschleunigten Rezepturentwicklung auf einer vollelektrischen 2K-Spritzgießmaschine im Rahmen eines integrierten Systems basierend auf den Methoden des HTS. Das vollständige HTS-System besteht aus der sogenannten PDWB (Product Design Workbench)-Software zur Versuchsplanung und Datenauswertung, sowie aus den Komponenten Dosierung, distributives Mischen, Spritzgießen und Prüfung. Kernkomponente der Anlage ist eine vollelektrische Zweikomponenten-Spritzgießmaschine.

Ziel dieser Diplomarbeit war es, das HTS-Konzept weiterzuentwickeln und die Eignung des Systems für die Praxis zu prüfen. Ebenso war eine Literaturrecherche über die geschichtliche Entwicklung des Spritzgießcompoundierens und den Einsatz von statischen Mischelementen im Spritzgießen durchzuführen.

Durch die Literaturrecherche wurde klar, dass es zurzeit kein vergleichbares Konzept zur schnellen Rezepturentwicklung gibt. Das klassische Compounding mittels Extruder lässt sich durch das HTS-System teilweise ersetzen und ist als Ergänzung und Erweiterung anzusehen.

Zur Weiterentwicklung der Maschine, insbesondere der Fähigkeit, die Schmelzeströme der beiden Plastifizieraggregate während des gesamten Formfüllvorganges mit einem definierten Volumenverhältnis zu mischen, wurden Probekörper durch Coinjektion von reiner Thermoplastschmelze und mit Füllstoff versetztem Thermoplast hergestellt. Die produzierten Probekörper und die ins Freie gespritzten Stränge wurden auf ihren Füllstoffgehalt (Eisenpulver) hin untersucht. Es zeigte sich, dass der Füllstoff einen ansteigenden Gehalt über die Fließweglänge aufwies, wobei der Sollwert stets unterhalb des Mittelwertes lag. Um hier Verbesserungen zu erzielen, wurden Versuche bei veränderten Einspritzbedingungen verwendet. In weiterer Folge wurde Glaskugelpulver als Füllstoff eingesetzt um ggf. magnetische Einflüsse und die Anisotropie des Füllstoffes auszuschließen. Diese Versuche zeigten nicht den gewünschten Verbesserungserfolg und so wurde anschließend der Coinjektionskopf mit

Drucksensoren, Bolzenverschlussdüsen und einer Drossel adaptiert. Mit dem neuen Kopf wurden nochmals Probekörper mit Eisenpulver gefertigt und untersucht. Anschließend wurden noch Stränge bei aufgebohrter Düse mit gleichen Materialien bei unterschiedlicher Einfärbung gefertigt und die Querschnitte über die Länge mittels einer Bildvermessungssoftware untersucht. Im Zuge dieser Versuchserie wurde auch noch versucht, durch Spritzen mehrerer Schuss mit einer Dosierung eine gleichmäßige Eisenverteilung über die Fließweglänge zu erzielen. Die letzten Versuche zeigten, dass der Aufbau einer stabilen Grenzschicht eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt und daher durch Eliminierung des ersten ausgespritzten Materials eine homogenere Füllstoffverteilung erzielt werden könnte.

Die Praxistauglichkeit des Systems wurde unter Zuführung der Dosierung auf ein Aggregat durch die Bearbeitung und Dokumentierung verschiedener Projekte überprüft. In diesen Projekten war das gesamte System gefordert, d.h. ausgehend von der Rezepturerstellung mit der PDWB-Software über die automatische Dosierung und Fertigung der Probekörper, gefolgt von der Prüfung und Zurückübertragung der ermittelten Daten an die PDWB-Software und Erstellung eines Simulationsmodells.

Process analysis of an integrated System for accelerated development of compounds based on a two-component-all-electric injection moulding machine and the methods of HTS (High Throughput Screening)

Abstract

Polymaterials AG (Kaufbeuren, DE) in collaboration with Engel GmbH (Schwertberg, AT) developed a system for the accelerated development of compounds on a two-component-all-electric injection moulding machine in an integrated system based on the methods of HTS. The complete HTS- system consists of a so called PDWB (Product Design Workbench)-software used for experimental design and data analysis and of the components, metering, mixing, injection moulding, and testing. Main component of the system is an all-electric two component injection moulding machine.

The aim of this thesis was to adapt the HTS-system to an injection moulding machine and check the practicality of the system. Also part of the thesis was a literature review of the historical development of injection moulding compounding and the use of static mixing elements in injection moulding.

Through the literature review it became clear that currently there is no similar concept for the accelerated development of compounds. The classic compounding with an extruder can partly be replaced by the HTS system and it has to be seen as a complement and an extension.

In order to develop the machine concept, especially the ability of mixing both melt streams of both plastification units during the whole injection cycle, test specimens were produced via co-injection of pure and filler containing polymermelt. The produced specimen and free injected strands were analyzed for their content of the filler material, which was iron powder. It was found that the filler level increased with the flow distance. The average value did not reach the nominal value. To get an improvement, these experiments were made with changed injection conditions. Subsequently, glass bead powder was used as filler material to avoid magnetic effects and anisotropic behaviour of the filler. These experiments did not show the desired improvement so the next step was to modify and equip the co-injection device with pressure sensors, bolt shut-off nozzles and a throttle. With the new head again specimens with iron powder were made and analyzed. Then strands with the same materials in different coloration using a nozzle with the same outflow-diameter as the inner diameter of the static mixer were produced. Afterwards the cross-sections of the strands along the length were analyzed

by using image measurement software. As part of this series of experiments it has been tried to inject several shots with one dosage to achieve an even distribution of the iron powder over the flow distance. The experiments showed a significantly more homogeneous distribution for subsequent shots.

The practicability of the system was verified through processing and documentation of various client projects, which were realised by serving the metering system to one injection aggregate. In these projects the whole system was required, i.e. first the composition creation with the PDWB-software via the automatic metering and manufacturing of the specimens for the testing and afterwards the transfer of the data back to the software and the creation of a simulation model.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	8
2	Spritzgießcompoundieren	9
2.1.	Geschichtliche Entwicklung des Spritzgießcompoundierens	9
2.2.	Geschichtliche Entwicklung des Einsatzes von statischen Mischern beim Spritzgießen	13
2.3.	High Throughput Screening (HTS)	14
2.4.	Schnelle Rezeptentwicklung mit dem HTS-System.....	17
3	Maschinenentwicklung	22
3.1.	Berechnung des korrigierten Eisenanteils	26
3.2.	Leitfaden durch die verschiedenen Versuchsserien	27
3.3.	Ermittlung des Ausspritzverhaltens mit Eisencompound	29
3.3.1.	Soxhlet-Extraktion.....	29
3.3.2.	Verteilungsermittlung im Strang	31
3.3.3.	Ermittlung der Eisenpulver-Verteilung im Probekörper	36
3.3.4.	Probenspritzung mit Zeitverzögerung	42
3.3.5.	Probenspritzung mit Geschwindigkeitsprofil	47
3.3.5.1.	Geschwindigkeitsprofil 1	48
3.3.5.2.	Geschwindigkeitsprofil 2	53
3.3.6.	Ermittlung des Füllstoffanteils bei Verwendung eines Glaskugelcompounds	57
3.4.	Untersuchungen zum erforderlichen Einspritzvolumen und zum Entlastungshub	63
3.4.1.	Schließverhalten der Rückstromsperre	63
3.4.2.	Tatsächlich eingespritztes Volumen	65
3.4.3.	Untersuchung der Kompressionsentlastung	67
3.5.	Untersuchungen mit einem neuen Coinjektionskopf.....	70
3.5.1.	Aufbau	70
3.5.2.	Ermittlung der Eisenpulververteilung im Probekörper	71

3.5.3.	Ermittlung des Druckzustands bei vertauschter Befüllung	77
3.5.4.	Fertigung der Probekörper mit einem Aggregat	80
3.5.5.	Untersuchung der Drucksensoranzeige bei quasistatischem Druckzustand	81
3.5.6.	Ausspritzversuche bei aufgebohrter Düse	83
3.5.7.	Mehrere Schuss mit einer Dosierung.....	92
3.5.8.	Verteilungsermittlung im Strang mit neuem Kopf und Verwendung der Drossel.....	95
3.6.	Zusammenfassung der Maschinenentwicklung	98
4	Untersuchung der Systemgenauigkeit	100
4.1.	Projekt 1	101
4.2.	Projekt 2	107
4.3.	Diskussion und Ausblick	120
5.	Zusammenfassung.....	122
7	Abkürzungen.....	126
8	Literatur	127

1. Einleitung

In der modernen Technik werden fast ausschließlich Kunststoffe verwendet, welche durch Zugabe von Additiven modifiziert werden, dadurch fällt dem Compoundieren eine sehr wichtige Aufgabe in der Kunststoffindustrie zu. Die Rohstoffhersteller tendierten in den vergangenen Jahren in Richtung Massenproduktion bei gleichzeitiger Reduktion der Produktpalette, und so wurde die spezifische Modifikation der Kunststoffe immer mehr in den Hintergrund gedrängt.

Die Firma Polymaterials AG (Kaufbeuren, D) entwickel in Zusammenarbeit mit Engel GmbH (Schwertberg) eine Zweikomponenten-Spritzgießmaschine mit Coinjektionskopf als Versuchsanlage für eine schnelle Rezepturenentwicklung, womit Compounds produziert und zu Prüfkörpern verarbeitet werden können. Durch die Zusammenführung der Compoundierung mit dem Spritzgießvorgang in einer Maschine und in einem Arbeitsschritt ist eine wesentliche Verringerung des Zeitaufwands möglich, wodurch verschiedenste thermoplastische Rezepturen in erheblich verkürzter Zeit getestet werden können. Dies ist für Rohstoffhersteller, Materialentwickler sowie Kunststoffverarbeiter interessant.

2 Spritzgießcompoundieren

2.1. Geschichtliche Entwicklung des Spritzgießcompoundierens

Die große Stärke von Kunststoffen ist die Möglichkeit, sie auf das jeweilige Anforderungsprofil hin abzustimmen und zu modifizieren. Dies erfolgt durch Zugabe von Additiven zum Grundwerkstoff und wird mittels Compoundieren technisch umgesetzt. In klassischer Weise ist dies ein Extrusionsprozess und wird durch einen gleichläufigen Doppelschneckenextruder realisiert. Die geschichtliche Entwicklung des Spritzgießcompoundierens wird hier nun kurz dargestellt.

Im Jahre 1973 wurden erstmals Mischelemente einem Extruder nachgeschaltet, um das geschmolzene Material mit diversen Additiven zu versehen und die homogene Verteilung gewährleisten zu können. Dies wurde beim Schäumen von Kunststoffen [5] und Realisieren von Harz- bzw. Farbmischungen [6] eingesetzt. 1975 wurde eine Vorrichtung zum Mischen und Fördern von Spritzgußmaterialien entwickelt, in welcher Material in einer einzigen, kontinuierlich arbeitenden, Vorrichtung vermischt, aufgeschmolzen und verspritzt wurde [7]. Nachdem sich einige Jahre in diesem Bereich nicht viel ereignete, wurde 1981 ein Patent angemeldet, welches ein Spritzgießverfahren beschreibt, in dem Additive dem aufgeschmolzenen Material zugegeben werden können. Das Grundmaterial wird mittels eines Extruders aufgeschmolzen und in einen Spritzkolben extrudiert. Dort werden dann die Zusatzstoffe zugegeben. Nach vollständiger Aufdosierung startet der Einspritzvorgang und das Material wird über einen statischen Mischer in eine Form gefüllt. Der Mischer ermöglicht eine gute Homogenisierung des Compounds [8].

Fünf Jahre später, 1986, wurde eine Compoundieranlage hergestellt [9]. Diese beinhaltet einen Doppelschneckenextruder mit zwei, in axialer Richtung, hintereinander positionierten Einfüllöffnungen für Grundstoff sowie Additive. Am Ende der Aufschmelzeinheit läuft der Compound über eine Verschlussdüse in einen Zwischenspeicher, wodurch das Aggregat nach hinten gedrückt wird. Wenn der Speicher vollständig gefüllt ist, wird das Aggregat wieder nach vorne bewegt und die Masse durch eine Extruderdüse oder in ein Spritzgießwerkzeug geführt. Ein oszillierender Nachdruck kann durch einen Kolben, parallel zum Spritzaggregat, aufgebracht werden. Im Jahr darauf wurde eine Apparatur zur Produktion von Polyurethan-Hartschaum entwickelt. Die Zudosierung der 2 Komponenten in einem

Mischkopf erfolgt jeweils über einen Dosierzylinder und wird abwechselnd durchgeführt [10].

Aus 1992 ist ein Prozess zur direkten Verarbeitung von inkompatiblen Harzen dokumentiert [11]. Der Compoundierschritt wird eingespart, weil die Harze in der Spritzeinheit zu einem ausreichend homogenen Compound verarbeitet und anschließend sofort in die Form eingespritzt werden können, ohne das Material thermisch zu schädigen. Dies wird erzielt durch einen ansteigenden Staudruck beim Dosieren sowie ein Scherteil an der Schneckenspitze.

Im folgenden Jahr wurde auch ein Verfahren zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen veröffentlicht [12]. In diesem Verarbeitungsprozess wurde vor allem auf die homogene und sanfte Durchmischung der Schmelze geachtet, um möglichst große Faserlängen zu erzielen. Das gleiche Thema behandelt eine Erfindung aus dem Jahre 1994, bei welcher die Zugabe der Fasern in einem Extruder erfolgt. Die Masse wird in einen Dosierkolben plastifiziert und anschließend in die Form gefüllt. [13]. Ebenso um die Einarbeitung von Fasern geht es in Patenten aus dem Jahre 2002 [14], 2004 [15] und 2006 [16].

1993 wurde ein Patent zur Produktion von Mehrschichtverbunden angemeldet, in welchem dies durch direkte Coextrusion oder Coextrusion gefolgt von Schichtmultiplikation in einem oder mehreren statischen Mischern erfolgt [17], sowie 1995 ein Verfahren zum Spritzgießen von Gegenständen aus mindestens zwei unterschiedlichen Schichten [18]. Die Aussenschicht wird mittels Kolbenspritzeinheit zuerst eingebracht und im Anschluss die Kernkomponente mittels Schneckeneinheit eingespritzt. Vorzugsweise werden hier lackummantelte Kunststoffteile produziert. Unter den Bereich Mehrschichttechnologie fällt auch jene des Sandwichspritzgießens, und eine Apparatur dafür wurde im gleichen Jahr realisiert. Einer normalen Einkomponenten-Spritzgießmaschine kann ein zweites Spritzaggregat mit Heißkanalsystem hinzugefügt werden [19]. Im Jahre 1998 wurde eine Apparatur zur Herstellung von Teilen aus mindestens zwei unterschiedlichen Kunststoffen erfunden, wobei es sich hier um mindestens zwei Plastifizieraggregate und eine Mehrkomponentendüse, die direkt am Werkzeug befestigt ist, handelt [20]. Ziemlich genau dieses Thema behandelt eine andere Erfindung aus dem gleichen Jahr, jedoch wurden hier nicht nur Polymere verarbeitet sondern die sekundär eingespritzte Masse war ein Nicht-Kunststoff, erfindungsgemäß ein Druckfluid [21]. Eine weitere Erfindung in diesem Bereich behandelt eine Apparatur zum Spritzgießen von zwei kompatiblen Materialien aus dem Jahr 2002 [22]. Im Jahre 2008 wurde ein Spritzgießcompoundiersystem für Mehrschichttechnologien veröffentlicht, in welchem

die verschiedenen Schichten in einen Massespeicher gefördert werden, bevor diese dann in die Form gespritzt wird [23].

Ein 1996 entwickeltes Verfahren beschreibt die Herstellung von Formkörpern, wobei die Ausgangsstoffe separat, kalt, miteinander vermischt und anschließend mit einer Spritzgießmaschine verarbeitet wurden. Vorrangiges Ziel war es, den zeit- und energieintensiven Schritt des Compoundierens mittels Doppelschneckenextruder zu vermeiden und stattdessen die Mischung direkt zu Formkörpern zu verarbeiten. Dies ist nicht nur eine Zeit- und die Energieersparnis, sondern auch keine geringere thermische Belastung für das Material selbst. Ebenso zeigte sich, dass der Einsatz von Misch- und Scherteilen im Spritzaggregat notwendig ist, um den gewünschten Homogenisierungsgrad erzielen zu können. Des Weiteren ist durch diesen Verfahrensablauf ein rascher Materialwechsel problemlos möglich, da lediglich die Mischaggregate gesäubert werden müssen [24].

Weiters wurde 1998 zur Kopplung kontinuierlicher Plastifizierung mit zyklischer diskontinuierlicher Schmelzeaustragung eine Vorrichtung erarbeitet, um für alle produzierten Teile eine konstant gute Schmelzequalität zu gewährleisten. Basierend auf der Trennung von Plastifizierung und Einspritzen wird die Masse in einen Schmelzespeicher extrudiert und anschließend mittels Kolbeneinspritzung in die Form eingebracht [25]. Zur gleichen Zeit wurde eine Anlage zum Plastifizieren und Einspritzen insbesondere kleiner Mengen von thermoplastischer Schmelze mit einem Schneckenzyylinder entwickelt [26].

1999 wurde ein Verfahren zum Spritzgießen von mindestens zwei unterschiedlichen Materialien, wobei eines ein Kunststoff sein muss, entwickelt. In zwei Extrudern wird das Material kontinuierlich aufgeschmolzen und in ein, über den Fließweg angebrachtes, Speicherelement extrudiert. Über ein Mischelement werden die Ströme dann zusammengeführt, gemischt und homogenisiert. Anschließend wird der Compound in die Kavität gefördert. Die Vermischung erfolgt entweder durch ein dynamisches, oder ein statisches Mischelement [27]. Im gleichen Jahr wurde ein Verfahren zur Herstellung von aus mindestens einem zerkleinerten Rohstoff und mindestens einem Bindemittel bestehenden Formkörpern entwickelt [28]. Ebenfalls in diesem Jahr wurde eine Einrichtung zum Einspritzen eines aus mindestens zwei Komponenten bestehenden Kunststoffes in eine Form entwickelt, wobei die Komponenten über eine in die Spritzgußmaschine integrierte, volumetrische Dosiereinheit einer Mischeinheit und über diese einem Einspritzylinder zugeführt wurden [29].

Im Jahr 2000 wurde ein Heißkanalverteiler für eine Spritzgießeinrichtung zur Verarbeitung von Schmelzecomounds mit mindestens einem Zusatzstoff entwickelt. Um in verschiedenen Kavitäten unterschiedliche Komponenten bzw. Farben gleichzeitig herstellen zu können ist es notwendig, diese im Heißkanalverteiler zuzumischen. Die benötigte, homogene Mischung wird durch statische Mischelemente im Heißkanalverteiler erzielt. Um die Mischleistung bei geringen Baugrößen zu gewährleisten, wird der Mischer als wenigstens zweiteilig und als nicht fluchtende Mischstrecke ausgeführt [30]. Dem gleichen Zeitraum entspringt eine Innovation bezüglich der Homogenisierung der Mischung von Kunststoffschmelzen mit Füll- und/oder Verstärkungsstoffen. Die Mischung wird in einer Spritzeinheit aufgeschmolzen und mittels einer axialen Schneckenbewegung in ein dynamisches Mischelement geführt. Nach der Homogenisierung wird das Material in ein Spritzgießwerkzeug gespritzt [31]. Im gleichen Jahr wurde auch ein kombinierter Prozess zum Spritzgießcompounding entwickelt, und dieser ist geeignet für Recyclingkunststoffe. Das aufgeschmolzene Material wird in einem Puffer gespeichert und anschließend in ein Spritzgießwerkzeug befördert [32]. Das gleiche Thema behandelte ein weiteres Patent dieses Jahres, jedoch für Harz-Spritzgießen entwickelt [33].

2003 wurde eine Zweisechnecken Compounding- bzw. Spritzgießmaschine abgehandelt. Der Aufschmelzvorgang erfolgt im Zweisechneckenextruder und am Ende des Spritzzylinders wird das Material gesammelt. Einer der beiden Schneckenkerne ist aufgrund eines Sternprofils relativ zum Schneckenkörper in axialer Richtung verschiebbar. Die Ausspritzdüse liegt in einer Linie mit dieser für das Ausspritzen verantwortlichen Schnecke und ermöglicht das Füllen einer Form [34].

Im gleichen Jahr wurde auch ein Spritzgießcompounder bestehend aus einem Extruder und einer Einspritzeinheit entwickelt. Im Ein- oder Zweisechneckenextruder wird der Compound aufgeschmolzen, homogenisiert und in einen Schmelzespeicher extrudiert. Sobald dieser Speicher aufgefüllt ist, wird das Material mittels eines Kolbens in das Werkzeug eingespritzt [35], [36].

Im Jahr 2007 wurde ein Patent für eine elektrisch gesteuerte Spritzgießmaschine mit kontinuierlicher Vorplastifiziereinheit veröffentlicht. Der Kunststoff wird in einen Schmelzespeicher plastifiziert und anschließend mittels einer Kolbenspritzeinheit eingespritzt. Durch die elektrische Steuerung der Maschine ist es möglich, die Zykluszeit zu verkürzen und Teile mit hohen Präzisionsanforderungen zu fertigen [37]. Grundsätzlich die gleiche Arbeitsweise beinhaltet eine Apparatur aus dem Jahr 2008, der einzige Unterschied ist ein Dekompressionsschritt vor dem Aufdosieren [38].

Ein Verfahren zur Herstellung von Spritzgießartikeln aus Compoundmaterial wurde 2008 publiziert. Die zugegebene Additivmenge wird nach dem Extruder ermittelt und wenn erforderlich nachgeregelt [39].

2.2. Geschichtliche Entwicklung des Einsatzes von statischen Mischern beim Spritzgießen

Im Jahre 1964 wurde ein Strömungsinverter für viskose Flüssigkeiten, zum Ausgleich des Geschwindigkeitsprofils bei Rohrströmungen, abgehandelt [40].

In Patenten aus den Jahren 1965, 1968 und 1971 werden Verfahren zur Herstellung von Grenzschichten dargestellt. Im ersten wird der Volumenstrom durch Aufteilen, Expansion und Wiedervereinigung durchmischt [41]. In der zweiten Erfindung werden vertikale Einzelströme in einer keilförmigen Kammer zusammengeführt und anschließend mittels Aufteilen in horizontale Stränge wieder ausgeführt. Die horizontalen Stränge werden danach wieder vertikal in die nächste Kammer eingeführt [42]. In gleicher Weise werden auch die Ströme in der dritten Entwicklung durchmischt, jedoch läuft der ganze Prozess hier in einem Rohr ab [43].

Ein statisches Mischelement zur homogenen Durchmischung von Polymerschmelzen wurde 1972 entwickelt. Es wurden um 180° links- bzw. rechtsverdrehte Bleche abwechselnd jeweils unter 90° axial verbunden, wodurch der Fluidstrom an jedem Element in zwei Teilströme unterteilt wird. Diese Teilströme werden durch die Form zusätzlich in Rotation versetzt, wodurch eine verbesserte Mischwirkung erzielt werden kann. Um eine längere Strecke zu erhalten, können mehrere Mischer in Serpentina angeordnet werden [44]. Gleiches behandelt eine Erfindung aus dem Jahre 1974. Die Schmelze durchströmt hier mehrere Lamellen [45]. 1977 wurde eine Düse mit integriertem, statischem Mischer für die Spritzgießverarbeitung hergestellt. Diese ermöglicht eine Homogenisierung der Schmelze vor dem Eintritt in das Werkzeug [46]. Das gleiche Thema behandelt eine Innovation aus dem Jahr 2000 [47]. Ebenso für Spritzgießdüsen aber auch für Extrusionsprozesse wurde eine Vorrichtung aus dem Jahre 1995 zum Homogenisieren von hochviskosen Fluiden entwickelt, welche statische Mischelemente und gegebenenfalls Filterelemente umfasst. Diese sind in einer Hülse, die mehrteilig ausgebildet ist, längs der Hülsenachse angeordnet und die Vorrichtungselemente sind monolithische Bauteile [48].

1993 wurde ein Prozess zur Produktion von Polymerblends entwickelt. Hier wird in zwei separaten Extrudern Kunststoff aufgeschmolzen und die Ströme über ein T-Verbindungsstück zusammengeführt. Um anschließend die Materialien homogen zu vermischen, wurde dem Zusammenführungsstück ein statischer Mischer nachgeschaltet, gefolgt von einer Extrusionsdüse. Das Verfahren ist besonders geeignet zur Verarbeitung von flüssig kristallinen Polymeren und faserverstärkten Kunststoffen mit diversen Matrixmaterialien [49].

Bei einer Erfindung aus dem Jahre 1997 wurde ein statischer Mischer kurz vor der Kavität eingeplant, wodurch eine bessere Homogenität in der Temperaturverteilung erzielt wird [50]. 1999 wurde ein statischer Mischer für distributives und dispersives Mischen hergestellt [51].

Ein 2008 entwickelter statischer Mischer verarbeitet einen oder mehrere Ströme. Die Mischung erfolgt durch Umlenken eines horizontalen in einen vertikalen und in weiterer Folge wieder in einen horizontalen Strom. Um eine gute Durchmischung zu erzielen, beinhaltet ein Mischer drei dieser Elemente in serieller Anordnung [52]. Im gleichen Jahr wurde auch ein Zweikomponentenmischer hergestellt, wo zumindest ein Element die Form einer Disc hat, wodurch die Verarbeitung geringster Mengen möglich ist [53].

2.3. High Throughput Screening (HTS)

Durch Zugabe von Additiven ist es möglich, maßgeschneiderte Kunststoffe, d.h. Werkstoffe mit auf die Anwendung abgestimmten Eigenschaften, herzustellen. Ebenso werden Additive zur Verbesserung von Verarbeitungseigenschaften eingesetzt. Die Liste der Zusatzstoffe erstreckt sich von Lichtschutzmitteln, Antioxidantien und Metalldesaktivatoren über Flammschutzmittel, antimikrobielle Wirkstoffe und Antistatika bis hin zu Gleitmitteln, Thermostabilisatoren und Kompatibilitätsverbesserern. Hieraus ergibt sich eine große Zahl an Kombinationsmöglichkeiten für die Entwicklung eines Compounds. Aus 100 Grundpolymeren würde durch Zugabe von mehr als 1000 Additiven eine Menge von über 1 Mio. möglichen Rezepturen entstehen aus denen die besten ausgewählt werden müssen.

Die Entwicklung von neuen Rezepturen zur gezielten Anpassung von Kunststoffeigenschaften an das jeweilige Anforderungsprofil erfolgt auf herkömmliche Weise in mehreren Arbeitsschritten. Die Herstellung und Prüfung eines Kunststoffcompounds umfasst die Schritte Compoundierung, Spritzguss von

Probekörpern und Prüfung der Eigenschaften. Liegezeiten zwischen den einzelnen Schritten können bis zu 2 Wochen betragen.

Eine Rezepturentwicklung erfordert sehr viel Zeit. Dies ist gleichbedeutend mit einem hohen finanziellen Aufwand. Das HTS System ermöglicht eine Verringerung der Kosten durch Zusammenfassen der Arbeitsschritte des Compoundierens und des Spritzgießens. Ebenso ergibt sich daraus ein verringerter Zeit- und Energieaufwand, sowie eine Minimierung des Materialeinsatzes.

Für die Wirkstoffsuche und auch deren Optimierung werden in der Pharmazie schon seit vielen Jahren kombinatorische Methoden in hunderten paralleler Tests mit Substanzmengen von wenigen Milligramm angewandt. Auch in der Chemie werden zum Beispiel zur Optimierung von Reaktionen und zur Synthese von neuen Polymeren kombinatorische Methoden eingesetzt. Hier hat sich seit einigen Jahren das Forschungsgebiet der kombinatorischen Chemie etabliert. In der Kunststofftechnik wird sehr lange schon die statistische Versuchsplanung für die Optimierung von Prozessen und auch die Untersuchung der Eigenschaften von Additiven eingesetzt. Allerdings gibt es keine Möglichkeit, den Compoundierprozess zu parallelisieren und die Durchsätze zu minimieren, wie es für die Kombinatorik typisch ist, ohne den Bezug zum Compoundieren im praxisrelevanten Maßstab zu verlieren.

In den letzten Jahren wurden neben dem in Kapitel 2.4 beschriebenen HTS Konzept der Polymaterials AG noch einige ähnliche Konzepte verfolgt.

In den jeweiligen Systemen der Firmen Chemspeed (Augst, CH), hte AG (Heidelberg, DE), Symyx (Kalifornien, USA) und DSM (Linz, AT) werden Mikrocompounder und Mikrospritzgießautomaten zur Rezeptoptimierung unter geringstem Materialaufwand verwendet.

Am Deutschen Kunststoffinstitut (Darmstadt, DE) wurde das Verfahren des Combinatorial Compounding (CC) entwickelt, in welchem die Materialeigenschaften direkt nach dem Compoundierschritt ermittelt werden. Das Herzstück ist ein gleichläufiger Doppelschneckenextruder im Produktionsmaßstab, welcher mit fünf gravimetrischen Dosieranlagen beschickt und die einzelnen Durchsätze der

Komponenten kontinuierlich variiert werden können. Eine Komponente kann dabei der Basiskunststoff, ein Additiv, eine Additivmischung oder ein Masterbatch sein. So können in kurzer Zeit Compounds mit sich kontinuierlich ändernden Rezepturen erzeugt werden [3].

Das Krauss Maffei Verfahren des In-line compounding verbindet einen kontinuierlich arbeitenden Zweischnellenextruder mit einer Kolbenspritzeinheit über einen Schmelzespeicher, der während der Einspritz- und der Nachdruckphase Material puffert. Die Strömungswege aus den beiden Kolbenspritzeinheiten können geschlossen und geöffnet werden, wodurch eine Trennung des kontinuierlich arbeitenden Extruders von der diskontinuierlich arbeitenden Spritzeinheit realisiert wurde. Die Maschine soll Rezepturentwicklungskosten durch Vereinigen des Compoundier- mit dem Spritzgießschritt reduzieren [4].

Allen diesen Verfahren ist gemein, dass sie durch das Verwenden bzw. Kombinieren von bekannten Apparaten das Ziel der schnellen Rezepturentwicklung verfolgen. Die einzelnen Verfahren des Entwicklungsprozesses lassen sich, trotz einiger Überschneidungen, nach Einsatzzweck und Anwendungsziel gliedern (Abbildung 1).

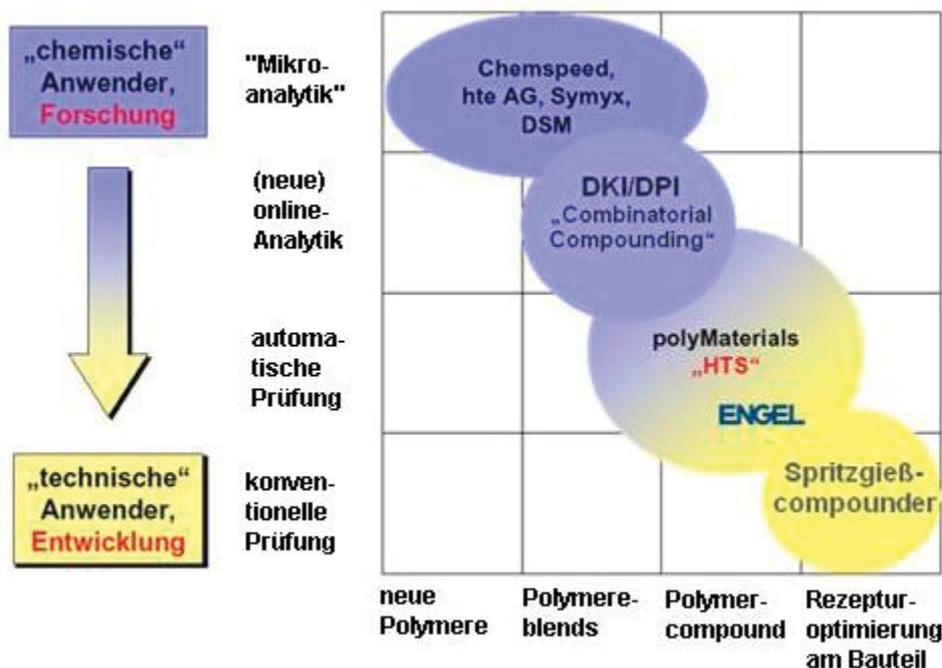


Abbildung 1: Konzepte zur schnellen Rezepturentwicklung

Diese neuen Maschinenkonzepte sind mit Sicherheit kein Ersatz für das klassische Compoundieren am Doppelschneckenextruder, jedoch sind sie eine Ergänzung bzw. Erweiterung für die Rezepturentwicklung und im Bereich der Eigenschaftsmodifikation.

2.4. Schnelle Rezepturentwicklung mit dem HTS-System

Auf Basis der Methoden des „High Throughput Screening“ wurde von der Polymaterials AG ein System entwickelt wodurch in kurzer Zeit der Einfluss einer großen Vielfalt an Additiven untersucht werden kann.

Das vollständige HTS-System der Polymaterials AG integriert Rezepturerstellung, Versuchsplanung, Dosierung, distributives Mischen, Spritzgießen, Prüfung und Datenauswertung (Abbildung 2).

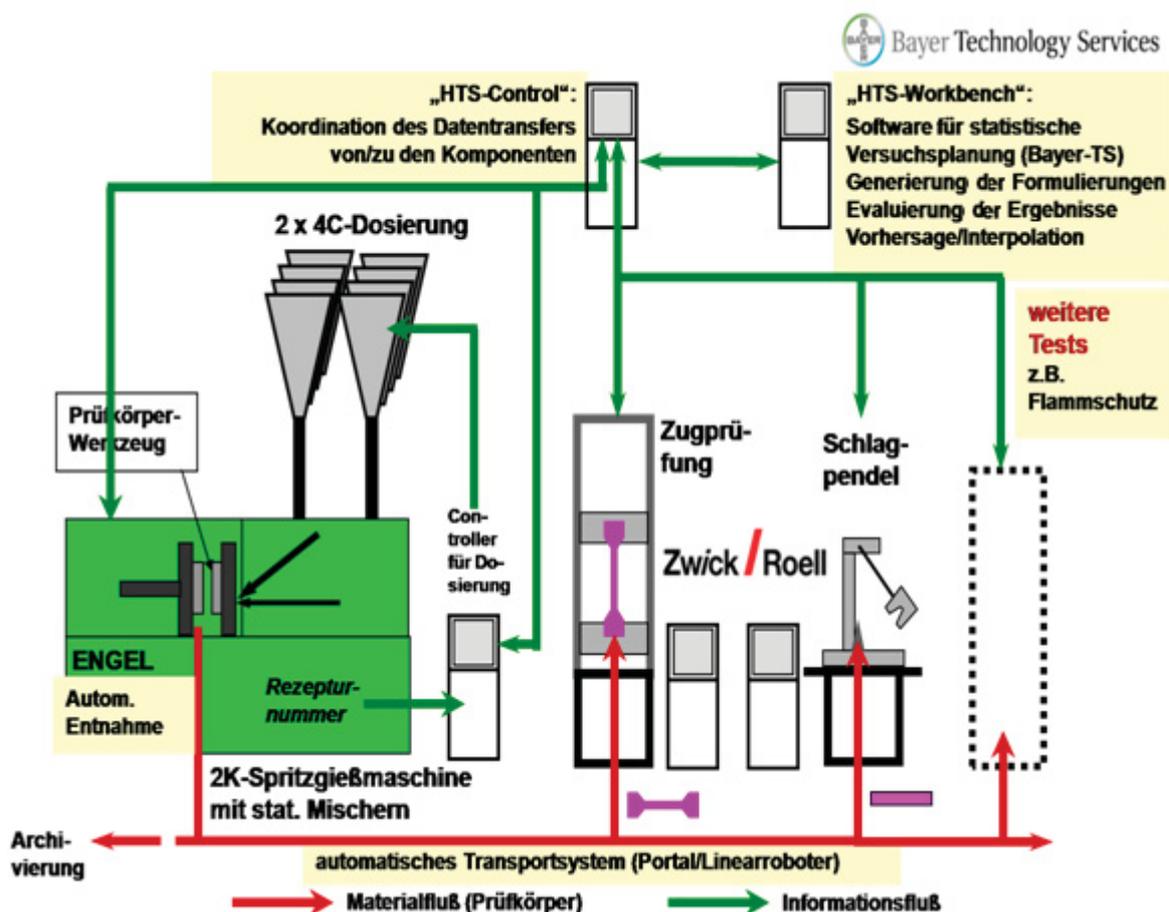


Abbildung 2: Vollständiges HTS-System der Polymaterials AG [1]

Kernkomponente der Anlage ist eine vollelektrische Spritzgießmaschine e-motion 200H200W/100 Combi, eine Zweikomponenten-Maschine mit zwei Spritzaggregaten mit 25-mm-Dreizonenschnecken der Baugröße 200 in Huckepack-Anordnung (Abbildung 3). Beide Plastifizieraggregate werden von je einem Dosiersystem der Baureihe Plasticolor der Firma Woywood (Gräfeling, D) mit einer Dosiergenauigkeit von 1% für bis zu acht Einzelkomponenten versorgt (Abbildung 3). Durch mehrere Materialzuführungssysteme und zwei unabhängige Plastifizieraggregate lassen sich in jeder Hinsicht variable Mischungsverhältnisse einstellen.



Abbildung 3: HTS-Anlage mit vollelektrischer Mehrkomponenten-Spritzgießmaschine e-motion 200H200W/100 Combi



Abbildung 4: Gravimetrisches Dosiersystem Plasticolor [1]

An der Spitze der beiden Plastifiziereinheiten befindet sich je ein statisches Mischteil SMK-X10/6 WB, Sulzer Chemtech (Winterthur, Ch), und nach dem Zusammenfluss beider Schmelzeströme ein weiterer statischer Mischer SMK-X12/10 WB, Sulzer Chemtech (Abbildung 5), so dass zum Einspritzen in das Werkzeug für Normprüfkörper der Firma Axxicon (Ekkersrijt, NL) eine sehr homogene Schmelze bereitsteht. Zusätzlich steht noch ein Werkzeug zur Herstellung von Stäben für Abbrennversuche mit einer Dicke von 1,5 mm zur Verfügung. Dank der hohen Präzision der elektrischen Antriebe für beide Plastifiziereinheiten lassen sich die Schmelzeströme sehr genau und reproduzierbar dosieren. Da Volumenstromverhältnisse zwischen Aggregat 1 und Aggregat 2 von 90:10 bis zu 10:90 verarbeiten werden können, ergibt sich durch den Verdünnungseffekt die Möglichkeit, Additivgehalte im Bereich von 0,1%, z.B. für UV-Stabilisatoren, zu erzielen.

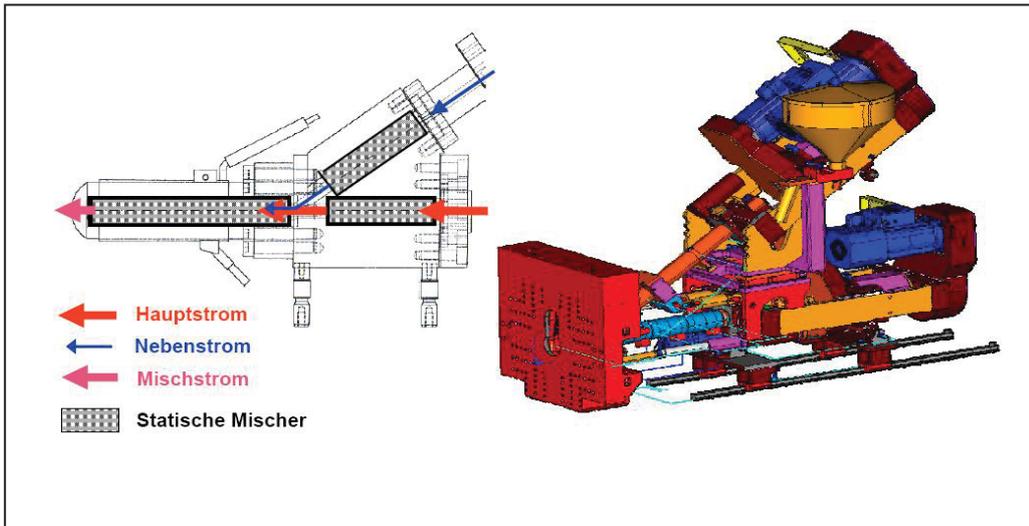


Abbildung 5: Coinjektionsdüsenkopf mit statischen Mixern [1]

Die spritzgegossenen Probekörper in ISO-Größe werden in Prüfkassetten abgelegt und nach dem Abkühlen und gegebenenfalls einer Nachkristallisation in Prüfautomaten der Firma Zwick/Roell auf mechanische Kennwerte untersucht (siehe Abbildung 6).

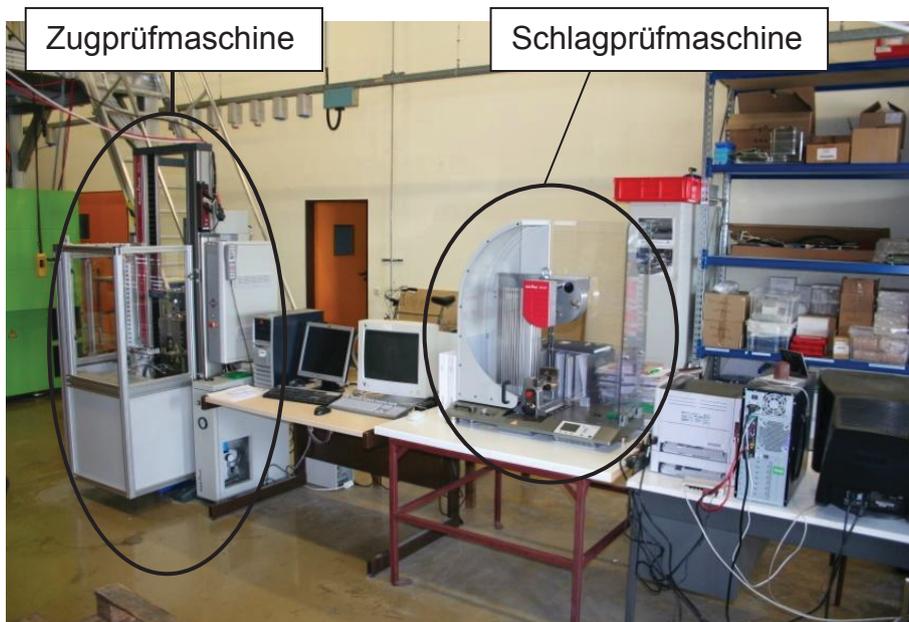


Abbildung 6 :Prüfautomaten der Firma Zwick/Roell

Die Auswertung der gewonnenen Daten, die Versuchsplanung und die Datenablage erfolgt mittels der „PDWB, Product Design Workbench“ Software von Bayer Technology Services GmbH (Leverkusen, D). Diese vereint die statistische Versuchsplanung, die

Modellerstellung mithilfe neuronaler Netze und die Optimierung mit der experimentellen Untersuchung und Datengewinnung (siehe Abbildung 7). Die Darstellung der ermittelten Werte erfolgt mit dem Programm „OPAL, Optimization Prediction Analysis Laboratory“.

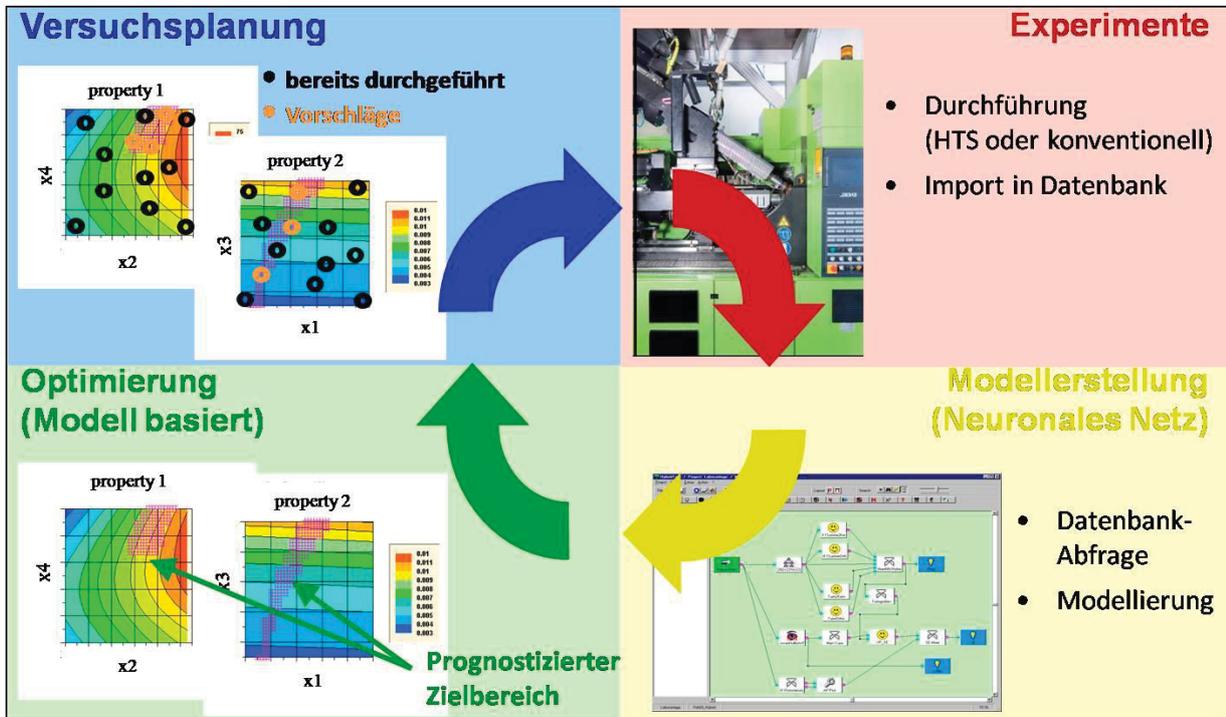


Abbildung 7: HTS Workflow, Arbeitsbereiche der Software

Für den Homogenisierungsvorgang der Komponenten wurden, trotz des erhöhten Druckabfalls über den Fließweg, statische Mischer vom Typ SMK-X der Firma Sulzer Chemtech. Diese bieten eine gute distributive und radiale Mischwirkung und wurden für das Einsatzgebiet als ausreichend angesehen. Hingegen ist die dispersive und axiale Mischwirkung sehr gering, wodurch sich eine enge Verweilzeitverteilung einstellt. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, den Mischer schnell und innerhalb weniger Zyklen zu spülen. Ebenso verringert sich dadurch die Gefahr von Ablagerungen.

3 Maschinenentwicklung

Die Firma Polymaterials AG entwickelte aus der Grundidee einer schnellen Rezepturenentwicklung für Kunststoffcompounds ein Konzept, welches in einem Spritzgießcompounder der Firma Engel GmbH umgesetzt wurde. Basis war eine vollelektrische 2K-Spritzgießmaschine, wodurch die räumliche Anordnung der Spritzaggregate vorgegeben war. Die Spritzeinheit besteht aus einem Horizontal- und einem Huckepackaggregat welche in Y-Form angeordnet sind und die beiden Schmelzeströme über einen Coinjektionskopf zusammenführen (siehe Abbildung 8). Durch diese Anordnung ergibt sich eine etwas längere Schmelzeleitung für das Huckepackaggregat. Im weiteren Verlauf wird das Horizontalaggregat als Aggregat 1 und das Huckepackaggregat als Aggregat 2 bezeichnet.

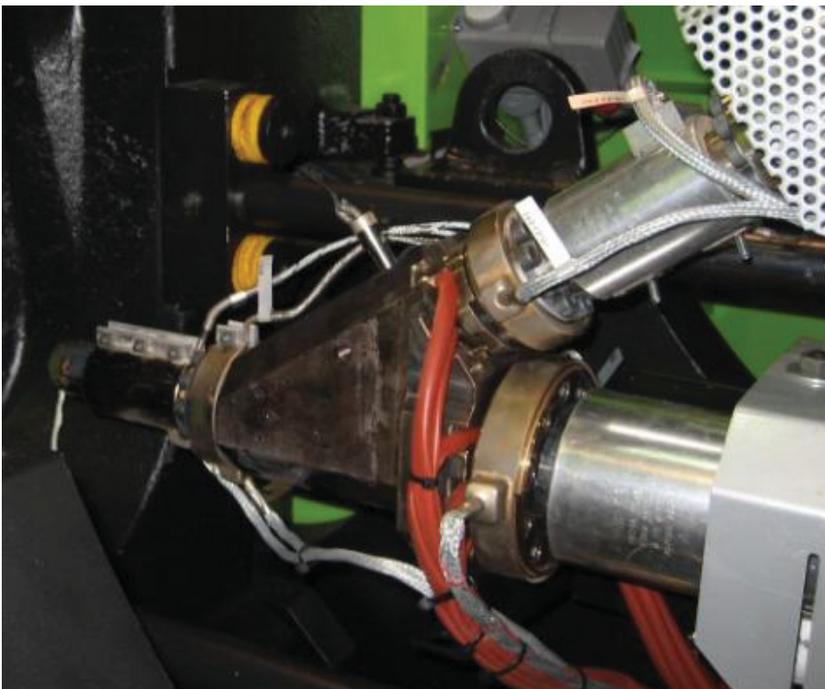


Abbildung 8: Y-Anordnung Horizontal- und Huckepackaggregat und Coinjektionskopf zur Zusammenführung der Schmelzeströme

Mit den ersten Versuchen wurde der Ist-Zustand in Bezug auf die Füllstoffverteilung über den gesamten Zyklus ermittelt. Zur Verbesserung dieses Zustands wurden die Prozessparameter variiert und in späterer Folge der Coinjektionskopf modifiziert und

adaptiert. Der Prozessablauf wurde so geregelt, dass das Huckepackaggregat sklavisch dem Horizontalaggregat folgt. Daraus ergaben sich gewisse Vorgaben bezüglich der Aggregatsverwendung, so wurden z.B. vorgegebene Verzögerungen und Geschwindigkeitsprofile am Horizontalaggregat eingestellt, da diese am Huckepackaggregat nicht berücksichtigt wurden.

Ziel ist es, eine homogene Additivverteilung im Prüfkörper zu gewährleisten. Dafür ist es notwendig, den Schmelzestrom von Aggregat 1 und 2 gleichmäßig zusammenzuführen. Dies sollte durch exakt proportionale Volumenströme im achssynchronen Betrieb, sowohl beim Einspritzen, Nachdrücken wie auch Dosieren, erzielt werden. Der Einspritzvorgang wurde geschwindigkeitsgeregelt unter Vorgabe der Schneckenvorlaufgeschwindigkeit gefahren, der Nachdruckvorgang druckgeregelt unter Vorgabe des Nachdrucks gefahren. Um beim Dosieren einen Schmelzefluss von einem Kanal in den anderen zu verhindern, wurde eine gleichzeitig ausgeführte Kompressionsentlastung in den Prozessablauf integriert. Jenes Aggregat, welches das Dosiervolumen früher erzielt, hält den Staudruck aufrecht, bis das andere ebenfalls den Dosiervorgang beendet hat. Die anschließende Kompressionsentlastung wird in Aggregat 1 eingestellt und in Aggregat 2 je nach Dosiervolumenverhältnis angepasst.

Zur Regelung des Spritzdrucks wurde der Schneckenanschubdruck, welcher durch eine Membran im Spritzaggregat gemessen wurde, herangezogen.

Die Temperatureinstellung der Heizzonen erfolgte für jedes Aggregat separat (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10), jedoch wurde die Düsen- und die Coinjektionskopfheizung über die Bedienoberfläche von Aggregat 1 eingestellt (siehe Abbildung 9).

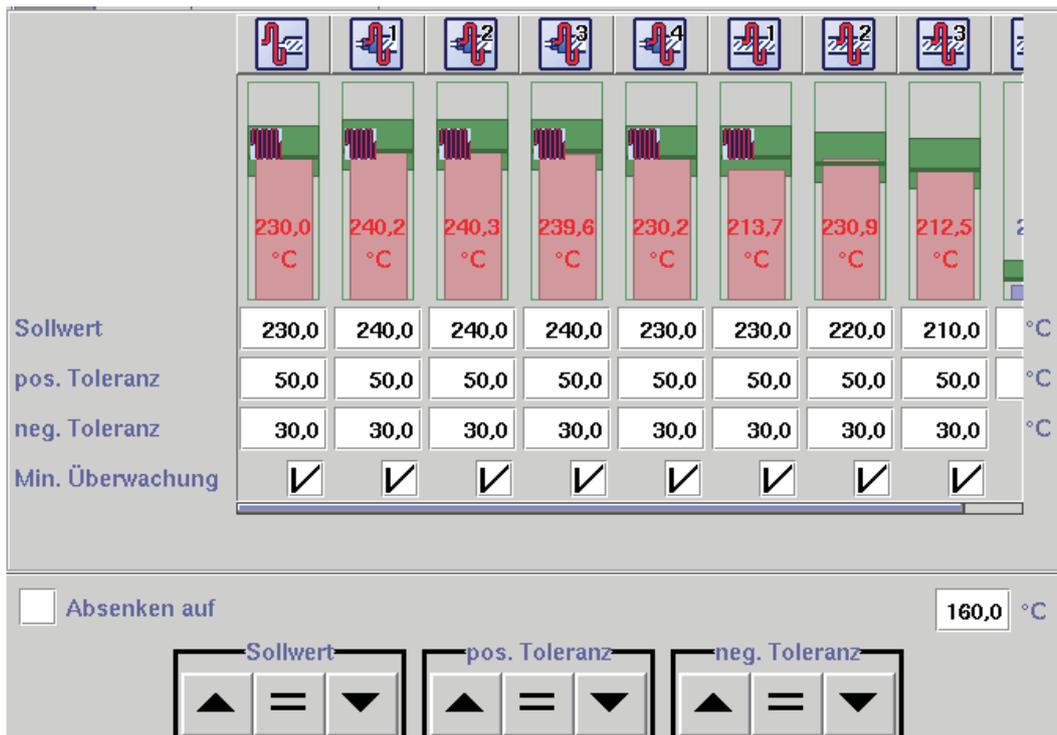


Abbildung 9: Heizzoneneinteilung Aggregat 1

Die Einteilung der Heizzonen an Aggregat 1, der Düse und des Coinjektionskopfs sind in Abbildung 9 dargestellt und wie folgt von links nach rechts aufgeteilt. Zone Düsenspitze und Zone 1 sind die Heizelemente an der Düse. Anschließend folgen die Heizelemente am Coinjektionskopf mit den Heizpatronen unten (Zone 2) und oben (Zone 3). Zone 4 regelt das Heizband am Flansch des Horizontalaggregats und die folgenden Zonen 1 bis 3 sind die keramischen Heizungen des Zylinders. Am Bild ganz rechts und nur noch teilweise zu sehen ist die Temperierung des Einzugs.

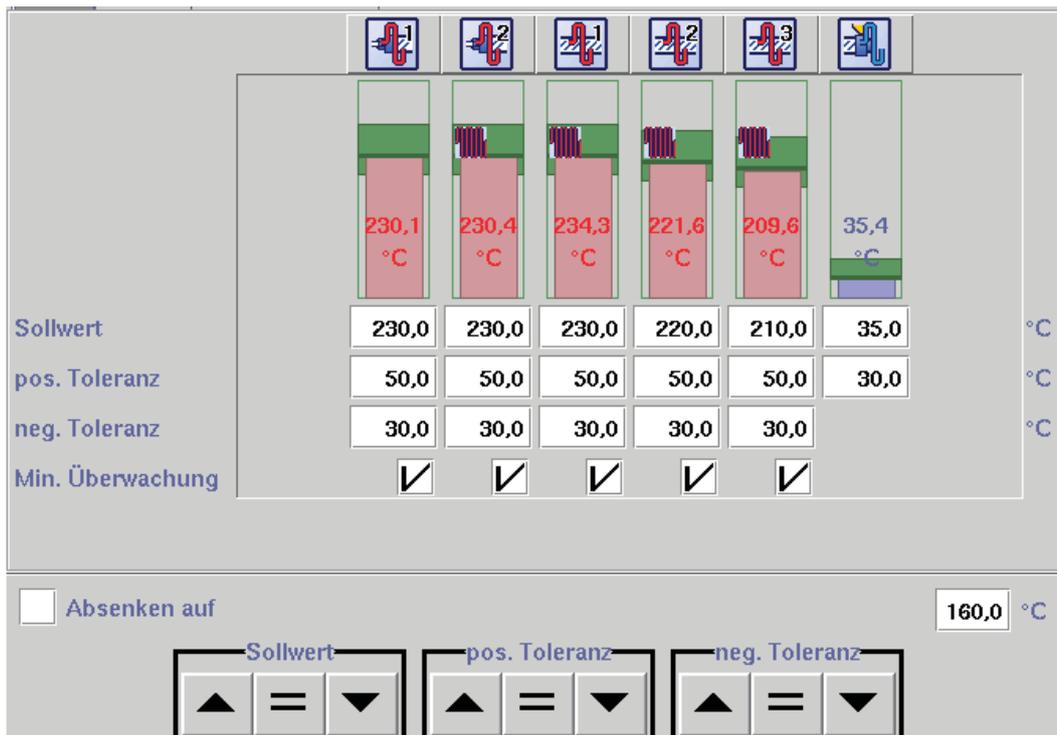


Abbildung 10: Heizzoneneinteilung Aggregat 2

Die Heizzoneneinteilung an Aggregat 2 erfolgt laut Abbildung 10 und ist wie folgt von links ausgehend angeordnet. Zone 1 ist die Beheizung des Verbindungsflansches zum Coinjektionskopf und Zone 2 die Beheizung des Verbindungsrohres. Die folgenden Zonen 1 bis 3, wie bei Aggregat 1, sind für die Beheizung des Zylinders vorgesehen. Ganz rechts ist die Temperierung des Einzugs vorzunehmen.

Zur Ermittlung des Aus- und Einspritzverhaltens wurde am Doppelschneckenextruder ein Compound aus Polystyrol Sabic 125 mit 25 bzw. 50 Gew-% Eisenpulver hergestellt. Danach wurden im achssynchronen Betrieb verschiedene Volumenstromverhältnisse gespritzt.

Die Nomenklatur der Volumenstrom-Verhältnisangaben bezieht sich immer auf die Aggregate, egal wie die Befüllung erfolgte. Die erste Zahl war auf Aggregat 1 (horizontal) und die zweite auf Aggregat 2 (huckepack) bezogen, z.B. 30/70 bedeutet, dass geforderte 30 % des Material von Aggregat 1 und 70 % von Aggregat 2 kommen sollten und umgekehrt heißt 70/30, dass 70 % des Materials von Aggregat 1 und 30 % von Aggregat 2 gefördert werden sollten

3.1. Berechnung des korrigierten Eisenanteils

In der Dosieranlage wurden die jeweiligen Mengen nach Gewicht dosiert. Die Verarbeitung der Materialien in der Spritzgießmaschine erfolgte jedoch in Volumenelementen.

Aufgrund der unterschiedlichen Mengenverarbeitung und der sich verändernden Dichten beim Übergang von Feststoff in Schmelze musste ein korrigierter Eisengehalt ermittelt werden.

$$\rho_{\text{PS,Feststoff}}(23^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = 1,05 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ (Wurde aus dem pvT-Diagramm ermittelt.) [54]}$$

$$\rho_{\text{PS,Schmelze}}(230^\circ\text{C}, 700\text{bar}) = 0,99 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ (Wurde aus dem pvT-Diagramm ermittelt.) [54]}$$

$$\rho_{\text{Fe,Feststoff}}(23^\circ\text{C}) = 7,874 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ [55]}$$

$$\alpha_{\text{Fe}} = 13,0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1} \text{ [2]} \rightarrow \gamma = 3 \times \alpha = 29,0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1} \text{ [55]}$$

$$\gamma = -\frac{1}{\rho} \times \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \text{ [55]}$$

$$\Delta \rho = -\gamma \times \rho \times \Delta T = -29,0 \times 10^{-6} \times 7,874 \times 207 = -0,0473 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{\text{Fe,Schmelze}}(230^\circ\text{C}) = 7,874 - 0,0473 = 7,8267 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Die Kompressibilität eines Feststoffs in Relation zu einem Fluid ist vergleichsmäßig gering und daher wurde der Druck, welcher auf das Eisenpulver wirkte, nicht berücksichtigt.

Dichte des Compound im festen Zustand: **25 Gew-% Eisen, 75 Gew-% PS**

$$\rho_{\text{Comp.,Feststoff}} = 0,75 \times \rho_{\text{PS,Feststoff}} + 0,25 \times \rho_{\text{Fe,Feststoff}}$$

$$\rho_{\text{Comp.,Feststoff}} = 0,75 \times 1,05 + 0,25 \times 7,874 = 2,756 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Verhältnis der Dichten im festen Zustand:

$$\frac{\rho_{\text{Comp.,Feststoff}}}{\rho_{\text{PS,Feststoff}}} = \frac{2,756}{1,05} = 2,62$$

Ermittlung der Verhältnisse in Schmelze durch gleichsetzen des Dichteverhältnisses im festen und im schmelzeförmigen Zustand.

$$\rho_{\text{Comp.,Schmelze}} = x \times \rho_{\text{PS,Schmelze}} + x \times \rho_{\text{Fe,Schmelze}}$$

$$\frac{\rho_{\text{Comp.,Feststoff}}}{\rho_{\text{PS,Feststoff}}} = \frac{\rho_{\text{Comp.,Schmelze}}}{\rho_{\text{PS,Schmelze}}}$$

$$2,62 = \frac{x \times 0,99 + (1-x) \times 7,826}{0,99} \rightarrow x = \frac{2,62 \times 0,99 - 7,826}{0,99 - 7,826} = 76,5 \text{ Gew} - \% \text{ PS} \rightarrow 23,5 \text{ Gew} - \% \text{ Fe}$$

Gehaltsverhältnis im schmelzförmigen Zustand für einen 25 Gew-%igen Eisencompound

23,5 Gew-% Eisen

76,5 Gew-% Polystyrol

Dichte des Compound im festen Zustand: **50 Gew-% Eisen, 50 Gew-% PS**

$$\rho_{\text{Comp.,Feststoff}} = 0,50 \times \rho_{\text{PS,Feststoff}} + 0,50 \times \rho_{\text{Fe,Feststoff}}$$

$$\rho_{\text{Comp.,Feststoff}} = 0,50 \times 1,05 + 0,50 \times 7,874 = 4,462 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Verhältnis der Dichten im festen Zustand:

$$\frac{\rho_{\text{Comp.,Feststoff}}}{\rho_{\text{PS,Feststoff}}} = \frac{4,462}{1,05} = 4,25$$

Ermittlung der Verhältnisse in Schmelze durch gleichsetzen des Dichteverhältnisses im festen und im schmelzförmigen Zustand.

$$\rho_{\text{Comp.,Schmelze}} = x \times \rho_{\text{PS,Schmelze}} + x \times \rho_{\text{Fe,Schmelze}}$$

$$\frac{\rho_{\text{Comp.,Feststoff}}}{\rho_{\text{PS,Feststoff}}} = \frac{\rho_{\text{Comp.,Schmelze}}}{\rho_{\text{PS,Schmelze}}}$$

$$4,25 = \frac{x \times 0,99 + (1-x) \times 7,826}{0,99} \rightarrow x = \frac{4,25 \times 0,99 - 7,826}{0,99 - 7,826} = 52,9 \text{ Gew} - \% \text{ PS} \rightarrow 47,1 \text{ Gew} - \% \text{ Fe}$$

Gehaltsverhältnis im schmelzförmigen Zustand für einen 25 Gew-%igen Eisencompound

47,1 Gew-% Eisen

52,9 Gew-% Polystyrol

3.2. Leitfaden durch die verschiedenen Versuchsserien

Im Zuge der Maschinenentwicklung wurden verschiedene Versuche zur Ermittlung der Füllstoffverteilung durchgeführt, und hier wird nun ein kurzer Überblick darüber gegeben.

Zur Untersuchung der Gleichmäßigkeit der Zusammenführung der beiden Schmelzeströme wurde ein Compound aus Eisenpulver und PS verwendet. Zu Beginn wurden Probekörper im Automatikbetrieb in verschiedenen Volumenstromverhältnissen gefertigt (siehe Kap. 3.3.3). Im Zuge dessen wurden mit den gleichen Einstellungen auch Stränge ins Freie gespritzt (siehe Kap. 3.3.2). Die gewonnenen Prozessdaten der Probekörperfertigung zeigten einen langsameren und jene der Strangspritzung einen verzögerten Druckaufbau im Aggregat mit dem geringeren Einspritzvolumen.

Aufgrund dieser Erkenntnis wurde versucht, durch verzögertes Einspritzen jenes Aggregats mit dem geringeren Dosiervolumen eine homogenere Verteilung zu erzielen (siehe Kap.3.3.4). Die Analysen ergaben zumeist ansteigende Füllstoffgehalte über die Fließweglänge und so wurde versucht, durch Einstellen eines Einspritzgeschwindigkeitsprofils eine bessere Verteilung zu erreichen (siehe Kap. 3.3.5). Nach der Untersuchung der Probekörper zeigte sich zwar ein ausgeglichenerer Füllstoffgehalt, jedoch nicht über den gesamten Zyklus, und der Mittelwert lag deutlich über dem Sollwert.

In weiterer Folge galt es, mögliche durch das Eisenpulver hervorgerufene magnetische und strömungsbedingte Effekte zu eliminieren, und daher wurde als Füllstoff Glaskugelpulver verwendet (siehe Kap. 3.3.6).

Da zumeist die an der Maschine eingestellten Volumenstromverhältnisse im Probekörper nicht wieder zu finden waren, wurden das Schließverhalten der Rückstromsperre (siehe Kap. 3.4.1) und das tatsächlich eingespritzte Volumen bestimmt (siehe Kap. 3.4.2). Ebenso wurde die erforderliche Kompressionsentlastung ermittelt (siehe Kap. 3.4.3).

Nachdem die bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Versuche nicht die gewünschten Erfolge zeigten, wurde ein neuer modifizierter und adaptierter Coinjektionskopf gefertigt (siehe Kap. 3.5.1). Mit dem neuen Coinjektionskopf wurden wieder Probekörper mit verschiedenen Volumenstromverhältnissen gefertigt und die Veränderungen gegenüber der ursprünglichen Konstruktion ermittelt (siehe Kap. 3.5.2). Um einen umfangreicheren Informationsstand zu erhalten, wurden die gleichen Verhältnisse bei umgekehrter Befüllung durchgeführt (siehe Kap. 3.5.3). Im neuen Coinjektionskopf wurde auch eine Drossel vorgesehen, um den Kanalquerschnitt des Huckepackaggregats zu verändern (siehe Kap. 3.5.8).

In weiterer Folge wurde der Einfluss des Eisencompounds auf die Eisenverteilung untersucht. Zu diesem Zweck wurden Probekörper bei direkter Dosierung über ein

Aggregat gefertigt. Um die Genauigkeit der Drucksensoren zu untersuchen, wurden bei quasistatischem Druckzustand die Druckkurven aufgenommen (siehe Kap 3.5.5). Um die Zusammenflusssituation über den Zyklus besser bestimmen zu können, wurden Stränge im Handbetrieb bei aufgebohrter Düse gefertigt (siehe 3.5.6). Diese wurden anschließend zerteilt und die Volumenstromverhältnisse bestimmt.

3.3. Ermittlung des Ausspritzverhaltens mit Eisencompound

Zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse im Coinjektionskopf wurden Versuche durchgeführt, bei denen Aggregat 1 mit reinem Polystyrol und Aggregat 2 mit dem Eisencompound und dann umgekehrt Polystyrol in Aggregat 2 und der Compound in Aggregat 1 gefüllt wurden. Je nach Einstellung wurden Verhältnisse Polystyrol/Eisencompound von 90/10 bis 50/50 gefertigt. Diese Verhältnisse ergaben SchneckenVorlaufgeschwindigkeiten für die beiden Aggregate, die in Summe auf 16 mm/s abgestimmt waren, z.B.: für 90/10, 14,4 mm/s zu 1,6 mm/s oder für 50/50, 8 mm/s zu 8 mm/s. Die 16 mm/s wurden deshalb gewählt, da sich daraus für die verwendeten Normprüfkörperwerkzeuge (siehe z.B. Abbildung 18) eine Soll-Fließfrontgeschwindigkeit nach ISO 249 ergab. Die zu analysierenden Teile wurden in Abschnitte unterteilt, zerkleinert, ausgewogen und in Filter gegeben. Je zwei Filter wurden in eine Extraktionshülse und diese anschließend in eine Soxhlet-Apparatur gegeben. Anschließend wurde aus den Proben das Polystyrol mittels Soxhlet-Extraktion (siehe Kap. 3.3.5) gelöst und das verbliebene Eisen ausgewogen. In Summe konnten so 30 Probekörper- bzw. Strangabschnitte je Extraktion analysiert werden.

In den Abbildungen der Eisenverteilung sind die gemessenen Ist-Werte durch Punkte eingetragen und der Verlauf zwischen den Messwerten als wahrscheinlicher Verlauf zu interpretieren.

3.3.1. Soxhlet-Extraktion

Zur Untersuchung der Zusammenströmsituation im Coinjektionskopf wurden die Proben mittels Soxhlet-Extraktion analysiert. Als Lösemittel wurde Ethylacetat verwendet.

Die Probe wurde in eine aus Zellulose bestehende flüssigkeitsdurchlässige Extraktionshülse gegeben und anschließend in der Soxhlet-Apparatur platziert. Die gesamte Apparatur (siehe Abbildung 11) wird luftdicht verschlossen und das Ölbad erhitzt. Dadurch verdampft das Lösemittel und wird über das Steigrohr nach oben geführt. An dem der Soxhletapparatur aufgesetzten Kühler kondensiert das Lösemittel und tropft auf die Probe. Durch den hydrostatischen Druck steigt sowohl der Flüssigkeitsstand in der Apparatur wie auch im Abheberohr an. Nach Erreichen des Maximalstands im Abheberohr wird das Lösemittel und das gelöste PS durch den entstehenden Unterdruck in den vier Liter Rundkolben rückgeführt. Durch erneutes Erhitzen des Ölbad verdampft das Lösungsmittel wieder und das gelöste PS bleibt zurück. Der Prozess läuft solange selbstständig ab, solange Energie zugeführt wird. Er wird erst beendet, wenn im abhebenden Ethylacetat kein PS mehr nachweisbar ist.

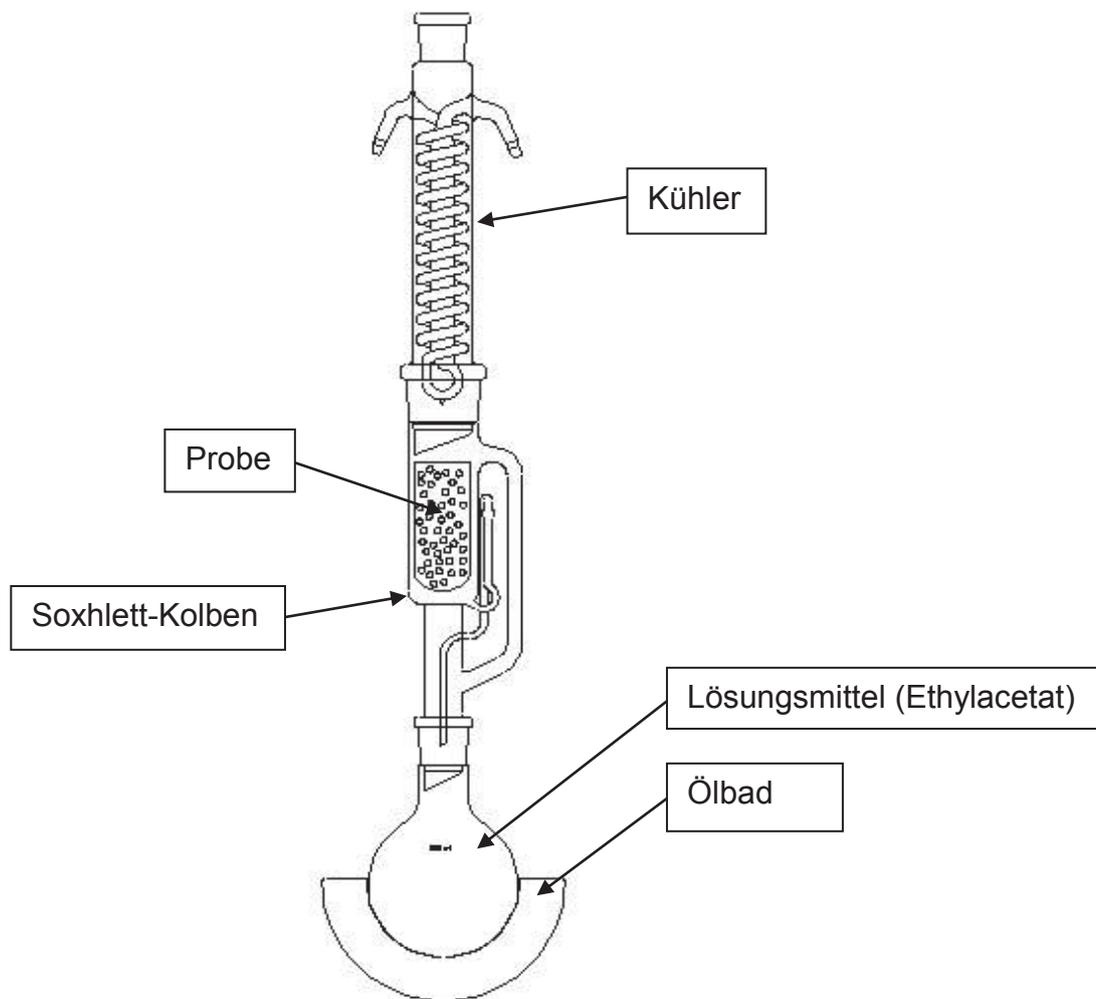


Abbildung 11: Soxhlet Extraktions Apparatur [57]

3.3.2. Verteilungsermittlung im Strang

Im Handbetrieb wurden Stränge mit zwei Aggregaten bei aktivierter achssynchroner Ablaufsteuerung hergestellt. Die Stränge wurden mit Hilfe einer Metallschiene von der Düse abgenommen und durch die Schwerkraft nach unten abgeführt. Die Düse wurde nicht verändert, d.h. weder der Austrittsquerschnitt noch die Anzahl der Mischelemente wurde verändert. Die erstarrten Stränge wurden in 9 gleich lange Abschnitte unterteilt und anschließend der Eisengehalt jedes Strangelements bestimmt. Die Strangabschnitte wurden mit 1 Anfang, bis zu 9, Ende, bezeichnet.

Die Zylindertemperaturen in den verschiedenen Heizzonen wurden laut Tabelle 1 und Tabelle 2 eingestellt.

Tabelle 1: Temperierung Aggregat 1, Strangspritzung ins Freie

Düsen- spitze	Zone Düse (°C)	Zone 1 (°C)	Zone 2 (°C)	Zone 3 (°C)	Zone 4 (°C)	Zone 1 (°C)	Zone 2 (°C)	Zone 3 (°C)	Zone Einzug (°C)	Einzug
	220	210	210	210	200	200	190	180	40	

Tabelle 2: Temperierung Aggregat 2, Strangspritzung ins Freie

Coinjektions- kopf	Zone 1 (°C)	Zone 2 (°C)	Zone 1 (°C)	Zone 2 (°C)	Zone 3 (°C)	Zone Einzug (°C)	Einzug
	210	200	200	190	180	40	

Abbildung 12 bis Abbildung 16 zeigen die Verteilungen des Eisengehalts über die Länge für die ins Freie gespritzte Stränge und die jeweiligen Prozessdaten (Hydraulikdruck, Einspritzgeschwindigkeit, Dosiervolumen) beider Aggregate für drei verschiedene Volumenstromverhältnisse.

In Abbildung 12 ist die Schwankung des Eisengehalts über die Stranglänge bei einem Volumenstromverhältnis von 50/50 ersichtlich. Der Ist-Gehalt an Eisen lag zu Beginn des Ausspritzens knapp über dem Sollwert und zeigte anschließend ein abnehmendes Verhalten. Zum Ende hin war ein leichter Anstieg ersichtlich. Im Mittelwert wurde der

Sollgehalt erreicht. Die absolute Streubreite lag bei 1 Gew-% und bedeutet einen relativen Streubereich von $\pm 3,7$ %. Die inhomogene Eisenverteilung kommt vermutlich aufgrund der unsymmetrischen Y-Anordnung und der damit verbundenen Schwierigkeit des Eindringens des Seitenstroms von Aggregat 2 in den Hauptstrom von Aggregat 1 zustande. Mitbestimmend für dieses Verhalten sind sicherlich auch die unterschiedlichen Viskositäten und elastischen Eigenschaften der beiden Schmelzströme.

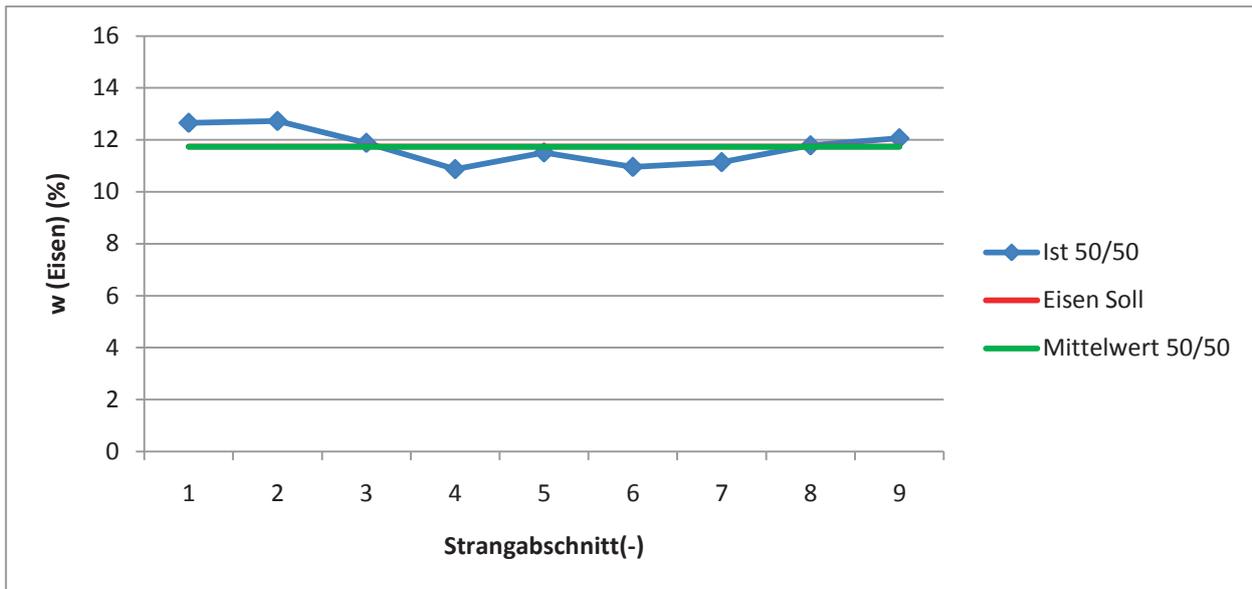


Abbildung 12: Eisengehalt im Strang, 50/50

In Abbildung 13 sind spezifischer Spritzdruck und Dosierhub beider Aggregate für das Volumenstromverhältnis 50/50 dargestellt. Der höhere Druck in Aggregat 2 dürfte aufgrund des längeren Fließwegs der Huckepackanordnung und der Viskositätsunterschiede der Materialien entstanden sein. Der Druckaufbau verläuft zu Beginn annähernd synchron und Aggregat 2 überfährt Aggregat 1 ab ca. 600 bar.

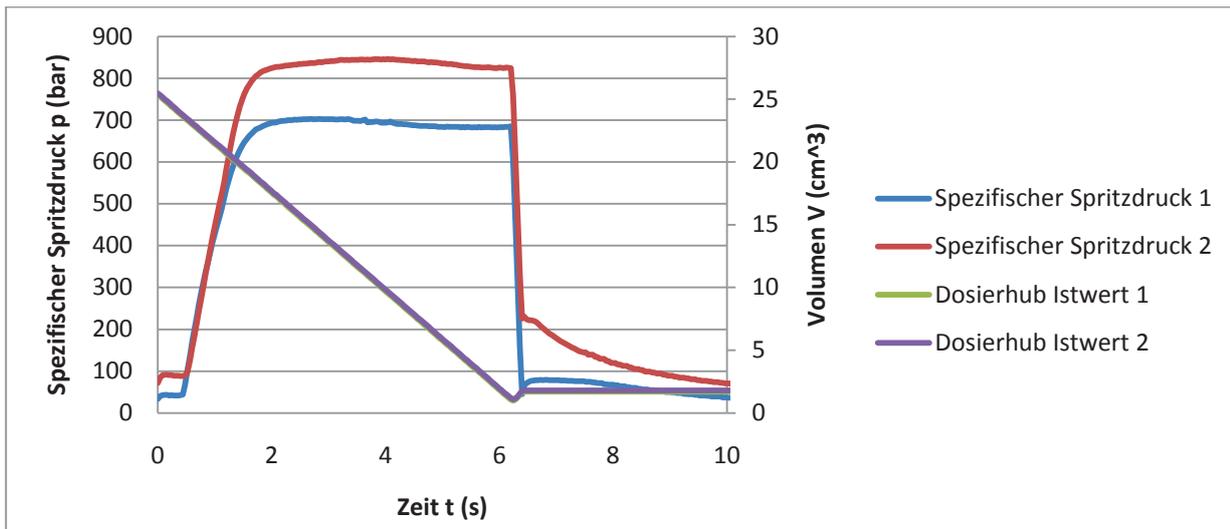


Abbildung 13: Prozessdaten, Eisengehalt im Strang, 50/50

In Abbildung 14 sieht man für das Volumenstromverhältnis 70/30, dass der Eisengehalt am Anfang des Strangs leicht unter dem Sollwert liegt, anschließend erfolgt ein Anstieg über den Sollgehalt mit einem Peak im dritten Abschnitt. Der unmittelbare Einbruch in Abschnitt 4 wird gefolgt von einem Wiederanstieg auf das Anfangsniveau. Im Mittel konnte der Sollwert um absolut 1 Gew-% nicht erreicht werden. Dies bedeutet eine relative Streubreite des Mittelwerts von $\pm 11\%$. Diese Abweichung ergibt sich vermutlich aufgrund der Schwierigkeit des Eindringens des Seitenstroms von Aggregat 2 in den Hauptstrom von Aggregat 1. Die Streubreite der Einzelwerte lag bei absolut 5,9 Gew-% und das sind $\pm 46,6\%$ Abweichung vom Mittelwert..

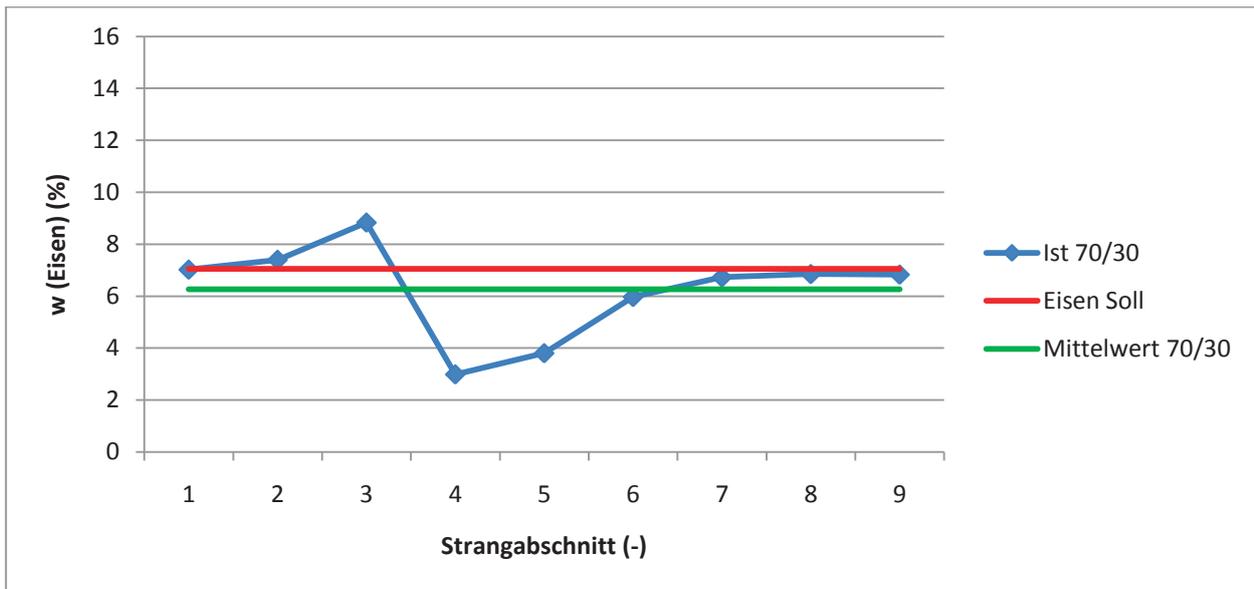


Abbildung 14: Eisengehalt im Strang, 70/30

In Abbildung 15 sind spezifischer Spritzdruck und Dosierhub beider Aggregate für das Volumenstromverhältnis 70/30 dargestellt. Der Druckanstieg in Aggregat 2 ist um etwa 0,5 Sekunden verzögert im Vergleich zu Aggregat 1, vermutlich aufgrund der geringeren SchneckenVorlaufgeschwindigkeit. Dieser verzögerte Druckaufbau weist auf eine „Propfenbildung“ im Seitenstrom hin, da dieser nicht sofort in den Hauptstrom eindringen kann. Erst nach Aufbau eines gewissen Druckes dürfte dieser „Pfropfen“ durchschießen, gefolgt von einem geringeren Strom bis sich langsam ein relativ konstanter Fluss ausbildet.

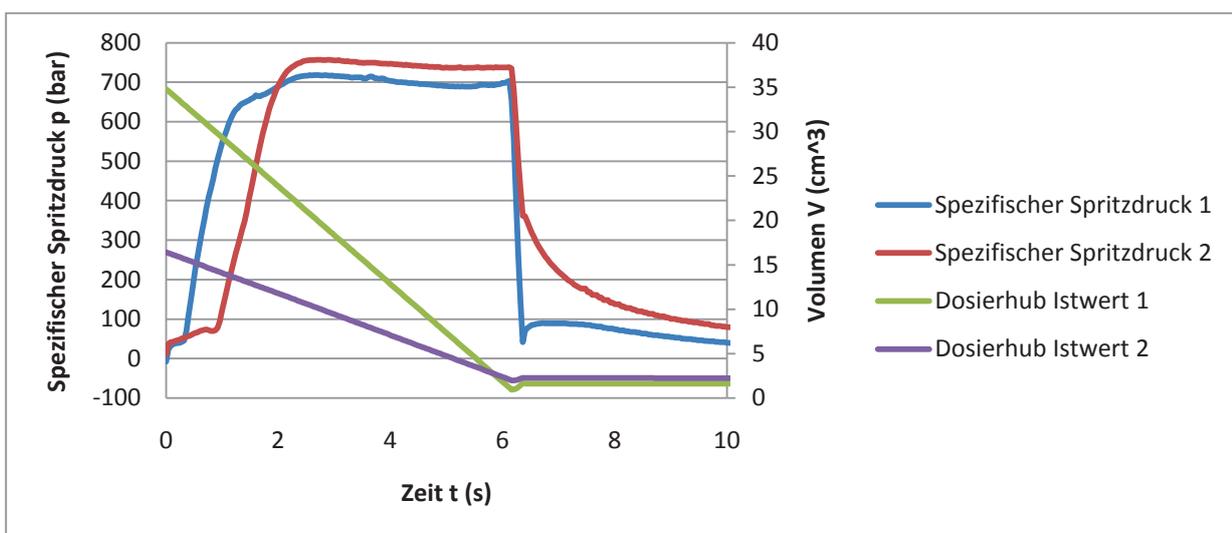


Abbildung 15: Prozessdaten, Eisengehalt im Strang, 70/30

Für das Volumenstromverhältnis 90/10 zeigt Abbildung 16, dass am Anfang des Strangs der Eisengehalt gleich null war. Anschließend war ein Anstieg zu verzeichnen mit einem Maximum im dritten Abschnitt und einem darauffolgenden Abfall wieder auf Null. Im Mittel wurde der Eisengehalt um absolut 1,1 Gew-% nicht erreicht. Dies bedeutet eine relative Abweichung von $\pm 47\%$. Die Streubreite lag bei absolut 6 Gew-% und relativ $\pm 127\%$.

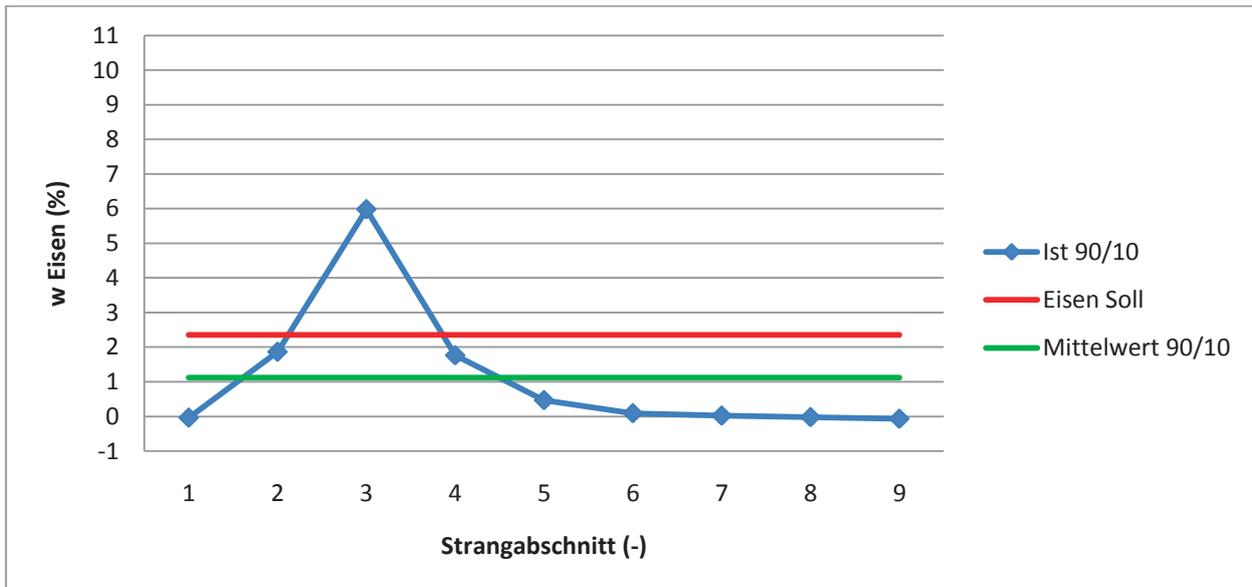


Abbildung 16: Eisengehalt im Strang, 90/10

In Abbildung 17 sind spezifischer Spritzdruck und Dosierhub beider Aggregate für das Volumenstromverhältnis 90/10 dargestellt. Der Druckanstieg in Aggregat 2 ist um ca. 1,5 Sekunden verzögert im Vergleich zu Aggregat 1, vermutlich aufgrund der geringen SchneckenVorlaufgeschwindigkeit. Hier scheint sich, wie zuvor beschrieben, aufgrund des verzögerten Druckaufbaus ebenfalls ein „Propfen“ im Seitenstrom auszubilden, welcher nach dem Druckaufbau durchschießt. Das Absinken des Gehalts anschließend auf null ist mit dem geringen Dosiervolumen zu erklären.

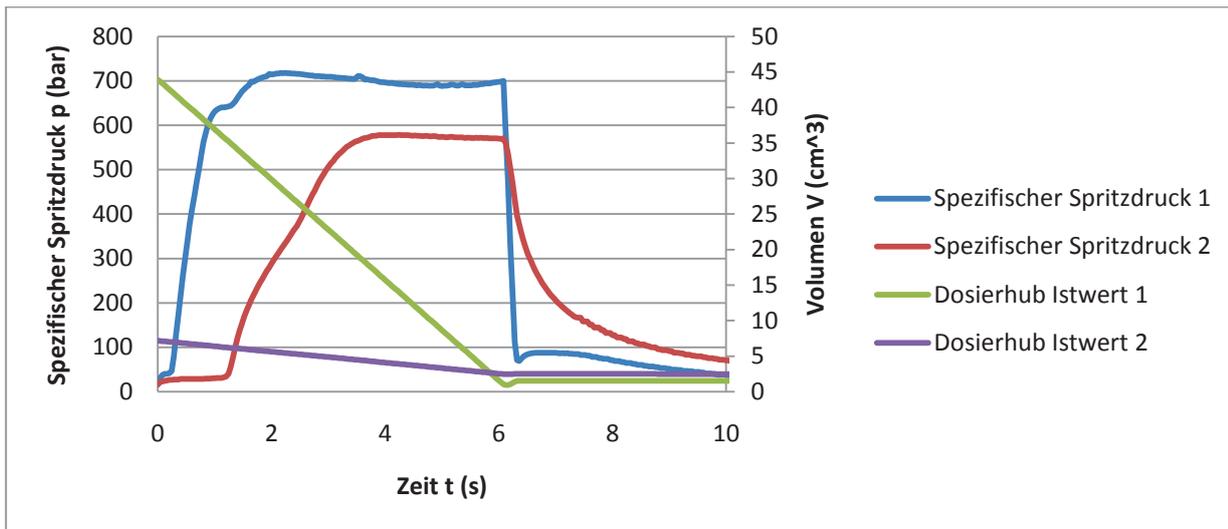
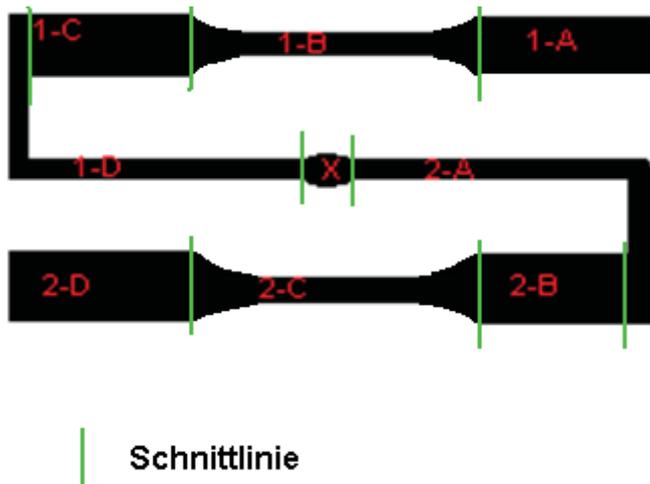


Abbildung 17: Prozessdaten, Eisengehalt im Strang, 90/10

Die Schwankungen über die Stranglänge und die Lage des Mittelwertes unter dem Sollwert dürften auf ungleiche Druckverhältnisse im Coinjektionskopf hinweisen. Ein Grund dafür ist vermutlich der längere Fließweg in Aggregat 1 bis zur Zusammenflussstelle. Dieser könnte sich durch das höhere, komprimierbare Volumen und den vergleichsweise höheren Druckabfall auswirken. Ebenso wäre es möglich, dass aufgrund von magnetischen Effekten ein Teil des Eisens aus dem Compound zurückgehalten wurde. Ganz klar zeigen Abbildung 15 und Abbildung 17 den verzögerten Druckanstieg im Aggregat 2, jenem mit dem geringeren Einspritzvolumen und der geringeren Einspritzgeschwindigkeit, im Vergleich zu Aggregat 1. Dies dürfte auf die geringere SchneckenVorlaufgeschwindigkeit zurückzuführen sein und lässt vermuten, dass auch die Masse mit einer gewissen Verzögerung in axialer Richtung gefördert wird.

3.3.3. Ermittlung der Eisenpulver-Verteilung im Probekörper

Im Automatikbetrieb wurden ISO-Zugprobekörper, Type 1A, mit zwei Aggregaten in achssynchronem Betrieb gefertigt. Aggregat 1 wurde mit reinem Polystyrol und Aggregat 2 mit dem Eisencompound befüllt. Der gesamte Schuss, d.h. beide Probekörper und das Angussystem, wurde laut Abbildung 18 in 9 Abschnitte unterteilt und der Eisengehalt bestimmt.



Schnittlinie

Abbildung 18: Unterteilung der Probekörper, Type 1A, zur Ermittlung des Eisengehalts

Das Element X kennzeichnet hier den Stangenanguss und 1-D bis 1-A den Fließweg zur Füllung von Kavität 1 während 2-A – 2-D den Fließweg zur Füllung von Kavität 2 bezeichnen.

In Abbildung 19 bis Abbildung 24 sind die Eisengehalte über die Fließweglänge und die jeweiligen Prozessdaten für drei verschiedene Volumenstromverhältnisse dargestellt.

Abbildung 19 zeigt den Eisengehalt im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 50/50. Es wurden 2 Schuss untersucht und die Analyse zeigte für beide ähnliche Ergebnisse. Über die Fließweglänge war deutlich ein ansteigender Eisengehalt zu erkennen. Im Mittel wurde der Sollwert um absolut 0,6 Gew-% übertroffen. Dies bedeutet eine relative Abweichung von $\pm 0,5\%$. Die absolute Streuung der Messwerte lag im Bereich von $\pm 3,9\%$ Gew-% und dies sind $\pm 16,6\%$ relativ. Eine mögliche Erklärung dieses Verhalten könnte die unsymmetrische Zusammenströmsituation oder die Umlenkungen und Querschnittsveränderungen im Spritzgießwerkzeug sein. Ebenso tragen auch der Viskositätsunterschied zwischen dem reinen PS und dem Eisencompound und die elastischen Schmelzeeigenschaften hierzu bei.

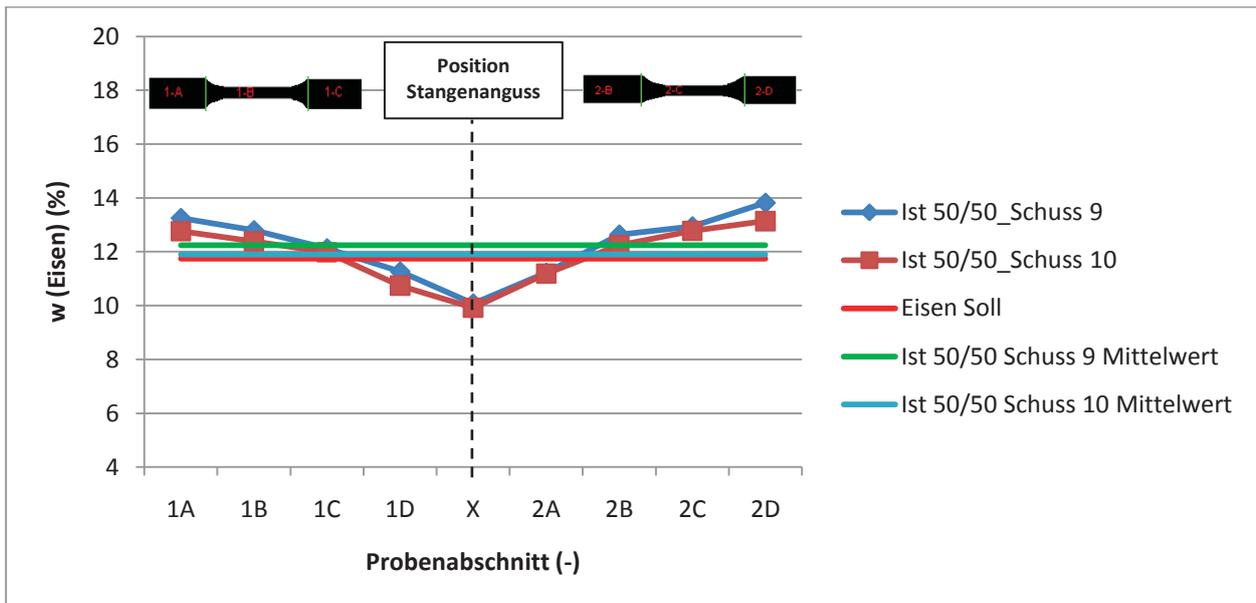


Abbildung 19: Eisengehalt im Probekörper, 50/50

In Abbildung 20 ist für ein Volumenstromverhältnis von 50/50 in Aggregat 2 ein wesentlich höherer spezifischer Spritzdruck ersichtlich. Dieser Unterschied kommt vermutlich durch den längeren Fließweg im Vergleich zu Aggregat 1 zustande.

Der Hydraulikdruckanstieg verlief annähernd gleich bis ca. 500 bar, anschließend überstieg Aggregat 2 den Druck in Aggregat 1. Am Ende des Dosierens von Aggregat 1, welches diesen Vorgang früher beendete, fiel der Staudruck auf ein niedrigeres Niveau ab und wurde nicht, wie geplant, konstant aufrechterhalten bis Aggregat 2 den Dosiervorgang ebenfalls beendet hat. Dies sollte durch Aufspielen eines Softwareupdates behoben werden.

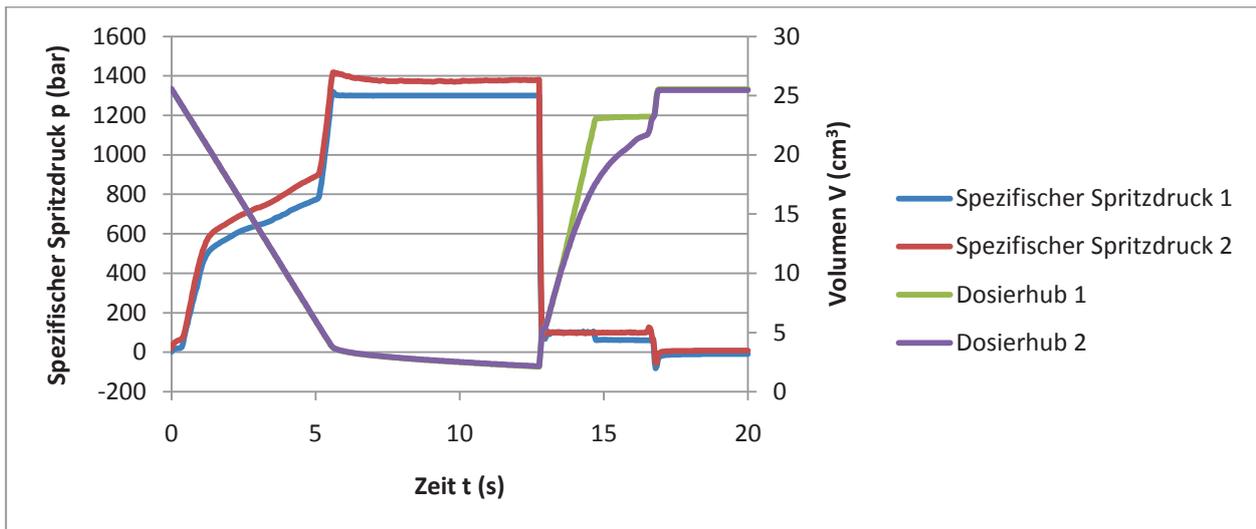


Abbildung 20: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 50/50

Abbildung 21 zeigt den Eisengehalt im Probekörper über die Fließweglänge für ein Volumenstromverhältnis von 70/30. Auch hier wurden 2 Schuss untersucht, und klar zu erkennen war der ansteigende Gehalt über die Fließweglänge. Im Mittel wurde der Sollgehalt um eine absolute Abweichung von 0,5 Gew-% und eine relative von $\pm 7,5\%$ nicht erreicht. Die absolute Streuung der Messwerte lag im Bereich von 1,8 Gew-%. Das ist ein relativer Streubereich von $\pm 12,7\%$. Ursache für die schwankenden Gehalte könnte hier ebenfalls die unsymmetrische Zusammenführung sowie die Umlenkungen und Querschnittsveränderungen im Werkzeug sein, ebenfalls auch der Viskositätsunterschied und die unterschiedlichen elastischen Eigenschaften der Materialien.

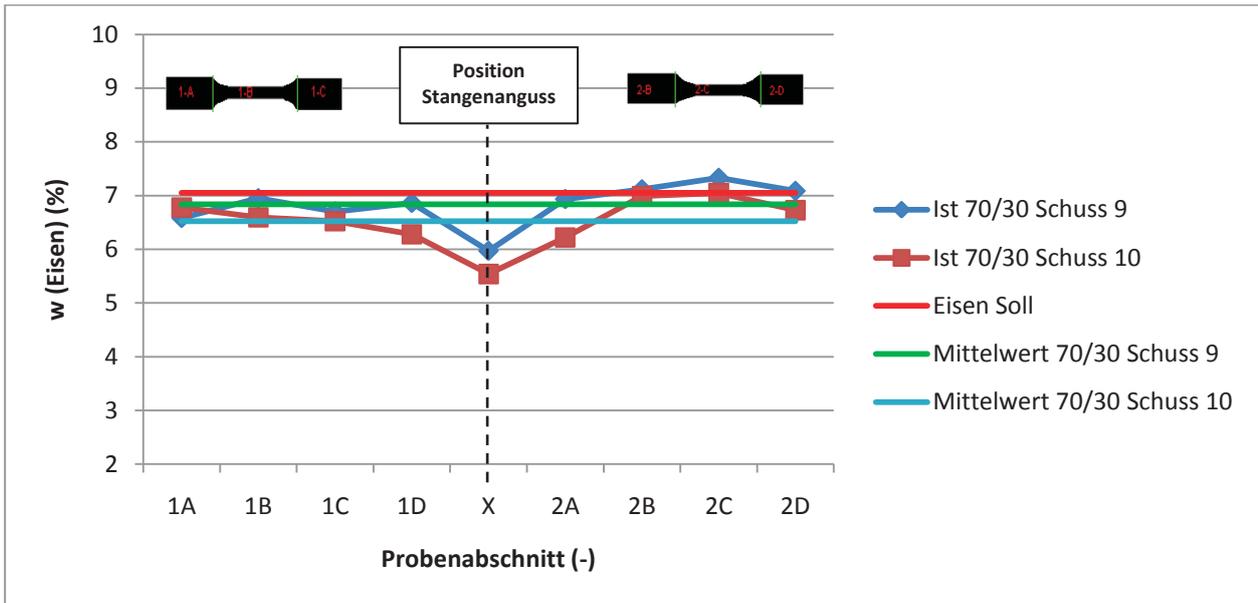


Abbildung 21: Eisengehalt im Probekörper, 70/30

Abbildung 22 zeigt den Druckverlauf und den Dosierhub für ein Volumenstromverhältnis von 70/30. Der Druckanstieg in Aggregat 2 läuft etwas langsamer ab als in Aggregat 1, vermutlich aufgrund der geringeren Einspritzgeschwindigkeit und des geringeren Einspritzvolumens. Ebenfalls zu sehen ist der Staudruckabfall in Aggregat 1 nach Beendigung der Dosierung und während des Wartens auf die gemeinsame Kompressionsentlastung mit Aggregat 2.

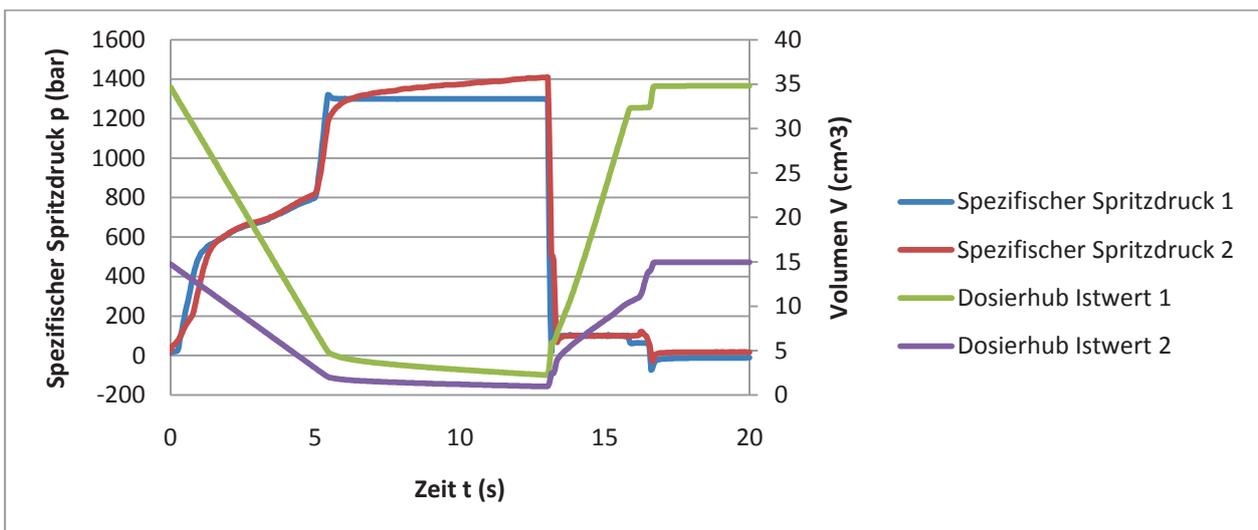


Abbildung 22: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 70/30

Abbildung 23 zeigt den Eisengehalt in den Proben für ein Volumenstromverhältnis von 90/10. Hier wurden ebenfalls 2 Schuss untersucht, und ebenso war der ansteigende Gehalt über die Fließweglänge klar ersichtlich. Die absolute Streubreite lag im Bereich von 0,5 Gew-%. Dies ist ein relativer Streubereich von $\pm 41,6\%$. Der Sollgehalt wurde im Mittel um absolut 1,4 Gew-% nicht erzielt. In relativen Zahlen ausgedrückt sind das $\pm 21,2\%$. Sehr wahrscheinlicher Einflussfaktor für das Verhalten hier ist der große Unterschied in Einspritzgeschwindigkeit und Dosiervolumen, ebenso der Viskositätsunterschied, der Unterschied in den elastischen Eigenschaften und die geometrischen Gegebenheiten in der Zusammenführung und im Werkzeug.

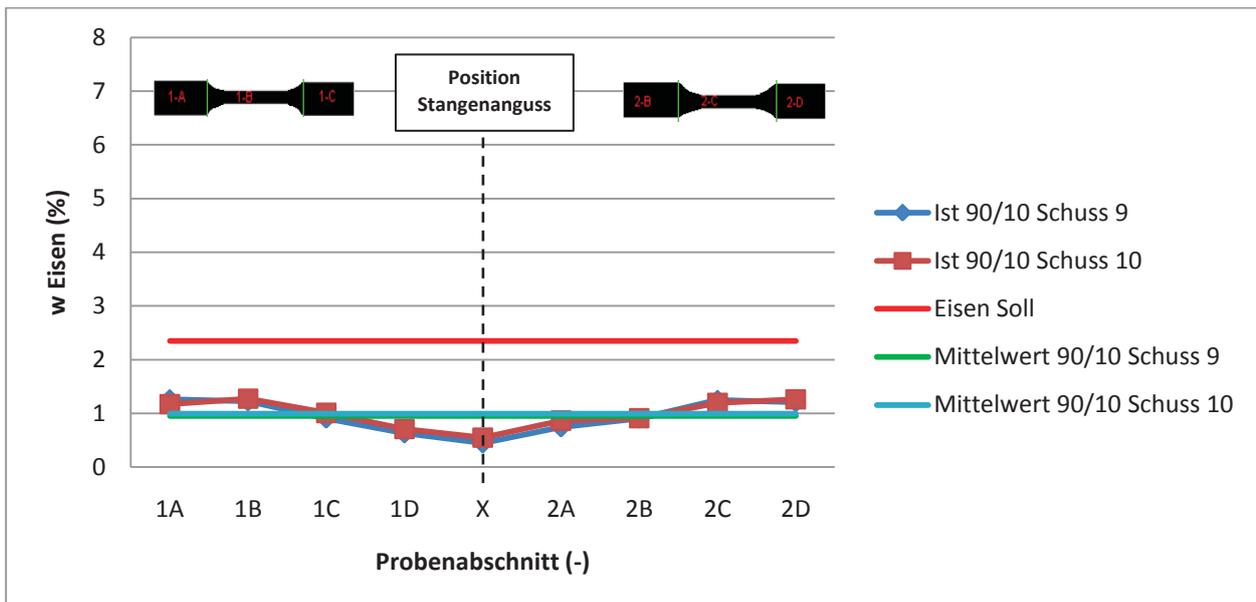


Abbildung 23: Eisengehalt im Probekörper, 90/10

Für ein Volumenstromverhältnis von 90/10 zeigt Abbildung 24 den Druckverlauf sowie den Dosierhub. Der Druckaufbau in Aggregat 2 war sehr viel langsamer als in Aggregat 1 und das Druckniveau wird sowohl beim Einspritzen wie auch im Nachdruck nicht erreicht. Dies wäre eine Erklärung für den geringen Mittelwert. Bei den hohen Drücken wird ersichtlich, dass Aggregat 2 keine Axialbewegung mehr ausführen kann und daher auch kein Materialtransport mehr stattfindet. Dennoch muss ein konstanter niedrigerer Anteil in das Werkzeug strömen. Ansonsten wäre die gleichmäßige Abnahme über die Fließweglänge nicht zu erklären.

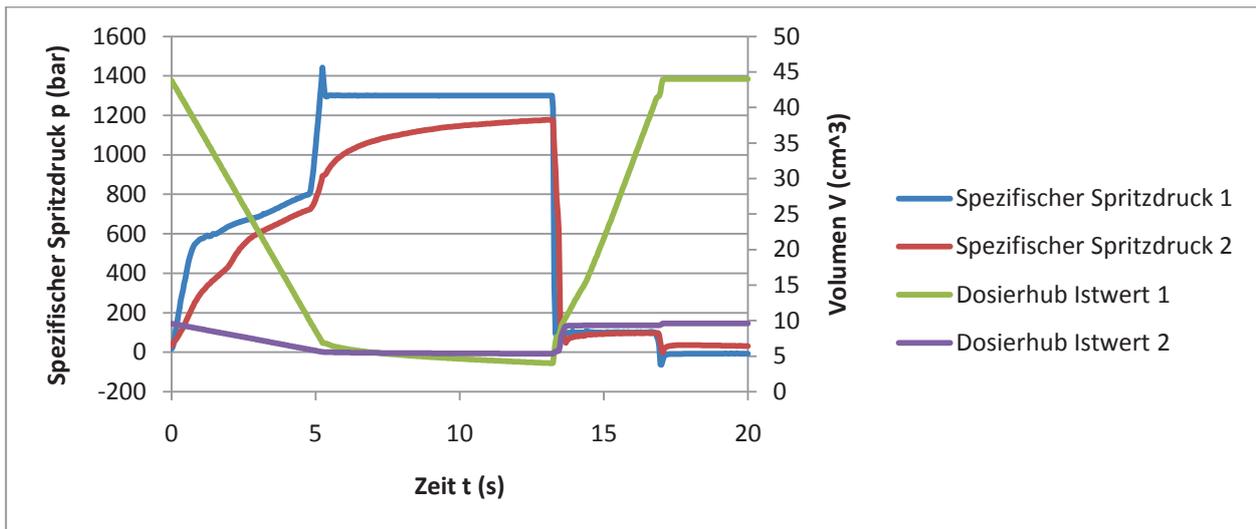


Abbildung 24: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 90/10

3.3.4. Probenspritzung mit Zeitverzögerung

Aufgrund des verzögerten und des langsameren Druckaufbaus in Aggregat 2 bei den Strangherstellungen, insbesondere bei einer Abweichung vom Volumenstromverhältnis von 50/50, wurde versucht, durch einen zeitverzögerten Einspritzstart des Aggregats mit dem größeren Einspritzvolumen eine gleichmäßige Eisengehaltsverteilung zu erzielen. Diese Verzögerung wurde in den Zyklusablauf integriert. Es war notwendig, den Eisencompound in Aggregat 1 und das reine Polystyrol in Aggregat 2 zu geben, da aufgrund der achssynchronen Steuerung die Verzögerung in Aggregat 2 aus programmtechnischen Gründen nicht ausgeführt wurde.

Für drei verschiedene Verzögerungen sind in Abbildung 25 bis Abbildung 30 die Eisenverteilung über die Fließweglänge und die jeweiligen Prozessdaten für ein Volumenstromverhältnis von 30/70 dargestellt.

Die Versuche wurden ebenfalls mit den Volumenstromverhältnissen von 50/50 und 10/90 gemacht, jedoch nicht dargestellt, da die gleichen Phänomene zu beobachten waren und es zu keinem höheren Informationsstand führen würde.

Abbildung 25 zeigt den Eisenanteil über die Fließweglänge bei einer Verzögerung von 0,4 Sekunden. Untersucht wurde 1 Schuss, und optisch war eine verbesserte Verteilung zu vermuten. Die Analyse zeigte aber wie zuvor eine Zunahme des Eisengehalts über die Fließweglänge in einem absoluten Streubereich von 2,6 Gew-%. Das bedeutet eine relative Streuung von $\pm 16,3\%$. Im Mittel lag der Gehalt um absolut 0,8 Gew-% und um relativ $\pm 11\%$ über dem Sollwert Aufgrund der Verzögerung ein höheres Volumen des Eisencompounds eingespritzt wurde.

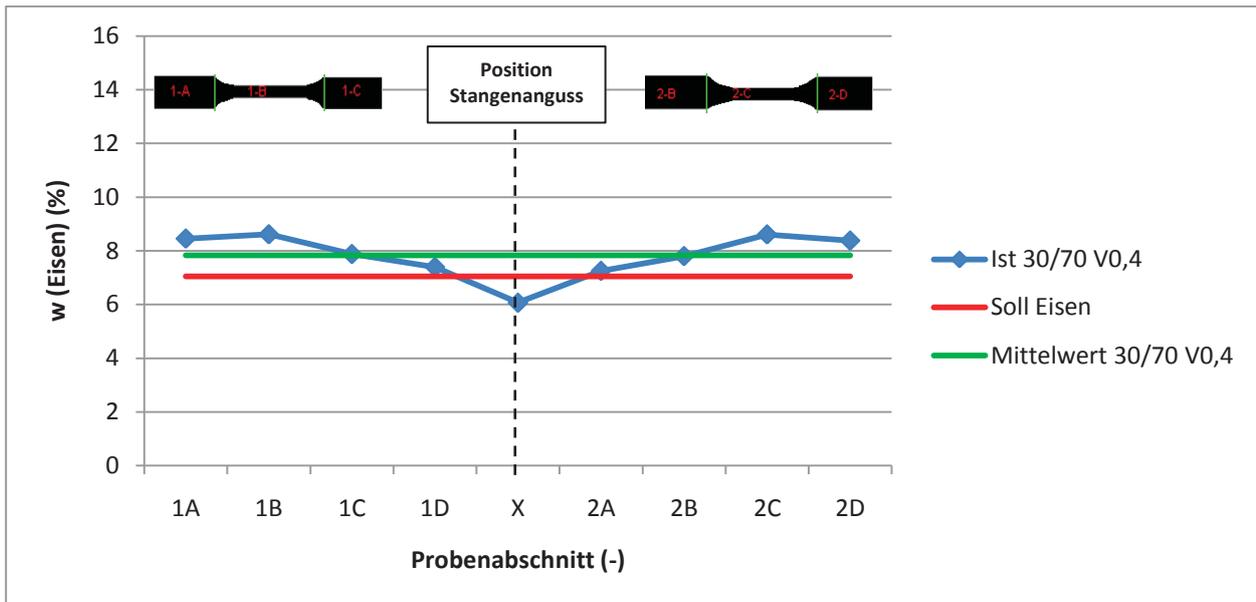


Abbildung 25: Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Verzögerung 0,4 Sekunden

In Abbildung 26 sind der spezifische Spritzdruck und der Schneckenweg der beiden Aggregate dargestellt. Die Verzögerung in Aggregat 2 von 0,4 Sekunden sorgt für einen verzögerten Druckaufbau in Aggregat 2, anschließend wird der Zyklus normal abgefahren.

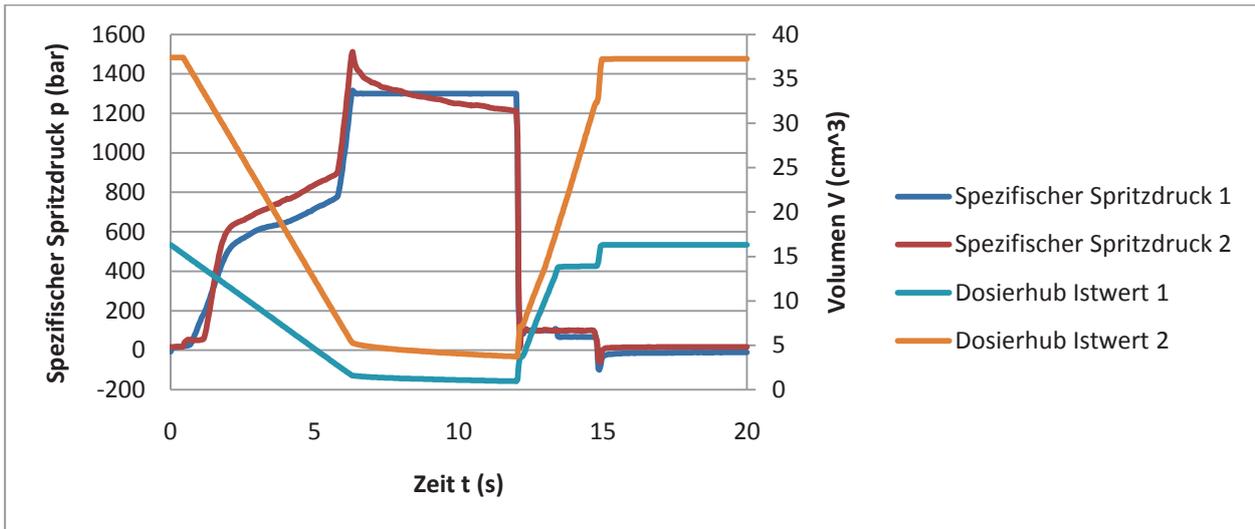


Abbildung 26: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Verzögerung 0,4 Sekunden

Abbildung 27 zeigt die Verteilung des Eisens über die Fließweglänge bei einer Verzögerung von 1 Sekunde. Die Zunahme über die Fließweglänge wurde durch die größere Verzögerung verstärkt. Der Mittelwert lag aufgrund des höheren eingespritzten Volumens des Eisencompounds um absolut 1,3 Gew-% und relativ um ±18 % höher als der Sollwert. Die absolute Streuung lag im Bereich von 3,3 Gew-% und einer relativen von ±20 %.

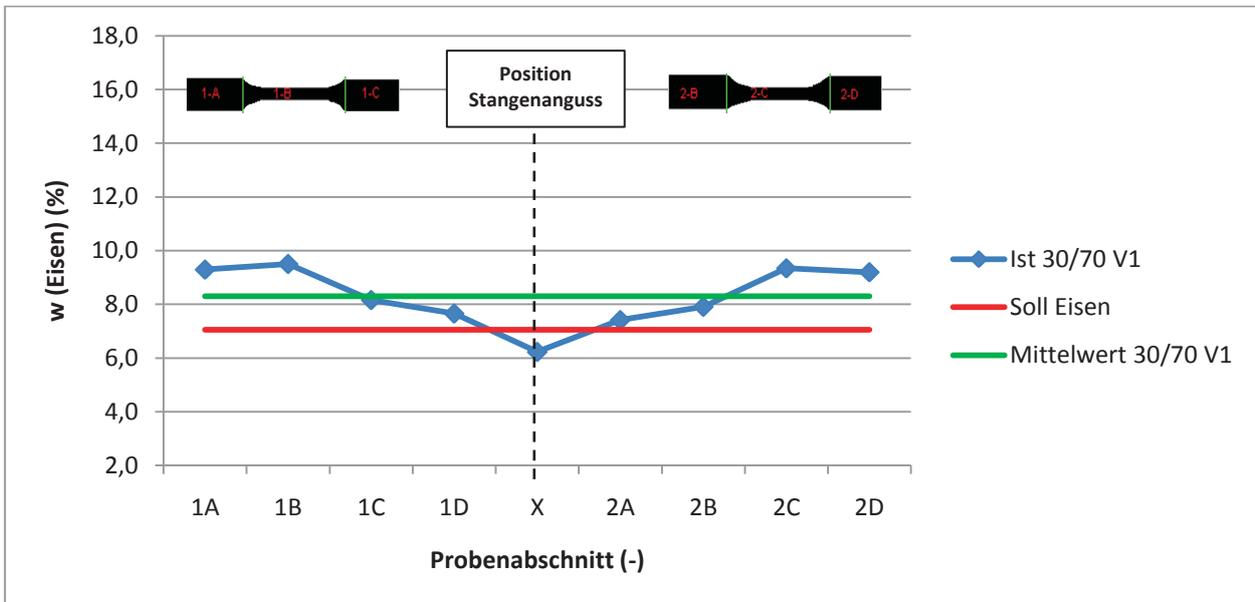


Abbildung 27: Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Verzögerung 1 Sekunde

Der spezifische Spritzdruck und der Schneckenweg sind in Abbildung 28 dargestellt. Die Verzögerung in Aggregat 2 führt zu einem verzögerten Druckaufbau, und das Einspritzvolumenverhältnis wurde verschoben, wodurch es zum überhöhten Mittelwert für den Eisengehalt kam.

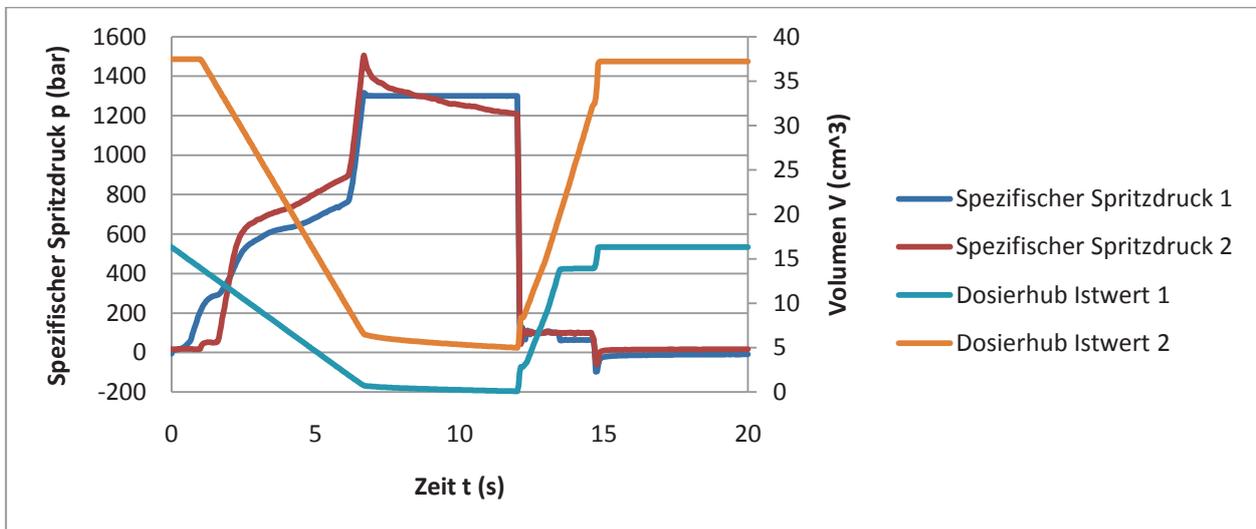


Abbildung 28: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Verzögerung 1 Sekunde

In Abbildung 29 ist der Eisenanteil über die Fließweglänge bei einer Verzögerung von 2 Sekunden dargestellt. Es zeigte sich der gleiche Verlauf wie bei geringeren Verzögerungen, nur die Streuung erhöhte sich absolut auf 5 Gew-% und relativ auf ± 30 %. Die Abweichung des Mittelwerts vom Sollwert beträgt absolut 1,4 Gew % und relativ ± 10 %.

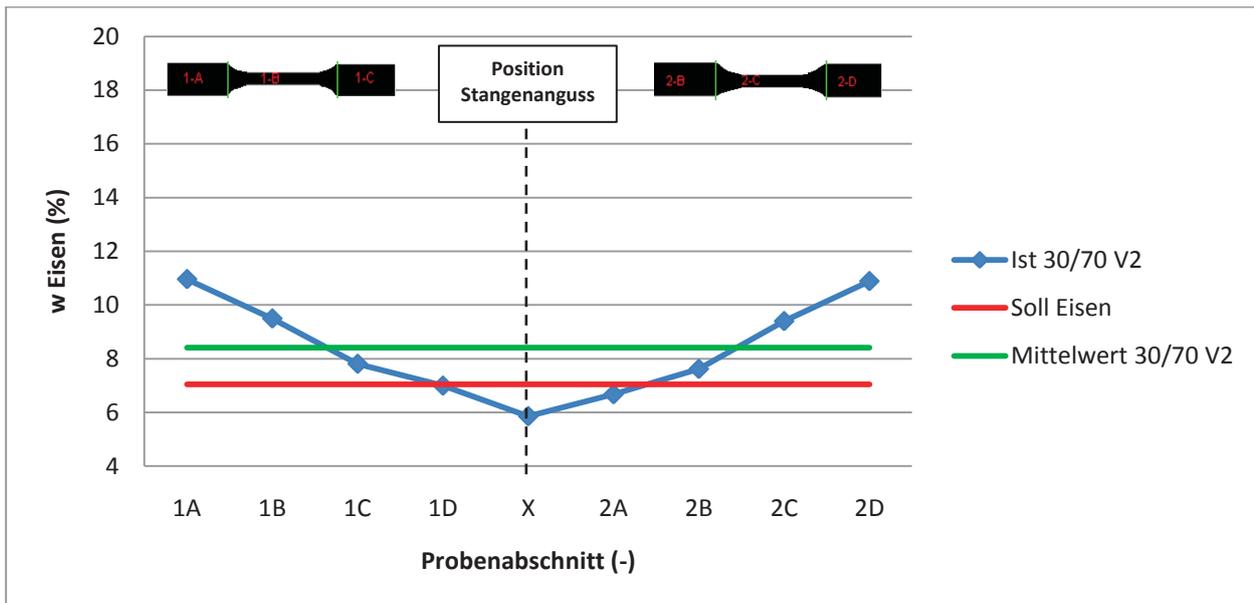


Abbildung 29: Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Verzögerung 2 Sekunden

Abbildung 30 zeigt den Hydraulikdruckverlauf und den Schneckenweg für eine Verzögerung von 2 Sekunden. Die Verzögerung in Aggregat 2 führt zu einem stark verzögerten Druckaufbau, und das Einspritzvolumenverhältnis wurde verschoben.

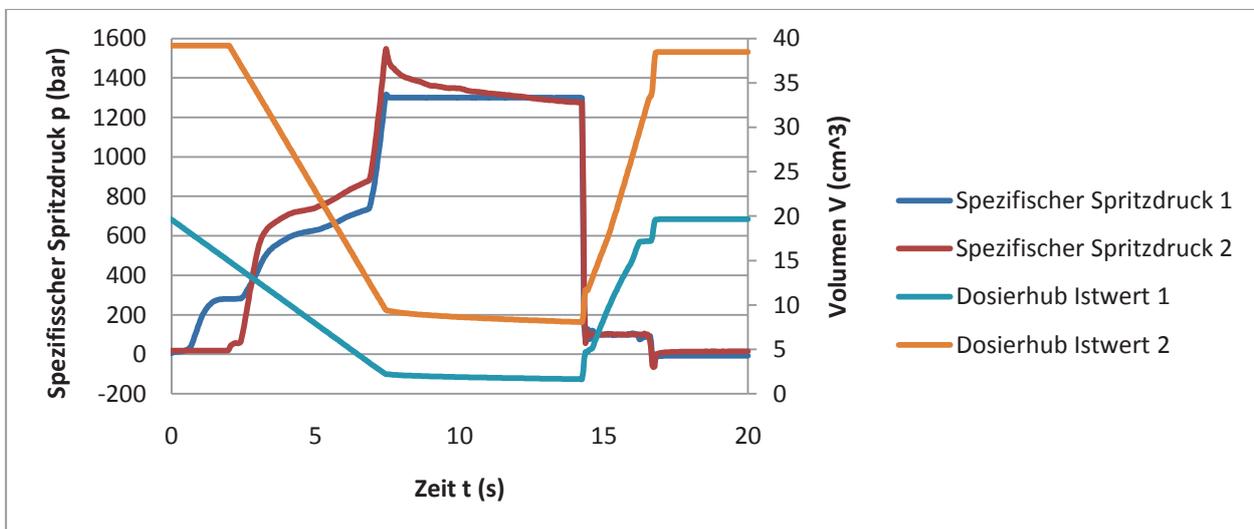


Abbildung 30: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Verzögerung 2 Sekunden

Der Versuch, durch verzögertes Einspritzen eine gleichmäßige Verteilung des Eisens über den gesamten Zyklus zu erreichen, führte zu keiner positiven Veränderung. Über

die Fließweglänge zeigte sich, wie in den Versuchsreihen zuvor, ein ansteigender Eisengehalt. Der Mittelwert der Proben lag über dem Sollwert und ist auf die Verschiebung des Volumenverhältnisses durch das verzögerte Einspritzen zurückzuführen. Aufgrund des verzögerten Einspritzens war es notwendig, ein höheres Compoundvolumen zu dosieren, um einen Restmassepulster zu erhalten.

3.3.5. Probenspritzung mit Geschwindigkeitsprofil

Nach dem erfolglosen Versuch, durch Einspritzen mit Verzögerung eine Verbesserung der Eisengehaltsverteilung zu erzielen, wurde versucht, durch Geschwindigkeitsprofil eine ausgeglichene Verteilung zu erzielen. In der CC200 Steuerung ist das Einstellen eines Geschwindigkeitsprofils über den Schneckenweg problemlos möglich, da für die einzelnen Punkte sowohl die Geschwindigkeit wie auch die Position am Schneckenweg definierbar sind (siehe Abbildung 31).



Abbildung 31: Einstellung der Einspritzgeschwindigkeit bei Abfahren eines Profils

Um eine gleichmäßige Verteilung des Eisenpulvers über den Zyklus zu erreichen, wurde versucht, durch Abfahren eines Geschwindigkeitsprofils in einem Aggregat, während Konstanthaltung der Geschwindigkeit des anderen Aggregats eine Homogenisierung zu erzielen. Da in den vorangegangenen Versuchen der Eisengehalt über die Fließweglänge zunahm, wurde ein dem entgegenwirkendes Geschwindigkeitsprofil eingestellt.

Für 3 unterschiedliche Volumenstromverhältnisse wurden 2 verschiedene Geschwindigkeitsprofile eingestellt.

3.3.5.1. Geschwindigkeitsprofil 1

Das erste Geschwindigkeitsprofil wurde so eingestellt, dass annähernd gleiche Kurven für den Schneckenanschubdruck zustande kamen. (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Geschwindigkeitsprofil 1, 50/50

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6	Position 7	Position 8	Position 9	Position 10
Schneckenweg s (mm)	0,0	10,3	12,3	14,9	21,2	35,0	66,0	67,0	70,0	71,0
Einspritzgeschwindigkeit v (mm/s)	8,0	14,0	20,0	20,0	20,0	18,0	8,0	8,0	10,0	15,0

In Abbildung 32 ist der Eisengehalt über die Fließlänge im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 50/50 bei Verwendung eines Geschwindigkeitsprofils für das Einspritzen (siehe Tabelle 3) dargestellt. Die Verteilung erfuhr zwar eine Verbesserung, aber es lag noch immer ein absoluter Streubereich von 2 Gew-% vor. Relative gesehen ist das ein Streubereich von $\pm 5,5$ %. Im Mittel lag der absolute Eisengehalt um 6,9 Gew-% über dem Sollwert. Dies ist eine relative Abweichung von ± 58 %. Grund hierfür dürfte sein, dass sich durch das gewählte Einspritzgeschwindigkeitsprofil die Druckverhältnisse geändert haben und ein höheres Dosiervolumen in Aggregat 1 benötigt wurde.

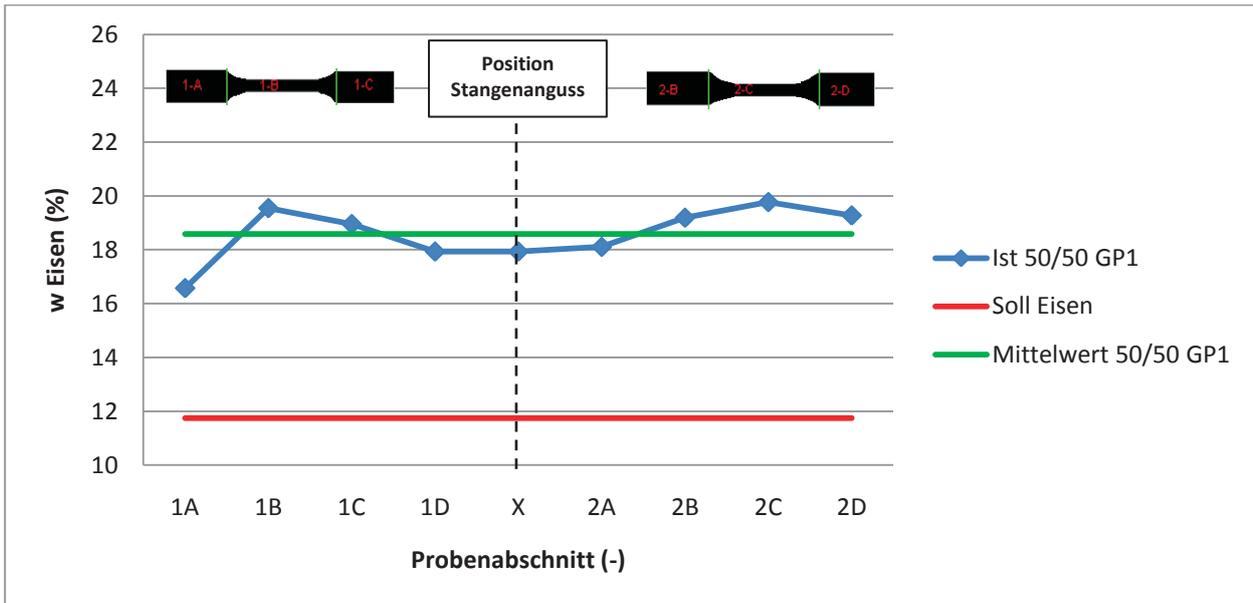


Abbildung 32: Eisengehalt im Probekörper, 50/50, Geschwindigkeitsprofil 1

Abbildung 33 zeigt die Prozessdaten für ein Volumenstromverhältnis von 50/50. Die Einspritzgeschwindigkeit in Aggregat 1 verzeichnete eine Absenkung am Beginn mit nachfolgendem Anstieg bis zum Ende der Einspritzphase. Das Geschwindigkeitsprofil wurde so gewählt, dass ein möglichst gleichmäßiger Druckanstieg in beiden Aggregaten erfolgte.

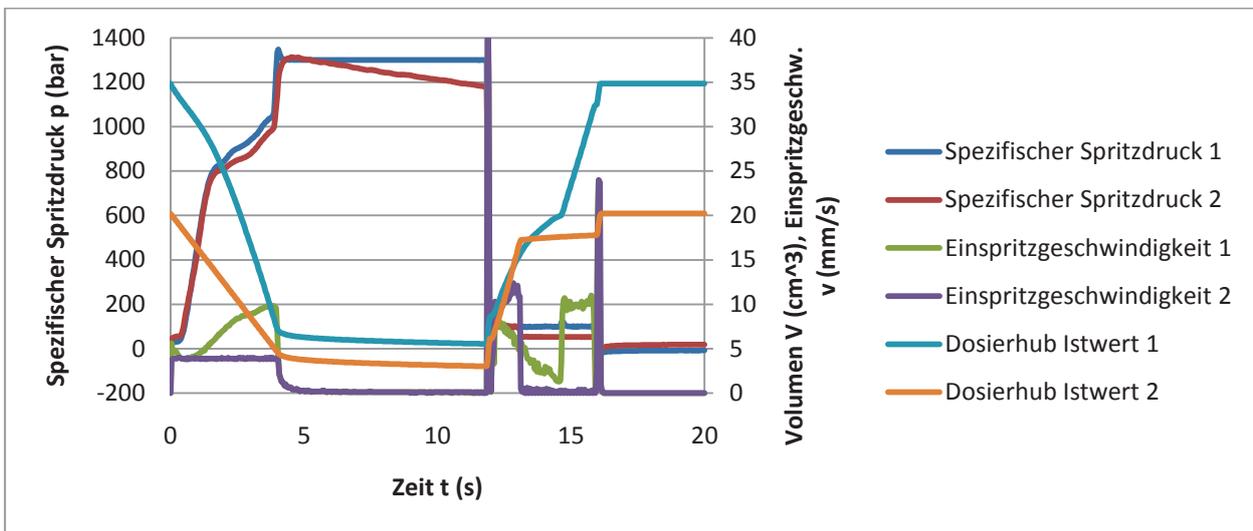


Abbildung 33: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 50/50, Geschwindigkeitsprofil 1

In Anlehnung an das Volumenstromverhältnis 50/50 wurde das Geschwindigkeitsprofil für 30/70 eingestellt (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Geschwindigkeitsprofil 1, 30/70

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6	Position 7	Position 8	Position 9	Position 10
Schneckenweg s (mm)	0,0	5,0	7,0	12,7	42,1	45,0	48,0	52,0	52,2	53,0
Einspritzgeschwindigkeit v (mm/s)	4,8	8,4	12,0	12,0	7,0	8,0	8,0	4,8	4,8	4,8

Für ein Volumenstromverhältnis von 30/70 ist die Verteilung des Eisens über die Fließweglänge in Abbildung 34 dargestellt. Der absolute Streubereich von 1,7 Gew-%, bedeutet eine Verbesserung des Zustandes. Relativ sind dies $\pm 6,3\%$. Der Mittelwert lag jedoch deutlich, absolut um 6,3 Gew-% und relative um $\pm 88,4\%$ über dem Soll. Dies ist vermutlich auf das höhere Einspritzvolumen in Aggregat 1 infolge des Einspritzgeschwindigkeitsprofils zurückzuführen.

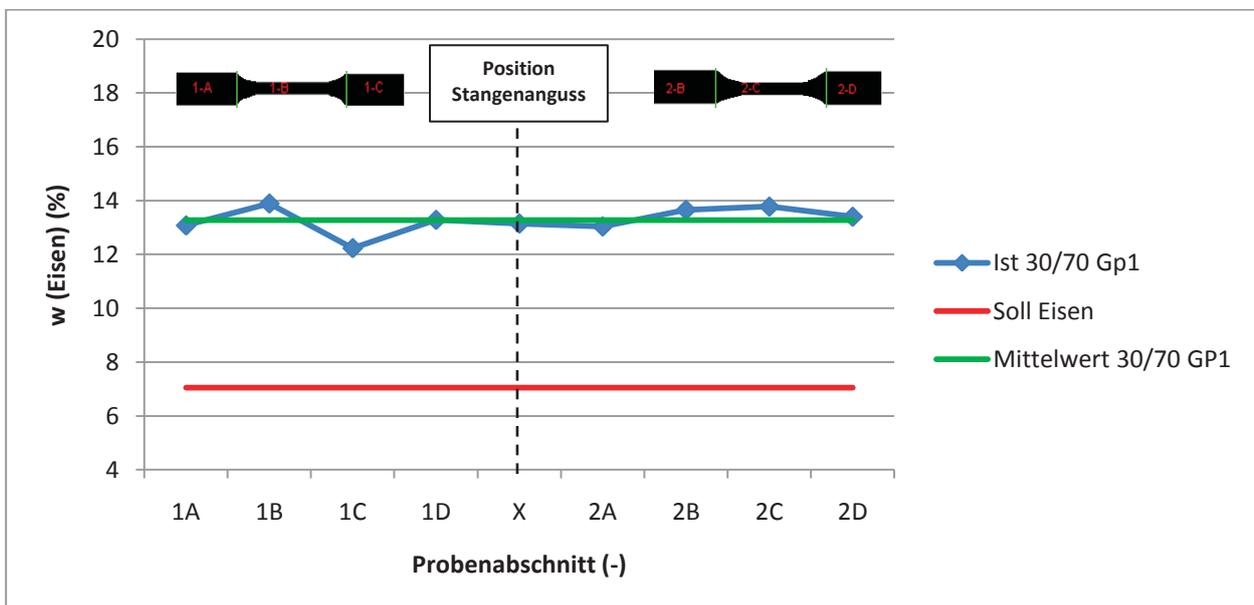


Abbildung 34: Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Geschwindigkeitsprofil 1

In Abbildung 35 sind die Prozessdaten über den Zyklus dargestellt. Beim eingestellten Geschwindigkeitsprofil wurde versucht, einen möglichst gleichmäßigen Druckaufbau zu

erzielen. Die Abstufungen im Geschwindigkeitsprofil wurden in Anlehnung an jenes vom Volumenstromverhältnis 50/50 vorgenommen (siehe Tabelle 4).

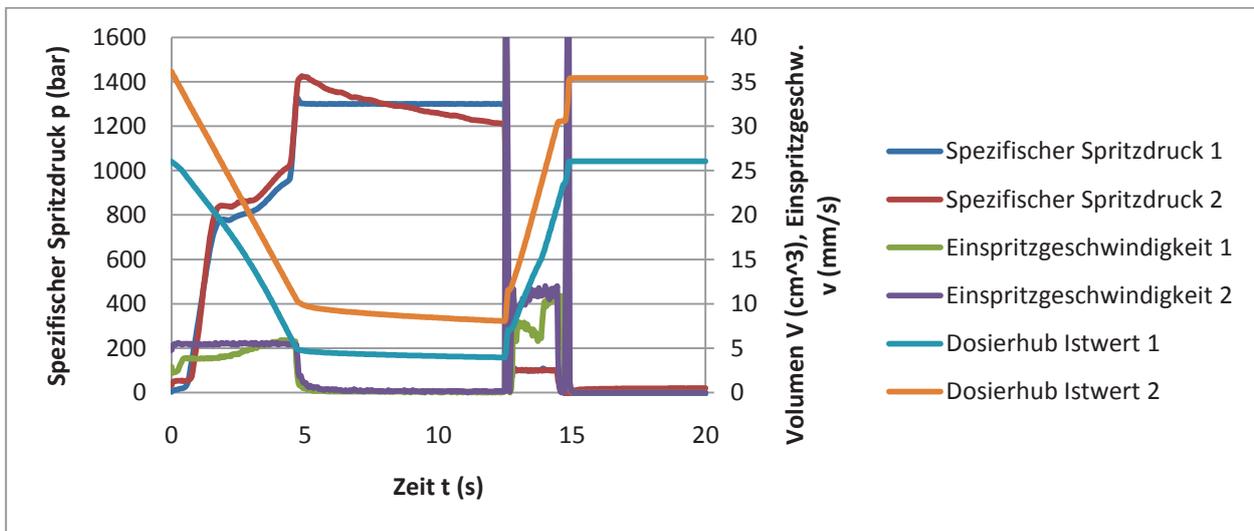


Abbildung 35: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Geschwindigkeitsprofil 1

Das eingestellte Geschwindigkeitsprofil für ein Volumenstromverhältnis von 10/90 wurde in Tabelle 5 definiert.

Tabelle 5: Geschwindigkeitsprofil 1, 10/90

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6	Position 7	Position 8	Position 9	Position 10
Schneckenweg s (mm)	0,0	2,2	3,0	13,5	18,3	19,5	20,8	21,7	22,7	23,0
Einspritzgeschwindigkeit v (mm/s)	1,6	3,0	6,0	6,0	3,0	2,7	1,6	1,6	2,0	3,0

Abbildung 36 zeigt den Eisengehalt für ein Volumenstromverhältnis von 10/90. Man sieht den schwankenden Anteil über die Fließweglänge. Das Maximum liegt hier nicht am Ende sondern in der Mitte des Fließweges. Durch das eingestellte Geschwindigkeitsprofil wird eine Verschiebung des Mittelwert um absolut 0,46 Gew-% über den Sollwert erzielt. Das bedeutet eine Abweichung von $\pm 27\%$. Das ist wahrscheinlich auf das größere Einspritzvolumen zurückzuführen ist. Die absolute Streuung der Messwerte lag bei 2,3 Gew-% und der relative Streubereich umfasst $\pm 37\%$.

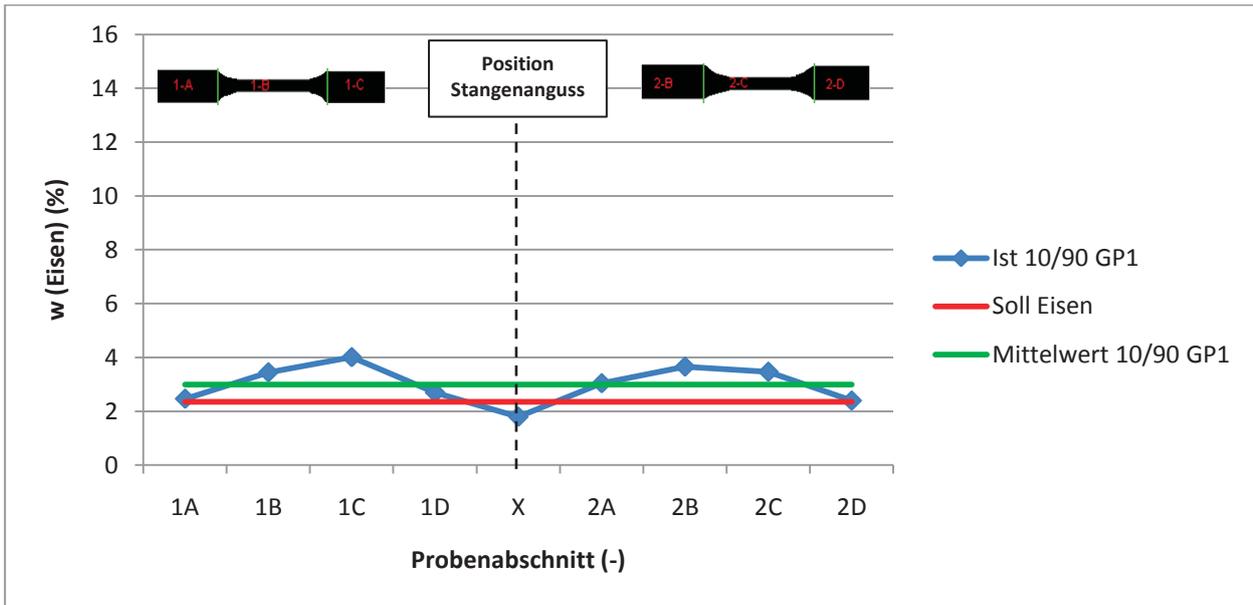


Abbildung 36: Eisengehalt im Probekörper, 10/90, Geschwindigkeitsprofil 1

Die Prozessdaten für ein Volumenstromverhältnis von 10/90 sind in Abbildung 12 dargestellt. Schön zu sehen ist das Abfahren des Geschwindigkeitsprofils in Aggregat 1 und die daraus resultierende diskontinuierliche Schneckenvorlaufgeschwindigkeit. In diesem Fall ergab sich ein verzögerter Druckaufbau in Aggregat 1.

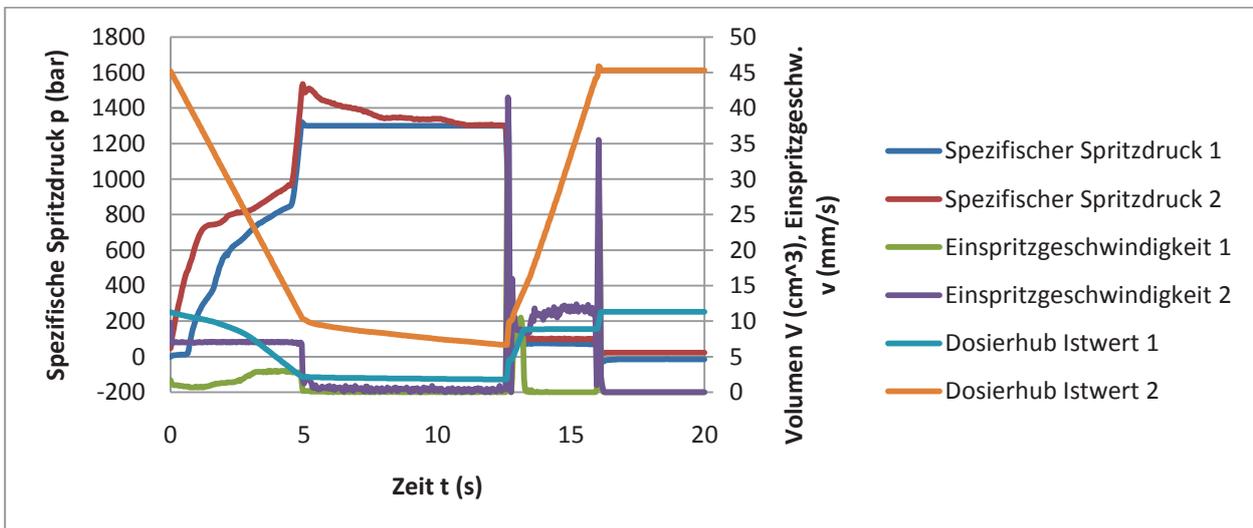


Abbildung 37: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 10/90, Geschwindigkeitsprofil 1

Die eingestellten Geschwindigkeitsprofile ergaben wesentlich bessere Verteilungen über die Fließweglänge im Vergleich zu den Versuchen zuvor. Im Mittel wurden die Sollwerte deutlich übertroffen da durch das Abfahren der Geschwindigkeitsprofile ein höheres Volumen des Eisencompounds eingespritzt wurde.

3.3.5.2. Geschwindigkeitsprofil 2

Aufgrund der verbesserten Gleichmäßigkeit des Füllstoffs über die Fließweglänge jedoch eines überhöhten Gehalts im Mittel wurde versucht, durch ein geringeres Geschwindigkeitsprofil eine gleichmäßige Verteilung über die Fließwege bei niedrigerem Mittelwert zu erhalten.

Abbildung 38 zeigt die Verteilung des Eisengehalts über die Fließweglänge. Man sieht einen verbesserten Ausgleich mit einem wesentlich geringeren Wert im Anguss. Die absoluten Schwankungen in den Stäben, 3 Messpunkte jeweils an den Fließwegenden, liegen bei 0,9 Gew-%. Dies ist ein relativer Streubereich von $\pm 4\%$. Im Mittel lag der Gehalt absolut um 1,9 Gew-% und relativ $\pm 15,8\%$ über dem Sollwert, zurückzuführen auf das eingestellte Einspritzgeschwindigkeitsprofil.

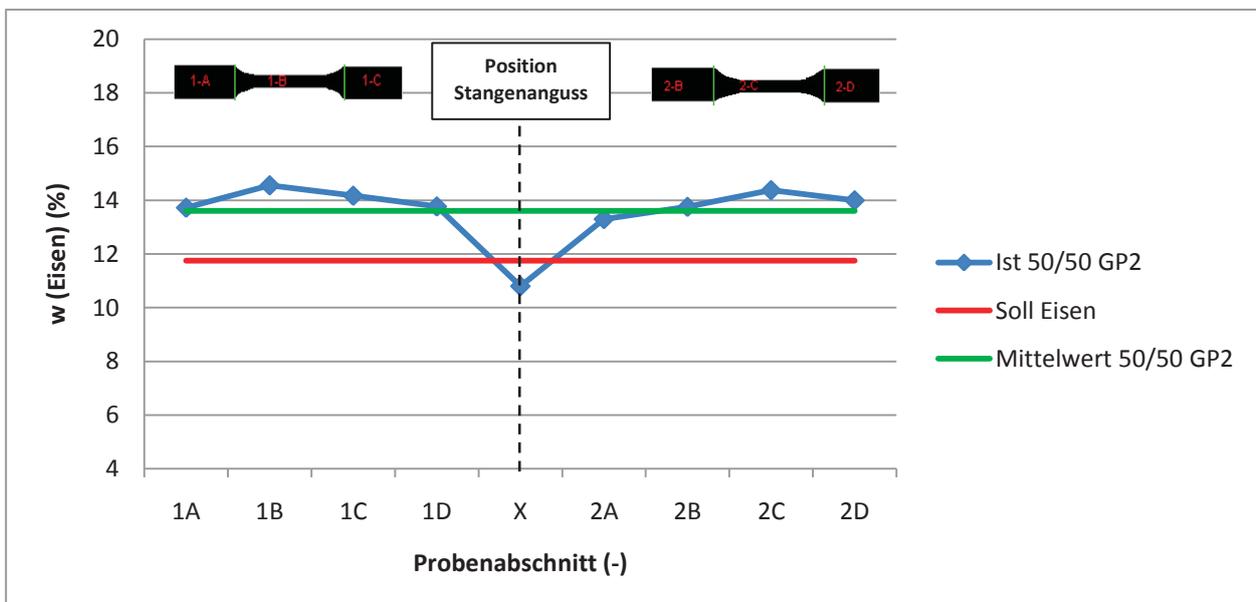


Abbildung 38: Eisengehalt im Probekörper, 50/50, Geschwindigkeitsprofil 2

In Abbildung 39 sind die Prozessdaten über den Zyklus für ein Volumenstromverhältnis von 50/50 dargestellt. Durch das eingestellte Geschwindigkeitsprofil konnten ähnliche Druckprofile in der Einspritzphase erzielt werden.

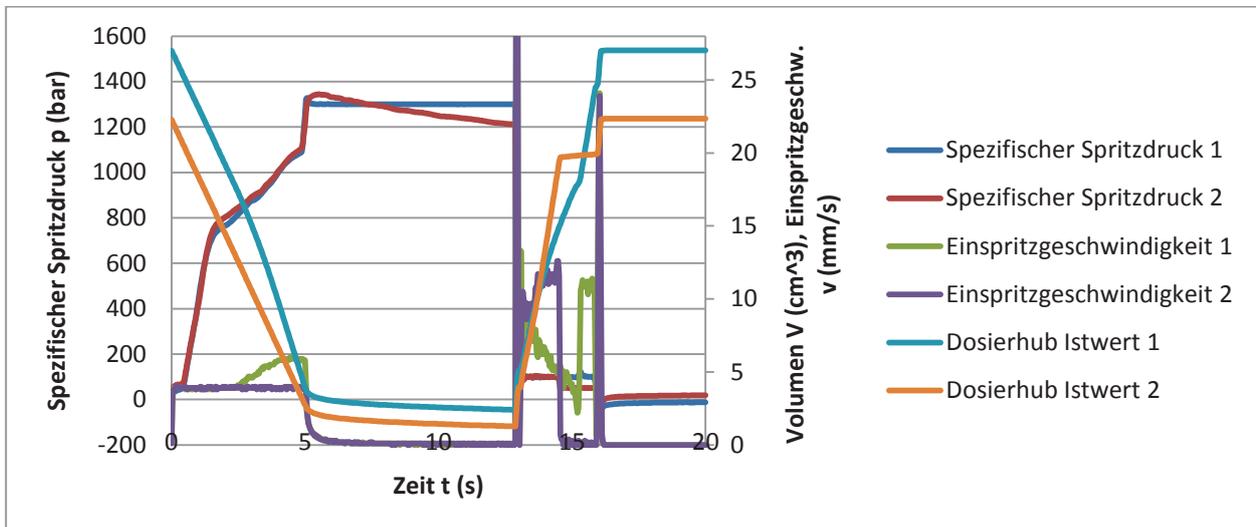


Abbildung 39: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 50/50,
Geschwindigkeitsprofil 2

Den Eisengehalt im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 30/70 zeigt Abbildung 40. Ersichtlich ist die nach wie vor inhomogene Verteilung über die Fließweglänge. Im Mittel lag der Wert um absolut 0,8 Gew-% über dem Soll, dies ist eine relative Abweichung von $\pm 11,4\%$ aufgrund der veränderten Einspritzvolumina durch das eingestellte Einspritzgeschwindigkeitsprofil. Die absolute Streuung betrug 2,1 Gew-% und dies sind $\pm 13,5\%$ relative Streuung.

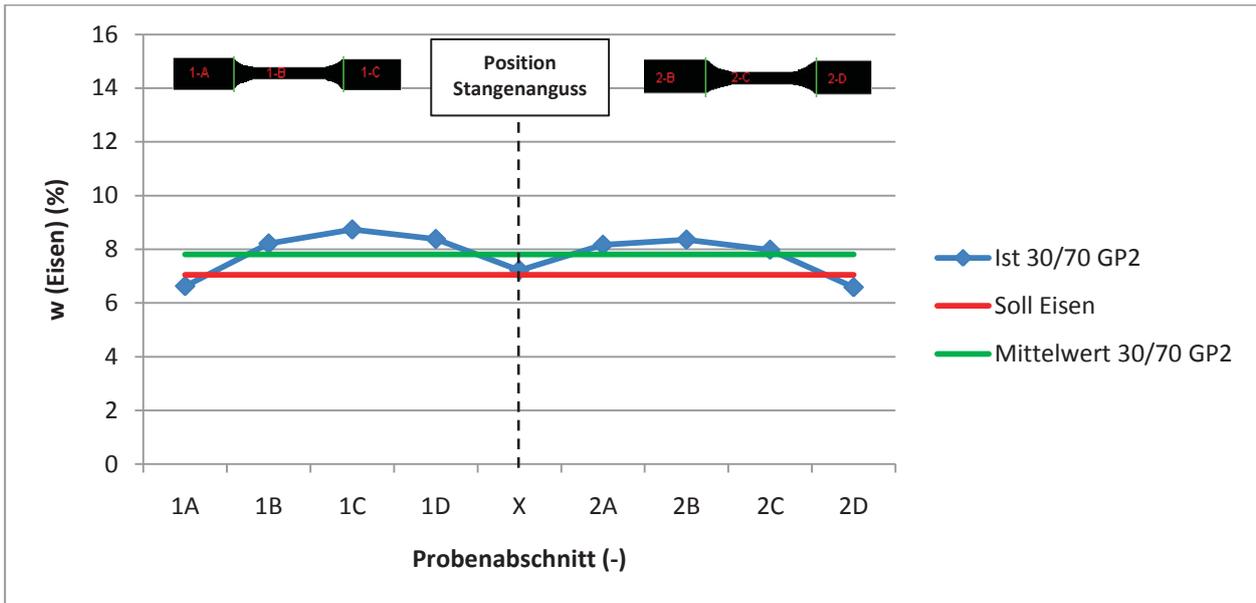


Abbildung 40: Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Geschwindigkeitsprofil 2

Abbildung 41 zeigt die Prozessdaten für ein Volumenstromverhältnis von 30/70. Man kann klar erkennen, dass der beabsichtigte gleichzeitige Druckaufbau nicht erzielt wurde und es kam zu einem verzögerten Druckaufbau in Aggregat 1.

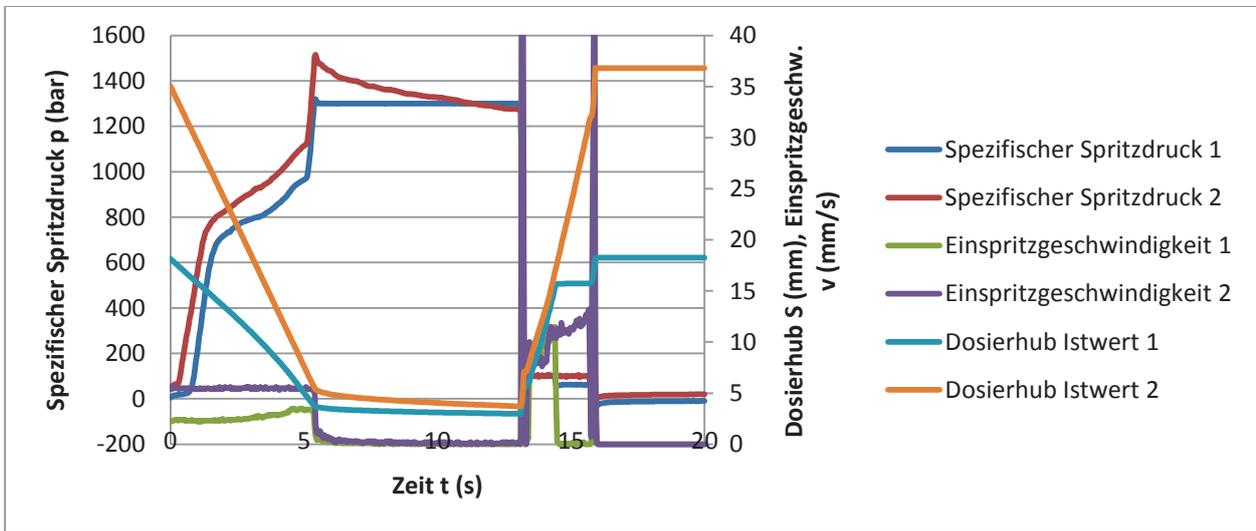


Abbildung 41: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 30/70, Geschwindigkeitsprofil 2

Abbildung 42 zeigt die Verteilung des Eisengehalts über die Fließweglänge. Die unausgeglichene Verteilung konnte trotz des eingestellten Geschwindigkeitsprofils nicht

verbessert werden. Die Schwankungen von absolut 0,3 Gew-%, relativ $\pm 19\%$ sowohl über die gesamte Fließweglänge wie auch in den Stäben allein ist nicht tolerierbar. Der Mittelwert lag um absolut 1,5 Gew-% und relativ $\pm 37,5\%$ auch weit unter dem Sollwert.

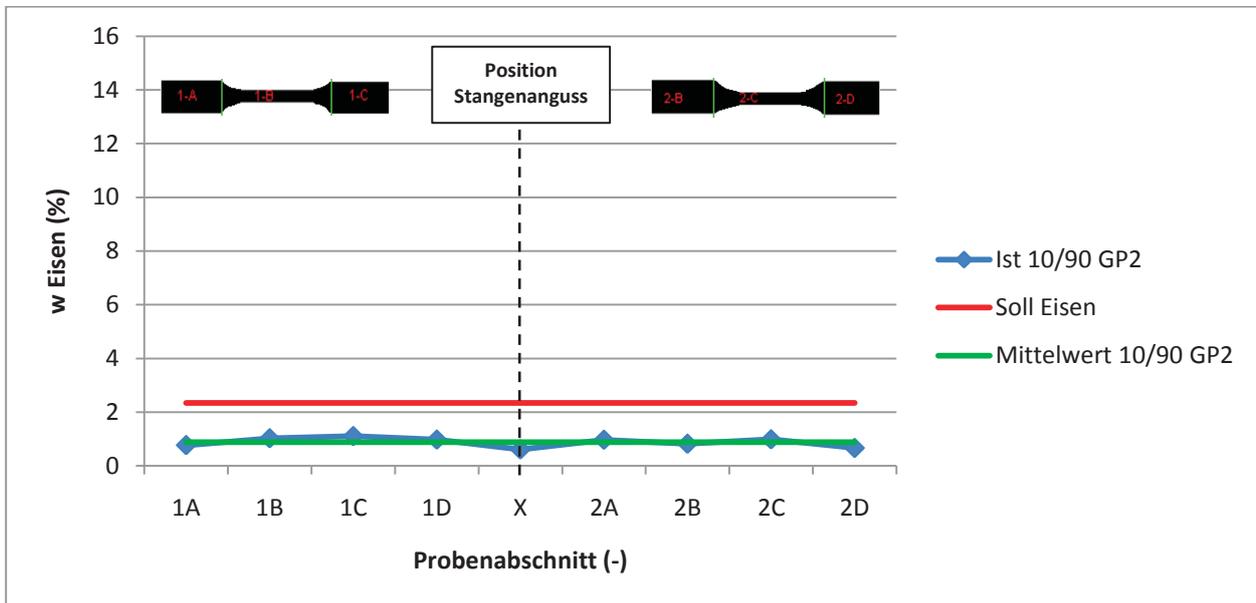


Abbildung 42: Eisengehalt im Probekörper, 10/90, Geschwindigkeitsprofil 2

Die Prozessdaten für ein Volumenstromverhältnis von 10/90 zeigt Abbildung 43. Der Druckanstieg mit anschließendem Abfall in Aggregat 1 deutet wieder auf eine „Propfenbildung“ hin. Scheinbar bildet sich beim Dosiervorgang ein „Pfropfen“ im Huckepackaggregat, wodurch das Eindringen des Nebenstroms in den Hauptstrom unterbunden wird und erst nach Aufbau eines gewissen Druckes möglich wird. Im Anschluss schießt das Material durch und verhindert so eine konstante Förderung des Hauptstroms.

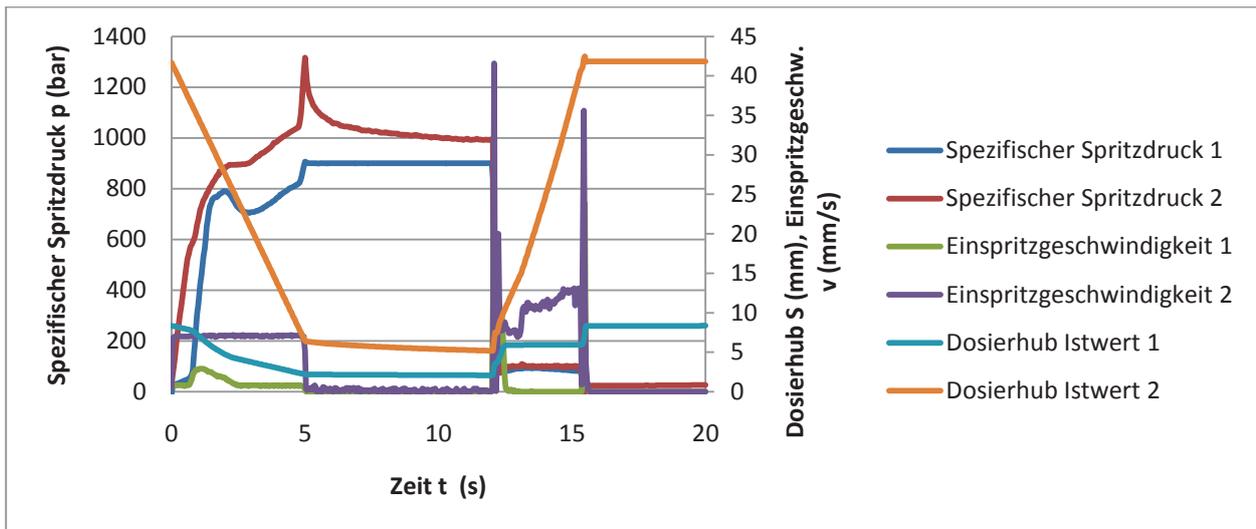


Abbildung 43: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper, 10/90,
Geschwindigkeitsprofil 2

3.3.6. Ermittlung des Füllstoffanteils bei Verwendung eines Glaskugelcompounds

Nachdem die Versuche mit dem Eisencompound keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferten, wurde ein anderes Material als Füllstoff verwendet. Durch die verwendeten Glaskugeln wurde versucht, die vermutlich durch das Eisen hervorgerufenen magnetischen bzw. durch den hohen Dichteunterschied zwischen Füllstoff und Schmelze bedingten Effekte zu unterbinden und so eine gleichmäßige Eisenverteilung über die Fließweglänge zu erzielen. Es wurde deshalb alternativ ein kugelförmiger Füllstoff eingesetzt, da er isotrope Eigenschaften aufweist und daher keine Orientierungen im Strömungsfeld zeigt. Verwendet wurde ein Compound aus 50 Gew-% Glaskugeln und 50 Gew-% PS Sabcic 125. Der Glasgehalt wurde anschließend wieder mittels Soxhlet-Extraktion ermittelt. Der Mittelwert dieses Compounds lag mit 50,4 Gew-% etwas über dem Sollgehalt, wodurch dann auch die Gehalte in den Probekörpern auf einem höheren Niveau zu liegen kamen.

Abbildung 44 zeigt den Glasgehalt über die Fließweglänge für ein Volumenstromverhältnis von 50/50. Auch hier liegt wie bei den Versuchen mit Eisenpulver ein ungleichmäßiger Gehalt von absolut 8,9 Gew-% und von relativ

$\pm 14,9\%$ vor. Ebenso lässt sich ein Anstieg über die Fließweglänge erkennen. Der Mittelwert liegt absolut um $9,7\text{ Gew-\%}$ und relativ $\pm 19\%$ deutlich über dem Sollwert.

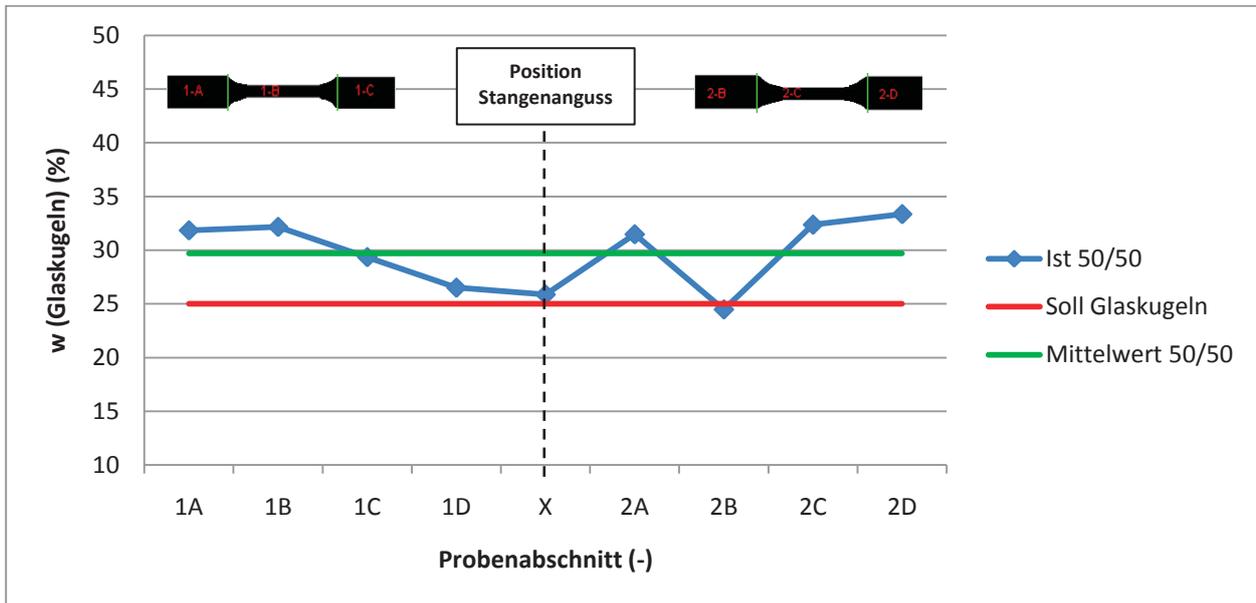


Abbildung 44: Glasgehalt im Probekörper, 50/50

In Abbildung 45 sind die Prozessdaten für die Ermittlung des Glasgehalts im Probekörper bei einem Volumenstromverhältnis von 50/50 dargestellt. Der Druck in Aggregat 2 übersteigt ab ca. 800 bar jenen von Aggregat 1 und hält diesen Abstand bis zum Ende des Nachdrucks aufrecht. Diese Drucküberhöhung würde den deutlich höheren Mittelwert im Vergleich zum Sollwert erklären.

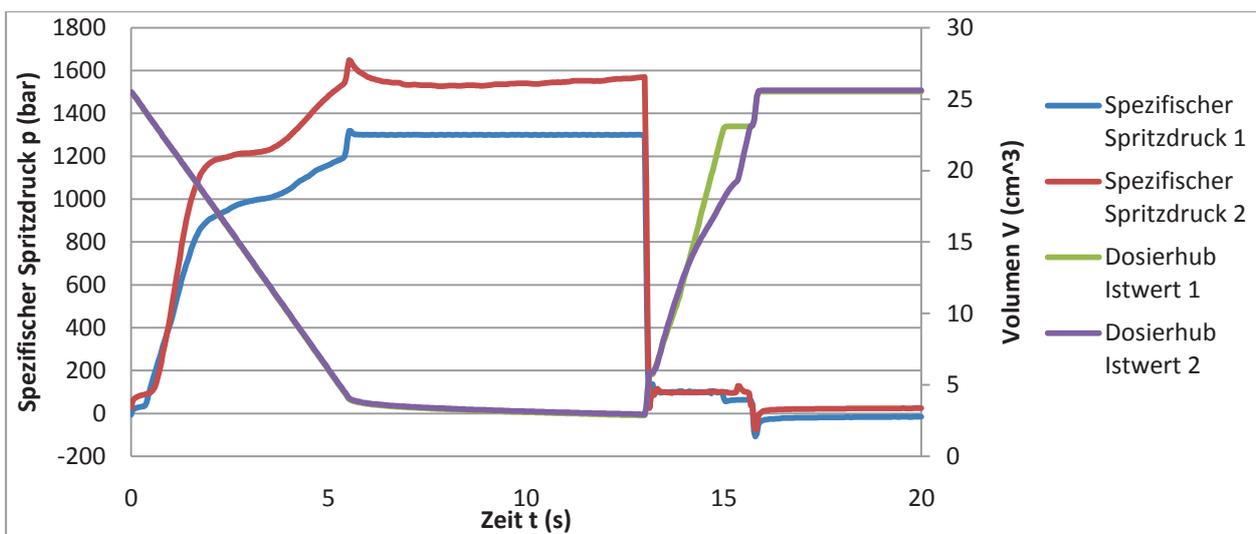


Abbildung 45: Prozessdaten, Glasgehalt im Probekörper, 50/50

Den Glasgehalt im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 70/30 zeigt Abbildung 46. Auch hier lag eine ungleichmäßige Verteilung mit einem Anstieg über die Fließweglänge vor. Die absolute Streubreite beträgt 2,8 Gew-% und das ist eine relative Streuung von $\pm 24,3$ %. Der Mittelwert lag auch hier um absolut 2 Gew-% und relative um $\pm 14,2$ % über dem Sollwert.

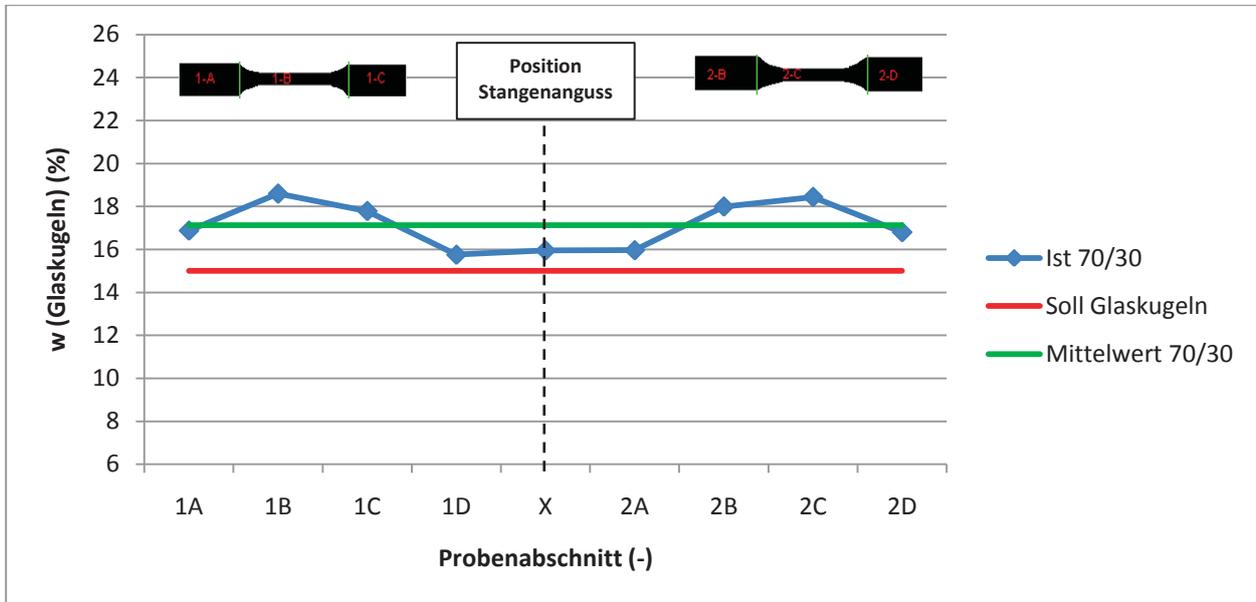


Abbildung 46: Glasgehalt im Probekörper, 70/30

Abbildung 47 zeigt den Druckverlauf und den Dosierhub beider Aggregate für ein Volumenstromverhältnis von 70/30. In Aggregat 2 übersteigt der spezifische Spritzdruck bei ca. 800 bar jenen von Aggregat 1 und hält diesen Abstand bis zum Ende des Nachdrucks aufrecht. Dadurch könnte der erhöhte Mittelwert zu erklären sein.

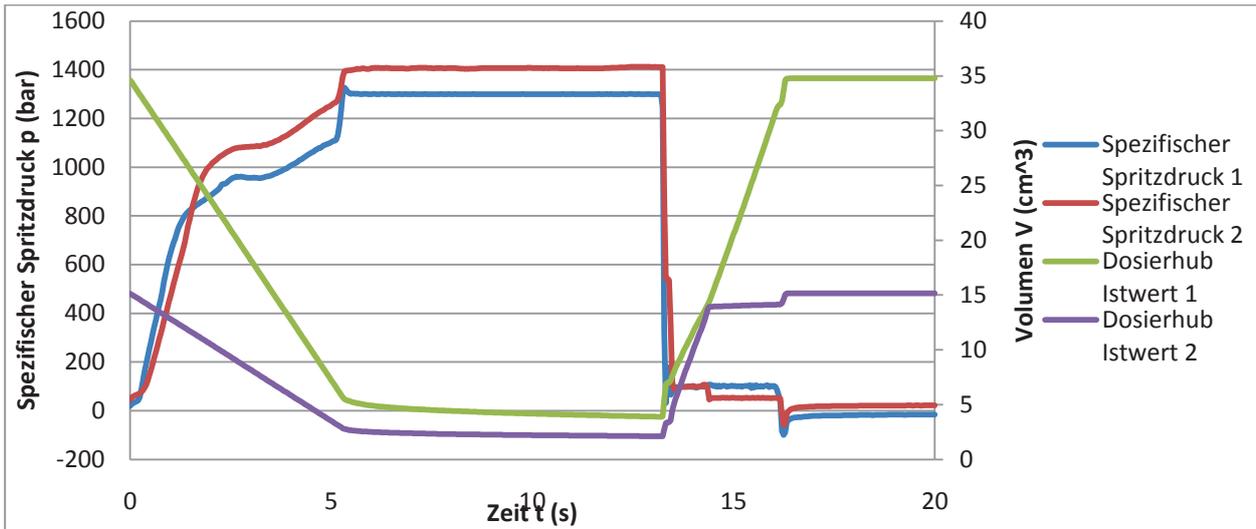


Abbildung 47: Prozessdaten, Glasgehalt im Probekörper, 70/30

Abbildung 48 zeigt den Glasgehalt über die Fließweglänge für ein Volumenstromverhältnis von 80/20. Die absolute Streubreite lag bei 3,4 Gew-% und das bedeutet eine relative Streuung von $\pm 20,8$. Der Mittelwert lag hier absolut um 1,9 Gew-% und relativ um $\pm 9,1$ % unterhalb des Sollwerts. Es scheint bei geringeren Einspritzgeschwindigkeiten, dass das Eindringen des Nebenstroms in den Hauptstrom schwieriger möglich ist.

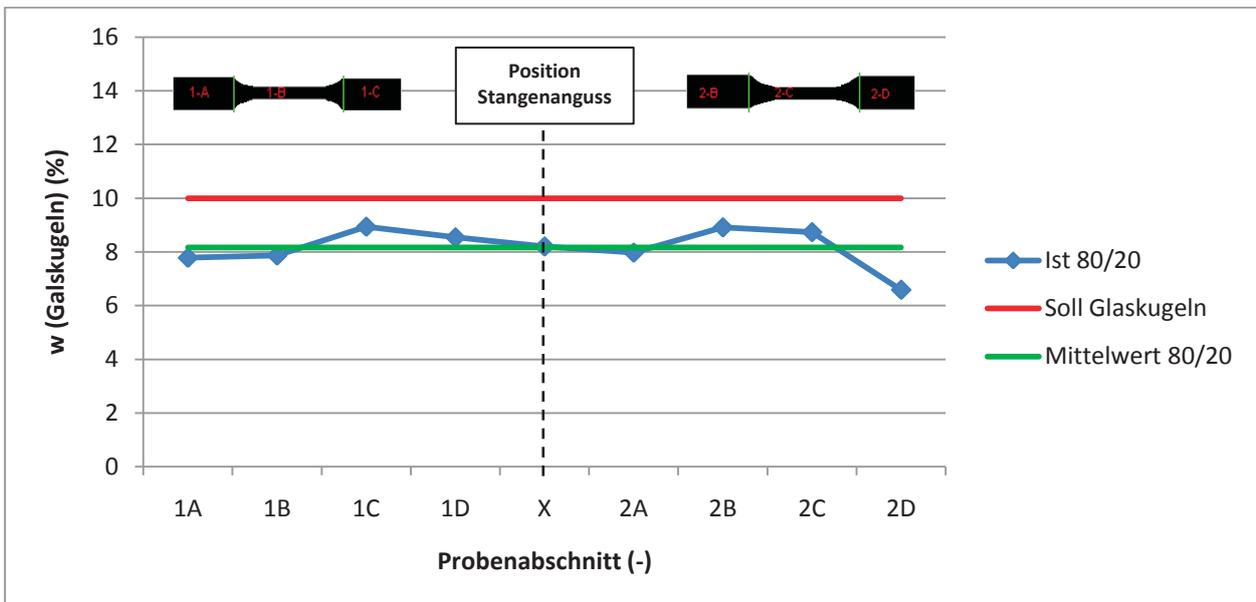


Abbildung 48: Glasgehalt im Probekörper, 80/20

In Abbildung 49 sind die Prozessdaten des Glasgehalts im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 80/20 zu sehen. Offensichtlich ist der langsamere Druckanstieg in Aggregat 2 zu Beginn. Dies dürfte der Grund für den zu niedrigen Mittelwert sein.

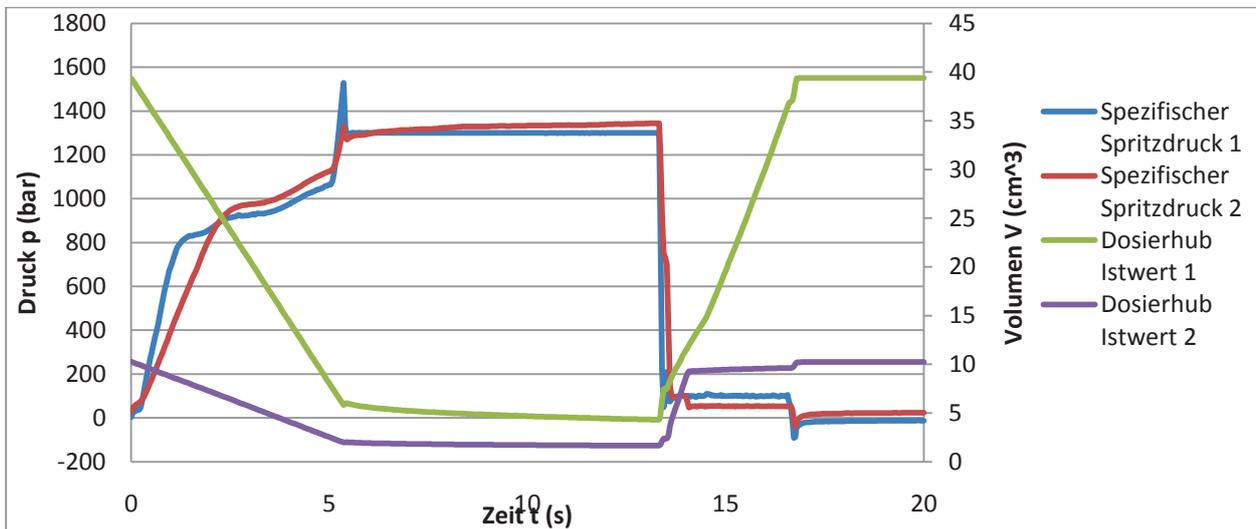


Abbildung 49: Prozessdaten, Glasgehalt im Probekörper, 80/20

Abbildung 50 zeigt den Glasgehalt im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 90/10. Die Streuung liegt absolut bei 1,4 Gew-% und relativ bei $\pm 33,7$, jedoch zeigte sich wieder ein Anstieg über die Fließweglänge. Der Mittelwert wich um absolut 3 Gew-% und relativ ± 40 % deutlich vom Sollwert ab.

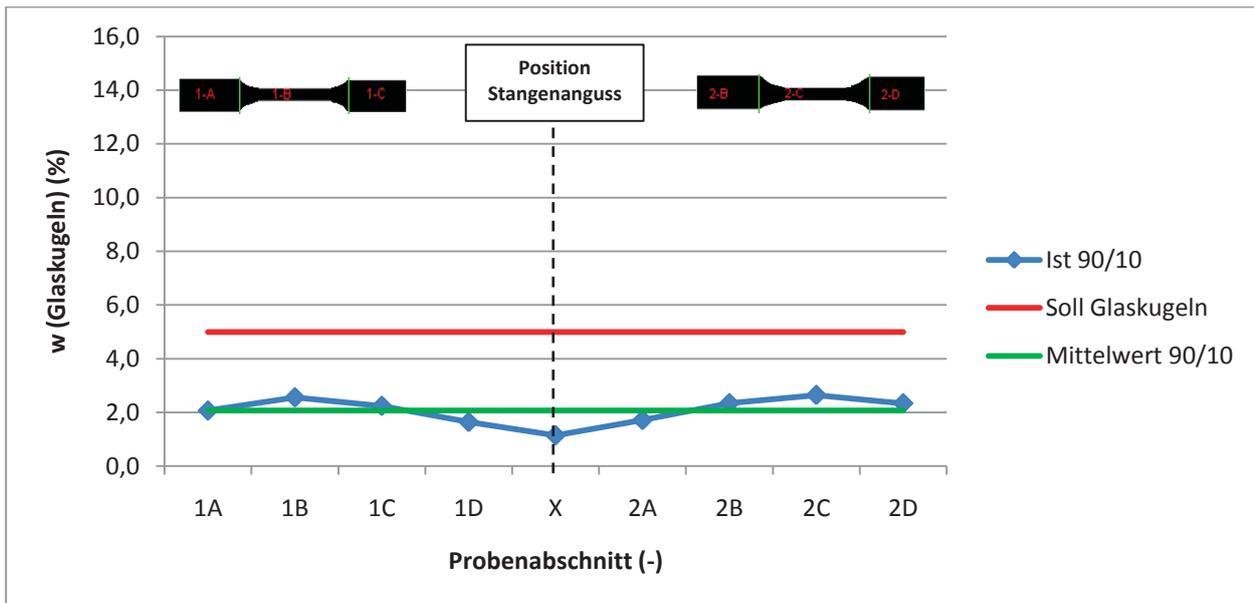


Abbildung 50: Glasgehalt im Probekörper, 90/10

Die Prozessdaten für den Glasgehalt im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 90/10 sind in Abbildung 51 dargestellt. Der niedrige Mittelwert dürfte sich durch den verzögerten Druckanstieg in Aggregat 2 erklären lassen.

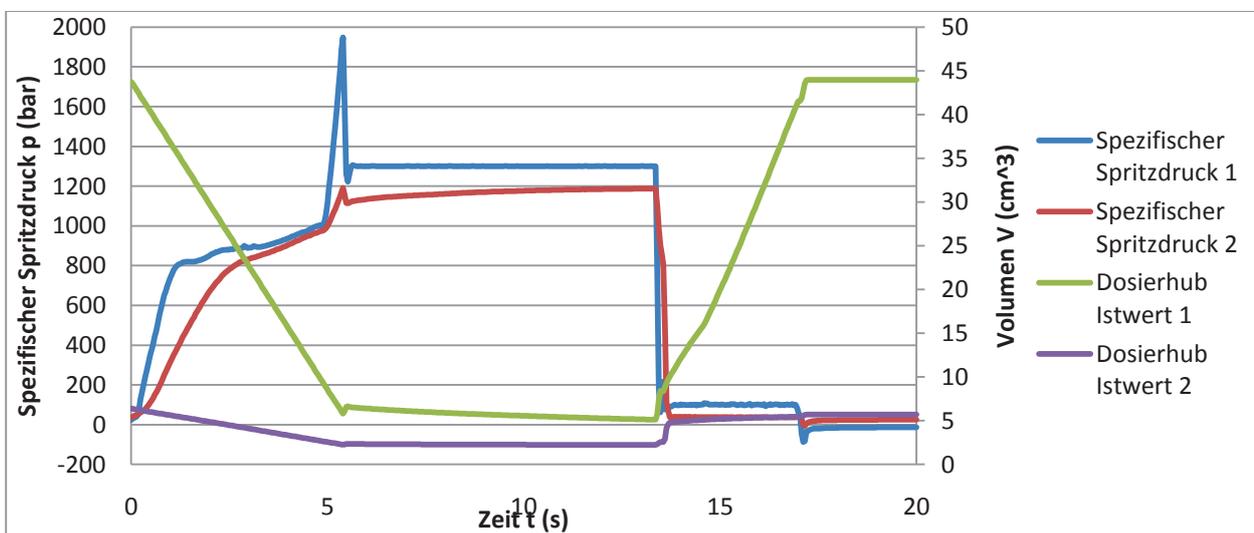


Abbildung 51: Prozessdaten, Glasgehalt im Probekörper, 90/10

Die Untersuchungen mit dem Glaskugelcompound lieferten nicht die erwarteten positiven Veränderungen und zeigten bei Volumenstromverhältnissen von 50/50 und 70/30 einen über dem Sollwert liegenden Mittelwert. Bei den

Volumenstromverhältnissen von 80/20 und 90/10 lag der Mittelwert unter dem Sollwert, vermutlich bedingt durch die verschiedenen Druckverhältnisse aufgrund der unterschiedlichen Schneckenvorlaufgeschwindigkeiten. Der Glaskugelgehalt über die Fließweglänge zeigte in allen Fällen eine ungleichmäßige Verteilung und tendenziell einen Anstieg über den Fließweg.

3.4. Untersuchungen zum erforderlichen Einspritzvolumen und zum Entlastungshub

In den meisten Untersuchungen waren die eingestellten Volumenstromverhältnisse an der Maschine in den untersuchten Prüfkörpern nicht wieder zu finden. Bei konstanten Einspritzgeschwindigkeiten und Nachdrücken wurde ein geringerer Volumenanteil an Eisencompound ersichtlich. Um irgendwelche Fehler auf Maschinenseite auszuschließen, wurden das Schließverhalten der Bolzenrückstromsperre sowie das eingespritzte Volumen je Zyklus in Form der axialen Schneckenbewegung untersucht.

3.4.1. Schließverhalten der Rückstromsperre

Als Rückstromsperre wurde eine Bolzensperre vorgesehen, da diese für leichtfließende Materialien ein besseres Schließverhalten aufweist als gebräuchliche Standardsperren wie z.B. die Dreiflügelrückstromsperre. Diese soll auch bei sehr geringen Einspritzgeschwindigkeiten, wie sie auf Grund der vorgegebenen Fließfrontgeschwindigkeit im Prüfkörper erforderlich waren, reproduzierbar schließen.

Zur Ermittlung des Schließverhaltens der Rückstromsperre wurden fünf Probekörper aus dem Polypropylen Borealis PP HD 120 MO je Einspritzgeschwindigkeit gefertigt und die Konstanz des Restvolumenpolsters untersucht. Die Einspritzgeschwindigkeiten wurden so variiert, dass bei nicht funktionierender Rückstromsperre relativ große Unterschiede im Schließverhalten der Sperre und somit beim Restvolumenpolster zu erwarten wären. Die Geschwindigkeitsfolge und die ermittelten Restvolumenpolster sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Abfolge der Geschwindigkeiten erfolgte exakt wie in Tabelle 6 von links nach rechts beschrieben, d.h. zuerst wurde eine Einspritzgeschwindigkeit von 1,6 mm/s gewählt. Anschließend wurde die Einspritzgeschwindigkeit auf 20 mm/s erhöht. Danach wurde die Einspritzgeschwindigkeit auf 4 mm/s gesenkt und abschließend noch einmal auf 8 mm/s und von hier weiter auf 30 mm/s erhöht.

Tabelle 6: Restvolumenpolster, Ermittlung des Schließverhaltens der Rückstromsperre

Einspritzgeschwindigkeit	1,6 mm/s		20 mm/s		4 mm/s		8 mm/s		30 mm/s	
Probennummer	Agg. 1 (cm ³)	Agg. 2 (cm ³)	Agg. 1 (cm ³)	Agg. 2 (cm ³)	Agg. 1 (cm ³)	Agg. 2 (cm ³)	Agg. 1 (cm ³)	Agg. 2 (cm ³)	Agg. 1 (cm ³)	Agg. 2 (cm ³)
1	1,93	2,05	2,36	2,5	-	-	2,28	2,4	2,18	2,3
2	1,76	2,08	2,21	2,38	1,95	2,11	2,45	2,53	2,12	2,21
3	2,11	2,2	2,21	2,3	1,99	2,01	2,3	2,43	2,12	2,21
4	2,06	2,21	2,07	2,14	2,29	2,34	2,11	2,25	2,03	2,08
5	2,06	2,21	2,06	2,15	2,26	2,3	2,45	2,28	2,22	2,25
Mittelwert	1,984	2,15	2,182	2,294	2,1225	2,19	2,318	2,378	2,134	2,21
Standardabweichung	0,14	0,08	0,12	0,15	0,18	0,16	0,14	0,11	0,07	0,08

Abweichend von der üblichen Praxis gab es keine Einschwingphase, sondern bereits der erste Schuss direkt nach einer Umstellung wurde bei der Berechnung der Standardabweichung berücksichtigt. In Abbildung 52 ist der Restvolumenpolsterverlauf für verschiedene Einspritzgeschwindigkeiten über fünf Schuss dargestellt.

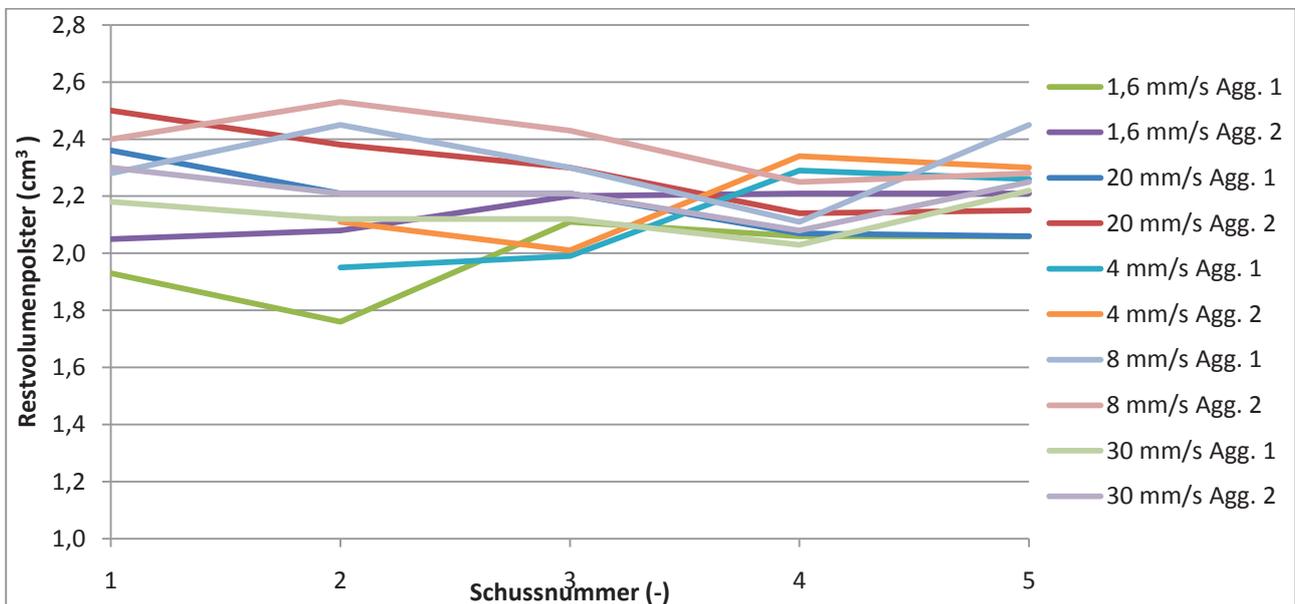


Abbildung 52: Restvolumenpolster, Ermittlung des Schließverhaltens der Rückstromsperre

Aus Tabelle 6 und Abbildung 52 ist zu entnehmen, dass die Rückstromsperre bei allen untersuchten Einspritzgeschwindigkeiten schließt, da es keine großen Restvolumenpolsterschwankungen gab. Mit zunehmender Stückzahl verringerte sich die Streuung des Polsters zwischen den verschiedenen Einspritzgeschwindigkeiten, was ebenfalls den Verdacht eines schlechten Rückstromsperrenschließverhaltens zerstreut.

3.4.2. Tatsächlich eingespritztes Volumen

Für Sabic PS 125 wurde das tatsächlich eingespritzte Volumen im Automatikbetrieb ermittelt. Der Nachdruck wurde geregelt auf Null abgesenkt und die Entspannung des Materials anhand der Bewegung der Schnecke festgestellt. Das eingespritzte Volumen ergab sich dann aus der Volumendifferenz zwischen Anfangsvolumen und dem Volumen nach der Entlastung.

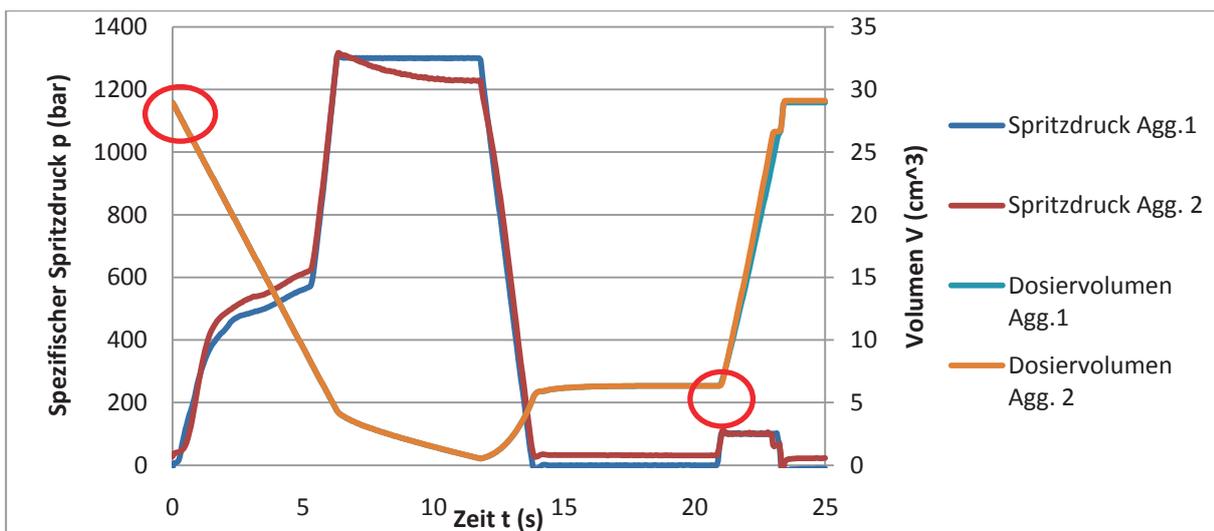


Abbildung 53: Druckabsenkung, Volumenstromverhältnis 50/50

In Tabelle 7 ist das tatsächlich eingespritzte Volumen für ein Volumenstromverhältnis von 50/50 dargestellt. Die Versuche zeigen, dass die axialen Schneckenbewegungen äußerst exakt ausgeführt werden.

Tabelle 7: : Tatsächlich eingespritztes Volumen, Volumenstromverhältnis 50/50

	Agg. 1 (cm ³)	Agg. 2 (cm ³)	Verhältnis	Sollverhältnis
--	---------------------------	---------------------------	------------	----------------

Versuch 1	22,62	22,57	1,0022	50/50 = 1,0000
Versuch 2	22,5	22,48	1,0009	
Versuch 3	21,57	21,6	0,9986	
Versuch 4	22,04	22,04	1,0000	
Versuch 5	21,58	21,53	1,0023	

Tabelle 8 zeigt das tatsächlich eingespritzte Volumen für ein Volumenstromverhältnis von 70/30. In diesem Fall wurde das Volumenverhältnis exakt erzielt.

Tabelle 8: Tatsächlich eingespritztes Volumen, Volumenstromverhältnis 70/30

	Agg. 1 (cm ³)	Agg. 2 (cm ³)	Verhältnis	Sollverhältnis
Versuch 1	29,34	12,6	2,3286	70/30 = 2,3333
Versuch 2	29,9	12,85	2,3268	
Versuch 3	29,7	12,76	2,3276	
Versuch 4	29,24	12,52	2,3355	
Versuch 5	27,84	11,97	2,3258	

Tabelle 9 veranschaulicht das tatsächlich eingespritzte Volumen für ein Volumenstromverhältnis von 90/10. Auch hier wurden die Volumenverhältnisse sehr genau erreicht.

Tabelle 9: Tatsächlich eingespritztes Volumen, Volumenstromverhältnis 90/10

	Agg. 1 (cm ³)	Agg. 2 (cm ³)	Verhältnis	Sollverhältnis
Versuch 1	36,69	4,06	9,0369	90/10 = 9,0000
Versuch 2	37,06	4,1	9,0390	
Versuch 3	36,87	4,08	9,0368	
Versuch 4	35,58	3,93	9,0534	
Versuch 5	36,07	4	9,0175	

Die Versuche zeigen, dass die Schnecken den jeweiligen Weg relativ genau abfahren und aus dieser Sicht keine Schwankungen im Bezug auf die Volumenverhältnisse gegeben sind. Hiermit ist klargelegt, dass der verringerte Eisenanteil bei Abfahren konstanter Geschwindigkeiten nicht an etwaigen axialen Schneckengeschwindigkeitsunterschieden liegt.

3.4.3. Untersuchung der Kompressionsentlastung

Zur Realisierung einer konstanten Verteilung über den gesamten Zyklus ist es notwendig, zu jedem Zeitpunkt gleiche Volumenstromverhältnisse zu fördern. Aus diesem Grund war es notwendig, die erforderliche Kompressionsentlastung zu ermitteln, um von Beginn des Einspritzens an ein konstantes Volumenstromverhältnis zu erhalten. Als erforderliche Kompressionsentlastung wurde das Absinken des Druckes im Coinjektionskopf auf ein niedriges Druckniveau, weniger als 10 bar, definiert. Zur Ermittlung wurde als Material PS 158 K der Firma BASF und als Formteil der Zugprobekörper Type 1A mit einem Dosiervolumen von 46,1 cm³ und einem Dosierhub von 94 mm verwendet.

Die erforderlichen Kompressionsentlastungen in Abhängigkeit vom Dosiervolumen sind in Tabelle 10 beschrieben.

Tabelle 10: Erforderliche Kompressionsentlastung

Verhältnis	erforderliche Kompressionsentlastung							
	Aggregat 1				Aggregat 2			
	Dosierhub (mm)	Dosierhub (cm ³)	Entlastung (mm)	Entlastung (cm ³)	Dosierhub (mm)	Dosierhub (cm ³)	Entlastung (mm)	Entlastung (cm ³)
0/100	-	-	-	-	94,0	46,1	4,6	2,3
30/70	28,2	13,8	2,0	1,0	65,8	32,3	3,6	1,8
50/50	47,0	23,1	2,3	1,1	47,0	23,1	3,3	1,6
70/30	65,8	32,3	2,4	1,2	28,2	13,8	2,8	1,4
80/20	75,2	36,9	2,8	1,4	18,8	9,2	3,3	1,6
90/10	84,6	41,5	3,0	1,5	9,4	4,6	2,3	1,1
100/0	94,0	46,1	4,0	2,0	-	-	-	-

Abbildung 54 zeigt den erforderlichen Entlastungshub in Abhängigkeit vom jeweiligen Dosierhub. Klar zu erkennen ist der höhere notwendige Entlastungshub für das gleiche Dosiervolumen in Aggregat 2 im Vergleich zu Aggregat 1.

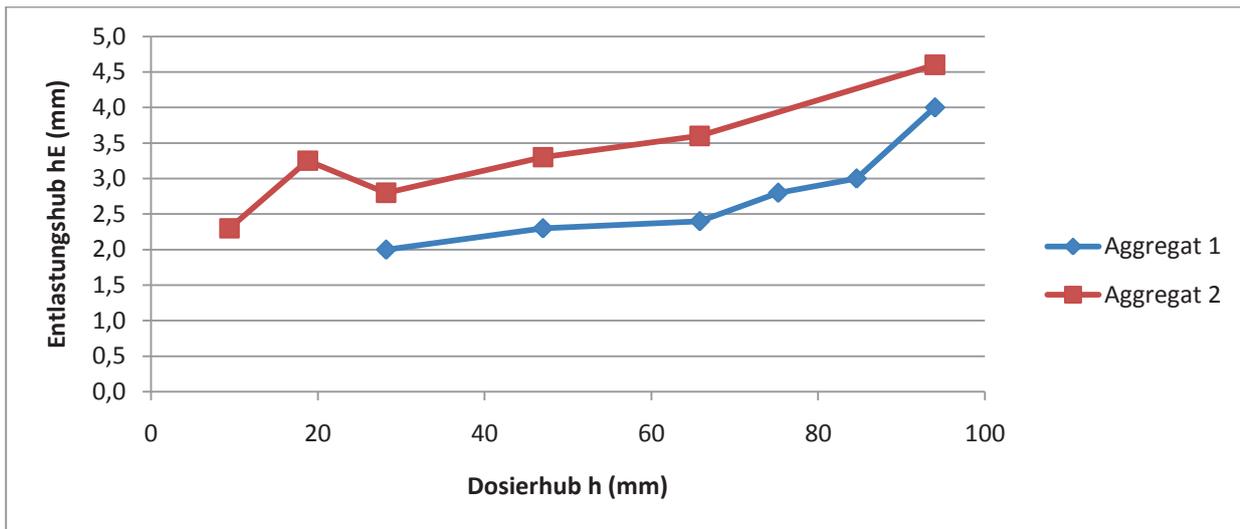


Abbildung 54: Erforderliche Kompressionsentlastung

Wie die Ermittlung der erforderlichen Kompressionsentlastung durchgeführt wurde, ist in Abbildung 55 für Aggregat 1 und in Abbildung 56 für Aggregat 2 dargestellt. Es wurden verschiedene Kompressionsentlastungen eingestellt und über den jeweiligen Drucksensor die Druckabsenkung ermittelt. Die Entlastung wurde dann als ausreichend angesehen, wenn der Druck an den Sensoren im Coinjektionskopf auf einen geringen Wert kleiner 10 bar abgesunken war.

Abbildung 55 zeigt die Prozessdaten zur Untersuchung der erforderlichen Kompressionsentlastung für Aggregat 1.

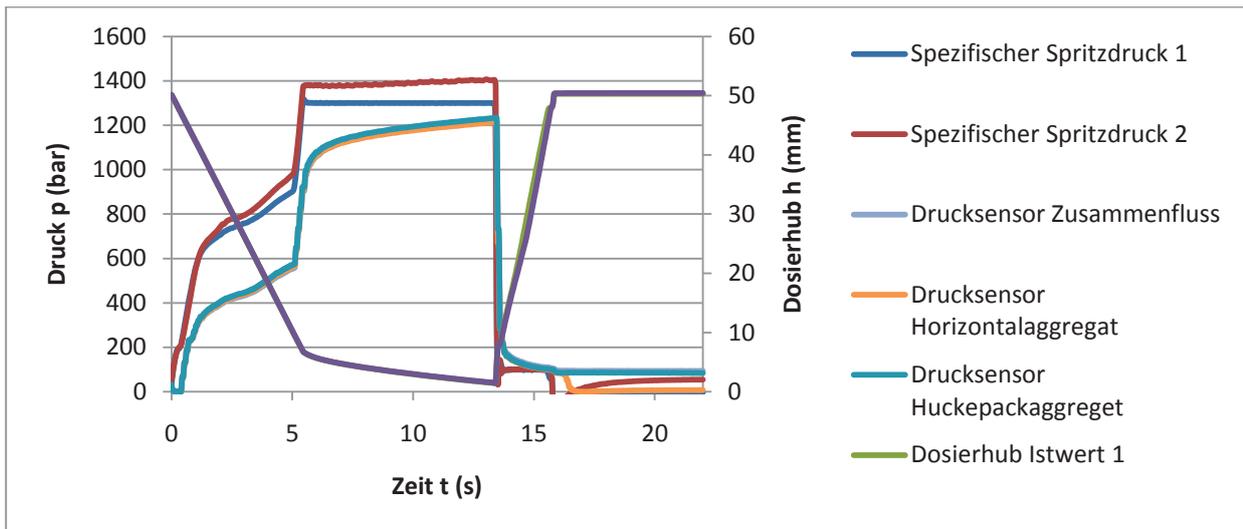


Abbildung 55: Untersuchung der Kompressionsentlastung, Volumenstromverhältnis 50/50, Entlastung 2,3 mm

In Abbildung 56 sind die Prozessdaten für die Untersuchung der erforderlichen Kompressionsentlastung in Aggregat 2 dargestellt.

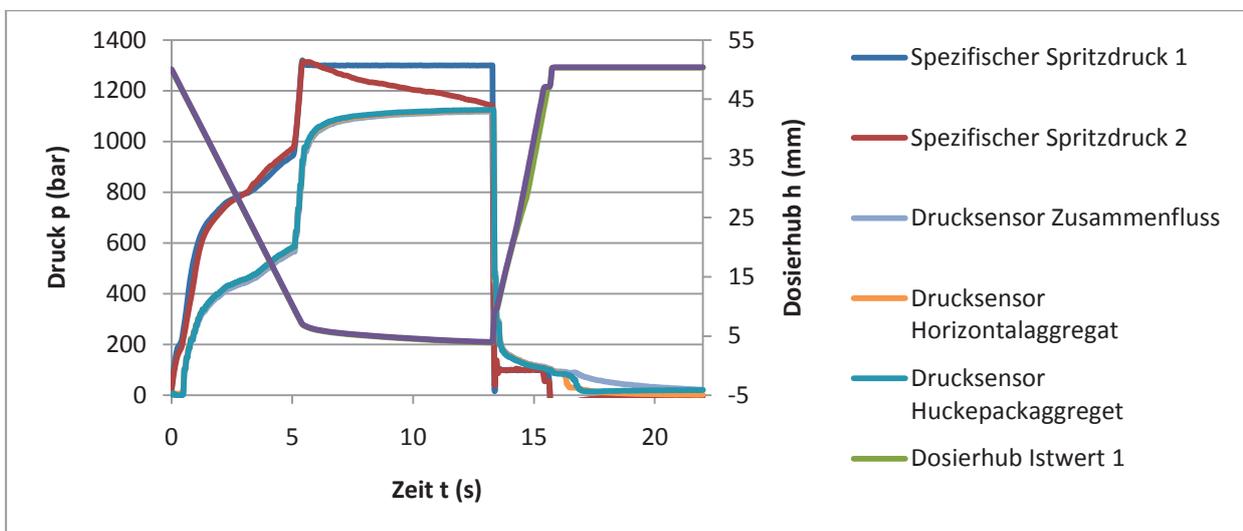


Abbildung 56: Untersuchung der Kompressionsentlastung, Volumenstromverhältnis 50/50, Entlastung 3,3 mm

Die Ermittlung der erforderlichen Kompressionsentlastung wurde nur für ein Material ermittelt. Sie ist abhängig von den elastischen Eigenschaften und der Kompressibilität der verspritzten Schmelze und ist offensichtlich für jedes Material im Vorfeld zu ermitteln.

3.5. Untersuchungen mit einem neuen Coinjektionskopf

3.5.1. Aufbau

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass durch Veränderung der Prozessparameter keine wesentlichen Verbesserungen erzielt wurden, und deshalb wurde entschieden, einen neuen, modifizierten und adaptierten Coinjektionskopf anzufertigen (siehe Abbildung 57).

Es wurde je eine pneumatische Bolzenverschlussdüse im Kanal des Horizontal- (Pos.1) und des Huckepackaggregates (Pos. 2), integriert. Dadurch sollte eine saubere Trennung der Dosier- von der Einspritz- und Nachdruckphase erfolgen. Weiters wurden 3 Drucksensoren, je einer im Kanal des Horizontalaggregat (Pos.4) einer im Kanal des Huckepackaggregates (Pos.3) und einer an der Zusammenflussstelle (Pos. 5) vorgesehen. Diese dienten dazu, die Druckverhältnisse im Kopf aufzuklären. An Pos. 6 wurde noch eine Drossel eingebaut, um den Kanalquerschnitt verändern zu können.

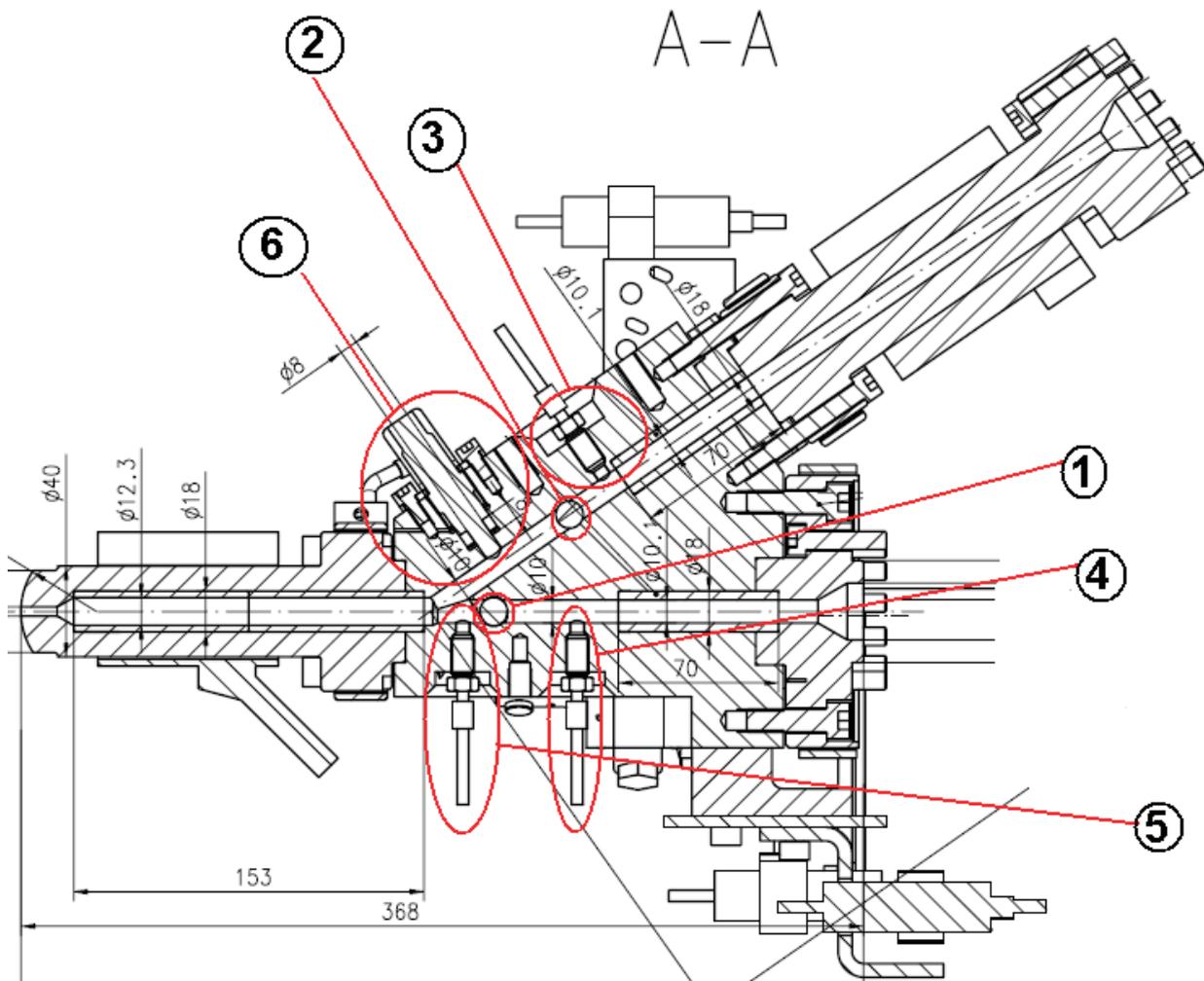


Abbildung 57: Aufbau des neuen Coinjektionskopfs; 1 Bolzenverschlussdüse Horizontalaggregat, 2 Bolzenverschlussdüse Huckepackaggregat, 3 Drucksensor Huckepackaggregat, 4 Drucksensor Horizontalaggregat, 5 Drucksensor Zusammenflussstelle, 6 Drossel

Mit Hilfe des neuen Coinjektionskopfs wurde versucht, die Compoundierung aus 2 Schmelzen zu realisieren. Die Versuche wurden wieder mit Hilfe eines Compounds aus 50 Gew-% PS Sabcic 125 und 50 Gew-% Eisenpulver in einem Aggregat, und mit reinem PS im anderen Aggregat durchgeführt.

3.5.2. Ermittlung der Eisenpulververteilung im Probekörper

Mit dem modifizierten und adaptierten Coinjektionskopf wurde nochmals die Eisenverteilung im Probekörper, wie unter 3.3.3 beschrieben, ermittelt.

Da das Volumenstromverhältnis von 90/10 sehr schwierig zu realisieren war, wurde hier noch ein zusätzliches Verhältnis, 80/20 untersucht. Die untersuchten Probekörper wurden wie in den Versuchen zuvor von Abbildung 18 unterteilt.

Abbildung 58 zeigt die Eisenverteilung über die Fließweglänge für ein Volumenstromverhältnis von 50/50. Klar zu erkennen ist der abnehmende Gehalt über der Fließweglänge, wie in den Versuchen mit dem alten Coinjektionskopf. Die absolute Streuung lag bei 6,5 Gew-% und dies ist ein relativer Streubereich von $\pm 9,7\%$. Der Mittelwert weicht, um absolut 10,2 Gew-% und relativ $\pm 43\%$, über dem Sollwert und dies bedeutet eine Abweichung zu den alten Versuchen. Es scheint als würde durch die Trennung des Dosier- und Einspritzvorganges ein höherer Anteil des Eisencompounds eingespritzt werden.

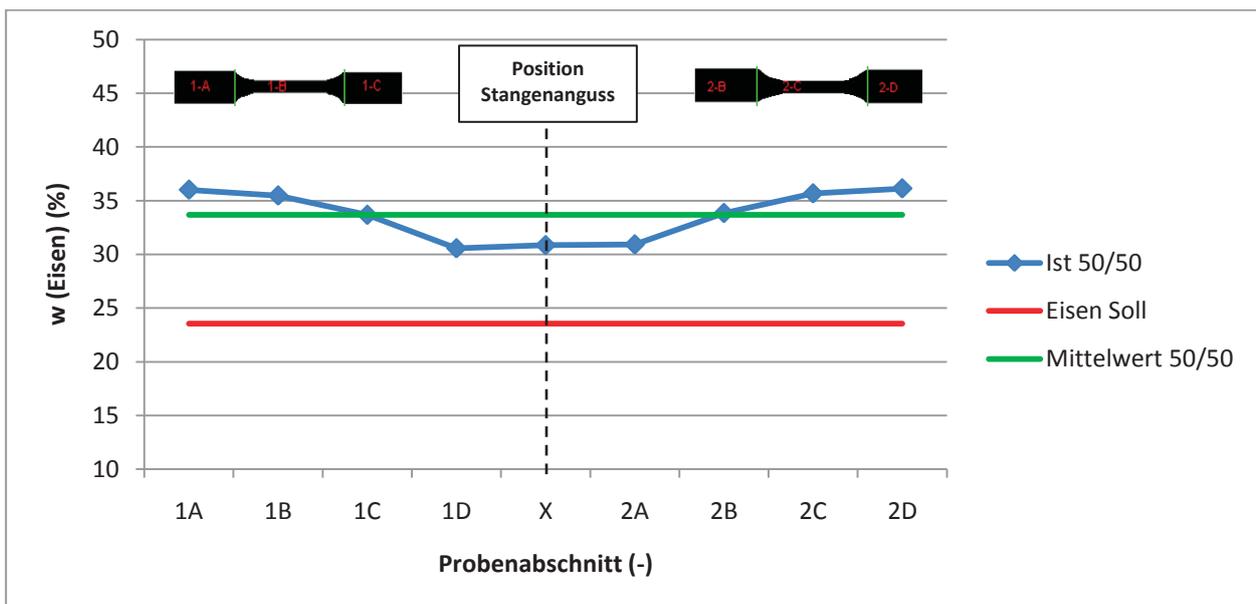


Abbildung 58: Eisengehalt im Probekörper 50/50, neuer Coinjektionskopf

In Abbildung 59 sind die Prozessdaten für die Bestimmung des Eisengehalts im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 50/50 dargestellt. Als zusätzliche Information sind nun die Schmelzdrücke im Coinjektionskopf durch die drei Sensoren bekannt. Hier wird ersichtlich, dass die Sensoren im Horizontal- und im Huckepackaggregat über den gesamten Zyklus nahezu gleiche Drücke liefern. Dies

spricht für die Synchronizität der Drücke in den beiden Kanälen vor dem Zusammenströmen, obwohl die spezifischen Spritzdrücke in den beiden Aggregaten oberhalb von 800 bar unterschiedlich sind. Der höhere Druck in der Zusammenflussstelle der beiden Ströme dürfte durch die senkrechte Einbausituation des Druckaufnehmers zustande kommen. Laut Theorie sollte der Druck niedriger sein, da ein längerer Fließweg vorliegt, jedoch dürfte durch die beiden sich vereinigenden Schmelzeströme ein höherer Druck vorliegen. Der verbleibende Druck in der Vereinigung nach Dosierentlastung ist in der Position der Verschlussbolzen begründet, welche vor der Zusammenflussstelle angebracht sind. Aufgrund des nicht Abhebens der Düse wird dieser Druck eingeschlossen und beim Öffnen des Werkzeugs nach vorne hin abgebaut.

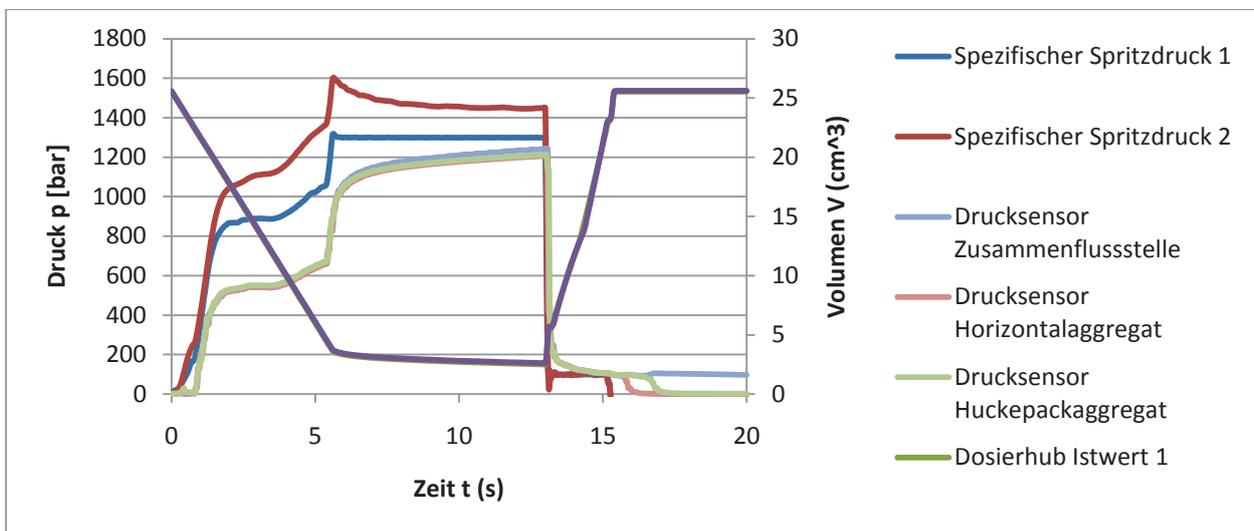


Abbildung 59: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper 50/50, neuer Coinjektionskopf

Abbildung 60 zeigt den Eisengehalt im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 70/30 mit dem neuen Coinjektionskopf. Die Schwankungsbreite über die Fließweglänge war vergleichbar mit jener beim alten Kopf und lag im absoluten bei 1,5 Gew-% und im relativen bei $\pm 4,6\%$, jedoch konnte im Mittel ein um 1,9 Gew-% absolut und um $\pm 13,5\%$ höherer Wert als das Soll erzielt werden.

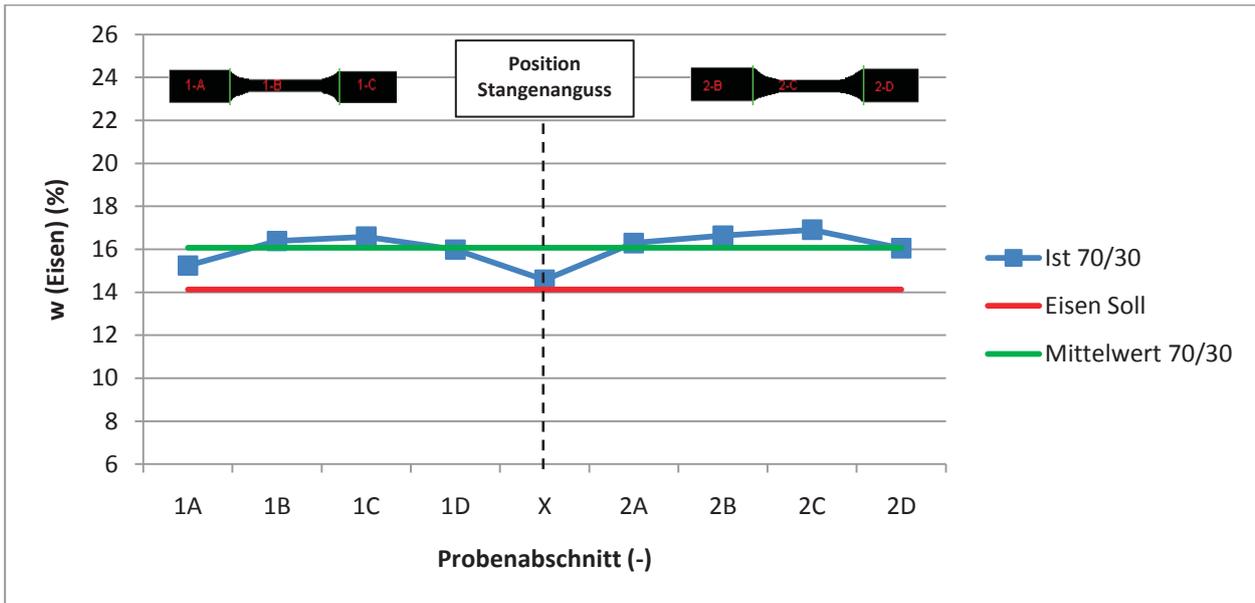


Abbildung 60: Eisengehalt im Probekörper 70/30, neuer Coinjektionskopf

Die Prozessdaten für die Ermittlung der Eisenverteilung im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 70/30 sind in Abbildung 61 dargestellt. Die Drucksensoren zeigten annähernd gleiche Druckverhältnisse in den Kanälen und einen etwas höheren Druck in der Zusammenflussstelle. Die Drucksensoren zeigten, dass die Druckverhältnisse bei von 50/50 abweichenden Volumenstromverhältnissen ebenso gleichmäßig sind.

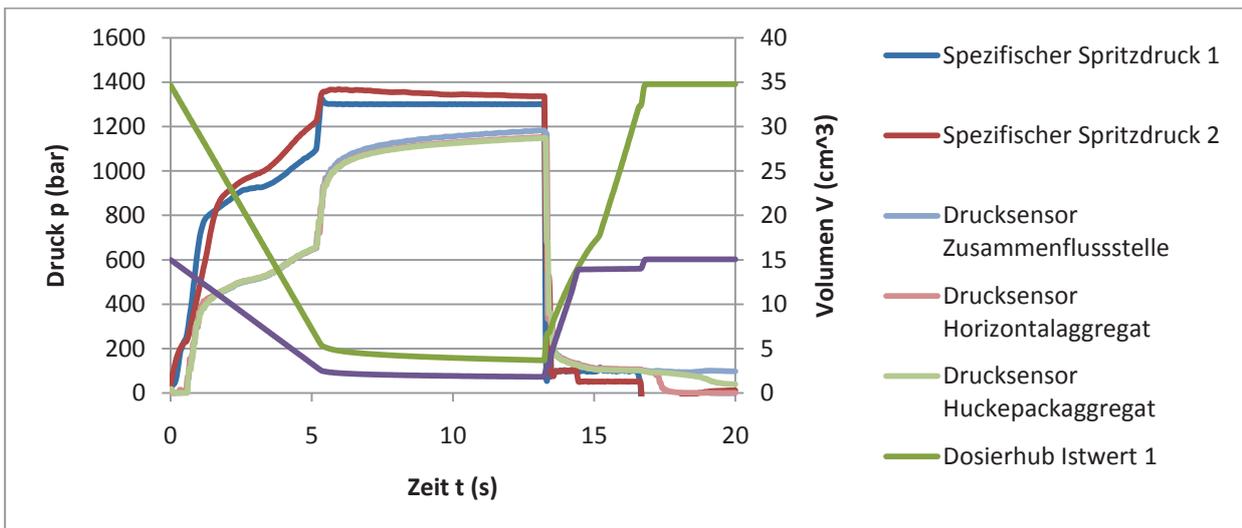


Abbildung 61: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper 70/30, neuer Coinjektionskopf

In Abbildung 62 sieht man die Eisenverteilung im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 80/20 mit dem neuen Coinjektionskopf. Die absolute Schwankungsbreite ist relativ hoch und liegt bei 3,7 Gew-%. Dies ist eine relative Streuung von $\pm 17,7\%$. Am Ende des Fließwegs war der Gehalt am niedrigsten, vermutlich verursacht durch den langsameren Druckaufbau aufgrund der geringen Einspritzgeschwindigkeit in jenem Aggregat mit dem geringeren Einspritzvolumen. Der Mittelwert lag hier absolut um 1 Gew-% und relativ um $\pm 5,3\%$ über dem Sollwert.

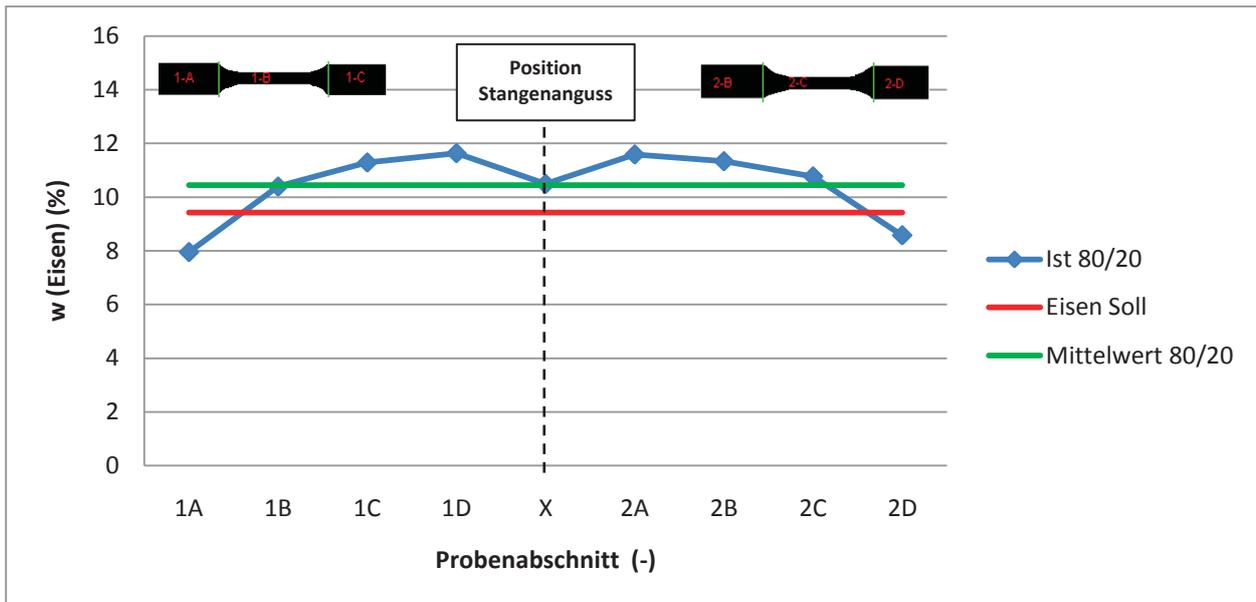


Abbildung 62: Eisengehalt im Probekörper 80/20, neuer Coinjektionskopf

Abbildung 63 zeigt die Prozessdaten für den Eisengehalt im Probekörper und ein Volumenstromverhältnis von 80/20 mit dem neuen Coinjektionskopf. Die Drucksensoren weisen auf gleiche Druckverhältnisse in den Kanälen und einen etwas erhöhten Druck an der Zusammenflussstelle hin. Die gleichen Drücke in den Kanälen sprechen für eine gleichmäßige Zusammenströmsituation.

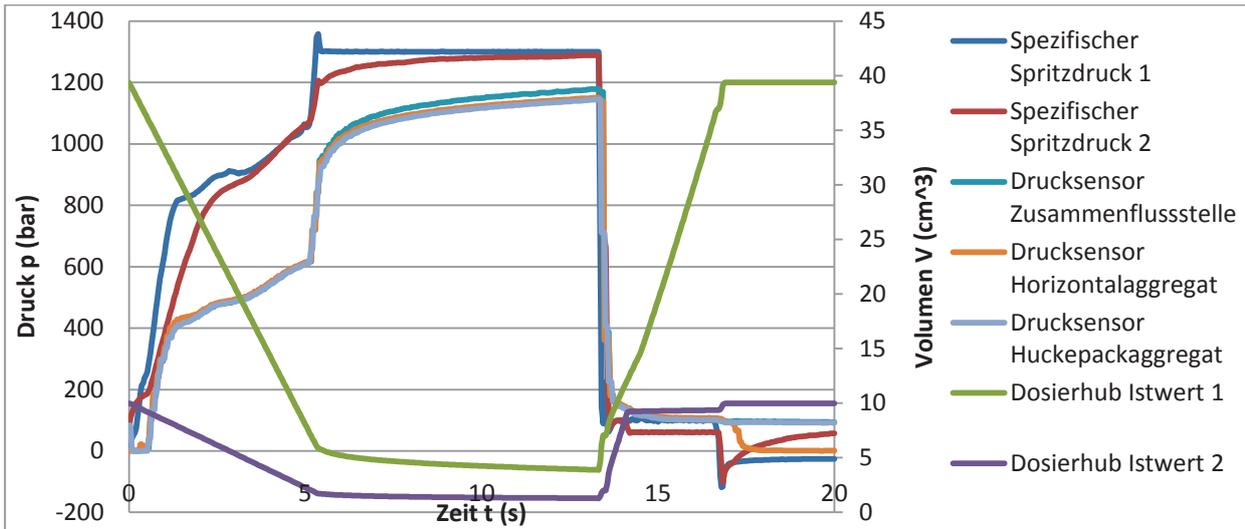


Abbildung 63: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper 80/20, neuer Coinjektionskopf

In Abbildung 64 ist der Eisengehalt im Probekörper für ein Volumenstromverhältnis von 90/10 dargestellt. Die absolute Streuung lag hier im Bereich von 0,46 Gew-%. Dies bedeutet eine relative Streuung von $\pm 9,2\%$. Der Mittelwert war absolut um 57,8 Gew-% und relativ um $\pm 46,9\%$ niedriger als der Sollwert, wodurch der Probekörper auch nicht den Vorgaben entspricht.

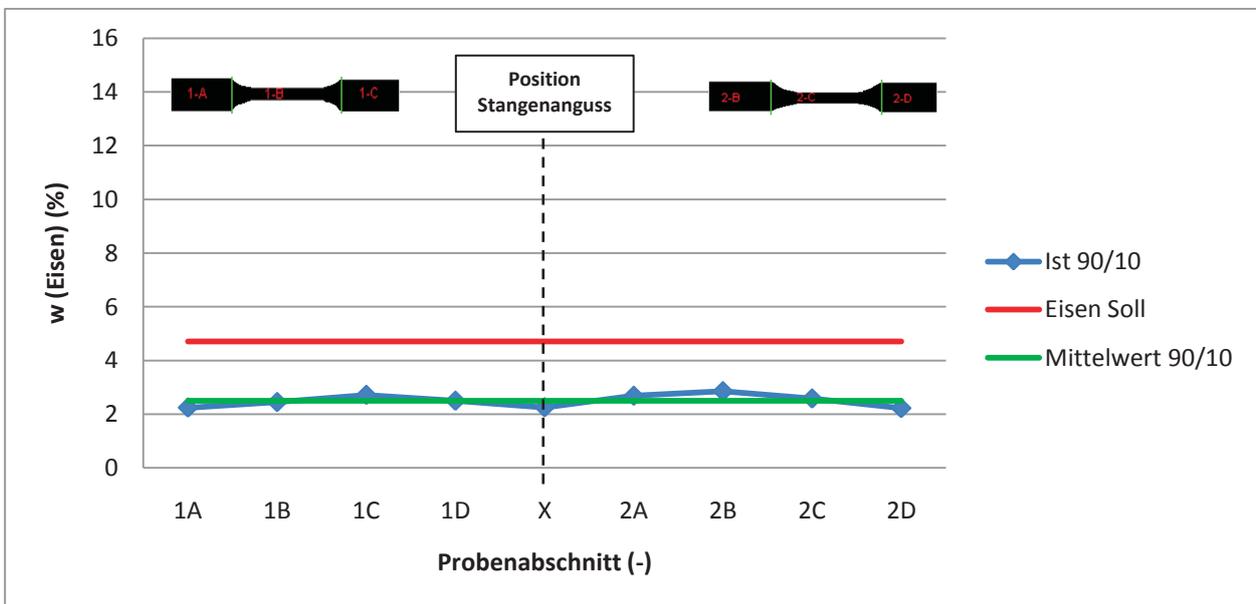


Abbildung 64: Eisengehalt im Probekörper 90/10, neuer Coinjektionskopf

Abbildung 65 zeigt die Prozessdaten für die Eisenverteilung über die Fließweglänge bei einem Volumenstromverhältnis von 90/10. Die Drucksensoren zeigten hier wie bei den anderen Verhältnissen gleiche Druckverhältnisse in den beiden Kanälen und einen etwas höheren Wert in der Zusammenflussstelle.

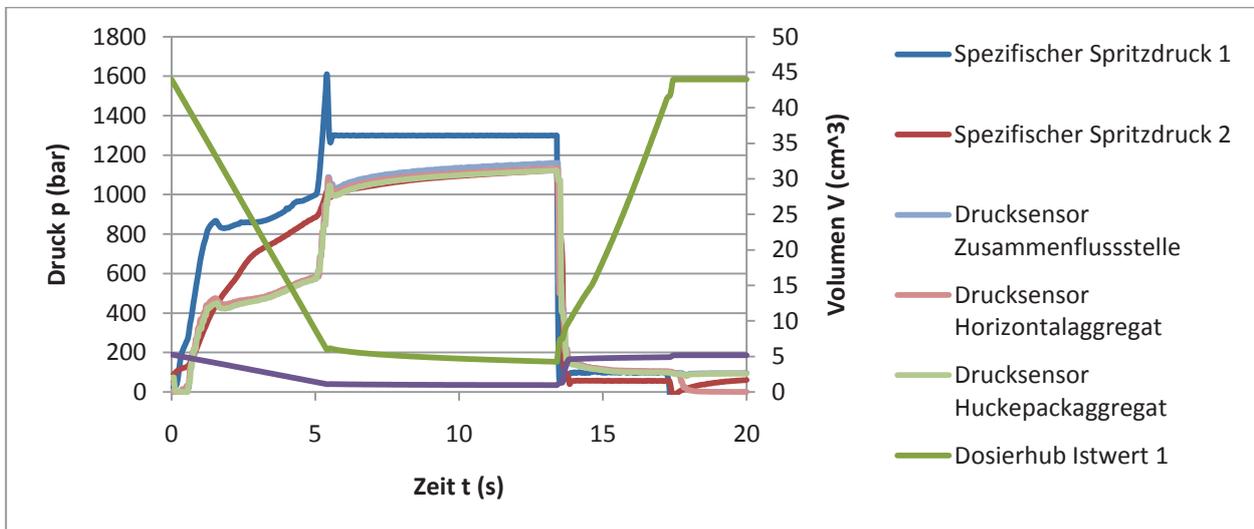


Abbildung 65: Prozessdaten, Eisengehalt im Probekörper 90/10, neuer Coinjektionskopf

Die ersten Versuche mit dem neuen Coinjektionskopf lieferten Ergebnisse, die das Arbeiten mit 2 Aggregaten wieder sinnvoll erscheinen ließen. Vor allem die Aussage der Drucksensoren, dass die Drücke in den Kanälen bei allen Verhältnissen annähernd gleich sind zeigt, dass es möglich sein sollte, mit dem e-compounder verschiedene Mengenverhältnisse durch Abfahren der entsprechenden Relativgeschwindigkeiten in den beiden Aggregaten zu realisieren.

3.5.3. Ermittlung des Druckzustands bei vertauschter Befüllung

Um einen umfangreichen Informationsstand zu erhalten, wurden Versuche bei umgekehrter Befüllung durchgeführt, d.h. der Eisencompound wurde in Aggregat 1 und das reine PS in Aggregat 2 gegeben und anschließend Verhältnisse von 20/80 bis 50/50 abgefahren. Das Interesse lag hier in der Vergleichbarkeit der Drucksensoranzeige zwischen standardmäßiger und umgekehrter Befüllung. Das Verhältnis von 10/90 konnte aufgrund der Regelung, Aggregat 2 wird nach Aggregat 1 geregelt, nicht abgefahren werden.

Abbildung 66 zeigt die Prozessdaten für die Ermittlung des Druckzustandes bei umgekehrter Befüllung für ein Volumenstromverhältnis von 50/50. Der Druckaufbau in beiden Aggregaten lief annähernd gleichzeitig ab. Die Drucksensoren zeigten ebenfalls gleiches Verhalten, wodurch klar gestellt werden konnte, dass die Drücke in den Kanälen gleich sind.

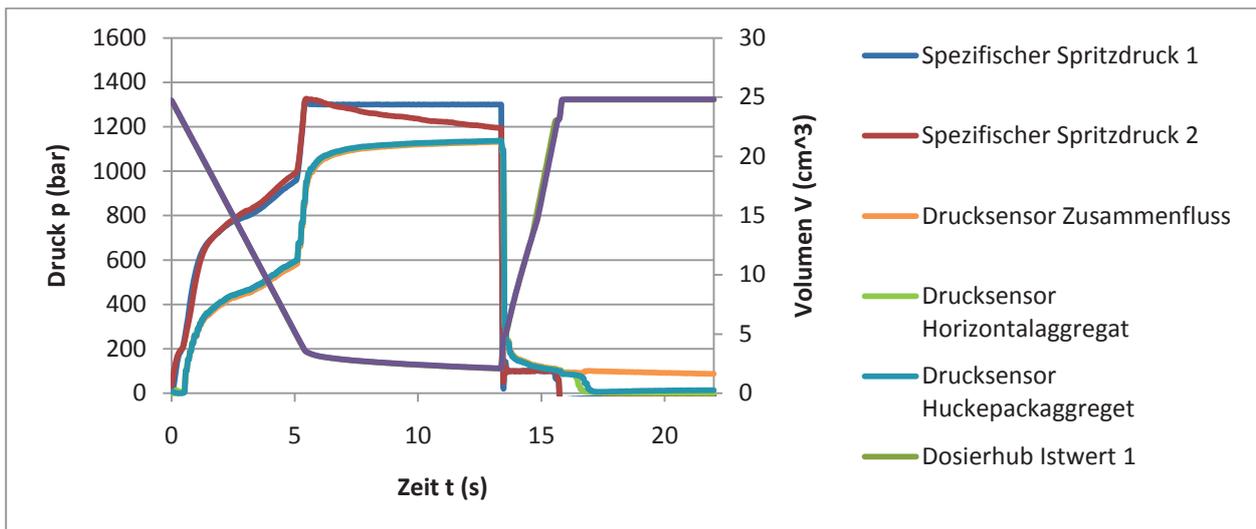


Abbildung 66: Prozessdaten, Ermittlung der Druckzustände bei umgekehrter Befüllung, 50/50

In Abbildung 67 sind die Prozessdaten für die Ermittlung des Druckzustandes bei umgekehrter Befüllung für ein Volumenstromverhältnis von 30/70 dargestellt. Der Druckaufbau in Aggregat 2 erfolgte schneller als jener in Aggregat 1, vermutlich bedingt durch die größere Schneckenvorlaufgeschwindigkeit. Trotz dieser Unterschiede zeigten die Drucksensoren gleichen zeitlichen Druckverlauf.

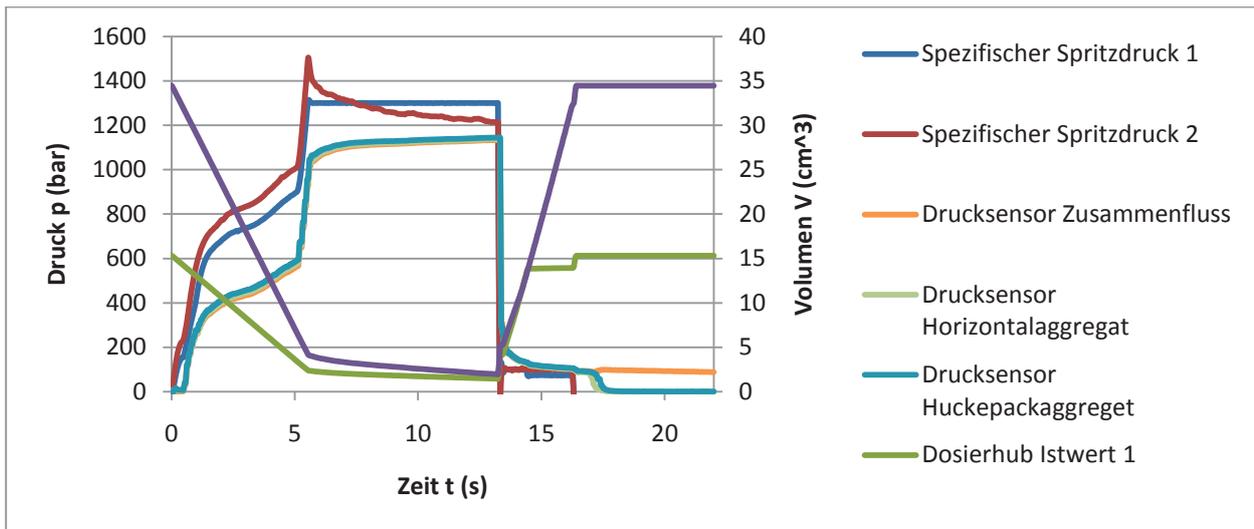


Abbildung 67: Prozessdaten, Ermittlung der Druckzustände bei umgekehrter Befüllung, 30/70

Die Prozessdaten für die Ermittlung der Druckzustände bei umgekehrter Befüllung für ein Volumenstromverhältnis von 20/80 sind in Abbildung 68 dargestellt. Auch hier zeigt sich ein schneller Druckanstieg in Aggregat 2 vermutlich aufgrund der höheren Einspritzgeschwindigkeit. Die Drucksensoren weisen trotzdem gleiche Drücke auf.

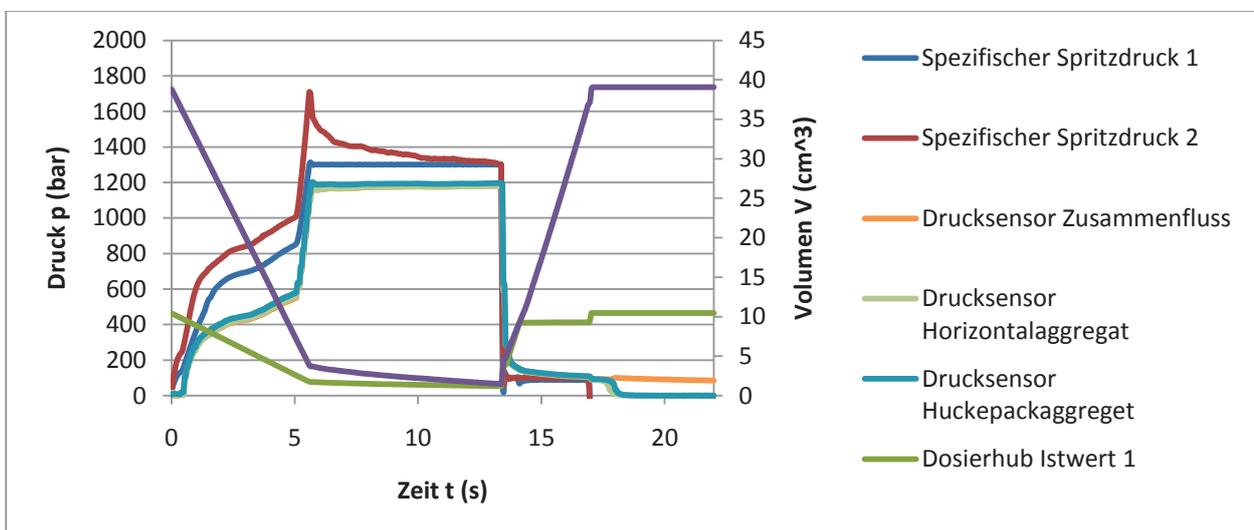


Abbildung 68: Prozessdaten, Ermittlung der Druckzustände bei umgekehrter Befüllung, 20/80

Die Versuche bei umgekehrter Befüllung zeigten, dass die Drücke im Coinjektionskopf unabhängig von Befüllung und Volumenstromverhältnis annähernd gleich sind. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Befähigung der Maschine zur schnellen Rezepturentwicklung.

3.5.4. Fertigung der Probekörper mit einem Aggregat

Die Ermittlung des Eisengehalts im Probekörper ergab in den meisten Fällen einen ansteigenden Gehalt über die Fließweglänge. Um nun den Einfluss der Zusammenführung der beiden Aggregate auszuschließen und zu sehen, welches Verhalten der Eisencompound bei der Verarbeitung über ein Aggregat hat, wurden Probekörper bei direkter Eingabe eines 7% Eisencompounds in das Horizontalaggregat gefertigt.

Abbildung 69 zeigt den Eisengehalt im Probekörper bei der Herstellung mit einem Aggregat. Die Analyse ergab ähnlich den Versuchen mit 2 Aggregaten einen ansteigenden Eisenanteil über die Fließweglänge. Im Vergleich mit den früheren Ergebnissen ist die Streuung relativ gering und lag absolut bei 0,5 Gew-% und relativ bei $\pm 3,5$ %. Daraus kann die mögliche Fertigungs- und Analysegenauigkeit abgeleitet werden. Obwohl die Abweichung des Mittelwerts vom Sollwert relativ gering ist, absolut 0,19 Gew-% und relativ $\pm 2,7$ %, kann man auch hier wieder klar den ansteigenden Eisengehalt über die Fließweglänge erkennen. Bei den V-förmigen Kurven dürfte es sich also um einen systematischen Fehler handeln, und dieser dürfte durch Fließanomalien des Eisen-PS-Compound zustande kommen. Aufgrund des hohen Dichteunterschiedes zwischen Eisen und Polymermatrix sind Entmischungserscheinungen bei Umlenkungen im Kaltkanal nicht auszuschließen. Hier könnte eine optimierte Angussgestaltung in Anlehnung an das Pulverspritzgießen zu Verbesserungen führen.

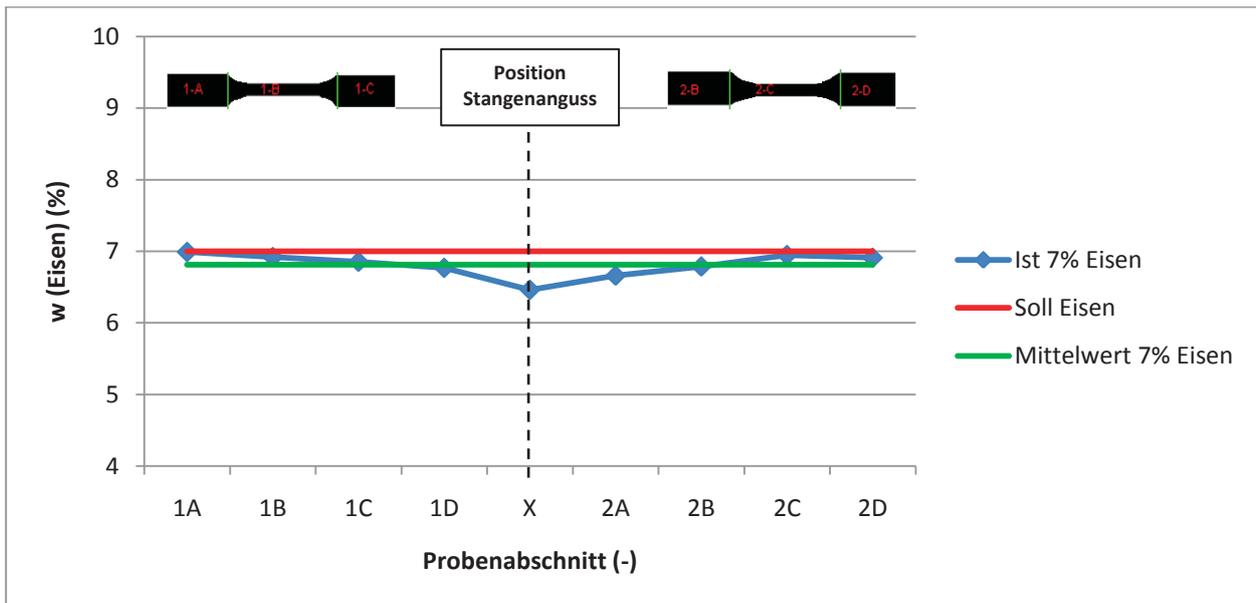


Abbildung 69: Eisengehalt im Probekörper, gefertigt mit einem Aggregat

3.5.5. Untersuchung der Drucksensoranzeige bei quasistatischem Druckzustand

Zur Untersuchung der Drucksensoranzeige wurde die Düse mittels eines Kupferplättchens verschlossen. Hierzu wurde das Plättchen zwischen Düse und Werkzeug eingespannt und der Anpressdruck aufgebaut. Zur Durchführung wurden die Einstellungen für ein Volumenstromverhältnis von 50/50 gewählt, der Umschaltzeitpunkt zeitabhängig geregelt und auf Null Sekunden festgelegt. Dadurch wechselt die Maschine sofort in die Nachdruckphase und dort wird dann das eingestellte Druckprofil laut Abbildung 70 abgefahren.



Abbildung 70: Druckprofil zur Untersuchung der Drucksensoranzeige bei quasistatischem Druckzustand

In Abbildung 71 sind die Prozessdaten für die Untersuchung der Drucksensoranzeige bei quasistatischem Druckzustand dargestellt. Die Sensoren zeigen einen gleichmäßigen Druckverlauf, nur bei höheren Drücken ist eine Differenz zu erkennen, vermutlich bedingt durch den großen Unterschied in den Schneckenanschubdrücken. Generell dürfte es zu einem Druckausgleich im Coinjektionskopf kommen. Erst bei größeren Druckunterschieden zeigen die Sensoren tendenziell den Druck im jeweiligen Aggregat.

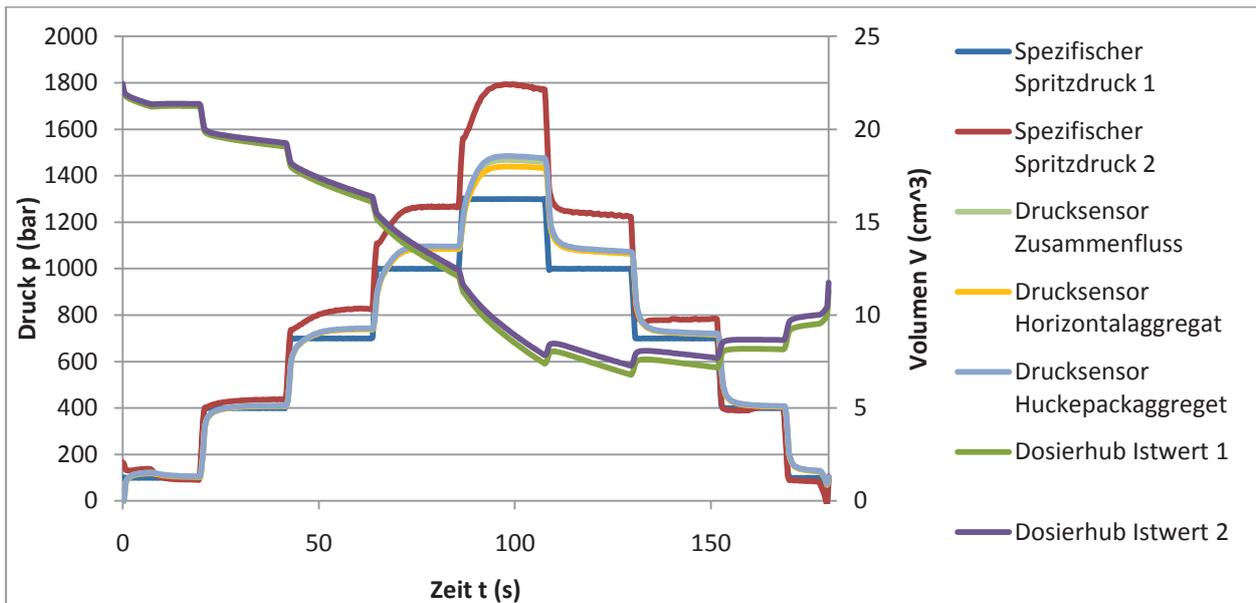


Abbildung 71: Prozessdaten, Untersuchung der Drucksensoranzeige bei quasistatischem Druckzustand

Bei der Realisierung der quasistatischen Druckversuche konnte ein geringer Materialverlust nicht verhindert werden. Zwar konnte die Düse mit dem Kupferplättchen gut verschlossen werden, jedoch kam es zu einem Materialaustritt über die Sensorbohrungen und an der Dichtfläche zwischen Düse und Coinjektionskopf.

3.5.6. Ausspritzversuche bei aufgebohrter Düse

Um die Zusammenflusssituation über den Zyklus besser bestimmen zu können, wurden Stränge im Handbetrieb bei aufgebohrter Düse gefertigt. Diese wurden auf ein Blech gespritzt und nach dem Abtrennen sofort in einen mit Wasser gefüllten Kübel gegeben, um ein übermäßiges Verwinden zu vermeiden. Es wurden wieder verschiedene Volumenstromverhältnisse abgefahren und dafür die entsprechenden Geschwindigkeiten verwendet. Für ein Volumenstromverhältnis von 50/50 je Aggregat wurde 8mm/s Einspritzgeschwindigkeit eingestellt. Um den Einfluss der Viskosität vernachlässigen zu können, wurde für beide Aggregate das gleiche Material, PC, einmal weiß und einmal in rot deckender Einfärbung verwendet. Das weiße PC wurde in Aggregat 1 und das rote in Aggregat 2 verarbeitet. Bei diesen Versuchen stand kann

PS Sabcic 125 zur Verfügung und so wurde aus Zeit- und Kostengründen alternativ PC eingesetzt.

Zur Strangspritzung wurde die kurze Düse mit einer Hülse anstatt eines fünfelementigen Mischers verwendet. In Abbildung 72 ist der Düsenaustritt und in Rot der aufgebohrte Durchmesser dargestellt. Wie zu sehen ist, wurde der Düsenaustritt auf den Innendurchmesser der Hülse erweitert, um möglichst keinen Einfluss durch Umlenkungen nach dem Zusammenfluss mehr zu haben. Des Weiteren ist PC amorph und zeigt deswegen beim Erstarren in Gegensatz zu teilkristallinen Thermoplasten wenig Verwindungen.

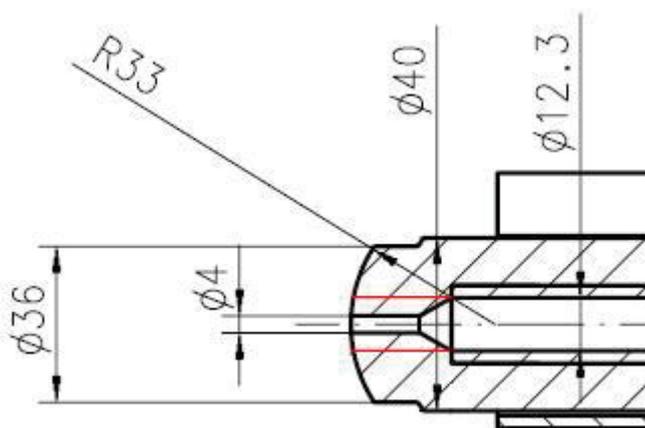


Abbildung 72: Düsenaustritt

Die hergestellten Stränge wurden anschließend in gleiche Teile zerschnitten und die so entstandenen Querschnitte auf ihre Rotanteile untersucht. Die Ermittlung der Flächenverhältnisse wurden mit Hilfe einer DEMO Version des Programms „DatInf Measure“ (DatInf GmbH, Tübingen, D) durchgeführt. Beispiele hierfür sind in Abbildung 73 und Abbildung 74 dargestellt. Bei der Vermessung des Rot- wie auch des Weißanteils wurden etwaige Hohlräume und Blasen im Inneren des Stranges nicht berücksichtigt.

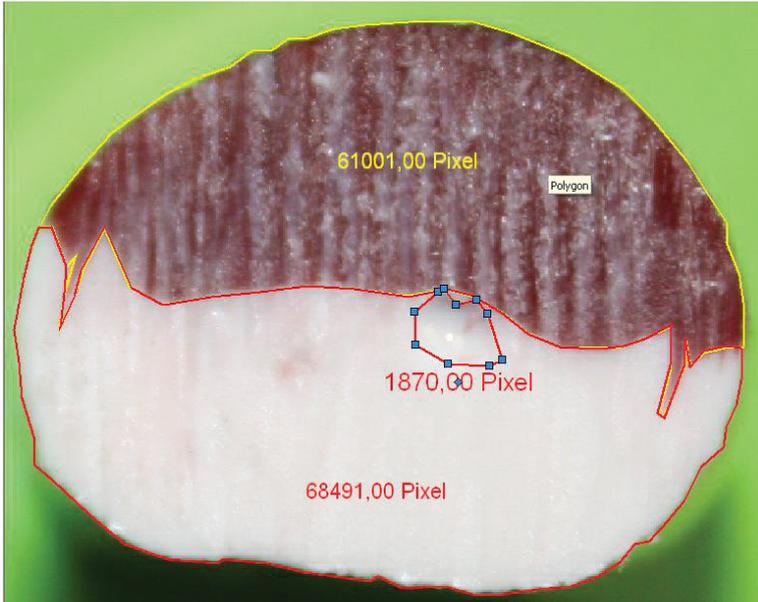


Abbildung 73: Querschnitt 3, Strang 3, 50/50



Abbildung 74: Querschnitt 10, Strang 2, 50/50

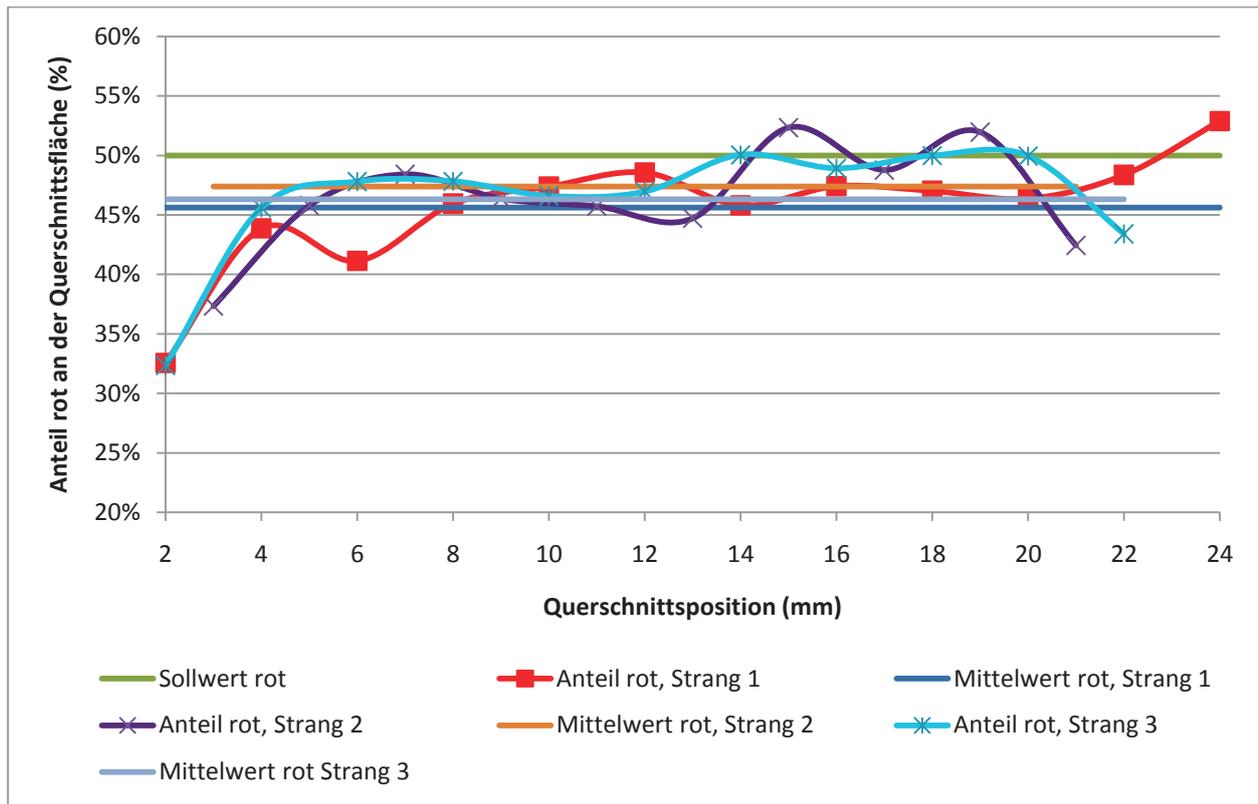


Abbildung 75: Stränge 50/50, aufgebohrte Düse

Abbildung 75 zeigt den Rotanteil über die Stranglänge von drei ins Freie gespritzten Stränge bei aufgebohrter Düse für ein Volumenstromverhältnis von 50/50. Klar zu erkennen ist der Anstieg am Anfang, in weiterer Folge bleibt der Rotanteil relativ konstant. Dies dürfte darauf hindeuten, dass die Ausbildung der Grenzschicht eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt. Die Mittelwerte lagen deutlich unterhalb des Sollwerts, wohl auch bedingt durch den Anstieg von einem geringeren Wert aus am Stranganfang. Generell lag das Niveau aber unter dem beabsichtigten Sollwert. Es scheint, dass durch die Anordnung und dem damit verbundenen längeren Fließweg im Huckepackaggregat ein geringerer Anteil im Endprodukt wieder zu finden war. Vor allem die Umlenkung des Nebenstroms aus Aggregat 2 bei der Zusammenführung scheint die Ursache der geringeren Mittelwerte zu sein.

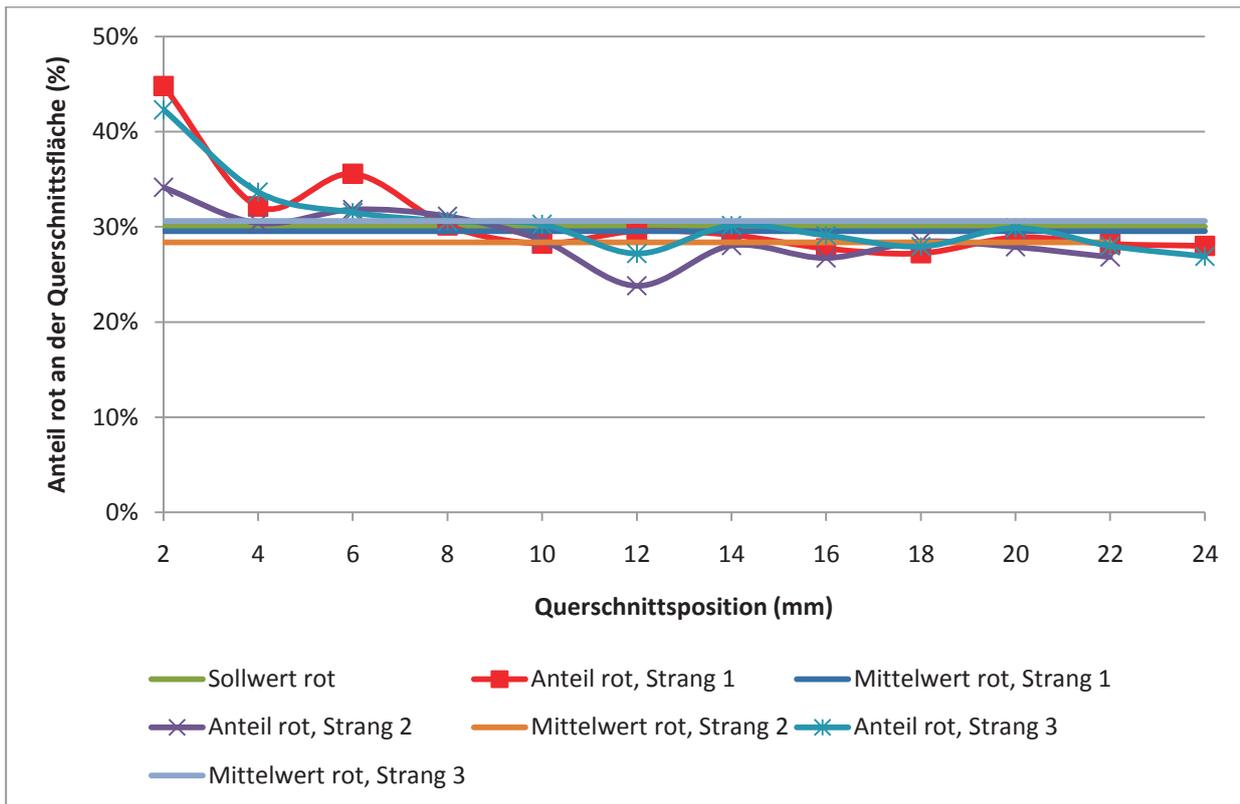


Abbildung 76: Stränge 70/30, aufgebohrte Düse

In Abbildung 76 ist der Rotanteil über die Stranglänge für ins Freie gespritzte Stränge bei aufgebohrter Düse für ein Volumenstromverhältnis von 70/30 dargestellt. Hier lag im Unterschied zum Verhältnis von 50/50 ein Abfall, kein Anstieg, zu Beginn vor. Vermutlich lag dies am schnelleren Druckaufbau bedingt durch das geringere Dosiervolumen. Anschließend konnte wieder ein relativ konstantes Niveau erzielt werden, was vermutlich auf die Ausbildung der stabilen Grenzschicht zurückzuführen war. Der Mittelwert lag, bedingt durch den Mehranteil am Anfang des Strangs, im Bereich des Sollwertes. Nach Ausbildung der Grenzschicht wurde ein relativ stabiles, niedriges Niveau erzielt, vermutlich bedingt durch die unsymmetrische Zusammenführung.

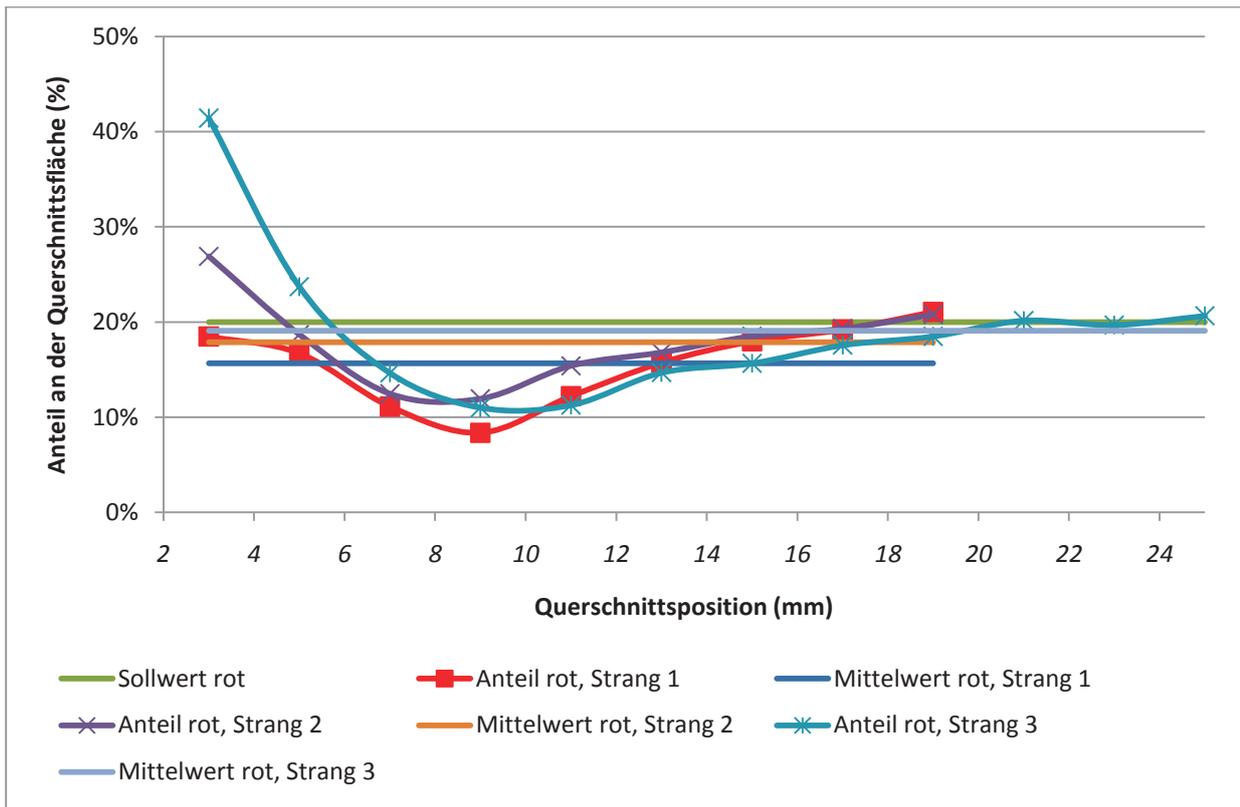


Abbildung 77: Stränge 80/20, aufgebohrte Düse

In Abbildung 77 sieht man den Rotanteil über die Stranglänge für ins Freie gespritzten Stränge bei aufgebohrter Düse für ein Volumenstromverhältnis von 80/20. Hier zeigt sich ein hoher Anteil zu Beginn, gefolgt von einem Abfall und einem anschließenden Wiederanstieg ohne einen konstanten Anteil zu erzielen. Der hohe Anteil zu Beginn dürfte am schnelleren Druckaufbau aufgrund des geringeren Dosiervolumens liegen. Im Mittel wurde der Sollwert auch nicht erreicht, was auch wieder auf die unsymmetrische Zusammenführung der Schmelzeströme liegen dürfte.

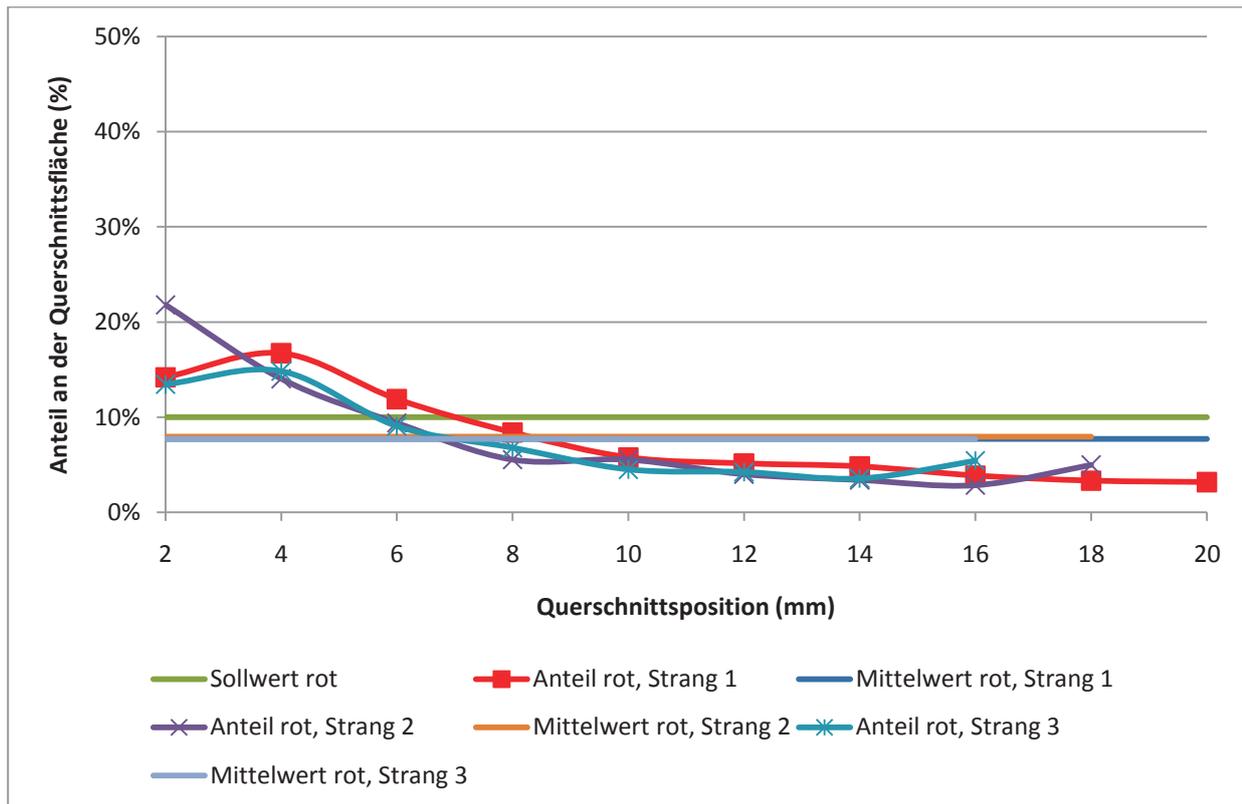
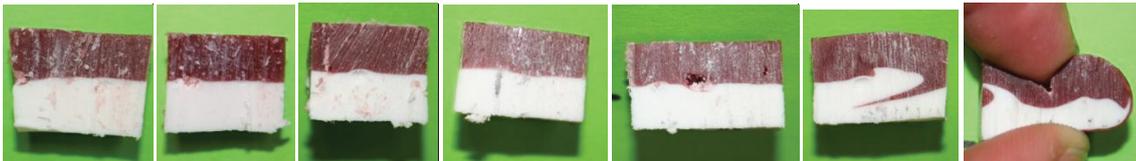


Abbildung 78: Stränge 90/10, aufgebohrte Düse

Abbildung 78 zeigt den Rotanteil über die Stranglänge der ins Freie gespritzten Stränge bei aufgebohrter Düse für ein Volumenstromverhältnis von 90/10. Zu Beginn lag ein höherer Anteil vor, gefolgt von einem stetigen Abfall über die gesamte Länge vor. Der hohe Anteil zu Beginn ist auf den schnelleren Druckaufbau bedingt durch das geringe Dosiervolumen zurückzuführen. Der stetige Abfall ist dann vermutlich eine Folge des erhöhten Gehalts am Anfang und der langsamen axialen Schneckenlaufgeschwindigkeit. Der Sollwert wurde im Mittel ebenfalls nicht erreicht, vermutlich aufgrund der unsymmetrischen Zusammenführung.

Keine Berücksichtigung der genauen Zusammenströmverhältnisse entlang der Länge ergab die Untersuchung der Querschnitte, da nur eine punktweise Analyse der Stränge erfolgte. Um nun einen genaueren Einblick über die Stränge zu erhalten, wurden die einzelnen Elemente entlang der Länge aufgeschnitten und die Situation optisch betrachtet.

Abbildung 79 zeigt das Rot- Weißverhältnis über die Stranglänge eines ins Freie gespritzten Stranges bei aufgebohrter Düse für ein Volumenstromverhältnis von 50/50. Klar zu erkennen ist die inhomogene Zusammenflusssituation zu Beginn des Ausspritzens (Element 1 und 2). Über die Stranglänge stellt sich anschließend ein konstanter Verlauf ein.



Element 7←Element 6←Element 5←Element 4←Element 3←Element 2←Element 1



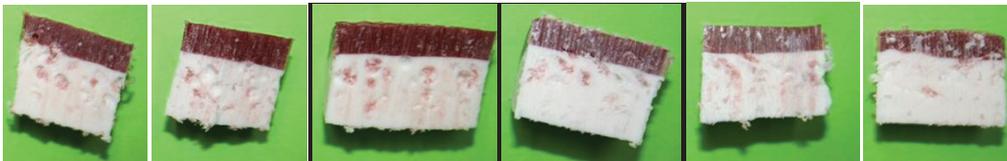
Element 13←Element 12←Element 11←Element 10←Element 9←Element 8

Abbildung 79: Strang 50/50, aufgebohrte Düse, Längsschnitt

Abbildung 80 zeigt das Rot- Weißverhältnis über die Stranglänge der ins Freie gespritzten Stränge bei aufgebohrter Düse für ein Volumenstromverhältnis von 70/30. Auch hier war zu Beginn eine hohe Inhomogenität (bis Element 4) und anschließend ein konstanter Verlauf zu erkennen.



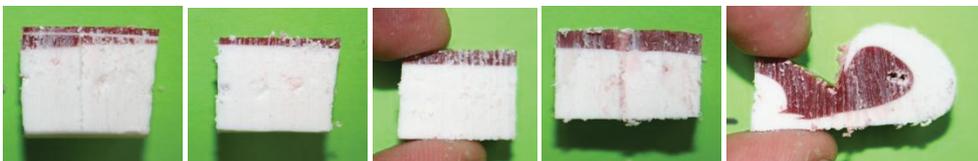
Element 6 ← Element 5 ← Element 4 ← Element 3 ← Element 2 ← Element 1



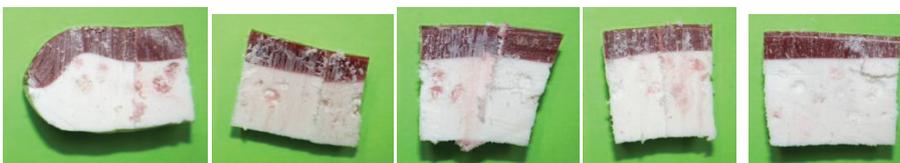
Element 12 ← Element 11 ← Element 10 ← Element 9 ← Element 8 ← Element 7

Abbildung 80: Strang 70/30, aufgebohrte Düse, Längsschnitt

Abbildung 81 zeigt das Rot- Weißverhältnis über die Stranglänge der ins Freie gespritzten Stränge bei aufgebohrter Düse für ein Volumenstromverhältnis von 80/20. Zu Beginn lag wieder eine hohe Schwankung vor, gefolgt von einer Abnahme des Rotanteils. Nach dem Minimum in Element 4 trat wieder eine Zunahme auf, wobei sich anschließend eine relativ konstante Verteilung einstellte.



Element 5 ← Element 4 ← Element 3 ← Element 2 ← Element 1



Element 10 ← Element 9 ← Element 8 ← Element 7 ← Element 6

Abbildung 81: Strang 80/20, aufgebohrte Düse, Längsschnitt

Abbildung 82 zeigt das Rot- Weißverhältnis über die Stranglänge der ins Freie gespritzten Stränge bei aufgebohrter Düse für ein Volumenstromverhältnis von 90/10. Auch hier traten zu Beginn große Schwankungen auf. Im Anschluss folgte eine

kontinuierliche Abnahme bis zu einem verschwindend geringen Rotanteil über einen Großteil des Stranges.



Element 5 ← Element 4 ← Element 3 ← Element 2 ← Element 1



Element 10 ← Element 9 ← Element 8 ← Element 7 ← Element 6

Abbildung 82: Strang 90/10, aufgebohrte Düse, Längsschnitt

3.5.7. Mehrere Schuss mit einer Dosierung

Die Farbversuche bei aufgebohrter Düse zeigten eine inhomogene Verteilung am Anfang des Ausspritzens mit nachfolgender Stabilisierung der Grenzschicht und dann relativ konstanten Verhältnissen. Die Inhomogenität zu Beginn deutet auf eine „Pfropfenbildung“ im Huckepackaggregat hin, d.h.: das Einströmen des Nebenstroms in den Hauptkanal wurde zuerst größtenteils verhindert, bis sich ein gewisser Druck aufgebaut hatte, gefolgt von einem Durchschießen des Materials, wobei das Material vom Hauptaggregat zurückgedrängt wurde. In weiterer Folge bildet sich eine konstante Grenzschicht aus. Nun wurden Versuche mit zwei Aggregaten durchgeführt, bei denen mit einer Dosierung mehrere Schuss gefertigt wurden. Aggregat 2 wurde mit einem 25%igen Eisencompound und Aggregat 1 mit reinem PS befüllt.

Es wurden mit 1 Dosierung 2 Schuss der Zugprobekörper, Type 1A, hergestellt, nach Abbildung 18 unterteilt und anschließend durch Soxhlet-Extraktion analysiert.

Abbildung 83 zeigt den Eisengehalt im Probekörper für die Herstellung zweier Schuss mit einer Dosierung. Klar zu erkennen ist der Unterschied zwischen dem ersten und dem zweiten Schuss. Der ansteigende Gehalt über die Fließweglänge im ersten Schuss mit einer Streuung von absolut 2,72 Gew-% und relativ $\pm 9,2\%$ ist hier deutlich zu sehen. Der gleiche Effekt ist ebenso im zweiten Schuss zu sehen, jedoch liegt die absolute Streuung bei 0,4 Gew-% und die relative Streuung bei $\pm 1,4\%$. Dies unterstreicht die Theorie der „Pfropfenbildung“ nach dem Dosiervorgang und beim Start eines neuen Einspritzvorgangs.

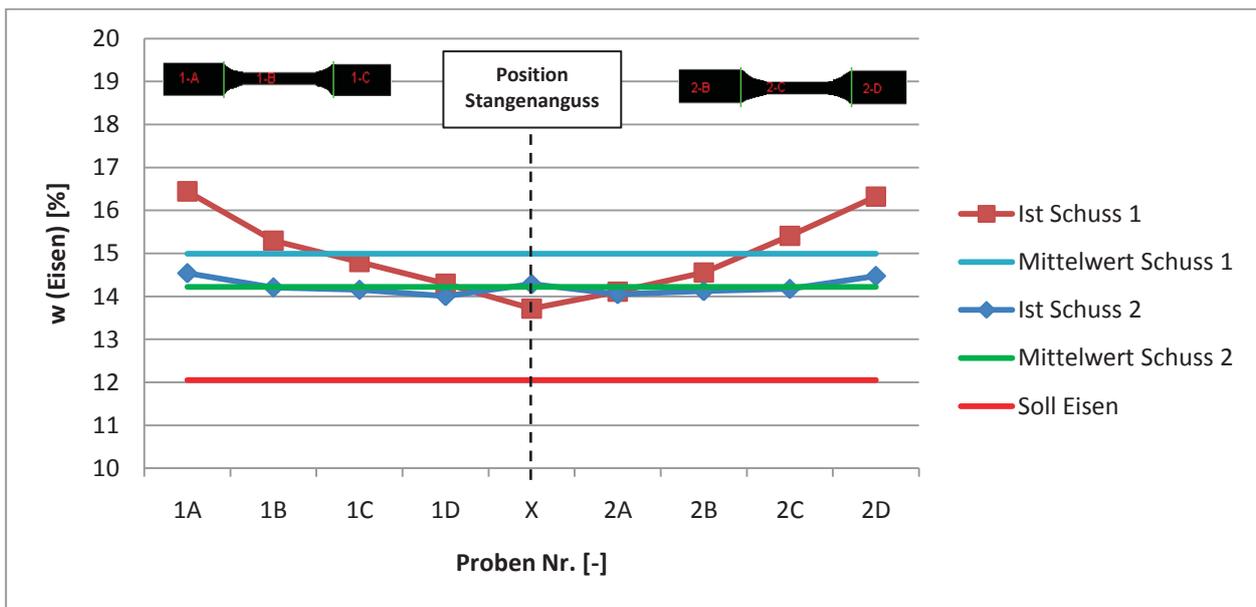
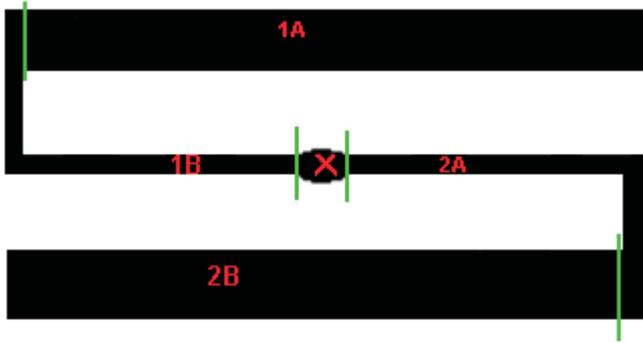


Abbildung 83: Eisengehalt im Probekörper, Zugprüfkörper Type 1A, 2 Schuss mit 1 Dosierung

Um zu untersuchen, ob tatsächlich nur beim ersten Schuss dieser „Pfropfen“ auftritt, wurde versucht, eine höhere Anzahl an Probekörpern aus einer Dosierung zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde ein Werkzeug mit geringerem Probekörpervolumen für die Herstellung von Probekörpern zur Untersuchung der Entflammbarkeit (Flammstäbe) verwendet (siehe Abbildung 84). So konnten 5 Schuss zu je 17g je Dosierung realisiert und ein Eisengehaltsvergleich angestellt werden.



Schnittlinie

Abbildung 84: Unterteilung der Flammstäbe zur Ermittlung des Eisengehalts

In Abbildung 85 ist der Eisengehalt im Probekörper für die Herstellung mehrerer Schuss mit einer Dosierung dargestellt. Die Flammstäbe wurden nach Abbildung 84 in einzelne Abschnitte unterteilt. Hier wurde ebenfalls klar, dass der erste Schuss eine sehr inhomogen Eisenverteilung über die Fließweglänge aufweist. Die Streuung betrug hier absolut 4,2 Gew-% und relativ $\pm 15\%$. Die folgenden vier Schuss lagen hingegen in gleichen Bereichen bei einer absoluten Streuung von 1,1 Gew-% und einer relativen von $\pm 4,1\%$. Dadurch wird die Vermutung der „Pfropfenbildung“ zu Beginn bestätigt.

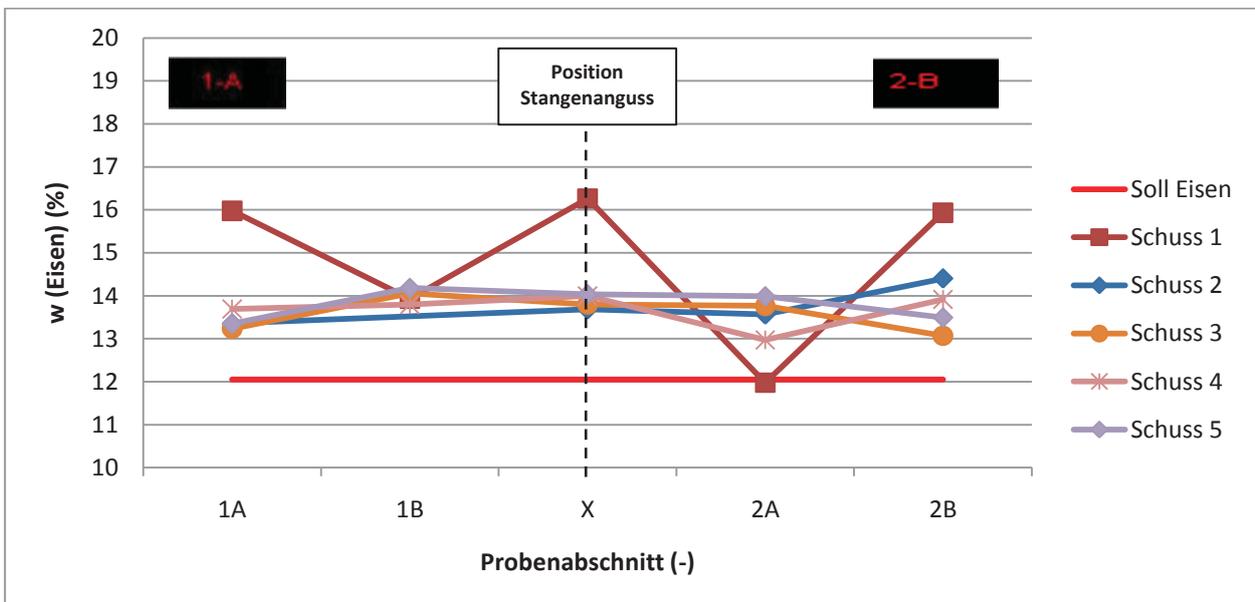


Abbildung 85: Eisengehalt im Probekörper, Flammstab, 5 Schuss mit 1 Dosierung

Die Fertigung mehrerer Schuss mit einer Dosierung zeigte, dass sich scheinbar beim Dosiervorgang ein Pfropfen im Huckepackaggregat bildet, wodurch das Eindringen des Nebenstroms in den Hauptstrom unterbunden wird und erst nach Aufbau eines gewissen Druckes möglich wird. Im Anschluss schießt das Material durch und verhindert so eine konstante Förderung des Hauptstroms. In weiterer Folge bildet sich ein gleichmäßiger Zusammenfluss und somit auch eine konstante Grenzschicht aus.

Zur weiteren Verbesserung der Maschine wäre es gut, den Prozessablauf so zu verändern, dass das erste Material nach der Dosierung nicht in den Spritzling gelangt sondern von diesem getrennt wird z.B. durch Einspritzen eine später mit dem Spritzling entformte Nebenkavität. Ebenso zu untersuchen wäre, wie viel Material eliminiert werden müsste.

3.5.8. Verteilungsermittlung im Strang mit neuem Kopf und Verwendung der Drossel

Zur Untersuchung des Einflusses der Drossel wurden ins Freie gespritzte Stränge bei verschiedenen Drosselstellungen gefertigt und diese dann verglichen. Es wurden die verschiedenen Drosselpositionen bei Volumenstromverhältnissen von 80/20 und 90/10 von 0 mm, ausgeschraubter Zustand, bis zu 8 mm, maximale Eindringtiefe, in 2 mm Schritten variiert. Das reine PS wurde von Aggregat 1 und der Eisencompound von Aggregat 2 verspritzt. Die Stränge wurden entlang ihrer Länge in sechs Teile unterteilt und Mittels Soxhlet-Extraktion analysiert.

In Abbildung 86 ist der Eisengehalt über die Stranglänge für ein Volumenstromverhältnis von 90/10 bei einer Drosselposition von 4 mm fotografisch dargestellt. Und es ist klar die inhomogene Verteilung über die Fließweglänge zu erkennen.





Abbildung 86: Eisengehalt im Strang, Volumenstromverhältnis 90/10,
Drosselposition 4 mm, Foto

Abbildung 87 zeigt den Eisengehalt im Strang für ein Volumenstromverhältnis von 90/10 bei einer Drosselposition von 4 mm grafisch. Klar zu erkennen ist der hohe Gehalt zu Beginn mit anschließenden Abfall fast auf Null und einem Wiederanstieg zum Ende hin. Die absolute Streuung lag bei 7,5 Gew-% und entspricht einem relativen Streubereich von $\pm 118,5\%$. Der Mittelwert lag absolut um 0,8 Gew-% und relativ um $\pm 33,9\%$ höher.

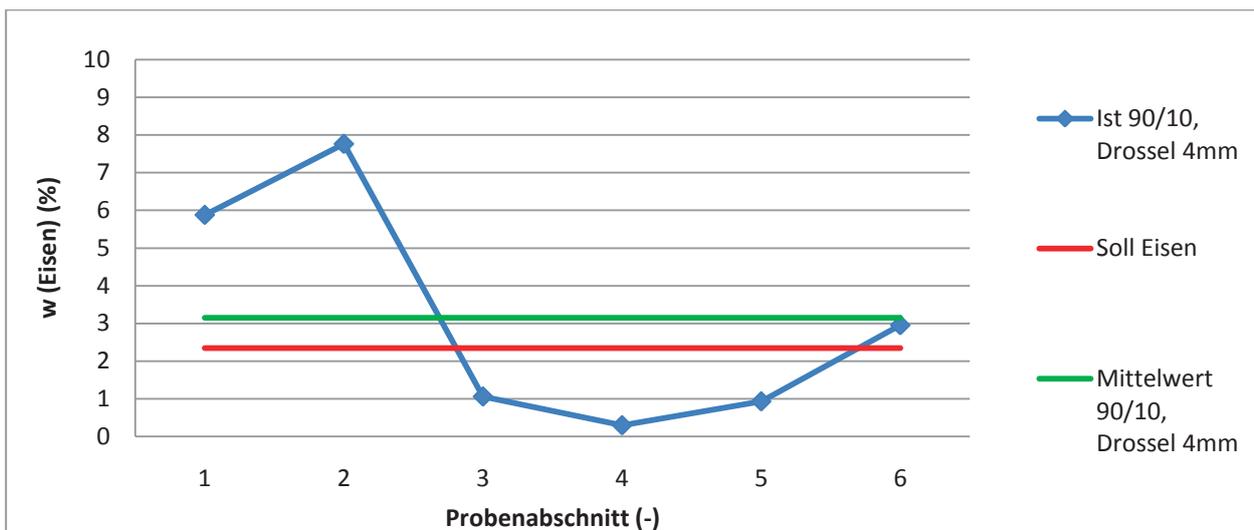


Abbildung 87: Eisengehalt im Strang, Volumenstromverhältnis 90/10,
Drosselposition 4 mm, Soxhletanalyse

In Abbildung 88 ist der Eisengehalt über die Stranglänge für ein Volumenstromverhältnis von 90/10 bei einer Drosselposition von 8 mm fotografisch festgehalten. Wieder klar zu erkennen ist die inhomogene Verteilung über die Fließweglänge.

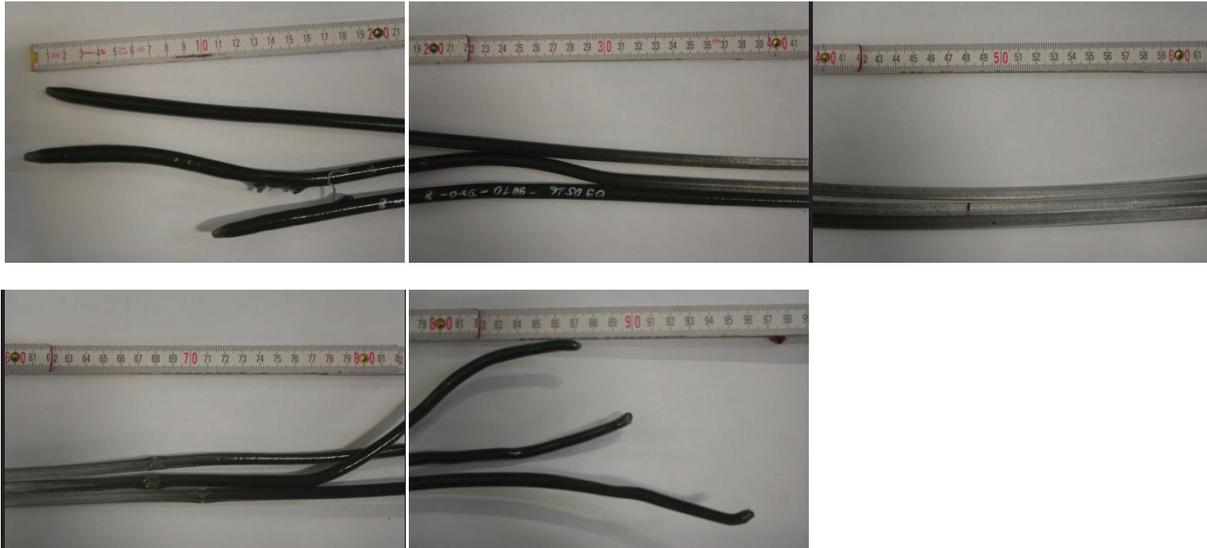


Abbildung 88: Eisengehalt im Strang, Volumenstromverhältnis 90/10,
Drosselposition 8 mm, Foto

In Abbildung 89 ist der Eisengehalt im Strang für ein Volumenstromverhältnis von 90/10 bei einer Drosselposition von 8 mm grafisch dargestellt. Auch hier lag am Anfang des Stranges ein hoher Gehalt vor, gefolgt von einem starken Abfall und einem Wiederanstieg zum Ende hin. Die Streuung lag absolut bei 4,58 Gew-% und relativ bei $\pm 189,1$ %. Der Mittelwert erzielt in diesem Fall genau den Sollwert.

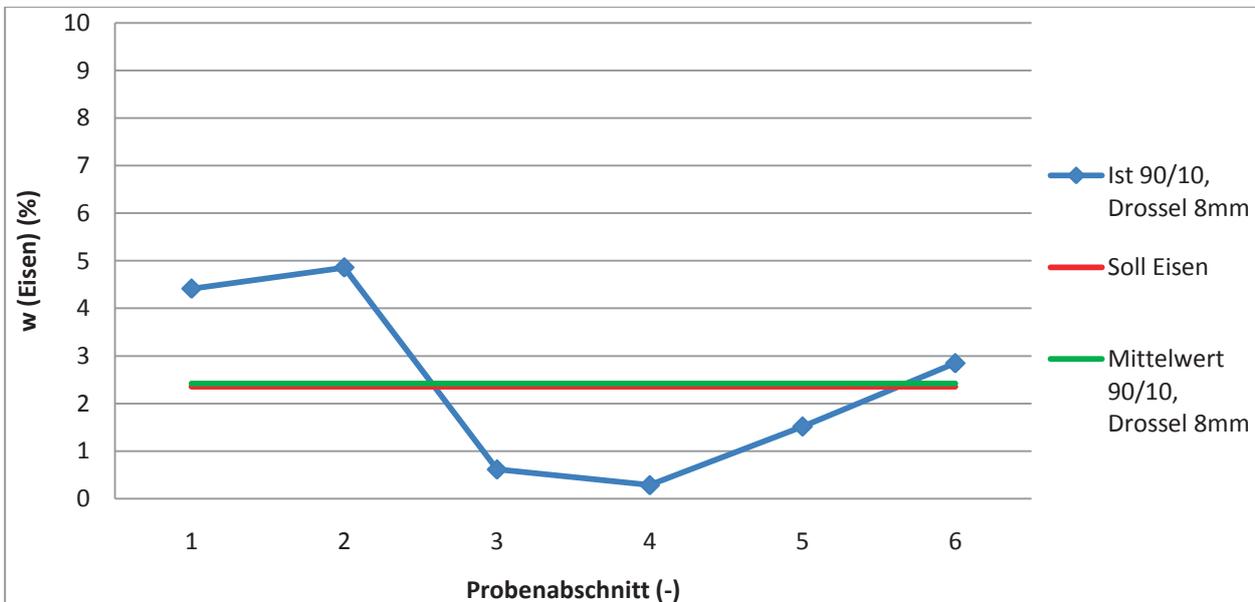


Abbildung 89: Eisengehalt im Strang, Volumenstromverhältnis 90/10,
Drosselposition 8 mm, Soxhletanalyse

Die Analyse zeigte, dass durch die unterschiedlichen Drosselpositionen, also die Veränderung des Kanalquerschnitts, keine Homogenisierung des Eisengehalts über die Stranglänge erfolgte. Der Mittelwert konnte an den Sollwert angenähert werden, was durch die Querschnittsverringering zu erwarten war. Eine weitere Frage, die sich stellt ist, ob es durch die Drossel zu toten Ecken und damit zu Materialablagerung kommt, wodurch hier eine Materialersetzung erfolgen würde.

Für die folgenden Versuche wurde die Drossel nicht mehr verwendet und die Bohrung mittels eines Blindstopfens verschlossen. Als weiterführende Untersuchung wäre der Einfluss der Drossel auf die Eisenverteilung am Probekörper und bei Verarbeitung eines Farbcompounds interessant.

3.6. Zusammenfassung der Maschinenentwicklung

Die Streubreite für die ersten untersuchten Proben für ein Volumenstromverhältnis von 50/50 lag bei $\pm 16,6$ % wobei der Mittelwert um $\pm 0,5$ % unter dem Sollwert lag. Die relative Streuung konnte durch das Abfahren eines Geschwindigkeitsprofils geringfügig auf 15,8 % verbessert werden. Jedoch ergab sich dadurch ein erhöhter Mittelwert im Vergleich zum Sollwert von ± 4 %. Mit dem neu gefertigten Coinjektionskopf wurde eine Verbesserung der relativen Streuung auf $\pm 9,7$ % erzielt wobei der Mittelwert um ± 47 % erhöht war.

Die durchgeführten Versuchsserien, Strangspritzung bei aufgebohrter Düse und Mehrere Schuss mit einer Dosierung zeigten einen relativen Streubereich von $\pm 4,1$ % bei Eliminierung des ersten Materials. Der Mittelwert war um $\pm 12,5$ % erhöht. Hier sollte das Volumenstromverhältnis angepasst werden.

Das Volumenstromverhältnis 70/30 zeigte eine für die ersten Probekörper eine relative Streuung von $\pm 12,7$ % und eine Abweichung des Mittelwerts vom Sollwert von $\pm 7,5$ %. Für ein Volumenstromverhältnis von 90/10 wurde für die zuerst untersuchten Probekörper eine relative Streuung von $\pm 12,7$ % erreicht werden, jedoch lag der Mittelwert $\pm 7,5$ % unter dem Sollwert.

Für die Volumenstromverhältnisse von 70/30 und 90/10 wurden nur die Stränge bei aufgebohrter Düse gefertigt und bei Eliminierung des ersten Materials wurden folgende relative Streubereiche erzielt.

Beim Volumenstromverhältnis von 70/30 wurde eine relative Streuung von ± 5 % erzielt und der Mittelwert lag um ± 5 % niedriger.

Das Volumenstromverhältnis 90/10 zeigte eine relative Streubreite von ± 3 jedoch war der Mittelwert um ± 40 % niedriger.

Das Ausspritzen des ersten Materials ermöglicht, dass nur jenes Material in die Kavität gelangt, bei welcher sich schon eine stabile Grenzschicht ausgebildet hat. Dies ermöglicht eine Verringerung der Streubreite wodurch der Einsatz des HTS-Systems für eine Vorauswahl an relevanten Rezepturen möglich ist. Im Anschluss sollte aber in jedem Fall die Rezepturfestlegung mittels DSE erfolgen.

4 Untersuchung der Systemgenauigkeit

Zur Evaluierung der Praxistauglichkeit wurden Versuchsplänen für Kundenprojekte ein zweites Mal abgefahren und die gefertigten Probekörper mechanisch geprüft. Ziel dieser Versuche war es die erzielbare Genauigkeit für die mechanische Prüfung zu bestimmen.

Zu Beginn eines jeden Projektes wurden die Schüttdichten der Einsatzmaterialien bestimmt und anschließend ein Mengentest zur Aufnahme einer Förderkurve an den Dosierwaagen durchgeführt. Dieser Mengentest musste für jedes Material durchgeführt werden, um die unterschiedlichen Fördercharakteristiken der Granulate, Pulver und Fasern zu bestimmen.

Die Prüfung der erzeugten Probekörper erfolgte nach Lagerung und Konditionierung über einen Zeitraum von 24 Stunden unter Luftabschluss bei einer Temperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% an einer Zugprüfmaschine Z010, Zwick/Roell (Ulm, D), und einer Schlagprüfmaschine der Type Hit 5.5P von Zwick/Roell (Ulm, D). Mit Hilfe der ermittelten Kennwerte wurden dann Schlüsse auf das mechanische Verhalten der verschiedenen Compounds gezogen.

4.1. Projekt 1

Zur Abwicklung von Projekt 1 wurden die Versuche mit einem Spritzaggregat durchgeführt und es wurde der Versuchsplan laut Tabelle 11 verwendet. Als Grundmaterial wurde PA 66 verwendet und dieses mit verschiedenen dicken Glasfasern, einem weiteren PA sowie mit bis zu 5 verschiedenen Farbmasterbatchen versetzt. Da die Anlage aus einer Dosiereinheit mit acht Waagen besteht, musste zu bestimmten Zeitpunkten ein Materialwechsel durchgeführt werden. Ansonsten wurde der Versuchsplan automatisch durch Variation der Einstellungen an den Waagen abgearbeitet. Die Zuführung der Materialien aller acht Dosierwaagen erfolgte auf Aggregat 1.

Für jede Rezeptur wurden 14 Schuss, davon 9 als Vorlauf und 5 für Prüfzwecke, hergestellt. Gefertigt wurden mit jedem Schuss je 2 genormte Zugprüfkörper laut DIN EN ISO 527 Typ 1BA und 2 genormte Schlagprüfkörper Typ 1 laut DIN EN ISO 179.

Als Übergang werden in weiterer Folge die ersten 9 Schuss nach einem Rezepturwechsel bezeichnet.

Tabelle 11: Versuchsplan Projekt 1

		Angaben in Gewichts-%											
Waage		1		2		3	4	5	6	7	8	Gesamt	
	Versuchs-Nr.	Grundmaterial PA 66	GF 11 µm	GF 14 µm	GF 17 µm	PA A	PA B	Farbmasterbatch 1	Farbmasterbatch 2	Farbmasterbatch 3	Farbmasterbatch 4	Farbmasterbatch 5	
Erstbefüllung W1-W8	1	45,9	35	0	0	9,1	0	10	0	0	0	0	100
	2	45,9	35	0	0	9,1	0	0	10	0	0	0	100
	3	40,9	35	0	0	9,1	0	10	0	0	0	5	100
	4	23,6	35	0	0	9,1	0	10	0	14	3,3	5	100
Mat.-wechsel W 2	5	32,6	0	35	0	9,1	0	0	10	13,3	0	0	100
	6	25,9	0	35	0	9,1	0	0	10	0	20	0	100
	7	8,6	0	35	0	9,1	0	0	10	14	18,3	5	100
	8	39,9	0	35	0	9,1	0	10	0	1	0	5	100
Mat.-wechsel W 2	9	45,9	0	0	35	9,1	0	0	10	0	0	0	100
	10	32,6	0	0	35	9,1	0	0	10	13,3	0	0	100
	11	29,6	0	0	35	9,1	0	10	0	8	8,3	0	100
	12	8,6	0	0	35	9,1	0	0	10	14	18,3	5	100
Mat.-wechsel W 2, W 3	13	45,9	35	0	0	0	9,1	10	0	0	0	0	100
	14	26,6	35	0	0	0	9,1	10	0	6	13,3	0	100
	15	14,2	35	0	0	0	9,1	0	10	15	6,7	10	100
Mat.-wechsel W 2	16	45,9	0	35	0	0	9,1	10	0	0	0	0	100
	17	16,9	0	35	0	0	9,1	0	10	14	10	5	100
	18	17,7	0	35	0	0	9,1	10	0	4	16,7	7,5	100
Mat.-wechsel W 2	19	32,6	0	0	35	0	9,1	0	10	13,3	0	0	100
	20	15,7	0	0	35	0	9,1	0	10	11	16,7	2,5	100
	21	38,7	0	0	35	0	9,1	10	0	3	1,7	2,5	100
	22	19,2	0	0	35	0	9,1	0	10	5	11,7	10	100
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

Nach der Abarbeitung des Versuchsplans wurden die produzierten Probekörper konditioniert, unter Luftabschluss bei Raumtemperatur von 23 °C und Raumfeuchte von 50% rel. Luftfeuchte gelagert und am darauffolgenden Tag geprüft.

Die ermittelten Werte sind für den E-Modul in Abbildung 90 mit und in Abbildung 91 ohne Übergang dargestellt. Die Werte für die Schlagzähigkeit sind in Abbildung 92 mit und in Abbildung 93 ohne Übergang dargestellt.

Der Übergang entspricht den ersten 9 Schuss nach einem Materialwechsel. Die Darstellung mit Übergang beinhaltet diesen Vorlauf und bedeutet, dass pro Rezepturzusammenstellung 14 Probekörper geprüft und aufgetragen wurden. Im Vergleich dazu zeigt die Darstellung ohne Übergang nur Schuss 10 bis 14 nach einem Materialwechsel, und somit jene untersuchten Probekörper bei welchen die vorherigen Dosiereinstellungen keinen Einfluss mehr auf die aktuelle Rezepturzusammensetzung im Probekörper haben.

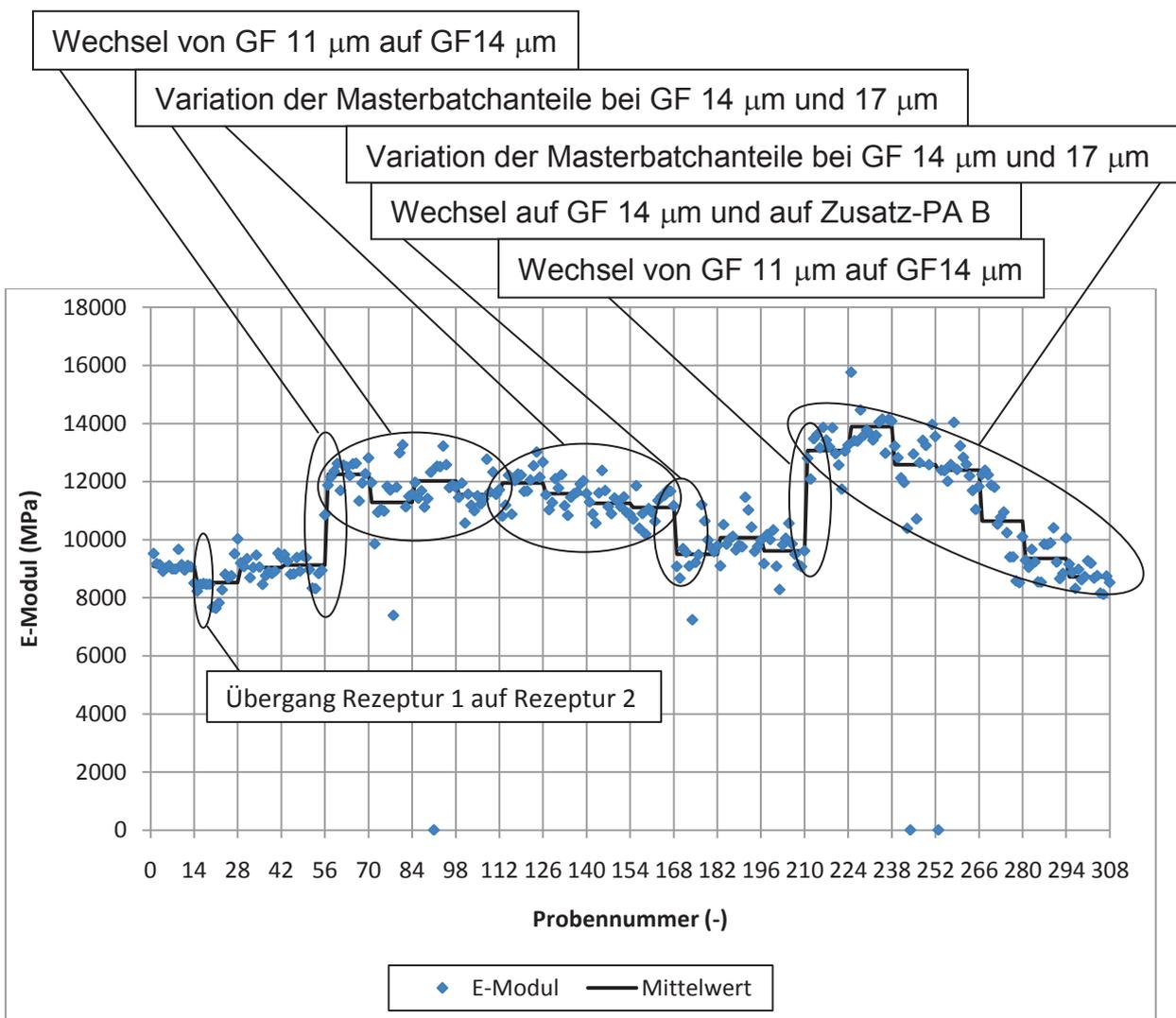


Abbildung 90: Auswertung E-Modul mit Übergang, Projekt 1

In Abbildung 90 ist der E-Modul mit Übergang über die Probenanzahl dargestellt. Klar zu erkennen ist, dass sich das E-Modul-Niveau mit jeder Änderung der Rezepturzusammensetzung verändert. Besonders markante Übergänge sind bei jedem Wechsel der Glasfaser zu sehen.

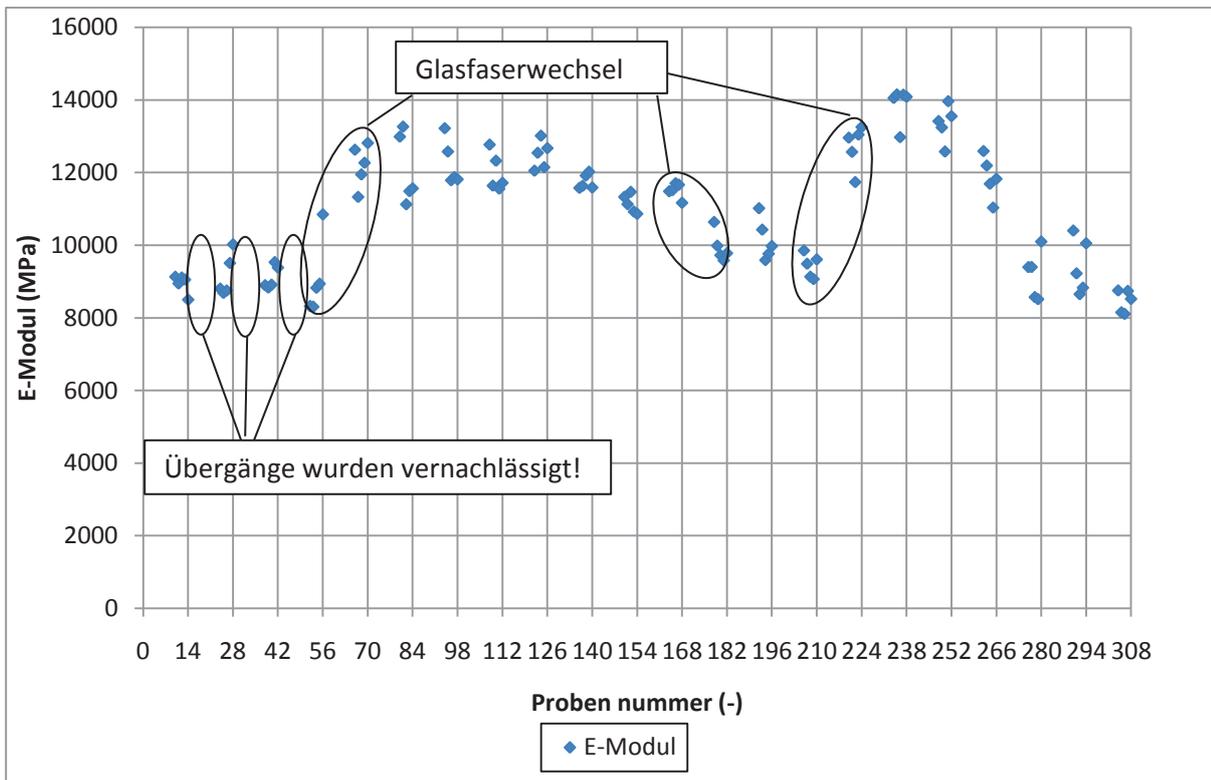


Abbildung 91: Auswertung E-Modul ohne Übergang, Projekt 1

Abbildung 91 zeigt die Auswertung des E-Moduls ohne Übergang für Projekt 1. Man erkennt sofort die unterschiedlichen E-Modul Niveaus mit jeder Rezepturänderung. Die markanten Änderungen sind mit der Änderung der Glasfaserdicke zu erklären. Die Werte der einzelnen Versuchsserien streuen um den Mittelwert mit einer maximalen Standardabweichung von $\pm 11,5\%$ und einer minimalen Standardabweichung von $\pm 1,8\%$. Dies ist ein hohe Streuung und könnte durch eine höhere Stückzahl an Vorlauf verbessern.

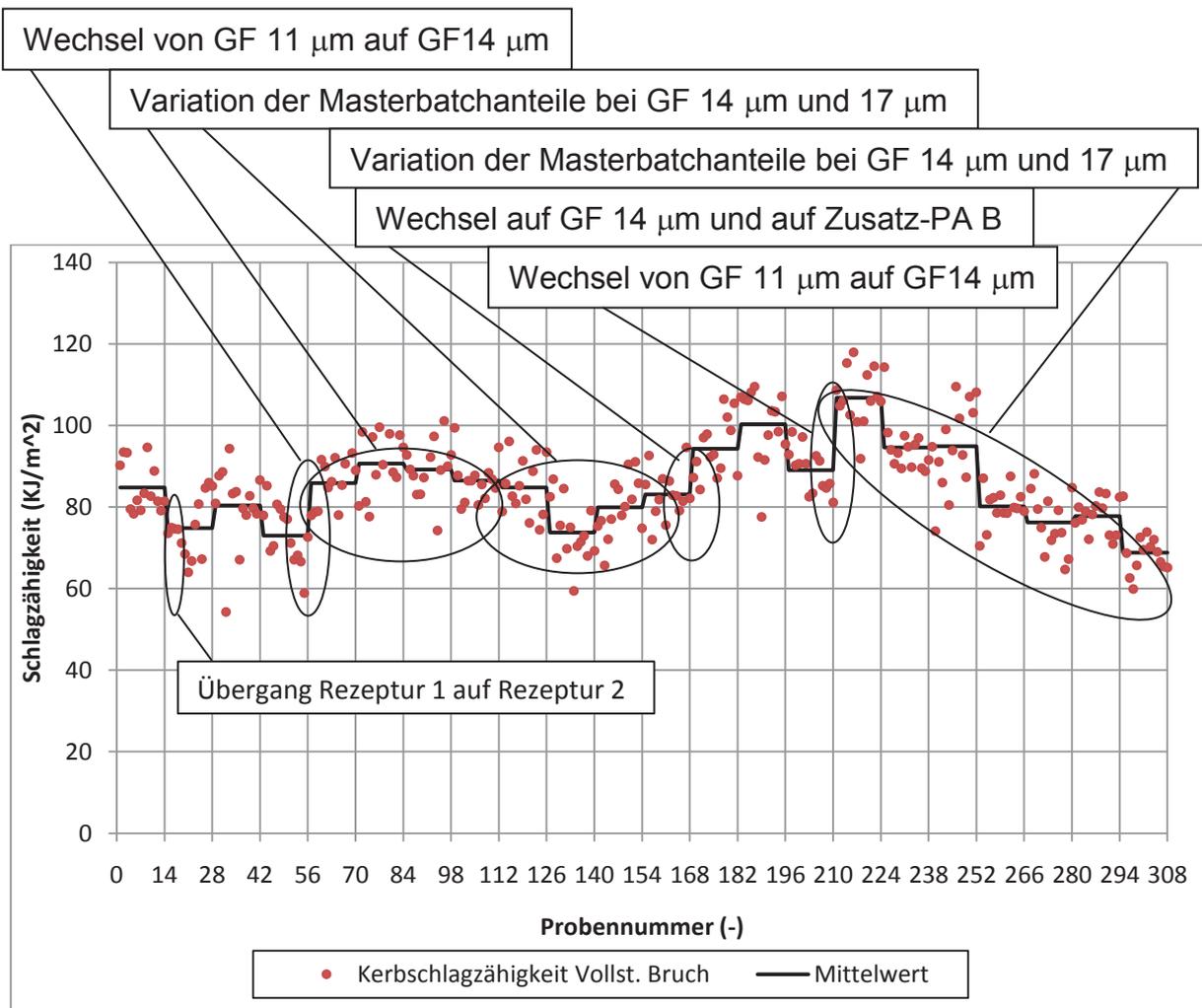


Abbildung 92: Auswertung Kerbschlagzähigkeit mit Übergang, Projekt 1

Abbildung 92 zeigt die Auswertung der Schlagzähigkeitsprüfung mit Übergang für Projekt 1. Zur Berechnung der Schlag- bzw. Kerbschlagzähigkeit wird die benötigte Energie, um eine Probe zu durchschlagen, auf den entsprechenden Querschnitt bezogen. Die die Streuung der Werte ist sehr groß. Für die Schlagzähigkeitsprüfung wäre es sinnvoll, eine höhere Anzahl an Teilen einer Prüfung zu unterziehen.

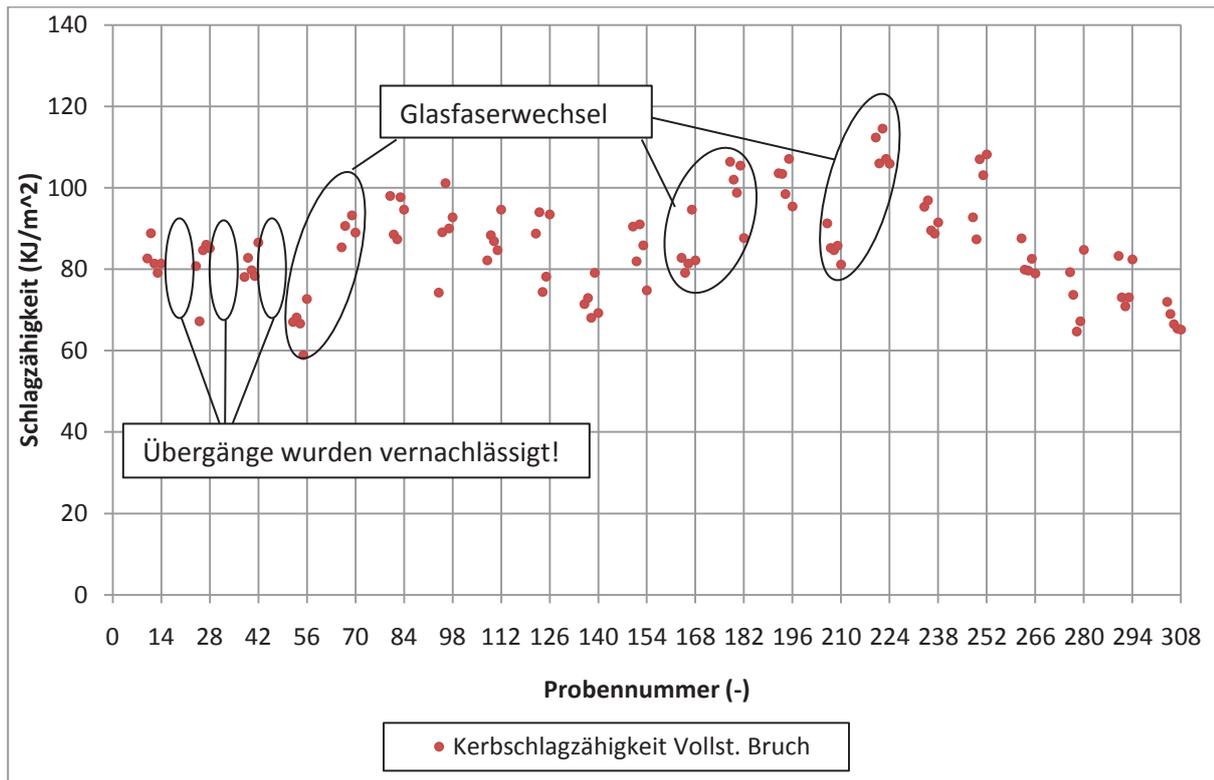


Abbildung 93: Auswertung Kerbschlagzähigkeit ohne Übergang, Projekt 1

Abbildung 93 zeigt die Auswertung der Schlagzähigkeitsprüfung ohne Übergang für Projekt 1. Es handelt sich hier ausschließlich um Messungen mit Vollbruch was auf die hohe Härte und Sprödigkeit in Folge des Glasfaseranteils zurückzuführen ist. Geprüft wurden gekerbte Proben, um die Bruchfläche immer genau an der gleichen Stelle zu haben und vergleichbare Messwerte zu erhalten. Die Werte streuen um den Mittelwert in einem großen Bereich und die maximale Standardabweichung liegt bei $\pm 11\%$ sowie die minimale Standardabweichung liegt bei $\pm 4\%$.

Der große Vorteil des Systems ist die schnelle Abarbeitung verschiedener Rezepturzusammensetzungen. Nach einer Änderung der Dosiereinstellungen ist die Veränderung innerhalb weniger Schuss im Probekörper zu erkennen.

Die zur Untersuchung herangezogenen Prüfkörper zeigen eine maximale Standardabweichung sowohl für den E-Modul wie auch für die Schlagzähigkeit von mehr als 10 %. Dies ist eine große Abweichung und zeigt, dass das System noch große Schwächen hat, welche um allgemeine Compoundieraufgaben erledigen zu können, korrigiert werden müssen.

4.2. Projekt 2

Im Projekt 2 wurden PA/ABS Blends mit ein und zwei Aggregaten an der HTS-Spritzgießmaschine hergestellt. Ebenso wurde der Blend auch am Extruder compounding und anschließend an der HTS-Spritzgießmaschine Probekörper gespritzt. Die auf drei verschiedenen Arten erzeugten Zug- bzw. Schlagprüfstäbe wurden nach einer Konditionierung von einem Tag (Lagerung unter Luftabschluss bei einer Temperatur von 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit) der Prüfung unterzogen. Ziel war es, das mechanische Verhalten der Blends durch Zug- und Schlagprüfung zu ermitteln.

PA/ABS ist ein typischer Blend aus technischen Thermoplasten und vereint die Eigenschaften der beiden Materialien. In der Literatur werden diese beiden Kunststoffe als unverträglich bezeichnet [58]. PA zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißbeständigkeit aus. Dagegen weist ABS eine hohe Schlagzähigkeit und gute Warmformeigenschaften auf.

Hier spricht man von einem Terblend, da ABS bereits ein Pfropfcopolymer aus Styrolacrylnitril (SAN) und Butadienkautschuk (BR) ist [58]. Die Kombination des Copolymers ABS mit PA6 erzielt eine wesentlich höhere Schlagzähigkeit, Rissbeständigkeit und einen E-Modul Verlauf über einen großen Temperaturbereich auf höherem Niveau als nur PA6.

Der PA/ABS-Blend wurde aus maximal fünf Komponenten hergestellt (siehe Abbildung 94 bis Abbildung 98). Vier Komponenten lagen in Granulatform vor und eine als Pulver. Die Zugabe von SAN lag in diesem Fall im einstelligen Prozentbereich und führte daher zu keiner Strukturänderung.



*Abbildung 94: ABS,
Kunststoffgranulat A1, Projekt 2*



*Abbildung 95: SAN,
Kunststoffgranulat A2, Projekt 2*



*Abbildung 96: PA6,
Kunststoffgranulat A3, Projekt 2*



*Abbildung 97: Additivmasterbatch,
Kunststoffgranulat A4, Projekt 2*



*Abbildung 98: Verträglichkeitsvermittler,
Pulver A5, Projekt 2*

Bei der Durchführung von Projekt 2 wurde der Versuchsplan laut Tabelle 12 verwendet. Von jeder Rezeptur wurden 20 Schuss produziert. Die ersten 10 wurden jeweils als Einlauf bzw. Übergang bewertet und nur bei Interesse einer Prüfung unterzogen. Die folgenden 10 Schuss wurden als Proben gewertet und immer geprüft.

Gefertigt wurden mit jedem Schuss je 2 genormte Zugprüfkörper laut DIN EN ISO 527 Typ 1BA und 2 genormte Schlagprüfkörper laut DIN EN ISO 179 Typ 1.

Tabelle 12: Versuchsplan für Projekt 2

Blend	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A-Blend	Gew. %														
A1	34	39	44	49	54	34	39	44	49	54	34	39	44	49	54
A2	5,6	2,8	0	0	0	5,6	2,8	0	0	0	5,6	2,8	0	0	0
A3	47,4	45,2	43	40,8	38,6	45,4	43,2	41	38,8	36,6	43,4	41,2	39	36,8	34,6
A4	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7
A5	10	10	10	7,2	4,4	10	10	10	7,2	4,4	10	10	10	7,2	4,4
total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Nach der Abarbeitung des Versuchsplans wurden die Probekörper einen Tag unter Luftababschluss bei Raumtemperatur und Raumfeuchte konditioniert und anschließend der Prüfung unterzogen. Die Prüfung des Übergangs wurde zusätzlich durchgeführt, um den Einfluss der Rezepturänderung auf die Eigenschaften zu ermitteln und zu sehen, wie schnell Veränderungen in den Dosiereinstellungen eine Auswirkung in den mechanischen Prüfwerten zeigen.

Die Prüfkörper wurden auf drei verschiedene Arten gefertigt:

1. Dosierung von A1 bis A5 über die Dosieranlage und Spritzgießen über Aggregat 1
2. Compoundieren mit dem Doppelschneckenextruder (DSE) und anschließendes Spritzen der Probekörper über die HTS-Maschine, Eingabe in Aggregat 1
3. Dosierung von A1, A2, A4 und A5 über die Dosieranlage und Spritzgießen über Aggregat 1 und von A3 über Aggregat 2.



Abbildung 99: Kerbschlagprüfung PA/ABS mit Übergang, Projekt 2

Abbildung 99 zeigt die Auswertung der Kerbschlagprüfung mit Übergängen für den PA/ABS-Blend. Jeweils 20 Proben sind mit einer Rezepturzusammensetzung hergestellt worden. Die ersten 10 wurden als Übergang gewertet und geprüft, um festzustellen wie schnell sich neuen Einstellungen an den Dosieraggregaten auf einstellt treffen zu, können. Klar zu erkennen ist der Unterschied in der Kerbschlagzähigkeit zwischen Voll- und Teilbruch. Der DSE zeigt ein homogenes Verhalten im Bezug auf die Unterscheidung zwischen Voll- und Teilbruch, so lag innerhalb einer Testserie entweder Teilbruch oder Vollbruch vor. Diese Homogenität konnte mit dem HTS-System nicht erzielt werden, da bei einigen Serien beide Brucharten auftraten. Bei einem Vollbruch weniger Energie aufgewendet werden muss und diese auch noch auf einen größeren Querschnitt zu beziehen ist. Ein Teilbruch deutet auf ein zäheres, elastischeres Material mit besseren Dämpfungseigenschaften hin, wobei ein Vollbruch eher auf einen härteren, spröderen Werkstoff hinweist.

An den Übergängen wird ersichtlich, dass eine Änderung in der Rezeptur nach etwa 5 Schuss im Probekörper wiederzufinden ist, was eine wesentliche Zeit-, Energie- und Materialeinsparung im Vergleich zum Compoundieren mit dem DSE bedeutet.

Abbildung 100 zeigt die Auswertung der Kerbschlagprüfung ohne Übergang für den PA/ABS-Blend. In allen Fällen zeigte der Compound aus dem DSE eine höhere Schlagzähigkeit als in den Versuchen mit dem HTS-System.

Des weiteren weisen die Probekörper, welche über ein Aggregat gefertigt wurden tendenziell ein besseres Schlagzähigkeitsverhalten auf als jene, welche über zwei Aggregate gefertigt wurden. Die Standardabweichung bei der Rezepturerstellung über ein Aggregat ist um 40 % und bei jenem über zwei Aggregate um 57 % höher als bei der Erzeugung mit dem DSE. In Extremfällen gibt es 200 % Unterschiede bei den Ergebnissen der HTS-Maschine. Die Grenze zwischen Vollbruch und Teilbruch wird von den am DSE erzeugten Probekörpern relativ gut eingehalten. Die am HTS-System produzierten Proben zeigen bei wesentlich mehr Zusammensetzungen sowohl Teilbruch wie auch Vollbruch. In der Schlagzähigkeitsprüfung erzielt der DSE wesentlich besser Ergebnisse.

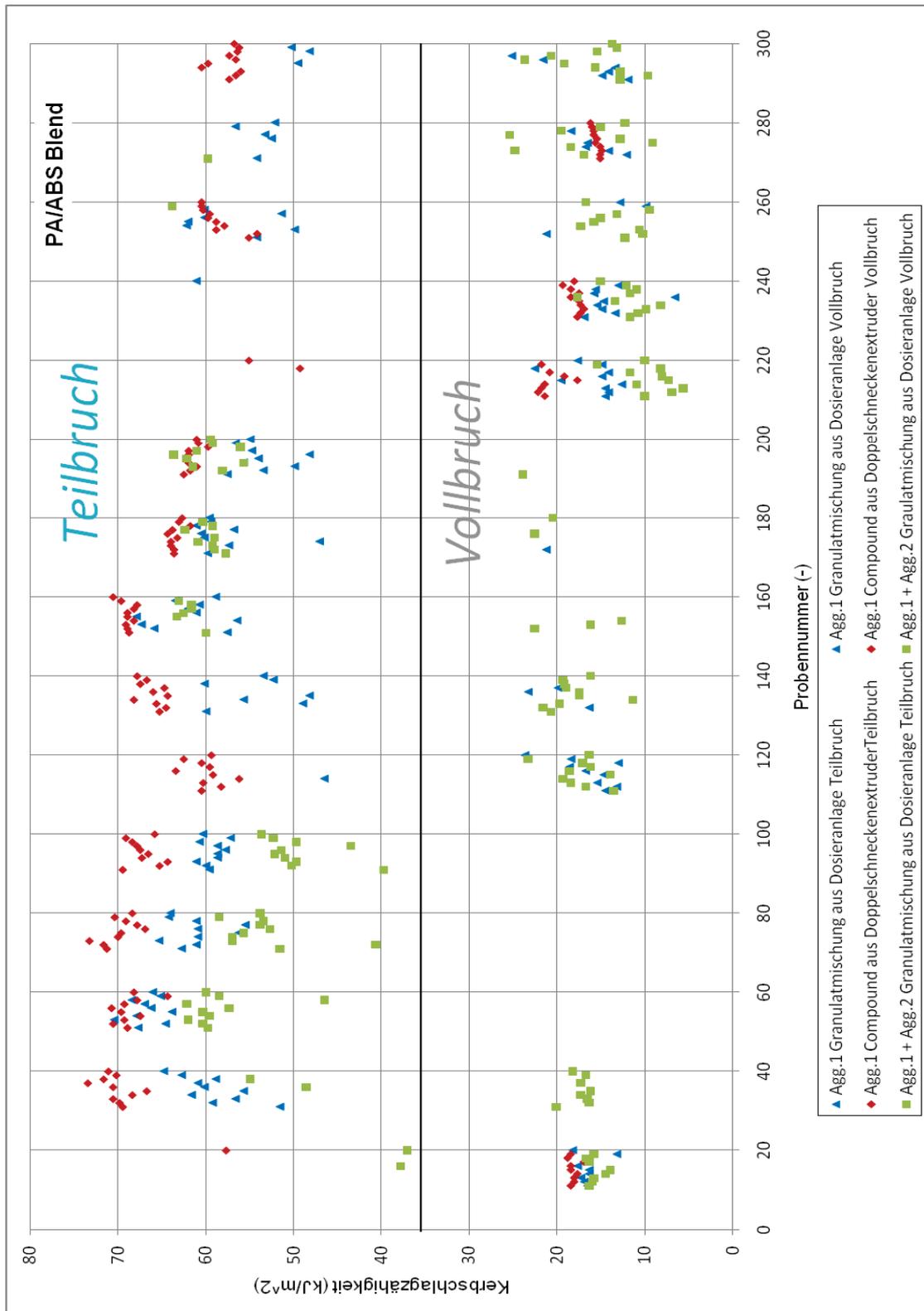


Abbildung 100: Kerbschlagprüfung PA/ABS ohne Übergang, Projekt 2

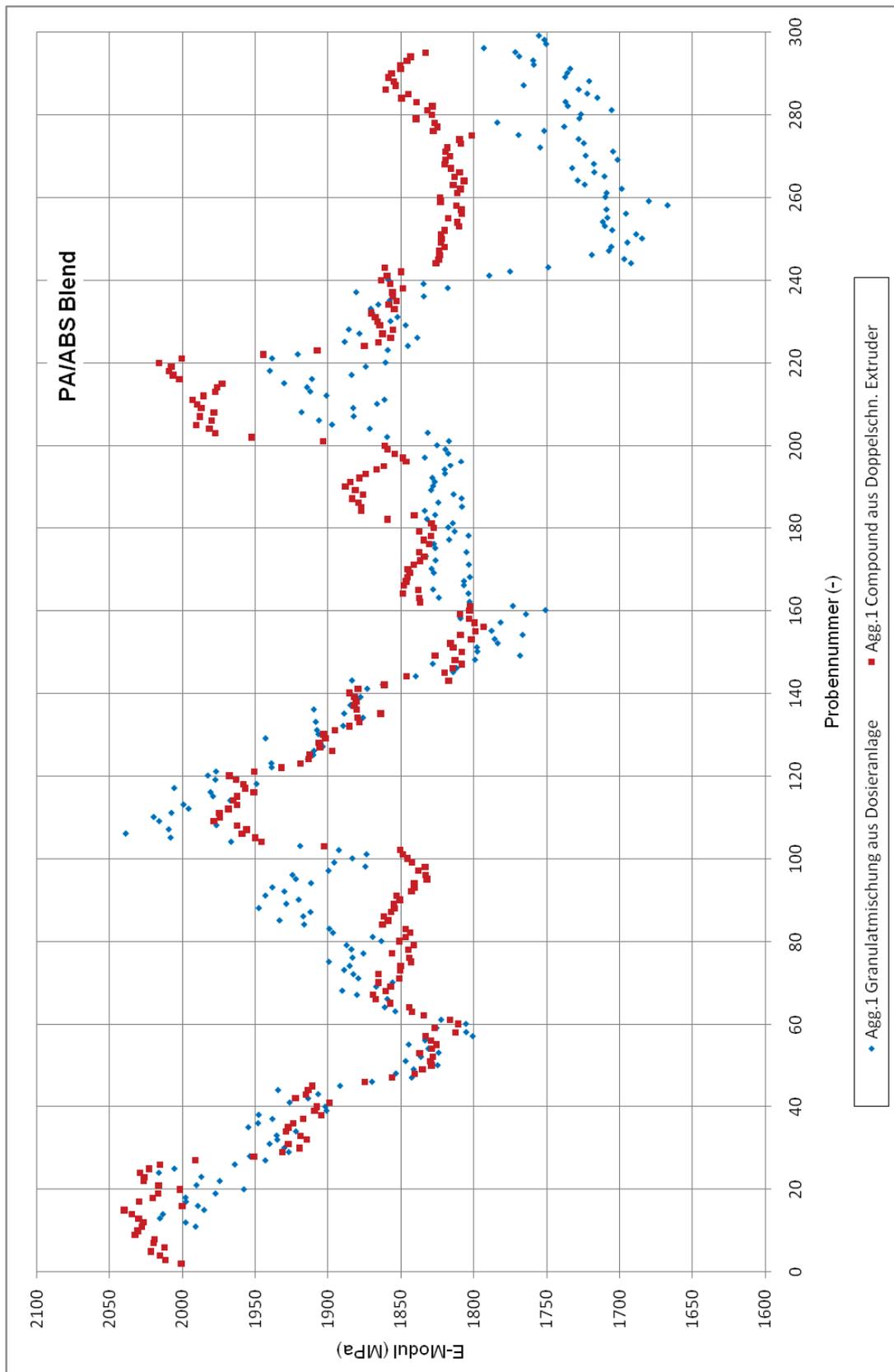


Abbildung 101: E-Modul PA/ABS mit Übergang, Projekt 2

Abbildung 101 zeigt den E-Modul mit Übergang für Projekt 2. Die Auswertung für den E-Modul wurde nur für die Fertigung über Aggregat 1 und mit dem DSE mit anschließender Probenspritzung durchgeführt, da aufgrund der begrenzten Materialmengen keine Zugprobekörper über 2 Aggregate hergestellt werden konnten. Klar zu sehen ist die Veränderung des E-Moduls mit jeder Rezepturänderung. Zumeist liegen die Werte aus beiden Herstellvarianten auf gleichem Niveau. Bei manchen Rezepturen zeigt das HTS-System sogar bessere Ergebnisse als de DSE, und in anderen wiederum etwas schlechtere. Die um 7 % geringere Mittelwert in manchen Versuchsserien ist vermutlich auf die geringere Durchmischung im Spritzaggregat mit anschließender statischer Vermischung zurückzuführen.

In Abbildung 102 ist der E-Modul für verschieden Rezepturen des PA/ABS Blends ohne Übergang dargestellt. Die Werte der Compounds, welche an der HTS-Spritzgießmaschine hergestellt wurden, liegen bei einigen Rezepturen auf annähernd gleichem Niveau wie die des DSE, und auch die Streuung liegt in diesen Fällen in ähnlichen Bereichen. Bei anderen wiederum sind die Niveau unterschiedlich und auch die Streuung der Compounds aus der HTS-Spritzgießmaschine ist in diesen Fällen deutlich höher. So weist der DSE eine relative Streuung von 0,79 % auf während das HTS-System eine relative Streubreite von 1,46 % zeigt. Aus dem Versuchsplan lässt sich aufgrund dieser Aussagen keine Systematik ableiten, also können hier die Abweichungen nicht direkt mit den Änderungen in der Rezepturzusammensetzung korreliert werden.

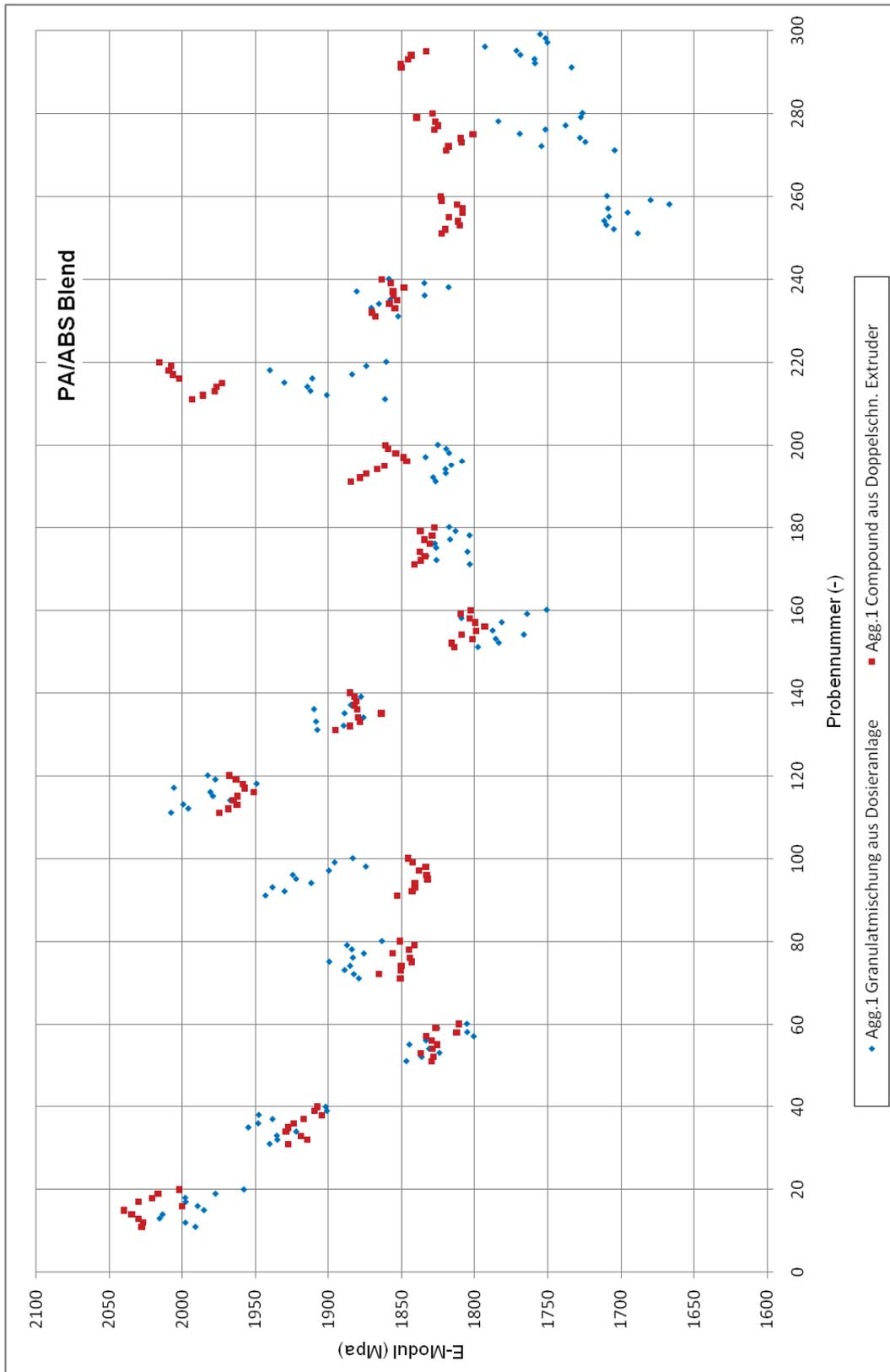


Abbildung 102: E-Modul PA/ABS ohne Übergang, Projekt 2

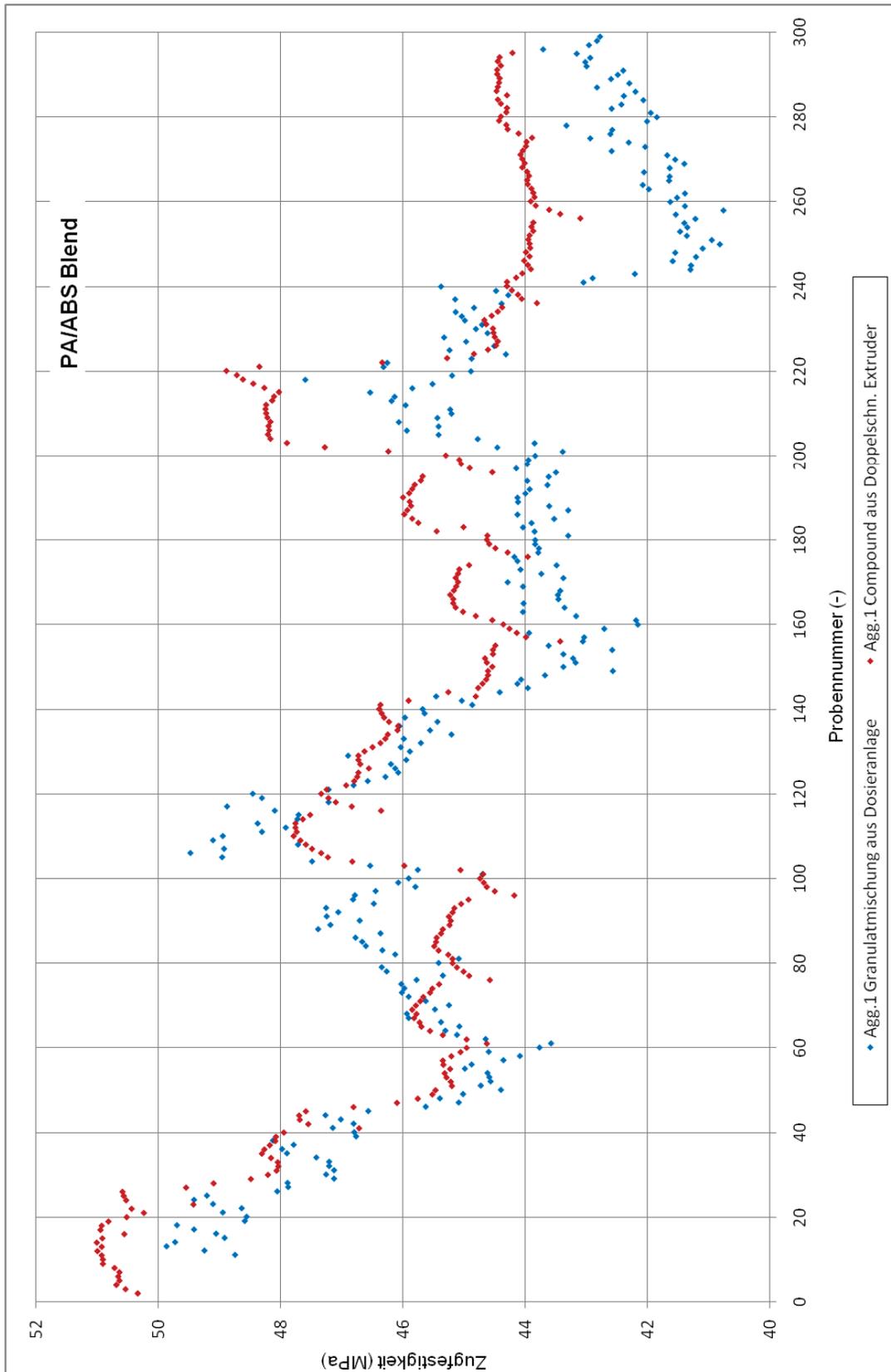


Abbildung 103: Zugfestigkeit PA/ABS mit Übergang, Projekt 2

Abbildung 103 zeigt die Zugfestigkeit für die PA/ABS Blends aus Projekt 2 mit Übergang. Die Werte des am DSE produzierten Compounds werden hier von jenem aus der HTS-Spritzgießmaschine nur bei wenigen Rezepturen erreicht. Der maximale Mittelwertunterschied liegt bei etwas über 4 %. In einigen Fällen werden jedoch mit dem HTS-System sogar um etwa 4 % höhere Zugfestigkeiten als am DSE erzielt. Die relative Streuung ist im Vergleich zum DSE deutlich, um ca. 70 %, höher.

In Abbildung 104 ist die Zugfestigkeit für die PA/ABS-Blends für Projekt 2 dargestellt. Bei einigen Rezepturen liegen Niveauabweichungen der Messwerte vom HTS-System zum klassischen Compounding vor und auch die Streubreite ist beim HTS-Compoundieren deutlich höher. Bei manchen Rezepturen liegt der HTS-Compound auf höherem Mittelwertniveau, um etwa 4 %, in anderen Fällen kann der DSE-Compound ebenfalls um etwa 4 % nicht erreicht werden. Die Streuung der Ergebnisse am DSE ist um ca. 60 % geringer.

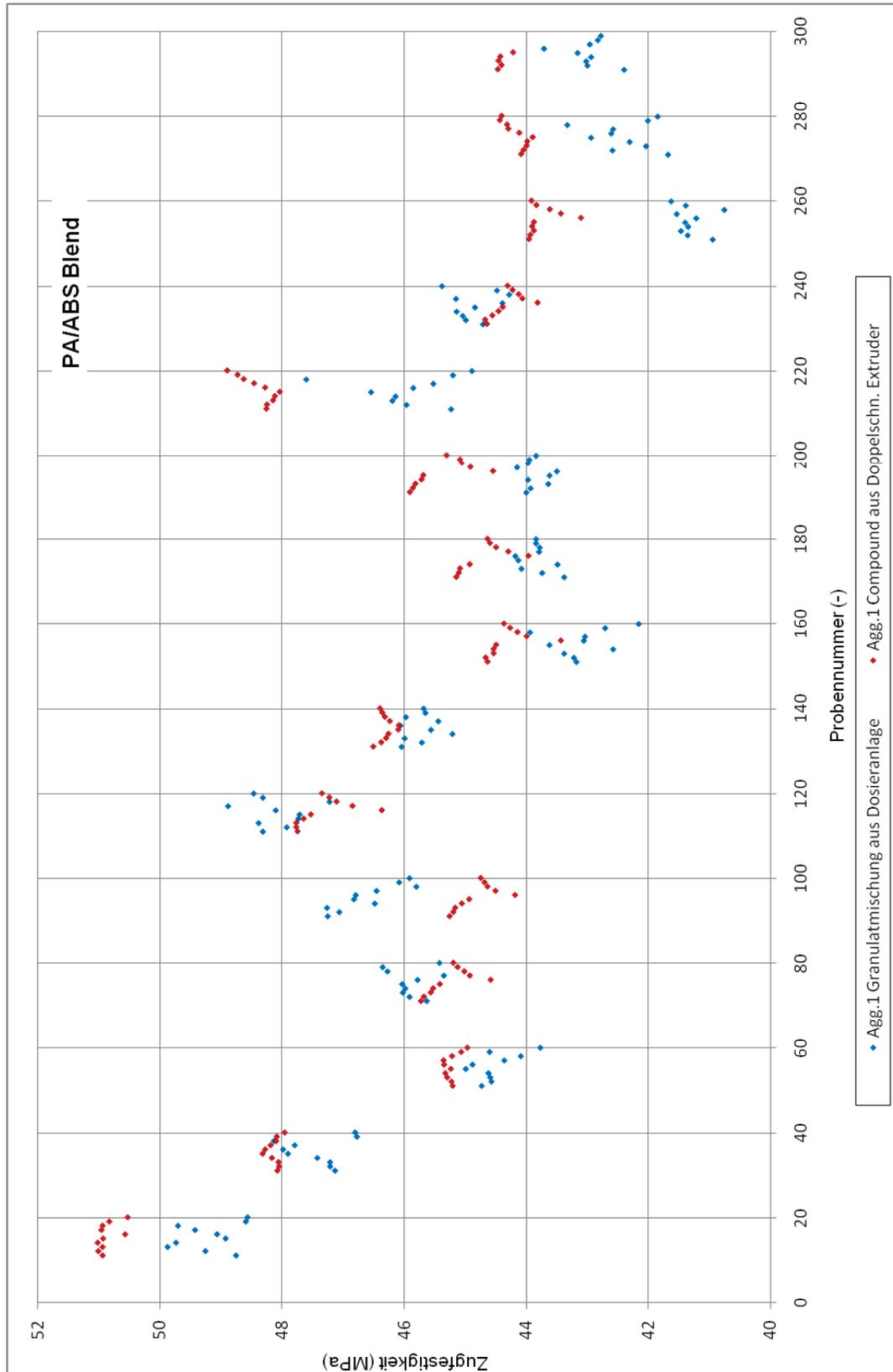


Abbildung 104: Zugfestigkeit PA/ABS ohne Übergang, Projekt 2

Die Messwerte der Prüfkörper aus dem Doppelschneckenextruder und dem HTS-System liegen bei einigen Rezepturen auf annähernd gleichem Niveau. Bei gewissen Rezepturzusammensetzungen können die Ergebnisse jene des DSE erreichen und zum Teil sogar übertreffen. In anderen Fällen ist dies wiederum nicht möglich und der HTS-Compound bleibt auf um etwa 60 % niedrigerem Niveau zu liegen.

Die Ergebnisse aus Projekt 2 zeigen, die grundsätzliche Befähigung der Maschine zur Rezepturentwicklung speziell bei Untersuchung mechanischer Kennwerte. Die Vergleichbarkeit einiger Ergebnisse des HTS-System mit jenen des DSE sprechen für das System. Abweichende Ergebnisse zeigen aber auch die Grenzen und Nachteile des Systems auf. In jedem Fall ein Vorteil sind die Zeit-, Energie- und Materialersparnis.

Die drei Varianten der Compounderzeugung- DSE, HTS-System über ein Aggregat und HTS-System über zwei Aggregate- zeigen zum Teil stark unterschiedliche Ergebnisse. Der DSE Compound zeigt sowohl in der Schlagprüfung sowie auch bei der E-Modul- und Zugfestigkeitsbestimmung zumeist höhere Werteniveaus. In den Abweichungen erzielt der DSE in allen Fällen die besten Ergebnisse. Diese Ergebnisse zeigen, dass das HTS-System im derzeitigen Zustand nicht mit dem DSE konkurrieren kann. Ein Aufgabenfeld für das die Genauigkeit des HTS-Systems ausreichen würde, könnte eine Grobabschätzung der Rezepturzusammenstellung sein und damit eine Eliminierung einer Vielzahl an irrelevanten Zusammensetzungen.

4.3. Diskussion und Ausblick

In den Projekten konnte die grundsätzliche Befähigung des Systems für den Einsatz in der Praxis dargestellt und dokumentiert werden. Ebenso wurden aber auch die Grenzen und Verbesserungspotentiale der Anlage aufgezeigt.

In Projekt 1 zeigte das HTS-System Schwierigkeiten bei der Verarbeitung von Glasfaser. Das Einbringen von Langfasern ist nicht möglich, da die Schmelze beim Durchlaufen der statischen Mischer einer starken Deformation unterworfen ist und so die Glasfasern stark geschert und dadurch zerbrochen werden. Bei der Verarbeitung höherer Glasfaseranteile >50% stößt die Maschine an ihre Grenzen. Hier kam es zu Entmischungserscheinungen durch Glasfaseransammlungen vor den statischen Mischern. In weiterer Folge führte dies auch zur Verstopfung der Kanäle. Ebenso neigen die Fasern zur Agglomeratbildung in der Engstelle des konischen Trichters, wodurch die Materialdosierung behindert wird. Dies ist mitunter bedingt durch die diskontinuierliche Förderung.

Der DSE Compound erzielt in den meisten Fällen sowohl bei der Schlagzähigkeitsmessung wie auch bei der Ermittlung des E-Moduls und der Zugfestigkeit um bis zu 70 % höhere Werte, als der HTS Compound. In einigen Rezepturzusammensetzungen liegt der HTS-Compound jedoch auf gleichem und manchmal sogar auf höherem Niveau als der DSE. Dies war bei den Versuchen in der Regel aber nicht der Fall. Die Standardabweichung des HTS-Systems war stets größer und lag im Maximum bei bis zu 70 %. Die Schwankungsbreite des HTS-Systems lag im Maximum z.B. bei der Schlagprüfung bei etwa 200 % wobei der DSE Compound in einem Schwankungsbereich von etwa 15 % lag.

Die unüblichen Streuungen zeigen, dass das System für eine zuverlässige Rezepturentwicklung nicht befähigt ist. Als alternative Arbeitsweise würde sich das System für eine Grobabschätzung der Rezepturzusammensetzungen eignen, gefolgt von einer Feinoptimierung am DSE.

Für zukünftige Projekte sollte die BTS-Software noch besser genutzt und integriert werden. Mit Hilfe weniger Daten lässt sich ein anschauliches Modell im mehrdimensionalen Raum erstellen, wodurch es möglich wird, den zur Rezepturoptimierung erforderlichen versuchstechnischen Aufwand zu minimieren. Ein

vergleichbares Modell mittels anderer Datenverarbeitungsprogramme zu erstellen würde einen erheblich höheren Aufwand erfordern.

Ebenso wäre es sinnvoll, den Automatisierungsgrad noch weiter zu erhöhen. Dies bedeutet eine direkte Übermittlung des Versuchsplans von der PDWB-Software an die Dosieranlagen, eine automatische Entnahme des Schusses nach der Fertigung, ein Abtrennen des Angusses und die Ablage der Probekörper zur Konditionierung. In weiterer Folge sollte eine automatisierte Bestückung der Prüfkassetten und die automatische Durchführung der Prüfung sowie Ermittlung der Daten und die Übertragung dieser zurück zur PDWB-Software erfolgen.

Im gleichen Zuge sollte auch die Eignung des Systems für andere Anwendungen und Anforderungen sowie Prüfmethode wie Farbrezeptierung, Flammschutz usw. untersucht werden.

5. Zusammenfassung

Ziel dieser Diplomarbeit war, das HTS-Konzept weiterzuentwickeln und die Eignung des Systems für die Praxis zu prüfen. Im Zentrum der Untersuchungen standen der E-Compounder der Firma Engel GmbH und die Zusammenführung der Schmelzeströme aus dem Horizontal- und dem Huckepackaggregat. Ebenso war eine Literaturrecherche über die geschichtliche Entwicklung des Spritzgießcompoundierens und den Einsatz von statischen Mischelementen im Spritzgießen durchzuführen.

Der e-Compounder zeichnet sich dadurch aus, dass eine bestehende 2K-Spritzgießmaschine zur schnellen Rezeptentwicklung herangezogen wird. Eine bestehende Maschine zu verwenden bedeutet einen gewissen Modifizierungs- und Optimierungsaufwand. Auf Seiten der Steuerung galt es, die beiden Aggregate achssynchron zu betreiben. Durch diese Betriebsweise sollten gleiche Einspritzverhältnisse zu jedem Zykluszeitpunkt und damit auch gleiche Verhältnisse in jedem Volumenelement der erzeugten Probekörper vorhanden sein. Dies wurde mit Hilfe eines PS-Eisenpulver-Compounds untersucht.

Zu Beginn galt es, den bestehenden Zustand im Hinblick auf die Mischungshomogenität zu ermitteln, und hierzu wurde für verschiedene Volumenstromverhältnisse sowohl für die hergestellten Probekörper wie auch für die ins Freie gespritzten Stränge der Eisengehalt über die Fließweglänge mittels Soxhlet-Extraktion analysiert. Anschließend wurde versucht, durch verzögertes Einspritzen und anschließend durch Abfahren eines Geschwindigkeitsprofils jeweils mit jenem Aggregat mit dem geringeren Dosiervolumen eine verbesserte Eisenverteilung zu erzielen. Um mögliche Einflüsse des Eisenpulvers und die dadurch entstehenden großen Viskositätsunterschiede vernachlässigen, zu können wurde alternativ Glaskugelpulver verwendet. Zur Ermittlung des Einflusses des Eisenpulvers wurde der Eisencompound über ein Aggregat bei direkter Eingabe in den Materialtrichter verarbeitet.

Die Streubreite für ein Volumenstromverhältnis von 50/50 lag bei $\pm 16,6\%$ wobei der Mittelwert um $\pm 0,5\%$ unter dem Sollwert lag. Durch Eliminierung des ersten Materials kann hier eine Verbesserung des relativen Streubereichs auf $\pm 4,1\%$ erzielt werden bei gleicher Mittelwertgenauigkeit.

Das Volumenstromverhältnis 70/30 zeigte eine für die ersten Probekörper eine relative Streuung von $\pm 12,7\%$ und eine Abweichung des Mittelwerts vom Sollwert von $\pm 7,5\%$. Hier könnte durch abtrennen des ersten Materials eine Verbesserung der relativen Streuung auf $\pm 5\%$ erzielt werden und die Sollwertabweichung würde auf $\pm 5\%$ sinken.

Für ein Volumenstromverhältnis von 90/10 wurde für die zuerst untersuchten Probekörper eine relative Streuung von $\pm 12,7\%$ erreicht werden, jedoch lag der Mittelwert $\pm 7,5\%$ unter dem Sollwert. Die relative Streubreite würde auf $\pm 3\%$ gesenkt jedoch lag die relative Abweichung des Mittelwerts bei $\pm 40\%$.

Bei Abweichung des Mittelwert vom Sollwert sollte eine Anpassung des Volumenstromverhältnisses durchgeführt werden.

Das Ausspritzen des ersten Materials ermöglicht, dass nur jenes Materials in die Kavität gelangt, bei welcher sich schon eine stabile Grenzschicht ausgebildet hat. Dies ermöglicht eine Verringerung der Streubreite wodurch der Einsatz des HTS-Systems für eine Vorauswahl an relevanten Rezepturen möglich ist. Im Anschluss sollte aber in jedem Fall die Rezepturfestlegung mittels DSE erfolgen.

Neben diesen Versuchen wurde auch das Schließverhalten der Rückstromsperre untersucht, das tatsächlich eingespritzte Volumen ermittelt und die erforderliche Kompressionsentlastung bestimmt.

Da trotz der oben beschriebenen Maßnahmen Eisen-/Glaskugelverteilung mit dem ursprünglichen Coinjektionskopf immer noch unbefriedigend war wurde dieser überarbeitet und neu gefertigt. Der neue Coinjektionskopf beinhaltete zwei Bolzenverschlüssdösen, drei Drucksensoren und eine Drossel.

Mit diesen neuen Gegebenheiten wurde wieder der IST-Zustand anhand von Probekörpern ermittelt. Bei diesem Versuch wurde die Drossel nicht verwendet und durch einen Blindstopfen ersetzt. Die Eisenverteilung unterlag einer geringeren Streuung und die Drucksensoren zeigten annähernd gleiche Druckverhältnisse in den Kanälen. Um das Messverhalten der Drucksensoren untersuchen zu können, wurde die Aufnahme bei quasi-statischem Druckzustand aufgezeichnet, und diese zeigte bei verschiedenen Druckhöhen annähernd gleiche Drücke.

Mithilfe der installierten Drossel wurden Stränge gefertigt, jedoch zeigte dies keine positiven Effekte.

Abschließend wurden noch Stränge mit zwei verschiedenen eingefärbten Polycarbonat-Chargen bei aufgebohrter Düse gefertigt und die Querschnitte über die Stranglänge auf ihren Farbgehalt untersucht. Hier zeigt sich, dass das Ausbilden der Grenzschicht eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, und dadurch die ungleichmäßigen Verteilungen erklärt werden könnten. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden mehrere Probekörper mit einer

Dosierung gefertigt, und es zeigte sich ein ähnliches Verhalten. Der erste Schuss zeigt eine uneinheitliche Eisenpulververteilung über die Fließweglänge und die folgenden eine wesentlich ausgeglichene Pulververteilung.

Zur weiteren Verbesserung der Maschine wäre es gut, den Prozessablauf so zu verändern, dass das erste Material nach der Dosierung nicht in den Spritzling gelangt sondern von diesem getrennt wird

Für die weitere Vorgehensweise wäre es sinnvoll eine Methode zu finden die das zuerst ausgespritzte Material vom restlichen trennt z.B. durch Einspritzen eine später mit dem Spritzling entformte Nebenkavität, und dadurch eine stabile Grenzschicht über den gesamten Zyklus entsteht. Ebenso zu untersuchen wäre, wie viel Material eliminiert werden müsste.

Zum besseren Verständnis der Zusammenflusssituation und der Ausbildung der Grenzschicht als Funktion des Volumenstrom- und Viskositätsverhältnisses wäre eine 3D-Fließsimulation dringend anzuraten. Ebenso wäre es sinnvoll Viskositätsmessungen an den Materialcompounds durchzuführen und auf Basis dieser eine Druckbedarfsberechnung zu machen. Die elastischen Effekte der Materialien vor allem im Zusammenfluss könnten durch eine FEM-Analyse berücksichtigt werden. Für die Weiterentwicklung des e-Compounds wären diese Untersuchungen dringend anzuraten.

Der e-Compounder weist in der Arbeitsweise mit beiden Aggregaten noch wesentliche Schwächen auf. Vermutlich lässt sich eine gänzliche Neugestaltung der Zusammenflussstelle nicht vermeiden. Um das Eindringen des Seitenstroms in den Hauptstrom bei verschiedenen Volumenstromverhältnissen zu ermöglichen sollte eine zentrale Einspeisung des Nebenkanals in axialer Richtung des Hauptkanals erfolgen. Dadurch könnte der Nebenstrom homogen in den Hauptstrom einströmen, und die Mischwirkung in den statischen Mischelementen würde ebenfalls erhöht werden.

In den Projekten zur Untersuchung der Systemgenauigkeit konnte die grundsätzliche Befähigung des Systems für den Einsatz in der Praxis dargestellt und dokumentiert werden. Ebenso wurden aber auch die Grenzen und Verbesserungspotentiale der Anlage aufgezeigt. Ermittelt wurden Schlagzähigkeit, E-Modul und Zugfestigkeit.

In den Mittelwerten erzielte bei den mechanischen Prüfungen der DSE um bis zu 70 % höhere Werte als das HTS-System. Die relative Streuung des HTS-Systems war stets größer und lag bei etwa 70 % im Vergleich zum Die maximalen Schwankungen des HTS-Systems betragen 200 % wobei der DSE Compound in einem Schwankungsbereich von etwa 15 % lag.

Das System ist in dieser Form für allgemeine Compoundieraufgaben nicht geeignet. Die unüblichen Streuungen zeigen, dass das System für eine zuverlässige Rezepturentwicklung nicht befähigt ist. Als Alternative würde sich das System für eine Grobabschätzung der Rezepturzusammensetzungen eignen, kombiniert mit einer anschließenden Feinoptimierung am DSE.

7 Abkürzungen

PA: Polyamid

PA6: Polyamid 6

PA66: Polyamid 66

ABS: Acrylnitril-Butadien-Styrol

GF: Glasfaser

DSE: Doppelschneckenextruder

HTS: High-Throughput-Screening

E-Modul: Elastizitätsmodul

BTS: Bayer Technology Services

PDWB: Product Design Workbench

OPAL: Optimization Prediction Analysis Laboratory

SBS: Styrol-Butadien-Styrol

8 Literatur

- [1] Steinbichler, G.: High-throughput-screening für die Entwicklung neuer Kunststoff-Compounds. Kaufbeuren, 1. Juli 2007
- [2] Maier, G., Stebani, J., Bacher, E.: Schneller- umfassender- effizienter „high throughput“ Methoden in der Kunststoffentwicklung. Kunststoffe (2007) 9, S. 227-231
- [3] Moneke, M.: Neue Wege der Rezepturenentwicklung, Kunststoff Trends, Juni (2006) 6, S. 40-41
- [4] Krauss Maffei: In-line compounding system cuts molding costs, lifts quality. Modern plastics international, Oktober 1993
- [5] DeVita, W., Raymond, M., Structural Foam Products, Inc.: Vorrichtung zum Formen schäumender thermoplastischer Gegenstände. Patent Nr.: DT2228969, 11. Januar 1973
- [6] Maiocco, H.L., Beloit Corp., Beloit, Wis.: Apparatus for dispensing colorant in plasticized thermoplastic material. Patent Nr.: US3817675, 18. Juni 1974
- [7] Matsuoka, J.T., Intercole Automation, Inc.: Vorrichtung zum Mischen und Fördern von Spritzgußmaterialien. Patent Nr.: DE2432034A1, 23. Januar 1975
- [8] Wallace, C.W., Koenig, H.A., Standard Oil Company: Method for injection molding articles wherein additives are added in selective portions. Patent Nr.: US4255367, 10. März 1981
- [9] Gaspar, E., Brunel University: Forming articles from composite materials. Patent Nr.: WO86/06321, 2. Mai 1986
- [10] Feist, N., Battenfeld Maschinenfabriken GmbH: Vorrichtung zum Dosieren von Reaktionsgemischen. Patent Nr.: DE3616463, 19. November 1987
- [11] Blatz, P.S., Richardson, P.N., Subramanian, P. M., E. I. du Pont de Nemours and Company: Direct fabrication. Patent Nr.: US5130076, 14. Juli 1992
- [12] Truckenmüller, F.: Vorrichtung zur Herstellung von Formteilen aus plastifizierbarem Material und faserförmigen Einlagen. Patent Nr.: DE4236662, 6. Mai 1993

-
- [13] Hara, T., Matsumoto, M., Usui, N., Matubara, S, Sumitomo Chemical Company Ltd.: Method for producing molded article of fiber reinforced thermoplastic resin. Patent Nr.: US5275776, 4. Januar 1994
- [14] Scheuring, B., Häring, E., Schwendemann, D., Krupp Werner & Pfleiderer GmbH: Method of preparing filled modified and fiber reinforced thermoplastics and twin screw extruder for putting the method into practice. Patent Nr.: US6419864, 16. Juli 2002
- [15] Hawley, R.C., Moore, Hansen & Summer: Resin and fiber compounding process for molding operations. Patent Nr.: US20040124556, 1. Juli 2004
- [16] Lustiger, A., Valentage, J., Exxonmobil Research and engineering company: In-line compounding and molding process for making fiber reinforced polypropylene composites. Patent Nr.: US20060264557, 23. Nov 2006
- [17] Schrenk, W.J., Shastri, R.K., Roehrs, H.C., Ayres, R.E., The Dow Chemical Company: Method for producing injection molded multilayer articles. Patent Nr.: US5202074, 13. April 1993
- [18] Eckhardt, H., Plank, H., Bleier, H., Battenfeld GmbH: Verfahren zum Spritzgießen von aus mindestens zwei unterschiedlichen Schichten bestehenden Gegenständen. Patent Nr.: DE4414258, 26. Oktober 1995
- [19] Jaroschek, C., Steger, R., Nesch, W., Gehring, A., Bourdon, K., Ferromatik milacron Maschinenbau GmbH: Apparatus for the sandwich method of injection molding. Patent Nr.: US5443378, 22. August 1995
- [20] Eckhardt, H., Dedeken, R., Ehrhrit, J., Hill, K.H., Battenfeld GmbH: Vorrichtung zur Herstellung von Kunststoff-Formteilen aus mindestens zwei unterschiedlichen Kunststoff-Materialien. Patent Nr.: DE19624346, 26. Februar 1998
- [21] Gosdin, M., Battenfeld GmbH: Verfahren zum Spritzgießen eines Formteils aus mindestens zwei spritzgießfähigen Materialien. Patent Nr.: DE19625062, 5. Februar 1998
- [22] Thomson, J., Cooper & Dunham LLP: Apparatus for molding multilayered articles. Patent Nr.: US 20020041912, 11. April 2002
- [23] Mortazavi, A., Husky injection molding systems Ltd.: compounding molding system, amongst other things. Patent Nr.: WO2008022429, 28. Februar 2008
-

-
- [24] Sarabi, B., Jüblicher, K.H., Alberts, H., Tischer, W., Bayer AG: Verfahren zur Herstellung von Formkörpern. Patent Nr.: DE4443153, 13. Juni 1996
- [25] Wortberg, J., Neumann, M.: Verfahren und Vorrichtung zur Kopplung kontinuierlicher Plastifizierung mit zyklischer diskontinuierlicher Schmelzeausstragung. Patent Nr.: DE19715229, 15. Oktober 1998
- [26] Bleier, H., Kukla, C., Battenfeld GmbH: Vorrichtung zum Plastifizieren und Einspritzen von thermoplastischer Schmelze. Patent Nr.: DE19724346, 24. Dezember 1998
- [27] Ehrhrit, J., Hill, K.H., Eckardt, H., Battenfeld GmbH: Verfahren und Vorrichtung zum Spritzgießen von aus mindestens zwei unterschiedlichen Materialien bestehenden Kunststoffgegenständen. Patent Nr.: DE19808620, 8. April 1999
- [28] Stüssel, B., Bammann, H., Bammann, W., Exori-Import-Export Gesellschaft mit beschränkter Haftung & Co. KG: Formkörper sowie Verfahren zur Herstellung von Formkörpern. Patent Nr.: EP0960712, 1. Dezember 1999
- [29] Steinbichler, G., Ebenhofer, H., Engel GmbH: Einrichtung zum Einspritzen eines aus mindestens zwei Komponenten bestehenden Kunststoffes in eine Form. Patent Nr.: EP0904927, 31. März 1999
- [30] Mold-Masters Ltd.: Heißkanalverteiler für eine Spritzgußeinrichtung. Patent Nr.: DE19860797, 6. Juli 2000
- [31] Eckhardt, H., Ehrhrit, J., Hill, K.H., Battenfeld GmbH: Verfahren und Vorrichtung zum Spritzgießen von Formteilen. Patent Nr.: DE19902990, 18. August 2000
- [32] Putsch, P., Intrafico Intercontinental Trade & Finance Co. Establ.: Compounding injection molding combined process. Patent Nr.: US6071462, 6. Juni 2000
- [33] Seta, K., Takeda, T., Merata Manufacturing Co., Ltd.: Thermoplastic resin injection molding machine. Patent Nr.: EP1013397, 28. Juni 2000
- [34] Clock, J.B., Frappier, R.L., Kathryn A, Delphi Technologies, INC.: Twin screw compounding/injection molding apparatus and process, Patent Nr.: US20030021860, 30. Januar 2003
- [35] Zimmet, R., Zwiesele, J., Steinherr, T., Krauss-Maffei Kunststofftechnik GMBH: Compounder-type injection molding machine. Patent Nr.: US20030075821, 24. April 2003
-

-
- [36] Wohlrab, W., Krauss-Maffei Kunststofftechnik GmbH: Spritzgießcompounder. Patent Nr.: DE10156522, 5. Juni 2003
- [37] Kamps, T., Wortberg, J., Eberlein, W., Himmel, S., Siemens AG: Injection moulding machine. Patent Nr.: WO2007031377, 22. März 2007
- [38] Ujma, A., Juaristi-Tello, E., Husky injection molding systems Ltd.: Apparatus and methods for active mold decompression & melt accumulation in shooting pot reservoir of an injection molding machine. Patent Nr.: US20080111265, 15. Mai 2008
- [39] Schlummer, C., Habibi-Naini, A., Francis C., Hand, Esq.: Method for the manufacture of a molding composition. Patent Nr.: US20080067719, 20. Mai 2008
- [40] Boucher, D.F., Sakiadis, C.C., E.I. du Pont de Nemours Company: Fluid flow inverter. Patent Nr.: US3128794, 14. April 1964
- [41] Harder, R.E., The Dow Chemical Company: Interfacial surface generator. Patent Nr.: US3195865, 20. Juli 1965
- [42] Harder, R.E., The Dow Chemical Company: Interfacial surface generator. Patent Nr.: US3404869, 8. Oktober 1968
- [43] Harder, R.E., Dow Badische Company: Interfacial surface generator. Patent Nr.: US3583678, 8. Juni 1971
- [44] Grout, K.M., Devellian, R.D., Kenics Corporation: Dispersion producing method. Patent Nr.: US3704006, 25. Januar 1971
- [45] Huber, M., Sulzer Chemtech : Mixing apparatus and method. Patent Nr.: US3785620, 15. Januar 1974
- [46] Cunningham, A.D., Cunningham Industries Inc.: Static mixer for flowable materials, and related method. Patent Nr.: US4027857, 7. Juni 1977
- [47] Er Ming, Y., Kowloon, K.T., Static mixers in an injection nozzle. Patent Nr.: EP0987091, 22. Februar 2000
- [48] Signer, A., Sulzer Chemtech: Vorrichtung zum Homogenisieren von hochviskosen Fluiden. Patent Nr.: EP0646408, 5. April 1993
-

-
- [49] Baird, G.D., Sukhadia, A., Virginia Polytechnic Institute & State University; Virginia Tech Intellectual Properties, Inc., Center for Innovative Technology: Mixing Process for generating in-situ reinforced thermoplastics. Patent Nr.: US5225488, 6. Juli 1993
- [50] Salamon, B.A., Donald, R.J., The Dow Chemical Company: In-runner polymer melt mixer. Patent Nr.: US5677462, 18. November 1997
- [51] Davis, B., Gramann, P.J., Osswald, T.A., The Madison Group: Static mixer head. Patent Nr.: WO9944731, 5. März 1999
- [52] Wilken, K., Tetra Laval Holdings & Finance S.A.: Static mixer. Patent Nr.: US20080038425, 14. Februar 2008
- [53] Keller, W.A., Medmix Systems AG: Static mixer. Patent Nr.: US20080056065, 6. März 2008
- [54] Gerhard, W., Becker, B., Carlowitz, Dietrich Braun: KunststoffHandbuch, Band1 S. 328
- [55] Gobrecht, J.: Werkstofftechnik-Metalle 2.Auflage 2006
- [56] Bacher, E.: Combinatorial Compounding – Ein neuer Weg der Rezepturentwicklung. Kunststoff Trends (2008) 5
- [57] Müller, M, RWTH Aachen, 2001-2005, www.chempage.de/lexi/soxhlet.htm
- [58] R.W. Lang: Skriptum zu Physik und Werkstoffkunde der Kunststoffe, Institut für Werkstoffkunde und -prüfung der Kunststoffe, Kapitel V. Polymerlegierungen, Montanuniversität Leoben, 2002

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Dr. Bacher und Herrn DI Bäck sowie Herrn Prof. Friesenbichler für die Betreuung meiner Diplomarbeit bedanken. Ebenso gilt mein Dank auch der Engel GmbH insbesondere Herrn Prof. Steinbichler und der Polymaterials AG, Herrn Dr. Stebani und Herrn Dr. Mayer für die Vergabe des Themas und die Unterstützung in der Durchführung. In diesem Sinne gilt mein Dank auch Herrn Prof. Holzer und dem Institut für Kunststoffverarbeitung. Ein weiterer Dank gilt allen Kollegen der Polymaterials AG und der Engel GmbH für das angenehme Arbeitsklima und die konstruktive Zusammenarbeit.

Ein mindestens ebenso großer Dank gilt meinen Eltern Franz-Karl und Marianne Brunmayr, meiner Familie und meiner Freundin für den Rückhalt und die Unterstützung im Laufe meiner ganzen Ausbildung.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei meinen Freunden, Studienkollegen und sonstigen Wegbegleitern für die schöne Studienzeit.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre 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.

Affidavit

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

Datum

Unterschrift