

Verschleißuntersuchung an Schneckenelementen eines gleichläufigen, dichtkämmenden Doppelschneckenextruders

Technische Universität Dortmund
Fakultät Maschinenbau
Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Inhaber: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann

Fachwissenschaftliche Projektarbeit

von
Felix Brall
Matrikelnummer: 193683

Ausgegeben am: 28. April 2023
Eingereicht am: 20. Oktober 2023
1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann
2. Prüfer: Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Reiner Zielke
Betreuerin: M.Sc. Julia Urbanczyk
Externer Betreuer: M.Sc. Alexander Thewes

Abstract

In der vorliegenden Arbeit wurden die Verschleißformen in einem gleichläufigen, dichtkämmenden Doppelschneckenextruder, welche bei der Extrusion mit Füllstoffanteilen, bis zu 80 Gewichtsprozent auftreten, untersucht und schriftlich festgehalten. Die zu untersuchenden Bauteile sind Fördererlemente, Knetblöcke und Einschraubdüsen. Sie sind aus zwei verschiedenen Werkstoffen hergestellt, jedes Bauteil liegt in doppelter Ausführung vor, einmal aus jedem Werkstoff gefertigt. Pro Extrusion werden nur Bauteile des gleichen Werkstoffes eingesetzt. Die Extrusion verläuft bei beiden Werkstoffen immer unter den gleichen Parametern und Bedingungen ab. Die Werkstoffe sind Saramet10 und Saramet26 aus der Gruppe der pulvermetallurgischen Stähle.

Zur Bestimmung der Verschleißformen werden die Bauteile vor und nach den Versuchen an festgelegten Messpositionen vermessen. Bei den Fördererlementen und Knetblöcken wird der radiale Abtrag in Form von Höhendifferenzen und breiter werdenden Stegen vermessen, bei den Einschraubdüsen wird der Einlauf- und Auslaufdurchmesser und das Gewicht vor und nach der Extrusion verglichen. Anschließend werden Aufnahmen von der Oberfläche der Bauteile gemacht und mit Oberflächenaufnahmen von nicht in der Extrusion eingesetzten Bauteilen, verglichen.

Die Auswertung der Messungen und Aufnahmen zeigt, dass die hauptsächlich auftretende Verschleißform, der Abrasionsverschleiß ist. Der größte Materialabtrag findet dabei auf den Stegen der Fördererlemente und der Knetblöcke statt. Bei den Einschraubdüsen vergrößert sich der Durchmesser auf der Eintrittsseite stärker als auf der Austrittsseite. Zusätzlich zum Abrasionsverschleiß kann ein Korrosionsverschleiß überlagern, welcher die Abrasion verstärkt. Diese Verschleißform ist nicht mit einer optischen Auswertung durch Aufnahmen nachzuweisen, jedoch deutet das Werkstoffverhalten der beiden Stähle darauf hin. In den Bereichen, wo Korrosion auftreten kann, schützt der Saramet26 besser vor Verschleiß, dieser hat einen besseren Korrosionsschutz auf Grund eines hohen Chromanteils. Den größeren Schutz vor reiner Abrasion bietet der Saramet10.

Die Verschleißuntersuchungen zeigen, dass nur das Fertigen von Bauteilen aus verschleißschützenden Werkstoffen nicht ausreicht. Um einen besseren Verschleißschutz zu erhalten, müssen die betroffenen Bauteiloberflächen durch Beschichtungen so modifiziert werden, dass sie vor allem der Abrasion entgegenwirken.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und aktueller Wissensstand der Forschung	2
2.1 Extrusion und Extruderbauformen	2
2.2 Verschleiß	7
2.2.1 Abrasion in Doppelschneckenextrudern	9
2.2.2 Adhäsion in Doppelschneckenextrudern	10
2.2.3 Korrosiver Verschleiß in Doppelschneckenextrudern.....	11
2.3 Pulvermetallurgische Stähle.....	12
3. Extruderversuche am SKZ	14
4. Ziel der Arbeit	17
5. Aufbau der Werkstoffe	18
5.1 Präparation von Saramet10- und Saramet26-Proben	18
5.2 Optische Gefügeuntersuchung	19
6. Optische Auswertung von eingesetzten Bauteilen	20
6.1 Aufbau und Ablauf der optischen Messung.....	20
6.2 Ergebnisse der optischen Auswertung.....	20
6.2.1 Fördererelemente	20
6.2.2 Knetblöcke	24
6.2.3 Einschraubdüsen.....	26
7. Wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse	27
7.1 Fördererelemente.....	27
7.2 Knetblöcke	30
7.3 Einschraubdüsen.....	30
7.4 Vergleich der Werkstoffe bezüglich ihres Verschleißschutzes.....	31

8. Zusammenfassung	33
9. Ausblick.....	35
10. Literaturverzeichnis	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Drei-Zonen-Schnecke (Hopmann et al. 2021, S. 99)	3
Abbildung 2.2: schematischer Aufbau eines Extruders (Hopmann et al. 2021, S. 99)	4
Abbildung 2.3: Einteilung der Extruder nach Zylinderbauart (Hopmann et al. 2021, S. 100) ..	5
Abbildung 2.4: Darstellung eines tribologischen Systems (Kohlgrüber 2016, S. 621) 1 Grundkörper, 2 Gegenkörper, 3 Zwischenstoff, 4 Umgebungsmedium.....	8
Abbildung 2.5 Zonen eines Doppelschneckenextruders mit Druck- und Temperaturverlauf (Kohlgrüber 2016, S. 621).....	9
Abbildung 3.1: Aufbau Extruderwellen.....	14
Abbildung 3.2: Messposition Fördererelemente	15
Abbildung 3.3: Messposition Fördererelemente	16
Abbildung 3.4: Messprinzip der Fördererelemente und Knetblöcke.....	16
Abbildung 5.1: Gefüge von Saramet 10 (links) und Saramet 26 (rechts).....	19
Abbildung 6.1: FE-Stirnfläche Zulaufseite	21
Abbildung 6.2: Ausbruch- FE Saramet26, von vorne (links) & von oben (rechts).....	21
Abbildung 6.3: FE vor KBE - seitliche Stegaufnahmen M4.....	22
Abbildung 6.4: Stegkante und Ausbruch	23
Abbildung 6.5: FE-Stirnflächen Zulaufseite Saramet10 (links) und Saramet26 (rechts).....	23
Abbildung 6.6: FE vor Düse - seitliche Stegaufnahmen M2 Saramet10 (links) und Saramet26 (rechts).....	24
Abbildung 6.7: KBE-Steg M5, Referenz (oben) & eingesetzt (unten), Saramet10 (links) & Saramet26 (rechts)	25
Abbildung 6.8: KBE-Messpunkt M15, Saramet10 Referenz (links) und eingesetzt (rechts)..	26
Abbildung 6.9: Einlaufdurchmesser der Einschraubdüsen	26
Abbildung 7.1: Vergleich der Kanten vom eingesetztem (rechts) und Referenz-Fördererelement (links)	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht Doppelschneckenextruderbauformen (Greif et al. 2018, S. 53).....	6
Tabelle 2.2: Zusammensetzung der PM-Stähle (Saar Pulvermetall GmbH 2023, S. 3–4)	13
Tabelle 3.1: Prozessparameter	15
Tabelle 5.1: Übersicht über die Schleif- und Poliervorgänge	18
Tabelle 6.1: Stegkantenbreite	23
Tabelle 6.2: Mittelwerte der KBE-Steg-Abmessungen	24
Tabelle 7.1: Messwerte der Bauteile bei acht Stunden Einsatz und aus den Ergebnissen von null und dreizehn Stunden interpolierte Werte (*)	32

Liste der verwendeten Abkürzungen

FE	Förderelement
KBE	Knetblock
PM	Pulvermetallurgie
Gew.-%	Gewichtsprozent
GL	Gleichlauf
GGL	Gegenlauf
M	Messpunkt
D	Durchmesser
SKZ	Das Kunststoff-Zentrum
MW	Mittelwert

1. Einleitung

Doppelschneckenextruder haben nicht nur die Aufgabe, Kunststoffgranulate oder -pulver aufzuschmelzen und eine Form zu geben. Kaum ein Polymerbauteil wird ohne die Zugabe eines Zusatzstoffes gefertigt. Sie verbessern die mechanischen, chemischen und optischen Eigenschaften der Kunststoffe, indem sie z.B.: durch Einarbeitung von Glasfasern verstärken, durch Einarbeitung von Pigmenten färben oder durch Einmischen von Stabilisatoren die chemische Beständigkeit erhöhen. Demnach ist neben dem Aufschmelzen des Kunststoffgranulates oder -pulvers, das Zumischen von Additiven und Füllstoffen eine wesentliche Aufgabe eines Doppelschneckenextruders (Kohlgrüber 2016, S. 4).

Durch die Herstellung hochgefüllter Kunststoffe unterliegen die Extruder erhöhtem Verschleiß. Die entstehenden Kosten setzen sich nicht nur aus der Wiederbeschaffung von Ersatzteilen, sondern auch aus Umbaukosten, Produktionsausfällen und mangelnder Produktqualität zusammen. Um dem Verschleiß entgegenzuwirken ist es notwendig, die betroffenen Bauteile des Extruders, meist die Extruderwellen gegen den Verschleiß zu schützen. Realisieren lässt sich dies in dem die verschleißgefährdeten Bauteile aus Werkstoffen gefertigt werden, welche gegen verschiedene Arten von Verschleiß schützen. Auch lassen sich die Oberflächen der Bauteile modifizieren, sodass Füllstoffe oder Additive die Einsatzdauer der Bauteile nicht verkürzen. Alle Maßnahmen zum Verschleißschutz setzen jedoch voraus, dass die auftretenden Verschleißformen bekannt sind. Durch die vielseitigen Anwendungen können Korrosion, Abrasion und auch Adhäsion an unterschiedlichen Stellen im Extruder auftreten, egal ob durch Begleitstoffe im Kunststoffgranulat oder durch die Zugabe von Füllstoffen und Additiven. Um Ihnen entgegenwirken zu können ist es notwendig, die Verschleißformen lokal in der Maschine zu orten, erst dann kann der Verschleiß durch geeignete Werkstoffsysteme verringert werden (Kohlgrüber 2016, S. 619–620).

2. Grundlagen und aktueller Wissensstand der Forschung

2.1 Extrusion und Extruderbauformen

Bei der Aufbereitung von Rohpolymeren zu einer verarbeitbaren Formmasse und bei der Verarbeitung der Formmasse zu Halbzeugen oder fertigen Produkten, durchlaufen nahezu alle Kunststoffe einmal einen Extruder (Mennig 2007, S. 445). Bei der Extrusion werden die Rohpolymere, welche als Pulver oder Granulat vorliegen, aufgeschmolzen und in eine neue Form gebracht. Damit zählt die Extrusion zu den urformenden Verfahren (Mennig 2007, S. 98). Extruder haben neben dem Aufschmelzen und der Formgebung noch weitere Funktionen, z. B.: das Entgasen und Homogenisieren der Schmelze und das Zumischen von Additiven und Füllstoffen. Polymere werden selten als reine Stoffe eingesetzt, da durch Additive und Füllstoffe die Verarbeitbarkeit, die chemischen und mechanischen Eigenschaften und die Umwelt- und Alterungsbeständigkeit verbessert werden können (Baur et al. 2022, S. 755). Additive sind z.B.: Gleitmittel, Farbmittel, Weichmacher und Flammschutzmittel. Ab einer Zudosierung von 5 Gew.-% werden Additive Füllstoffe genannt. Füllstoffe dienen als Streckmittel zur Kosteneinsparung und verbessern z. B.: die Verarbeitbarkeit, Steifigkeit und elektrische Leitfähigkeit, sowie die Festigkeit. Manche Füllstoffe erfüllen dabei zusätzlich die Funktionen von Additiven. Dabei können sie die Formen von Kugeln, Quadern, Plättchen, usw. haben (Baur et al. 2022, S. 769–770).

Ein Extruder setzt sich aus vielen verschiedenen Bauteilen zusammen (Abbildung 2.2). Der Trichter hat die Aufgabe, das Ausgangsmaterial dem Extruder gleichmäßig zuzuführen. Werden dem Polymer bei der Extrusion noch Additive oder Füllstoffe hinzugegeben, ist noch ein weiterer Trichter an späterer Stelle zugeschaltet. Rieseln die Rohpolymere, oder Füllstoffe schlecht, ist der Trichter mit einer Rühr- oder Fördereinrichtung ausgestattet (Hopmann et al. 2021, S. 99).

Die zugeführten Rohpolymere werden von der Extruderschnecke eingezogen, gefördert, aufgeschmolzen und die Schmelze anschließend homogenisiert. Die Drei-Zonen-Schnecke (Abbildung 2.1) ist die am meisten verbreitete Bauart von Extruderschnecken und wird in Einschneckenextrudern eingesetzt. An ihr kann die Einteilung der verschiedenen Zonen dargestellt werden. In der Einzugszone wird das vorliegende Kunststoffgranulat eingezogen und weitergefördert. In der Kompressionszone verringert sich der Innendurchmesser der Schnecke, sodass das eingezogene Material verdichtet. Durch die Verdichtung und eine

spezielle Schneckenengeometrie in Form von Knetblöcken entstehen Scherbewegungen im Kunststoff, welche Reibung erzeugen. Dies erhöht die Temperatur und schmilzt den Werkstoff auf. In der Ausstoßzone ist der Innendurchmesser der Schnecke meist wieder konstant, sodass die Schmelze homogenisiert und auf die gewünschte Arbeitstemperatur gebracht wird. Die Schmelze kann dann weiterverarbeitet, bzw. durch Ausgangsdüsen zu einem gewünschten Halbzeug geformt werden (vgl. Hopmann et al. 2021, S. 99–100).

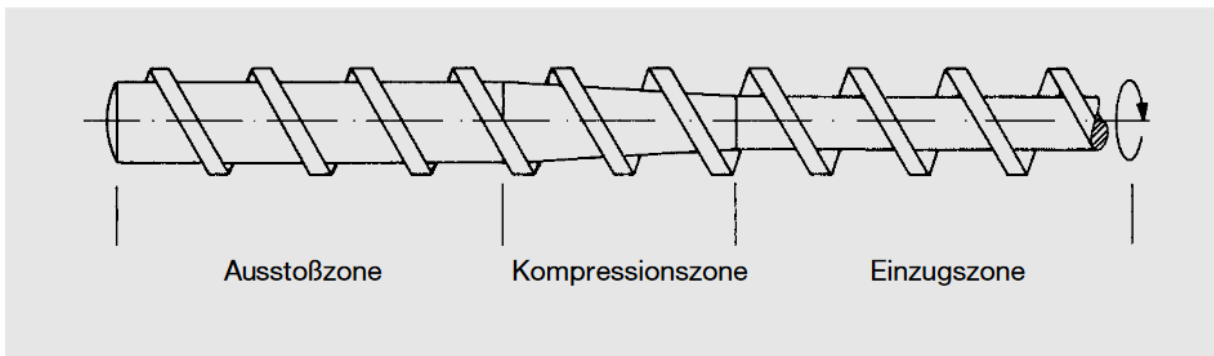


Abbildung 2.1: Drei-Zonen-Schnecke (Hopmann et al. 2021, S. 99)

Die Heizung/Kühlung dient als Temperiersystem, da das Aufschmelzen der Rohpolymere nicht nur durch Reibung, sondern auch durch eine externe Wärmezufuhr realisiert wird. Dabei besteht das Temperiersystem aus mehreren in Reihe geschalteten Heiz-/Kühlkörpern, welche getrennt voneinander beheizt oder gekühlt werden können (Hopmann et al. 2021, S. 102).

Polymere werden nach der Extrusion durch angeflanschte Werkzeuge in verschiedene Formen gebracht. Jedes Werkzeug besitzt einen Fließkanal, welcher der Schmelze die gewünschte Form gibt. Die Geometrie der Halbzeuge ist dabei vielseitig, es können Folien, Platten, Vollstrangprofile, offene Profile, Rohre und Hohlkammerprofile gefertigt werden (Hopmann et al. 2021, S. 103–104).

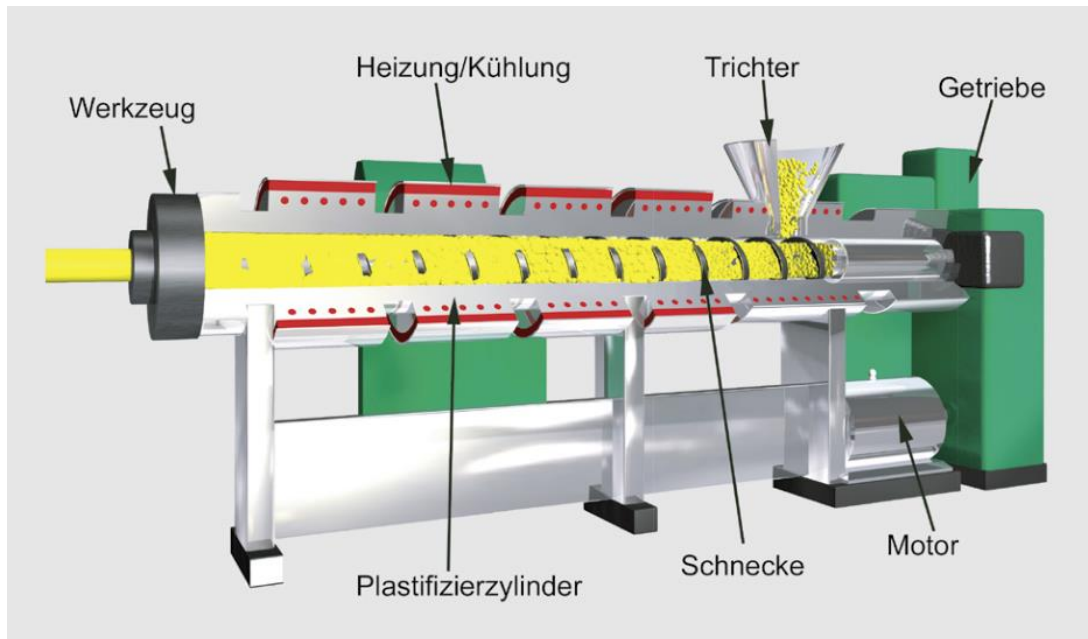


Abbildung 2.2: schematischer Aufbau eines Extruders (Hopmann et al. 2021, S. 99)

Der Zylinder gibt die Bauart des Extruders an. Unterschieden wird dabei zwischen Einschnecken- und Doppelschneckenextrudern (Abbildung 2.3). Die Doppelschneckenextruder werden in gleichläufig und gegenläufig drehende Maschinen unterteilt. Dabei ist die Drehrichtung der beiden Extruderschnecken zueinander gemeint, bei gleichläufigen Extrudern drehen sich die Schnecken in die gleiche Richtung, bei gegenläufigen in entgegengesetzte. Einschneckenextruder sind die am häufigsten verwendeten Maschinen, da sie am kosteneffizientesten sind. Doppelschneckenextruder werden immer dann eingesetzt, wenn die Prozessanforderungen nicht mehr mit einer Schnecke realisiert werden können. Für Einschneckenextruder eignen sich hauptsächlich bereits compounding Granulate, also Polymergranulate, die schon vor der Extrusion mit anderen Füllstoffen oder Additiven vermischt wurden. Doppelschneckenextruder eignen sich für ein kontinuierliches Mischen, weswegen bei der Extrusion häufig verschiedene Additive oder Füllstoffe hinzugemischt werden (Baur et al. 2022, S. 226).

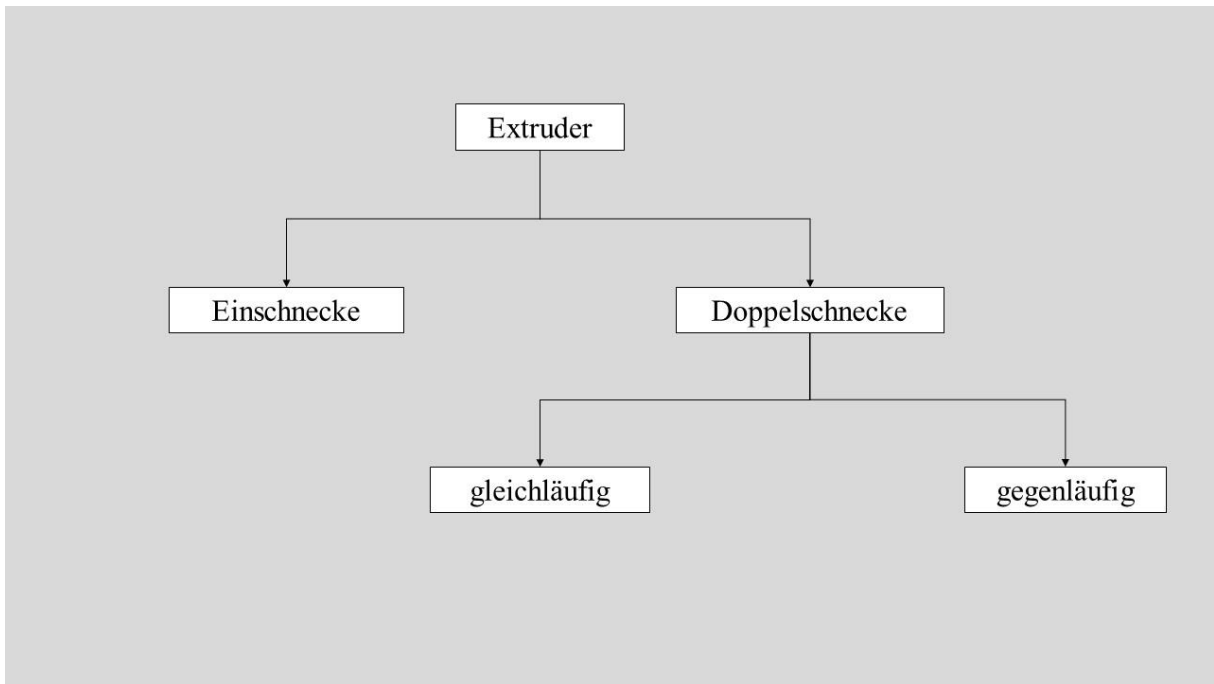












Abbildung 2.3: Einteilung der Extruder nach Zylinderbauart (Hopmann et al. 2021, S. 100)

Bei einem Doppelschneckenextruder sind zwei nebeneinander gelagerte Schnecken in einem Gehäuse untergebracht. Die Zylinderbohrungen, in denen die Schnecken liegen, haben den Querschnitt einer liegenden Acht, beide Bohrungen greifen ineinander ein. Die Bauformen lassen sich an drei Kriterien unterscheiden: Drehrichtung der Schnecken, Achsabstand und längs/quer offene/geschlossene Schnecken. Die Drehrichtung der Schnecken ist entweder gleich- oder gegenläufig. Hinsichtlich des Achsabstandes gibt es drei Bauformen. Bei dicht kämmenden Doppelschneckenextrudern greifen die Schneckenelemente ineinander ein. Des Weiteren gibt es Extruder, die nur teilweise oder nicht kämmend sind. Als drittes lassen sich Extruder zwischen längs und quer offenen/geschlossenen Schnecken unterscheiden. Dieses Kriterium gibt an, ob sich die Schneckenstege längs oder quer komplett berühren, oder ob es (teilweise) Hohlräume gibt. Die drei Kriterien lassen sich miteinander kombinieren, was in einer Vielzahl von Bauformen resultiert (vgl. Greif et al. 2018, S. 52).

Tabelle 2.1: Übersicht Doppelschneckenextruderbauformen (Greif et al. 2018, S. 53)

Eingriff		System	gegenläufig	gleichläufig
ineinandergreifend	vollständig kämmend	längs und quer geschlossen		theoretisch nicht möglich
		längs offen und quer geschlossen	theoretisch nicht möglich	
		längs und quer offen	theoretisch möglich, praktisch nicht verwirklicht	
	teilweise kämmend	längs offen und quer geschlossen		theoretisch nicht möglich
		längs und quer offen		
				
nicht ineinandergreifend	nicht kämmend	längs und quer offen		

Für diese Arbeit ist nur der gleichläufige, dichtkämmende Doppelschneckenextruder relevant, weswegen dieser im Folgenden genauer beschrieben wird. Gleichläufig drehende Doppelschneckenextruder sind Extruder mit zwei parallelen Schnecken, die eine identische Geometrie aufweisen. Die Geometrie der Schnecken wird so gewählt, dass die Schnecken sich gegenseitig über ihre Oberflächen streifen und somit einen Selbstreinigungseffekt erzielen und darf deswegen, anders als beim Einschneckenextruder nicht einfach frei gewählt werden, sondern muss auf diesen Effekt angepasst werden. Wie bei dem Einschneckenextruder wird die Schmelze durch Schleppkräfte gefördert. Durch die Übergabe der Schmelze im Eingriffsbereich der zwei Schnecken entsteht eine hohe Scherbelastung auf die Schmelze, was zu einer verbesserten Durchmischung führt. Doppelschneckenextruder

werden immer dann eingesetzt, wenn eine gute Mischwirkung bei hohem Durchsatz gefordert ist. Das Abschaben, woraus die Selbstreinigung resultiert, verhindert, dass sich Schmelzrückstände zwischen den Schnecken bildet, es gibt keine Totzonen, in denen das Material kaum bis gar nicht gefördert wird. Dadurch hat die Schmelze keine langen Verweilzeiten. (vgl. Greif et al. 2018, S. 56–57).

Die Schnecken bestehen aus einem Dorn, auf den verschiedene Schneckenelemente (Förderelemente, Knetblöcke, usw.) per Formschluss aufgesteckt werden, sodass die Elemente gegen Verdrehen gesichert sind. Auch eignet sich der Formschluss, welcher meist in Form einer Verzahnung vorliegt, zur Übertragung großer Drehmomente. An der Schneckenspitze werden die Schneckenelemente eingespannt. Dadurch entsteht ein flexibler, modularer Aufbau der Extruderschnecken, welcher je nach Anwendung angepasst werden kann (vgl. Greif et al. 2018, S. 54–55).

Förderelemente (FE) sind selbstreinigende Gewindeelemente, welche die Materialien in Zugabezonen und dem Entgasungsbereich fördern. Sie bauen zusätzlich Druck vor Mischzonen und dem Extruderausgang auf. Somit bestimmen Förderelemente den Druckgradienten im Extruder. Bei größerer Steigung der Förderelemente wird weniger Druck im Extruder aufgebaut, weswegen sie in der Entgasungszone, während FE's mit kleiner Steigung vor Mischzonen und dem Ausstoß eingesetzt werden, um den erforderlichen Druck aufzubauen. Für eine optimale Durchmischung der Materialien im Extruder werden Knetblöcke verwendet. Der Grad der dispersiven (Zerteilen von Partikeln) und distributiven (Verteilen von Partikeln) Mischung wird durch die Breite der einzelnen Knetscheibe und der Versatzwinkel der Knetscheiben untereinander bestimmt (Baur et al. 2022, S. 229).

Der häufigste Einsatz von dichtkämmenden, gleichläufigen Doppelschneckenextruder ist beim Compoundieren von Kunststoffen. Die gute Mischwirkung bei hohem Durchsatz ermöglicht das Plastifizieren und Homogenisieren der Schmelze, das Dispergieren von Farbpigmenten und Additiven, das Entgasen von flüchtigen Bestandteilen wie Lösungsmittel und Restfeuchtigkeit und das Einmischen unterschiedlicher Kunststoffe und Füllstoffe (Greif et al. 2018, S. 57).

2.2 Verschleiß

Verschleiß ist die Beschädigung, oder der Materialabtrag von einer oder zwei festen Oberflächen, die sich in einer Gleit-, Roll- oder Stoßbewegung zueinander befinden. Dabei

kann das Material auf der Kontaktfläche verdrängt werden, sodass sich die Eigenschaften des Festkörpers an der Oberfläche verändern, oder die Oberfläche kann abgetragen werden. Die abgetragenen Partikel können entweder auf die Gegenoberfläche übertragen werden, oder als Verschleißpartikel ausbrechen (Bhushan 2013, S. 447).

Damit Verschleiß auftreten kann, muss ein tribologisches System vorliegen. Dieses besteht in der Regel aus einem Grundkörper, einem Gegenkörper, einem Zwischenstoff und einem Umgebungsmedium. Auf das System wirkt ein Beanspruchungskollektiv aus energetischen und stofflichen Wechselwirkungen (Temperatur, Relativgeschwindigkeit, ...). Im Extruder sind die Bauteile auf der Extruderwelle (Förderelemente, Knetblöcke, ...) der Grundkörper und die Zylinderwand der Gegenkörper. Der Zwischenstoff variiert je nach Zone im Extruder, von Polymergranulat/-pulver, über Polymerschmelze bis zu Schmelze mit Füllstoff und Additiv. Dadurch ergeben sich zwei mögliche tribologische Systeme, ein Zweikörper- oder ein Dreikörpersystem. (Kohlgrüber 2016, S. 621). Das in Abbildung 2.4 dargestellte System ist ein Dreikörpersystem. Fehlt der Gegenkörper, oder der Zwischenstoff liegt ein Zweikörpersystem vor (Hakami et al. 2022, S. 6–7).

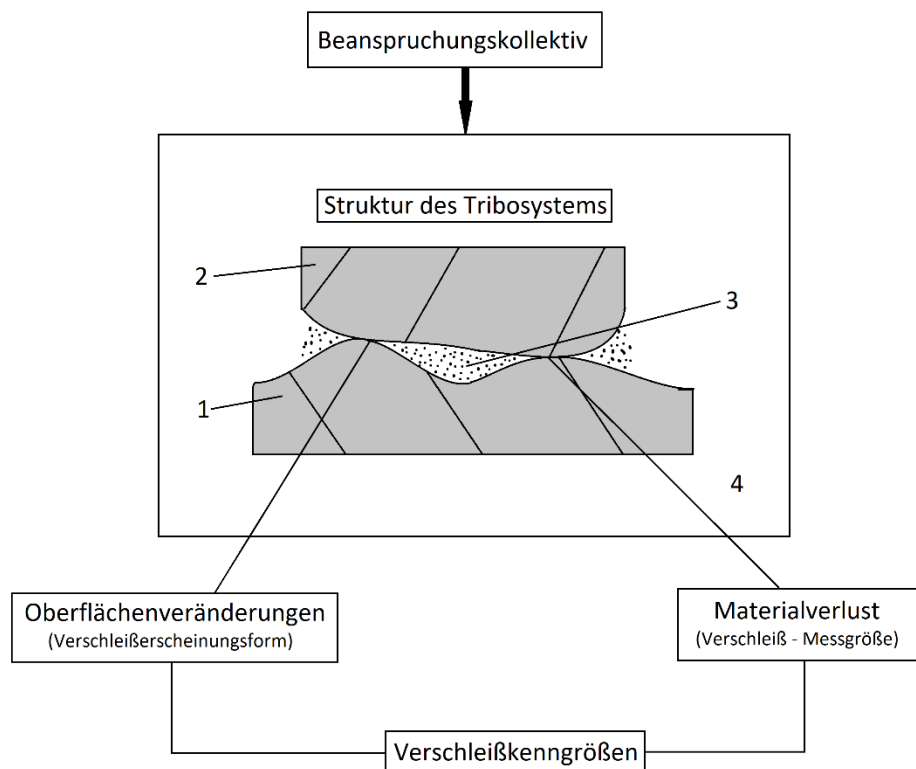


Abbildung 2.4: Darstellung eines tribologischen Systems (Kohlgrüber 2016, S. 621)

1 Grundkörper, 2 Gegenkörper, 3 Zwischenstoff, 4 Umgebungsmedium

Verschleiß lässt sich in verschiedene Arten unterteilen den abrasiven, adhäsiven und chemischen/korrosiven Verschleiß. Diese werden durch mechanische oder chemische Wechselwirkungen hervorgerufen und treten meist in Kombination miteinander auf (Bhushan 2013, S. 448). Die Verschleißarten treten an bestimmten Stellen im Extruder auf, weswegen die Betrachtung des Extruders als ein ganzes System nicht sinnvoll ist, da allein das Polymer mehrere Zustände durchläuft. Der Extruder wird in drei Teilsysteme unterteilt (Abbildung 2.5), der Polymereinzug und Aufschmelzbereich, die Füllstoffzugabe und Einmischung und die Entgasung und der Austrag. In den Bereichen liegen verschiedene Drücke und Temperaturen vor.

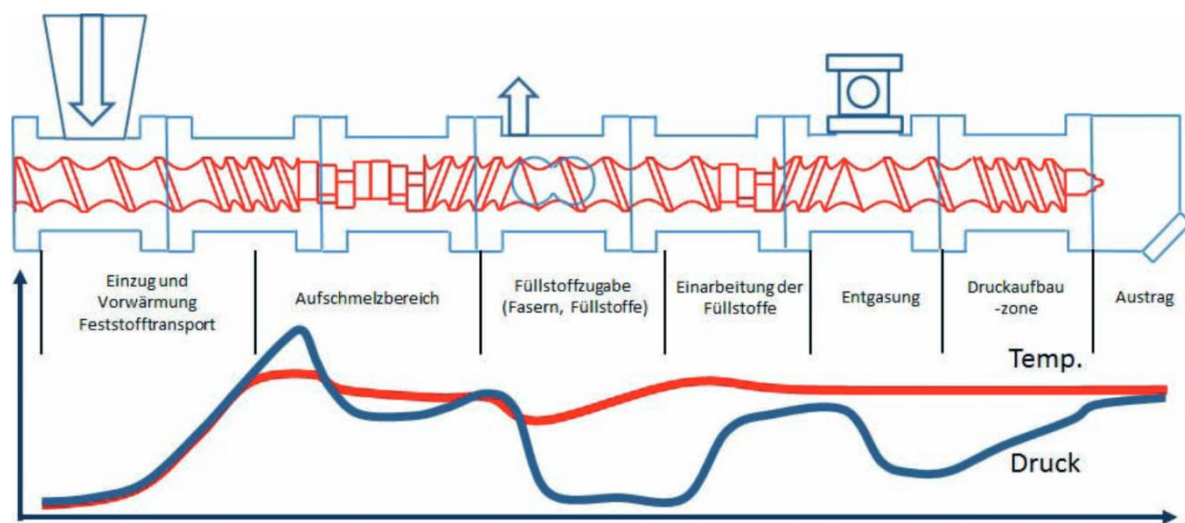


Abbildung 2.5 Zonen eines Doppelschneckenextruders mit Druck- und Temperaturverlauf (Kohlgrüber 2016, S. 621)

2.2.1 Abrasion in Doppelschneckenextrudern

Abrasiver Verschleiß tritt allgemein auf, wenn Unebenheiten einer rauhen, harten Oberfläche oder harte Partikel über eine weichere Oberfläche gleiten und diese plastisch verformen und/oder bis zum Bruch beschädigen. Es gibt zwei Arten von abrasivem Verschleiß. Beim Zweikörperverschleiß bewegen sich zwei Oberflächen relativ zueinander und die härtere reibt die weichere ab. Befindet sich zwischen den beiden Oberflächen ein härterer, dritter Körper, welcher eine oder beide Oberflächen abreibt, liegt Dreikörperverschleiß vor. Der dritte Schleifkörper besteht meist aus kleinen Schleifpartikeln (Bhushan 2013, S. 459–462).

Abrasion ist der am stärksten auftretende Verschleiß in Schneckenmaschinen, da die Füllstoffe meist in reiner Form dem Kunststoff hinzugegeben werden. Selbst bei ungefüllten

Kunststoffen tritt der abrasive Verschleiß auf, da das Granulat unter hohen Drücken und Scherkräften, mit Hilfe von Wärmezufuhr über die Zylinderwand aufgeschmolzen wird (vgl. Mennig 2007, S. 323). Hauptsächlich tritt abrasiver Verschleiß in folgenden Zonen auf: der Aufschmelzzone, der Füllstoffzugabe, der Füllstofffeinarbeitung und Homogenisierung der Schmelze und im Bereich des Druckaufbaus und des Austrages. Im Bereich des erhöhten Druckaufbaus wirkt auf die abrasiv wirkende Schmelze ein höherer Gegendruck, welcher eine Rückströmung verursacht. Dabei werden die Flanken der Elemente durch Kantenverrundung im Durchmesser verschliffen. Die grundlegenden Faktoren, welche abrasiven Verschleiß beeinflussen, sind: Härte und Form von Polymer und Füllstoff, Anteil der Füllstoffe, Abrasionsbeständigkeit des Schneckenwerkstoffes, Gehäusetemperatur und das Spiel zwischen den Extruderwellen. Die Gehäusetemperatur hilft bei der Aufschmelzung des Polymers und bestimmt damit, wie lange das Polymer als Pulver oder Granulat abrasiv wirken kann. Nimmt das Spiel zwischen den Extruderwellen zu, verlängern sich die Druckaufbauzonen, was zu einer stärkeren Rückströmung von Schmelze führt (Kohlgrüber 2016, S. 621–624).

2.2.2 Adhäsion in Doppelschneckenextrudern

Beim Adhäsionsverschleiß stehen die Rauheitsspitzen des Grund- und Gegenkörpers in Kontakt und bilden adhäsive Bindungen. Diese werden durch die Relativbewegungen der beiden Körper aufgebrochen und neu gebildet. An den Bindungsstellen bricht dabei Material aus dem Körper mit der geringeren Scherfestigkeit aus. Dieses Material bleibt an den anderen Körper gebunden, oder löst sich und bildet Verschleißpartikel zwischen den beiden Körpern (Bhushan 2013, S. 448–450).

Bei den meisten Doppelschneckenextrudern werden die Wellen nicht durch mechanische Radiallager gelagert, sondern sind schwimmend in der Polymerschmelze und einseitig am Getriebe oder am Ausgang gelagert. In den Bereichen, wo das Polymer noch nicht geschmolzen ist, kann ein Festkörperkontakt zwischen den Extruderwellen, oder Extruderwelle und -gehäuse entstehen. Dieser Kontakt kann auch bei einer erhöhten Wellenauslenkung im Bereich der Aufschmelzung oder beim Ausgang eintreten. Da sich bei Kontakt zwischen den Wellen die Stege und Täler der Fördererlemente berühren, sind diese Bereiche am häufigsten von adhäsivem Verschleiß betroffen. Bei einem Kontakt zwischen Welle und Gehäuse ist neben der Gehäuseoberfläche ebenfalls wieder die Stegoberfläche vom Verschleiß betroffen. Die Faktoren, welche den adhäsiven Verschleiß somit hervorrufen, sind: der Betrag der radialen Wellenauslenkung, die Werkstofftypen und -kombination von

Schnecken und Gehäuse, die Art des Polymers und der Oberflächenzustand. Das Polymer hat einen maßgeblichen Einfluss, da es im Schmelzzustand den möglichen Kontakt zwischen Wellen und/oder Gehäuse verhindern kann. Deswegen sind Viskosität und Schmierwirkung der Schmelze wichtige Faktoren beim adhäsiven Verschleiß (Kohlgrüber 2016, S. 624–626).

2.2.3 Korrosiver Verschleiß in Doppelschneckenextrudern

Korrosiver Verschleiß entsteht, wenn das korrodierende Material von einem korrosiven Medium umgeben ist. In der Luft ist Sauerstoff das stärkste korrosive Medium. Erfährt die korrodierende Oberfläche keine Reibung, so bildet sich eine dünne Korrosionsschicht, welche die weitere Korrosion verlangsamen kann. Erfährt die Oberfläche parallel zur Korrosion Zwei- oder Dreikörperverschleiß, so wird die Korrosionsschicht immer wieder abgetragen und neu gebildet. Die dabei entstehende Reibungswärme kann die chemischen Reaktionen, welche Korrosion bilden noch beschleunigen. Somit ist der Verschleiß durch die Überlagerung von Korrosion und Abrasion stärker, als beide Verschleißarten getrennt (Bhushan 2013, S. 493).

Im Schneckenextruder tritt Korrosion häufig überlagert mit anderen Verschleißarten in folgenden Bereichen auf: Aufschmelzbereich, Füllstoff- und Additivzugabe und dem Entgasungsbereich. Im Aufschmelzbereich wird durch das Schmelzen des Polymers, Restfeuchte die im Polymergranulat/-pulver enthalten ist, freigesetzt. Diese Restfeuchte kann zusammen mit den hohen Temperaturen chemische Reaktionen auslösen, welche korrosiv wirken. Im Bereich der Zugabe entsteht Korrosion meist durch korrosiv wirkende Additive, z.B. Flammschutzmittel (Kohlgrüber 2016, S. 627). Flammschutzmittel auf Brombasis wirken korrosiv, weil die Bromverbindungen zusammen mit Wasser (z.B.: aus Restfeuchte des Polymers) reagieren. Im Entgasungsbereich werden leichtflüchtige Bestandteile der Polymerschmelze und Additive/Füllstoffe entgast, z.B.: Chloride bei bestimmten Thermoplasten, welche an der Innenseite des Zylinders kondensierten und bei Nitrierstahl zu Korrosion führen (Mennig 2007, S. 327–328). Korrosion kann aber auch entstehen, wenn der Extruder nicht sachgemäß gereinigt wurde, wodurch sich, während dem Prozess noch Rückstände von Reinigungsmitteln im Extruder befinden. Wie bei den anderen Verschleißarten besteht die Gefahr, dass das Polymer mit Korrosionspartikeln kontaminiert wird. Die Faktoren für Korrosionsbildung sind somit: Art und Zustand des Polymers, Korrosionsbeständigkeit der Extruder-Werkstoffe, Art der Extruder-Reinigung, Verfahrenstemperaturen, Kondensation an kühlen Zonen bei der Entgasung, Art der Additive und die chemische Reaktionsfähigkeit des Polymers (Kohlgrüber 2016, S. 627–629).

2.3 Pulvermetallurgische Stähle

Pulvermetallurgie (PM) beschreibt das Herstellen von metallischen Pulvern und von Bauteilen aus metallischem Pulver und lässt sich damit den urformenden Fertigungsverfahren zuordnen. Das Pulver wird dabei erst geformt (z.B.: durch Pressen) und anschließend durch Sintern die Grundfestigkeit erhöht. Durch pulvermetallurgische Fertigung können Bauteile hergestellt werden, bei denen in eine duktile Eisenmatrix Karbide, Nitride oder Diamanten gleichmäßig verteilt eingelagert sind. Durch die Wahl der Press- und Sinterverfahren ist es dabei möglich, den Grad der Porung einzustellen, es gibt Systeme mit einer Porosität von 90% des Gesamtvolumens. Ebenfalls ist das Zusammenführen von metallischen Legierungselementen mit unterschiedlichem Schmelzpunkt möglich, da die Herstellung meist ohne Schmelzphasen abläuft. Der Bauteilherstellung geht immer die Wahl der metallischen Pulverkomponenten und die Herstellung des Pulvers voraus (KLOCKE 2018, S. 40–41).

Für die Herstellung pulvermetallurgischer Werkstoffe gibt es verschiedene Pressverfahren. Verschleißfeste Bauteile für Extruderwellen werden unter anderem durch Heiß-Isostatisches Pressen (HIP) hergestellt. Das metallische Pulver wird in einem geschlossenen, evakuierten Behälter gefüllt und bei einem Druck von 100-200 MPa und einer Temperatur bis 1300 °C verdichtet. Der Behälter gibt dabei die Form des Bauteils vor. Es entsteht ein homogener, porenfreier und rissfreier Diffusionsverbund der Legierungselemente untereinander und mit der Eisenmatrix. Der Prozess läuft dabei meist ohne Schmelzphase ab und es gibt keine Schwindungshohlräume bei der Abkühlung. (Mennig 2007, S. 237).

Die HIP-PM-Stähle weisen ein feines, homogenes Gefüge auf, wobei sowohl Durchmesser als auch Abstand der harten Karbide maximal 5 µm, meist 1-3 µm betragen. Durch den geringen Abstand können abrasiv wirkende Stoffe die duktile Matrix nicht erreichen, da der geringe Abstand zwischen den Karbiden schützt. Somit ist das Matrix-Karbid-Verhältnis bei der Herstellung ein entscheidender Faktor. Beim HIP können Werkstoffe mit sehr hohen Legierungsgehalten hergestellt werden, bei denen die Kohlenstoffgehalte bis zu 5 Gewichtsprozent und Vanadiumgehalte bis zu 20 Gew.-% ausmachen. (vgl. Mennig 2007, S. 238). Obwohl Stahl per Definition nur 2,06 Gew.-% Kohlenstoff enthalten darf, zählen diese Werkstoffe trotzdem zu den Stählen und nicht zu den Gusseisen. Gusseisen entsteht, wenn der Kohlenstoffanteil so hoch ist, dass dieser nicht mehr im Mischkristall gelöst werden kann und als Graphit oder Zementit ausgeschieden wird. Bei PM-Stählen bildet der gesamte Kohlenstoff mit den anderen Legierungen Karbide und kein Graphit oder Zementit. Damit

bilden PM-Stähle mit Kohlenstoffgehalten über 2,06 Gew.-% eine Sondergruppe der Stähle (vgl. Eisenwerkstoffe 2013, S. 9).

Die Werkzeugstähle, mit denen das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum (SKZ) die Extruderversuche durchgeführt hat, wurden von Saar-Pulvermetall hergestellt. Sie zeichnen sich durch eine sehr hohe Verschleißbeständigkeit und Festigkeit aus. Der Stahl Saramet 26 hat dabei einen deutlich höheren Korrosionsschutz, was an dem hohen Legierungsanteil von Chrom liegt, da Stähle mit mehr als 12 Gew.-% Chrom eine Passivschicht bilden (vgl. BLECK 2017, S. 65). Saramet10 hingegen hat nur 5,3 Gew.-% Chrom, was nicht ausreicht, um eine Passivschicht zu bilden. Ansonsten unterscheiden sich die beiden Stähle hinsichtlich Bearbeitung, Verschleißschutz, Zähigkeit, Festigkeit und Warmhärte kaum. Die chemische Zusammensetzung der beiden Werkzeugstähle ist in Tabelle 2.2 aufgelistet.

Tabelle 2.2: Zusammensetzung der PM-Stähle (Saar Pulvermetall GmbH 2023, S. 3–4)

Legierung		Zusammensetzung in Gew. %					
Saar-Pulvermetall Bezeichnung	Handelsbezeichnung	C	Cr	Mo	V	Nb/Ta	Fe
Saramet10	V10	2,45	5,30	1,30	10,00	/	Basis
Saramet26	/	2,70	26,00	1,00	3,50	1,50	Basis

3. Extruderversuche am SKZ

Die in dieser Arbeit untersuchten Werkzeuge sind Schneckenelemente, welche in Extruderprozessen am Süddeutschen Kunststoffzentrum (SKZ) eingesetzt wurden. Der verwendete Extruder ist ein gleichläufiger, dichtkämmender Doppelschneckenextruder (Typ ZE25Ax45D UTX, KraussMaffei Berstorff), mit modularem Schnecken Aufbau. Der Schneckendurchmesser betrug 25 mm bei einer Schneckenlänge von 1125 mm. Das verwendete Polymer war Polypropylen in Granulatform. Als Füllstoff wurde Aluminiumoxid verwendet, welches in Pulverform dem Prozess hinzugefügt wurde.

Pro Werkstoff wurden vier Fördererlemente, zwei Knetblöcke und zwei Einschraubdüsen verwendet, die immer an gleicher Position auf der Welle eingebaut wurden. Die Positionen der Werkzeuge auf den Extruderwellen sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Alle anderen in den Versuchen eingesetzten Werkzeuge werden nicht untersucht.

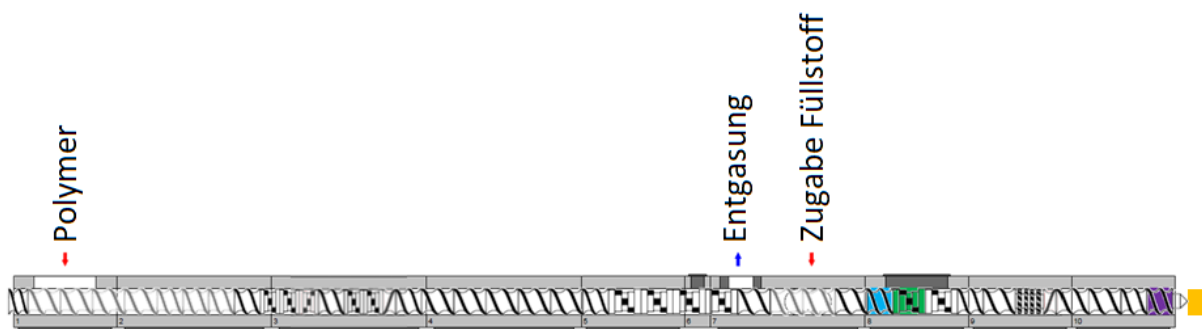


Abbildung 3.1: Aufbau Extruderwellen

Die Zylinderwand wurde während den Prozessen durchgehend temperiert und die resultierende Temperatur betrug 220°C, mit Ausnahme des Zylinderteils, bei dem der Füllstoff hinzugegeben wurde, dort betrug die Temperatur 230°C. Der Prozess mit den Saramet10-Werkzeugen dauerte insgesamt dreizehn Stunden. Die ersten drei Stunden wurde der Füllstoff mit einem Gewichtsanteil von 50% hinzugefügt. Nach drei Stunden wurde der Füllstoff-Gewichtsanteil auf 80% angehoben. Der Prozess mit den Saramet26-Werkzeugen lief nur acht Stunden. Hier wurde ebenfalls die ersten drei Stunden mit einem Füllstoff-Gewichtsanteil von 50% extrudiert, anschließend wurde er ebenfalls auf 80% angehoben.

Tabelle 3.1: Prozessparameter

Zeitintervall (h)	Dauer (h)	Gesamtdurchsatz (kg/h)	Anteil Al ₂ O ₃ (Gew.-%)	Anteil PP (Gew.-%)	Drehzahl (min ⁻¹)	Drehzahl SB (min ⁻¹)	Vakuum
0-3	3	10	50	50	250	150	zu
3-8	5	30	80	20	250	150	zu
8-13 (nur SA 10)	5	30	80	20	250	150	zu

Um den Verschleiß messen zu können, wurden an jeder Schneckenelementart Messpunkte definiert (Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3).

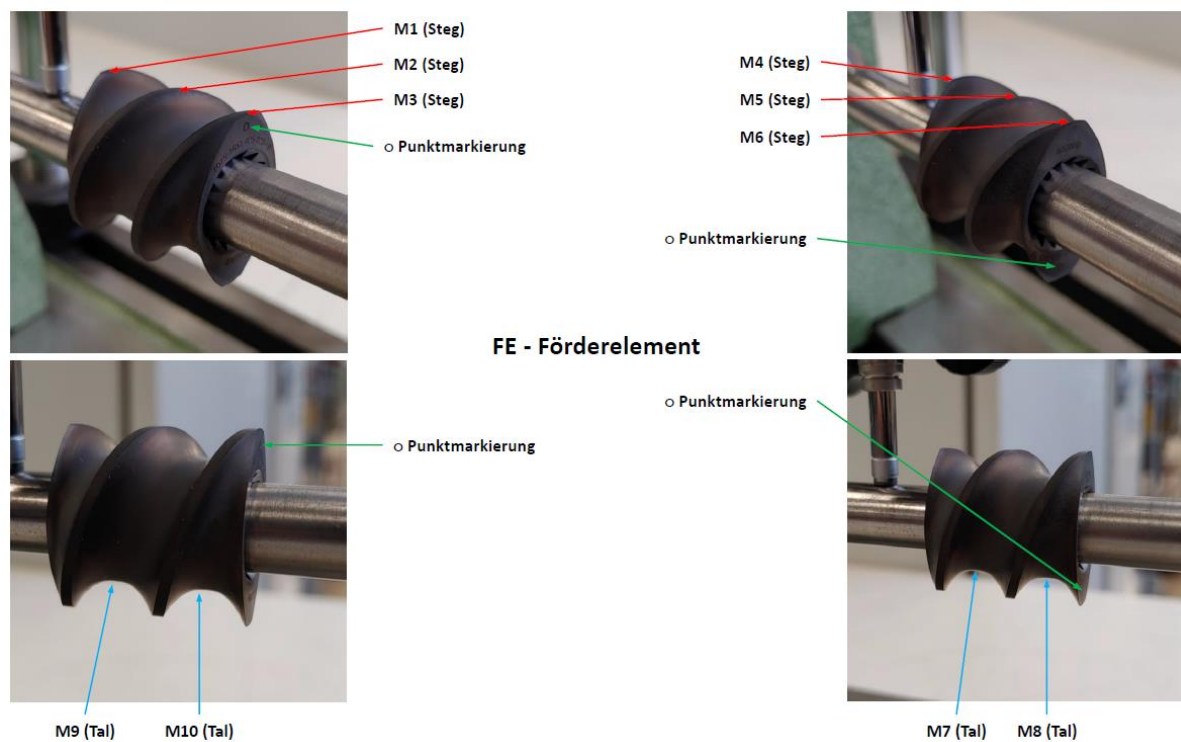


Abbildung 3.2: Messposition Förderelemente

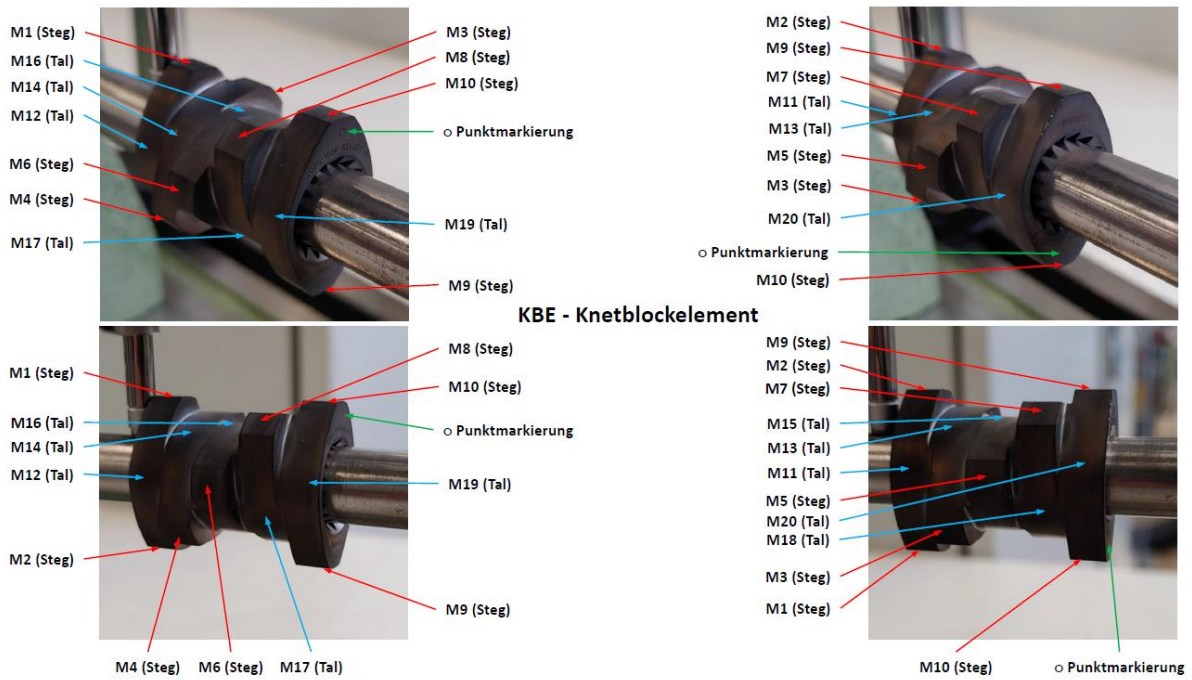


Abbildung 3.3: Messposition Fördererelemente

Die Messungen wurden jeweils vor dem Prozess, nach drei Stunden, nach acht Stunden und beim Saramet10 nach dreizehn Stunden vorgenommen. Dabei wurden die Bauteile auf eine Welle gesteckt und der radiale Abstand zwischen Messpunkt und Wellenoberfläche gemessen (Abbildung 3.4). Die Einschraubdüsen wurden nicht vermessen, sondern ebenfalls vor dem Prozess, nach drei Stunden, nach acht Stunden und beim Saramet10 nach dreizehn Stunden gewogen.



Abbildung 3.4: Messprinzip der Fördererelemente und Knetblöcke

4. Ziel der Arbeit

Wie in Kapitel 1 beschrieben, ist es notwendig die Verschleißformen lokal im Extruder zu bestimmen, dies soll das Ziel dieser Arbeit sein. Da auf einer Extruderwelle sehr viele einzelne Bauteile sitzen, werden hier zwei Teile aus zwei Bereichen gewählt, der Füllstoffeinmischung und dem Austrag der homogenen Polymerschmelze-Füllstoff-Masse. Aus jedem Bereich werden vier Bauteile untersucht (zwei pro Welle), einmal zwei Fördererlemente und zwei Knetblöcke aus der Füllstoffeinmischung und zwei Fördererlemente und zwei Einschraubdüsen aus dem Ausstoßbereich. Die Messpunkte und Stirnseiten der Bauteile werden zunächst fotografiert. Anschließend werden die Stegbreiten (FE und KBE), Stegtiefen (KBE) und Durchmesser (Einschraubdüsen) vermessen. Auf Grundlage der Oberflächenbilder und Messergebnisse soll dann der Verschleiß, welchen die einzelnen Teile erfahren haben, charakterisiert und die Ursache für den Verschleiß erkannt werden. Die beiden Werkstoffe, aus denen jedes Bauteil einmal gefertigt wurden, werden zuletzt hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens und dem Verschleißschutz, den sie bieten verglichen.

5. Aufbau der Werkstoffe

Für eine genaue Auswertung der Werkzeuge, soll zuerst einmal das Gefüge der Werkstoffe Saramet10 und Saramet26 analysiert werden. Dafür werden Proben aus Halbzeugen entnommen, welche anschließend so präpariert werden, dass das Gefüge unter einem Lichtmikroskop sichtbar wird.

5.1 Präparation von Saramet10- und Saramet26-Proben

Die beiden Proben werden zunächst mit einem Trennschleifer zu einem Quader zurechtgeschnitten. Diese werden anschließend in einer Einbettpresse (Ecopress 102, Metkon, Türkei) in eine schwarze Epoxid-Einbettmasse eingebettet. Die eingebetteten Proben werden dann in einer Poliermaschine (Forcipol 300 1V, Metkon, Türkei) geschliffen und poliert. Die Maschine besteht aus einem rotierendem Probenhalter, welcher die Proben auf einen Schleif-/Polierteller drückt. Der Teller kann sich dabei in die gleiche Richtung (GL), oder in die entgegengesetzte Richtung (GGL) drehen. Die Schleifpapiere, bzw. Poliertücher werden dabei auf dem Teller befestigt. Die Proben werden von Stempeln auf die Schleifpapiere gedrückt, wobei der Stempeldruck einstellbar ist, dieser wird konstant auf 20 N gehalten. Die Drehzahl des Probenhalters wurde auf ca. 137 U/min eingestellt. Alle Schleif- und Poliervorgänge sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1: Übersicht über die Schleif- und Poliervorgänge

Schleifstärke/ Korngröße [μ]	Drehrichtung Teller	Bearbeitungsdauer [min]	Umdrehung/min
P500/ 30	GL	1	150
P500/ 30	GL	1,5	150
P1000/ 18	GL	1,5	300
P1000/ 18	GL	1,5	150
3 μ	GGL	2	150
3 μ	GL	2	150
1 μ	GGL	3	150
1 μ	GL	3	150

Geschliffen wird mit Schleifpapieren, die nach jedem Durchgang gewechselt werden. Poliert wird mit Poliertüchern, in zwei Schritten mit einer 3μ - und anschließend mit einer 1μ -Diamantsuspension. Die Reinigung der Proben erfolgt in einem Ultraschallbad in Isopropanol um lose Schleifpartikel zu entfernen. Um das Gefüge sichtbar zu machen, werden die Proben anschließend in Nital für jeweils 10 Sekunden (Saramet10) und 30 Sekunden (Saramet26) geätzt.

5.2 Optische Gefügeuntersuchung

Das Gefüge der präparierten Werkstoffe wurde unter einem digitalen Lichtmikroskop (Leica DVM6, Leica, Deutschland) untersucht. Mit Hilfe der zum Mikroskop gehörenden Software (Leica Application Suite X, Leica, Deutschland) werden die Bilder aufgenommen und anschließend auch vermessen. Außerdem ist die Blende etwas geschlossen, durch die minimal geworfenen Schatten werden die Karbide noch sichtbar. Die beiden Gefügaufnahmen für Saramet10 und Saramet26 sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Im Gefüge sind die Hartphasen, die Karbide und die Eisenmatrix, in welche die Karbide eingebettet sind, zu erkennen. Anhand der Messung ließ sich feststellen, dass wie in Kapitel 2.3 beschrieben, der Abstand zwischen den Karbiden und der Durchmesser der Karbide zwischen $1-3\mu$, aber nie über 5μ liegt. Der durchschnittliche Abstand der Saramet10-Karbide liegt bei $2,22\mu$, beim Saramet26 sind es $2,6\mu$. Auch der durchschnittliche Karbiddurchmesser ist beim Saramet10 mit $1,78\mu$ geringer als bei dem Saramet26 mit $3,15\mu$, der Saramet10 weist also ein etwas feineres Gefüge auf als der Saramet26.

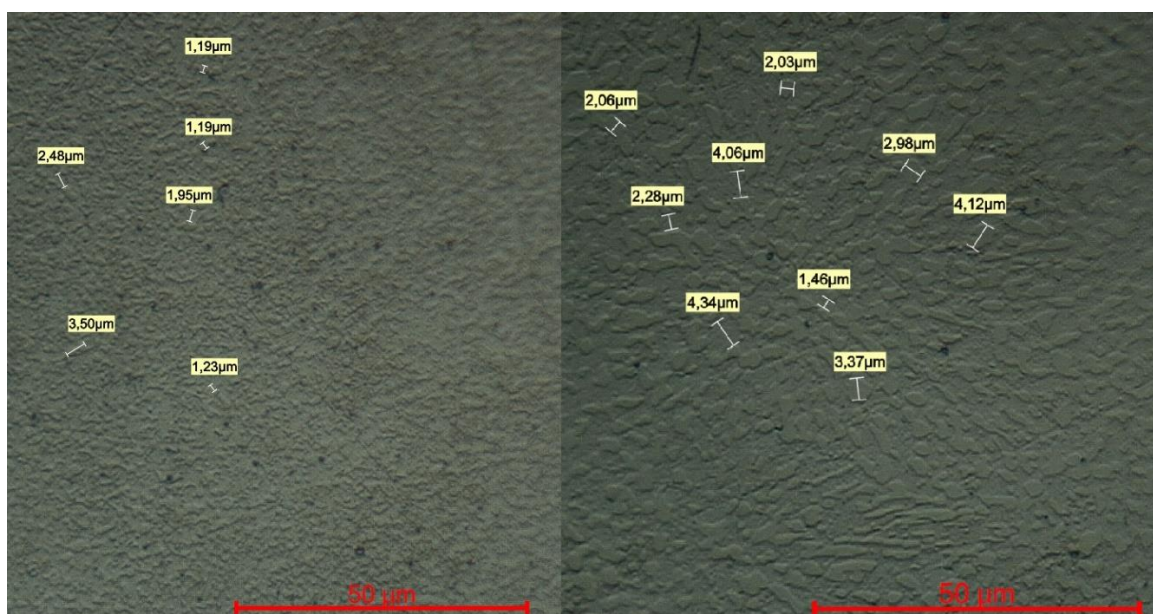


Abbildung 5.1: Gefüge von Saramet 10 (links) und Saramet 26 (rechts)

6. Optische Auswertung von eingesetzten Bauteilen

6.1 Aufbau und Ablauf der optischen Messung

Die Auswertung der Werkzeuge erfolgt an demselben Lichtmikroskop, wie auch die Gefügeuntersuchungen in Kapitel 5. Von jedem Werkzeugbauteil werden alle festgelegten Messpunkte (siehe Kapitel 3) abfotografiert. Dadurch lassen sich bei den Fördererelementen die Stegbreiten, bei den Knetblöcken die Breite und die Tiefe der Oberfläche auf den Stegen, bei den Düsen der Einlauf- und Auslaufdurchmesser an den Messpunkten ausmessen. Dieser Vorgang wurde auch an Werkzeugen durchgeführt, welche nicht in Extruderversuchen eingesetzt wurden und die Ausgangsgeometrie besitzen. Diese werden als Referenzbauteile verwendet, um geometrische Differenzen zu messen.

6.2 Ergebnisse der optischen Auswertung

6.2.1 Fördererelemente

Die Referenzfördererelemente beider Werkstoffe weisen die gleichen geometrischen Merkmale auf. Alle Kanten der Stege und Stirnflächen sind eckig und nicht abgerundet. Die Oberfläche weist ein gleichmäßiges Rauheitsmuster auf, was den Werkstoffen ein mattes Aussehen verleiht. Die durchschnittliche Stegbreite ergibt sich zu 1,44 mm.

Fördererelemente vor KBE

Bei den Saramet10- und den Saramet26-Fördererelementen variieren die Verschleißerscheinungen je nach Position auf der Extruderwelle. Die Fördererelemente, welche vor dem Knetblock saßen, weisen einen starken radialen Materialabtrag auf der Zulaufseite auf. In Abbildung 6.1 ist dies für die Fördererelemente, welche auf der linken Extruderwelle saßen, dargestellt. Die Fördererelemente auf der rechten Extruderwelle weisen allerdings die gleiche Geometrie auf der Auslaufseite auf. Das gilt auch für die „untere Hälfte“ der Fördererelemente, dort sind die Stirnflächen, wegen der Symmetrie ebenfalls in Drehrichtung abgerundet.

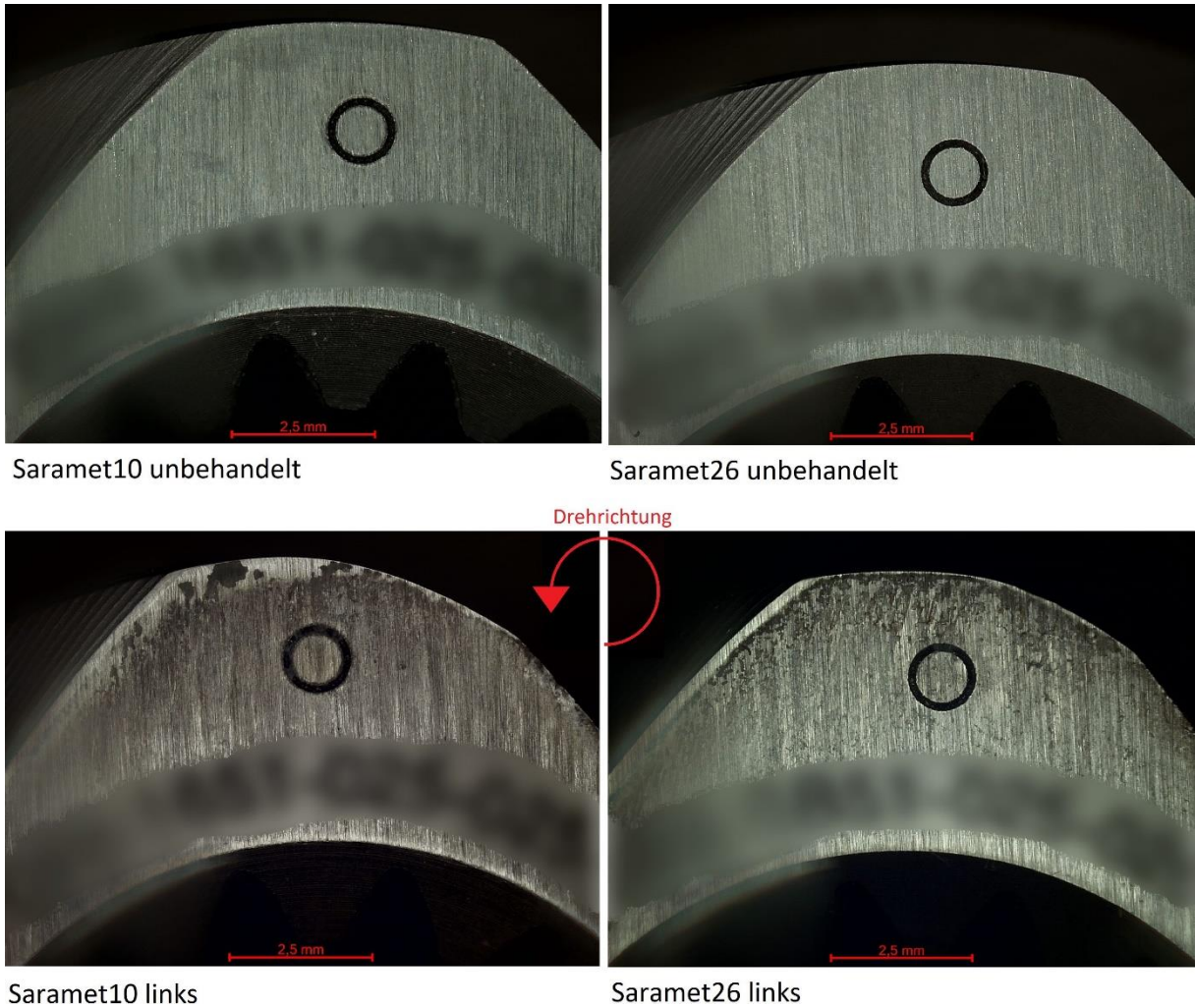


Abbildung 6.1: FE-Stirnfläche Zulaufseite

Das rechte Fördererelement aus Saramet26 weist auch eine Bruchstelle auf der Zulaufseite auf. Dabei sind die Bruchkanten scharfkantig und nicht abgerundet (Abbildung 6.2).



Abbildung 6.2: Ausbruch- FE Saramet26, von vorne (links) & von oben (rechts)

Auf dem Bild ist ebenfalls zu erkennen, dass sich die Oberfläche auf den Stegen verändert hat und gegenüber dem Referenzfördererelement glänzt. Die Stegkanten weisen keine Rundung auf, jedoch hat sich die Stegbreite verändert, der Mittelwert liegt beim Saramet10 bei 1,47 mm und beim Saramet26 bei 1,44 mm. Eine glänzende Oberfläche zeigt sich auch in den

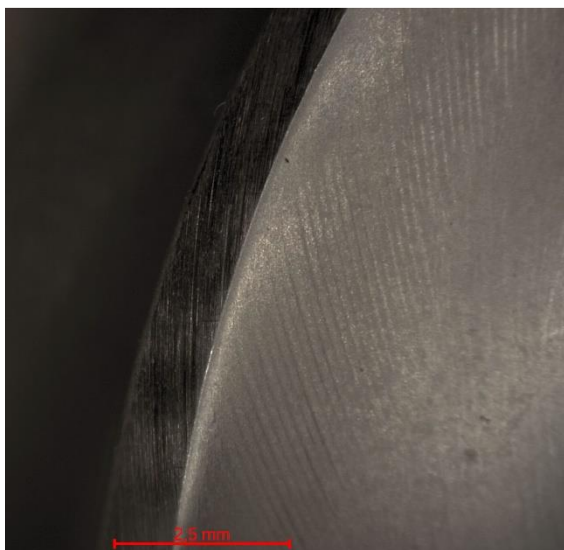
Tälern der Fördererelemente. Da die abrasiv wirkenden Füllstoffe hauptsächlich durch die Täler liefen, wurde von den Steg-Messpunkten in der Mitte eines jeden Fördererelementes (M2 und M4) seitliche Bilder gemacht, welche den Verschleiß in den Tälern besser sichtbar machen sollen. In Abbildung 6.3 sind die Stege des Messpunktes M4 der unbehandelten und der linken Bauteile dargestellt.



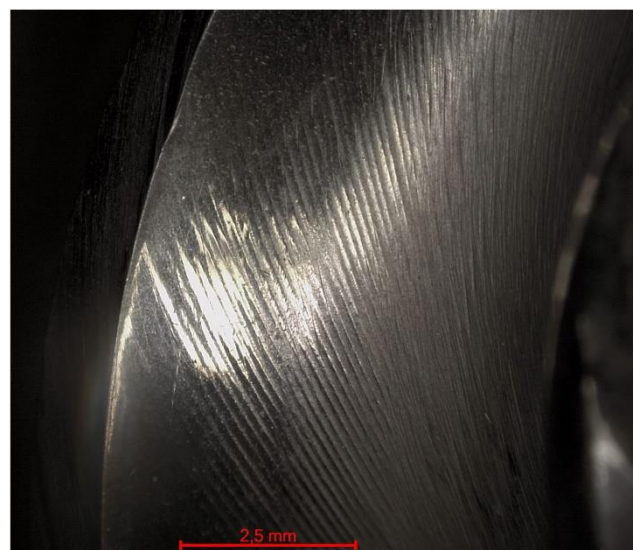
Saramet10 unbehandelt



Saramet26 unbehandelt



Saramet10 links



Saramet26 links

Abbildung 6.3: FE vor KBE - seitliche Stegaufnahmen M4

Hier zeigt sich, dass die feine Rauheitsmusterung abgetragen wurde. Die Riefen in den eingesetzten Bauteilen sind größer und weisen gleichmäßig in die Richtung, in die sich Schmelze und Füllstoff während der Extrusion bewegt haben. Die Oberfläche beim Saramet10 ist an allen seitlichen Steg-Aufnahmen matt, der Saramet26 glänzt.

Fördererelemente vor der Düse

Bei den Fördererelementen, welche am Ende der Extruderwelle vor der Düse lagen, ist die Stegbreite größer als bei den Fördererelementen vor den Knetblöcken. Der Mittelwert liegt für den Werkstoff Saramet10 bei 1,96 mm und beim Saramet26 bei 1,90 mm. Auch hat sich auf der Höhe von Messpunkt 3/6 eine Kante auf dem Steg gebildet. Der Durchmesser des Fördererelementes ist von M1/4 bis kurz vor M3/6 geringer als nach der Kante (Abbildung 6.4). Die Breite der Kante bis zur Stirnfläche wurde ebenfalls ausgemessen, die Werte sind in Tabelle 6.1 einmal aufgelistet. Die Werte ergeben sich dabei immer aus dem Mittelwert von M3 und M6.

Tabelle 6.1: Stegkantenbreite

Stegkantenbreite				
	Saramet10		Saramet26	
	rechts	links	rechts	links
MW	0,97	0,58	0,82	0,70

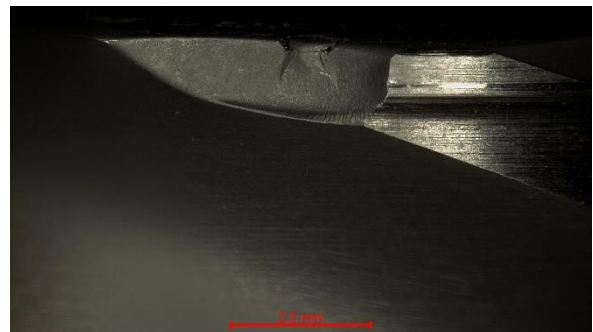


Abbildung 6.4: Stegkante und Ausbruch

Das rechte Fördererelement weist auf der Einlaufseite bei Messpunkt 3 eine Bruchstelle auf (Abbildung 6.5). Die Kanten der Bruchstelle sind scharf und nicht abgerundet. Die Stirnflächen beider Fördererelemente sind auf beiden Seiten (Zulauf und Ablauf) radial nicht verformt, eine leichte Kantenrundung liegt nur in axialer Richtung vor.

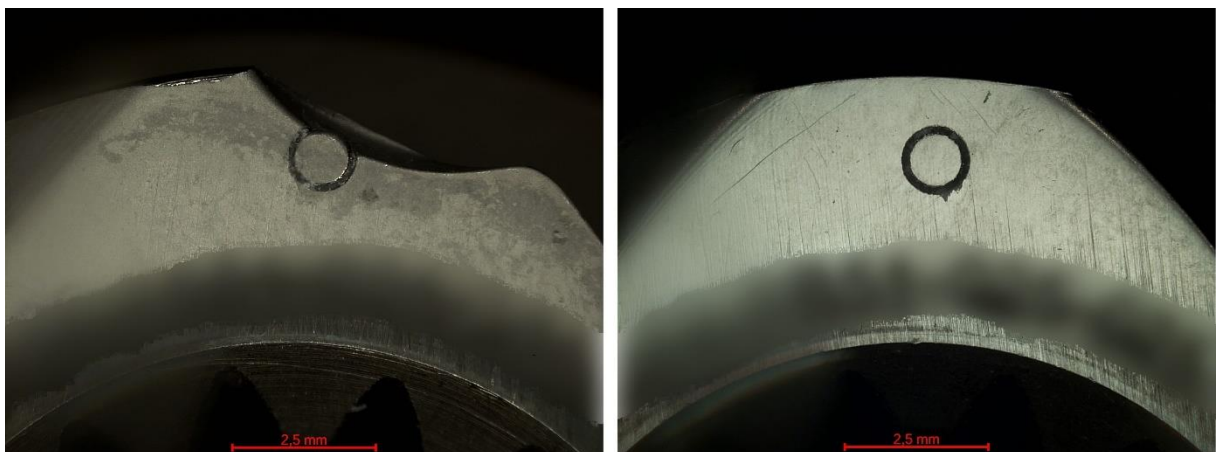


Abbildung 6.5: FE-Stirnflächen Zulaufseite Saramet10 (links) und Saramet26 (rechts)

Bei den seitlichen Stegaufnahmen (Abbildung 6.6) zeigt sich, dass wie bei den Fördererelementen vor den Knetblöcken, das Rauheitsmuster in den Tälern abgetragen wurde. Das neue Rauheitsprofil ist gröber und die Oberflächen beider Werkstoffe weisen glänzende Flächen auf, beim Saramet10 nur in Flecken, beim Saramet26 die gesamte Oberfläche.



Abbildung 6.6: FE vor Düse - seitliche Stegaufnahmen M2 Saramet10 (links) und Saramet26 (rechts)

6.2.2 Knetblöcke

Wie bei den Fördererelementen sind alle Kanten bei den Knetblöcken, welche als Referenz dienen, spitz zulaufend. Bei den eingesetzten Knetblöcken sind alle Kanten abgerundet. Am stärksten davon betroffen sind die Kanten an den Stegen, welche in Drehrichtung zeigen (Abbildung 6.7). Wie bei den Fördererelementen weist der Saramet10 glänzende Flecken auf der Oberfläche auf, beim Saramet26 ist die gesamte Oberfläche glänzend. Auf den Stegen wurde einmal die Breite, auf dem Bild von links nach rechts und die Tiefe, auf dem Bild von oben nach unten gemessen. Die Mittelwerte sind in Tabelle 6.2 eingetragen.

Tabelle 6.2: Mittelwerte der KBE-Steg-Abmessungen

Mittelwert-KBE Breite [mm]			Mittelwert-KBE Tiefe [mm]		
Referenz	Saramet10	Saramet26	Referenz	Saramet10	Saramet26
4,55	4,82	4,55	5,40	5,30	5,22

Bei den im Extruder eingesetzten Knetblöcken wurde von jedem Knetblock separat der Mittelwert aller Messpunkt-Abmessungen errechnet. Die sich ergebenden zwei Mittelwerte pro Werkstoff (einmal rechts, einmal links), wurden zu dem in der Tabelle 6.2 stehenden

Mittelwert zusammengerechnet. Der Mittelwert von den nicht eingesetzten Referenzknetblöcken wurde aus den Mittelwerten eines Knetblockes aus Saramet10 und eines Knetblockes aus Saramet26 errechnet. Wie bei den Fördererelementen sind die Stege der Knetblöcke ebenfalls breiter geworden, die Tiefe ist jedoch sowohl bei Saramet10 als auch Saramet26 geringer geworden.

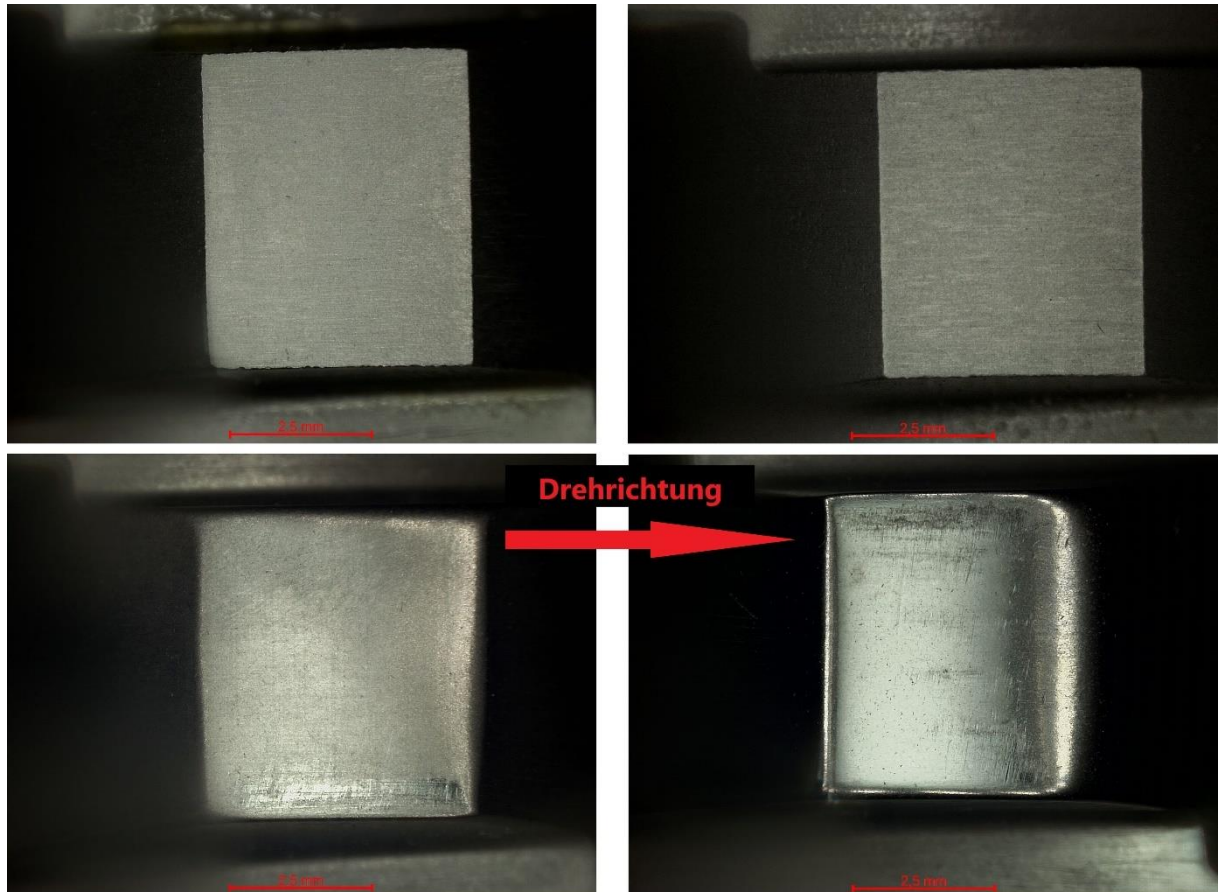


Abbildung 6.7: KBE-Steg M5, Referenz (oben) & eingesetzt (unten), Saramet10 (links) & Saramet26 (rechts)

In den Tälern lassen sich wenig bis gar keine Unterschiede zwischen eingesetzten und nicht eingesetzten Bauteilen erkennen. In Abbildung 6.8 ist der Messpunkt M15 des nicht-eingesetzten (links) und des eingesetzten (rechts) Saramets10 abgebildet. Es ist gut zu erkennen, dass sich die Struktur der Oberfläche kaum verändert hat, wie es bei den Fördererelementen der Fall war. Die Oberfläche des eingesetzten Bauteils weist nur eine höhere Dichte an Kratzern auf. Die glänzendere Optik des eingesetzten Bauteils ist auf eine unterschiedliche Lichtstärke des Mikroskops zurückzuführen. Dies zeigt sich auch bei den Taloberflächen des Werkstoffes Saramet26.

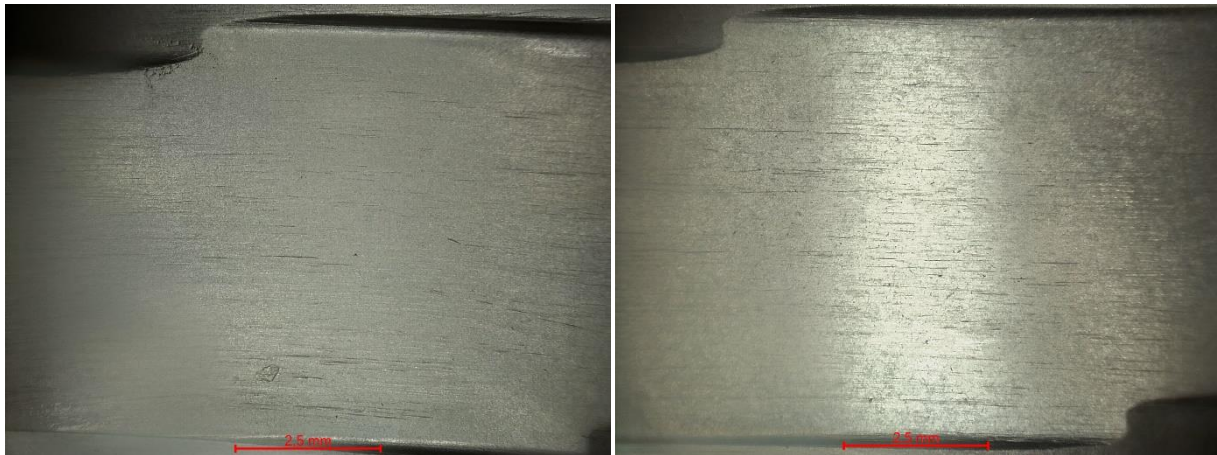


Abbildung 6.8: KBE-Messpunkt M15, Saramet10 Referenz (links) und eingesetzt (rechts)

6.2.3 Einschraubdüsen

Bei den Einschraubdüsen ist der Durchmesser des Einlaufes die wesentliche Messgröße. Der Einlauf der Referenzbauteile ist scharfkantig, somit lässt sich ein Durchmesser messen. Bei den eingesetzten Bauteilen hat sich die Einlaufkante abgerundet, weswegen sich ein Außendurchmesser und ein Innendurchmesser ausmessen lässt. Wie in Abbildung 6.9 zu sehen, hat sich der Einlaufdurchmesser bei den eingesetzten Düsen vergrößert. Von allen Bauteilen wurden die gleichen Messungen auf der Rückseite der Düse am Auslauf getätigt. Dort ist die Aufweitung wesentlich geringer ausgefallen. Während auf der Einlaufseite die Änderung der Durchmesser im hundertstel Mikrometer Bereich lagen, betragen sie auf der Auslaufseite nur ein bis zwei zehntel Mikrometer.

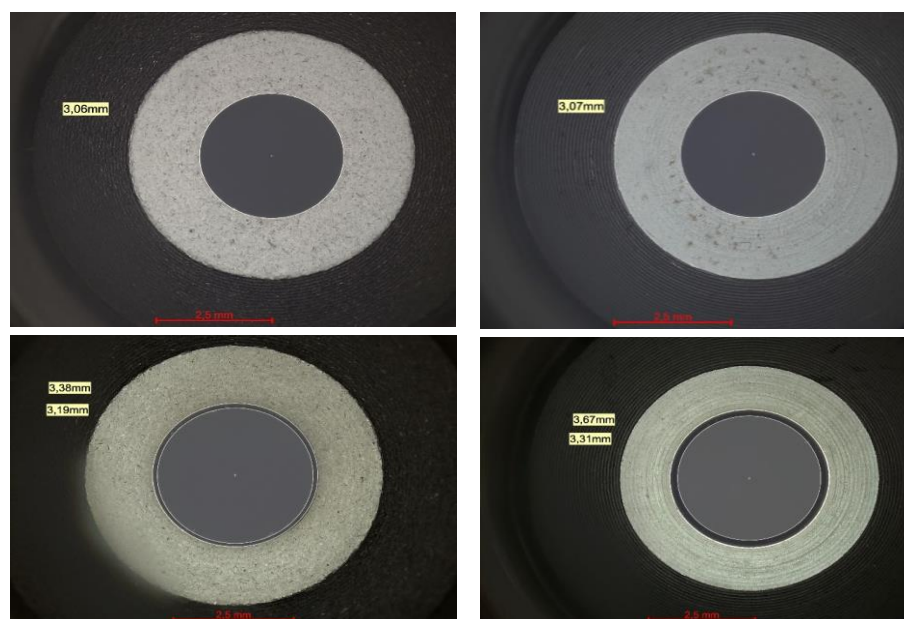


Abbildung 6.9: Einlaufdurchmesser der Einschraubdüsen

7. Wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse

Wie in Kapitel 3 erläutert, wurde bei den Förderelementen und Knetblöcken die Höhe der Messpunkte vor den Versuchen, nach drei, acht und bei dem Saramet10 nach dreizehn Stunden gemessen. Damit beide Werkstoffe vergleichbar sind, wird im Folgenden nur die Höhendifferenz zwischen Ausgang und Behandlung nach acht Stunden verwendet. Dafür wurde die Differenz eines jeden Messpunktes ausgerechnet und daraus der Mittelwert aller vergleichbaren Messpunkte bestimmt. Pro Knetblock und Förderelement ergeben sich somit zwei Mittelwerte, die durchschnittliche Höhendifferenz der Täler und der Stege. Da an jeder Bauteilposition auf der Welle zwei Bauteile im Einsatz waren (linke und rechte Welle) wurde der Mittelwert dieser beiden Teile berechnet. Im Folgenden ist also bei Steg- und Talhöhe immer der Durchschnitt aller Messpunkte und Bauteile, einer Position auf der Extruderwelle gemeint.

7.1 Förderelemente

Förderelemente vor dem Knetblock

Die Förderelemente vor dem Knetblock wurden im Bereich der Füllstoffeinmischung in die Polymerschmelze eingesetzt. Der radiale Abtrag ist an den Stegen deutlich stärker als in den Tälern. So verringerte sich die durchschnittliche Steghöhe der Förderelemente aus Saramet10 um 0,048 mm und die Talhöhe um 0,0036 mm. Bei dem Saramet26 sank die Steghöhe um 0,039 mm und die Talhöhe um 0,0046 mm. Da sich in dem Bereich der Füllstoffeinmischung ein Druck aufbaut, werden Füllstoffpartikel zwischen Steg und Zylinderwand gedrückt, wodurch ein Dreikörpersystem entsteht. Grund- und Gegenkörper bilden dabei Steg und Zylinder, Schmelze und Füllstoff bilden den Zwischenstoff. Der Druck ist nicht so hoch wie beim Ausstoß an der Düse, jedoch sind Füllstoff und Schmelze noch nicht homogen miteinander vermischt, weswegen die Füllstoffpartikel freiliegen und abrasiven Verschleiß bewirken. Der Großteil des Polymerschmelze-Füllstoffgemisches läuft jedoch entlang der Schneckentäler. Dadurch entsteht das in Kapitel 6.2.1 beschriebene Rauheitsprofil der Taloberflächen und Stegflanken. Das Rauheitsmuster zeigt deutlich die Förderrichtung der Füllstoffpartikel, welche den abrasiven Verschleiß hervorrufen. Die Stirnflächen auf der Zulaufseite wurden ebenfalls abgerundet. Das Füllstoff-Schmelze-Gemisch läuft in einer schraubenförmigen Bewegung um die Schnecken in axiale Richtung. Dabei ist die Bewegungsrichtung des Gemisches die gleiche, wie die Drehrichtung überlagert mit einer

Translation in axiale Richtung. Ein Teil des Gemisches läuft dabei nicht nur durch das Tal, sondern vom Tal über den Steg. Dabei verursacht es durch Abrasion die Kantenrundung, welche in der Abbildung 7.1 zu sehen ist.

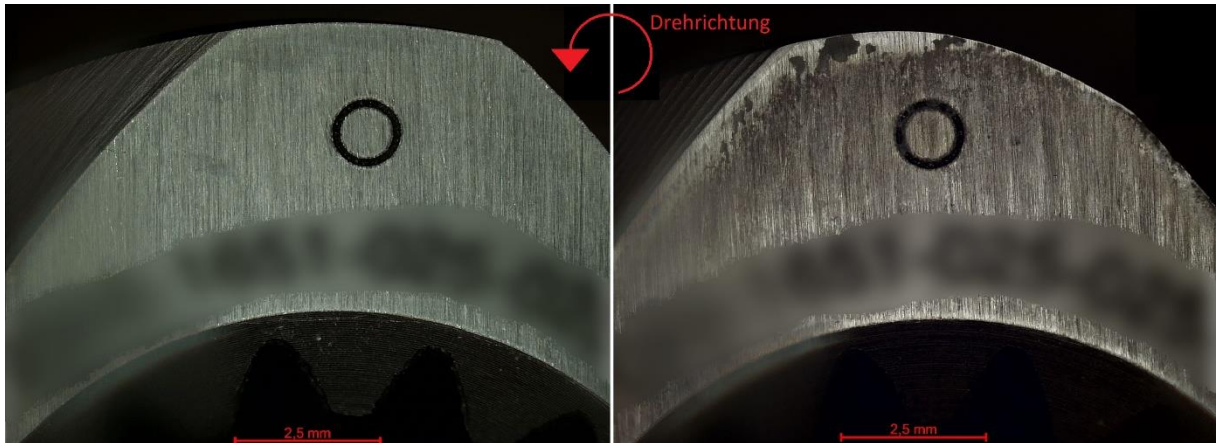


Abbildung 7.1: Vergleich der Kanten vom eingesetztem (rechts) und Referenz-Fördererlement (links)

Es besteht die Möglichkeit, dass der abrasive Verschleiß noch von Korrosion überlagert wurde, der Nachweis ist mit der optischen Auswertung jedoch nicht möglich. Der Korrosionsverschleiß lässt sich jedoch deutlich eingrenzen, da hier keine korrosiv wirkenden Additive verwendet wurden. Das einzige Medium, welches somit noch Korrosion hervorrufen könnte, wäre Restfeuchtigkeit aus dem Füllstoff, die zusammen mit den hohen Temperaturen im Extruder zu chemischen Reaktionen führen. Die Korrosion würde den Verschleiß beschleunigen, da die Korrosionsschicht immer wieder durch den Füllstoff abgetragen wird, sodass sie sich neu bilden kann. In Kapitel 7.4 zeigt sich jedoch, dass die Bauteile aus dem Werkstoff mit höherem Korrosionsschutz (Saramet26) in diesem Bereich einen geringeren Verschleiß erfahren als die Fördererlemente mit besserem Abrasionsschutz (Saramet10). Das deutet darauf hin, dass zu der Abrasion eine Korrosion wirkt, welche den abrasiven Verschleiß deutlich verstärkt. Optisch kann die Korrosion allerdings nicht nachgewiesen werden, da die Abrasion die korrodierte Oberfläche direkt wieder abträgt.

Adhäsiver Verschleiß an den Fördererlementen lässt sich fast vollständig ausschließen. Das Polymer ist zum Zeitpunkt der Füllstoffzugabe bereits aufgeschmolzen und bildet eine schützende Schicht zwischen Fördererlement und Zylinderwand. Auch weisen die Stege ein gleichmäßiges Rauheitsprofil auf, was durch die Abrasivpartikel des Füllstoffes verursacht wurde. Das zeigt, dass sich während der Extrusion zwischen Gehäuse und Steg Füllstoff und damit auch Schmelze befand, welche eine Adhäsion zwischen Gehäuse und Steg verhindern.

Förderelemente vor der Düse

Die Steghöhe bei den Förderelementen vor der Düse, ist beim Saramet10 um 0,34 mm und bei dem Saramet26 um 0,51 mm gesunken. Da der Querschnitt eines Steges in Richtung Förderelementmitte immer breiter wird, ist die Stegbreite beim Saramet10 um 0,52 mm und bei dem Saramet26 um 0,46 mm gestiegen. Die Stege müssen also einen starken radialen Abtrag erfahren haben. In dem Bereich vor der Düse liegen hohe Drücke vor, da sich der Extruderquerschnitt auf den Düsenquerschnitt verringert. Der entstehende Rückstau führt dazu, dass die Polymerschmelze nicht mehr nur zwischen FE-Tal und Zylinderwand fließt, sondern nun auch in die kleinen Zwischenräume zwischen Steg und Zylinderwand gedrückt wird. Dort entsteht ein tribologisches Dreikörpersystem, mit Steg und Zylinder als Grund- und Gegenkörper und Polymerschmelze mit Füllstoff als Zwischenstoff. Der hohe Füllstoffanteil wirkt dabei stark abrasiv auf die Schneckenstege und trägt diese ab. Die Kante, welche sich auf dem Steg auf der Einlaufseite gebildet hat, zeigt an, bis zu welchem Punkt Schmelze und Füllstoff zwischen Steg und Zylinder aufgestaut wurden. In den Tälern sind wie an den Stegen Spuren von abrasivem Verschleiß zu finden. Da die Abrasivpartikel in Förderrichtung über die Taloberfläche gleiten liegt Zweikörperverschleiß vor, der einen geringeren Verschleiß verursacht. Die durch die Abrasivpartikel entstehenden Furchen sind in den Aufnahmen der Täler und den seitlichen Stegaufnahmen zu erkennen. Der vorherrschende Verschleißmechanismus ist also die Abrasion.

Adhäsiver Verschleiß zwischen Steg und Zylinder kann ausgeschlossen werden, da sich auf Grund der Polymerschmelze zwischen ihnen, diese nicht berühren können. Der abrasive Abtrag der Stege erhöht auch nochmal den Abstand zwischen Steg und Zylinderwand. Korrosiver Verschleiß wirkt am Austrag nicht, da korrosiv wirkende Additive schon komplett in die Schmelze eingearbeitet wurden und kaum mit den Förderelementen reagieren. Andere Medien, wie die Restfeuchte im Polymer wurden in der Entgasungszone bereits abgeschieden. Der Bruch an der Stirnseite des rechten Saramet10-Förderelementes erfolgte nicht während dem Prozess. Die Kanten sind scharf und nicht abgerundet was indiziert, dass der Bruch nicht während dem Versuch erfolgte, da die Füllstoffpartikel sonst die Kanten abgerundet hätten. Die Ursachen sind Eigenspannungen im Bauteil, die sich durch den hohen Druck bei der Extrusion aufgebaut haben. Wird das Bauteil nach dem Prozess wieder entlastet, kann es zu solchen Ausbrüchen kommen.

7.2 Knetblöcke

Auch die Stege der Knetblöcke haben eine verschleißbedingte Höhenabnahme erfahren. Beim Saramet10 wurde die Steghöhe um 0,052 mm reduziert, beim Saramet26 um 0,051 mm. Mit der Abnahme der Höhe wurde der Steg wie bei den Förderelementen breiter. Die Knetblöcke wurden im Bereich der Füllstofffeinarbeitung eingesetzt. Die Füllstoffpartikel sind in diesem Bereich noch nicht homogen mit der Schmelze vermischt und treffen somit teilweise direkt auf die Knetblockflächen auf, ohne einen Schmelzfilm, der vor Abrasion schützen kann. Dadurch wurden die Kanten der Knetblöcke abgerundet. Am stärksten vom abrasiven Verschleiß ist die Kante in Drehrichtung der Welle betroffen, hier haben die Füllstoffpartikel eine viel stärkere Kantenrundung bewirkt, da diese Kante aktiv durch die Polymerschmelze und den Füllstoff wälzt, während Füllstoff und Schmelze über die anderen Kanten nur abgleiten. Da der Knetblocksteg nah an der Zylinderwand rotiert und der Druck bei der Füllstofffeinarbeitung steigt, werden Schmelze und Füllstoff zwischen Knetblock und Zylinder gepresst, was zu einem Dreikörperverschleißsystem führt. Dieses System bewirkt den abrasiven Verschleiß der Stegoberfläche, jedoch verhindern Schmelze und Füllstoff einen Kontakt von Knetblock und Extruderzylinder, weswegen kein adhäsiver Verschleiß zwischen diesen auftritt. Die Täler der Knetblöcke weisen nur geringe Verschleißerscheinungen auf, die Oberfläche unterscheidet sich kaum von den Referenzbauteilen (siehe Kapitel 6.2.2). Die Füllstoffpartikel gleiten hier ohne starken radialen Druck über die Oberfläche und bewirken eine leichte Abrasion. Die Höhenänderung beträgt 0,65 µm beim Saramet10 und 0,60 µm beim Saramet26 um fast ein Hundertstel geringer als die Höhenänderung der Stege.

Da der Füllstoff einen Anteil an Feuchtigkeit in den Extruder bringt, ist ein korrosiver Verschleiß im Bereich der Füllstofffeinarbeitung nicht auszuschließen, auch wenn in diesen Versuchen keine korrosiven Additive verwendet wurden. Wie bei den Förderelementen, welche auf der Extruderwelle direkt vor den Knetblöcken saßen, sind auch die Knetblöcke aus Saramet26 weniger verschlissen als die aus Saramet10. Daraus lässt sich schließen, dass auch hier ein korrosiver Verschleiß stattgefunden hat.

7.3 Einschraubdüsen

Die Einschraubdüsen wurden am SKZ vor und nach dem Einsatz gewogen und bei der optischen Auswertung am Lichtmikroskop vermessen. Die Saramet10-Düsen wogen vor der Behandlung 22,8 g, die Saramet26-Düsen 22,1 g. Nach acht Stunden haben die Saramet10-Düsen 0,02 g Masse verloren, die Saramet26 0,06 g. Der Einlaufdurchmesser hat sich dabei

um 0,11 mm (SA10) und 0,26 mm (SA26) aufgeweitet. Dies geschah durch die abrasiv wirkenden Füllstoffpartikel, welche unter hohem Druck durch die Düse gepresst werden. Am Einlauf der Düse ist der Druck sehr hoch, da dort ein Querschnittsprung von großem Querschnitt zu kleinem vorliegt. Dadurch wird einmal die Einlaufkante abgerundet und auch der Düsenkanal aufgeweitet. Der abrasive Verschleiß nimmt allerdings über die Düsenlänge ab, denn die Querschnittsänderung am Düsenaustritt betragen beim Saramet10 nur 0,03 mm und beim Saramet26 nur 0,02 mm. Somit tritt der höchste Verschleiß am Düseneintritt ein und nimmt über die Länge bis zum Austritt ab, wobei er am Düsenaustritt nicht gleich null ist, auch dort reiben die Verschleißpartikel noch Material ab. Adhäsion und Korrosion spielen an den Düsen nur eine untergeordnete Rolle, da zwischen Füllstoff und Düsenoberfläche keine adhäsiven Bindungen entstehen und sowohl Polymer als auch Füllstoff keine korrosive Wirkung auf den Düsenkanal haben.

7.4 Vergleich der Werkstoffe bezüglich ihres Verschleißschutzes

Um den Verschleißschutz der Werkstoffe Saramet10 und Saramet26 zu vergleichen, ist es sinnvoll die Punkte zu betrachten, welche den größten messbaren Verschleiß erfahren haben. Für die Knetblöcke und Fördererlemente sind das, die Abmaße der Stege, also die Steghöhe und Stegbreite und für die Knetblöcke zusätzlich die Stegtiefe. Für die Einschraubdüsen sind die vergleichbaren Messwerte der Einlaufdurchmesser und das Gewicht der Düse. Da alle Bauteile für mindestens acht Stunden unter gleichen Bedingungen eingesetzt wurden, ist dies der Zeitpunkt, bei dem die Werte verglichen werden. Der Saramet10 wurde allerdings dreizehn Stunden im Extruder eingesetzt, weswegen die gemessenen Stegbreiten/-tiefen und Einlaufdurchmesser für diesen Zeitpunkt gelten. Für jedes Bauteil (aus Saramet10) liegt also die Steghöhe/das Düsenengewicht bei null, acht und dreizehn Stunden vor und die Stegbreiten/-tiefen und Düsendurchmesser für null und dreizehn Stunden, daraus kann der fehlende Wert für acht Stunden interpoliert werden. In Tabelle 7.1 sind diese Werte einmal dargestellt, die Werte der Spalte SA10 Breite/Tiefe/D sind dabei die interpolierten. Die Höhen/Gewichte sind dabei eine Differenz zwischen Messwert bei null und bei acht Stunden.

Tabelle 7.1: Messwerte der Bauteile bei acht Stunden Einsatz und aus den Ergebnissen von null und dreizehn Stunden interpolierte Werte (*)

Bauteil/ Abmaße [mm]	SA10 Höhe/Gewicht	SA26 Höhe/Gewicht	SA10* Breite/Tiefe/D	SA26 Breite/Tiefe/D
FE vor KBE	0,048	0,039	1,46	1,44
FE vor Düse	0,341	0,514	1,76	1,90
KBE (Breite)	0,052	0,051	4,78	4,55
KBE (Tiefe)	0,052	0,051	5,31	5,22
Einschraubdüse	0,023	0,060	3,14	3,32

Es zeigt sich, dass in den Bereichen wo reine Abrasion wirkt, der Saramet10 einen deutlich besseren Verschleißschutz bietet als der Saramet26. Diese Bereiche sind die Fördererlemente vor der Düse und die Einschraubdüse selbst. Beim Saramet10 liegen die harten Karbide näher aneinander (siehe 5.2), wodurch die weichere Matrix des Werkstoffes besser von dem Eingriff harter Füllstoffpartikel geschützt wird, dadurch schützt dieser Werkstoff besser vor Abrasion. In den Bereichen der Fülleinarbeitung, wo die zwei anderen Fördererlemente und Knetblöcke gelagert sind tritt nicht nur reiner Abrasionsverschleiß auf. Durch verschiedene Einflussfaktoren (2.2.3) wird die Abrasion von einer Korrosion überlagert. Der Saramet26 bietet auf Grund seines hohen Chromanteils einen besseren Korrosionsschutz, da der Chromanteil hoch genug ist, um eine Passivschicht aufzubauen, die vor Korrosion schützt. Da Korrosion überlagert mit Abrasion den Verschleiß gegenüber reiner Abrasion verstärkt, sind die Bauteile des Saramet26 in den Bereichen der Füllstofffeinarbeitung weniger verschlissen als die Bauteile des Saramet10.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Fördererlemente, Knetblöcke und Einschraubdüsen eines gleichläufigen, dichtkämmenden Doppelschneckenextruders auf die Verschleißarten, die sie bei der Extrusion erfahren, untersucht. Zwei der Fördererlemente waren direkt vor den Knetblöcken im Bereich der Füllstoffzugabe gelagert, die beiden anderen Fördererlemente waren direkt vor der Düse am Austritt gelagert. Jedes Bauteil lag in doppelter Ausführung vor, einmal gefertigt aus Saramet10 und einmal aus Saramet26. Dabei wurden pro Extrusionsversuch nur Bauteile von einem Werkstoff eingesetzt, allerdings liefen beide Versuche unter gleichen Bedingungen ab, lediglich die Bauteile aus Saramet10 wurden fünf Stunden länger eingesetzt. Beide Werkstoffe gehören zur Gruppe der pulvermetallurgischen Stähle und besitzen verschleißschützende Eigenschaften, die durch Gefügeuntersuchungen bestimmt wurden. Die Extrusionsversuche wurden am SKZ durchgeführt, als Polymer wurde Polypropylen in Granulatform verwendet, als Füllstoff Aluminiumoxid in Pulverform.

Die Verschleißmessung der Extruderbauteile erfolgte in zwei Phasen. Die erste Phase fand schon während den Extruderversuchen statt, dort wurden die Bauteile vor den Versuchen, nach drei Stunden, nach acht Stunden und teilweise nach dreizehn Stunden vermessen. Die Messung erfolgte an festgelegten Messpunkten, ermittelt wurde der radiale Abstand zu der Welle, auf die die Bauteile gesteckt wurden. Dadurch konnte der radiale Abtrag an den Messpunkten bestimmt werden. Die zweite Phase der Auswertung erfolgte nach den Extruderversuchen. Die festgelegten Messpunkte wurden unter einem Lichtmikroskop fotografiert und teilweise vermessen. Die vermessenen Messpunkte waren die Stege bei Fördererlementen und Knetblöcken und die Einlauf- und Auslaufdurchmesser der Einschraubdüsen. Die nicht vermessenen Messpunkte waren die Stirnflächen, Täler und Oberflächen der Bauteile.

Auf Basis der Bilder und Messungen wurden die Verschleißformen, welche die Bauteile erfahren hatten, ermittelt. Der hauptsächliche Verschleiß, welcher für den Großteil des Materialabtrages verantwortlich ist, ist die Abrasion. Die Stege wurden alle radial abgetragen, was die Breite der Stege auf Grund der Stegeometrie vergrößerte. Bei den Einschraubdüsen wurde der Düsenkanal aufgeweitet, und die Einlaufkante abgerundet. Die Aufweitung ist auf der Seite des Einlaufes am stärksten und nimmt über die Länge des Kanals bis zum Auslauf ab, ist aber nirgends null. In den Bereichen der Füllstofffeinarbeitung wurde die Abrasion von einer Korrosion überlagert. Die Korrosion kann durch Restfeuchtigkeit im Polymer und

Füllstoff entstehen, obwohl keine korrosiv wirkenden Additive der Extrusion hinzugefügt wurden.

Zum Schluss wurden die beiden Werkstoffe Saramet10 und Saramet26 verglichen. In den Bereichen reiner Abrasion, vor der Düse, bietet der Saramet10 auf Grund seines feineren Gefüges einen deutlich besseren Verschleißschutz. Im Bereich der Füllstoffzugabe, wo die Korrosion zusätzlich wirkt, die Abrasion aber nicht so stark wie vor der Düse ist, bietet der Saramet26 einen besseren Verschleißschutz, da er einen hohen Chromanteil von 26 Gew.-% besitzt und somit eine schützende Passivschicht ausbilden kann.

9. Ausblick

Das Ziel eines Extruderwerkzeuges (FE, KBE, Düse) ist, unter Einhaltung der geforderten Werkstückqualität, möglichst lange eingesetzt werden zu können. Der Verschleißschutz des Werkstoffes, aus dem die Werkzeuge gefertigt werden, ist dabei ein wichtiger Parameter. Die in dieser Arbeit vorgenommenen Versuche haben gezeigt, dass selbst Werkstoffe die von sich aus schon einen guten Verschleißschutz durch ein feines Gefüge aus harten Karbiden, oder eine Passivschicht durch Chrom mitbringen, anfällig für verschiedene Verschleißformen sind. Zwar war der Füllstoffanteil während der Extrusion sehr hoch gewählt, jedoch ist es das Ziel Bauteile zu entwickeln, welche auch unter harten Bedingungen einen guten Verschleißschutz bieten. Dabei reicht die alleinige Auswahl oder Herstellung eines verschleißresistenten Werkstoffes nicht aus. Für einen besseren Verschleißschutz müssen die Oberfläche der Bauteile durch das Herstellen harter, verschleißresistenter Schichten modifiziert werden. Des Weiteren bietet der modulare Aufbau der Extruderschnecken, von gleichsinnig drehenden Doppelschneckenextrudern die Möglichkeit, Bauteile aus verschiedenen Werkstoffen und mit verschiedenen Oberflächenschichten an verschiedenen Schneckenpositionen einzusetzen, sodass die Bauteile möglichst lange verwendet werden können.

10. Literaturverzeichnis

- Baur, Erwin; Drummer, Dietmar; Osswald, Tim A.; Rudolph, Natalie (2022): Saechtling Kunststoff-Handbuch. 32., aktualisierte Auflage. München: Hanser.
- Bhushan, Bharat (2013): Principles and applications of tribology. Second edition. Chichester, West Sussex, UK: Wiley (Tribology series).
- BLECK, M. (2017): HANDBUCH STAHL. [Place of publication not identified]: CARL HANSER Verlag GMBH &.
- Eisenwerkstoffe. Stahl und Gusseisen : Hans Berns (2013). Berlin: Springer.
- Greif, Helmut; Limper, Andreas; Fattmann, Gordon (2018): Technologie der Extrusion. 2., aktualisierte und neu bearbeitete Auflage. München: Hanser.
- Hakami, Ferial; Pramanik, Alokesh; Basak, Animesh Kumar (2022): Tribology of Elastomers. Singapore: Springer Nature Singapore.
- Hopmann, Christian; Greif, Helmut; Wolters, Leo (2021): Technologie der Kunststoffe. Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser.
- KLOCKE, FRITZ (2018): FERTIGUNGSVERFAHREN. Giesen, pulvermetallurgie, additive manufacturing. [Place of publication not identified]: MORGAN KAUFMANN.
- Kohlgrüber, Klemens (2016): Der gleichläufige Doppelschneckenextruder. Grundlagen, Technologie, Anwendungen. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser.
- Mennig, Günther (2007): Verschleiß in der Kunststoffverarbeitung. Phänomene und Schutzmaßnahmen. Neuauf. München: Hanser, Carl.
- Saar Pulvermetall GmbH (2023): Saramet (SAM). PM-Stähle. Werkstoff-Datenblatt.

Eidesstattliche Versicherung:

Brall, Felix

193683

Name, Vorname

Matrikelnummer

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Projektarbeit mit dem Titel „*Thema einfügen*“ selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Essen, 20.10.2023

Felix Brall

Ort, Datum

Unterschrift

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -) Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft. Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen. Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Essen, 20.10.2023

Ort, Datum

Felix Brall

Unterschrift

Erlaubnis der weiteren Verwendung durch den Lehrstuhl:

Brall, Felix

193683

Name, Vorname

Matrikelnummer

Hiermit räume ich dem „Lehrstuhl für Werkstofftechnologie“ der Technischen Universität Dortmund ein, die Inhalte dieser Arbeit unter Einhaltung eventuell vorgegebener Sperrfristen wissenschaftlich zu nutzen und öffentlich zu machen.

Essen, 20.10.2023

Felix Brall

Ort, Datum

Unterschrift