

Untersuchung und Entwicklung verschleißminimierender Maßnahmen bei der Verarbeitung von Wood Plastic Compounds (WPC)

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 26638 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Autoren

Prof. Dr.-Ing. **F. Pöhler**, B. Eng. **C. Bohnert**, Dipl.-Ing. (FH) **D. Braun**,
B. Eng. **S. Klotz**, Dipl.-Ing. (FH) **A. Sehi**; *Hochschule Karlsruhe*
Dr. **M. Schulte**; *Werzalit GmbH + Co. KG, Oberstenfeld*

März 2011

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az 26638 – 21/0	Referat	Fördersumme	124.612,- €
Antragstitel Verminderung der Umweltbelastung durch verschleißminimierende Maßnahmen bei der Verarbeitung von Wood Plastic Compounds (WPC)			
Stichworte			
Laufzeit 26 Monate	Projektbeginn 01.10.2008	Projektende 31.12.2010	Projektphase(n)
Zwischenberichte:		alle 6 Monate Kurzbericht	
Bewilligungsempfänger		Tel	07062/50355
Werzalit GmbH + Co. KG Gronauer Str. 70 71720 Oberstenfeld		Fax	07062/50324
		Projektleitung	
		Dr. M. Schulte	
		Bearbeiter	
Kooperationspartner		Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik Herr Prof. Pöhler Moltkestr. 30 76133 Karlsruhe	
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens			
<p>„Wood Plastic Composites“ (WPC) oder auch „Holz-Polymer-Werkstoffe“ gewinnen auf dem deutschen und europäischen Markt immer mehr an Bedeutung. Es handelt sich dabei um Mischungen aus thermoplastischen Kunststoffen und Holzpartikeln, die durch ihre Fließfähigkeit in Verfahren verarbeitet werden können, die ursprünglich aus der Kunststoffindustrie stammen. Die Hauptanwendungsbereiche für WPC-Produkte sind Verandaböden bzw. „Decking“.</p> <p>Bei der typischen Verarbeitung von WPC auf gegenläufig arbeitenden Doppelschneckenextrudern ist festzustellen, dass die Lebensdauer der Verfahrenseinheiten (Schnecken + Zylinder) gegenüber der Verarbeitung von PVC drastisch reduziert ist (im Extremfall auf nur 10-20 %). Ebenso ist der spezifische Energieverbrauch von Extrudern (Energieeinheit je kg aufgeschmolzenem Material) deutlich erhöht (bis zu 50 %) und die tatsächlich mögliche Extruderleistung deutlich erniedrigt.</p> <p>Ziel des Projektes ist die messtechnische Erfassung von Prozessparametern bei der Verarbeitung von Holz-Polymer-Werkstoffen (WPC) in Doppelschneckenextrudern, die einen signifikanten Einfluss auf das Verschleißverhalten von Verfahrenseinheiten haben. Dadurch sollen Einflussparameter identifiziert werden, mit deren Hilfe die Lebensdauer der Verfahrenseinheiten deutlich verlängert und die spezifische Energie deutlich verringert werden kann.</p>			
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden			
<p>Da der hohe Verschleiß bei der Verarbeitung von WPC nach bisherigen Erkenntnissen vor allem durch Adhäsion zwischen Schnecken und Zylinder (hohe Spreizkräfte) hervorgerufen werden, wurde dieses Phänomen primär untersucht. Anerkannte Verfahren zur Verschleißmessung oder –simulation an gleichlaufenden Doppelschneckenextrudern sind nicht bekannt. Daher wurden folgende Verfahren auf Ihre Eignung hin untersucht:</p> <p>1.) Es wurde ein instrumentierter Kalandar zur Beurteilung von Spreizkräften eingesetzt. 2.) Es wurde eine Energiebilanz erstellt mit dem Ziel der qualitativen Unterscheidung von hohem und niedrigem Energieverbrauch durch Reibung zwischen Schneckenstegen und Zylinder. Diese wurde mit realen Messungen an Produktionsextrudern unterlegt. 3.) Es wurden verteilt über die Länge des Extruders die Druckverläufe im Extruder zur Erkennung absoluter, gemittelter Werte und zur Erkennung radialer Schneckendrücke an der Zylinderwand, aufgenommen. Dies erfolgte im Vergleich von einem Standardextruder mit einem verschleiß-optimierten Extruder. 4.) Es wurden tribologische Untersuchungen zur Bestimmung des abrasiven und korrosiven Verschleißverhaltens durchgeführt.</p>			
Deutsche Bundesstiftung Umwelt ● An der Bornau 2 ● 49090 Osnabrück ● Tel 0541/9633-0 ● Fax 0541/9633-190			

Ergebnisse und Diskussion

Die Versuche am instrumentierten Kalandrier waren leider nicht erfolgreich. Durch das Fehlen der Zwangsförderung kam es, entgegen bestehender Literaturquellen, zu keinen aussagefähigen Kennwerten. Das WPC-Material tanzte auf dem Kalandrierspalt ohne wirklich aufgeschmolzen zu werden.

Die Aufstellung der Energiebilanz führte zu der Erkenntnis, dass nur 25-28% der Energie für das Aufschmelzen des WPC-Compounds verwendet wird. Der größte Teil der Energie geht durch Abwärme verloren. Der spezifische Energieverbrauch nimmt mit steigendem Extruderdurchsatz ab. Die Energiebilanz konnte nicht zur Beurteilung des Verschleissverhaltens eingesetzt werden, da die Reibungsenergie zwischen Steg und Zylinder die Systemgrenzen des aufgestellten Energiemodells nicht überschreitet.

An Produktionsextrudern konnten aufschlussreiche Druckkurven über die Länge der Extruder und im Vergleich von verschleissstarken Positionen und verschleissarmen Positionen ermittelt werden. Die Optimierung der Schnecken-geometrie an einem Versuchsextruder führte zu signifikanten Druckunterschieden und zu deutlich erhöhten Standzeiten der Verfahreseinheit. Signifikante Unterschiede zwischen Einflussparametern der Rezeptur und der Granulatgröße konnten dagegen nicht ermittelt werden. Mit einer Modellbildung zur Druckzustandsbeschreibung in den einzelnen Extruderzonen wurde begonnen. Hierzu sind jedoch noch zahlreiche Messungen und Modellbildungen in weiteren Projekten notwendig.

Die tribologischen Untersuchungen haben im Vergleich von glasfasergefülltem PP, unmodifiziertem PP und WPC nachgewiesen, dass korrosiver und abrasiver Verschleiss bei aufgeschmolzenem WPC nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt.

Die Standzeit der optimierten Verfahreseinheit konnte im Projekt gegenüber der unmodifizierten Einheit nachweislich um den Faktor 3 erhöht werden. Weitere Potentiale liegen vor, da das Verschleissbild sich nun deutlich verschoben hat. Die stark modifizierten Schneckenbereiche sind immer noch gering verschlissen, die wenig modifizierten Bereiche werden zum limitierenden Faktor. Durch die längere Standzeit können ca. 2,5 Verfahreseinheiten im Jahr eingespart werden. Dies führt allein durch die Einsparung der im Stahl enthaltenen Energie zu einer Einsparung je Produktionslinie von 8,2 MWh/a. Dazu kommt die eingesparte Energie zur Bearbeitung des Stahls bis zur fertigen Verfahreseinheit.

Die Ausstoßleistung auf einem Extruder mit 90 mm Durchmesser konnte im Projekt von 170 kg/h auf 230 kg/h erhöht werden. Die berechneten Kennwerte zeigen, dass dadurch die spezifische Energie [kWh/kg Material] um ca. 10% reduziert werden kann. Ebenso wird der spezifische Energieverbrauch positiv durch den Einsatz von Gleitmitteln beeinflusst. Dadurch konnte der Verbrauch um bis zu 25 % reduziert werden. Ein ähnlicher positiver Einfluss lässt sich durch den Einsatz sehr dünnflüssigen PP's erzielen. Dies zeigt die Potentiale der einzelnen Einflussparameter. Die Betrachtung erfolgte allerdings ohne Berücksichtigung der Extrusionsqualität. Diese schränkt die Anwendung o.g. Einflussparameter teils wieder erheblich ein.

Durch eine gute Zusammenarbeit der Projektpartner konnten die anvisierten Untersuchungsziele erreicht werden. Da keine etablierten Methoden bekannt waren, mussten zwangsläufig mehrere Wege beschritten werden um zum Ziel zu gelangen. Einige der Arbeitspakete konnten verkürzt werden. Z.B. die Kalandrieruntersuchungen stellten sich als unbrauchbaren Weg dar. Die tribologischen Untersuchungen konnten reduziert werden, da keine Erkenntnisse zum Spreizverhalten des Materials zu erwarten waren. Die Untersuchungen am kleinen, instrumentierten Extruder konnten ganz fallen gelassen werden, da sie als Vorstufe zu den Untersuchungen am großen Extruder überflüssig wurden. Dagegen haben die Untersuchungen am Standardextruder und am verschleiss-optimierten Extruder deutlich mehr Zeit und Raum eingenommen. Hier waren die umfangreichsten Erkenntnisse zu gewinnen.

Durch diese Faktoren haben sich die Aufwendungen für ‚Fremdleistungen‘ und ‚Reisekosten‘ deutlich reduziert.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt wurde von Prof. Pöhler auf der VDI-Jahrestagung am 16. Juni 2011 in Bonn als Vortrag und Posterpräsentation vorgestellt.

Fazit

Das Projekt hat zu zahlreichen bisher nicht verfügbaren Erkenntnissen über die Verarbeitung von WPC geführt. Von allen untersuchten Methoden zur Beurteilung des Verschleissverhaltens ist die Druckmessung am vielversprechendsten. Dennoch sind noch zahlreiche Untersuchungen und Erklärungsmodelle in zukünftigen Projekten zu entwickeln, um die Druckmessung als Regelgröße zur Verschleissmessung zu etablieren. Sollte dies gelingen, so ergeben sich dadurch unabhängig von dem Einsatz des WPC Chancen, den gegenläufigen Doppelschneckenextruder weiter energetisch und verfahrenstechnisch zu optimieren.

Es konnten hohe Energie-Einsparpotentiale bei der Verarbeitung von WPC ermittelt werden. In Folgeprojekten muss deren Umsetzbarkeit in WPC-Rezepturen und Verfahrenparameter zur Herstellung von Produkten mit marktgerechten Eigenschaften getestet werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	- 1 -
Abbildungsverzeichnis.....	- 3 -
Tabellenverzeichnis.....	- 4 -
Nomenklatur.....	- 5 -
1 Zusammenfassung.....	- 6 -
2 Einleitung.....	vii
3 Hauptteil – Durchführung und Ergebnisse.....	11
3.1 Versuche mit instrumentiertem Kalandar.....	11
3.1.1 Einleitung.....	11
3.1.2 Versuchsdurchführung.....	11
3.1.3 Ergebnisse.....	13
3.2 Vorversuche auf gegenläufigen Labor-Doppelschneckenextruder.....	14
3.3 Theoretische Modellbildung - Energiebilanzierung.....	14
3.3.1 Modellerstellung.....	14
3.3.2 Energie- und Massenbilanz.....	15
3.3.3 Einbindung der Messergebnisse in die Energiebilanz.....	15
3.3.4 Ansatz zum Bestimmen des Verschleißes.....	19
3.4 Durchführung Versuche auf Produktionsextruder (Extruder 1).....	21
3.4.1 Vorgehensweise.....	22
3.4.2 Auswertung.....	25
3.4.3 Fazit der Auswertung.....	32
3.4.4 Stegposition über den Druckverlauf.....	33
3.5 Durchführung auf Produktionsextruder mit veränderter Schneckengeometrie (Extruder 2).....	37
3.5.1 Auswertung.....	37
3.5.2 Fazit der Auswertung.....	44
3.5.3 Flächenvergleich Extruder 1 und 2 (Integral der Druckkurven).....	46
3.6 Tribologische Untersuchungen.....	48

3.6.1	Verschleißmessgrößen	48
3.6.2	Untersucht Proben	48
3.6.3	Ergebnisse der Untersuchung	49
3.6.4	Bewertung	50
3.6.5	Einschränkende Faktoren	50
4	Ökologische Bewertung.....	50
5	Fazit	52
6	Literaturverzeichnis.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Stark abgenutzte Schnecken, adhäsiver Verschleiß durch Spreitzkräfte	viii
Abbildung 2-2: Zylinderinnenwände mit starken Verschleißspuren	viii
Abbildung 3-1: Kalender Prüfstand	12
Abbildung 3-3: Darstellung von aufgenommener Leistung durch den Werkstoff, Massendurchsatz und spezifischer Energie in Abhängigkeit der Drehzahl.	18
Abbildung 3-4: Sankey-Diagramm des Extrusionsprozesses (Qualitative Größen)	20
Abbildung 3-5: Prinzipskizze der Drucksensorenverteilung über den Extruder 1	24
Abbildung 3-6: Sensorposition am Extruder.....	27
Abbildung 3-7. Druckverlauf der Variante 1: Standardmaterial mit einem Durchsatz C von 230 kg/h, n=21 1/min (Bezeichnung: Versuch 04_1, Oben: Sensor 3 und 4, Unten: Sensor 5 und 6)	29
Abbildung 3-8. Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 100 kg/h	30
Abbildung 3-9. Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 153 kg/h	31
Abbildung 3-10. Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 230 kg/h	32
Abbildung 3-11: Messeinrichtung (rechts), Skizze der Sensorposition 3 mit der Null-Stellung	33
Abbildung 3-12. Stegposition mit Druckverlauf der Variante 1: Standardmaterial mit einem Durchsatz B von 150kg/h, n=11 1/min (Druckversuchsbezeichnung: Versuch 2010-11-10_Nr03 mit Sensor 3 und 4).....	34
Abbildung 3-13. Druckverlauf der Variante 1 mit eingezeichneten Schneckenstellungen (Standardmaterial, Versuch 2010-11-10_Nr03, Durchsatz 150 kg/h, n=11 1/min, Sensor 3 und 4)	35
Abbildung 3-15. Druckmittelwertvergleich von Sensor 3 der Extruderlinien.....	40
Abbildung 3-16. Druckmittelwertvergleich von Sensor 5 der Extruderlinien.....	40
Abbildung 3-17: Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 100 kg/h	42
Abbildung 3-18: Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 153 kg/h	43
Abbildung 3-19: Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 230 kg/h + 3 % MFI	44
Abbildung 3-20. Druckmittelwertvergleich Extruder 1 zu 2 mit den Sensoren 3 und 5.....	46
Abbildung 3-21: Flächenvergleich Druckmessungen Extruder 1 und 2 für eine Umdrehung bei gleicher Drehzahl (Integral der Druckkurven)	47
Abbildung 3-22: Masse und Volumenverlust der geprüften Plättchen nach 45kg Schmelzedurchsatz.....	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Versuchsmatrix der Kalanderversuche	12
Tabelle 3-2: Maximalwerte der Spreizkräfte	13
Tabelle 3-3: Thermische Eigenschaften der einzelnen Komponenten des Granulats	16
Tabelle 3-4: Berechnung der benötigten Leistungen zum Aufschmelzen des WPC-Werkstoffes	16
Tabelle 3-5: Rechnerisch ermittelte Größen	17
Tabelle 3-6: Versuchsmatrix der Druckmessung	21
Tabelle 3-7: Materialzusammensetzung der Versuchsreihen	22
Tabelle 3-8: Leistungsübersicht des Extruders 1	26
Tabelle 3-9: Gemittelter Druck über die Messreihe	27
Tabelle 3-10: Übersicht der Sensor- zu Stegposition bei einer 180° Umdrehung (Zone 5)	36
Tabelle 3-11: Druckverlaufmerkmale in der Zone 4	36
Tabelle 3-12: Leistungsübersicht des Extruders 2	38
Tabelle 3-13: Gemittelter Druck über die Messreihe	39
Tabelle 3-14: Druckdifferenzen pro Schneckenumdrehung der einzelnen Varianten	41
Tabelle 3-15: Untersuchte Formmassen	48
Tabelle 3-16: Ergebnisse der gravimetrischen Auswertung nach Schmelzedurchsatz	49

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

b	mm	Breitenmaß
b_{Glas}	mm	Kurze Frontscheibenseite
b_m	mm	Zweifache Abklinglänge
c_1	mm	Zuschlag Wanddickenunterschreitung

Griechische Formelzeichen

α	°	Winkelmaß
β	°	Winkelmaß
δ_p	$\mu\text{m}/\text{N}$	Plattennachgiebigkeit

Indizes

a	Außen
eff	Effektiv
i	Innen
max	Maximal

Besondere Zeichen

$\alpha^{1.0}$	Name einer Baureihenversion
$\beta^{1.0}$	Name einer Baureihenversion

Abkürzungen

.neu	Pro/Engineer Neutrale Datei
.step	Standard for the exchange of product model data
1K	Einkomponentensystem
2H	2- Hand bzw. 2-Handschuhstutzen

1 Zusammenfassung

Wood Plastic Composites' (WPC) oder auch ‚Holz-Polymer-Werkstoffe‘ gewinnen immer mehr an Bedeutung. Es handelt sich um fließfähige Mischungen aus thermoplastischen Kunststoffen und Holzpartikeln, verarbeitet mit Verfahren der Kunststoffindustrie. Die Hauptanwendungsbereiche für WPC-Produkte sind Terrassendielen.

Der überwiegende Teil der hergestellten WPC-Profile wird auf gegenläufig arbeitenden Doppelschneckenextrudern hergestellt. Bei diesem Verarbeitungsschritt zeigt die Erfahrung, dass die Lebensdauer der Verfahrenseinheiten (Schnecken + Zylinder) gegenüber der Verarbeitung von PVC drastisch reduziert ist. Bekannt ist, dass der spezifische Energieverbrauch [kWh/kg] deutlich erhöht ist. Beides führt zu einem deutlich erhöhten Verschleiß.

Ziel des Projektes war die messtechnische Erfassung von Prozessparametern bei der Verarbeitung von WPC in Doppelschneckenextrudern, die einen signifikanten Einfluss auf das Verschleißverhalten von Verfahrenseinheiten haben. Der Verschleiß durch Adhäsion zwischen Schnecken und Zylinder, hervorgerufen durch hohe Spreizkräfte, wurde vornehmlich untersucht. Dazu wurden folgende Verfahren angewandt: 1.) Ein instrumentierter Kalandar zur Beurteilung von Spreizkräften; 2.) Eine Energiebilanz mit dem Ziel der qualitativen Unterscheidung von hohem und niedrigem Energieverbrauch durch Reibung zwischen Schneckenstegen und Zylinder; 3.) Die Aufnahme von Druckverläufen im Extruder zur Erkennung radialer Schneckendrücke an der Zylinderwand; 4.) Tribologische Untersuchungen.

Die Methode 1.) war leider nicht erfolgreich. Durch das Fehlen der Zwangsförderung im Kalandar kam es zu keinen aussagefähigen Kennwerten. Die Methode 2.), führte zu der Erkenntnis, dass nur 25-28% der Energie für das Aufschmelzen des WPC-Compounds verwendet wird. Der größte Teil der Energie geht dagegen durch Abwärme verloren. Der spezifische Energieverbrauch nimmt mit steigendem Extruderdurchsatz ab. Da die Reibungsenergie zwischen Steg und Zylinder die Systemgrenzen des aufgestellten Energiemodells nicht überschreitet, konnte die Energiebilanz nicht zur Beurteilung des Verschleißverhaltens eingesetzt werden. Mit der Methode 3.) konnten aufschlussreiche Druckkurven über die Länge der Extruder und im Vergleich von verschleissstarken Positionen und verschleissarmen Positionen ermittelt werden. Eine Optimierung der Schneckengeometrie führte zu signifikanten Druckunterschieden und zu deutlich erhöhten Standzeiten der Verfahrenseinheit. Signifikante Unterschiede zwischen Einflussparametern der Rezeptur und der Granulatgröße konnten dagegen nicht ermittelt werden. Mit einer Modellbildung zur Druckzustandsbeschreibung in den einzelnen Extruderzonen wurde begonnen. Hierzu sind jedoch noch zahlreiche Messungen und Modellbildungen in weiteren Projekten notwendig. Die tribologischen Untersuchungen aus Methode 4.) haben im Vergleich von glasfasergefülltem PP, unmodifiziertem PP und WPC nachgewiesen, dass korrosiver und abrasiver Verschleiß bei aufgeschmolzenem WPC nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt.

Das Projekt wurde durch die Projektpartner Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik und der Werzalit GmbH+Co. KG unter dem Aktenzeichen 26638 durchgeführt. Als assoziierter Partner fungierte die KraussMaffei Technologies GmbH.

2 Einleitung

Wood Plastic Composites (WPC) sind Holz-Polymer-Werkstoffe aus dem natürlichen Polymer „Holz“ in Kombination mit dem synthetischen Polymer „Kunststoff“. Lassen sich nach dieser Definition eine Vielzahl von Werkstoffen vorstellen, zu denen im weitesten Sinne auch Spanplatten, Sperrholz oder Polymerholz gehören, so werden unter dem Begriff WPC in den letzten Jahren vor allem Holzwerkstoffe verstanden, die aus einer Mischung von Holzpartikeln und Thermoplasten hergestellt werden (z.B. Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) oder Polyvinylacetat (PVC)). Durch diese Mischung erhält man Holzwerkstoffmaterialien, die durch ihre Fließfähigkeit (in warmen Zustand) in Verfahren eingesetzt werden können, die ursprünglich aus der Kunststoffindustrie stammen. In den USA hat sich diesbezüglich seit ca. 15 Jahren eine Industrie entwickelt, die deutliche Zuwachsraten aufweist. Seit ca. 8 Jahren hat auch in Europa und Deutschland die Anzahl installierter Anlagen stetig zugenommen.

Die Hauptanwendungsbereiche sind in Nordamerika Terrassen- und Verandenböden und auch in Europa hat das Produkt ‚Decking‘ erst den mengenmäßigen Durchbruch für WPC-Produkte gebracht, wengleich die Differenzierung zwischen den Produkten weiter voran schreitet als in Amerika.

Bei der Herstellung von WPC lassen sich im Vergleich zu reinem Kunststoff durch die Kombination von Thermoplasten mit Holz technologisch unter anderem folgende Eigenschaften verbessern.

- Erhöhung der Steifigkeit (E-Modul);
- Erhöhung der Festigkeit (Biege-, Zug- und Schraubenauszugsfestigkeit)
- Erhöhung Wärmeformbeständigkeit
- Verringerung des Kriechverhaltens

Gegenüber Vollholz und klassischen Holzwerkstoffen lassen sich in einem Arbeitsgang zwei- und dreidimensional geformte Produkte mit geringen Wandstärken und funktionalen Elementen herstellen.

Aus ökologischer Sicht wird es möglich, bis zu 80 % des thermoplastisch zu verarbeitenden Werkstoffes aus Holz herzustellen. Das bedeutet, dass bis zu 80 % des Rohöl basierten Rohstoffes ‚Thermoplast‘ ersetzt wird durch den nachwachsenden, CO₂-neutralen Rohstoff Holz. Speziell im Bereich der Decking-Profile ist es zudem möglich durch hohe Witterungsbeständigkeit der WPC-Produkte Tropenholz als Deckingmaterial abzulösen.

Der überwiegende Teil der in Europa hergestellten Decking-Profile wird auf gegenläufig arbeitenden Doppelschneckenextrudern hergestellt. Ursprünglich für die Verarbeitung von PVC eingesetzt hat sich diese Technologie, bei der das zu verarbeitende Material durch zwei sich gegenläufig drehende Schnecken aufgeschmolzen, komprimiert und unter hohem Druck extrudiert wird, auch für die Verarbeitung von WPC's etabliert.

Die bei den Extrudern eingesetzte Verfahrenseinheit, bestehend aus dem Zylinder und den sich darin drehenden Schnecken, bildet das Herzstück eines Extruders. Schätzungsweise 30%-40% der Anschaffungskosten müssen für dieses Bauteil ausgegeben werden.

Da in der Verfahrenseinheit hohe Scherkräfte eingebracht werden um den Thermoplast aufzuschmelzen, ist dieses Bauteil in jedem Fall ein Verschleißteil, welches nur eine endliche Lebensdauer besitzt und dann ausgewechselt werden muss. Nun ist bei der Verarbeitung von WPC festzustellen, dass die Lebensdauer dieser Verfahrenseinheit gegenüber der Verarbeitung von PVC drastisch reduziert ist. Die Lebensdauer nicht speziell gehärteter, und damit sehr teurer Verfahrenseinheiten, beträgt schätzungsweise nur 10 – 20 % der Lebensdauer bei der Verarbeitung von PVC! Dieser Sachverhalt ist bisher nicht dokumentiert worden, er ist in der WPC-verarbeitenden Branche jedoch hinlänglich bekannt.

Bekannt ist auch, dass der spezifische Energieverbrauch von Extrudern (Energieeinheit je kg aufgeschmolzenem Material) deutlich erhöht ist und die tatsächlich mögliche Extruderleistung deutlich gegenüber der Verarbeitung von PVC erniedrigt ist. So wiesen die bisher bekannten Informationen darauf hin, dass der spezifische Energieverbrauch um bis zu 50 % erhöht und die Ausstoßleistung um bis zu 50 % erniedrigt ist. Beide Faktoren sind dabei eng mit dem erhöhten Verschleiß verknüpft. Verschleißbilder deuten darauf hin, dass durch hohe Spreizkräfte beim Aufschluss des WPC's die Schnecken an die Innenwand der Zylinder gepresst werden, dort reiben und zu erhöhtem Energieverlust führen.

Zur Zeit behilft sich die WPC-verarbeitende Industrie damit, sehr hochwertig veredelte Stähle für die Beschichtung der Schnecken und Zylinder einzusetzen. Diese so genannte ‚Bimetall-Lösung‘ führt dazu, dass Lebensdauern der Verfahrenseinheiten erreicht werden können, die an die Lebensdauer bei der Verarbeitung von PVC heranreichen, wenngleich dort nur nitrierter Stähle eingesetzt werden.

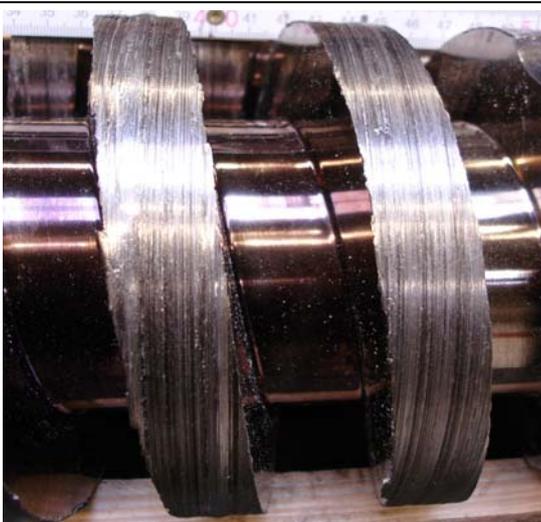


Abbildung 2-1: Stark abgenutzte Schnecken, adhesiver Verschleiß durch Spreitzkräfte

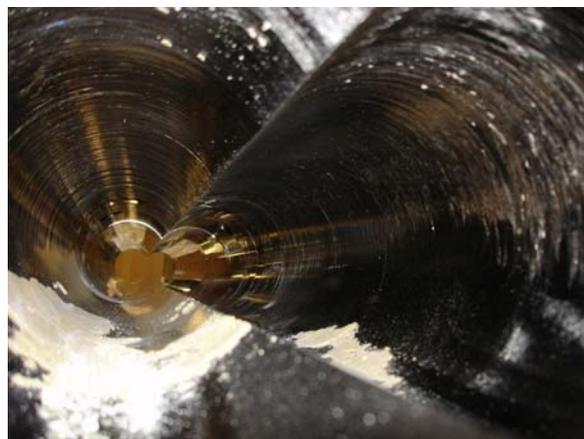


Abbildung 2-2: Zylinderinnenwände mit starken Verschleißspuren

Dies führt zu Mehrkosten je Verfahrenseinheit von 50 % - 100 %. Dies führt zu unnötigem Ressourcenverbrauch bei der Herstellung der hochwertigeren Verfahrenseinheiten. Es ändert nichts an dem erhöhten spezifischen Energieverbrauch bei der Verarbeitung von WPC's und der reduzierten Ausstoßleistung. Und es eröffnet keine Möglichkeit zur Verbesserung der Situation, weil damit nach wie vor die Ursachen für den hohen Verschleiß unbekannt bleiben.

Mögliche Einflussfaktoren um das Verschleißverhalten bei der WPC-Herstellung zu beeinflussen, können sein: Die Temperaturführung im Extruder, die Partikelgröße der eingesetzten Holzspäne, die Viskosität des eingesetzten Thermoplasts, die Größe des Granulates bzw. Compounds (der Vormischung aus Thermoplast und Holz wie sie dem Extruder zugeführt wird) und die Geometrie der Extruderschnecken. Welche dieser Faktoren einen signifikanten Einfluss haben, soll im beantragten Projekt ermittelt werden.

Mit einer Lösung dieser Problematik werden neben dem ökonomischen Gesichtspunkt (Anlagenauslastung) auch ökologische Punkte wie Maschinenstandzeit und Ressourcenschonung (Energieverbrauch) erreicht.

Ziel des Projektes ist die messtechnische Erfassung von Prozessparametern bei der Verarbeitung von Holz-Polymer-Werkstoffen (WPC) in Doppelschneckenextrudern, die einen signifikanten Einfluss auf das Verschleißverhalten von Verfahrenseinheiten haben. Durch die Erfassung der signifikanten Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen wird versucht Strategien zu entwickeln, wie der Verschleiß bei der Verarbeitung von WPC verringert werden kann.

Dies soll zur

- Signifikante Erhöhung der Standzeit von Extruderschnecken führen (Potential Faktor 10);
- Reduzierung der Verlustleistung bzw. der Erhöhung der Energieeffizienz führen;
- Möglichkeit führen, einfachere Extruderschnecken mit geringerem Herstelleraufwand (nitriert/gepanzert) einzusetzen;
- Reduktion der Produktionskosten führen und damit zur Steigerung der Konkurrenzfähigkeit von WPC.

Welches Potential zur Energieeinsparung erarbeitet werden kann, soll folgende Berechnung zeigen: Die Standzeit der Verfahrenseinheiten (Schnecken und Zylinder) eines Extruders sollen deutlich verlängert werden. Es wird angenommen, dass nach gegenwärtiger Technik 3 Garnituren an Schnecken und Zylinder pro Anlage und Jahr notwendig sind. Wenn nun von einer zukünftigen Standzeit über 2 Jahren pro Garnitur ausgegangen wird, spart dies 2,5 Einheiten pro Jahr ein. Eine Garnitur wiegt ungefähr 640 kg. Zur Herstellung von 1 t Rohstahl wird von einem Energieverbrauch von 18,5GJ/t (Rohstahl) ausgegangen. Dies entspricht 5,1389 MWh/t. Daraus ergibt sich somit alleine für das eingesparte Material eine Einsparung von $2,5 /a * 0,640 t * 5,14 MWh/t = 8,224 MWh/a$. Da die Stahlrohlinge noch aufwendig nachbearbeitet, gefräst, aufgeschweißt, poliert und gehärtet werden müssen, kommt mindestens nochmals der genannte Energieaufwand für die Bearbeitung des Stahls hinzu.

Weiteres Einsparungspotential ergibt sich durch die Erhöhung der Ausstoßleistung der Extruder und einen dadurch reduzierten spezifischen Energieverbrauch. Der derzeitige Ausstoß auf einem gegenläufigen Doppelschneckenextruder von 90mm Durchmesser für WPC beträgt ca. 170kg/h bei einer Energieaufnahme von ca. 43 kWh. Bei einer Auslastung von 90% führt dies zu einem spezifischen Verbrauch von ca. 0,28 kWh/kg. Lässt sich dieser Ausstoß z.B. auf 300 kg/h erhöhen (bei der Verarbeitung von PVC sind bis zu 340 kg/h möglich), so führt dies bei einer Auslastung von 90% zu einem theoretisch möglichen spezifischen Verbrauch von ca. 0,159 kWh/kg. Dies entspricht einer Energieeinsparung von mehr als 40%!

Für die Erreichung der Projektziele sollen folgenden Verfahren angewandt werden:

- 1.) Ein instrumentierter Kalanders zur Beurteilung von Spreizkräften;
- 2.) Eine Energiebilanz mit dem Ziel der qualitativen Unterscheidung von hohem und niedrigem Energieverbrauch durch Reibung zwischen Schneckenstegen und Zylinder;
- 3.) Die Aufnahme von Druckverläufen im Extruder zur Erkennung radialer Schneckendrucke an der Zylinderwand;
- 4.) Tribologische Untersuchungen.

Zu 1): Kalanders sind Maschinen mit zwei glatten, beheizten Walzen. Der Spalt zwischen den Walzen ist einstellbar. Bei speziellen Messkalandern lassen sich die Spreizkräfte zwischen den Walzen messen, indem die Lager der Walzen mit Kraftmeßdosen ausgerüstet sind. Ein solch ausgerüsteter Kalanders kann als einfaches Modell eines ‚Zwickels‘ zwischen den Extruderschneckenstegen verstanden werden. Durch die Variation der Walzentemperaturen, die Variation der Spaltbreite und die Variation der Materialeigenschaften lassen sich grundlegende Untersuchungen zur Spreizwirkung von Prozessparametern durchführen.

Zu 2): Der größte Anteil der Wärmeenergie wird über die Scherwirkung der Schnecken und damit über die Antriebsleistung des Extruders ins Material hinein gebracht. Über das Ausmessen des Energieverbrauchs am Extruder bei verschiedenen Betriebszuständen (entleert, voll) und variierten Prozessparametern soll eine Energiebilanz aufgestellt werden mit deren Hilfe es möglich sein soll, den Anteil des Energieverbrauchs abzuschätzen, der durch die Reibung zwischen Schnecken und Zylinderwand hervorgerufen wird. Diese Reibung erzeugt den Verschleiß.

Zu 3): Hauptaugenmerk für die Beschreibung des Verschleißverhaltens wird auf die Adhäsionskräfte zwischen Schneckensteg und Zylinderinnenwand gelegt. Die eingesetzten Extruder wurden über die Länge des Zylinders mit Druckmessdosen ausgestattet. Normalerweise ist es das Ziel, die Drücke im Material zu bestimmen. Nutzt man jedoch die Messeinrichtung zur Bestimmung des Druckes im Moment des Vorbeigleitens des Schneckensteiges, so lassen sich Adhäsionskräfte messen. Der Vergleich unterschiedlicher Betriebszustände (z.B. Ausstoßleistung), Materialrezepturen und Schneckengeometrien/desings wurden genutzt, um die Aussagefähigkeit der Druckkurven in Bezug zum Verschleißverhalten zu setzen. Ursprünglich waren Erstversuche auf einem instrumentierten Laborextruder geplant. Die Versuche auf den Produktionsextrudern waren jedoch sehr erfolgreich, so dass das Hauptaugenmerk auf diese Produktionsextruder gelegt wurde. Es wurde dabei ein Standardextruder mit einem Versuchsextruder in Produktionsgröße (veränderte Schneckendurchmesser, Spaltmaße, Kompressionen etc.) verglichen.

Zu 4): Mit der DKI-Plättchenmethode (DKI: Deutsches Institut für Kunststofftechnik) wurden tribologische Untersuchungen zum Vergleich von WPC mit Standardkunststofftypen durchgeführt. Diese Untersuchungsmethode lässt Aussagen über korrosiven Verschleiß und abrasivem Verschleiß zu. Aussagen zu Spreizkräften sind leider mit keiner am DKI vorhandenen Tribologischen Methode möglich.

3 Hauptteil – Durchführung und Ergebnisse

3.1 Versuche mit instrumentiertem Kalanders

3.1.1 Einleitung

Die erste Versuchsreihe zur Bestimmung der Aufschmelzvorgänge des WPC Materials fand auf einem Kalanders statt. Die Versuche wurden am Forschungsinstitut für Leder und Kunststoffbahnen (FILK) in Freiberg durchgeführt.

Bei Kalanders handelt es sich um Maschinen mit zwei glatten, beheizten Walzen. Der Spalt zwischen den Walzen ist einstellbar. Bei speziellen Messkalanders lassen sich die Spreizkräfte zwischen den Walzen messen, indem die Lager der Walzen mit Kraftmeßdosen ausgerüstet sind.

Ein solch ausgerüsteter Kalanders kann als einfaches Modell eines ‚Zwickels‘ zwischen den Extruderschneckenstegen verstanden werden. Durch die Variation der Walzentemperaturen, die Variation der Spaltbreite und die Variation der Materialeigenschaften lassen sich grundlegende Untersuchungen zur Spreizwirkung von Prozessparametern durchführen. [1]

Ziel der Versuche war es, die Spreizkräfte zwischen den Rollen des Kalanders zu bestimmen und damit eine Analogie zu den Vorgängen im Doppelschneckenextruder zu erhalten. Dass die Vorgänge zwischen einem gegenläufigen Doppelschneckenextruder und einem Kalanders vergleichbar sind, wird auch von [2] festgestellt. Von besonderer Bedeutung für dieses Projekt sind dabei die Kräfte im Moment des Aufschmelzens, da diese theoretisch besonders hoch zu erwarten sind. Es wurde davon ausgegangen, dass eine gröbere Körnung ebenfalls eine erhöhte Spreizkraft zur Folge hat.

3.1.2 Versuchsdurchführung

Die Einstellungen des Kalanders wurden wie folgt vorgenommen und während den Versuchsreihen nicht verändert:

- Spalttiefe 1 mm
- Spaltbreite 250 mm
- Walzentemperatur 190 °C
- Geschwindigkeit der hinteren Walze 3,39 m/min
- Geschwindigkeit der vorderen Walze 2,04 m/min

Die Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Walzen resultiert durch die unterschiedlichen Durchmesser von Schneckenrund und Schneckensteg der beiden Extruderschnecken. Diese Differenz ist unter realen Bedingungen etwas höher. In **Abbildung 3-1** ist der Versuchskalanders für die Spreizversuche dargestellt. Bei den Versuchen werden unterschiedliche Kunststoffe und auch WPC Rezepturen nach

Tabelle 3-1 auf ihr Spreizverhalten im Kalandrieren untersucht.



Abbildung 3-1: Kalandrier Prüfstand

Tabelle 3-1: Versuchsmatrix der Kalandrierversuche

Material	Verwendete Menge [g]	Schüttdichte in [g/dm ³]	Eigenschaften
PP MFI (230/2,16) 0,8	100	580	
PP MFI (230/2,16) 0,8	250	580	
PP MFI (230/2,16) 0,8	180	580	Standard-Granulat
PP MFI (230/2,16) 1,3	180	580	
PP MFI (230/2,16) 140	180	540	
PVC (Standard - Profilrezeptur)	180	634	Pulverform
PVC (Standard - Profilrezeptur)	360	634	Pulverform
WPC S2 30	180	492	Standard-Granulat
WPC S2 50	180	513	Standard-Granulat
WPC S2 60	180	413	Gemahlen
WPC S2 60	180	493	Standard
WPC S2 60	180	510	Grobe Körnung

3.1.3 Ergebnisse

Das eigentliche Ziel, eine Abhängigkeit der verschiedenen Rezepturen herauszufinden, konnte mit dieser Versuchsreihe nicht bestätigt werden. Die Einflüsse der Zwangsförderung sowie die Schlepp- und Druckströmungen unterscheiden sich im gegenläufigen Doppelschneckenextruder zum Kalandr. Erkennbar ist der Einfluss der unterschiedlichen PP-Varianten, die vom MFI-Wert zwischen 0,8 bis 140 variierten. Diejenigen, mit einem niedrigen MFI-Wert führen zu den höheren Lagerbelastungen. Ein direkter Vergleich zwischen der PP und der PVC-Mischung ist aufgrund der unterschiedlichen Körnung und der daraus resultierenden höheren Schüttmenge für das PVC nicht möglich. Es ist nicht möglich, eine Verbindung von größerem Granulat und größeren Lagerkräften nachzuweisen. Es hat den Anschein, dass bei größeren Körnern die Spreizkraft sogar geringer ist. Eine Erklärung ist, dass die größeren Körner erst langsam angeschmolzen werden und nicht, bedingt durch die Zwangsförderung im gegenläufigen Doppelschneckenextruder, durch den Spalt gepresst werden. Dadurch wird ein direkter Vergleich zwischen den Verhältnissen im Doppelschneckenextruder und einem Kalandr erschwert. Beim PVC Pulver findet aufgrund der kleinen Körnung sehr schnell ein Anschmelzen und Haften auf den Walzen statt. Zusätzlich fällt ein beträchtlicher Teil des Materials durch den für das Granulat eingestellten Spalt von 1 mm. Wenn diese durchgefallene Menge nachgeschüttet wird, kommt es wiederum direkt zu einer erheblich höheren Lagerbelastung im Vergleich zum PP-Granulat.

In **Tabelle 3-2** sind die maximal gemessenen Spreizkräfte der verschiedenen Materialien dargestellt.

Tabelle 3-2: Maximalwerte der Spreizkräfte

Material	Masse [g]	Kraft [kN]	Zeit [s]
PP MFI (230/2,16) 0,8	100	2,7	/
PP MFI (230/2,16) 0,8	250	2,9	<40
PP MFI (230/2,16) 0,8	180	1,7	<40
PP MFI (230/2,16) 1,3	180	2,7	35
PP MFI (230/2,16) 140	180	-0,2	/
PVC (Standard - Profilrezeptur)	180	2	/
PVC (Standard - Profilrezeptur)	360	3,9	/
WPC S2 30	180	0,7	310
WPC S2 50	180	0,6	495
WPC S2 60 (gemahlen)	180	0,8	65
WPC S2 60 (Standard)	180	0,5	410
WPC S2 60 (grob)	180	0,3	400

3.2 Vorversuche auf gegenläufigen Labor-Doppelschneckenextruder

Versuche auf einem gegenläufigen Doppelschneckenextruder wurden nicht durchgeführt.

Hauptursache für die Streichung dieser Versuche war die Tatsache, dass entgegen der Aussagen in der Projektierungsphase der mit Druckfühlern ausgestattete Meßextruder nur ein gleichlaufendes Schneckensystem besitzt. Der Laborextruder mit gegenläufigen Schnecken hingegen war nicht mit Drucksensoren über die Extruderlänge ausgestattet.

Entscheidend für das ‚Überspringen‘ der Vorversuche auf dem Laborextruder war zudem, dass die ersten Versuche zur Druckmessung auf dem Produktionsextruder bereits zu sehr positiven Ergebnissen geführt hatten. Dadurch wurden die Vorversuche auf dem kleinen Extruder obsolet und die frei werdenden Kapazitäten wurden genutzt, um die Untersuchungen auf den Produktionsextrudern noch intensiver zu bearbeiten.

3.3 Theoretische Modellbildung - Energiebilanzierung

3.3.1 Modellerstellung

Zum besseren Verständnis des Extrusionsprozesses wird in diesem Arbeitspaket der gesamte Extruder in einem theoretischen Modell abgebildet.

Abbildung 3-2 stellt eine vereinfachte Skizze des Extruders zur Modellerstellung dar. Die mechanische Leistung des Motors wird über das Reduzier- und das Verteilergetriebe auf beide Schnecken aufgeteilt. Zur einfacheren Betrachtung wird ein idealer Getriebewirkungsgrad von eins angenommen.

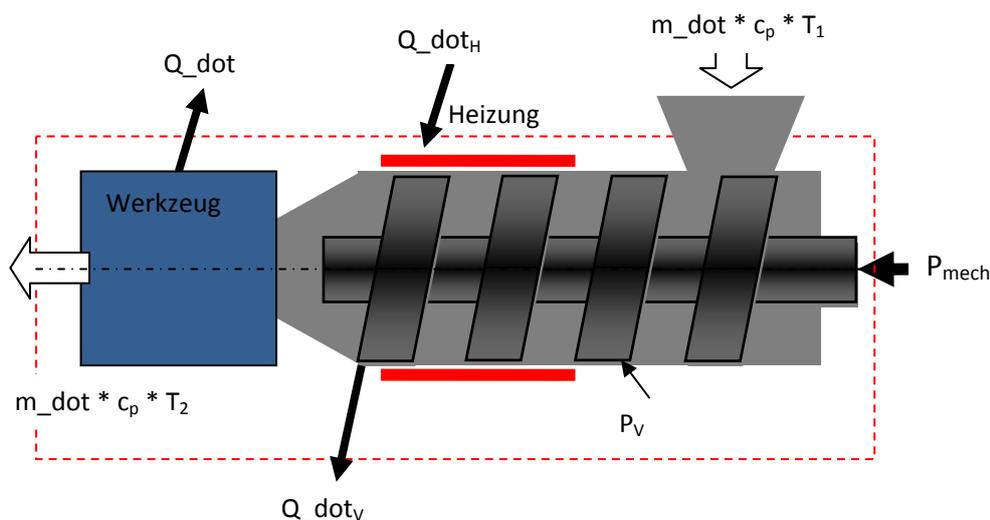


Abbildung 3-2: Systemskizze des Extruders (Seitenansicht) zur Erstellung der Wärmebilanz

Für die Erstellung der Energiebilanz werden folgende Annahmen getroffen:

- Konstante Stoffdaten (keine chemische Veränderung der Materialien während der Verarbeitung und keine Verdampfung des im WPC enthaltenen Wassers)
- Der Prozess ist stationär
- Der Massenverlust sowie Enthalpieverlust aufgrund der Entgasung wird (vorerst) vernachlässigt
- Die potentielle sowie kinetische Energie des Materialstroms vor dem Einfüllen wie nach dem Ausstoß wird vernachlässigt.

3.3.2 Energie- und Massenbilanz

Aus der Summe aller die Systemgrenze übertretenden Energie- und Stoffströme ergibt sich die Bilanz:

$$P_{mech} + \dot{Q}_H + \dot{m} \cdot c_p \cdot T_1 = \dot{Q}_v + \dot{Q}_K + \dot{m} \cdot c_p \cdot T_2$$

Dabei setzt sich die durch den Antriebsstrang in das System eingebrachte Leistung P_{mech} folgendermaßen zusammen:

$$P_{mech} = P_{RSZ} + P_{RM} + P_v$$

Zum einen entsteht die durch mechanische Arbeit erzeugte Prozesswärme durch die Reibung zwischen Schnecke und Zylinder (P_{RSZ}), zum anderen durch die Scherung der WPC-Partikel, bzw. des Granulats (P_{RM}). Ein dritter, jedoch wesentlich kleinerer Anteil an Arbeit wird durch die wirkenden Verschleißmechanismen in Form von plastischer Verformung im Werkstoffgefüge von Schnecke und Zylinder gespeichert.

3.3.3 Einbindung der Messergebnisse in die Energiebilanz

Die gemessenen Leistungen können nun in das Modell der Energiebilanz eingefügt und eine Verteilung des Leistungsaufwands errechnet werden. Dazu werden die entsprechenden Werte in Gleichung (2.2) eingesetzt. Als Grundlage zur Bestimmung der Energiebilanz dienen die Messungen an Extruder 2. An dieser Linie sind mehrere verschiedene Betriebszustände gemessen worden, wodurch Aussagen über ein Verschleißoptimum und/oder ein Minimum des Energieverbrauchs möglich sind. Gleichung (2.1) stellt die zu- und abgeführten Energiemengen gegenüber:

Equation Chapter 2 Section 2

$$P_{mech} + \dot{Q}_H = \dot{Q}_v + \dot{Q}_K + \dot{m} \cdot h_\Delta \quad (2.1)$$

Die durch die Werkzeugkühlung abgeführte Wärmemenge ist nicht bekannt und wird daher zur Verlustwärme \dot{Q}_v hinzugefügt. Die zur Erwärmung und Plastifizierung des Granulats benötigte Wärmemenge wird nach folgender Gleichung ermittelt. Der im Holz und im übrigen Granulat vorhandene Wasseranteil von etwa 2 bis 3 % wird hierbei vernachlässigt, da aufgrund der Entgasung ein Feststel-

len der Verdampfungstemperatur des Wassers und somit dessen Verdampfungsenthalpie ohne Kenntnis des Innendruckes nicht möglich ist:

$$\dot{m} \cdot h_{\Delta} = \dot{m}_{PP} \cdot (h_{s,PP} + c_{p,PP} \cdot \Delta T) + \dot{m}_{Holz} \cdot (c_{p,Holz} \cdot \Delta T) \quad (2.2)$$

Annahme: Da das im Granulat enthaltene Holz mit etwa 60 % und das als Matrix verwendete Polypropylen mit etwa 40 % Massenanteil unterschiedliche thermische Eigenschaften haben, wird der Massenstrom \dot{m} den Verhältnissen im Produktionsprozess entsprechend in \dot{m}_{PP} und \dot{m}_{Holz} aufgeteilt. Der Berechnung liegen folgende Daten von Holz (hauptsächlich Fichte) und PP zugrunde:

Tabelle 3-3: Thermische Eigenschaften der einzelnen Komponenten des Granulats

Name und Formelzeichen		Wert	Einheit
Spez. Wärmekapazität von PP	$c_{p,PP}$	2,15 [3]	$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Spez. Wärmekapazität von Holz	$c_{p,Holz}$	1,7 [3]	$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Aufschmelzenthalpie von S2-60	h_s	30 [5]	kJ kg^{-1}
Eingangstemperatur	t_1	20	$^{\circ}\text{C}$
WPC-Massetemperatur	t_2	Je nach Betriebspunkt	$^{\circ}\text{C}$

Aus diesen Werten lassen sich je nach Betriebspunkt, die zum Aufschmelzen des WPC-Granulats erforderlichen Leistungen bestimmen. Die benötigte Leistungsmenge für die Erwärmung und das Aufschmelzen des Polypropylens und die reine Erwärmung der Holzfasern ist in **Tabelle 3-4** für den jeweiligen Betriebspunkt von Extruder 1 angegeben.

Tabelle 3-4. Berechnung der benötigten Leistungen zum Aufschmelzen des WPC-Werkstoffes

Betriebspunkt		nur Heizung	Antrieb im Leerlauf	Produktionsbetrieb	Produktionsbetrieb	Produktionsbetrieb	Produktionsbetrieb
Drehzahl	min^{-1}	0	12	12	15	16	17
P Summe	kW	19,2	31,1	52,7	59,4	62,8	63,9
P Antrieb	kW	0,0	6,8	21,9	28,5	31,9	33,0
P Heizung Extruder	kW	13,3	13,1	22,5	22,5	22,5	22,5
P Heizung Werkzeug	kW	2,0	2,0	4,4	4,4	4,4	4,4
P Nebenantriebe	kW	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Massetemperatur	$^{\circ}\text{C}$	186	184	188	188	188	189
Schneckendrehzahl	min^{-1}	0,0	12,4	12,4	15,0	16,1	17,0
Massedurchsatz	kg/h	0	0	154	186	200	211,0
Schneckendrehmoment	%	0	11	28	30	29	30,0

Tabelle 3-5. Rechnerisch ermittelte Größen

Betriebspunkt		nur Heizung	Antrieb im Leerlauf	Produktionsbetrieb	Produktionsbetrieb	Produktionsbetrieb	Produktionsbetrieb
P Antrieb (abz. Wirkungsgr. verl.)	kW	0,0	6,5	20,9	27,2	30,5	31,5
Spezifischer Energieverbrauch	KWh/kg	inf	inf	0,34	0,32	0,31	0,30
Aufschmelzleistung WPC	kW	0,0	0,0	1,3	1,6	1,7	1,8
Aufwärmleistung 40% PP	kW	0,0	0,0	6,2	7,5	8,0	8,5
Aufwärmleistung 60% Holz	kW	0,0	0,0	7,3	8,9	9,5	10,1
Summe: Erwärmungs- und Aufschmelzleistung	kW	0,0	0,0	13,5	16,3	17,5	18,6
Anteil der Erw.- und Aufschmelzleistung am Gesamtverbrauch	%	0,0	0,0	25,6	27,5	27,9	29,1

Es stellt sich heraus, dass die Leistung zum Erwärmen und Plastifizieren des Materials lediglich 25,6 bis 27,9 % der insgesamt von der Maschine aufgenommenen elektrischen Leistung beträgt.

Werden nur die Spalten von Tabelle 3-4 berücksichtigt, welche die Zustände während des Produktionsbetriebs beschreiben (hellblau hervorgehoben), steigt die Motorleistung mit steigender Schneckendrehzahl und somit steigendem Massendurchsatz an. Der spezifische Verbrauch, der in kWh elektrisch aufzubringender Energie pro kg verarbeitetem WPC-Werkstoff angegeben wird, sinkt jedoch kontinuierlich ab. Demnach stellt sich bei einem höheren Massendurchsatz (> 200 kg/h) ein energetisch optimaler Betriebspunkt ein. Dieser kann jedoch aufgrund des geringen Betrachtungsfensters nicht genau bestimmt werden (**Abbildung 3-3**).

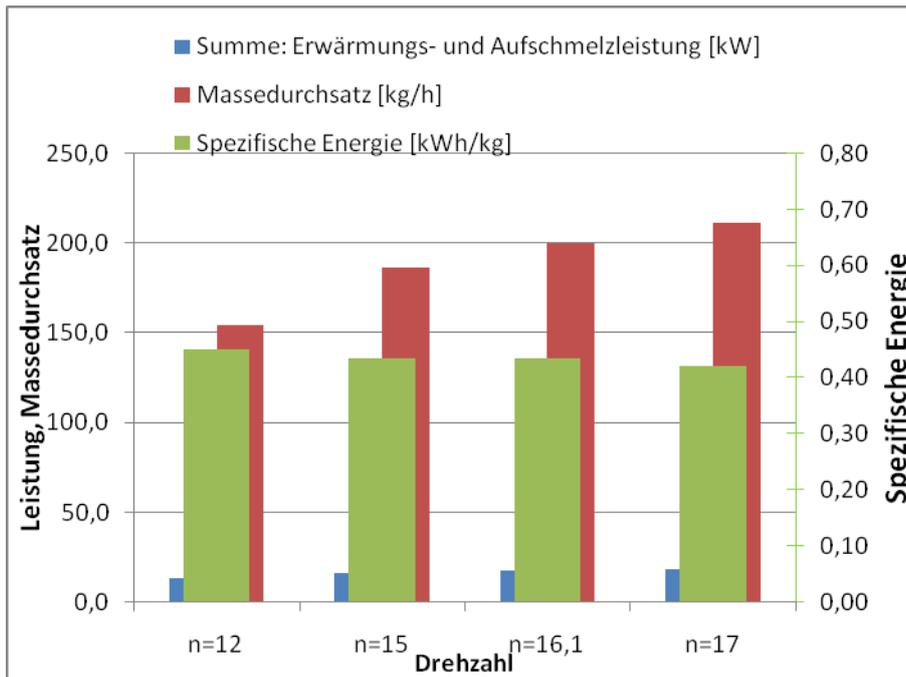


Abbildung 3-3: Darstellung von aufgenommener Leistung durch den Werkstoff, Massendurchsatz und spezifischer Energie in Abhängigkeit der Drehzahl.

Bei den oben genannten Betriebspunkten ist zu erkennen, dass die berechnete Abwärme einen sehr großen Anteil der Energie, welche vom System abgeführt wird, ausmacht. Um zu zeigen, dass sich die Abwärme tatsächlich in diesem Bereich befindet, sollte diese den Genauigkeitsanforderungen entsprechend berechnet werden. Dazu ist die Kenntnis der Oberflächentemperatur des Extruders über die Maschinenlänge und in Abhängigkeit des Betriebspunkts sowie die Temperaturdifferenz des Kühlwassers ΔT_{Kw} notwendig. Durch folgende Analysemethoden kann die Abwärme ermittelt werden:

- Stellgrad der Heizungen bzw. Aktivität der Kühlgebläse der entsprechenden Zonen
- Wärmebildaufnahme
- Bestimmung der Oberflächentemperatur durch lokale Messungen.

Ziel der Energiebilanz ist letztendlich das Bestimmen einer Größe, mit der der momentane Verschleiß des Extruders charakterisiert werden kann. Bei erhöhter Reibung muss der Antrieb ein erhöhtes Moment aufbringen, um den gleichen Massenstrom zu fördern. Könnte diese erhöhte Leistungseinbringung anhand einer erhöhten Abwärme festgestellt werden, wäre dies ein Hinweis für den auftretenden Verschleiß. Da allerdings die durch den Verschleiß ins System eingebrachte Leistung letztendlich in Wärme übergeht und damit teilweise sogar zum Aufschmelzen des Kunststoffes beiträgt, ist hierfür wiederum eine geringere Heizleistung erforderlich. Dies wird von der Heizungsregelung erkannt und entsprechend in „weniger heizen“ umgesetzt.

3.3.4 Ansatz zum Bestimmen des Verschleißes

Wie in Kapitel 3.3.2 erörtert, teilt sich die mechanisch eingebrachte Leistung P_{mech} in $P_{RSZ} + P_{RM} + P_V$ auf. Da die Verformungsleistung P_V von der Reibung zwischen Schnecke und Zylinder abhängt, ist $P_V = f(P_{RSZ})$. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die beiden abhängigen Größen P_V und P_{RSZ} im Folgenden zu einer Größe P_{Reib} zusammengefasst. Es gilt nun also:

$$P_{mech} = P_{RM} + P_{Reib} \quad (2.3)$$

Weiter ist bekannt, dass sich die Aufschmelzleistung des Materials nach Gleichung (2.4) aus der Scherung im Material, einem Teil der Heizleistung und der Reibleistung zusammensetzt.

$$P_{aufsch} = P_{RM} + P_{Reib} + P_{H_aufsch} \quad (2.4)$$

Von den in Gleichungen (2.3) und (2.4) verwendeten Größen sind Aufschmelzleistung P_{aufsch} und die mechanische Leistung P_{mech} bekannt. Unbekannt sind die Leistung der Reibung im Material P_{RM} , die Leistung der Reibung der Schnecke am Zylinder P_{Reib} und die Leistung der Heizung, die zum Aufschmelzen erforderlich ist P_{H_aufsch} . Bei nur zwei Gleichungen können diese drei Unbekannten nicht bestimmt werden. Deshalb muss das Gleichungssystem erweitert werden. Die Leistung der Heizung setzt sich aus der Leistung, die ins WPC-Material eingeleitet wird und der Abwärme zusammen:

$$P_{Heizung} = P_{ab} + P_{H_aufsch} \quad (2.5)$$

Durch Kenntnis der Abwärme kann nun auf P_{H_aufsch} geschlossen werden. Eingesetzt in Gleichung (2.4) ergibt sich:

$$P_{aufsch} - P_{H_aufsch} = P_{RM} + P_{Reib} \quad (2.6)$$

Es ist nun gut zu erkennen, dass mittels dieser Gleichung (2.6) lediglich eine theoretische mechanische Leistung errechnet werden kann. Wird versucht das Gleichungssystem aufzulösen, verschwindet wegen der linearen Abhängigkeit der Gleichungen die Zielgröße P_{Reib} . Um auf diese schließen zu können, muss ein Zusammenhang über die Größenverhältnisse von P_V zu P_{Reib} bekannt sein. Dieser Zusammenhang lässt sich jedoch nicht aus der Energiebilanz ableiten. Um einen Überblick über die bekannten und unbekannt Leistungen zu geben, ist in **Abbildung 3-4** ein Sankey-Diagramm des vollständigen Prozesses dargestellt. Die zu- und abgeführten Energieströme sind hier in mechanische und thermische Leistungen aufgeteilt, um Energieumwandlungen innerhalb der Systemgrenze erkennbar zu machen. Anzumerken sei hier, dass die eingezeichneten Größenverhältnisse keinen quantitativen Bezug zum realen Prozess haben.

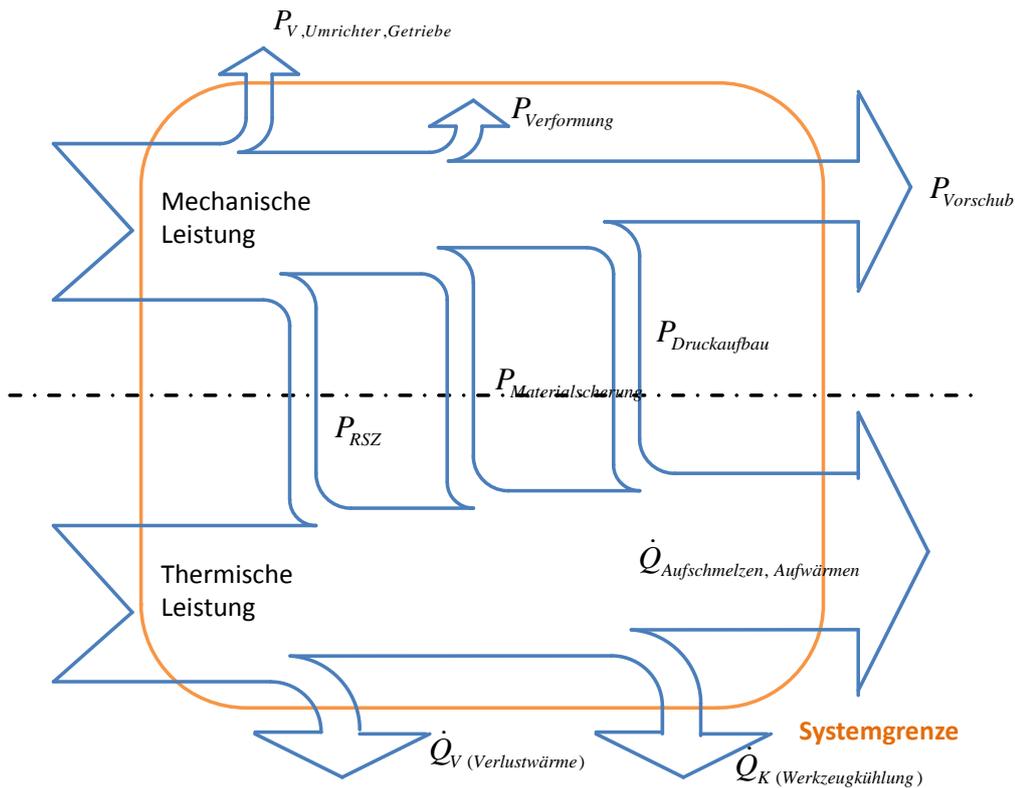


Abbildung 3-4: Sankey-Diagramm des Extrusionsprozesses (Qualitative Größen)

Auf der linken Seite von Abbildung 3-4 treten 100 % der thermischen und mechanischen Leistung über die Systemgrenze. Der Anteil der thermischen Leistung wird zuerst um den Betrag der Verlustwärme über die Zylinderwand reduziert. Des Weiteren wird über die Wasserkühlung des Werkzeugs ein zweiter Wärmestrom abgeführt. Zum Prozessende hin tritt als Ausgangsgröße die Wärmemenge, welche zum Erwärmen und Aufschmelzen des WPC-Materials erforderlich ist. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass das extrudierte WPC-Profil nach dem Werkzeugaustritt im flüssigen Zustand ist.

Die mechanische Leistung wird nach Überschreiten der Systemgrenze um die Wirkungsgradverluste von Motor und Getriebe (hier ca. 4,6 %) verringert. Ein sehr kleiner Teil an mechanischer Leistung wird in Form von Verformungsleistung in die Grenzschichten der Werkstoffe eingeleitet und dort gespeichert. Das Speichern der Energie erfolgt durch die Entstehung von Versetzungen auf molekularer Ebene im Material [03]. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Verformungsarbeit die Systemgrenze nicht überschreitet und somit in der Energiebilanz nicht eindeutig zu charakterisieren ist.

Während des Extrusionsprozesses finden innerhalb des Zylinders mehrere Energieumwandlungen von mechanischer zu thermischer Leistung hin statt. Durch Reibung zwischen Schnecke und Zylinder, Reibung beim Scheren des WPC-Granulats und durch den Druckabbau durch das Werkzeug kommt es zu einer Temperaturerhöhung innerhalb des Zylinders. Die interne Systemgrenze zwischen thermischer und mechanischer Leistung wird somit überschritten. Am Ausgang des Prozesses liegt lediglich die Vorschubleistung als verbleibende mechanische Leistung vor. Der Großteil ist bereits in Wärme umgewandelt worden.

Da die entscheidenden bzw. verschleißrelevanten Größen nicht über die Systemgrenzen treten und somit nicht in der Energiebilanz auftauchen, ist eine genaue Charakterisierung des Verschleißes nicht möglich.

3.4 Durchführung Versuche auf Produktionsextruder (Extruder 1)

Es werden Strom und Druckmessungen mit paralleler Aufnahme der Schneckennullstellung an dem Extruder 1 der Firma Werzalit durchgeführt. Ziel dieser parallelen Messungen ist die Leistungsaufnahme des Motors und die Druckverteilung mit deren Stegposition über die Extruderlänge bei verschiedenen Materialien nach **Tabelle 3-6** zu ermitteln. Die Parameter der Durchführung nach AP 6 auf einem Produktionsextruder mit veränderter Schneckengeometrie sind hier der besseren Vergleichbarkeit wegen mit in der Tabelle aufgeführt.

Die Ergebnisse der Messungen sollen zusammen mit der Energiebilanz genutzt werden, um Rückschlüsse auf den Verschleiß des Extruders bilden zu können.

Tabelle 3-6: Versuchsmatrix der Druckmessung

Versuch Nr.	Material	Durchsatz niedrig	Durchsatz Mittel (Standard)	Durchsatz hoch	Durchsatz Hoch + 3 % Gleitmittel
1	Standard	A	B	C	D
2	Grob	A	B	C	D
3	Fein	A	B	C	D
4	Hoher MFI	A	B	C	D
5	Granulat ZSK	A	B	C	D
6	Oechsler	A	B	C	D
7	50 % Holz	A	B	C	D
8	60 % Holz	A	B	C	D

Maschine	Parameter	Durchsatz niedrig	Durchsatz Mittel (Standard)	Durchsatz hoch	Durchsatz Hoch + 3 % Gleitmittel
-	Massendurchsatz [kg/h]	100	153	230	230
Extruder 2	Schneckendrehzahl [min^{-1}]	8,7	8,7	13	13
Extruder 2	Spez. Durchsatz [$\text{kg}\cdot\text{min}/\text{h}$]	11,5	17,6	17,7	17,7
Extruder 1	Schneckendrehzahl [min^{-1}]	11	11	21	21
Extruder 1	Spez. Durchsatz [$\text{kg}\cdot\text{min}/\text{h}$]	9,1	13,9	10,9	10,9

Messequipment: Stommesszange, Mehrkanalmessverstärker mit Wandler, Rechner mit Hard- und Software zur parallelen Messwerterfassung und –speicherung, Messschnüre und Zubehör.

Bei allen Messungen werden pro Variante die Messwerte mit den nachstehenden Geräten aufgezeichnet:

- Stromaufnahme mittels Messzange: Messwertaufzeichnung über LabView [08]
- Druck über Drucksensoren: Messwertaufzeichnung über LabView
- Maschinenverfahrensparameter: Messwertaufzeichnung über Maschinenspeicher

In nachfolgender **Tabelle 3-7** sind die Versuchsmaterialien mit deren Zusammensetzung aufgelistet. Die Additive setzen sich dabei im Wesentlichen aus Koppler, Farbe und Prozesshilfsmittel zusammen.

Tabelle 3-7: Materialzusammensetzung der Versuchsreihen

Versuch Nr.	Material (Bemerkung)	Holzanteil [%]	Kunststoffanteil [%]	Additive [%]	Schüttdichte [kg/m ³]
1	Standard	55	32,5	12,5	500
2	Grob (Grobfraktion von Standardmaterial)	55	32,5	12,5	480
3	Fein (Feinfraktion von Standardmaterial)	55	32,5	12,5	520
4	Hoher MFI (Metoceneanteil um ~ 10 % erhöht)	50	37,5	12,5	505
5	Granulat ZSK (60/40 MFI 20, PP-Homo)	60	37,0	3,0	475
6	Oechsler (Oechslergranulat mit Gleitmittel, Firmeninterne Mischung)	60	33,0	7,0	475
7	50 % Holz (50 % Holz, 10 % Talkum)	50	32,5	17,5	505
8	60 % Holz ("Alu" Mischung, Master Batch mit Alu-Komponente, Firmeninterne Mischung)	60	34,0	6,0	505

3.4.1 Vorgehensweise

3.4.1.1 Strommessung

Die Messungen des Stroms werden mit einem handelsüblichen Stromzangenadapter VC-511 [07] und dem Datenerfassungsgerät NI USB-6221 [08] durchgeführt. Der Strom $I(t)$ wird über den gesamten Zeitraum der einzelnen Versuchsvarianten mit einer Samplerate von 1000 s^{-1} digital aufgezeichnet. Die Daten werden anschließend grafisch aufgearbeitet und analysiert. Über den Effektivwert des Stromes kann die Leistungsaufnahme des Antriebes bestimmt werden.

Über die Leistung und die Maschinendrehzahl kann direkt auf das Antriebsdrehmoment zurückgeschlossen werden

$$M = \frac{P}{s \cdot \pi \cdot n} \quad (2.7)$$

3.4.1.2 Berechnung der spezifischen Scherenergie

Um eine bestimmte Menge WPC zu plastifizieren, ist eine bestimmte Energie notwendig. In der Praxis zeigt sich, dass der Scherenergieanteil mit zunehmender Schneckendrehzahl ansteigt. Die spezifische Gesamtenergie, d. h. die Summe aus spezifischer Heiz- und Scherenergie ist annähernd konstant. Heiz- und Scherenergie stehen dabei in einem bestimmten Verhältnis. In der Praxis zeigt sich, dass der Scherenergieanteil mit zunehmender Schneckendrehzahl ansteigt.

Alternativ zur Maschinendatenerfassung, welche direkt von der Maschine exportierbar ist, kann die spezifische Scherenergie mit

$$L_M = \frac{N_M \cdot M_d \cdot n_s}{n_{s \max} \cdot \dot{m}} \quad (2.8)$$

bestimmt werden.

- L_M = spezifische Scherenergie [kWh/kg]
- N_M = max. Leistung der Antriebsmaschine [kW]
- M_d = Schneckendrehmoment [%]
- n_s = Schneckendrehzahl [min⁻¹]
- $n_{s \max}$ = max. Drehzahl [min⁻¹]
- \dot{m}_{spez} = Massendurchsatz [kg/h]

3.4.1.3 Druckmessung

Der dynamische Druckverlauf wird nach **Abbildung 3-5** an drei Bereichen des Extruders erfasst und aufgezeichnet.

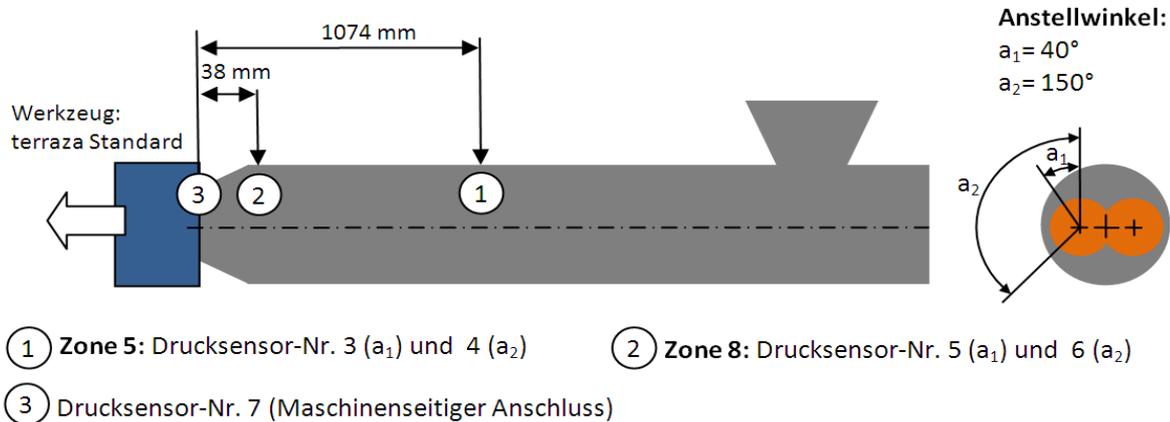


Abbildung 3-5. Prinzipskizze der Drucksensorenverteilung über den Extruder 1

Erste Versuchsreihen zeigten, dass in den ersten Schneckenzonen kein Materialdruck aufgebaut wird. Daher wird in dieser Versuchsmessung auf diese beiden ersten Sensoren 1 und 2 verzichtet. Der Sensorwinkel beträgt nach dem Extruderbohrbild für die ersten beiden Zonen 110° .

Bereich 1 und 2: Drucksensor 0 – 3000 bar (Zone 5 und 8: 2- und 3-gängig)

Bereich 1 und 2 befinden sich im Plastifizierbereich der Verdichtungszone, wo mit einem Druckanstieg zu rechnen ist. Der dritte Messbereich liegt kurz vor dem Werkzeug und somit in der zweiten Schneckenstufe, welcher als reiner Schmelzförderer mit Druckaufbau für den Ausstoß der entgasten Schmelze arbeitet. Die vorangegangene Druckmessung zeigt, dass der größte Druck an der Messstelle 3 vor dem Werkzeugadapter zu erwarten ist und bestätigte den theoretischen Druckanstieg.

Bereich 3: Drucksensor 0 – 700 bar

Der letzte Bereich vor dem Werkzeug befindet sich nach dem Werkzeugadapter. Hier wird gegenüber dem Bereich 3 ein Druckabfall erwartet. Ein geringerer Wertebereich des Sensors von 0 bis 700 bar ist ausreichend. Der Druck wird maschinenseitig aufgezeichnet und in einer Datenbank gespeichert.

3.4.2 Auswertung

Der Versuchsverlauf setzt sich aus 6 diversen Materialvarianten zusammen. Dabei wird in der Auswertung zunächst auf die Leistungsübersicht der einzelnen Versuche eingegangen und im Anschluss daran werden verschiedene Auswertungen gezeigt, sowie ein Quervergleich der Materialien durchgeführt.

3.4.2.1 Leistungsübersicht des Extruders 1

Für eine erste Einschätzung der Leistungsaufnahme und der daraus resultierenden Drücke werden in diesem Kapitel unterschiedliche Leistungsparameter des Extruders 1 folgend aufgezeigt.

- **I Mittlere Motorstromaufnahme**
Der Strom wird aus den mit der Strommesszange gemessenen Messwerten einer Phase des Antriebsmotors berechnet. Die großen Abweichungen sind hier aufgrund unterschiedlicher Ströme der drei Phasen entstanden, welche sich bis zu dem Drehmoment M_{M-I} aufsummieren.
- **$P_{S\ M-I}$ Mittlere Motorstrangleistung**
Die Motorstrangleistung (gemittelt) wird über die Stromaufnahme I nach der Formel P_{Str} (3) in Kapitel 3.4.1 errechnet.
- **P_{M-I} Mittlere Motorleistung**
Die gemittelte Gesamtleistung des Motors errechnet aus der dreifachen Strangleistung mit $P_{M-I} = 3 * P_{S\ M-I}$ nach den Stromdaten
- **M_{M-I} Mittleres Motordrehmoment**
Nach den gemessenen Stromdaten kann das Motordrehmoment errechnet werden.
- **M_S Mittleres Schneckendrehmoment**
 M_S gibt das mittlere Schneckendrehmoment beider Schnecken nach den Maschinenaufzeichnungen an. Dies berechnet sich Prozentual aus dem Gesamtdrehmoment des Motors zu $M_S = M_M * M_{\%}$ mit einem Motordrehmoment von $M_M = 18$ kNm. Hier bleiben Getriebewirkungsgrad und Reibungen unberücksichtigt.
- **$M_{\%}$ Mittleres Schneckendrehmoment**
 $M_{\%}$ (nach Maschinendaten) gibt das reine prozentuale Schneckendrehmoment an, der Getriebewirkungsgrad, die Reibung oder ähnliche Einflüsse werden nicht berücksichtigt.
- **T_m Mittelwert der Massentemperatur.**
Gemittelte Massentemperatur über die Versuchszeit nach Maschinendaten.
- **L_M Mittlere spezifische Scherenergie**
Die spezifische Scherenergie berechnet mit den Aufzeichnungen der Maschinendaten.

In **Tabelle 3-8** ist eine Leistungsübersicht der Extruderanlage mit den oben beschriebenen Parametern über die einzelnen Versuchsvarianten aufgelistet.

Tabelle 3-8: Leistungsübersicht des Extruders 1

Variante Nr.	Material	Anlagenleistungsübersicht der einzelnen Durchsatzparameter																							
		A: Durchsatz Niedrig								B: Durchsatz Mittel								C: Durchsatz Hoch							
		Größe								Größe								Größe							
		Durchsatz $\dot{m}_{polymer} = 100 \frac{kg}{h}$ Schneckendrehzahl $n = 11 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{spez} = 9,1 \frac{kg \cdot min}{h}$								Durchsatz $\dot{m}_{polymer} = 153 \frac{kg}{h}$ Schneckendrehzahl $n = 11 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{spez} = 13,9 \frac{kg \cdot min}{h}$								Durchsatz $\dot{m}_{polymer} = 230 \frac{kg}{h}$ Schneckendrehzahl $n = 21 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{spez} = 10,9 \frac{kg \cdot min}{h}$							
		I [A]	P _{SM-I} [kW]	P _{M-I} [kW]	M _{M-I} [kNm]	M _S [kNm]	M% [%]	T _m [°C]	L _M [kWh/kg]	I [A]	P _{SM-I} [kW]	P _{M-I} [kW]	M _{M-I} [kNm]	M _S [kNm]	M% [%]	T _m [°C]	L _M [kWh/kg]	I [A]	P _{SM-I} [kW]	P _{M-I} [kW]	M _{M-I} [kNm]	M _S [kNm]	M% [%]	T _m [°C]	L _M [kWh/kg]
1	Standard	65,6	13,9	41,1	36,3	9,9	55,1	82,2	0,12	77,9	16,6	49,7	43,1	16,4	90,4	181	0,13	73,8	15,7	47,0	21,4	14,4	80,1	179	0,14
2	Grob	64,7	13,7	41,2	35,8	9,9	54,9	180	0,12	77,2	16,4	49,2	42,7	15,5	86,3	180	0,13	74,3	15,8	47,3	21,5	14,4	80,1	180	0,15
3	Fein	63,9	13,6	40,8	35,4	9,4	52,1	180	0,11	81,0	17,2	51,6	44,8	16,6	92,4	181	0,14	76,7	16,3	48,9	22,2	13,8	76,6	181	0,14
5	Granulat ZSK	60,5	12,4	38,6	33,5	6,9	38,3	180	0,08	67,4	14,3	42,9	37,3	11,0	61,0	179	0,09	67,5	14,3	43,0	19,6	12,0	66,7	179	0,12
7	50 % Holz	62,9	13,4	40,1	34,8	9,2	51,3	180	0,11	80,5	17,1	51,3	44,5	16,1	89,4	180	0,13	75,4	16,0	48,1	21,8	13,7	76,1	180	0,14
8	60 % Holz	66,4	14,1	42,3	36,7	9,8	54,6	180	0,12	79,4	16,9	50,6	43,9	16,9	94,1	180	0,14	72,4	15,4	46,1	20,9	14,1	78,2	181	0,14

3.4.2.2 Gemittelter Druck über die Messreihe

In **Tabelle 3-9** werden analog zur Leistungsübersicht der gemittelte Druck von Sensor 3 bis 7 über die gesamte Versuchszeit aufgelistet. Durch den kurzen Extruder entfallen die Sensoren 1 und 2 in der Vorkompression der Einzugszone.

Versuchsanmerkungen:

- Bei dem gemittelten Druck handelt es sich um einen Mittelwert über die gesamte Messreihe aller Samples und nicht um die gemittelten Maximas und Minimas.

Tabelle 3-9: Gemittelter Druck über die Messreihe

Variante Nr.	Material	Gemittelter Druck über die Messreihe je Drucksensor [bar]														
		A: Durchsatz Niedrig					B: Durchsatz Mittel					C: Durchsatz Hoch				
		Sensor Nr.					Sensor Nr.					Sensor Nr.				
		Durchsatz $\dot{m}_{polymer} = 100 \frac{kg}{h}$ Schneckendrehzahl $n = 11 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{spez} = 9,1 \frac{kg \cdot min}{h}$					Durchsatz $\dot{m}_{polymer} = 153 \frac{kg}{h}$ Schneckendrehzahl $n = 11 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{spez} = 13,9 \frac{kg \cdot min}{h}$					Durchsatz $\dot{m}_{polymer} = 230 \frac{kg}{h}$ Schneckendrehzahl $n = 21 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{spez} = 10,9 \frac{kg \cdot min}{h}$				
		3	4	5	6	7	3	4	5	6	7	3	4	5	6	7
1	Standard	130	178	512	551	1	247	257	484	494	1	236	253	434	427	1
2	Grob	130	160	387	455	3	190	214	430	491	3	216	241	416	462	3
3	Fein	107	149	416	489	3	215	238	452	506	3	221	257	369	481	3
5	Granulat ZSK	51	52	333	362	2	100	112	322	322	2	130	146	288	269	2
7	50 % Holz	131	169	423	429	1	213	236	451	456	1	220	239	358	422	2
8	60 % Holz	100	143	459	484	1	202	224	481	494	1	203	231	330	370	1

3.4.2.3 Gemittelter Druck und Druckdifferenzenvergleich

In dem folgenden Kapitel wird der gemittelte Druck aus Kapitel 3.4.2.2 grafisch dargestellt und die Differenz zwischen Druckspitze und Drucktal der Sensoren in den einzelnen Messreihen verglichen. Dabei werden die min- und max-Werte aus den Versuchsdiagrammen herausgelesen und die Differenz gebildet. **Abbildung 3-6** zeigt hier für eine bessere Übersicht nochmals die Position der Sensoren am Extruder.

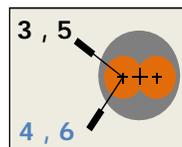


Abbildung 3-6. Sensorposition am Extruder

Nach **Abbildung 3-7** fällt auf, dass die Druckspitzen der Sensoren 3 und 5 auf der oberen Position meist eine von ca. 50 bis 100 bar größere Differenz zum jeweiligen Druckminimum aufweisen. Dagegen ergeben sich für Sensor 4 und 6 zwischen der unteren und oberen Sensorposition eine geringere Druckdifferenz von ca. 50 bar. Auf den gemittelten Druck von der oberen Position zur unteren kann dieser Trend dabei nicht zurückgeschlossen werden, da der zeitliche Verlauf der Druckspitzen ein unterschiedliches Delta aufweist (siehe Abbildung 3-7).

Abweichungen im Druckbereich der Druckdifferenz und dem gemittelten Druck sind auf Materialinhomogenitäten während dem Versuch zurückzuführen. Die Druckdifferenz zwischen Spitze und Tal bleiben über den Versuch jedoch konstant, sodass sich nur das gesamte Niveau verändert, womit sich auch das gemittelte Druckniveau ändern kann.

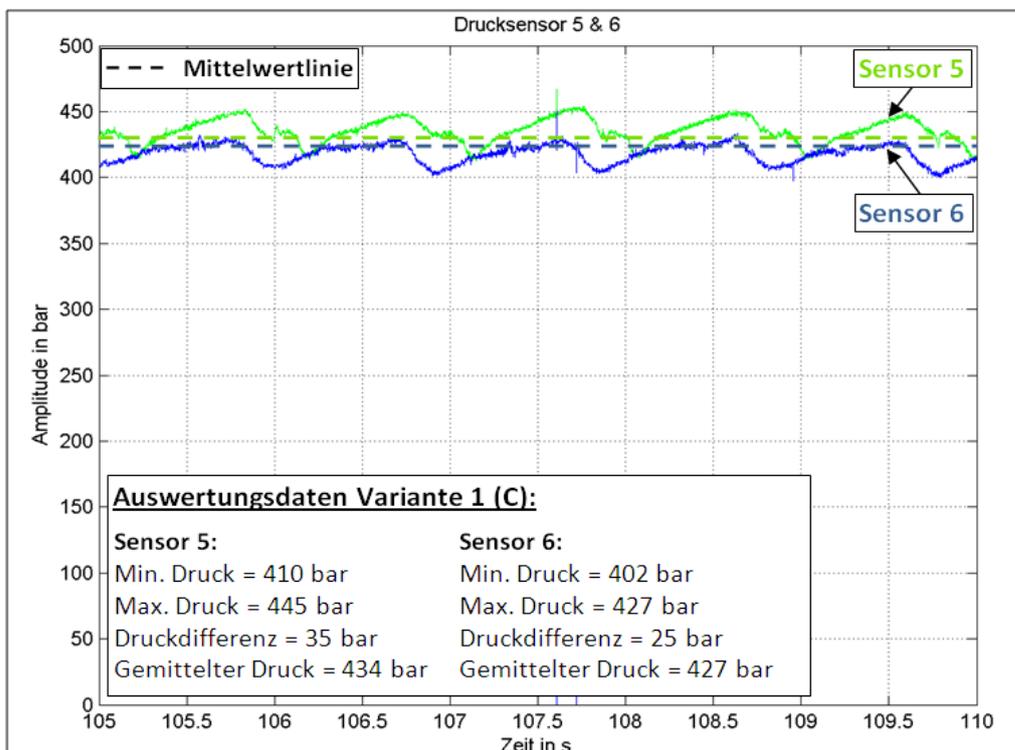
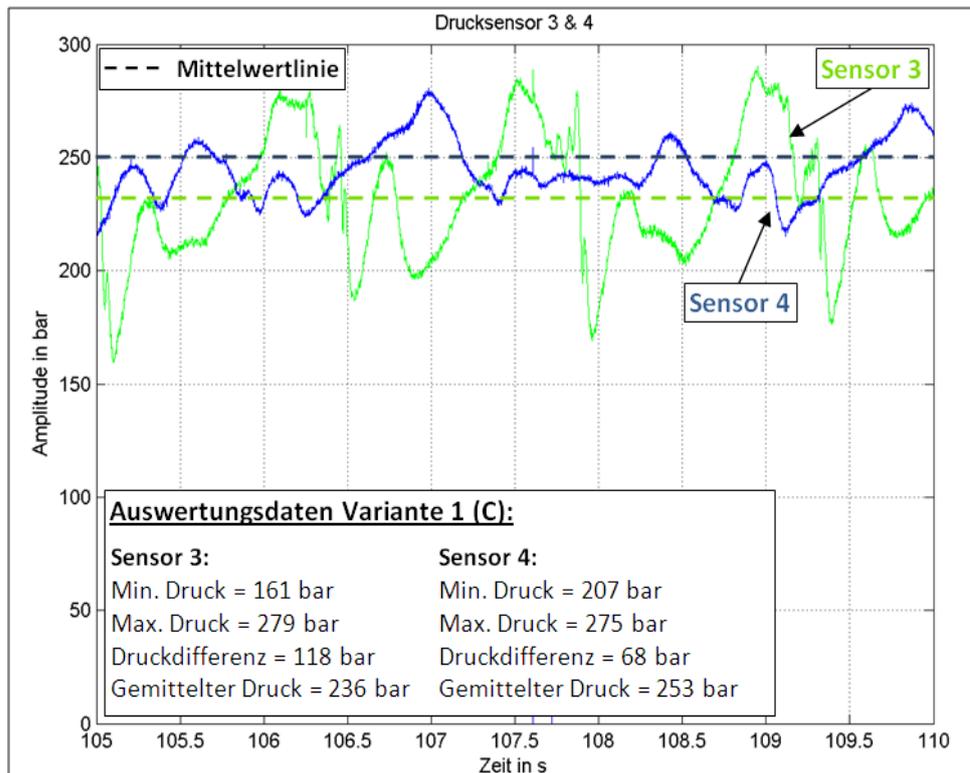


Abbildung 3-7. Druckverlauf der Variante 1: Standardmaterial mit einem Durchsatz C von 230 kg/h, n=21 1/min (Bezeichnung: Versuch 04_1, Oben: Sensor 3 und 4, Unten: Sensor 5 und 6)

3.4.2.4 Materialquervergleich

Im Materialquervergleich werden die jeweiligen Drücke innerhalb der Sensorpositionen 3 bis 6 des Extruders 1 mit den unterschiedlich extrudierten Materialien verglichen. Analog zu Kapitel 3.4.2.3 werden auch hier Druckminimas und Druckmaximas mit dem Differenzdruck sowie die gemittelten Drücke grafisch dargestellt. Die Druckwerte in den folgenden Diagrammen entsprechen ebenfalls den Tabellen aus Kapitel 3.4.2.3 und werden hier nicht mehr extra aufgeführt.

3.4.2.4.1 Durchsatz A: 100 kg/h

Abbildung 3-8 zeigt die grafische Auswertung mit 100 kg/h Massendurchsatz im Materialvergleich.

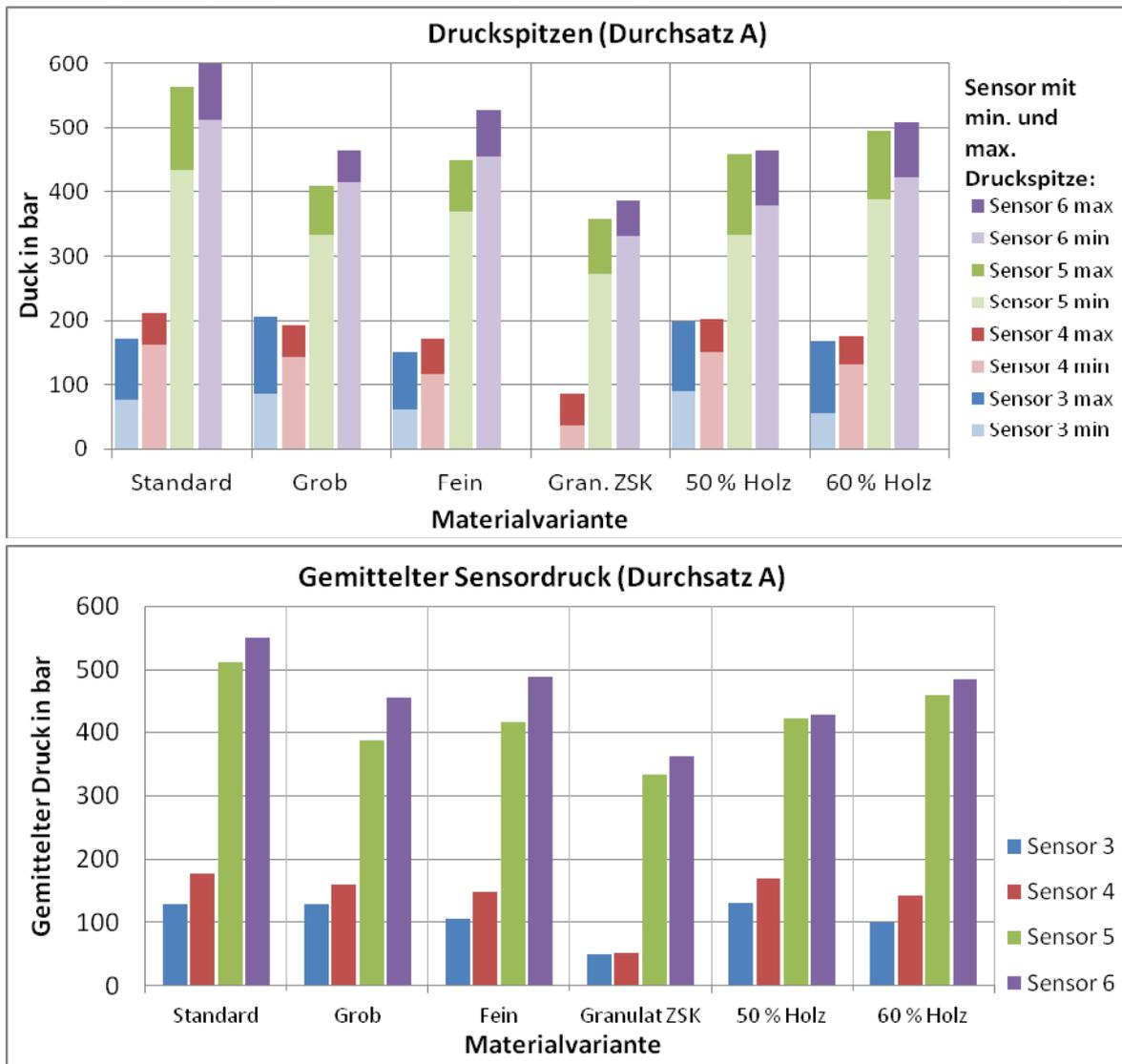


Abbildung 3-8. Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 100 kg/h

3.4.2.4.2 Durchsatz B: 153 kg/h (Standarddurchsatz)

Abbildung 3-9 zeigt die grafische Auswertung mit 153 kg/h Massendurchsatz im Materialvergleich.

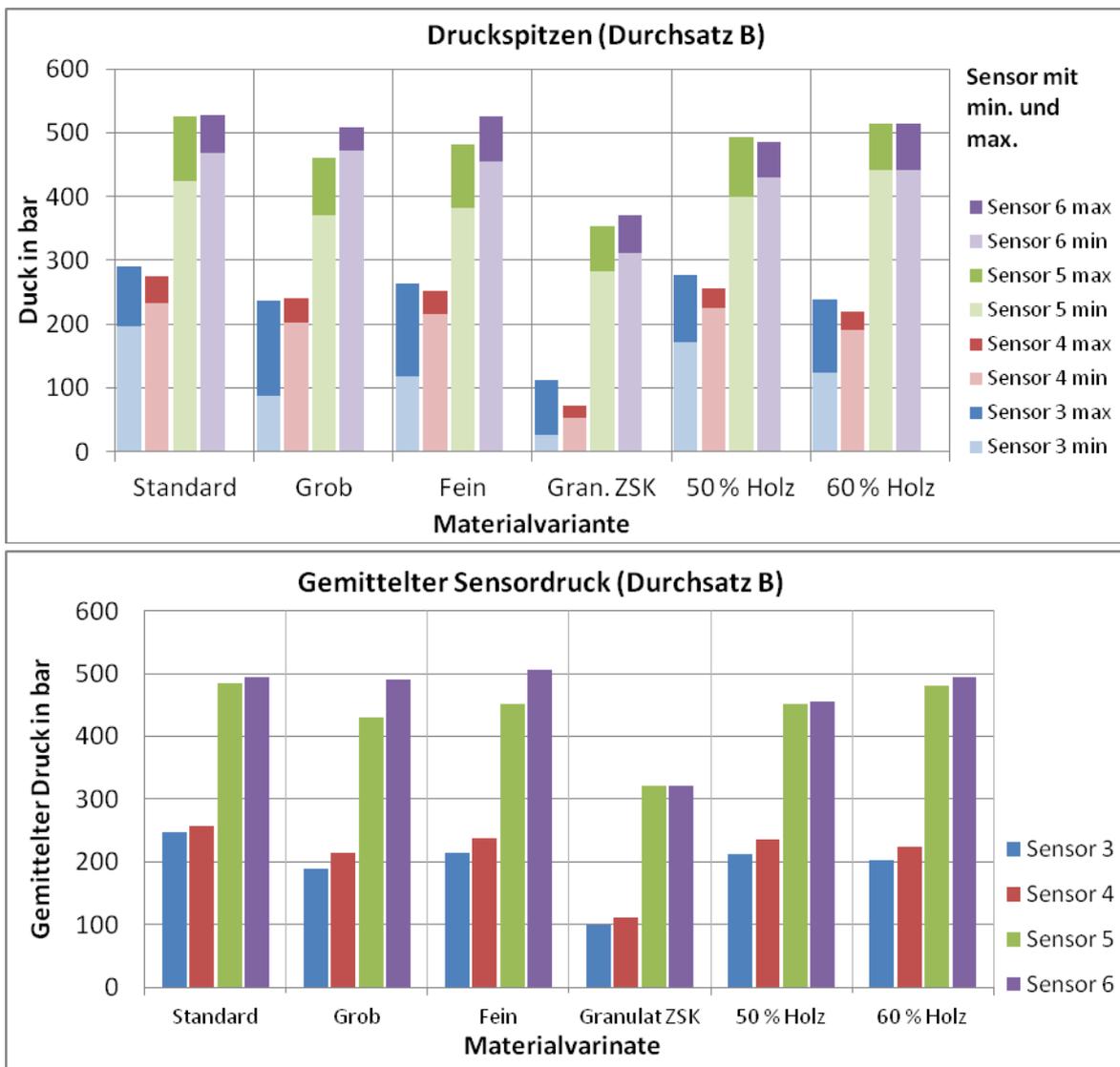


Abbildung 3-9. Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 153 kg/h

3.4.2.4.3 Durchsatz C: 230 kg/h

Abbildung 3-10 zeigt die grafische Auswertung mit 230 kg/h Massendurchsatz im Materialvergleich.

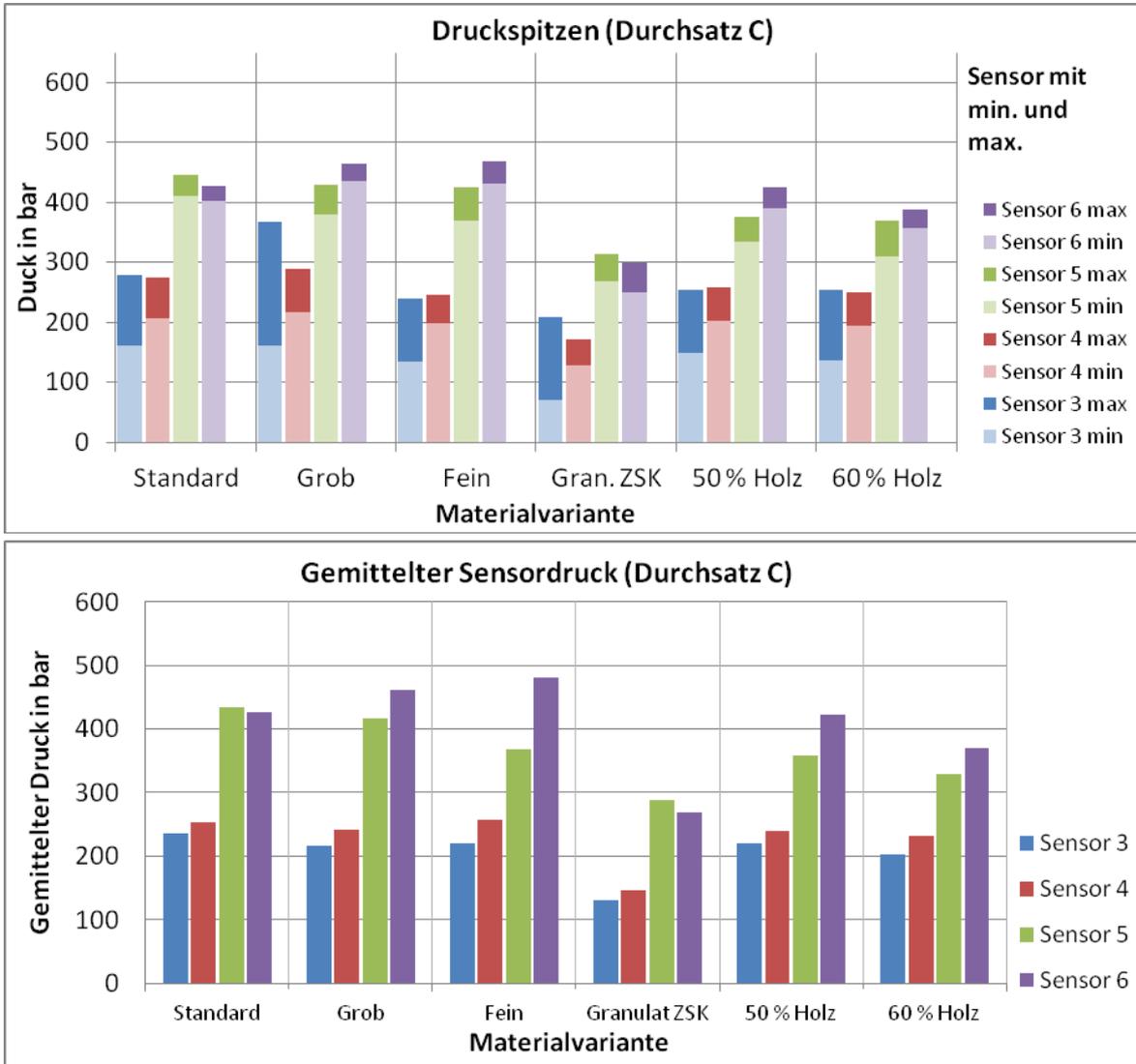


Abbildung 3-10. Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 230 kg/h

3.4.3 Fazit der Auswertung

Das Ergebnis des Extruders 1 befindet sich zusammen mit dem des Extruders 2 im Kapitel 3.5.2.

3.4.4 Stegposition über den Druckverlauf

Die Lage der Stegposition wird parallel mit der Messung aller Varianten am Extruder durchgeführt. Die Stegposition der einzelnen Sensorzonen wird über die „Null-Stellung“ der Schnecke bei gleichzeitiger Druckaufnahme aufgezeichnet. Mit Hilfe der Geometriedaten (Stegbreite, Steigung und Zonenposition) kann auf die tatsächliche Stegposition zurückgeschlossen werden.

Die elektrische Erfassung der „Null-Stellung“ erfolgt über einen optischen Sensor mittels einer Reflektionslichtschranke (siehe **Abbildung 3-11**). Alle Diagramme beziehen sich auf den Mittelpunkt des Messflecks am Drucksensor, Teilüberdeckungen von Steg und Sensor werden hier noch nicht berücksichtigt.

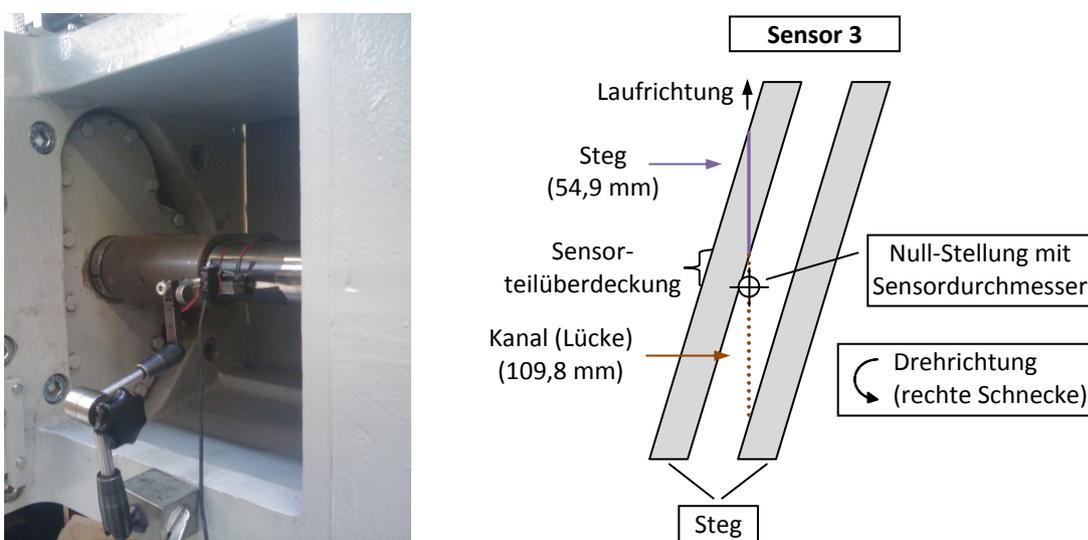


Abbildung 3-11: Messeinrichtung (rechts), Skizze der Sensorposition 3 mit der Null-Stellung

Abbildung 3-12 zeigt beispielhaft den Verlauf der Drucksensoren drei und vier mit den dazugehörigen Schnecken-Null-Stellungen als Rechtecksignal. Die senkrechte Linie auf dem Rechtecksignal ist jeweils etwas auf die rechte Hälfte des Signals versetzt, da die Lichtschranke ein merklich zu frühes Signal erzeugt hat. Daher befindet sich das Signal nicht symmetrisch um die Nullstellung gelegt.

Versuchs-Parameter für Abbildung 3-12 (entsprechen Variante 1B aus Tabelle 3-9)

- Massendurchsatz: $\dot{m} = 150 \text{ kg/h}$
- Extruderdrehzahl: $n = 11 \text{ min}^{-1}$
- Massentemperatur: $T_m = 181 \text{ °C}$
- Massendruck am Sensor 7: k.A.

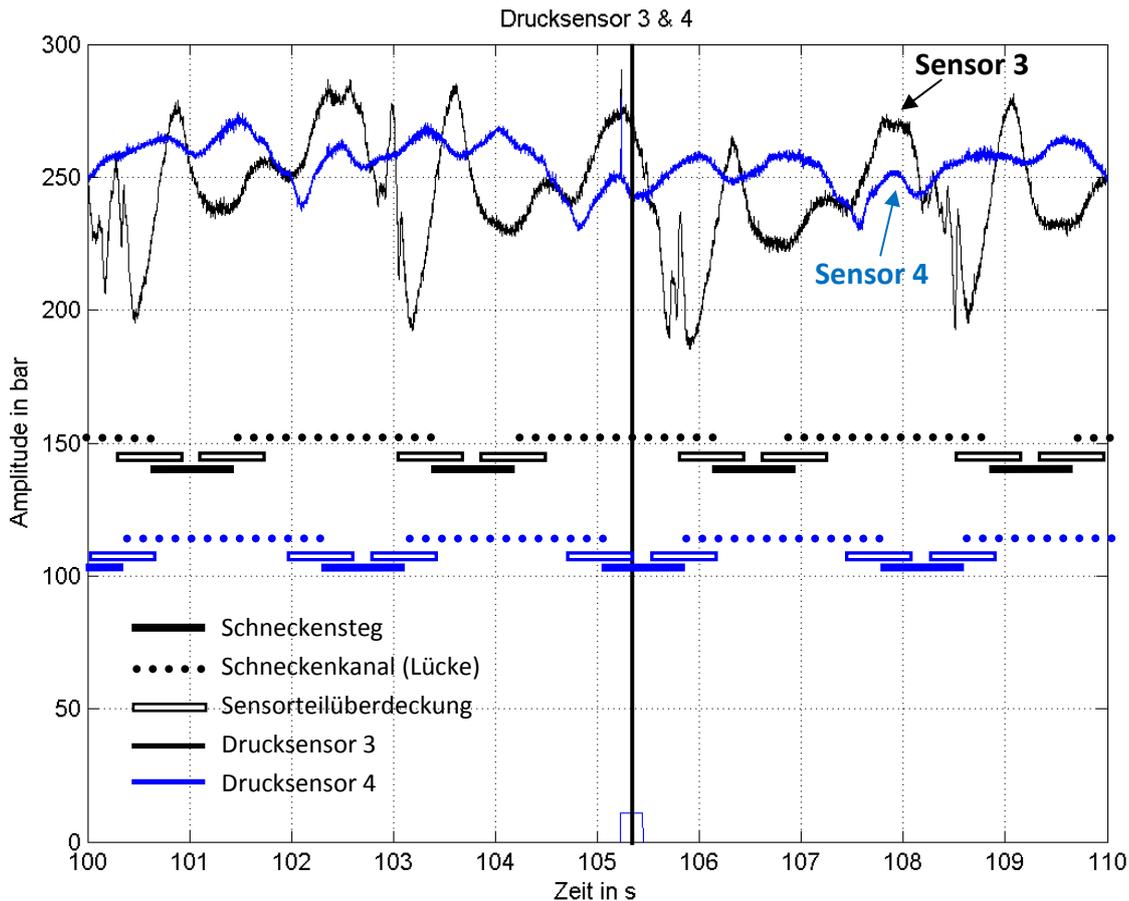


Abbildung 3-12. Stegposition mit Druckverlauf der Variante 1: Standardmaterial mit einem Durchsatz B von 150kg/h, n=11 1/min (Druckversuchsbezeichnung: Versuch 2010-11-10_Nr03 mit Sensor 3 und 4)

Die eingezeichneten Sensorteilüberdeckungen in den Druckverläufen zeigen, dass sich beide Sensoren nur zu einem ganz kurzen undefinierten Zeitpunkt in derselben Druckkammer befinden. Somit kann sich hier kein gleiches Druckniveau einstellen. Auf den Druckverlauf wirkt sich dies durch eine kurze Druckschwankung aus. Als Beispiel sei hier der Drucksensor 3 bei Stegeintritt genannt, hier fällt der Druck kurz ab, bevor er bis zu einem Maximum stark ansteigt.

3.4.4.1 Charakterisierung der Schneckenzonen

Für eine bessere Übersicht wird nachfolgend der Druckverlauf der beiden Schneckenzonen mit charakteristischen Punkten visualisiert. Dabei werden Merkmale wie beispielsweise Maxima oder Minima beider Sensoren berücksichtigt, welche folgend mit der jeweiligen Schneckenstellung in den Tabellen aufgelistet sind. Die Schneckenstellungen stellen einen senkrechten Schnitt durch die Förderschnecken dar. Die reale 3-dimensionale und komplexere Realität vor allem im Zwickelbereich der Schnecken kann dadurch leider nicht zufrieden stellend dargestellt werden. Aber es erleichtert die Interpretation der Ergebnisse erheblich.

Zone 5 (Sensor 3 und 4)

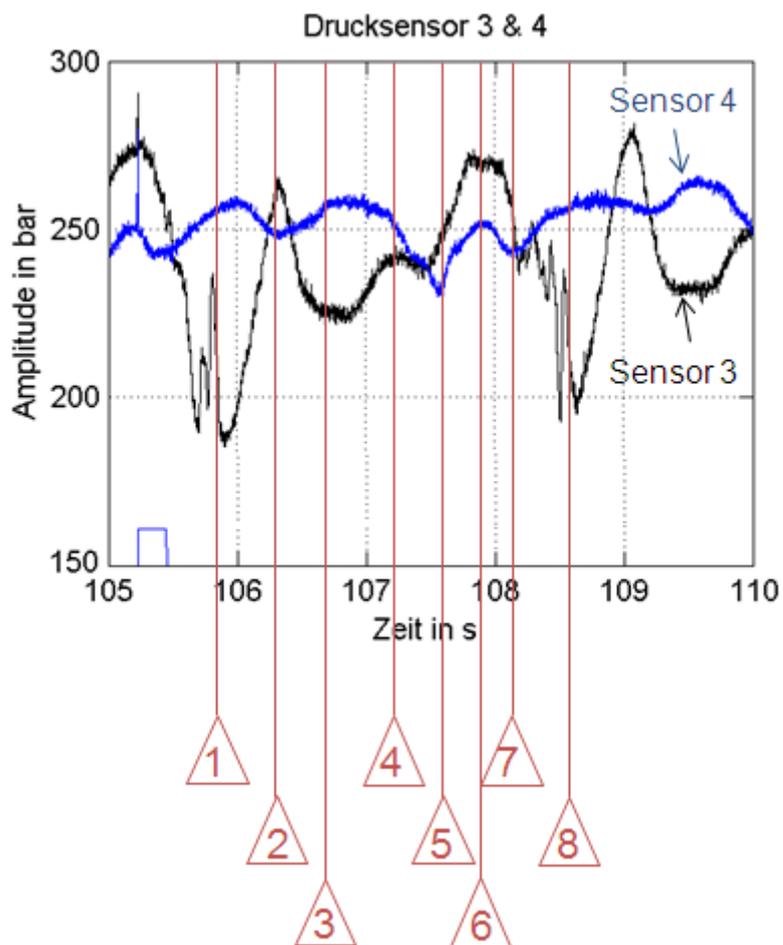


Abbildung 3-13. Druckverlauf der Variante 1 mit eingezeichneten Schneckenstellungen (Standardmaterial, Versuch 2010-11-10_Nr03, Durchsatz 150 kg/h, n=11 1/min, Sensor 3 und 4)

Tabelle 3-10. Übersicht der Sensor- zu Stegposition bei einer 180° Umdrehung (Zone 5)

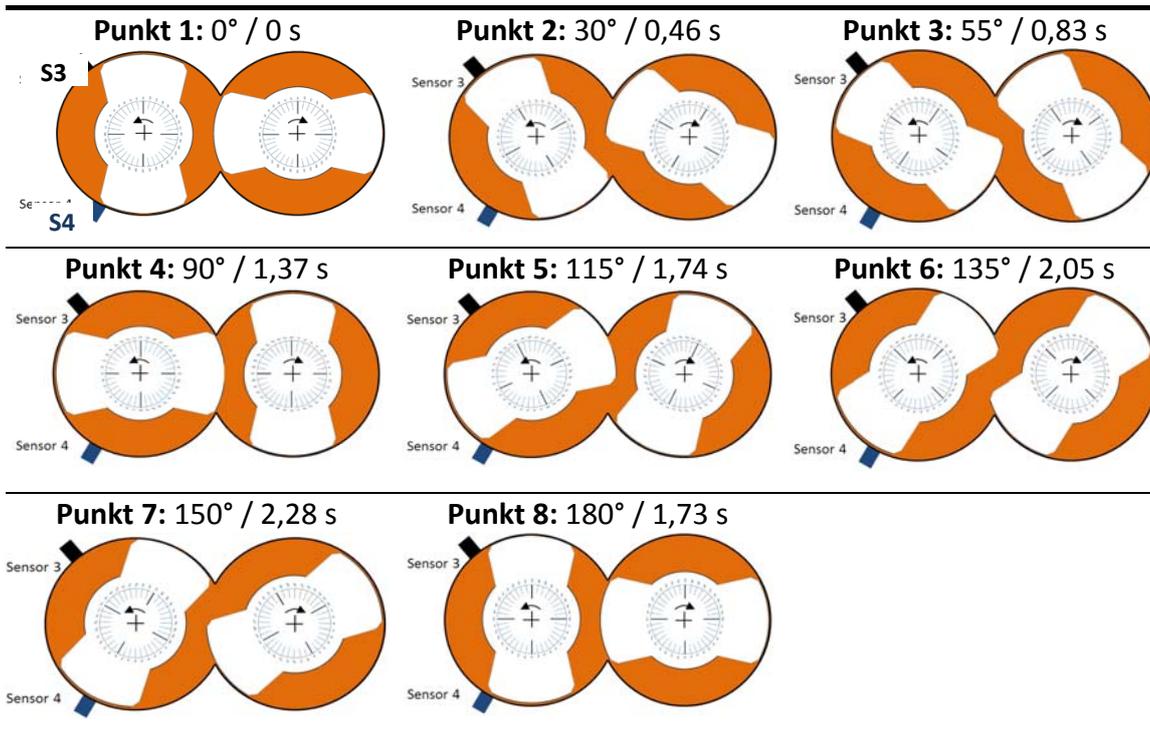


Tabelle 3-11. Druckverlaufmerkmale in der Zone 4

Pkt.	Grad / Zeit	Merkmale	Drucksensor 3	Drucksensor 4
1	0° / 0 s	Steg eintritt und Drucktiefe bei Sensor 3.	Drucktiefe erreicht	Druckanstieg
2	30° / 0,46 s	Zwickelbereich der linken* Schnecke öffnet sich.	Kurze Druckspitze	Kurzzeitiger Druckabfall
3	55° / 0,83 s	Der Steg der rechten Schnecke tritt in den Zwickelbereich ein.	Druckabfall	Druckanstieg
4	90° / 1,37 s	Die Schneckenkammern beider Schnecken sind getrennt.	Druckanstieg mit Zwischenhoch	Druckabfall
5	115° / 1,74 s	Steg eintritt und Drucktiefe bei Sensor 4.	Druckanstieg	Drucktiefe erreicht
6	135° / 2,05 s	Der Steg der linken Schnecke läuft in den Zwickelbereich ein. Druckhoch bei Sensor 3.	Max. Druck erreicht	Kurze Druckspitze
7	150° / 2,28 s	Der Steg der linken Schnecke befindet sich im Zwickelbereich.	Druckabfall	Druckabfall
8	180° / 2,73 s	Linke Schnecke befindet sich im Zwickelbereich.	Drucktiefe erreicht	Druckanstieg

* in Extrusionsrichtung

3.5 Durchführung auf Produktionsextruder mit veränderter Schneckengeometrie (Extruder 2)

Gegenüber Extruder 1 wurde ein Produktions-Versuchsextruder realisiert, der länger ist und einen größeren Schneckendurchmesser besitzt. Es wurde zudem versucht die Spreizkräfte zu reduzieren, mit denen die Schnecke an den Zylinder gedrückt wird. Dazu wurde der Spalt zwischen Schnecke und Zylinder vergrößert (Kopfspalt erhöht) und der Spalt zwischen den Schneckenstegen (Flankenspiel vergrößert).

Der dynamische Druckverlauf wird nach **Abbildung 3-14** an vier Bereichen des Extruders erfasst und aufgezeichnet. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Sensorbohrbild im Gegensatz zu dem Extruder 1 nicht im 110° - Winkel angeordnet, sondern um 90° versetzt ist. Der 90° - Winkel ist aufgrund baulicher Gegebenheiten der Zylindergeometrie nicht realisierbar.

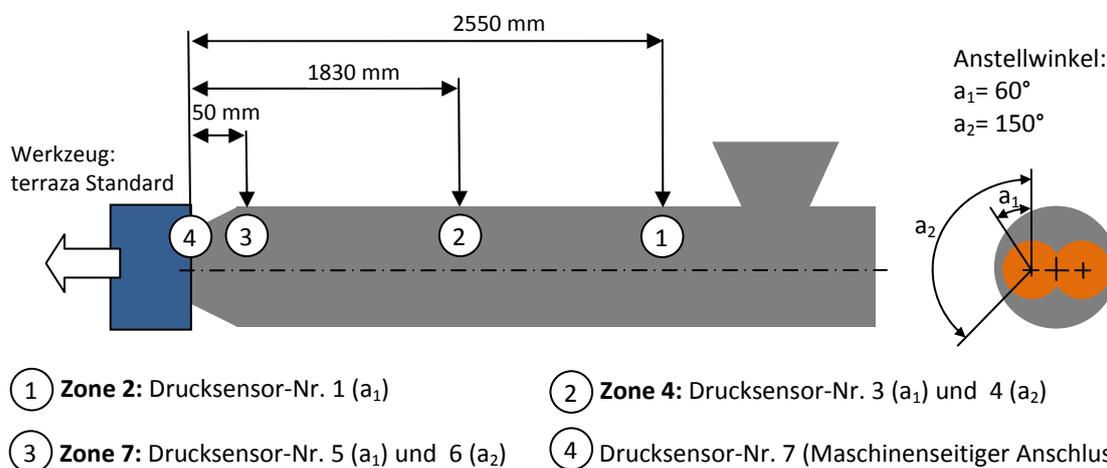


Abbildung 3-14: Prinzipskizze der Drucksensorenverteilung über den Extruder

3.5.1 Auswertung

Der Versuchsverlauf setzt sich aus sieben durchgeführten Varianten zusammen. Dabei wird in der Auswertung zunächst auf die Leistungsübersicht der einzelnen Versuche eingegangen und im Anschluss daran werden verschiedene Auswertungen gezeigt, sowie ein Quervergleich der Materialien durchgeführt.

3.5.1.1 Leistungsübersicht des Extruders 2

Für eine erste Einschätzung der Leitungsaufnahme und der daraus resultierenden Drücke werden in diesem Kapitel unterschiedliche Leistungsparameter der Anlage analog zu Kapitel 3.4.2.1 aufgezeigt. Das Motordrehmoment beträgt bei dieser Anlage $M_M = 35,7$ kNm

In **Tabelle 3-12** ist eine Leistungsübersicht des Extruders 2 mit den oben beschriebenen Parametern über die einzelnen Versuchsvarianten aufgelistet.

Tabelle 3-12: Leistungsübersicht des Extruders 2

Variante Nr.	Material	Anlagenleistungsübersicht der einzelnen Durchsatzparameter																															
		A: Durchsatz Niedrig								B: Durchsatz Mittel								C: Durchsatz Hoch								D: Durchsatz Hoch + 3 % Gleitmittel							
		Größe								Größe								Größe								Größe							
		Durchsatz $\dot{m}_{\text{Polymer}} = 100$ kg/h Schneckendrehzahl $n = 8,7$ min ⁻¹ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{\text{spez}} = 11,5$ kg·min/h								Durchsatz $\dot{m}_{\text{Polymer}} = 153$ kg/h Schneckendrehzahl $n = 8,7$ min ⁻¹ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{\text{spez}} = 17,6$ kg·min/h								Durchsatz $\dot{m}_{\text{Polymer}} = 230$ kg/h Schneckendrehzahl $n = 13$ min ⁻¹ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{\text{spez}} = 17,7$ kg·min/h								Durchsatz $\dot{m}_{\text{Polymer}} = 230$ kg/h Schneckendrehzahl $n = 13$ min ⁻¹ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{\text{spez}} = 17,7$ kg·min/h							
		I [A]	P _{SM-I} [kW]	P _{M-I} [kW]	M _{M-I} [kNm]	M _S [kNm]	M% [%]	T _m [°C]	L _M [kWh/kg]	I [A]	P _{SM-I} [kW]	P _{M-I} [kW]	M _{M-I} [kNm]	M _S [kNm]	M% [%]	T _m [°C]	L _M [kWh/kg]	I [A]	P _{SM-I} [kW]	P _{M-I} [kW]	M _{M-I} [kNm]	M _S [kNm]	M% [%]	T _m [°C]	L _M [kWh/kg]	I [A]	P _{SM-I} [kW]	P _{M-I} [kW]	M _{M-I} [kNm]	M _S [kNm]	M% [%]	T _m [°C]	L _M [kWh/kg]
1	Standard	24,1	5,1	15,3	16,8	11,7	32,8	187	0,11	44,8	9,5	28,5	31,2	23,1	64,7	190	0,15	66,9	14,2	42,6	31,2	25,1	70,3	193	0,16	51,7	8,1	24,3	24,3	18,6	52,1	185	0,12
2	Grob	21,7	4,6	13,8	15,3	14,5	40,6	188	0,14	46,0	9,8	29,4	32,1	24,5	68,6	190	0,15	68,4	14,5	43,5	31,8	26,0	72,9	193	0,16	61,0	13,0	39,0	28,5	22,5	63,0	190	0,14
3	Fein	28,3	6,0	18,0	19,5	14,3	40,1	189	0,14	44,4	9,4	28,2	31,2	23,4	65,6	191	0,15	68,4	14,5	43,5	32,1	25,5	71,4	196	0,16	58,6	12,4	37,2	27,3	21,6	60,4	190	0,14
4	Hoher MFI	29,8	6,3	18,9	20,7	14,4	40,3	183	0,14	29,6	6,3	18,9	20,7	14,1	39,4	182	0,09	44,2	9,4	28,2	20,7	15,7	44,1	186	0,10								
5	Granulat ZSK	20,5	4,3	12,9	14,4	9,5	26,6	176	0,09	31,1	6,6	19,8	21,6	15,0	41,9	178	0,10																
6	Oechsler	20,7	4,4	13,2	14,4	9,6	26,8	181	0,09	32,0	6,8	20,4	22,5	16,0	44,7	182	0,10	59,5	12,6	37,8	27,9	21,7	60,9	186	0,14	42,4	9,0	27,0	19,8	14,9	41,7	180	0,10
7	50 % Holz	28,5	6,1	18,3	19,8	13,7	38,3	187	0,13	39,5	8,4	25,2	27,5	19,9	55,7	186	0,13	60,7	12,9	38,7	28,5	22,7	63,7	192	0,14	54,2	11,5	34,5	25,5	20,9	58,5	190	0,13

3.5.1.2 Gemittelter Druck über die Messreihe

In **Tabelle 3-13** werden analog zur Leistungsübersicht der gemittelte Druck von Sensor 1 bis 7 über die gesamte Versuchszeit aufgelistet

Versuchsanmerkungen:

- Bei dem gemittelten Druck handelt es sich um einen Mittelwert über die gesamte Messreihe aller Samples und nicht um die gemittelten Maximas und Minimas.
- Bei dem Versuch Granulat ZSK (Variante 5) kam es zu Durchsatzproblemen, da das Material nicht kontinuierlich in den Extruder gefördert wurde.

- Der Versuch mit hohem MFI (Variante 4) wurde nach dem Sensorwechsel der ersten und letzten Zone nicht erneut durchgeführt, somit können diese beiden Zonen mit Sensor 1&2 sowie 5&6 nicht ausgewertet werden.

Tabelle 3-13: Gemittelter Druck über die Messreihe

Variante Nr.	Material	Gemittelter Druck über die Messreihe je Drucksensor [bar]																											
		A: Durchsatz Niedrig							B: Durchsatz Mittel							C: Durchsatz Hoch							D: Durchsatz Hoch + 3 % Gleitmittel						
		Durchsatz $\dot{m}_{\text{Polymer}} = 100 \text{ kg/h}$ Schneckendrehzahl $n = 8,7 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{\text{spez}} = 11,5 \text{ kg}\cdot\text{min/h}$							Durchsatz $\dot{m}_{\text{Polymer}} = 153 \text{ kg/h}$ Schneckendrehzahl $n = 8,7 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{\text{spez}} = 17,6 \text{ kg}\cdot\text{min/h}$							Durchsatz $\dot{m}_{\text{Polymer}} = 230 \text{ kg/h}$ Schneckendrehzahl $n = 13 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{\text{spez}} = 17,7 \text{ kg}\cdot\text{min/h}$							Durchsatz $\dot{m}_{\text{Polymer}} = 230 \text{ kg/h}$ Schneckendrehzahl $n = 13 \text{ min}^{-1}$ Spez. Durchsatz $\dot{m}_{\text{spez}} = 17,7 \text{ kg}\cdot\text{min/h}$						
Sensor Nr.							Sensor Nr.							Sensor Nr.							Sensor Nr.								
		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	Standard	5	8	4	0	281	231	156	4	8	205	176	328	289	168	3	7	203	175	346	279	165	2	6	85	33	341	251	174
2	Grob	5	8	11	3	343	258	173	4	7	196	176	358	264	164	4	7	173	135	378	261	156	4	7	144	101	340	235	153
3	Fein	4	7	13	7	322	216	161	3	7	195	170	367	259	171	5	8	196	167	380	257	169	5	8	182	147	163	220	163
4	Hoher MFI			33	53			123			35	45			136			22	36			110							
5	Granulat ZSK	4	8	0	0	252	208	154	5	9	38	4	247	186	144														
6	Oechsler	2	2	4	0	262	207	140	14	14	103	97	298	237	143	6	10	276	367	289	255	133	4	9	222	240	238	193	108
7	50 % Holz	3	6	22	10	321	222	168	4	7	121	85	321	207	165	4	7	165	144	334	260	153	3	6	185	152	327	251	147
8	60 % Holz																												

3.5.1.3 Gemittelter Druck und Druckdifferenzenvergleich

In dem folgenden Kapitel wird der gemittelte Druck aus Kapitel 3.4.2.2 und 3.5.1.2 grafisch dargestellt und die Differenz zwischen Druckspitze und Drucktal der Sensoren in den einzelnen Messreihen verglichen. Dabei werden die min.- und max.-Werte aus den Versuchsdiagrammen herausgelesen und die Differenz gebildet. Ein Vergleich der Druckmittelwerte an den beiden Extruder 1 und 2 wird in Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 dargestellt. Diese Balkendiagramme beinhalten die ersten drei Versuchsvarianten und den Druckmittelwert der Sensoren 3 und 5, da diese Positionen verschleißbehaftet sind. Die weiteren Varianten und Sensoren verhalten sich analog zu diesem Diagramm.

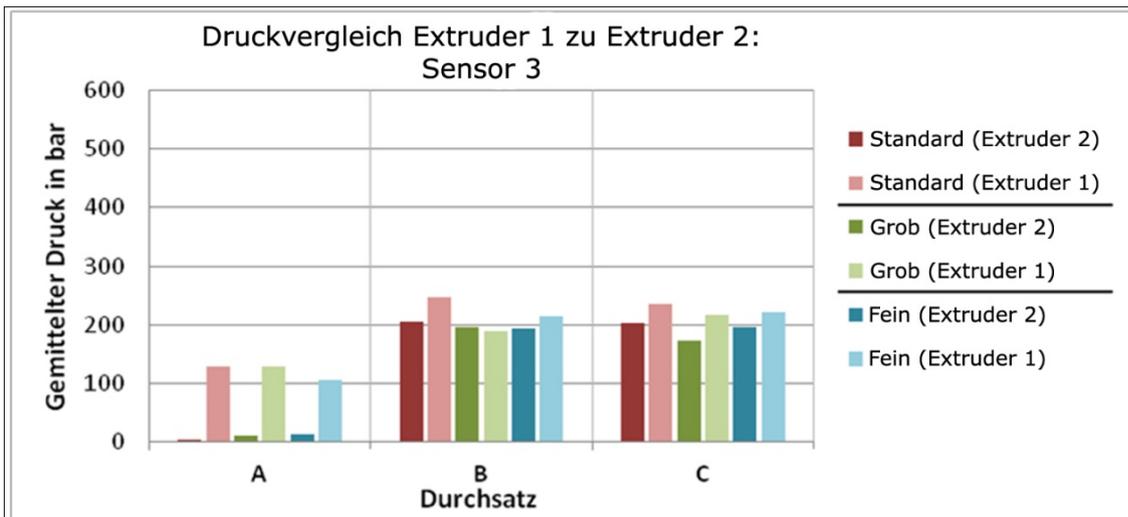


Abbildung 3-15. Druckmittelwertvergleich von Sensor 3 der Extruderlinien

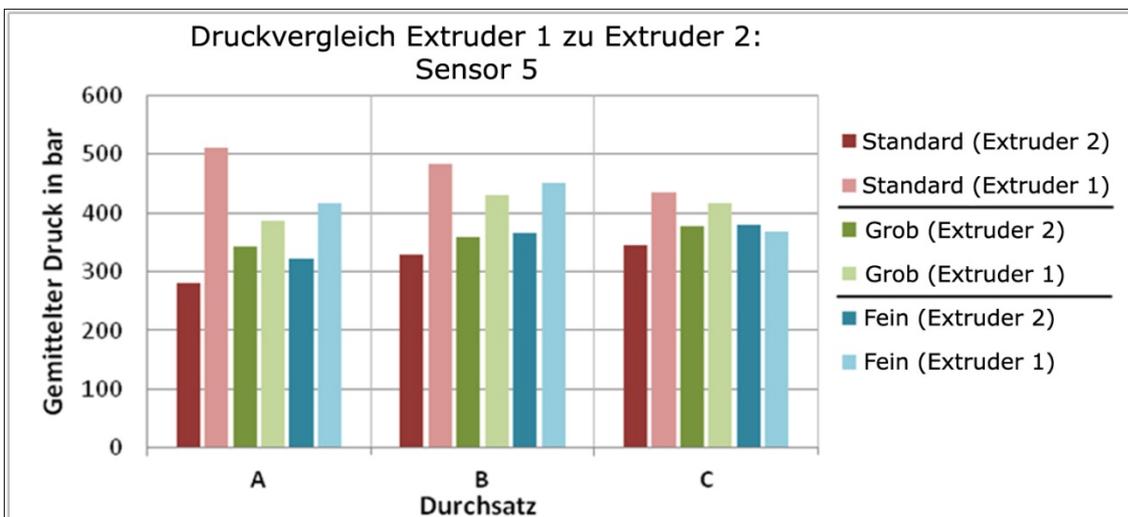


Abbildung 3-16. Druckmittelwertvergleich von Sensor 5 der Extruderlinien

Der gemittelte Druck nach **Kapitel 3.5.1.2** zeigt, dass in der Schneckenzone bei den ersten beiden Sensoren 1 und 2 nahezu kein Druck entsteht und dieser erst später aufgebaut wird. In der Einzugszone entstehen auch keine Druckspitzen, sodass hier diese beiden Sensoren nicht grafisch ausgewertet werden.

Es fällt auf, dass die Druckspitzen der Sensoren 3 und 5 auf der oberen Position (10 Uhr) meist eine von ca. 150 bis 300 bar größere Differenz zum jeweiligen Druckminimum aufweist. Dagegen ergibt sich für Sensor 4 und 6 zwischen der unteren und oberen Sensorposition eine wesentliche geringere Druckdifferenz von ca. 50 bis 150 bar.

Die Druckdifferenz der einzelnen Varianten pro Schneckenumdrehung wird in **Tabelle 3-14** aufgelistet. Hier zeigt sich, dass die Druckunterschiede der Zone 5 von Sensoren 3 zu 4 bei einem Durchsatz von 230 kg/h (Durchsatz C) die größte Differenz aufweist. Diese beträgt bei Sensor 3 gemittelt 139

bar und 61 bar bei Sensor 4. Mit dem gleichen Durchsatz ergibt sich dagegen in der Zone 8 mit den Sensoren 5 und 6 die kleinste Druckdifferenz von 60 und 30 bar.

Der Mittelwertunterschied der Druckdifferenzen in Zone 5 beträgt über die Versuchsvarianten mit den Durchsätzen A, B und C etwa 30 bar. Zone 8 weist dagegen einen etwas größeren Unterschied mit 50 bar von Variante A zu C auf.

Im direkten Vergleich des Extruders 1 zu dem Extruder 2 sind die Druckdifferenzen des Extruders 1 wesentlich geringer. Dies spiegelt sich auch bei den einzelnen Sensorpositionen wieder. In den beiden Sensorpositionen (hier Zone 5 und 8) entsteht bei dem Extruder 2 ein Druckunterschied von 50 bis 300 bar. Wobei sich hier ein deutlicherer Unterschied von der oberen zur unteren Sensorposition gegenüber dem Extruder 1 zeigt. Bei dem Extruder 1 ist das durchschnittliche Druckdifferenzenverhältnis von „oben“ zur „unteren“ Position in beiden Sensorzonen etwa 100/50 bar. In Extruder 2 dagegen 250/100 bar.

Tabelle 3-14: Druckdifferenzen pro Schneckenumdrehung der einzelnen Varianten

Durchsatz	Sensordruck 3 p_{S3} in bar			Sensordruck 4 p_{S4} in bar			Sensordruck 5 p_{S5} in bar			Sensordruck 6 p_{S6} in bar		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Extruder 1 mit den Sensorzonen 5 und 8												
Variante 1	96	94	118	50	41	68	129	100	35	86	59	25
Variante 2	118	150	207	49	38	71	75	91	50	50	36	30
Variante 3	89	144	147	56	36	75	81	100	56	72	70	41
Variante 5	-	87	138	51	18	43	86	71	46	55	58	50
Variante 7	108	106	106	51	31	55	125	94	40	85	55	35
Variante 8	113	113	118	44	28	55	106	73	61	85	73	30
Mittelwert	105	116	139	50	32	61	100	88	48	72	59	35
Extruder 2 mit den Sensorzonen 4 und 7												
Variante 1	12	296	299	-	82	108	144	218	184	68	86	64
Variante 2	24	263	226	32	157	232	323	345	232	72	81	71
Variante 3	12	302	322	27	80	106	286	268	199	83	86	55
Variante 7	147	300	249	56	160	92	223	206	152	78	96	59
Mittelwert	49	290	274	38	120	135	244	259	192	75	87	62

Abweichungen im Druckbereich der Druckdifferenz und dem gemittelten Druck liegen auch hier an möglichen Materialinhomogenitäten. Die Druckdifferenz zwischen Spitze und Tal bleibt über den Versuch jedoch konstant, sodass sich nur das gesamte Niveau kurzfristig verändert, womit sich auch das gemittelte Druckniveau ändern kann.

3.5.1.4 Materialquervergleich

Im Materialquervergleich werden die jeweiligen Drücke innerhalb den Sensorpositionen 3 bis 6 mit den unterschiedlich extrudierten Materialien verglichen. Analog zu **Kapitel 3.5.1.3** werden auch hier Druckminimas und Druckmaximas mit dem Differenzdruck sowie die gemittelten Drücke grafisch dargestellt.

3.5.1.4.1 Durchsatz A : 100kg/h

Abbildung 3-17 zeigt die grafische Auswertung mit 100 kg/h Massendurchsatz im Materialvergleich.

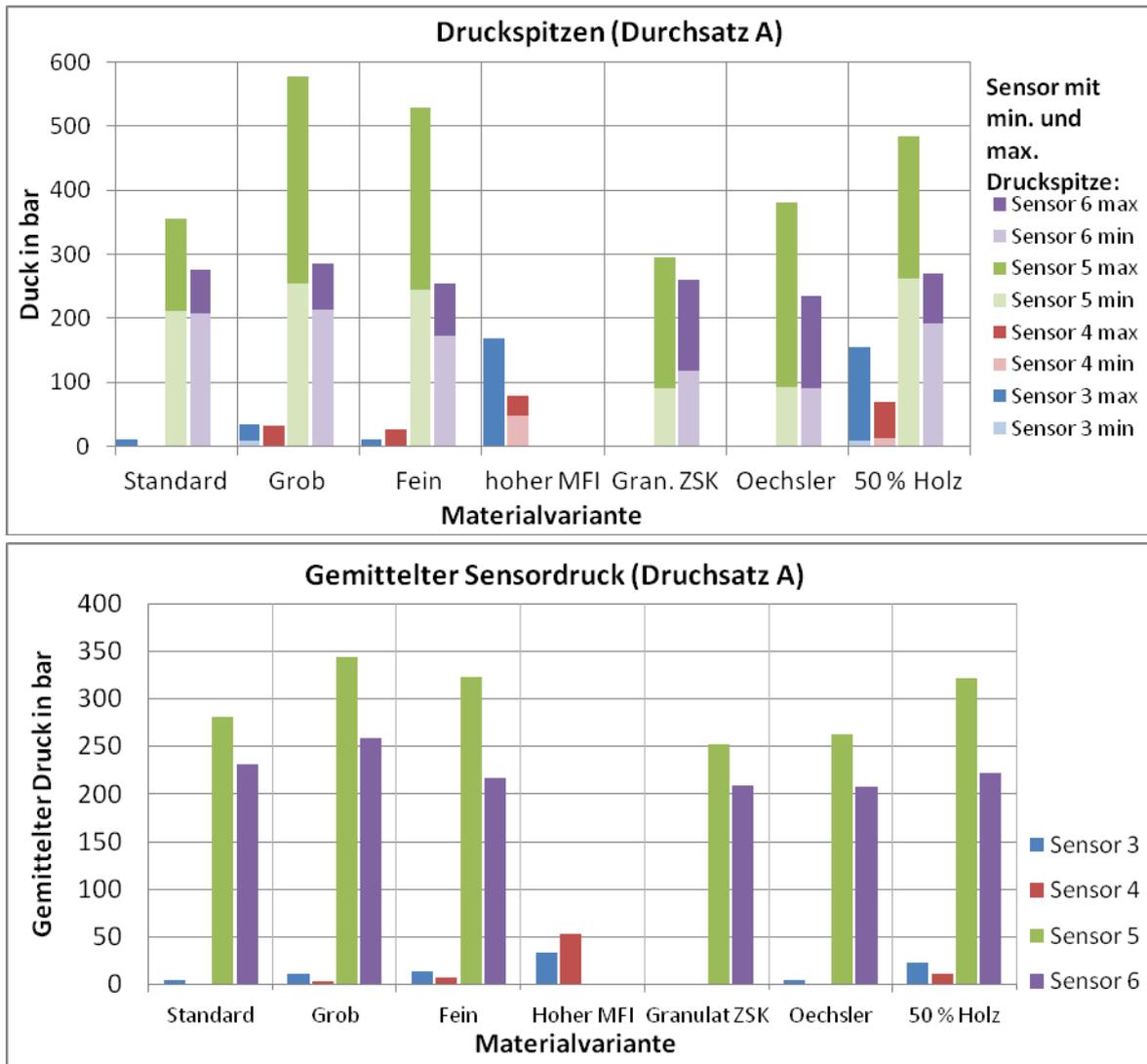


Abbildung 3-17: Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 100 kg/h

3.5.1.4.2 Durchsatz B: 153 kg/h (Standarddurchsatz)

Abbildung 3-18 zeigt die grafische Auswertung mit 153 kg/h Massendurchsatz im Materialvergleich.

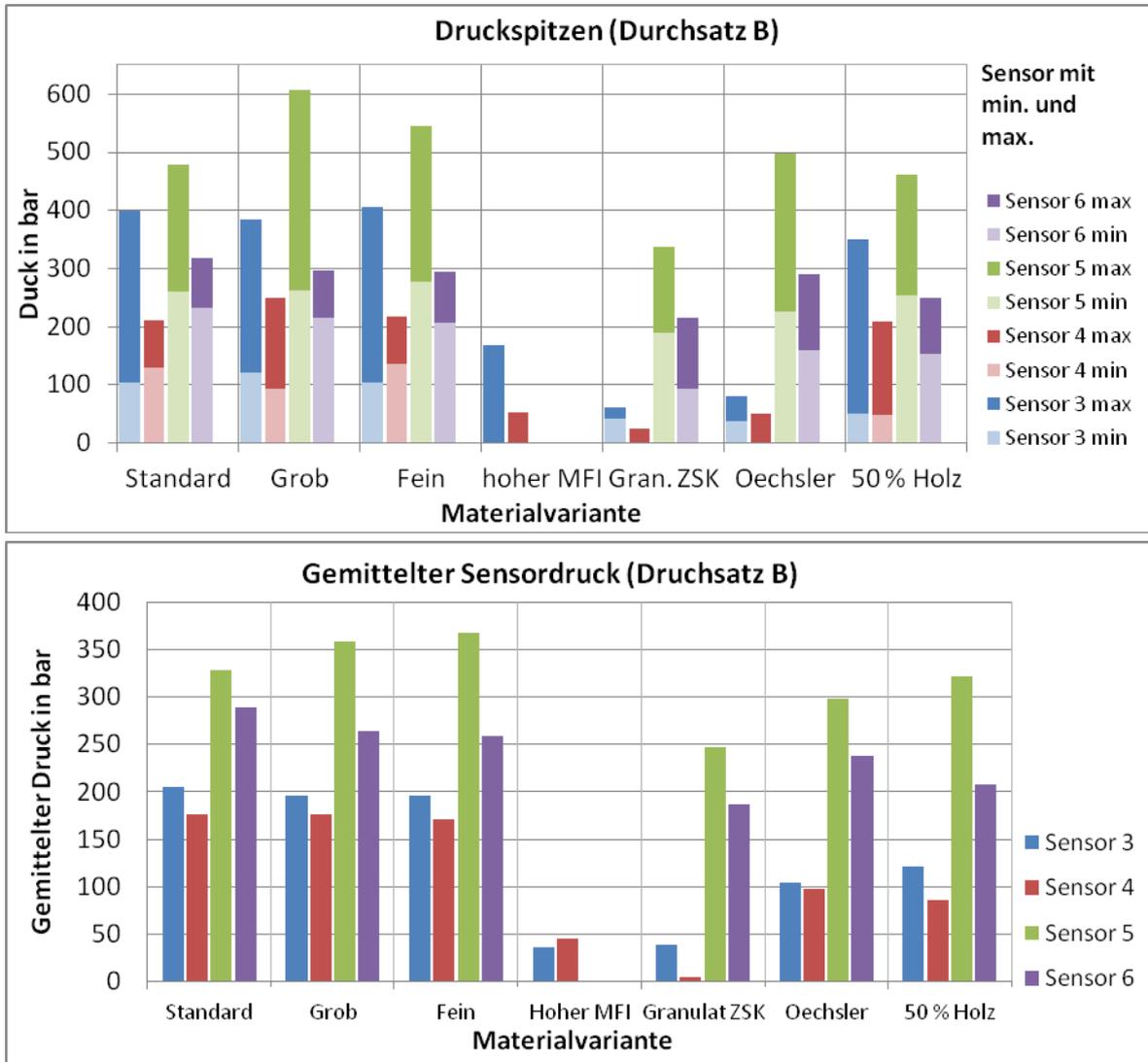


Abbildung 3-18: Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 153 kg/h

3.5.1.4.3 Durchsatz D: 230kg/h mit erhöhtem MFI Anteil (+ 3 % Gleitmittel)

Abbildung 3-19 zeigt die grafische Auswertung mit 230 kg/h Massendurchsatz im Materialvergleich.

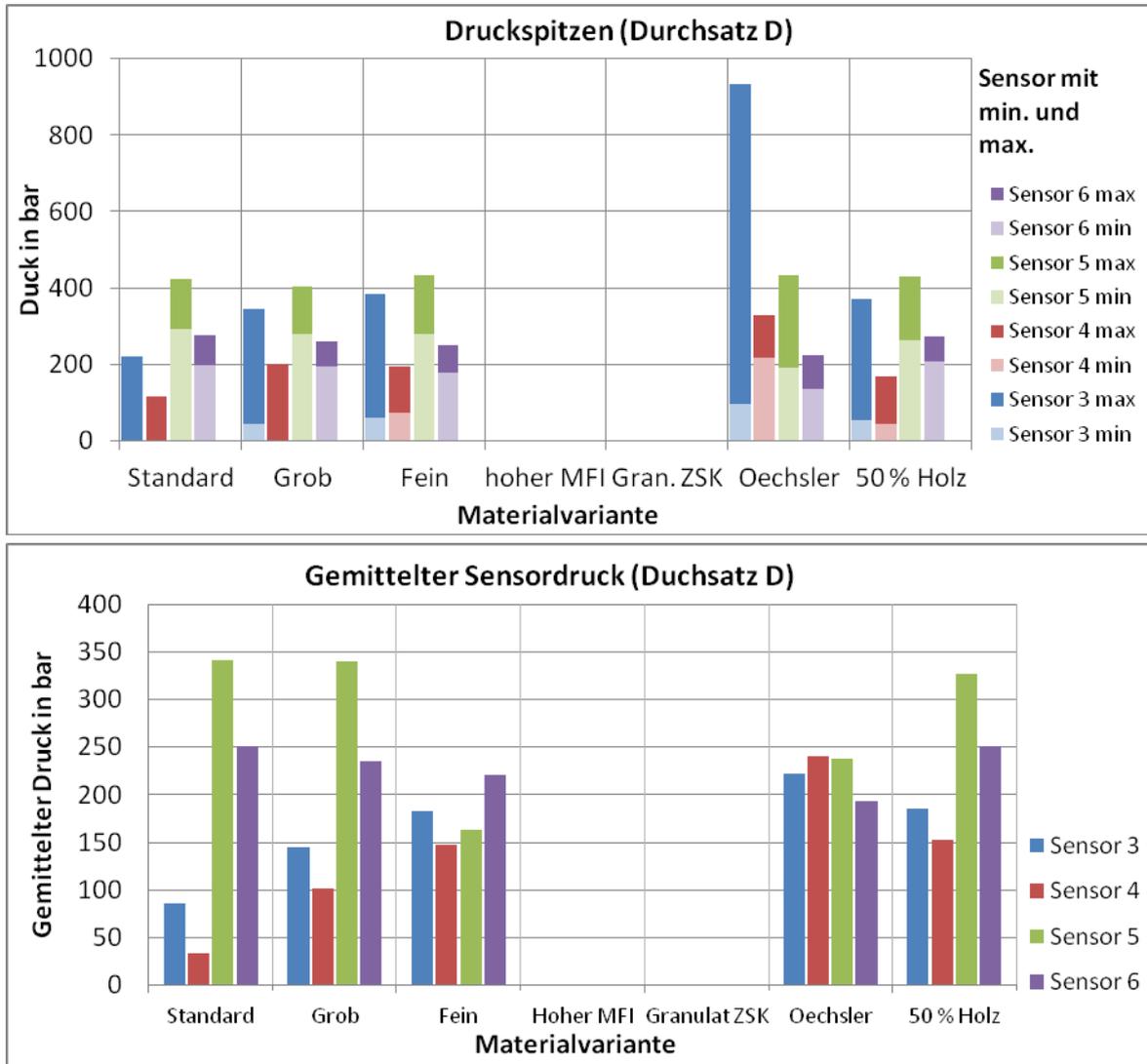


Abbildung 3-19: Grafik der Sensordruckspitzen und dem gemitteltem Sensordruck in direktem Materialvergleich bei einem Durchsatz von 230 kg/h + 3 % MFI

3.5.2 Fazit der Auswertung

3.5.2.1 Ergebnis 1 (Extruder 2)

Die „oberen“ Sensorpositionen auf 60° (10 Uhr) mit den Sensoren 3 und 5 weisen jeweils eine 150 bis 300 bar große Druckdifferenz zwischen Minima und Maxima auf. Die Druckdifferenz von Druckspitze bis Drucktal der „unteren“ Sensorpositionen auf 150° (7 Uhr) mit den Sensoren 4 und 6 weisen dagegen eine geringere Differenz von ca. 50 bis 150 bar auf (vgl. Variantentabellen unter Kapitel 3.5.1.3).

3.5.2.2 Ergebnis 2 (Extruder 2)

Nach **Kapitel 3.5.1.3** ist in der **Zone 4** mit den Sensoren 3 und 4 auffallend, dass bei steigendem Massendurchsatz beispielsweise von 153 kg/h auf 230 kg/h die Druckdifferenz der einzelnen Sensoren steigt. Gleichzeitig nimmt das Verhältnis (Sensor3/Sensor4) der Druckdifferenz des oberen Sensors zu der Druckdifferenz an dem unteren Sensor etwas ab. Das würde bedeuten, dass sich der Verschleiß kontinuierlicher über den gesamten Umfang ausbilden wird.

In der **Zone 7** mit den Sensoren 5 und 6 ist dieser Trend nahezu entgegengesetzt. Bei steigendem Massendurchsatz fällt die Druckdifferenz der Druckspitzen ab. Wie auch bei Zone 4 nimmt die Druckdifferenz des Verhältnisses von Sensor 5 zu 6 ab. Das wiederum bedeutet, dass sich der Verschleiß in der Zone 7 verkleinert und sich über den Umfang ebenfalls kontinuierlicher ausbildet.

Die Differenz der Druckdifferenzen von den Sensoren oben zu unten ist bei einem Materialdurchsatz von 153kg/h tendenziell am größten.

Bei einem erhöhten Massendurchsatz von 153kg/h auf 230kg/h bleibt dabei die mittlere spezifische Scherenergie mit 0,15kWh/kg nahezu konstant (vgl. Tabelle 3-12) und der Druck mit den Druckdifferenzen wird geringer, welches einen geringeren Verschleiß zur Folge hat.

3.5.2.3 Ergebnis 3 (Extruder 2)

Dicht kämmende gegenläufige Doppelschnecken wirken im Zwickelbereich wie ein Walzwerk, welche über das eingezogene Material in den Spalt (Kopfspiel) zwischen den abwälzenden Flächen eine beträchtliche Kraft erzeugt.

Der Materialvergleich nach **Kapitel 3.5.1** zeigt, dass die Standardversion gegenüber der Variante Grob und Fein ein geringeres Druckniveau aufweist. Die Differenzen von Minima zu Maxima bleiben jedoch nahezu konstant. Variante Grob und Fein verhalten sich ähnlich, sodass sich die Agglomerat-Größe nicht auf den Druckverlauf auswirkt und das Kopfspiel keine Auswirkung hat.

Ein erhöhter Gleitmittelanteil von 3 % bewirkt in der Zone 7 (Sensor 5 und 6) bei den Varianten Standard, Grob und Fein eine Druckreduzierung zwischen 10 und 20 %. Eine starke Verringerung ist bei der Standardvariante festzustellen. Die Variante Oechsler mit 60 % Holzanteil weist im Vergleich zu den Varianten gleiche Druckminimas auf, die Druckspitzen sind dagegen erheblich größer.

3.5.2.4 Ergebnis 4 (Vergleich Extruder 1 und Extruder 2)

Die Mittelwerte der Druckmessungen sind beim Extruder 1 im Vergleich zu Extruder 2 wesentlich höher. Die Druckdifferenzen dagegen verringern sich im direkten Vergleich etwa um die Hälfte.

3.5.2.5 Ergebnis 5 (Extruder 1)

Vergleich spezifischer Massedurchsatz

In Zone 5 mit den Sensorpositionen 3 und 4 ist trotz der Verringerung des spez. Massedurchsatzes von 13,9 (Versuch B) auf 10,9 kg*min/h (Versuch C) keine Druckminderung sondern eine leichte Druckzunahme zu erkennen. Die Sensoren 5 und 6 verhalten sich mit einer Druckabnahme gegenläufig zur Zone 5 und der Druck fällt ab (**Abbildung 3-20**).

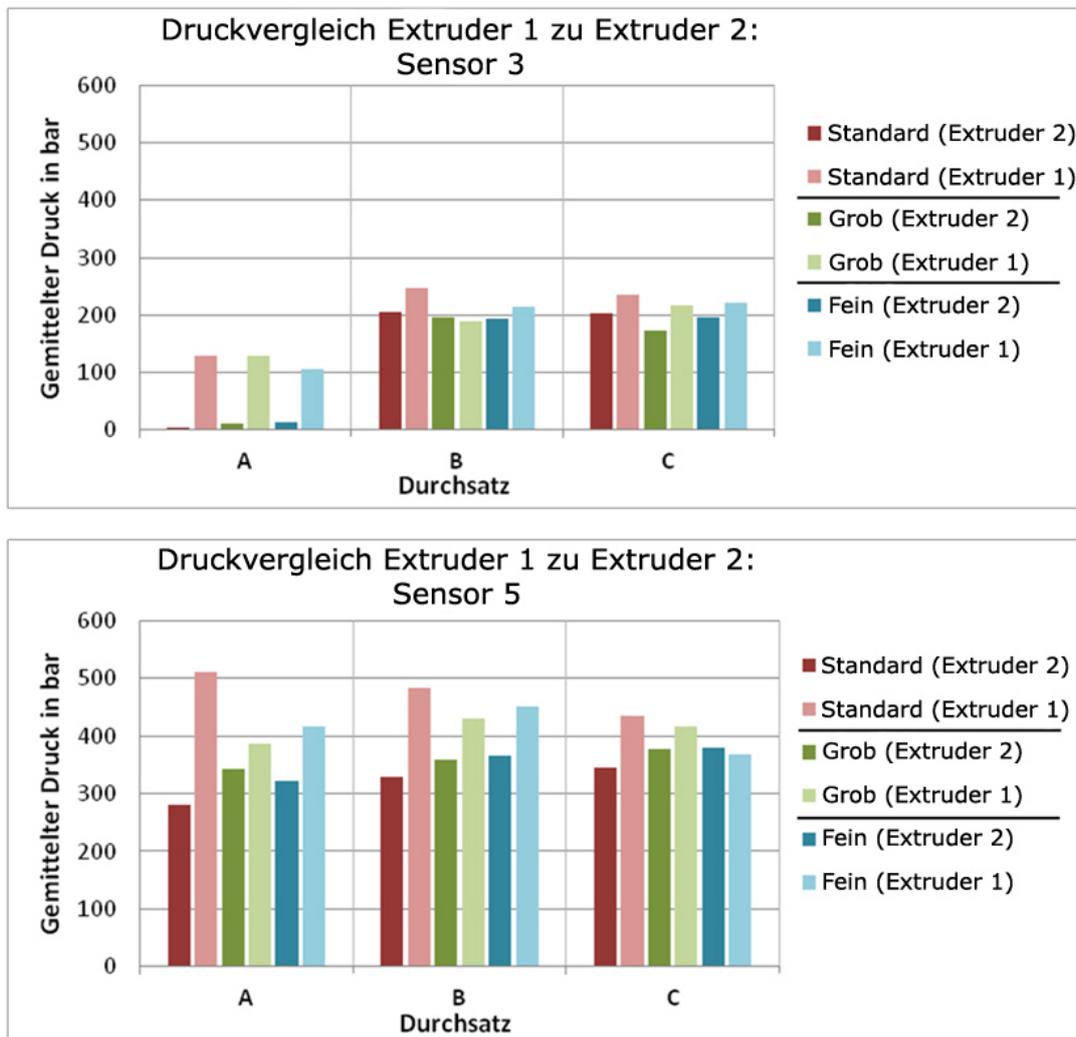


Abbildung 3-20. Druckmittelwertvergleich Extruder 1 zu 2 mit den Sensoren 3 und 5

3.5.3 Flächenvergleich Extruder 1 und 2 (Integral der Druckkurven)

Eine Auswertung der einzelnen Mittelwerte und Druckdifferenzen für den direkten Vergleich der beiden Maschinen zu ziehen, ist aufgrund unterschiedlicher Parameter sehr schwierig. Zum einen ist der reine Vergleich der Mittelwerte nicht aussagekräftig, da sich keine Aussage über den Verlauf der Druckkurve treffen lässt. Zum anderen ist auch der Druckdifferenzvergleich nicht aussagekräftig, da hier der Bezug zu den absoluten Werten fehlt. Aus diesem Grund werden durch Flächenaufnahmen unter der Kurve für eine Umdrehung der beiden Charakteristiken, das Druckniveau und die Druckdifferenzen, in einer charakteristischen Größe vereinigt. Bei der Auswertung muss beachtet werden, dass die Druckverläufe sich nicht proportional zu den Druckverläufen verhalten und aufgrund der unterschiedlich langen Zeitachse die Werte nur schwer direkt miteinander zu vergleichen sind. Für eine korrekte Aussage müssten beide Extruder mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit drehen.

In **Abbildung 3-21** ist der Flächenvergleich (Integral der Druckkurven) der beiden Extruder gegenübergestellt. Als Versuchsparameter sind die Drehzahlen der beiden Maschinen gleich gewählt.

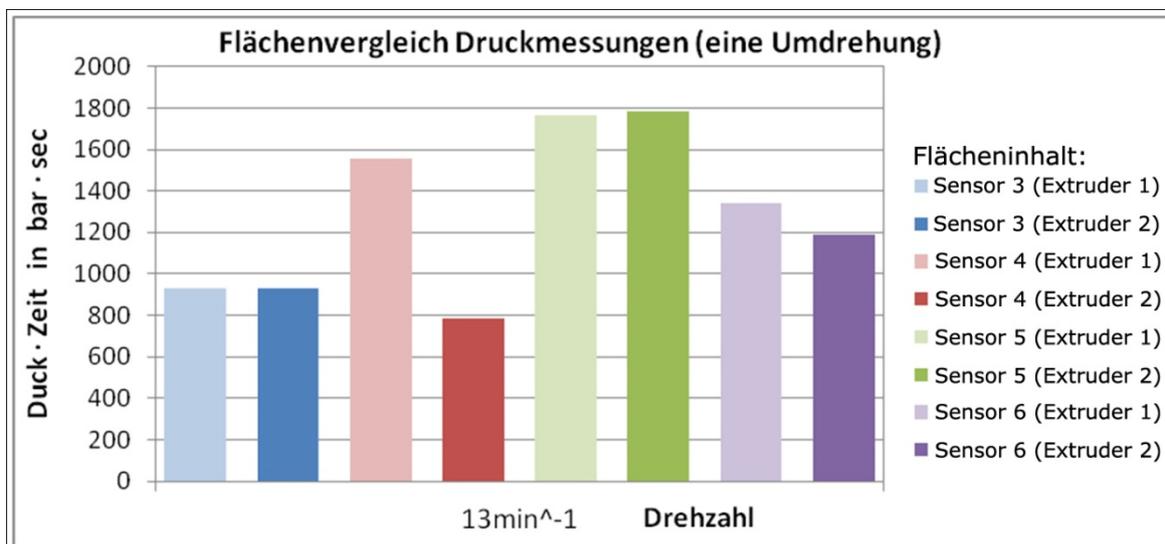


Abbildung 3-21: Flächenvergleich Druckmessungen Extruder 1 und 2 für eine Umdrehung bei gleicher Drehzahl (Integral der Druckkurven)

Es wird deutlich dass die Flächen der Sensoren 3 und 5 bei beiden Maschinen nahezu identisch sind. An den Sensoren 4 und 6 sind größere Unterschiede sichtbar. Es zeigt sich, dass sich die Maßnahmen zur Verminderung der Druckbelastung für den Extruder 2 besonders in der Schneckenzone 4 auswirken und die Druckniveaus senken. Diese Theorie wird durch die letzten Verschleißmessungen der Verfahreseinheit nochmals bestätigt.

3.6 Tribologische Untersuchungen

Zur Überprüfung der Verschleißwirkung kam die DKI-Plättchenapparatur zum Einsatz. Mit der DKI Plättchenmethode werden Modelluntersuchungen zur vergleichenden Bewertung metallischer Werkstoffe bzw. der plastifizierten Formmassen durchgeführt. Sie stellt das tribologische System Zylinderwand – Schmelze – Schneckensteg / -grund in der Ausstoßzone nach und erfasst Erosionsvorgänge, die dort durch kombinierte abrasiv-korrosive Verschleißmechanismen entstehen. Die nachfolgenden Ergebnisse sind [9] entnommen.

3.6.1 Verschleißmessgrößen

Folgende Messgrößen fließen in die Bewertung der Verschleißwirkung der untersuchten Formmassen mittels der DKI- Plättchenapparatur ein:

- Masseverlust der Probekörper
- Volumenverlust der Probekörper

3.6.2 Untersucht Proben

Vom DKI wurden die in **Tabelle 3-15** dargestellten Kunststoffformmassen in Granulatform untersucht. Als Probekörper wurde der Werkstoff 9S20K verwendet.

Tabelle 3-15: Untersuchte Formmassen

Nr.	Formmasse	Hersteller	Polymer
1	S2-60	Weralit	PP
2	PP LGF	---	PP
3	PP	---	PP

3.6.3 Ergebnisse der Untersuchung

In **Tabelle 3-16** sind die Ergebnisse der gravimetrischen Untersuchung dargestellt.

Tabelle 3-16: Ergebnisse der gravimetrischen Auswertung nach Schmelzedurchsatz

Plättchen Nr.	Material	Durchsatz [kg]	m_0 [g]	$-\Delta m_1$ [g]
1	WPC	45 kg	6,95415	0,00201
2			6,92562	0,00164
3	PP LGF	45 kg	6,94053	0,12068
4			6,92929	0,11716
5	PP	45 kg	6,93497	-0,00036
6			6,92636	-0,00010

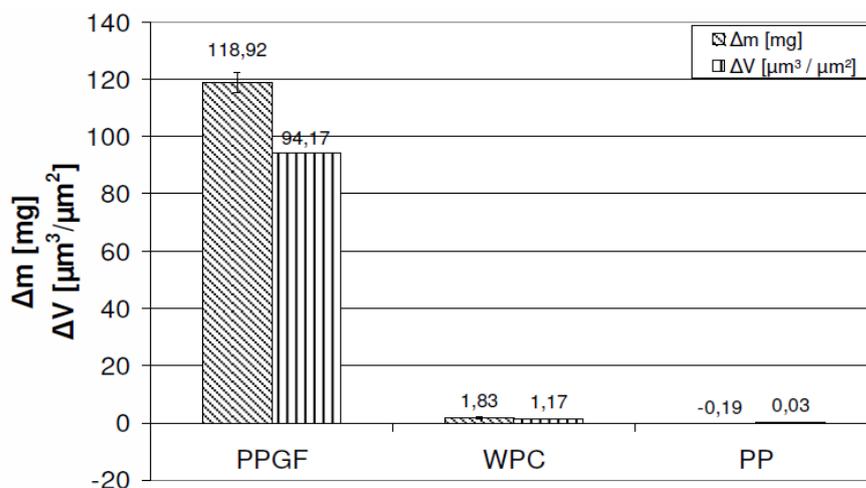


Abbildung 3-22: Masse und Volumenverlust der geprüften Plättchen nach 45kg Schmelzedurchsatz

Die **Abbildung 3-22** zeigt den Masse- und Volumenverlust der untersuchten Probekörper unter Einwirkung der verschiedenen Kunststoffschmelzen.

3.6.4 Bewertung

Die durchgeführte Untersuchung zeigt das Verschleißverhalten bei der Verarbeitung der drei getesteten Formmassen gegenüber dem Werkstoff 9S20K.

Die Formmasse Nr. 2 verursacht einen Materialabtrag von ca. 1,8 mg, nach einem Schmelzedurchsatz von 45 kg. Sie liegt damit zwei Größenordnungen hinter der Formmasse Nr. 1 (118 mg), welche aufgrund ihrer Langglasfasern massive Abrasionsschäden auf dem weichen Prüfplättchen verursacht. Die Formmasse Nr. 3 kann als Blindprobe aufgefasst werden, welche aufgrund des Fehlens jeglicher Füllstoffe keinen messbaren Masseabtrag innerhalb der Fehlertoleranzen verursacht. Diese Ergebnisse aus der Differenzwägung können mittels der topografischen Auswertung bestätigt werden, welche exakt die gleiche Rangfolge der Formmassen ergibt. Die ermittelten Rauheitskennwerte zeigen, dass gerichteter Materialabtrag stattfindet, der Furchen in Fließrichtung bewirkt. Daraus kann gefolgert werden, dass der Verschleißmechanismus abrasiver Natur ist, während Korrosion untergeordnet zu sein scheint.

3.6.5 Einschränkende Faktoren

Eine Übertragung der mit der DKI-Plättchenmethode ermittelten Verschleißergebnisse auf reale Verschleißschäden ist nur auf das durch diese Modellprüfapparatur nachgebildete tribologische System (Grundkörper, Gegenkörper, Zwischen- und Umgebungsmedium) möglich. Mit Hilfe der DKI-Plättchenapparatur kann ein Relativvergleich der Werkstoffe durchgeführt werden. Für eine Übertragung in die Praxis müssen zusätzlich abweichende Verarbeitungsparameter wie Einspritzgeschwindigkeit, Schneckendrehzahl und -geometrie, Zykluszeiten, Trocknung, veränderte Temperaturprofile und ggf. Polymerzusätze berücksichtigt werden. Vergleiche verschiedener Formmassen und Stahlwerkstoffe mit Hilfe der Plättchenapparatur haben sich in der Vergangenheit als qualitativ übertragbar auf den konkreten Anwendungsfall erwiesen. Die diskutierten Versuchsergebnisse dokumentieren den Verschleißschaden zu einem bestimmten Zeitpunkt bez. Formmassedurchsatz.

4 Ökologische Bewertung

Die Standzeit der optimierten Verfahrenseinheit konnte im Projekt gegenüber der unmodifizierten Einheit nachweislich um den Faktor 3 erhöht werden. Durch die längere Standzeit können je Produktionslinie ca. 2,5 Verfahrenseinheiten im Jahr eingespart werden. Dies bestätigt die Annahmen aus der Projektantragsphase.

Eine Verfahrenseinheit wiegt ungefähr 640 kg. Zur Herstellung von 1 t Rohstahl wird von einem Energieverbrauch von 18,5 GJ/t (Rohstahl) ausgegangen. Dies entspricht 5,1389 MWh/t [10].

Daraus ergibt sich somit alleine für das eingesparte Material eine Einsparung von $2,5 /a * 0,640 t * 5,14 MWh/t = 8,224 MWh/a$.

Da die Stahlrohlinge noch aufwendig nachbearbeitet, gefräst, aufgeschweißt, poliert und gehärtet werden müssen, kommt mindestens nochmals der genannte Energieaufwand für die Bearbeitung des Stahls hinzu.

Thyssen Krupp beziffert in seinem Nachhaltigkeitsbericht 2004-2005 den spezifischen Energieeinsatz bei der Stahlerzeugung im Werk Duisburg auf 18,5GJ pro Tonne Rohstahl. Das Werk gehört nach Angabe des Unternehmens weltweit zu den günstigsten Werken mit einer so weit gehenden Fertigungstiefe.

Weitere Potentiale zur Standzeitverbesserung liegen vor. Das Verschleissbild hat sich deutlich verschoben. Die stark modifizierten Schneckenbereiche in der Aufschlusszone sind immer noch gering verschlissen, die wenig modifizierten Bereiche in der Kompressionszone werden zum limitierenden Faktor. Hier wäre eine weitere Optimierung denkbar. Begrenzt werden erfolgreiche Modifikationen in dieser Schneckenzone allerdings durch den absolut notwendigen Druckaufbau und einen nicht zu akzeptierenden Rückfluss des Materials in Richtung Entgasung. Ob diese Ziele miteinander vereinbar sind, müssten weitere Untersuchungen zeigen.

Die Ausstoßleistung auf dem Produktionsextruder konnte im Projekt von 170 kg/h auf 230 kg/h erhöht werden. Die berechneten Kennwerte zeigen, dass dadurch die spezifische Energie [kW/kg Material] um ca. 10% reduziert werden kann. Ebenso wird der spezifische Energieverbrauch positiv durch den Einsatz von Gleitmitteln beeinflusst. Dadurch konnte der Verbrauch um bis zu 25 % reduziert werden. Ein ähnlicher, positiver Einfluss lässt sich durch den Einsatz sehr dünnflüssigen PP's erzielen.

Dies zeigt die Potentiale der einzelnen Einflussparameter. Die Betrachtung erfolgte allerdings ohne Berücksichtigung der Extrusionsqualität. Diese schränkt die Anwendung o.g. Einflussparameter teils wieder erheblich ein.

Gegenüber der ursprünglichen Annahme zu Projektbeginn, dass ein theoretischer spezifischer Energieverbrauch bei der Verarbeitung von WPC von ca. 0,28 kWh/kg vorliegt, wurden bei den realen Messungen Verbräuche von 0,10 kWh/kg bis 0,16 kWh/kg Material gefunden. Dies korrigiert die absoluten tatsächlichen Verbräuche gegenüber den Annahmen deutlich nach unten. Dennoch hat sich auch gezeigt, dass der überaus größere Teil der Energieverluste durch die Abwärme verursacht wird. Nur ca. 20-28 % der verbrauchten Energie geht tatsächlich in den Aufschluss des Materials.

Es kann angenommen werden, dass durch entsprechende Maßnahmen zur Reduzierung der Abwärme (z.B. durch thermische Isolation der Heißregister) eine Einsparung von 15-25 % der eingesetzten Energie erreicht werden kann. Werden somit auf einer Extrusionslinie im Jahr 1020 t WPC mit einem spezifischen Energieverbrauch von 0,14 kWh/kg verarbeitet, so ergibt sich ein Einsparpotential je Linie von ca. 21-36 kWh/a!

Da die Aussagen zur Abwärme sich höchstwahrscheinlich auf alle Arten von gegenlaufenden Doppelschneckenextrudern übertragen lässt, unabhängig davon, welches Material in den Maschinen verarbeitet wird, liegt hier ein sehr großes Potential zur Einsparung in der kunststoffverarbeitenden Industrie.

5 Fazit

Das Projekt hat zu zahlreichen bisher nicht verfügbaren Erkenntnissen über die Verarbeitung von WPC geführt. Von allen untersuchten Methoden zur Beurteilung des Verschleissverhaltens ist die Druckmessung am vielversprechendsten. Dennoch sind noch zahlreiche Untersuchungen und Erklärungsmodelle in zukünftigen Projekten zu entwickeln, um die Druckmessung als Regelgröße zur Verschleissmessung zu etablieren. Sollte dies gelingen, so ergeben sich dadurch, unabhängig von dem Einsatz des WPC, Chancen, den gegenläufigen Doppelschneckenextruder weiter energetisch und verfahrenstechnisch zu optimieren.

Es konnten hohe Energie-Einsparpotentiale bei der Verarbeitung von WPC ermittelt werden. In Folgeprojekten muss deren Umsetzbarkeit in WPC-Rezepturen und Verfahrenparameter zur Herstellung von Produkten mit marktgerechten Eigenschaften getestet werden.

Im Einzelnen werden folgende Aspekte als untersuchungswürdig für vertiefende Projekte angesehen:

Die im Projekt gefunden Erkenntnisse sind für eine erste Charakterisierung der Druckverhältnisse innerhalb des Extruders hilfreich. Jedoch kann mit den bisherigen Ergebnissen keine exakte Aussage über die tatsächlichen Verhältnisse und Wechselwirkungen in den einzelnen Extruderzonen getroffen werden (z.B. Unterschiede zwischen Zwickel und Schneckenkammer).

Ein Ansatz zur weiteren Charakterisierung der Druckverhältnisse kann der weitere Vergleich der Extruder 1 und 2 liefern. Der Extruder 2 besitzt eine veränderte Geometrie die schon deutliche Verbesserungen im Verschleißverhalten vorgebracht hat. Durch den Vergleich der Extruder können die Geometrie-Veränderungen charakterisiert werden und auf ihre Wirksamkeit untersucht werden. Auch das Verschieben von Verschleißmaximas innerhalb der Schnecke hin zu anderen Schneckenzenen ist bei diesen Untersuchungen in Betracht zu ziehen.

Die Simulationstechnik im Bereich Doppelschneckenextruder ist in den letzten Jahren stark fortgeschritten. Eine Modellierung und Untersuchung der Schneckengeometrie in einem Simulationstool kann weitere Aussagen über die Verhältnisse innerhalb des Extruders liefern. Ein erster Schritt ist die Nachbildung der aktuellen Geometrien, um die gemessenen Werte zu validieren. Mit den gewonnen Ergebnissen kann dann in einem zweiten Schritt eine Untersuchung von optimierten Geometrien auf deren Verschleißverhalten durchgeführt werden.

Im Extruder mit veränderter Schneckengeometrie sind die Verschleißwerte im Plastifizierungsbereich stark verbessert. Der Ausstoßbereich zeigt jedoch weiterhin Verschleißverhalten am Ende der Schne-

ckenzone. Das Extrusionswerkzeug ist in den bisherigen Untersuchungen nicht in Betracht gezogen worden. Eine Untersuchung des Werkzeuges auf die Strömungseigenschaften und das Druckverhalten kann durch gezielte Optimierung der Fließwege den Druck in der Ausstoßzone reduzieren und das Verschleißverhalten der Schnecke in diesem Bereich günstig beeinflussen.

Die weitere Untersuchung von Rohmaterialeigenschaften und deren Beeinflussung des Druckverlaufes könnte weitere Erkenntnisse für den geometrischen Aufbau der Schnecke und des Zylinders liefern. Weiterhin ist das Verhalten bei Zugabe von unterschiedlichen Gleitmitteln zu untersuchen, da diese eine günstige Wirkung auf die Druckverhältnisse haben. Ziel muss es dabei sein Gleitmittel zu finden, die sich positiv auf die Druckerniedrigung, den Energieverbrauch und das Verschleissverhalten auswirken, sich gleichzeitig jedoch möglichst neutral bei den Materialeigenschaften verhalten. Die bisher getesteten Gleitmittel hatten immer einen dramatischen, negativen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte des WPCs.

Eine Betrachtung unterschiedlicher Massedurchsätze und die damit zu erreichende Formteilqualität in einer gesonderten Versuchsreihe sind sinnvoll, da nicht alleinig der Massedurchsatz ein Parameter der Produktivität ist. Die Formteilqualität hängt von einer Vielzahl von Maschinen- und Materialparametern ab, sodass sich die maximale Produktivität aus der Abhängigkeit des Massedurchsatzes von der Formteilqualität ergibt. Eine Untersuchung auf die Parameterwahl mit dem geringsten Verschleißverhalten unter der Restriktion einer optimalen Formteilqualität ist für eine produktionsnahe, verschleißminimierte Betrachtung sinnvoll.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Pöhler, Frank; Schulte Matthias: *Untersuchung und Entwicklung verschleißminimierender Maßnahmen bei der Verarbeitung von Wood Plastic Compounds*, Projektantrag, 2008
- [2] Martin, Gerhard; Schuler, Werner: *Der Doppelschneckenextruder*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998
- [3] Baur, Erwin; Brinkmann, Sigrid; Osswald, Tim; Schmachtenberg, Ernst: *Saechtling – Kunststoff Taschenbuch*, Carl Hanser Verlag, 2007
- [4] Czichos, Horst; Habig, Karl-Heinz: *Tribologie Handbuch – Reibung und Verschleiß*, Vieweg, Wiesbaden, 2003
- [5] Funke: *DSC-Analyse WPC1 – S2-60*. 03 September 2009
- [6] Schweizer, Anton: *Projektierungshilfe für Stromaggregate*. [Online] http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/v2_wkapazitaet_holz.htm. 2009
- [7] VOLT CRAFT; Conrad Electronic SE; Stromzangenadapter VC-511 (www.voltcraft.de)
- [8] National Instruments Germany GmbH: NI USB-6221, Multifunktions-Datenerfassungsgerät der M-Serie mit 16 bit und 250kS/s, extern gespeist (www.ni.com)
- [9] Geertz, G.; Wieser, J.: *Bericht zu Verschleißuntersuchungen*, DKI, 03.12.2010
- [10] N.N.: Mayr Antriebstechnik, Konstruktiver Klimaschutz, technische Mitteilung vom 18.12.2007