

Entwicklung und Anwendung eines technologischen Vergleichsverfahrens zur Abschätzung
der Verarbeitungseigenschaften von Thermoplast-Recyclaten beim Spritzgießen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigt durch die

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
Fachbereich Ingenieurwissenschaften
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Dipl.-Ing. Torsten Kies
geboren am 21. Dezember 1963 in Dornreichenbach

Dekan des Fakultät Prof. Dr. H. Pöllmann

Dekan des Fachbereiches: Prof. Dr. H. Altenbach

Gutachter: Prof. Dr. H.-J. Radusch
 Prof. Dr. R. Schnabel
 Prof. Dr. A. K. Bledzki

Halle (Saale), 9.Dezember 2002

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als technischer Mitarbeiter am Fachbereich Ingenieurwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Radusch danke ich für die Übernahme der Betreuung, für die allseitigen Unterstützungen sowie die wertvollen Tipps während der Anfertigung der Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil Schnabel bedanke ich mich für die zahlreichen Hinweise und Anregungen bei der Erarbeitung der Versuchspläne. Mein besonderer Dank gilt ihm für die wissenschaftliche Beratung bei der Versuchsdurchführung.

Allen Beschäftigten im Rahmen der vom eingetragenen Verein Kunststoffe und Umwelt Merseburg organisierten Maßnahme „Kunststoffrecycling“ gilt besonderer Dank für die umfangreichen Zuarbeiten. Besonders möchte ich mich bei Frau Christine Rude für die Mithilfe bei den technologischen Untersuchungen sowie der Datenaufbereitung bedanken.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere bei Herrn Dr. Androsch und Herrn Dr. Oelschlägel, die mir bei der Durchführung der Untersuchungen und Anfertigung der Arbeit mit Diskussionen, Anregungen und Ratschlägen halfen, bedanke ich mich recht herzlich.

Inhalt

1	Einleitung	6
2	Besonderheiten der Recyclatverarbeitung	9
2.1	Eigenschaftsunterschiede zwischen Kunststoffrecyclaten und neu produzierten Formmassen	9
2.1.1	Auswirkungen chemischer Vorgänge	9
2.1.1.1	Startreaktionen am Makromolekül	9
2.1.1.2	Folgereaktionen	11
2.1.1.3	Einfluss von Mehrfachverarbeitung auf die Materialeigenschaften	12
2.1.1.4	Konsequenzen für die Verarbeitung	13
2.1.2	Auswirkungen physikalischer Vorgänge	14
2.1.2.1	Molmassenverteilungen bei Neuwaren und Recyclaten	14
2.1.2.2	Die Wirkung fester Fremdstoffe auf die Verarbeitungseigenschaften von Recyclaten	16
2.1.2.3	Die Wirkung flüssiger Fremdstoffe auf die Verarbeitungseigenschaften von Recyclaten	20
2.1.2.4	Die Wirkung von Fremdstoffen mit gasförmigem Aggregatzustand bei Verarbeitungstemperatur	25
2.2	Kreislaufführung von Kunststoffen	28
2.2.1	Ressourcenverbrauch beim Einsatz von Kunststoffserzeugnissen	28
2.2.2	Mögliche Kreislaufführungen	29
2.2.3	Technologien zum Wiedereinsatz von Altkunststoffen	30
2.2.3.1	Nutzung des energetischen Potentials von Altkunststoffen	30
2.2.3.2	Rohstoffliche Wiederverwertung	31
2.2.3.3	Werkstoffliche Wiederverwertung	31
2.2.3.4	Wiederverwendung von Kunststoffteilen	33
2.2.4	Charakterisierung der Kreislaufführung von Kunststoffen	33
2.2.4.1	Der Kreislaufanspruch	33
2.2.4.2	Die Recyclingwürdigkeit	34
2.2.4.3	Politische und ökonomische Einflussnahmen	35
2.2.5	Einsatz von Kunststoffrecyclaten für technisch anspruchsvolle Produkte	38
2.3	Materialeigenschaften eines Recyclattyps	39
2.3.1	Besonderheiten bei der Ermittlung von Rohstoffeigenschaften für Recyclate	39
2.3.2	Bauteilspezifischer Einsatz von Recyclaten	40
3	Vergleichsverfahren zur Abschätzung der Verarbeitungseigenschaften von Thermoplast-Recyclaten beim Spritzgießen	43
3.1	Bekanntes Vergleichsverfahren	43
3.1.1	Technische Anwendungen von Vergleichsverfahren	43
3.1.2	Vergleichsverfahren zur Modellübertragung für Extrusionsprozesse	43
3.2	Entwicklung eines Vergleichsverfahrens zur Abschätzung der Verarbeitungseigenschaften von Thermoplast-Recyclaten beim Spritzgießen	44
3.2.1	Das Wesen des Recyclat-Vergleichsverfahrens	44
3.2.2	Eignung der Spritzgusstechnologie für das Vergleichsverfahren	46
3.2.2.1	Rahmenbedingungen	46
3.2.2.2	Spritzgießen mit mehreren veränderlichen Eingriffsstellgrößen	47
3.2.2.3	Spritzgießen mit einer veränderlichen Eingriffsstellgröße	48

3.2.2.4	Fahrweise für den Vergleichsprozess	49
3.3	Ableitung des Vergleichsverfahrens aus der Spritzgusstechnologie	49
3.3.1	Zielgrößen beim Vergleichsverfahren	49
3.3.2	Eingriffsstellgrößen beim Vergleichsverfahren	51
3.3.3	Fahrweise beim Vergleichsverfahren zur Materialcharakterisierung	51
3.4	Eignung des Vergleichsverfahrens zur Charakterisierung der Materialeigenschaften für unterschiedliche Einsatzzwecke des Werkstoffs	53
3.4.1	Physikalische und chemische Eigenschaften als Zielgrößen beabsichtigter Produktionsprozesse	53
3.4.2	Optische Eigenschaften als Zielgrößen beabsichtigter Produktionsprozesse	53
3.4.3	Geometrische Eigenschaften als Zielgrößen beabsichtigter Produktionsprozesse	54
3.5	Adaptierung des Vergleichsverfahrens zur Charakterisierung der Materialeigenschaften für die geplante Herstellung von Präzisionsteilen	55
3.5.1	Zielgrößendefinition beim Vergleichsverfahren für eine geplante Herstellung von Präzisionsteilen	55
3.5.2	Definition der Eingriffsstellgröße beim Vergleichsverfahren für eine geplante Herstellung von Präzisionsteilen	57
3.5.3	Aussagen zur Produktionseffektivität mit Hilfe des Vergleichsverfahrens für eine geplante Herstellung von Präzisionsteilen	59
3.5.4	Aussagen zur Reproduzierbarkeit mit Hilfe des Vergleichsverfahrens für eine geplante Herstellung von Präzisionsteilen	61
3.6	Mathematische Beschreibung des Vergleichsverfahrens	62
4	Experimentelles	65
4.1	Für den Vergleichsprozess verwendetes Werkzeug und die eingesetzte Maschine	65
4.2	Materialauswahl	66
4.2.1	Polypropylen	66
4.2.2	Untersuchte Polypropylentypen	68
4.3	Versuchsdurchführung	70
4.3.1	Standardeinstellung des angewendeten Vergleichsprozesses	70
4.3.2	Fahrweise des angewendeten Vergleichsprozesses	71
4.3.3	Versuchsergebnisse bei der Anwendung des Vergleichsprozesses zur Charakterisierung der technologischen Eigenschaften von PP-Recyclat	72
4.4	Diskussion der ermittelten technologischen Eigenschaften der untersuchten Polypropylentypen	73
4.4.1	Allgemeine Aussagen zum Spritzgießen der einzelnen Materialtypen	73
4.4.2	Verarbeitungsfenster	74
4.4.3	Siegelverhalten	77
4.4.4	Reproduzierbarkeiten der Formteilmassen	80
4.5	Einordnung der Verarbeitungseigenschaften der mit dem Vergleichsprozess untersuchten Recyclattypen	84
4.6	Weitere Anwendungen für das Vergleichsverfahren	87
4.6.1	Andere untersuchte Polymersorten	87
4.6.2	Anwendung des Vergleichsverfahrens zur Wareneingangskontrolle	87
5	Materialeigenschaften von Recyclaten und Möglichkeiten zu deren Verbesserung	89

5.1	Die mechanischen Eigenschaften von Prüfkörpern aus den untersuchten Polypropylentypen	89
5.2	Möglichkeiten zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Recyclaten	91
5.2.1	Nachstabilisierung von Recyclaten	91
5.2.2	Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Homogenisierung der Recyclate	91
5.2.2.1	Anwendung des Schwimm-Sink-Trennverfahrens bei Polypropylen-Postconsumer-Recyclaten	91
5.2.2.2	Einsatz von statischen Mischelementen für Spritzgussmaschinen bei der Recyclatverarbeitung	92
5.3	Mischung unterschiedlicher Recyclate zur gezielten Eigenschaftseinstellung	95
	Zusammenfassung	98
	Summary	101
	Abkürzungs- und Formelverzeichnis	104
	Lebenslauf	105
	Anhang	106
	Literaturverzeichnis	113

1 Einleitung

Kunststoffe sind aufgrund ihres thermoplastischen Charakters zur Kreislaufführung grundsätzlich gut geeignet [1]. Das Abschätzen der Verarbeitungseigenschaften von Kunststoffrecyclaten zur Sicherstellung einer sinnvollen und effektiven stofflichen Verwertung auf einem möglichst hohem Niveau ist derzeit jedoch noch ein ungelöstes Problem. Vergleichsverfahren, die den Vergleich des Verarbeitungsverhaltens von Neuwaren mit denen von Recyclaten zum Gegenstand haben, können eine Möglichkeit eröffnen, für Recyclattypen optimale Verarbeitungsbedingungen zu bestimmen sowie effiziente Einsatzmöglichkeiten zu erkennen.

Die Vielzahl der unterschiedlichen Kunststoffherzeugnisse bedingt eine große Anzahl von Neuwaretypen, deren Eigenschaften auf die jeweilige Produktgruppe abgestimmt sind. Deshalb setzt ein erfolgreicher Einsatz eines bestimmten Kunststofftyps eine korrekte Materialauswahl voraus. Dies gilt sowohl für die Verwendung von Neuware als auch für den Einsatz von Kunststoffrecyclaten.

So kann man die Eignung eines bestimmten Recyclattyps für den Spritzgussprozess nicht pauschal angeben, sondern muss den jeweiligen Verarbeitungsprozess mit all seinen einzelnen Elementen berücksichtigen. Beispielsweise sind zur Herstellung von kompakten Formteilen mit dicken Wandstärken ganz andere Rohstoffeigenschaften wünschenswert, als bei der Produktion von filigranen Produkten mit langen Fließwegen.

Während für Neuwaren die Polymerhersteller Angaben zu den Werkstoffeigenschaften und Empfehlungen zu deren Verarbeitung abgeben, liegen bei Sekundärkunststoffen in der Regel keine Materialdaten vor.

Die Zielstellung dieser Arbeit ist, ein effektives Verfahren zum Vergleich der Verarbeitungseigenschaften von Thermoplast-Neuwaren mit denen ähnlicher Kunststoff-Recyclate durch den Vergleich ihrer Prozesseigenschaften zu entwickeln, um das für die Verarbeitung von Neuwaren bekannte Wissen auf Recyclate übertragen zu können.

Aufgrund der großen Anzahl von Produkten, die mit dem in der Kunststofftechnik angewendeten Verarbeitungsverfahren „Spritzgießen“ hergestellt werden, wird sich hier auf diese Technologie konzentriert. Die Entscheidung, das Vergleichsverfahren aus dem Spritzgussverfahren abzuleiten, basiert außerdem auf folgenden Argumenten:

Im Spritzgussverfahren werden Einzelteile für technisch hochwertige Anwendungen hergestellt und eine Vielzahl unterschiedlicher Artikel produziert. Wegen der diskontinuierlichen Produktion dieser Technologie ist nach einem eventuellen Maschinenstillstand ein zügiger Weiterbetrieb möglich. Die Spritzgusstechnologie wird überwiegend von lokal ansässigen kleinen und mittleren Unternehmen ausgeführt. Die zur Herstellung eines Artikels benötigten Materialmengen sind überschaubar und können bei Bedarf auch mit Altkunststoffen aus regionalen Aufkommen abgedeckt werden. So werden lange Transportwege der Recyclate vermieden. Wegen der beim Spritzgussverfahren dreidimensional gestaltbaren Formteile kann man mit konstruktiven Mitteln auf die Besonderheiten von Recyclaten reagieren. Aufgrund der hohen Investitionskosten bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen ist man auf Materialdaten für die zur Verarbeitung vorgesehenen Recyclate angewiesen, um das wirtschaftliche Risiko gering zu halten. Die Herstellung von Prüfkörpern für mechanische Tests erfolgt im Spritzgussverfahren. Aussagen

zu den technologischen Eigenschaften der Recyclate sind deshalb bereits bei der Probekörperproduktion für mechanische Tests möglich.

Mit dem in dieser Arbeit zu entwickelnden Vergleichsverfahren sollen die technologischen Eigenschaften von bestimmten Neuware- und Recyclattypen beim Spritzgießen beurteilt und unmittelbar gegenüber gestellt werden. Damit soll erreicht werden, dass für den jeweils beabsichtigten Prozess zur Herstellung eines Erzeugnisses die optimale Recyclatanwendung erkannt wird, eine prozessspezifisch gute Verarbeitbarkeit des Materials gewährleistet ist und das Auffinden der effektiven Parametereinstellung zügig erfolgen kann.

Die Grundlage des hier zu entwickelnden Vergleichsverfahrens ist die Tatsache, dass die Rohstoffeigenschaften die technologischen Eigenschaften bei der Verarbeitung des Materials aufgrund von objektiven Zusammenhängen bedingen. Die Beobachtung und Erfassung der Verarbeitungseigenschaften eines Prozesses ist jedoch mit einem deutlich geringerem Aufwand möglich als die Ermittlung der Materialeigenschaften der Rohstoffe. Wenn bestimmte Rahmenbedingungen eingehalten werden, können die Prozesseigenschaften unterschiedlicher Materialtypen miteinander verglichen werden (**Bild 1**). Mit Hilfe von Vergleichsprozessen sollen die dafür notwendigen Rahmenbedingungen – gleicher Einfluss der Maschine und des verwendeten Werkzeugs für alle untersuchten Materialtypen - realisiert werden.

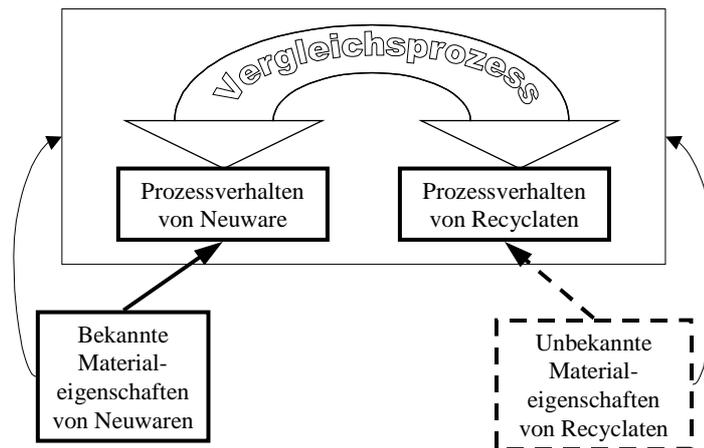


Bild 1 Gegenüberstellung des Prozessverhaltens von Neuware- und Recyclattypen bei einem Vergleichsprozess

Aus dem Vergleich zwischen dem Prozessverhalten von Recyclattypen mit unbekanntem Werkstoffeigenschaften und dem von Neuwaretypen mit bekannten Rohstoffeigenschaften sollen Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften des Recyclattyps gezogen und das Verarbeitungsverhalten bei anderen Produktionsprozessen abgeschätzt werden (**Bild 2**).

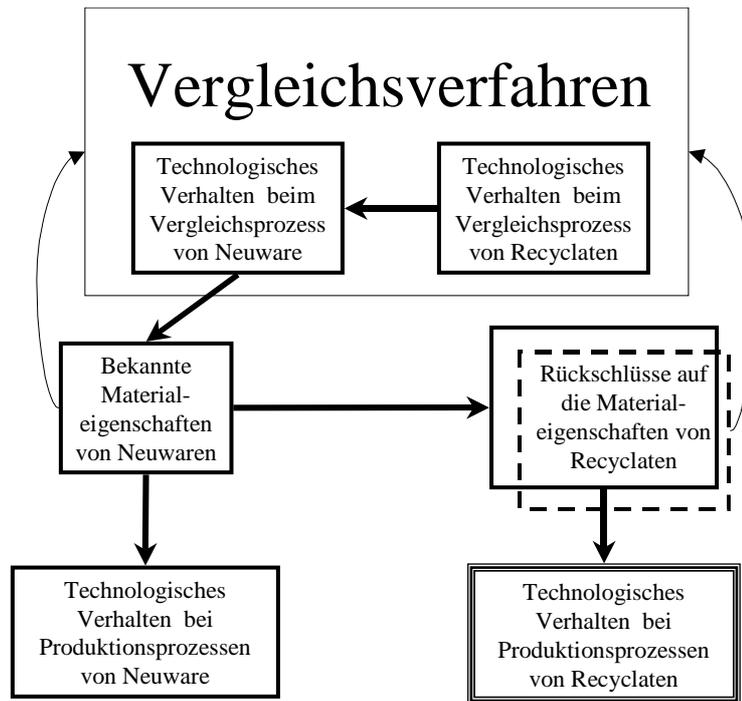


Bild 2 Abschätzung der Materialeigenschaften von Recyclattypen mit Hilfe des Vergleichsverfahrens

So können die meist nur für Neuwaren bekannten Materialdaten und Erfahrungen aus anderen Spritzgussprozessen auf einzelne Recyclattypen übertragen werden, ohne die Rohstoffeigenschaften der Sekundärkunststoffe unmittelbar ermitteln zu müssen. Die Probleme, die sich aufgrund der mangelnden Kenntnisse für die zur Verfügung stehenden Rohstoffeigenschaften von Kunststoffrecyclaten ergeben, sollen durch das hier zu entwickelnde Vergleichsverfahren gelöst werden.

Das Vergleichsverfahren soll unmittelbar dort angewendet werden können, wo der Einsatz von Recyclaten vorgesehen ist. Nur so können die gesetzten Prämissen für den geplanten Einsatzzweck und die vorhandenen technologischen Kenntnisse bei der Herstellung der Produkte optimal berücksichtigt werden. Die mit dem Vergleichsverfahren gewonnenen Erkenntnisse können in das firmeninterne Know-how einfließen und bringen so Wettbewerbsvorteile.

Ein größerer Anteil der sortenreinen Altkunststoffe aus technischen Produkten kann aufgrund der mit dem Vergleichsverfahren gewonnenen Erkenntnissen gewinnbringend auf einem hohem Niveau in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. So wird mit der Entwicklung des Vergleichsverfahrens ein Beitrag geleistet, um die in der Vergangenheit vorherrschende Durchflusswirtschaft zukünftig noch besser in eine effektive Kreislaufwirtschaft [2] überführen zu können.

Bevor die Entwicklung des Vergleichsverfahrens zur Abschätzung der Verarbeitungseigenschaften von Thermoplast-Recyclaten beim Spritzgießen erfolgen kann, müssen zunächst die Besonderheiten bei der Verarbeitung von Altkunststoffen untersucht werden.

2 Besonderheiten der Recyclatverarbeitung

2.1 Eigenschaftsunterschiede zwischen Kunststoffrecyclaten und neu produzierten Formmassen

2.1.1 Auswirkungen chemischer Vorgänge

Aufgrund äußerer Energiezufuhr während der Erstverarbeitung, beim Einsatz des Erzeugnisses oder bei der Wiederverarbeitung kann es zu chemischen Veränderungen an den Makromolekülen von Polymeren kommen.

Die bekannten Arbeiten zu chemischen Veränderungen von Polymeren unterscheiden in Startreaktion, auch Initiierung genannt, (**Kapitel 2.1.1.1**) und Folgereaktionen (**Kapitel 2.1.1.2**). Sie benennen mehrere Ursachen für die chemischen Veränderungen am Makromolekül, die während einer Verarbeitung der Kunststoffe beziehungsweise beim Gebrauch der Erzeugnisse auftreten.

Problematisch schätzen die Autoren ein, dass chemische Veränderungen der Makromoleküle durch mehrere gleichzeitig ablaufende, oftmals sich gegenseitig beeinflussende Reaktionen verursacht werden. Anfangs- und Randbedingungen für die ablaufenden chemischen Reaktionen sind unbekannt, weil die während der Produktion, beim Gebrauch und während der Wiederverarbeitung auf die polymeren Werkstoffe wirkenden Einflussfaktoren so zahlreich sind und für Postconsumer-Materialien nicht nachvollzogen werden können. Deshalb ist die theoretische Beschreibung der am Makromolekül vorkommenden Veränderungen bei der Formteilherstellung, dem Praxiseinsatz und der Aufbereitung von Kunststoffen im Komplex nicht möglich, so dass die chemischen Eigenschaften der Recyclate derzeit nicht vorhersagbar sind.

Zur Erfassung der Materialeigenschaften von Recyclaten ist man auf phänomenologische Untersuchungen angewiesen.

2.1.1.1 Startreaktionen am Makromolekül

Eine chemische Reaktion am Makromolekül startet vom Kettenende her oder aus der Kettenmitte heraus [3]. Angegriffen wird immer die Bindung mit der geringsten Bindungsenthalpie. Die Wirkung ist ein Ab- oder Zerreißen der Makromoleküle aufgrund einer lokalen Überdehnung (**Bild 3**). Dann wird die im Makromolekül gespeicherte elastische Energie plötzlich frei und verursacht Folgereaktionen unterschiedlicher Art [4], auf die in **Kapitel 2.1.1.2** eingegangen werden soll.

Weiterhin ist die Bildung reaktionsfähiger Radikale am Makromolekül aufgrund von Reaktionen an Seitengruppen der Kette möglich.

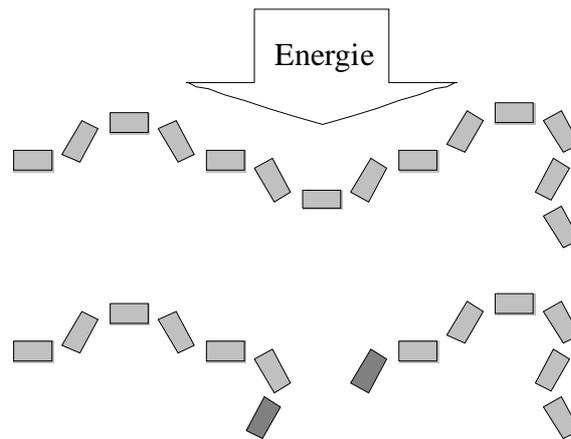


Bild 3 Kettenbruch als Startreaktion aufgrund der Wirkung einer äußeren Energiezufuhr

Man unterscheidet thermisch, mechanisch, hydrolytisch und oxidativ verursachte Startreaktionen. Die einzelnen Zusammenhänge für diese unterschiedlichen Mechanismen sind in [5] übersichtlich erklärt.

Zu einem thermischen Abbau kommt es, wenn eine materialspezifische Grenztemperatur überschritten wird. Diese ist durch die Aktivierungsenergie der jeweiligen chemischen Reaktion bestimmt.

Die Anzahl der gebildeten Schädigungspunkte ist abhängig von der Differenz zwischen Ist-Temperatur und der Grenztemperatur sowie der Zeitdauer, die das Material dieser Temperaturüberhöhung ausgesetzt ist.

Die während der Startreaktion gebildeten reaktiven Gruppen sind Ansatzpunkte für die unterschiedlichsten Folgereaktionen, auf die in **Kapitel 2.1.1.2** noch näher eingegangen wird. Aus der Anzahl der während der Startreaktion gebildeten reaktiven Gruppen ist der mögliche Umsatzgrad der Folgereaktionen abschätzbar.

Die Ursache des mechanischen Abbaus ist in hohen lokalen Scher- und Dehnbeanspruchungen zu sehen. Modellvorstellungen dazu werden in [6] genannt. Problematisch bei der Untersuchung von mechanischen Abbauvorgängen ist die bei hohen Schergeschwindigkeiten auftretende dissipative Erwärmung, die in den meisten Fällen bereits einen thermischen Abbau initiiert.

Ein Verarbeitungsverfahren, bei dem man den mechanischen Abbau relativ unabhängig vom thermischen beobachten kann, ist das Mahlen [3]. Aufgrund der verfahrenstypisch geringen Massetemperaturen, bei denen diese Technologie angewendet wird, ist die Kettenbeweglichkeit in diesem Fall gering.

Da bei langen Ketten die Anzahl der Verschlaufungen besonders groß ist, sind diese Moleküle in ihrer Beweglichkeit stärker eingeschränkt als kurze Ketten. Die Spaltung der Makromoleküle erfolgt vornehmlich in der Kettenmitte [7]. Beim mechanischen Abbau kann so eine Teilung von überlangen Ketten vorkommen [3]. Dieser Effekt kann zu einer Verminderung der Molmassenverteilung des Recyclats führen.

Der hydrolytische Abbau kommt bei Polykondensationsprodukten wie PBT, PET, PC und PA vor. Bei der Anwesenheit von Wasser tritt eine Verschiebung der Gleichgewichtslage der

Bildungsreaktion dieser Polymere auf [5]. Erfolgt die Verarbeitung im Beisein von Restfeuchtigkeit, wird das Polymer aufgrund der geänderten Gleichgewichtsbedingungen abgebaut [8], [9], [10].

Ein oxidativer Abbau entsteht aufgrund des in der Schmelze gelösten Luftsauerstoffs. Bei hohen Temperaturen kommt es zu einer Spaltung des molekularen Sauerstoffs in Radikale. Diese greifen die Ketten des Polymers an [11].

Aufgrund der Tatsache, dass der oxidative Abbau erst bei den erhöhten Temperaturen initiiert wird, die zur Sauerstoffaufspaltung nötig sind, ist eine klare Ursachentrennung zwischen thermischem und oxidativem Abbau nicht möglich.

Bei der Verarbeitung von Recyclaten können jedoch auch anders verursachte Bindungsbrüche vorkommen, die bei der Verwendung von Neuware nicht beobachtet werden.

So können dem Material anhaftende oder vom Werkstoff aufgenommene Verschmutzungen Kettenspaltungen initiieren. Als kritisch sind in diesem Zusammenhang beispielsweise Verschmutzungen durch Eisenoxide (Rost) zu sehen, die als Radikalbildner fungieren können. Weiterhin muss man bei Postconsumer-Recyclaten von UV-Schädigungen ausgehen, besonders bei dünnwandigen Rücklaufprodukten, die naturfarben angewendet wurden und intensiver Sonnenbestrahlung ausgesetzt waren - beispielsweise Gewächshausfolien.

Thermisch, mechanisch, hydrolytisch und oxidativ verursachte Startreaktionen sind eigenständige chemische Reaktionen. Deshalb gelten für die einzelnen Reaktionen jeweils eigene charakteristische Grenztemperaturen.

Mit der Startreaktion werden freie Elektronen, Protonen oder Ionen gebildet, die nur in einer geringen Konzentration vorliegen. Eine Materialschädigung ist aufgrund des geringen Umsatzgrades der Startreaktion nicht erkennbar. Erst die ablaufenden Folgereaktionen verursachen eine Veränderung der Werkstoffeigenschaften.

2.1.1.2 Folgereaktionen

Die Voraussetzung für die Folgereaktionen – auch Einzel- oder Kettenreaktion genannt - ist das Vorhandensein von bindungsfähigen Teilchen nach Ablauf einer oder mehrerer Startreaktionen. Für den Umsatzgrad der Folgereaktion und damit den Grad der Schädigung des Polymers ist entscheidend, ob die freigewordenen Radikale bei der Folgereaktion verbraucht werden oder erhalten bleiben.

Es sind unterschiedliche Arten von Folgereaktionen möglich.

Eine Möglichkeit ist, dass vom Makromolekül stabile niedermolekulare Reaktionsprodukte abgespalten werden.

Erfolgt dies durch ein Abspalten von Monomereinheiten vom Kettenende her, wie beispielsweise bei unzureichend stabilisiertem Polyoxymethylen, vermindert sich die Molmasse geringfügig aufgrund der Schädigungen.

Tritt bei der Folgereaktion ein Abspalten von funktionellen Gruppen aus der Kette auf, bleibt die Molmasse des Polymers erhalten, die Eigenschaften des Kunststoffes verändern sich jedoch deutlich. So führt beispielsweise die Chlor-Wasserstoff-Abspaltung aus Polyvinylchlorid zu einer Versprödung und Vergilbung des Materials.

Die niedermolekularen Reaktionsprodukte befinden sich in der Matrix des polymeren Werkstoffs und zeigen bei der Wiederverarbeitung physikalische Wirkungen.

Es ist auch denkbar, dass aktivierte Kettenenden eine Kettenspaltung an Nachbarmolekülen herbeiführen. Es kommt zu einer Kettenspaltung in der Mitte der Makromoleküle. Zu beobachten ist dann eine starke Verminderung der Molmasse des untersuchten Polymers. Niedermolekulare Reaktionsprodukte entstehen bei diesem Typ von Folgereaktionen nicht.

Aus der Literatur ist neben einer Abnahme auch eine Zunahme des Molekulargewichts bei Mehrfachverarbeitung bekannt [4], [12], [13], [14], [15]. Die Ursache für diese Zunahme des Molekulargewichts sind sich aufbauende Strukturen. In der Startreaktion gebildete reaktive Kettenenden reagieren mit anderen in der Kette gebundenen Molekülbestandteilen.

Welche Reaktionstypen im einzelnen ablaufen, hängt vom konkreten Polymersystem und den äußeren Bedingungen ab. Oft kommen unterschiedliche Reaktionstypen gleichzeitig parallel nebeneinander vor [16].

2.1.1.3 Einfluss von Mehrfachverarbeitung auf die Materialeigenschaften

Für die Verarbeitung und die einsatztechnischen Eigenschaften ist es entscheidend, ob ein Strukturauf- oder -abbau stattfindet.

Die Viskosität der Materialien, bei denen Abbauerscheinungen überwiegen, vermindert sich, der MFR nach DIN ISO 1133 nimmt zu.

Kommt es überwiegend zu Strukturaufbauerscheinungen, erhöht sich die Viskosität der Werkstoffe und der Schmelzindex nimmt ab.

Das hat auch Konsequenzen auf die Formteilmasse und die Maße eines Spritzgusserzeugnisses.

Obwohl die Dichte des Materials kaum von den Verarbeitungsbedingungen abhängt [12], sind deutliche Veränderungen der Masse von im Spritzgussverfahren hergestellten Teilen zu beobachten.

Das erklärt Gierrh in [17] mit einer erleichterten Druckübertragung in der Schmelze bei geringerer Viskosität. So vermindert sich beim Spritzgießen der Schwund von Teilen, die aus Recyclaten hergestellt werden, bei deren Verarbeitung überwiegend strukturabbauende Reaktionen vorkommen.

Auch die Festigkeitseigenschaften verändern sich nach Mehrfachverarbeitung. Während sich die Kurzzeiteigenschaften von ungefüllten Polymeren nach Mehrfachverarbeitung im Bereich von Chargenwechseln verändern [18], [19], können bei den Langzeiteigenschaften die Einflüsse durch die Materialschädigung sicher erkannt werden [20].

Allerdings ist die Richtung des Einflusses nicht bei allen Materialien gleich.

So bringt PA 6 nach Mehrfachverarbeitung kürzere Zeitstandfestigkeiten, für PA 12 erhöhen sich jedoch die Werte der Zeitstandfestigkeit [18]. Ähnliche Effekte wurden bei PE und PP beobachtet [17].

Interessant ist in diesem Zusammenhang eine in [20] angestellte Untersuchung, die sich mit der Durchstoßarbeit an Folien nach DIN 53373 beschäftigt. Bis zur siebten Verarbeitungsstufe wurde eine Zunahme der Durchstoßarbeit bis um 13% ermittelt. Danach fiel die Durchstoßarbeit wieder ab und erreichte nach der vierzehnten Verarbeitungsstufe 86% des Ausgangswerts. Erklärt wird dies mit einem zunächst vorherrschenden Strukturaufbau, der mit zunehmender Verarbeitungsstufe von einem vorherrschenden Strukturabbau abgelöst wird.

Bei einem Spritzversuch mit PC in [20] beobachtete man zunächst einen vorherrschenden Strukturabbau, der nach der zweiten Verarbeitungsstufe von einem Strukturaufbau überdeckt wurde.

Mit zunehmender Verarbeitungszahl sind beispielsweise bei POM und PMMA Trübungen zu erkennen [17]. Für Postconsumer-Recyclate ist diese Eigenschaftsveränderung jedoch von geringerer Bedeutung, weil sich aufgrund des Farbgemisches der Ausgangsmaterialien keine opaken oder durchsichtigen Produkte erzeugen lassen.

2.1.1.4 Konsequenzen für die Verarbeitung

Das Auftreten einer chemischen Reaktion in einem System ist von den vorherrschenden Prozessgrößen abhängig. Eine besonders starke Wirkung hat die Temperatur.

Aus der Aktivierungsenergie einer möglichen chemischen Reaktion ergibt sich eine charakteristische Grenztemperatur, bei deren Überschreitung die jeweiligen chemischen Vorgänge ablaufen. Bei den meisten Materialien liegt die charakteristische Grenztemperatur für die Startreaktion höher als die Aktivierungstemperatur für die unterschiedlichen Einzel- oder Kettenreaktionen [5].

Bei der Verarbeitung eines Materials ist es wichtig, dass die charakteristische Grenztemperatur einer der möglichen Startreaktionen nicht überschritten wird. Bei Einhaltung dieser Regel ist die Grenztemperatur der Folgereaktionen von untergeordneter Bedeutung, weil dann keine aktivierten Kettenbruchstücke vorliegen, an denen die Einzelreaktionen angreifen könnten.

Die charakteristische Grenztemperatur für die Startreaktion bei thermischem Abbau von Polybutylen gibt [5] mit 277°C an. Der Verarbeitungstemperaturbereich von PBT liegt nach Dominghaus [21] in einem Intervall von 230°C bis 270°C. Bewegt man sich bei allen Verarbeitungsschritten innerhalb dieses Intervalls, würde keine thermisch verursachte Startreaktion vorkommen.

Bei der Temperaturabschätzung für die Formmasse muss berücksichtigt werden, dass Schereinflüsse ebenfalls zu einer Temperaturerhöhung im Material beitragen, die auch mit aufwendigen maschinenseitigen Temperaturregelungen nur selten erkannt werden können.

Neben der Temperatur wirken aber auch weitere Prozessparameter auf das System.

Bei der Untersuchung chemischer Zusammenhänge werden die beim Spritzgussverfahren auftretenden hohen Prozessdrücke nur selten berücksichtigt. Das stellt einen nicht zu unterschätzenden Unsicherheitsfaktor dar.

Mechanisch, hydrolytisch oder oxidativ verursachte Startreaktionen können deutlich geringere charakteristische Grenztemperaturen haben als beim rein thermischen Abbau.

Zur Vermeidung eines mechanischen Abbaus dürfen bestimmte kritische Schergeschwindigkeiten nicht überschritten werden [12], [22]. Vereinzelt werden von Rohstoffherstellern kritische Schergeschwindigkeiten für die ihre Materialien angegeben [5], unterhalb derer kein nennenswerter mechanischer Abbau auftreten soll. Wählt man zur Vermeidung des thermischen Abbaus eine sehr geringe Massetemperatur, provoziert man verstärkt den mechanischen Abbau, weil dann zur Formgebung des Polymers eine erhöhte Schergeschwindigkeit notwendig ist.

Zur Eindämmung des hydrolytischen Abbaus geben die Kunststoffproduzenten für ihre Produkte kritische Restfeuchten an, die bei der Verarbeitung nicht überschritten werden

dürfen. Aufgrund intensiver Waschvorgänge bei der Aufbereitung von Postconsumer-Produkten kommt es zu einer starken Befeuchtung des Recyclats. Mit der anschließenden Trocknung muss sichergestellt werden, dass alle Bereiche des Gebindes einen Wassergehalt unter der kritischen Restfeuchte aufweisen.

Die allgemein eingesetzte thermische Trockentechnik arbeitet ohne Materialumwälzung. Die als Trockenmittel verwendete Heißluft wird auf bestimmten Vorzugspfaden durch das Gebinde strömen, längs derer eine hohe Trockenwirkung erreicht wird. Abseits dieser bevorzugten Pfade ist die Trockenwirkung jedoch stark eingeschränkt. Mit Stichprobenmessungen ist der Restfeuchtegehalt einer Gesamtmenge dann nur schwer zu ermitteln, da man immer nur den lokalen Feuchtegehalt einer kleinen ortsabhängig entnommenen Materialprobe untersuchen kann. Die Unsicherheit bei der exakten Bestimmung des Restfeuchtegehalts eines Gebindes stellt beim Wiederverarbeiten von wasseraufnehmenden Kunststoffen eine große Schwierigkeit dar.

Die einzelnen Kunststoffe sind unterschiedlich empfindlich gegen oxidativen Abbau. Während PMMA relativ stabil ist, wird für Polyolefine eine Stabilisierung empfohlen [5]. Neben der chemischen Stabilisierung ist auch die Verarbeitung von Polymeren unter Luftabschluss aus [23] und [24] bekannt. Das Spritzgießen unter Sauerstoffabschluss ist derzeit High-Tech-Anwendungen vorbehalten.

UV-Schädigungen wurden bei der Untersuchung von PKW-Stoßfängern in [25] nur unmittelbar unter der Oberfläche des Außenbereiches festgestellt. Der überwiegende Materialanteil aus inneren Gebieten der Formteile zeigte kein verändertes Materialverhalten.

Aufgrund der unterschiedlichen möglichen Startreaktionen und den nicht nachvollziehbaren Einflussfaktoren auf das Material muss man bei Recyclaten von einer Vorschädigung des Kunststoffes ausgehen.

Deshalb sollten Recyclate bei der Verarbeitung nicht unnötig hohen Temperaturen ausgesetzt werden und die Verarbeitung zügig erfolgen. Mehrmaliges Aufschmelzen der Recyclate führt zu einer erhöhten Materialschädigung und muss durch Auswahl von integrierten Verarbeitungsverfahren vermieden werden.

2.1.2 Auswirkungen physikalischer Vorgänge

2.1.2.1 Molmassenverteilungen bei Neuwaren und Recyclaten

Die meisten typreinen Polymere werden von den Herstellern mit einer Normalverteilung der Molmasse produziert.

Zur Herstellung von Formteilen werden Polymere mit hinreichend langen Molekülketten verwendet, so dass ausreichend Verhakungen möglich sind.

Die Nullviskosität von Polymerschmelzen mit gleicher Molmassenverteilung ist stark von der Molmasse abhängig. Mit zunehmender Molmasse steigt die bei geringen Schergeschwindigkeiten auftretende Viskosität von langkettigen Polymeren mit dem Exponenten 3,4 [26] an. Die einzelnen Viskositätsfunktionen von Typen mit gleicher Molmassenverteilung ähneln sich und unterscheiden sich nur durch ihren Ausgangswert. So konnte Laun [27] durch eine entsprechende vertikale Verschiebung der Viskositätskurven unterschiedlicher Polyamid-6-Typen eine molmasseninvariante Masterkurve erzeugen.

Bei Recyclaten aus genau einem Kunststofftyp bewirken die langfristig ablaufenden chemischen Reaktionen in der Regel eine größere Molmassenverteilung (**Bild 4**). Bei überwiegenden Abbaureaktionen kommt es daneben noch zu einer Verminderung der Molmasse. Sind Aufbaureaktionen stärker ausgeprägt, erhöht sich die Molmasse.

Der Effekt der Erhöhung der Molmassenverteilung ist besonders stark ausgeprägt, wenn in einem System Auf- und Abbaureaktionen parallel und gleichberechtigt nebeneinander ablaufen.

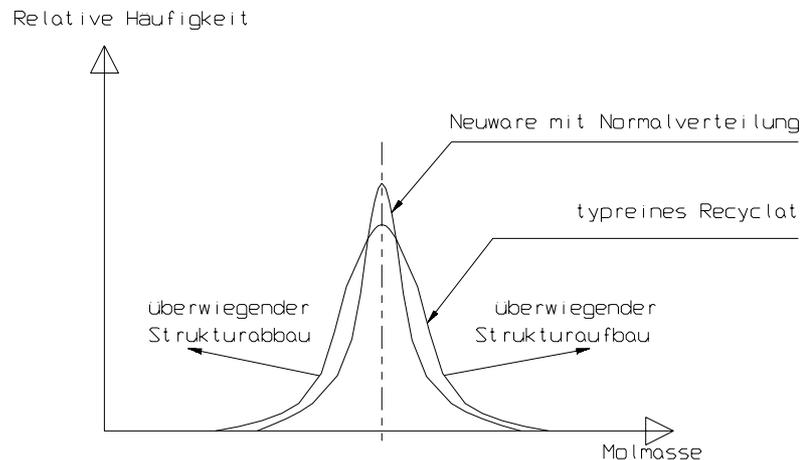


Bild 4 Molmassenverteilung bei Neuware mit Normalverteilung und typreinem Recyclat

Wenn Kettenbrüche vor allem an den Stellen vorkommen, an denen ein Abgleiten eines Makromoleküls verhindert wird, werden nach Mehrfachverarbeitung Verhakungen und Verschlaufungen der Makromoleküle gelöst [3], [28]. Das bedingt eine Verminderung der Anzahl von überlangen Molekülen in mehrfach verarbeiteten Kunststofftypen. In Ausnahmefällen kann so auch eine engere Molmassenverteilung bei typreinen Recyclaten gegenüber dem Ausgangsmaterial entstehen. In **Kapitel 2.1.1.1** wurde dafür bereits das Beispiel des Aufbereitungsschritts Kaltmahlen angeführt.

Zur Charakterisierung der Fließeigenschaften von typreinen Recyclaten gegenüber Neuwaren ist die Betrachtung der Molmasse allein ungeeignet. Es muss hier der Einfluss der Molmassenverteilung auf die rheologischen Eigenschaften betrachtet werden.

Dazu ist aus [27] das Verhalten von zwei Polypropylenen mit gleicher Molmasse aber mit unterschiedlicher Molmassenverteilung (Normalverteilung) bekannt. Für das Polypropylen mit der größeren Molmassenverteilung wurde eine höhere Nullviskosität gemessen. Bei den für das Formfüllen während des Spritzgießens typischen großen Schergeschwindigkeiten sind die Viskositätsfunktionen der beiden Materialtypen aber nahezu identisch. Eine Erhöhung der Molmassenverteilung bewirkt also nur bei geringen Schergeschwindigkeiten eine Erhöhung der Viskosität. Bei Schergeschwindigkeiten, wie sie für das Befüllen der Kavität mit Schmelze erforderlich sind, ist der Einfluss unterschiedlicher Molmassenverteilung bei gleicher Molmasse gering.

In den meisten Fällen sind Recyclate nicht typrein, sondern ein Gemisch von vielen Materialtypen. Das trifft auf Postconsumer-Recyclate zu. Weil beim Vermischen keine deutliche Veränderung der Molmasse vorkommt, zeigt das Stoffgemisch unterschiedlicher Kunststofftypen eine mit **Bild 5** gezeigte Verteilung.

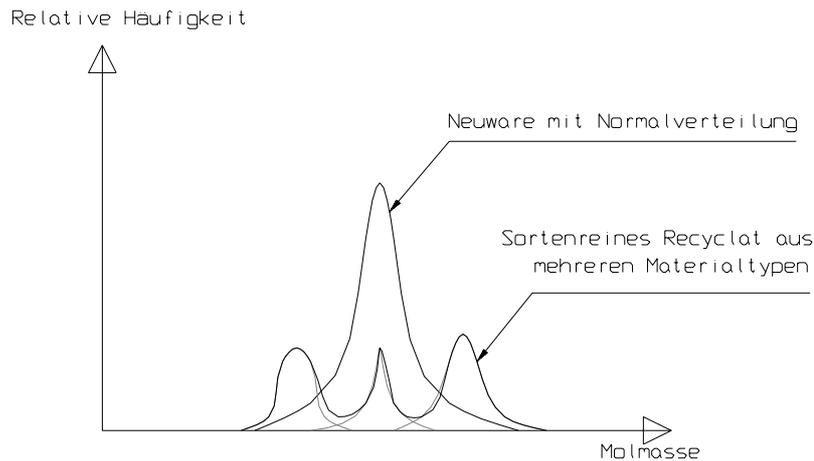


Bild 5 Molmassenverteilung bei Neuware mit Normalverteilung und sortenreinem Recyclat aus drei unterschiedlichen Typen

Überlegungen zum Fließverhalten von Polymerschmelzen, die eine Normalverteilung der Molmasse voraussetzen, sind nun ungeeignet [29]. Bei der Untersuchung von Polyisobutylen-Fractionen stellte Laun in [27] fest, dass sich die Nullviskositäten linear zur mittleren Molmasse der Mischungen verhalten. Die elastischen Eigenschaften von Mischungen unterschieden sich jedoch um Größenordnungen von denen der einzelnen Komponenten.

Beim Formfüllen von Spritzgusswerkzeugen treten starke Dehnströmungseffekte auf [30]. Durch die veränderten elastischen Eigenschaften einer aus mehreren Polymertypen bestehenden Schmelze wird das Fließverhalten während der Formfüllung aufgrund der Dehnströmung stark beeinflusst [31].

Möglichkeiten zur Bestimmung von elastischen Eigenschaften einer Polymerschmelze sind in [32] angegeben.

2.1.2.2 Die Wirkung fester Fremdstoffe auf die Verarbeitungseigenschaften von Recyclaten

Zur Eigenschaftsmodifizierung werden Kunststoffen unmittelbar nach der Herstellung unterschiedliche Füll- und Verstärkungsstoffe zugegeben. Bei der Wiedergewinnung der Materialien nach dem Gebrauch der Erzeugnisse können diese Zuschlagstoffe nicht mehr effektiv aus den Altmaterialien abgetrennt werden und verbleiben so im Recyclat. Die Eigenschaften des Recyclats werden demnach nicht nur durch die molekulare Struktur beeinflusst. Es muss auch die Wirkung von Füllstoffen untersucht werden.

Bekannt sind Arbeiten zum Einfluss von Mehrfachverarbeitungen auf faserverstärkte Systeme [5], [22], [33], [34], [35], [36], [37].

Aufgrund der Scher- und Dehnbeanspruchung während der Verarbeitung kommt es zu Faserbrüchen, die eine Verkürzung der Faserlängen bewirken. Die anisotrop verstärkende Wirkung der Fasern nimmt bei Mehrfachverarbeitung deutlich ab. Die Viskosität des Materials bei mittleren und hohen Schergeschwindigkeiten vermindert sich und der MFR nach DIN ISO 1133 steigt an [17], [22].

Aufgrund dieser Zusammenhänge wird für die Konstruktion von Formteilen der Einsatz von faserverstärkten Thermoplasten mit einem Fasergehalt von mehr als 20% unter recyclingtechnischen Aspekten nur für bedingt empfehlenswert gehalten [38].

Neben bewusst in Neukunststoffe eingebrachten Verstärkungsstoffen wirken in Recyclaten jedoch auch eine Reihe von Fremdstoffen, die an Altteilen anhaften und während des Aufbereitungsprozesses nicht vom Recyclat abgetrennt worden sind.

In der Literatur werden die verminderten Festigkeitseigenschaften der Recyclate auf eine Kerbwirkung von Verschmutzungen zurückgeführt [39], [40], [41]. Dieser Aspekt darf keinesfalls vernachlässigt werden. Dies allein erklärt aber nicht die in [17] beschriebene Beobachtung, warum sich die Langzeiteigenschaften von Recyclaten im Vergleich zu Neuware in einem anderen Grade verändern als die Kurzzeiteigenschaften.

Aufgrund des Vorhandenseins von Fremdstoffen dürfen Postconsumer-Recyclate nicht als Einstoffsysteme angesehen werden. Zum Verständnis der Verarbeitungseigenschaften müssen verschmutzte Altkunststoffe als Mehrstoffsysteme betrachtet und die Auswirkungen der im Recyclat enthaltenen unterschiedlichen Fremdstoffe auf das Fließverhalten der Schmelze untersucht werden.

In diesem Kapitel werden Einlagerungen betrachtet, die auch in der Polymerschmelze einen festen Aggregatzustand haben. Sie können deshalb in der polymeren Schmelze als undeformierbare Einlagerungen angesehen werden.

Für die meisten Formgebungsverfahren ist eine Scherströmung der Kunststoffschmelze in einem definierten Kanal charakteristisch. Dabei kann man im allgemeinen von einer Wandhaftung der Schmelze an der Kanalwand ausgehen. Über die Höhe eines kreisrunden Kanals bildet sich so ein axiales Geschwindigkeitsprofil aus [32].

Wandseitig erhält ein Fremdkörper durch die Schmelze einen geringeren Vorwärtsschub als auf der zentrumsseitigen Partikeloberfläche. Aufgrund dieser Geschwindigkeitsunterschiede wirkt auf die im Schmelzestrom mitschwimmenden Partikel ein Drehmoment (**Bild 6**). Neben einer translatorischen Bewegung im Schmelzestrom kommt es zur Rotationsneigung eines undeformierbaren Partikels [42].

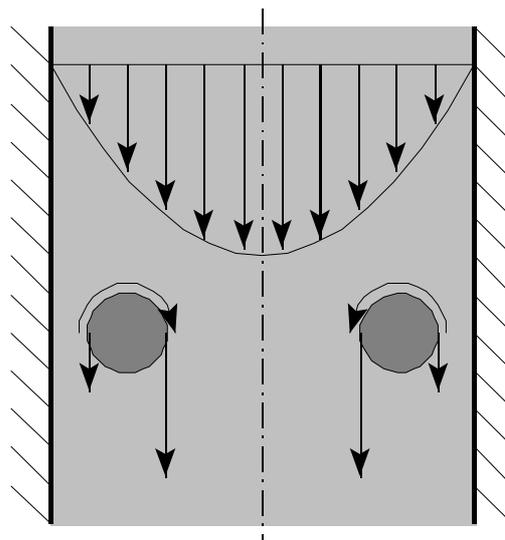


Bild 6 Feste Partikel in einer Scherströmung

In Abhängigkeit von der Verträglichkeit der Komponenten wird an der Oberfläche der Einlagerung polymeres Material mitgeführt. In der mitrotierenden Schmelzeschicht können hohe lokale Schergeschwindigkeiten auftreten. Bei geringer Dicke der vom Partikel in seiner

Rotationsbewegung mitgerissenen Schmelzeschicht und großen Schergeschwindigkeitsunterschieden im Strömungskanal tritt aufgrund der dissipativen Erwärmung dort eine starke lokale Temperaturerhöhung auf. So kann es zu einer thermischen Schädigung in der mitdrehenden Schmelzeschicht kommen, auch wenn die Temperaturentwicklung der linear verlaufenden Strömung die charakteristischen Grenztemperaturen der verschiedenen Startreaktionen (**Kapitel 2.1.1.1**) nicht erreicht.

Aufgrund der zusätzlichen Rotationsbewegung wird der Strömung Energie entzogen. Die makroskopisch gemessene Viskosität des Systems ist größer als bei reinen Polymerschmelzen mit vergleichbarem Fließverhalten [43].

Nur an den sich im Kanalzentrum befindenden Einlagerungen greift die Strömung symmetrisch am Partikel an (**Bild 7**). Hier wirkt kein Moment, eine Rotation des Partikels wird nicht initiiert. Die Einlagerung wird nur translatorisch bewegt.

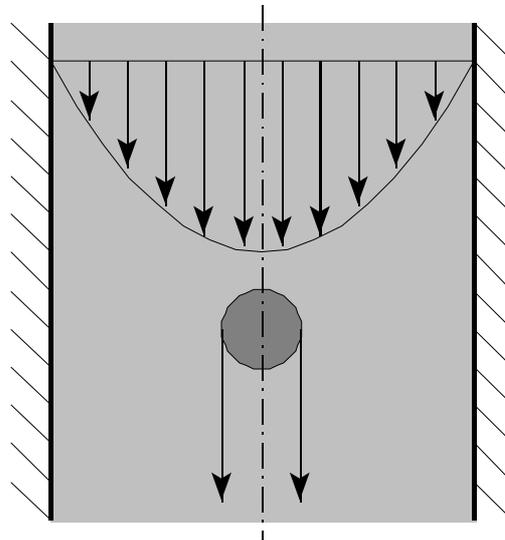


Bild 7 Feste Partikel im Zentrum des Schmelzkanals

Die in **Bild 7** dargestellte Lage von Partikeln in einer symmetrischen Strömung ist energetisch wesentlich günstiger als bei Fremdkörpern, die sich in einer durch **Bild 6** aufgezeigten unsymmetrischen Strömung befinden. Mit zunehmend durchströmter Fließkanallänge wird so aus entropischen Gründen eine Anhäufung von Feststoffpartikeln im Kanalzentrum vorkommen [44] (**Bild 8**).

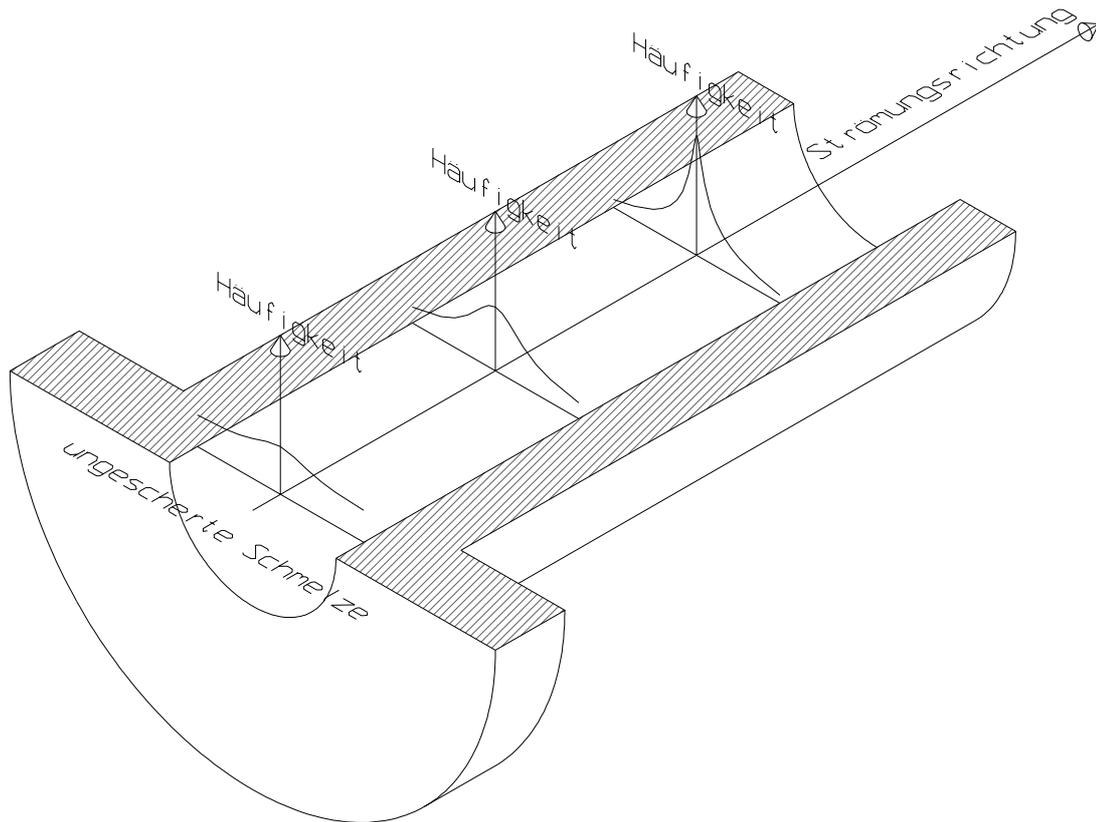


Bild 8 Schematische Darstellung der Partikelkonzentration über den Kanalquerschnitt bei unterschiedlichen Fließweglängen

Durch praktische Beobachtungen beim Spritzgießen von verschmutztem opaken Material wird die in **Bild 8** gezeigte Darstellung bestätigt. Die Schmutzpartikel konzentrieren sich in zentralen Bereichen der Spritzlinge, während die Randbereiche fast unverschmutzt sind. Die Schmelze legt in der Plastifiziereinheit und im Angussystem einen langen Fließweg zurück und ist über lange Zeit der Scherströmung ausgesetzt. Bei der Betrachtung von Spritzgussteilen gilt so die in **Bild 8** rechts oben gezeigte Häufigkeitsverteilung nach der Durchströmung eines langen Fließweges. Die dort vorhergesagte Konzentration von Partikeln in den zentralen Bereichen des Fließkanals erklärt die Anreicherung von Schmutzpartikeln in den zentralen Bereichen der Spritzlinge.

Neben der Lage von Partikeln wird auch die Ausrichtung von länglichen Fremdkörpern durch die Strömung beeinflusst. Grundsätzlich werden die Partikel so ausgerichtet, dass sie der Strömung die geringste Angriffsfläche bieten. So stellt sich bei einer reinen Scherströmung von faserverstärkten Kunststoffen eine Faserausrichtung parallel zur Strömungsrichtung [45] ein. Bei der Füllung von Spritzgusswerkzeugen mit Kunststoffschmelze treten aber neben den Scherströmungsanteilen auch Dehnströmungsanteile auf. Über die Dicke des Formteils ist aufgrund verschiedener Gewichtung von Scher- und Dehnströmungsanteilen die Faserausrichtung unterschiedlich [46]. Zur Vorhersage der Faserausrichtung wurden Schichtenmodelle entwickelt [47]. Programme zur Berechnung der sich einstellenden Faserorientierung sind bekannt [48], jedoch zur Erzielung nutzbarer Ergebnisse sehr aufwendig, teuer und langsam [49].

Nach der sich an die viskose Strömung anschließenden Erstarrung der Formmasse ist eine Verschiebung der polymeren Matrix unmöglich. Die während der Strömung ausgebildete

Partikelanordnung und –ausrichtung wird eingefroren. Das hat Konsequenzen auf die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Kunststoffprodukte.

Nach der Erstarrung der Schmelze können die Einlagerungen härter oder weicher als das polymere Grundmaterial sein.

Bei der Abschätzung der mechanischen Eigenschaften von Kunststoffteilen aus verunreinigten Recyclaten muss unterschieden werden, ob zwischen der polymeren Matrix und dem eingelagerten Fremdkörper eine Kraftübertragung möglich ist oder nicht.

Wenn zwischen der Matrix und dem eingelagertem Partikel keine Kräfte übertragen werden, wirkt bei geringen Verformungen die Einlagerung wie eine Fehlstelle in der Matrix. Bei starken Verformungen führen harte Partikel zu einer Behinderung der Verformung des Matrixmaterials und es entstehen lokale Spannungsspitzen. Weiche Einlagerungen sind diesbezüglich unbedenklich.

Ist zwischen der Matrix und dem eingelagertem Partikel eine Kraftübertragung möglich, werden die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Kunststoffprodukte stark beeinflusst. Weiche, zähe kugelähnliche Einlagerungen zeigen bei einer schlagartigen Belastung des Körpers eine rissstoppende Wirkung [50]. An scharfkantigen weichen Einlagerungen können jedoch auch Risse initiiert werden. Harte Einlagerungen haben bei möglicher Kraftübertragung zwischen Matrix und Partikel eine verstärkende Wirkung [47].

Wenn in einer polymeren Matrix längliche Partikel enthalten sind und zwischen Grundwerkstoff und Einlagerung eine Kraftübertragung möglich ist, zeigen die Volumenelemente des Kunststoffprodukts bei einer bevorzugten Ausrichtung der Fremdkörper anisotrope Eigenschaften. Sind die Partikel härter als das Matrixmaterial, haben die Volumenelemente in Vorzugsorientierungsrichtung einen höheren Modul als in den anderen beiden Raumrichtungen. Bei weichen Einlagerungen ist die Wirkung entsprechend umgekehrt.

Aufgrund der Anreicherung von Einlagerungen im Zentrum des Kunststoffprodukts (**Bild 8**) treten auch über den Querschnitt des hergestellten Kunststoffkörpers anisotrope Eigenschaften auf. Überwiegen harte Einlagerungen, weisen zentrale Bereiche des Körpers einen höheren lokalen Elastizitätsmodul auf als randnahe Gebiete. Wird dieser Körper gleichmäßig gedehnt, entstehen im Zentrum höhere Spannungen als in den Randgebieten. Wenn weiche Einlagerungen überwiegen, ist der Modul in den zentralen Bereichen geringer als in den Randgebieten des Körpers. Bei einer Dehnung sind dann die Spannungen in den zentralen Bereichen des Körpers geringer als in den Randbereichen.

Bei Körpern aus einem fremdkörperhaltigen Recyclat führen die über den Querschnitt unterschiedlich starken Spannungen zu einem Versagen bei geringeren Dehnungen. Dies muss bei der Gestaltung von Formteilen, für die ein Recyclateinsatz vorgesehen ist, berücksichtigt werden. Konstruktiv muss sichergestellt werden, dass anwendungstechnisch notwendige Dehnungen gering sind.

2.1.2.3 Die Wirkung flüssiger Fremdstoffe auf die Verarbeitungseigenschaften von Recyclaten

Im Schmelzzustand flüssige Beimengungen in Recyclaten können von Verschmutzungen herrühren, beispielsweise durch Öle und Fette. Weiterhin kommen aufgrund von chemischen Abbaureaktionen entstandene Oligomere oder bei einigen Kunststoffen auch Monomere vor, die ebenfalls in flüssiger Form vorliegen.

Bei der Verarbeitung von Recyclaten müssen auch nicht abgetrennte Fremdpolymere als flüssige Einlagerungen betrachtet werden, wenn sie bei der Verarbeitungstemperatur bereits aufgeschmolzen sind. Dabei muss das Viskositätsverhältnis zwischen Einlagerung und Matrix berücksichtigt werden.

Einlagerungen, die eine wesentlich höhere Viskosität als das Matrixmaterial haben, werden als feste Einlagerungen betrachtet. In diesem Fall gelten die in **Kapitel 2.1.2.2** getroffenen Aussagen. Eine Zerkleinerung der Einlagerungen ist nicht möglich [51].

Wenn bei der Verarbeitungstemperatur die Verunreinigungen eine ähnliche Viskosität wie das Matrixmaterial aufweisen, gelten die folgenden Betrachtungen:

Es wird davon ausgegangen, dass in der unbewegten Schmelze die flüssigen Einlagerungen eine runde Gestalt haben. Wird die Schmelze durch einen Strömungskanal gepresst, greifen die Scherkräfte an den meisten Partikeln unsymmetrisch an. Da im Gegensatz zu den in **Bild 6** gezeigten Verhältnissen hier eine Formveränderung der Einlagerungen möglich ist, erfolgt ein Langstrecken der Einschlüsse (**Bild 9**) in einer Scherströmung [52].

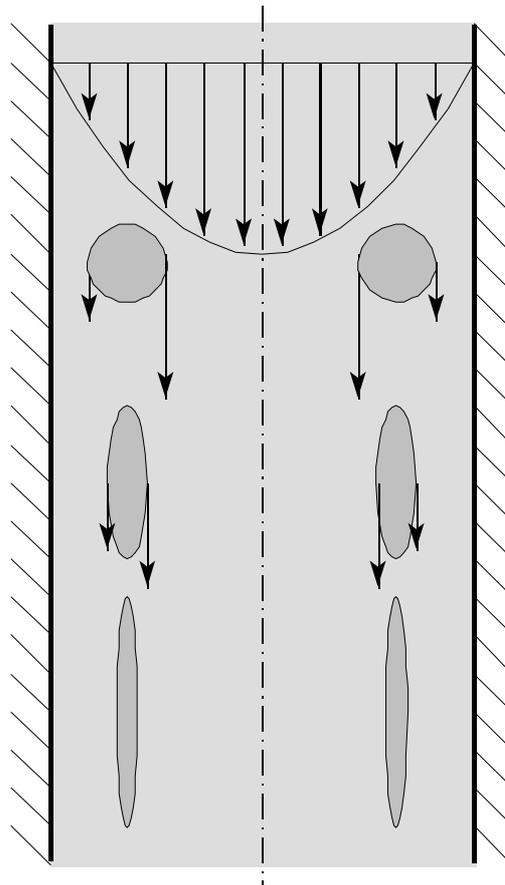


Bild 9 Viskose Partikel in einer Scherströmung

Nur die Einlagerungen, die sich unmittelbar im Zentrum des Strömungskanals befinden, werden von der Strömung symmetrisch mitbewegt. Ihre Gestalt bleibt weitgehend unverändert.

Entscheidend für den Grad des Langstreckens der Einlagerungen ist die Lage im Kanal. Der Verstreckungsgrad ist in den Randbereichen am größten und nimmt zur Kanalmitte hin ab. Genau im Zentrum des Kanals erfolgt dann keine Dehnung der Einlagerung.

Wenn die Bildung einer Oberfläche energetisch neutral abläuft, ist die Anordnung der Fremdkörper im Fließkanal zufällig. Bei hinreichend langen Fließwegen kann sich aufgrund der starken Dehnung der Fremdkörper eine lamellenartige Struktur im Fließkanal ausbilden. Das Strecken der Einlagerungen ist dann so stark, dass sich das Fremdmaterial in ringförmigen Gebilden ansammelt (**Bild 10**).

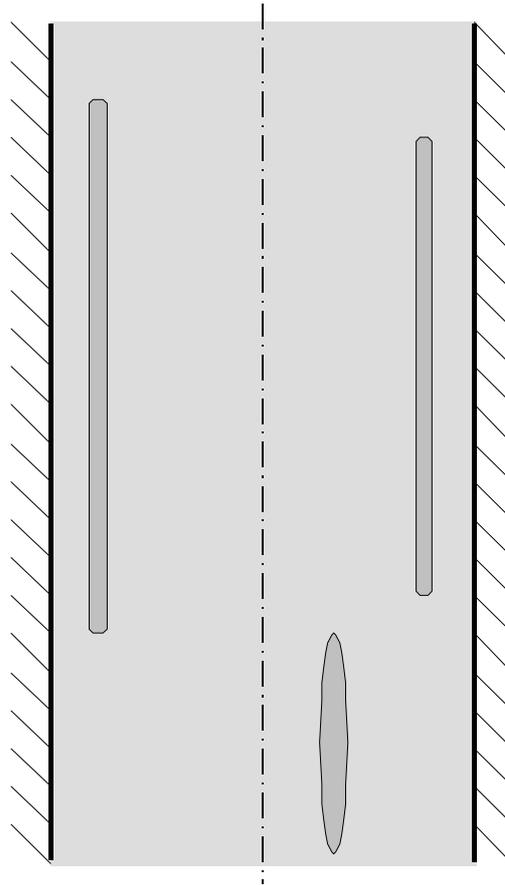


Bild 10 Ringförmige Anordnung von viskosen, zur Matrix verträglichen Partikeln bei lange wirkender Scherströmung

Bei den meisten Stoffkombinationen muss zur Vergrößerung der Berührungsfläche zwischen beiden Komponenten Energie aufgebracht werden. Eine extreme Längsdehnung ist dann aus enthalpischen Gründen nicht möglich. Ab einem bestimmten kritischen Dehnungsgrad erfolgt ein Zerteilen der Einlagerung [53] (**Bild 11**).

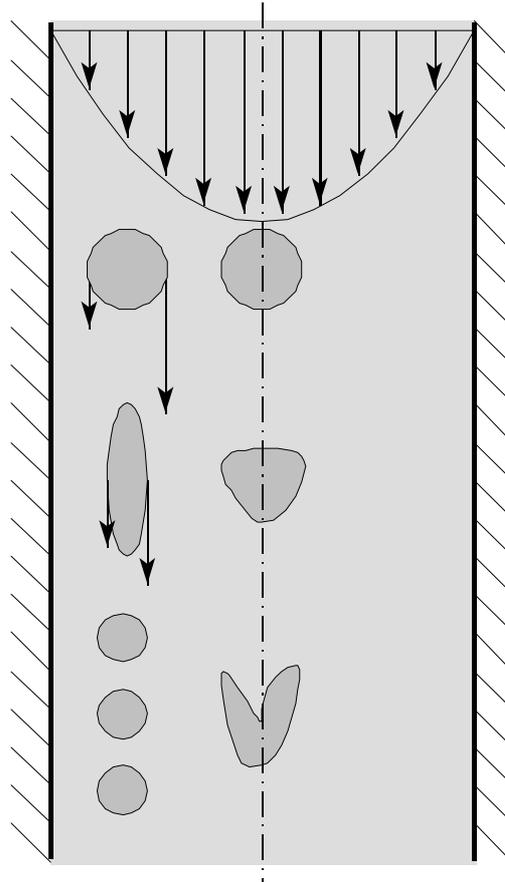


Bild 11 Viskose, zur Matrix unverträgliche Partikel in einer Scherströmung

Die Zerteileffekte sind am Rand des Strömungskanals am stärksten ausgebildet, da dort die größten Schergeschwindigkeitsunterschiede auftreten. Sie werden zum Zentrum hin immer schwächer.

An der Kanalwand befinden sich aufgrund der dort vorherrschenden starken Schergeschwindigkeiten und der damit verbundenen Zerteilwirkungen viele kleine Partikel, während man im Zentrum des Fließkanals große Fremdkörper finden wird [51].

Die Berührungsfläche zwischen den Einlagerungen und der Matrix ist bei vielen kleinen kugelförmigen Partikeln größer als bei zahlenmäßig wenigen, dafür aber großen Einlagerungen. Bei den meisten Stoffpaarungen wird zur Bildung einer Oberfläche Energie verbraucht. Die Zerteilung von Partikeln ist dann enthalpisch ungünstig. In einem solchen Fall wird es zu einer verstärkten Partikelkonzentration der Einlagerungen im Zentrum des Fließkanals analog zu der in **Bild 8** gezeigten Darstellung kommen.

Mehrstoffsysteme aus unterschiedlichen Basiskunststoffen, mit guter Verträglichkeit der Komponenten, kommen nur selten vor. Bei der Mischung von unterschiedlichen Polymeren kann man in Anbetracht der in [38], [54], [55] gezeigten Verträglichkeitsmatrizen davon ausgehen, dass die mit **Bild 11** diskutierten Zusammenhänge anwendbar sind. Durch die Zugabe von Verträglichkeitsvermittlern könnten jedoch Systeme erzeugt werden, die weitgehend den mit **Bild 9** und **Bild 10** gezeigten Modellvorstellungen entsprechen. Dafür spricht die Benennung des Produkts der Firma Extrudawood in [37], bei dem eine holzartige fasrige Struktur bei wiederverarbeiteten PS-Abfällen erzielt wird, deren Entstehung mit **Bild 10** erklärbar ist.

Wenn die Viskosität der Beimengungen wesentlich geringer ist als die der Kunststoffschmelze, muss zwischen verträglichen und unverträglichen Stoffpaarungen unterschieden werden.

Flüssigkeiten, die mit der Matrix verträglich sind, werden bis zu einer bestimmten Konzentration vom Kunststoff aufgenommen. Sie lagern sich zwischen den Molekülketten ab. Verhakungen und Verschlaufungen werden gelockert. In der Schmelze wirken sie als Weichmacher und vermindern bei hohen Schergeschwindigkeiten die Viskosität des Recyclats.

Bei geringen Schergeschwindigkeiten zeigen sich keine deutlichen Unterschiede, weil aufgrund der geringen Orientierung der Polymerketten gelockerte Verhakungen und Verschlaufungen keinen Effekt bewirken [32]. So wird bei der Bestimmung von MFR-Werten nach DIN ISO 1133 die Gleitmittelwirkung oft nicht erkannt. Beobachtet wurden solche Phänomene in [37] bei der Wiederverarbeitung von Materialien, die für Ölkästen oder Kraftstofftanks verwendet wurden. Hier fungieren offensichtlich vom Polymer aufgenommene Kohlenwasserstoffe als Weichmacher.

Schmitz führt in [20] eine Verminderung der Viskosität einer Polyamid-Schmelze auf eine weichmacherartige Wirkung der Abbauprodukte dieses Polymers zurück.

Dassow äußerte in [41] die Vermutung, dass auch Fremdpolymere eine weichmachende Wirkung im Schmelzzustand zeigen können.

Sind Matrix und niedrigviskoser Fremdstoff miteinander unverträglich, kommt eine Phasentrennung vor. Aufgrund der hier betrachteten geringeren Viskosität der aufgenommenen Flüssigkeiten erfolgt die Verteilung der Einlagerungen zügig. Zu einem starken axialen Ausdehnen der Fremdstoffe analog **Bild 9** kommt es bereits nach kurzen Fließweglängen, unter Umständen noch bevor die Zerteilprozesse nach **Bild 11** wirksam werden. Tritt ein solcher Fall auf, hat das Konsequenzen für das Strömungsbild des Systems (**Bild 12**).

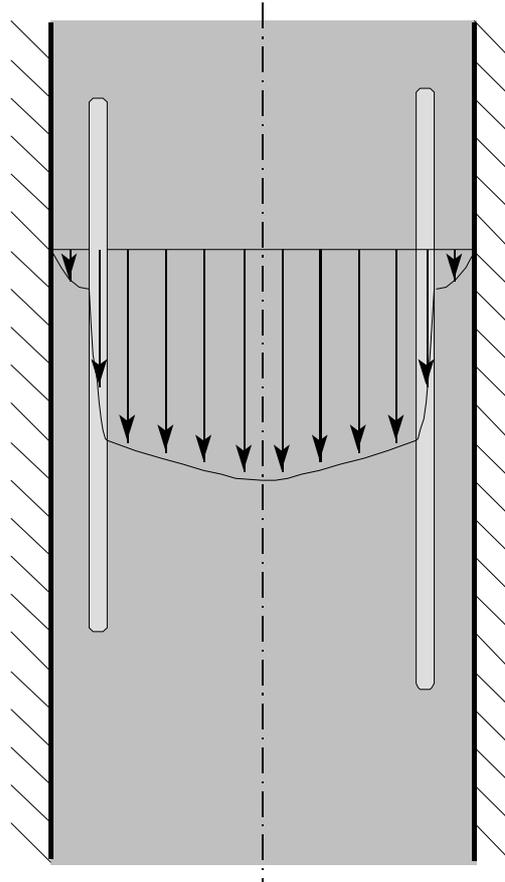


Bild 12 Ringförmige Anordnung von ungelösten niedrigviskosen Stoffen in einer Scherströmung

Aufgrund der großen Viskositätsunterschiede zwischen Matrix und Zuschlag bildet sich eine Blockströmung [32] aus. Ringförmige, axial ausgedehnte Einlagerungen fungieren dabei als Gleitschichten. Zur Schmelzeströmung ist dann wesentlich weniger Energie notwendig, als bei einer Scherströmung des homogenen Basismaterials. Aufgrund dieses energetischen Vorteils kann es zu einem Ausbleiben der Zerteilprozesse kommen. Die Viskosität einer solchen Mischung ist bei hohen Schergeschwindigkeiten geringer als bei der Strömung des reinen Matrixmaterials [51].

Dies ist der Fall, wenn zwischen dem flüssigen Fremdstoff und dem Werkstoff, aus dem die Kanalwand hergestellt ist, eine starke Adhäsionskraft besteht. Dann konzentriert sich das flüssige Fremdmaterial an der Kanalwand und es kommt zu einer Strömung mit Wandgleiten. Dazu wurden in [56] grundlegende Untersuchungen durch Bothmer angestellt.

2.1.2.4 Die Wirkung von Fremdstoffen mit gasförmigem Aggregatzustand bei Verarbeitungstemperatur

Eine weitere Variante für Beimengungen in einem Basispolymer sind Fremdstoffe, die bei Normalbedingungen im flüssigen Zustand von der Matrix in Spuren gelöst wurden, im Verarbeitungstemperaturbereich und bei atmosphärischen Druck jedoch in den gasförmigen Phasenzustand wechseln.

Es ist denkbar, dass nach den Waschvorgängen Wasserreste nicht vollständig aus dem Material heraus getrocknet wurden. Auch könnten niedermolekulare Bestandteile, die von

Abbauprozessen herrühren, in einer polymeren Matrix eingeschlossen sein. Werden während der Einsatzzeit durch die Polymere niedermolekulare Stoffe aufgenommen, könnte ebenfalls ein solches Verhalten auftreten, beispielsweise bei Recyclaten, die aus Kraftstofftanks gewonnen wurden. Bei 80% der 1995 in Europa hergestellten Kraftfahrzeuge wurde ein Kraftstoffbehälter aus Kunststoff eingesetzt [57].

Recyclate, die aus Schäumen gewonnen wurden und Reste von unverbrauchten Treibmitteln enthalten, zeigen Ausgasungserscheinungen. Auch Altkunststoffe, die mit Resten von Spanplatten vermischt sind, neigen zur Freisetzung von Gasen beim Aufschmelzen.

Kennzeichnend für die hier betrachteten Fremdstoffe ist der gasförmige Zustand bei atmosphärischen Druck im Verarbeitungstemperaturbereich.

Charakteristisch für die Polymerverarbeitungsverfahren, wie das Spritzgießen oder das Extrudieren, ist eine Kompression der Formmasse auf ein Vielfaches des Umgebungsdrucks. Bei vorherrschenden starken Drücken im Bereich der Verarbeitungstemperaturen von Kunststoffen behalten die hier betrachteten niedermolekularen Bestandteile den flüssigen Aggregatzustand bei und bleiben in der polymeren Matrix gelöst. Mit der Plastifizierung werden die niedermolekularen Bestandteile in flüssiger Phase unter die polymere Matrix gemischt und weiter fein verteilt.

Wenn sich die Fremdstoffe in geringen Konzentrationen im Polymer befinden, wird das Strömungsverhalten solcher Systeme nur wenig beeinflusst. So geben Bielinski und Gruszka in [58] für Neu-Polypropylen eine MFI-Erhöhung um 20% bei einer Treibmittelzugabe von 2% an.

Verarbeitungstechnische Probleme entstehen jedoch bei der Formfixierung der Kunststoffprodukte während der Abkühlung der Schmelze. Bei der damit verbundenen Verminderung des Prozessdrucks ändert sich in zentralen noch heißen Gebieten des Kunststoffprodukts der Aggregatzustand der niedermolekularen Bestandteile von flüssig zu gasförmig.

Die gasförmigen niedermolekularen Stoffe sammeln sich in feinen Bläschen im Innern des Polymers. Das Gesamtvolumen der Bläschen ist abhängig vom Platzbedarf der sich bildenden Gase. Da aufgrund der Formfixierung des Kunststoffteils durch äußere erhaltete Schichten oder eine Kavität jedoch keine beliebige Volumenvergrößerung möglich ist, bildet sich in diesen Bläschen ein lokaler Kompressionsdruck. Es tritt eine nicht zu unterschätzende Kompressionserwärmung auf, die eine lokale Schädigung des Polymers bewirken kann. Bei hinreichend fortgeschrittener Abkühlung erfolgt ein Phasenwechsel der Fremdstoffe von gasförmig zu flüssig. Der Druck in den Gasbläschen wird dadurch stark vermindert.

Aufgrund des notwendigen zusätzlichen Volumens der Gasbläschen ergibt sich ein vom reinen Polymer abweichendes p-v-T-Verhalten. Extrusionserzeugnisse blähen stärker auf, Spritzgussprodukte haben eine geringere Schwindung.

Eine der Ursachen für größere Maßschwankungen bei der Recyclatenverarbeitung gegenüber der Verwendung von Neuware ist das Vorhandensein von Fremdstoffen in Altkunststoffen, die bei Verarbeitungstemperatur unter Normaldruck den gasförmigen Aggregatzustand haben.

Liegen die Verunreinigungen in höheren Konzentrationen vor, wird sich auch unter Druck keine vollständige Lösung in der polymeren Matrix realisieren lassen. In herkömmlichen Kunststoffverarbeitungsanlagen liegt dann neben der Schmelze eine Gasphase vor, die eine sichere Verarbeitung unmöglich macht.

Erkennbar ist dies bereits beim Anfahren der Maschinen. In den Schneckengängen bilden sich gasgefüllte Hohlräume. Ein diskontinuierlicher Schmelzeaustritt und eine geräuschvolle Entspannung der austretenden Gase ist die Folge.

Die Herstellung eines zusammenhängenden Strangs im Extrusionsverfahren ist unmöglich.

In und an den Produkten, die im Spritzgussverfahren hergestellt wurden, tritt Blasenbildung auf. An Spritzlingen kommen aufgrund der mit in die Kavität eingebrachten Gasmengen nicht reproduzierbare Bindenähte vor, die für ein unkontrolliertes Bauteilversagen verantwortlich zeichnen können. Weiterhin treten Brandstellen an den produzierten Teilen auf, die auch mit aufwendigen Werkzeugentlüftungen nicht beseitigt werden können.

Bestimmte Konzentrationen von gasbildenden Beimengungen dürfen also auf keinen Fall überschritten werden. So gibt Scheirs [37] eine kritische Konzentration von 0,5% einmigrierten Kraftstoffs in den zur Wiederverwertung anstehenden Altkunststoffen an, die aus Fahrzeugtanks gewonnen wurden.

Neben den technologischen Problemen sind die bei der Verarbeitung ausgasenden Altkunststoffe jedoch auch aus physiologischer Sicht und unter Umweltschutzaspekten bedenklich.

Es besteht eine starke Geruchsbelästigung bei der Verarbeitung von Materialien, die mit Spanplattenresten verschmutzt sind. Die Ursache ist in frei werdendem Formaldehyd zu vermuten.

Freigesetzte Kraftstoffdämpfe sind hochgradig brennbar und haben ein hohes Gefährdungspotential.

Als Treibmittel zur Schaumstoffherzeugung wurden in der Vergangenheit ozonvernichtende FCKW-haltige Substanzen verwendet, die in den heute zur Verwertung anstehenden Altkunststoffen noch vorkommen.

Die Aufbereitung von mäßig ausgasenden Altkunststoffen erfolgt mit einem Entgasungsextruder. Im Einzelfall muss geprüft werden, wie mit den abgesaugten Dämpfen zu verfahren ist.

2.2 Kreislaufführung von Kunststoffen

2.2.1 Ressourcenverbrauch beim Einsatz von Kunststofferzeugnissen

In den letzten fünf Jahrzehnten entwickelte sich die Kunststofftechnik von der handwerklichen Produktion von Nischenprodukten zu einer Industrie, die zur Aufrechterhaltung unseres Lebensstandards unverzichtbar ist.

Aufgrund der großen Nachfrage unserer Konsumgesellschaft steigen seit dem zweiten Weltkrieg die weltweit erzeugten Kunststoffmengen von Jahr zu Jahr an (**Bild 13**).

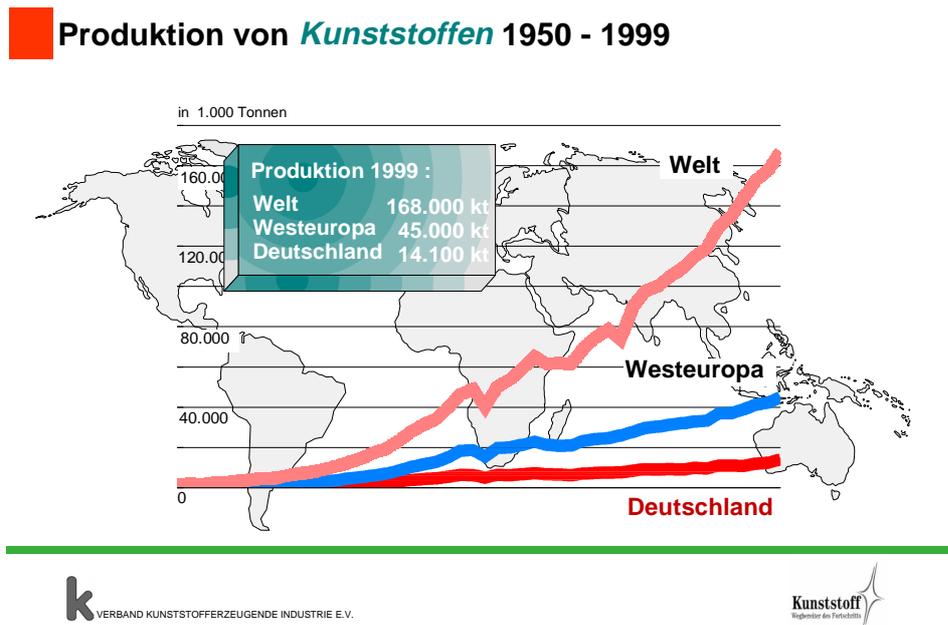


Bild 13 Produktion von Kunststoffen zwischen 1950 und 1999 in 1000t/a [59]

Die unbegrenzte Nachfrage ist hauptsächlich durch folgende Argumente zu begründen:

- Die Werkstoffeigenschaften von polymeren Materialien können gezielt auf einen konkreten Anwendungsfall hin optimiert werden.
- Die angewendeten Technologien zur Herstellung und Weiterverarbeitung der Kunststoffe haben ein hohes Niveau erreicht und ermöglichen eine effizientere Produktion als beim Einsatz von altbekannten Werkstoffen.
- Kunststofferzeugnisse können im Vergleich zu Produkten aus anderen Werkstoffen mit wesentlich geringeren Kosten hergestellt werden. Neben den effektiven Herstellungstechnologien ist dies auch damit zu begründen, dass für das zur Herstellung von Kunststoffen benötigte Erdöl keinerlei Steuern erhoben werden [60] und in absehbarer Zeit nicht zu erwarten sind.

Mehr als vier Prozent des weltweit verbrauchten Erdöls geht aufgrund der chemischen Umwandlung stofflich in die Kunststoffe ein [55], [61], [62]. Betrachtet man noch den zur Herstellung der Polymere notwendigen Energieaufwand, ergibt sich ein Anteil von etwa sieben Prozent an der Erdölförderung, der insgesamt zur Produktion von Kunststoffen aufgewendet werden muss [1], [63].

Aufgrund der stetig zunehmenden Mengen von erzeugten Kunststoffen (**Bild 13**) wird der Absolutverbrauch an Erdöl zu deren Herstellung steigen.

Beachtliche Entwicklungserfolge zur effektiveren Brennstoffausnutzung und auf dem Gebiet alternativer Energien - beispielsweise Solaranwendungen oder Brennstoffzellen - werden andererseits eine Verminderung der jährlichen Gesamtfördermengen nach sich ziehen. Diese beiden Tendenzen werden insgesamt zu einer Erhöhung des zur Herstellung von Kunststoffen notwendigen Anteils an der Gesamtfördermenge des Rohöls führen.

Nicht nur die Erzeugung von Kunststoffen, auch die Entsorgung von Kunststoffen verbraucht Ressourcen. Obwohl alle Kunststoffe organische Verbindungen darstellen, ist der Abbau durch Mikroorganismen in der Regel nicht möglich. Kunststoffe blockieren so auf Dauer Deponiekapazitäten. Eine Ausnahme bilden hier biologisch abbaubare Polymere, die aber nur einen verschwindend geringen Anteil an der gesamten Kunststoffproduktion haben.

Die lange Beständigkeit von mengenmäßig stets anwachsenden Kunststoffabfällen und der unwiederbringliche Ressourcenverbrauch an Erdöl stellen die Gesellschaft vor die Aufgabe, von den in der Vergangenheit vorherrschenden linearen Konsumketten der Durchflusswirtschaft abzukommen und eine funktionierende Kreislaufwirtschaft zu installieren [2].

2.2.2 Mögliche Kreislaufführungen

Die Kreislaufführung von Gütern (**Bild 14**) kann auf unterschiedliche Art erfolgen:

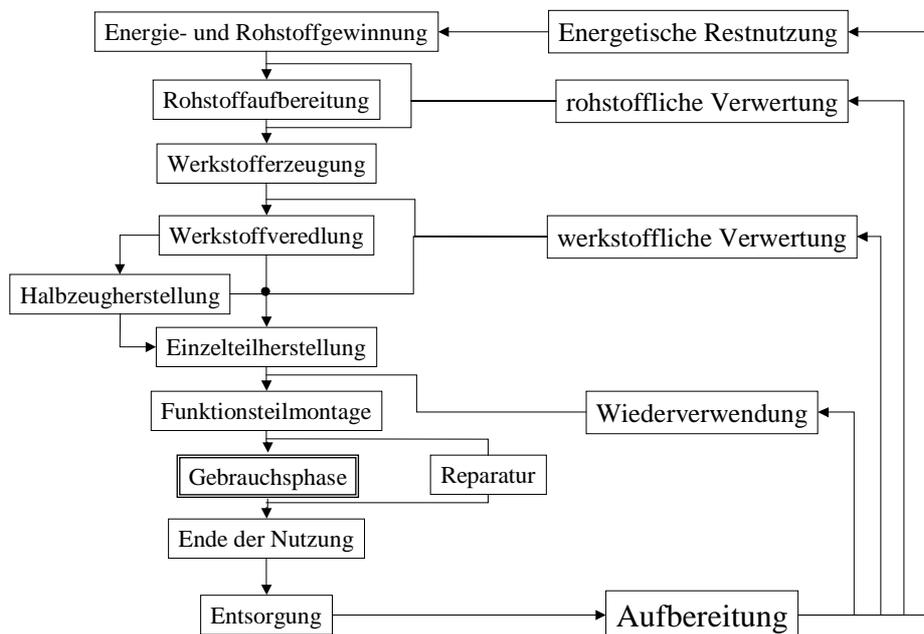


Bild 14 Mögliche Kreislaufführung von Gütern

Erzeugnisse aus Thermoplasten können grundsätzlich durch Wiedereinsatz, werkstoffliche Wiederverarbeitung, rohstoffliche Aufbereitung oder zur Energiegewinnung in den Stoffkreislauf zurück geführt werden.

Zur Ressourcenschonung ist bei der Kreislaufführung von Gütern ein möglichst enger Kreis (**Bild 14**) zu favorisieren. Bei der Wahl der Kreislaufführung muss die Qualität der Altmaterialien berücksichtigt werden. So ist es ökologisch unvermeidbar, wenn zur

Sicherstellung eines möglichst engen Verwertungskreises (**Bild 14**) ein extremer Aufwand beispielsweise zur Trennung von Materialien betrieben werden müsste und dann der Ressourcenverbrauch deutlich größer wäre, als die Verwendung von neuen Rohstoffen erfordern würde [64].

2.2.3 Technologien zum Wiedereinsatz von Altkunststoffen

2.2.3.1 Nutzung des energetischen Potentials von Altkunststoffen

Die Ausnutzung der in den Altkunststoffen gebundenen chemischen Energie erfolgt in Müllverbrennungsanlagen und mit Stoffumwandlungsprozessen, bei denen die Kunststoffe als Brennstoffersatz oder als Kohlenstofflieferant wirksam werden.

Diese Art von Aufbereitungsanlagen sind aufgrund der hohen Investitionskosten für große Stoffdurchsätze ausgelegt und überregional angesiedelt.

Das Inputmaterial ist ein Gemisch aus unterschiedlichen Abfallstoffen. Auf eine Aufbereitung wird weitgehend verzichtet.

Die Energieausbeute in Müllverbrennungsanlagen ist relativ gering, weil zur Verhinderung der Bildung von Schadstoffen die entstehenden Verbrennungsgase plötzlich abgekühlt werden müssen und sich deshalb nur ein geringer thermischer Wirkungsgrad realisieren lässt.

In Deutschland ist der Anteil von in Müllverbrennungsanlagen entsorgten Altprodukten mit 16% geringer als in anderen europäischen Ländern [65].

Als Ergänzungsbrennstoff sowie als Kohlenstofflieferant beziehungsweise Reduktionsmittel werden Altkunststoffe in der Zementindustrie [66], im Hochofenprozess [67], [68] und in Wärmekraftwerken [69] eingesetzt.

Die Energieausbeute ist bei dieser Art Verwertung fünf mal höher, als bei der Verbrennung der Kunststoffe in einer Müllverbrennungsanlage [70]. Allerdings sind die zulässigen Schadstoffemissionen aus Müllverbrennungsanlagen wesentlich geringer, als sie bei der Mitverbrennung in Zementwerken, Kohlekraftwerken und Hochöfen vorkommen dürfen [65]. Trotz der großzügigen gesetzlich zulässigen Emissionsgrenzwerte bei der Zement-, Energie- und Stahlerzeugung verursachen mitverbrannte Altpolymere Probleme [70], weil der Schwermetallgehalt in der Asche zu hoch ist. Die Schwermetalle stammen aus Zuschlagstoffen der Polymere. Auch der Chloranteil in den Verbrennungsgasen ist bereits bei geringen Anteilen von Polyvinylchlorid in den Altkunststoffen verfahrenstechnisch problematisch.

Vom Werkstoffpotential der zur Herstellung der Altprodukte verwendeten Neuware kann bei diesen Verfahren nur ein vom Wirkungsgrad abhängiger Teil der Verbrennungsenthalpie der Altkunststoffe ausgenutzt werden. PP hat beispielsweise eine Verbrennungsenthalpie von 44MJ/kg. Zur Erzeugung der Kunststoffe ist aber deutlich mehr Energie notwendig, bei Polypropylen sind dies 71MJ/kg [61]. Für höherwertige Kunststoffe ist das Verhältnis zwischen Verbrennungsenthalpie und der zur Erzeugung notwendigen Energie noch schlechter, beispielsweise aufgrund der notwendigen energetisch aufwendigen Trocknung von hydrophilen Polymeren.

Mit der Verbrennung von Kunststoffen kann man so weniger als die Hälfte der zu ihrer Erzeugung aufgewendeten Energie thermisch nutzbar machen.

2.2.3.2 Rohstoffliche Wiederverwertung

Unter der Rohstofflichen Verwertung versteht man die gezielte chemische Zerlegung eines Werkstoffs [71].

Bei der Gewinnung von chemischen Rohstoffen treten zehnfach geringere Abgaswerte auf [72] als bei der Mitverbrennung von Kunststoffen.

Mit rohstofflichen Wiederverwertungsverfahren ist die Herstellung von anorganischen oder von niedermolekularen organischen Stoffen möglich.

Die Herstellung von niedermolekularen Stoffen erfolgt mit modifizierten petrol- und carbochemischen Verfahren. Die gewonnenen Produkte sind Koks, Öle und Gase, wie zum Beispiel Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Methan, oder Wasser.

Aufgegeben werden vermischte Kunststoffabfälle [73]. Allerdings verursachen PVC-Anteile problematische Chloremissionen. Chlorhaltige Produkte sind am Markt nicht absetzbar und erfordern einen zusätzlichen Arbeitsschritt zur HCl-Abspaltung [74]. Außerdem führen Chloremissionen zum vorzeitigen Verschleiß der Anlagen [75].

Verfahrenstechnisch problematisch sind weiterhin füllstoffhaltige Altmaterialien. Vor allem bei Gebinden, die faserverstärkte Kunststoffe enthalten, kommt es zu anlagentechnischen Problemen.

Deshalb ist für die rohstoffliche Wiederverwendung eine Grobsortierung oder Vorbehandlung der Altkunststoffe notwendig.

Problematisch ist die Prozessführung, weil die Altkunststoffgebände nichtreproduzierbare Stoffgemische darstellen.

Die Kosten für den Erwerb und den Betrieb der Technik sind so hoch [55], so dass sich nur mit überregionalen Großanlagen wirtschaftlich produzieren lässt.

Zur Ausführung dieser Verwertungstechnologien ist eine Energiezufuhr notwendig, die mit einem Teil der gewonnenen Produkte sichergestellt wird. Auch die verbleibenden Produkte werden überwiegend zur Energieerzeugung eingesetzt, da die exakte Steuerung ihrer Zusammensetzung aufgrund des undefinierten Inputmaterials problematisch [76] ist.

Mit Verfahren zur Herstellung von niedermolekularen organischen Stoffen werden aus den Polymeren Monomer- oder monomerähnliche Verbindungen produziert. Diese Verfahren sind aber nur für bestimmte Polymere geeignet, wie die Polyester [77] PA, PC sowie PUR [78]. Ein sortenreines Inputmaterial ist unbedingt erforderlich. Eine Sortierung der Altkunststoffe ist deshalb zwingend notwendig.

Störend wirken die in den Altkunststoffen enthaltenen Additive [79].

Die Prozesse lassen Nebenreaktionen zu [74], so dass nur ein Teil der Monomerbausteine der aufgegebenen Kunststoffsorten gewonnen werden kann.

Aufgrund der wenigen Standorte, an denen die gewonnenen Monomere zur Kunststoffherzeugung benötigt werden, erfordern diese Verwertungsverfahren lange Transportwege.

2.2.3.3 Werkstoffliche Wiederverwertung

Zur werkstofflichen Wiederverwendung sind Verfahren, die einzelne Polymere lösen, und Umschmelztechnologien möglich.

Lösungstechnische Verfahren sind auch zur Aufbereitung von vermischten Kunststoffabfällen geeignet, wenn man selektiv wirkende Technologien anwendet. Man nutzt dabei die unterschiedliche Löslichkeit von Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur aus [80].

Verschmutzungen und Füllstoffe führen nur selten zu Prozessbeeinträchtigungen. Auch die Möglichkeit der Gewinnung von naturfarbenem Recyclat aus eingefärbten Kunststoffen ist in [81] nachgewiesen worden.

Zum Lösungsmittelentzug und -rückgewinnung ist jedoch ein hoher Energieaufwand notwendig.

Diese Verfahren sind insgesamt zu teuer und werden technisch nicht eingesetzt.

Umschmelzverfahren sind lokal anwendbar, sondern so gut wie keine Schadstoffe ab und verbrauchen im Vergleich zu anderen Aufbereitungsverfahren nur sehr wenig Energie.

Sie können zur Herstellung von dickwandigen Produkten aus vermischten Kunststoffabfällen und, wenn sortenreine Recyclate vorliegen, als Neuwareersatz für technisch anspruchsvolle Teile angewendet werden.

Die mit vermischten Altkunststoffen hergestellten dickwandigen Produkte genügen nur geringen Qualitätsanforderungen. Zu ihrer effizienten Verarbeitung sind robuste Sondermaschinen notwendig [82]. Typische Erzeugnisse sind Bohlen, Pflanzkübel und Begrenzungselemente, bei denen die anwendungstechnischen Anforderungen auf einem geringen Niveau angesiedelt sind und durch einen massiven Materialeinsatz erfüllt werden. Der Markt für solche Erzeugnisse ist begrenzt und nahezu gesättigt [64], [77]. Ökologisch unbefriedigend ist die nur sehr eingeschränkte Erfüllung technischer Ansprüche mit einem extrem hohen Materialeinsatz.

Diese Aufbereitungsstrategie hat gegenüber der Deponierung nur geringe Vorteile, wenn die erzeugten Recyclatprodukte nach deren Nutzung nicht in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können und an unbekanntenen Stellen verbleiben, wie es beispielsweise bei Unterwasseranwendungen der Fall ist.

Bei der Anwendung von Umschmelzverfahren zur Wiederverarbeitung sortenreiner Recyclate muss ein höherer Aufwand zur Trennung der Altkunststoffe betrieben werden. Die Sortenreinheit kann mit der energieintensiven Trennung von Schüttgütern erreicht werden oder durch die logistisch aufwendige Sortierung bereits bei der Demontage von Altgeräten.

Aufgrund der Vielzahl von Anwendungen können lokal anfallende Altkunststoffe in den Regionen verwertet und lange Transportwege vermieden werden. Beim Umschmelzen sortenreiner Recyclate ist der Einsatz von gebräuchlichen Maschinen zur Verarbeitung von Neuware möglich. Als Verarbeitungsverfahren kommen grundsätzlich die Verfahren Folienblasen, Extrusion und das Spritzgießen in Frage.

Aufgrund geringer Wandstärken der Produkte ist das Folienblasen empfindlich gegen Verunreinigungen, die bei Postconsumer-Recyclaten vorkommen. Die zulässige Größe von Fremdpartikeln zur Herstellung einer 30µm dicken Folie gibt Jungbauer [72] mit 20 µm an. Anwendungen zum Folienblasen von aufbereiteten PE-Folien sind der Hintergrund für die in [83] angestellten Untersuchungen.

Das Extrusionsverfahren ist weniger empfindlich gegen die in Postconsumer-Recyclaten enthaltenen Fremdpartikel. Schwankungen der Materialeigenschaften führen jedoch zu Dickschwankungen des Extrudats, so dass nur Erzeugnisse mit geringem Qualitätsanspruch aus Altkunststoffen herstellbar sind. Aufgrund der kontinuierlichen Fahrweise verursachen auftretende Produktionsstörungen hohe Kosten.

Beim Spritzgussverfahren sind Produktionsstörungen wegen der diskontinuierlichen Betriebsweise weniger problematisch als beim Extrudieren oder Folienblasen. Wegen der relativ großen Wandstärke der hergestellten Erzeugnisse stören Fremdstoffpartikel den Verfahrensablauf weniger als bei der Folienherstellung. Aufgrund der in **Bild 8** gezeigten Verteilung von festen Einlagerungen können auch bei der Verarbeitung von Recyclaten akzeptable Oberflächen erreicht werden.

Das Spritzgussverfahren ist somit eine geeignete Technologie zur Wiederverarbeitung sortenreiner Recyclate (siehe **Kapitel 1**). Es sind viele Erzeugnisse bekannt, bei denen Einzelteile aus Recyclaten spritzgegossen werden. In vielen Fällen wird sich jedoch auf die Zumischung von etwa 20% Recyclat zur Neuware beschränkt [84].

Wie das folgende Beispiel zeigt, können im Spritzgussverfahren auch hochwertige technische Anwendungen ausschließlich aus Postconsumer-Recyclat hergestellt werden. Es müssen dabei jedoch nicht nur technologische Probleme gelöst werden.

Bei einem in [85] ausgelobten Projekt werden Altkunststoffe aus gebrauchten Fernsehgehäusen wieder zur Herstellung von TV-Geräten eingesetzt. Dabei ist bei bestimmten Polymerklassen (ABS) ein hundertprozentiger Ersatz der Neuware möglich. Aus dem Umweltbericht des betreffenden Herstellers [86] wird deutlich, dass es erst 1996 aufgrund von konstruktiven Veränderungen an den Geräten möglich war, ganz auf Flammschutzmittel bei den zur Gehäuseproduktion eingesetzten Kunststoffe zu verzichten. Auf die von Jungbauer in [72] gestellte Frage, inwiefern flammschutzmittelhaltige Recyclate ökologisch bedenkenlos eingesetzt werden können, wurde in [86] nicht eingegangen. Aus dem graphischen Material zum Neukunststoff- und Recyclatverbrauch der Firma erkennt man jedoch, dass nach einer stetigen Steigerung des Recyclatanteils bis 1997 für das Jahr 1998 erstmals eine Verminderung des Anteils von Altkunststoffen an der im betreffenden Unternehmen verarbeiteten Thermoplastmenge vorkam.

2.2.3.4 Wiederverwendung von Kunststoffteilen

Der Wiedereinsatz von Kunststoffherzeugnissen ist bei kurzlebigen Produkten interessant, die regional und in großer Stückzahl erzeugt werden. Ein Beispiel sind Pfandflaschen, die regionalen Abfüllstationen zur Reinigung und Wiederbefüllung zugeleitet werden.

Produkte, die sich über mehrere Jahre ununterbrochen im Gebrauch befinden, entsprechen nach der Nutzungsphase nur noch in Ausnahmefällen dem Stand der Technik. Die unmittelbare Wiederverwendung solcher Erzeugnisse würde den technischen Fortschritt behindern und ist beispielsweise aufgrund der effizienteren Energieausnutzung moderner Waschgeräte ökologisch nicht sinnvoll [55], [87].

Eine Reparatur von Kunststoffherzeugnissen ist nur in seltenen Ausnahmefällen effektiv. Aufgrund des günstigen Preis-Leistungs-Verhältnisses von Kunststoffbauteilen ist deren Reparaturen gegenüber der Neuanschaffung unverhältnismäßig teuer. Technisch sind Instandsetzungen wegen der für Kunststoffherzeugnisse typischen ausgeprägten Funktionsintegration problematisch.

2.2.4 **Charakterisierung der Kreislaufführung von Kunststoffen**

2.2.4.1 Der Kreislaufanspruch

Der Kreislaufanspruch eines Recyclingprozesses kennzeichnet den Grad der Emissionseinsparung bei Einsatz eines Recyclingprodukts gegenüber dem zu ersetzenden Neuprodukt.

Der Kreislaufanspruch eines Prozesses ist mit Hilfe des in **Bild 14** gezeigten Schemas gut abschätzbar.

Um einen hohen Kreislaufanspruch zu erreichen, sind Kreislaufführungen in einer engen Schleife (**Bild 14**) zu wählen.

Zur Bestimmung des Kreislaufanspruchs von einzelnen Prozessen, die in der gleichen Schleife geführt werden können (**Bild 14**), muss die Wiederholungsmöglichkeit der Kreislaufführung und das Qualitätsniveau des erzeugten Produkts betrachtet werden.

Prozesse, die mehrfach in einer engen Schleife geführt werden können, haben einen höheren Kreislaufanspruch als Verfahren, deren Produkte nach dem einmaligen Durchlaufen einer engen Schleife beim dann folgenden Prozess in einer weiten Schleife aufbereitet werden müssen.

Beim Vergleich des Kreislaufanspruchs von zwei Prozessen, die eine gleich enge Schleife in **Bild 14** durchlaufen, ist der Prozess zur Herstellung qualitativ hochwertiger technischer Produkte, beispielsweise TV-Gerätegehäuse, höher zu bewerten als ein Prozess zur Produktion von Erzeugnissen mit geringen Qualitätsanforderungen, beispielsweise Pflanzkübel.

Die bekannten Instrumente zur Beurteilung der ökologischen Konsequenzen von Recyclingprozessen wie Ökobilanzierung [39], [88], Umweltanalyse [1] und Energiebilanz [89], sind sehr komplex und aufwendig bei der Anwendung. Sie sind deshalb nur für grundsätzliche Vergleiche von alternativen Produktgruppen oder Technologien geeignet [90] und wurden für das Recycling von Kunststoffen bereits ausgeführt [75].

Zu den ökologischen Konsequenzen von Prozessen mit unterschiedlichen Kreislaufansprüchen sei auf die Untersuchungen von Schmidt in [90] verwiesen. Allgemein haben Prozesse mit hohem Kreislaufanspruch einen ökologisch höheren Stellenwert als Prozesse mit geringem Kreislaufanspruch.

Allerdings sind nicht alle Recyclate für einen Prozess mit hohem Kreislaufanspruch geeignet, weil Altkunststoffe je nach ihrer Herkunft unterschiedliche Qualitäten haben. Mit steigender Qualität einer Recyclatcharge lässt sich ein höherer Kreislaufanspruch realisieren.

Altkunststoffe aus Produktionsabfällen, beispielsweise Angüsse von Spritzgussteilen, haben ein deutlich höheres Qualitätsniveau als stark verschmutzte Thermoplastgemische aus Haushaltverpackungen.

Prozesse mit einem hohem Kreislaufanspruch erfordern hohe Aufwendungen bei der Aufbereitung des Recyclats, bringen aber einen höheren Erlös als Prozesse mit einem geringem Kreislaufanspruch. Mit technologischen Mitteln kann die Qualität eines Recyclats beeinflusst werden. Dies ist immer mit Aufwendungen verbunden, die durch höhere Erlöse ausgeglichen werden müssen. Es ist daher notwendig, die Eignung eines bestimmten Recyclats für einen bestimmten Kreislaufanspruch zu erfassen.

2.2.4.2 Die Recyclingwürdigkeit

Die Recyclingwürdigkeit eines Altmaterials ist für einen Prozess mit einem bestimmten Kreislaufanspruch gegeben, wenn mit den daraus hergestellten Produkten Gewinn erwirtschaftet werden kann.

Bei einigen Recyclaten kann mit relativ geringem Aufwand ein hoher Kreislaufanspruch realisiert werden.

Das würde beispielsweise für die aus alten Fernsehgehäusen gewonnenen Postconsumer-Kunststoffe [85] zutreffen. Werden solche Recyclate für Prozesse mit zu geringem Kreislaufanspruch (beispielsweise als Ersatzbrennstoff in der Zementindustrie) verwendet, steht der Aufwand zur Gewinnung der Materialien in keinem Verhältnis zu den möglichen

Erlösen. Dann kommt es zu betriebswirtschaftlichen Verlusten. Die Recyclingwürdigkeit ist so nicht gegeben.

Andere Altmaterialien sind nur für Prozesse mit geringem Kreislaufanspruch geeignet, wie vermischte Altkunststoffe aus Verpackungsmaterialien. Die Aufwendungen für die Gewinnung dieser Altmaterialien (Sammel- und Transportkosten) sind relativ gering. Dafür können aber auch nur schwache Erlöse, beispielsweise aus der Stahlerzeugung, erzielt werden.

Durch besondere Sortierverfahren können aus vermischten Verpackungsabfällen sortenreine Fraktionen gewonnen werden. Mit den aus den einzelnen sortenreinen Fraktionen herstellbaren Produkten könnten höhere Erlöse erzielt werden als bei der Verwertung der Mischfraktion. Allerdings sind derzeit die notwendigen Aufbereitungskosten wesentlich höher als die Erlösaussichten. Außerdem besteht bei der Anwendung der zur Schüttguttrennung favorisierten elektrostatischen Trennverfahren noch erheblicher Forschungsbedarf zum Zeitverhalten von auf Kunststoffpartikel aufgetragenen Ladungen [91], bis eine technische Nutzung sinnvoll ist.

Zur Ermittlung der Recyclingwürdigkeit ist neben der Abschätzung der erzielbaren Erlöse die Kalkulation der durch eine Recyclatverarbeitung entstehenden Produktionskosten notwendig. Die dabei einfließenden technologischen Parameter sind für Recyclate im Vorfeld nur schwer abschätzbar. Das bedeutet ein hohes wirtschaftliches Risiko.

Um die Recyclingwürdigkeit zukünftig besser ermitteln zu können, müssen die notwendigen Produktions- oder Ausstoßzeiten beim Umschmelzen von Recyclaten abschätzbar sein.

2.2.4.3 Politische und ökonomische Einflussnahmen

In Deutschland stieg der Kunststoffverbrauch in den letzten Jahren kontinuierlich an (**Bild 15**).

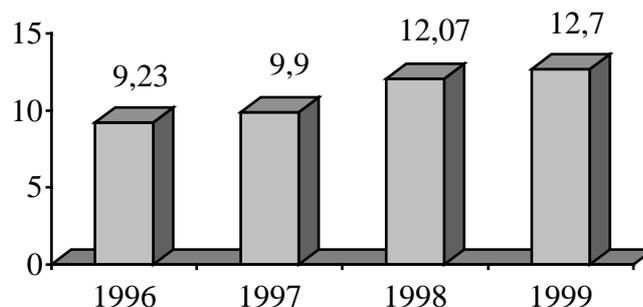


Bild 15 Kunststoffverbrauch in Deutschland in Millionen Tonnen– Werte nach [59]

Bezogen auf die Einwohnerzahl [92] ergibt sich in Deutschland ein Pro-Kopf-Verbrauch an Kunststoffen für 1999 von 155 kg pro Einwohner. Im weltweiten Vergleich [59] nimmt die BRD damit einen Spitzenplatz ein. Nur in Belgien verbraucht der Durchschnittseinwohner mehr Thermoplaste [61].

Weil sich die Einwohnerzahl in den nächsten Jahrzehnten vermindern wird und eine weitere Steigerung des bundesweiten Kunststoffverbrauchs zu erwarten ist, wird der Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoffen in der Zukunft ansteigen.

In Deutschland hat die Politik die Notwendigkeit der Kreislaufführung von Produkten erkannt [2]. Mit dem Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltgerechten Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG) vom 27. September 1994 [93], das am 07. Oktober 1996 in Kraft trat, wurde eine Rechtsnorm geschaffen, welche die Kreislaufführung von Produkten und Stoffen allgemein festschreibt.

Das Gesetz ist für alle ressourcenverbrauchenden Stoffgruppen gültig und deshalb sehr allgemein gehalten.

Die Durchsetzung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft für einzelne Produktgruppen oder Branchen wird durch Verordnungen und andere juristische Bestimmungen geregelt [65], die genau auf die Besonderheiten der jeweiligen Branche oder Produktgruppe zugeschnitten sind. Für einige Bereiche sind die speziellen Verordnungen bereits in Kraft getreten und werden in der Praxis realisiert, auf anderen Gebieten befinden sich die juristischen Instrumente noch in der Vorbereitung.

Aufgrund der vielfältigen Einsatzgebiete von thermoplastischen Polymeren ist keine allgemeingültige juristische Vorschrift geplant, die den Kreislauffluss von Kunststoffen regelt. Deshalb ist eine Aufschlüsselung des Kunststoffverbrauchs nach Branchen sinnvoll (**Bild 16**), damit die von den jeweiligen Verordnungen betroffenen Kunststoffmengen abgeschätzt werden können.

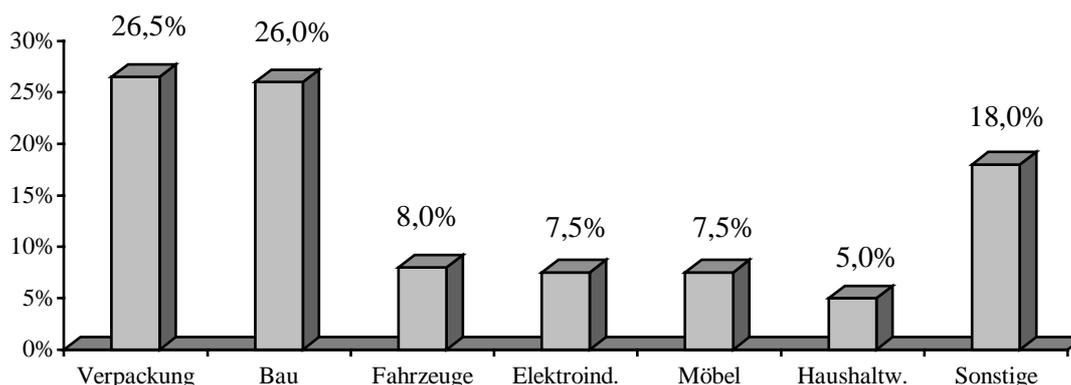


Bild 16 Branchenanteile der in Deutschland verbrauchten Kunststoffe – Werte nach [59]

In den einzelnen Branchen ist die mittlere Einsatzdauer von Produkten unterschiedlich lange [61]:

Bauwesen:	50 Jahre
Möbel, Auto,	10 Jahre
Elektroindustrie und Haushaltswaren	5 Jahre
Landwirtschaft	1-3 Jahre
Verpackungen	<1 Jahr

Ein Anteil von 26,5% der in Deutschland verbrauchten Kunststoffe, die heute zu Verpackungen verarbeitet werden (**Bild 16**), steht binnen kurzer Zeit zur Verwertung an. Obwohl dieser Anteil in den letzten Jahren stetig vermindert wurde [61], wird nach wie vor der mengenmäßig größte Teil der hergestellten Thermoplaste für Verpackungszwecke verwendet.

Die gesetzlichen Durchführungsbestimmungen zur Kreislaufführung von Verpackungsprodukten und -stoffen, so die Verordnung über die Vermeidung und

Verwertung von Verpackungsabfällen [94], wurden bereits Anfang der neunziger Jahre gültig und sind heute voll wirksam.

Aufgrund des lokalen Anfalls und der kurzen Einsatzdauer von vielen Verpackungsmitteln bieten sich in vielen Fällen Mehrwegsysteme an. Sie sind etabliert und werden auch zukünftig durch weitere gesetzliche Maßnahmen verstärkt gefördert [2].

Die Recyclingwürdigkeit von Altmaterial aus Verpackungsrückständen wäre ohne Kostenbeteiligung Dritter nur selten gegeben. So werden die Aufwendungen zur Sicherung einer kreislaufgerechten Aufarbeitung von Verpackungsabfällen aus Privathaushalten in den Neupreis der Waren einkalkuliert und damit vom Verbraucher getragen.

Die Bauwirtschaft nimmt mit 26% (**Bild 16**) einen beträchtlichen Anteil der erzeugten Thermoplaste ab. Der überwiegende Teil der von der Bauindustrie verwendeten Kunststoffe steht in nächster Zeit aufgrund der langen Einsatzzeiten nicht zur Wiederaufbereitung an.

Die Erarbeitung von Durchführungsbestimmungen, die sich auf das Kreislaufwirtschaftsgesetz von Altkunststoffen aus der Bauindustrie beziehen, hat deshalb gegenüber anderen Branchen eine geringere Priorität.

PVC-Fenster und Fußbodenbeläge [1], [95], [96] werden bereits heute wieder werkstofflich aufgearbeitet. Es können zwischen 50 und 60 Gewichtsprozent [72] Postconsumer-Abfälle bei der Herstellung von den gleichwertigen Produkten mit verwendet werden.

Aus insgesamt 28% der verbrauchten Kunststoffe (**Bild 16**) werden heute Erzeugnisse für die Auto- und Elektroindustrie sowie Haushaltwaren und Möbel produziert.

Die in solchen Anwendungen enthaltenen Thermoplaste müssen erst in etwa zehn Jahren entsorgt werden. Um die Menge von Kunststoffen aus den heute zur Entsorgung anstehenden Altfahrzeugen abzuschätzen, muss man von den Verbrauchszahlen und -anteilen von vor zehn Jahren ausgehen.

Zur kreislaufgerechten Entsorgung von Altfahrzeugen und Elektronikschrott sind die gesetzlichen Rahmenbedingungen vorbereitet [2] und teilweise schon in Kraft, werden aber noch kontrovers diskutiert. Genannt sei hier die Verordnung über die Entsorgung von Altautos und die Anpassung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften vom 4. Juli 1997 [97], die sowohl Anhänger [98] als auch Kritiker [99] hat. Umstritten ist hierbei vor allem, ob die notwendigen Zuschüsse zur Aufarbeitung der Altmaterialien sofort beim Neukauf oder erst nach dem Ende der Gebrauchsphase vom Verbraucher zu entrichten sind.

Gegen eine Abgabe beim Neukauf der Ware spricht die lange Lebensdauer der Geräte und die damit begründete Planungsunsicherheit bei der Abschätzung der Verwertungskosten nach der Nutzung.

Die Entrichtung der Entsorgungsabgabe am Ende der Nutzung würde aber den unnötig langen Betrieb von technisch verschlissenen Geräten mit unverhältnismäßig hohen Emissionen bewirken, da der Verbraucher eine Neuanschaffung wegen des negativen Marktwert seines alten Fahrzeuges [100] länger hinauszögern würde. Unter diesem Aspekt betrachtet, würde sich die für den Konsumenten auf den ersten Blick nicht erkennbare Umlage der Aufbereitungskosten auf den Neupreis für die Industrie absatzfördernd auswirken. Außerdem haben dann die Hersteller ein verstärktes Interesse daran, ihre Produkte recyclinggerecht zu gestalten, damit der Produktpreis gering gehalten werden kann.

Umfangreiche Untersuchungen der Automobilindustrie zur recyclinggerechten Produktgestaltung sind in [101] angestellt worden.

Mit den einzelnen Verordnungen, die sich auf das Kreislaufwirtschaftsgesetz beziehen, werden bestimmte Verwertungsquoten festgeschrieben. Die Vorgabe der anzuwendenden Verwertungsart durch den Gesetzgeber ist möglich.

Die derzeit geführte Diskussion über das Recycling von Kunststoffen wird im wesentlichen von zwei Standpunkten aus geführt:

Die eine Meinung setzt auf die werkstoffliche Verwertung eines möglichst hohen Anteils der anfallenden Altkunststoffe und verweist auf die mit hochwertigen Recyclingprodukten zu erzielenden Erlöse.

Der andere Standpunkt scheut die hohen Aufwendungen zur Aufbereitung der Recyclate und favorisiert die energetische Nutzung der im Abfall enthaltenen Kunststoffanteile.

Im Gegensatz zu anderen Staaten wird in Deutschland das werkstoffliche Recycling bei gleicher Eignung gegenüber dem rohstofflichen Aufbereiten bevorzugt [2].

In den nächsten Jahren wird nicht nur wegen der stetig steigenden Verbrauchszahlen von Kunststoffen (**Bild 15**), sondern auch aufgrund von gesetzlichen Vorschriften, die eine Verwertungsquote oder eine Verwertungsart vorgeben, die Menge der aufzubereitenden Postconsumer-Kunststoffe zunehmen.

2.2.5 Einsatz von Kunststoffrecyclaten für technisch anspruchsvolle Produkte

Die Herstellung von technisch hochwertigen Produkten ausschließlich aus Postconsumer-Recyclat, wie die in [86] genannte Herstellung von TV-Gerätegehäusen, stellt heute noch eine Ausnahme dar.

Beim Recyclateinsatz beschränkt man sich derzeit im allgemeinen auf die Zugabe von Recyclaten zur Neuware [29] oder versucht, bei einem laufenden Prozess die teurere Neuware bei eingefahrenen Prozessen durch billige Recyclate, die meist aus Produktionsabfällen gewonnen werden, zu ersetzen [102].

Werkzeuge und Hilfsmittel werden so auf die Verarbeitung von Neuware ausgelegt. Erst nach der Optimierung des Prozesses auf das Neumaterial kann dann eine Untersuchung erfolgen, ob sich der eingefahrene Prozess an die Verarbeitung von Recyclaten anpassen lässt.

Weil nach der Produktion der Nullserien in den meisten Fällen bereits Lieferverpflichtungen bestehen, sind Werkzeuganpassungen zur Optimierung des Prozesses auf die Verarbeitung von Recyclat hin nicht möglich. Die Folge ist, dass bei einem Großteil der Prozesse, die grundsätzlich den Einsatz von Recyclat erlauben würden, nach wie vor Neuware verarbeitet wird oder sich bestenfalls auf einen Anteil von meist hochwertigen Recyclaten aus Produktionsabfällen unter 25% beschränkt wird. Die Beimischung von Postconsumer-Kunststoffen wird derzeit noch sehr vorsichtig angegangen und beschränkt sich auf die Herstellung von wenigen Produkten.

Wenn der mögliche Recyclatanteil bei der Herstellung von technisch hochwertigen Produkten in den nächsten Jahren nicht deutlich erhöht werden kann, wird es zu einem Überangebot von hochwertigen Recyclaten kommen. Der damit verbundene geringe Marktwert der aufbereiteten Materialien erfordert dann hohe Zuschüsse auf lange Zeit.

2.3 Materialeigenschaften eines Recyclattyps

2.3.1 Besonderheiten bei der Ermittlung von Rohstoffeigenschaften für Recyclate

Aufgrund der vielen, unterschiedlichen und teilweise entgegengesetzt wirkenden Mechanismen, mit denen die einzelnen Fremdstoffe – mitunter bereits in geringen und geringsten Konzentrationen - das Materialverhalten eines Recyclats beeinflussen, können ohne experimentelle Untersuchungen keine seriösen Aussagen zu den Werkstoffeigenschaften von Altkunststoffen getroffen werden. Auch wenn die Recyclate aus genau definierten Erzeugnissen gewonnen werden, ist eine Übertragbarkeit der Materialeigenschaften zwischen einzelnen Chargen nicht möglich.

Die Ursache für die meist schlechtere Qualität der Recyclate gegenüber vergleichbaren Neuwaren der gleichen Kunststoffsorte ist, dass die gewonnenen Altkunststoffe bei ihrer Verarbeitung und während des Einsatzes geschädigt wurden, sowie mit Fremdstoffen versetzt sind, die während des Aufbereitungsprozesses nicht abgetrennt werden konnten.

Bereits mit der Herstellung wird bei der Modifizierung der Neuware mit Stabilisatoren die Qualität des Recyclats bestimmt. Zeigt das Stabilisatorsystem eine nicht ausreichende Wirkung, ist die Recyclatqualität aufgrund von bereits vorgekommenen chemischen Veränderungen der Makromoleküle schlecht (**Kapitel 2.1.1**).

Mit der recyclinggerechten Konstruktion des Produkts [37], [72], [87], [96], [100] wird sichergestellt, dass eine kostengünstige Demontage nach dem Ende der Nutzungsphase erfolgen kann. Weiterhin wirkt sich eine ausgefeilte recyclinggerechte Konstruktion nach der Gebrauchsphase auf die Demontageskosten sowie auf die Reinheit und damit die Qualität des entnommenen Recyclats aus. Bestehen die bei der Demontage entnommenen Einheiten aus nur einem Material und wurde mit konstruktiven Maßnahmen die Verschmutzung der Baugruppe gering gehalten, kommen Fremdstoffe nur in geringem Maße zur Wirkung.

Die Abhängigkeit der Recyclatqualität von den technologischen Bedingungen während der Verarbeitung des Kunststoffs ist unumstritten [12], [13], [18]. Werden die in **Kapitel 2.1.1.4** angegebenen Regeln eingehalten, wird die Recyclatqualität aufgrund der Verarbeitung nur in geringem Maße vermindert.

Die Einsatzbedingungen des Produkts während der Nutzungsphase bestimmen die Materialeigenschaften eines Recyclats erheblich [103], [104], [105], [106]. Besonders kritisch sind dabei Anwendungen der Produkte außerhalb des ursprünglichen Einsatzbereiches – beispielsweise die Aufbewahrung von Chemikalien in Getränkeflaschen. Die Qualität des Recyclats wird aufgrund der Wirkung von Verunreinigungen und Verschmutzungen (**Kapitel 2.1.2**), die beim Gebrauch der Produkte vom Kunststoff aufgenommen werden, aber auch durch die langfristige Wirkung von chemischen Prozessen am Polymer (**Kapitel 2.1.1**) vermindert.

Nach dem Gebrauch der Erzeugnisse bis zur Demontage sind die Materialien ebenfalls Umwelteinflüssen ausgesetzt. Eine unsachgemäße Zwischenlagerung kann Materialschädigungen bewirken. Die mangelhafte Durchführung der Demontearbeiten führt zu einem erhöhten Anteil von Fremdmaterialien [37], [107].

Die Interpretation der gemessenen Kennwerte von Prüfkörpern, die aus Recyclat hergestellt wurden, gestaltet sich aufgrund der Vielzahl von Schädigungsmöglichkeiten viel schwieriger als bei der Auswertung von Proben aus Neuware.

Die Rohstoffeigenschaften von Neuwaren des gleichen Kunststofftyps unterscheiden sich kaum. Aufgrund der ausgefeilten Herstellungstechnologien zur Kunststoffproduktion sind Chargenunterschiede bei einem konkretem Materialtyp heute kaum noch durch Abweichungen der Materialeigenschaften nachzuweisen. Bei Neuwaren sind deshalb die ermittelten Kennwerte eines Materialtyps für alle nachfolgend produzierten Chargen gültig.

Die Abgrenzung eines Recyclattyps ist aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren bei der Herstellung, dem Gebrauch und bei der Aufbereitung wesentlich schwieriger als bei Neuwaren.

Bei der Gewinnung von Postconsumer-Materialien stellt bereits die Separation der einzelnen Basispolymere ein Problem dar, das derzeit nicht gelöst werden kann. Eine Unterscheidung nach einzelnen Materialtypen ist bei Altkunststoffen derzeit kaum möglich. Postconsumer-Recyclate stellen deshalb ein Gemisch von unterschiedlichen Kunststofftypen eines Basispolymers dar, deren Molmasse und Molmassenverteilung qualitativ anders ist als bei reinen Neuwaretypen (**Bild 5**). Bereits geringe Anteile von stark hochmolekularen Kunststofftypen verändern die mittlere Molmasse und die Molmassenverteilung des Recyclats deutlich (**Kapitel 2.1.2.1**).

Hinzu kommt der Einfluss von Verschmutzungen und Verunreinigungen im Postconsumer-Material.

Aufgrund der unbekanntem Zusammensetzung der Gebinde aus unterschiedlichen Kunststofftypen und der nicht nachvollziehbaren Einsatzbedingungen ergeben sich für Prüfkörper aus unterschiedlichen Recyclaten des gleichen Basispolymers mitunter erhebliche Abweichungen bei den ermittelten Kennwerten. Die gemessenen Werte sind so nur für die betrachtete Recyclatmenge gültig.

Die für ein bestimmtes Recyclat ermittelten Materialeigenschaften haben so für eine wesentlich geringere Werkstoffmenge einen Aussagewert, als es bei der Untersuchung von Neuware der Fall wäre. Betrachtet man die aufgrund der Messungen entstehenden Kosten pro Mengeneinheit, für welche die Ergebnisse repräsentativ sind, müssen derzeit für die Bestimmung der Materialeigenschaften von Recyclaten wesentlich höhere Aufwendungen erbracht werden, als bei der Untersuchung von Kunststoff-Neuwaren.

Aufgrund dieses Kostenfaktors ist die Bestimmung von Materialeigenschaften zur Qualitätssicherung eines Recyclatgebindes geringer Tonnage uneffektiv und wird kaum angewendet. Die Folge ist, dass Recyclate derzeit nur für Anwendungen mit geringem Anspruch eingesetzt werden.

Um Kunststoffrecyclate für technisch anspruchsvolle Produkte wirtschaftlich sinnvoll einsetzen zu können, muss eine effektivere Methode zur Charakterisierung der Materialeigenschaften entwickelt werden.

2.3.2 Bauteilspezifischer Einsatz von Recyclaten

Der Ausgangspunkt der Erzeugnisentwicklung ist ein beabsichtigtes Produkt.

Der bestehende Maschinenpark der jeweiligen Firma beschränkt jedoch in der Regel die technologischen Möglichkeiten für die Herstellung des gewünschten Produkts. Erforderliche Investitionen würden zu einem nicht gewollten Liquiditätsverlust führen und vermindern darüber hinaus über die planmäßigen Abschreibungen den möglichen Unternehmensgewinn. So wird vornehmlich auf die vorhandenen Technologien zurückgegriffen.

Für die beabsichtigten Produkte und die ausführbaren Technologien müssen geeignete Materialien gefunden werden, mit denen das Lastenheft für die Produkte voll erfüllt wird und eine möglichst effektive Produktion erfolgen kann.

Bei der Verwendung von Neuware wird bereits während der Konstruktion und der Kalkulation auf die vom Hersteller gelieferten Materialdaten zurückgegriffen. In den letzten Jahren wurden dazu umfangreiche Datenbanken erstellt, für die Kunststoffhersteller die Materialeigenschaften ihrer Erzeugnisse zur Verfügung stellen [108]. So ist bereits bei der computergestützten Erzeugnientwicklung ein unmittelbarer Zugriff auf Daten möglich.

Sollen Recyclate verwendet werden, stehen solche Angaben und Möglichkeiten nicht zur Verfügung.

Auch bei der Auslegung von Werkzeugen und Hilfsmitteln müssen materialabhängige Besonderheiten berücksichtigt werden - beispielsweise zur Schwundmaßberechnung beim Spritzgießen von Thermoplasten. Auch hier kann man sich nur bei Neuware auf Datenmaterial und Erfahrungen stützen.

Eine Aussage, ob sich ein Recyclat für den beabsichtigten Prozess grundsätzlich eignet oder nicht, ist erst nach der Bemusterung und der Bauteilprüfung möglich.

Bei Neuware dient diese Phase des Entwicklungsprozesses nur zum Nachweis der Funktionserfüllung des Produkts und der Eignung für den Prozess. Die grundsätzliche Anwendbarkeit des Materialtyps zur Herstellung des Erzeugnisses wurde bereits während der Konstruktionsphase erkannt.

In **Bild 17** sind diese Zusammenhänge in einem Flussdiagramm dargestellt.

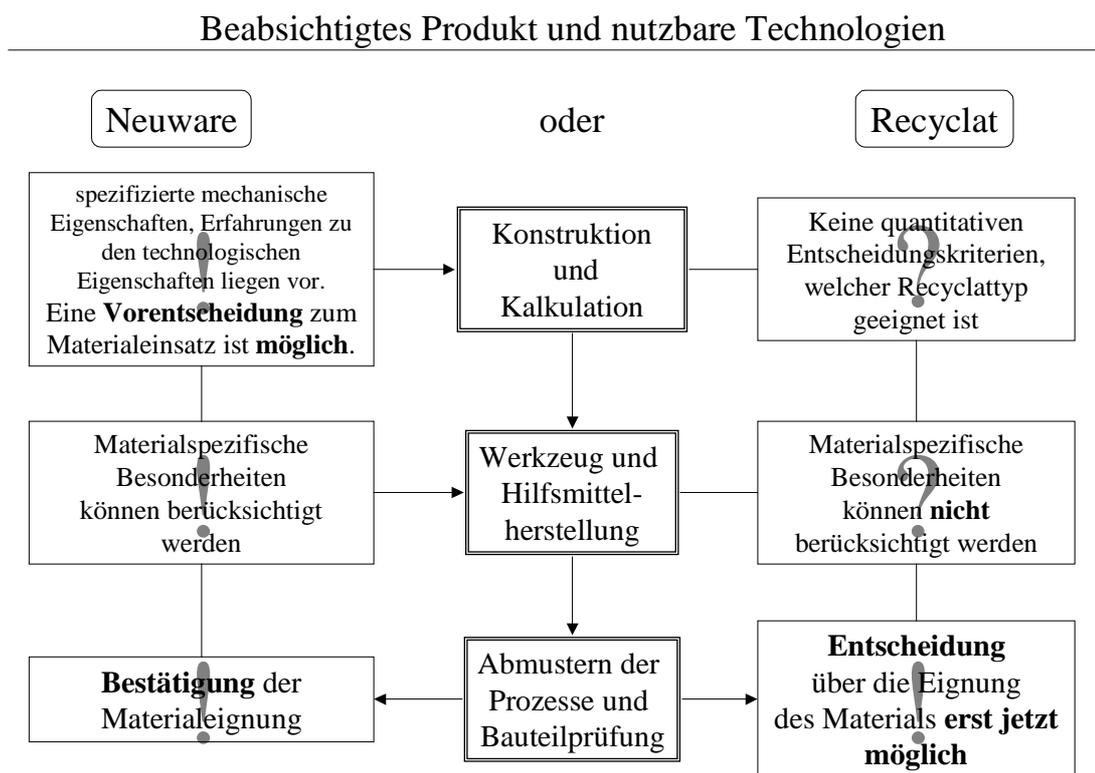


Bild 17 Entwicklungsprozess von Kunststoffprodukten bei der Verwendung von Neuware und beim Einsatz von Recyclaten

Ob der beabsichtigte Prozess mit dem gewählten Recyclat möglich ist, kann man erst feststellen, nachdem oft erhebliche Investitionen zur Werkzeuganfertigung getätigt wurden. Beim Einsatz von Altkunststoffen stellt die mangelnde Kenntnis der Rohstoffeigenschaften

somit ein großes wirtschaftliches Risiko dar, welches in diesem Umfang bei der Verwendung von Neuwaren nicht vorkommt.

Die Kalkulation ist für Erzeugnisse aus Postconsumer-Kunststoffen problematisch, weil man für das angestrebte Erzeugnis in der Regel mehrere Recyclate testen muss, die meist unterschiedliche Preise haben, um ein geeignetes Material zu finden.

Neben dem Materialpreis stellen die technologisch notwendigen Produktionszeiten einen bedeutenden Kostenfaktor dar. Zur Kalkulation werden Erfahrungswerte angesetzt. Das gesammelte Wissen beruht aber auf der Verarbeitung von Neuware. Für Recyclate sind hier kaum Erfahrungen vorhanden.

Die Folge der mangelhaften Kenntnisse über die Eigenschaften von Recyclaten ist, dass man auf den Einsatz von reinen Recyclaten bei neu zu entwickelnden Produkten verzichtet, obwohl ihre Verwendung technisch und ökonomisch vertretbar sein könnte.

Um das geschilderte Problem zu lösen, wird im Folgenden ein Vergleichsverfahren zur Abschätzung der Verarbeitungseigenschaften von Thermoplast-Recyclaten beim Spritzgießen entwickelt. Das Vergleichsverfahren berücksichtigt die Anforderungen eines mittelständischen Betriebes, in dem die Verarbeitung von Postconsumer-Recyclat zu technisch anspruchsvollen Produkten realisiert werden soll.

3 Vergleichsverfahren zur Abschätzung der Verarbeitungseigenschaften von Thermoplast-Recyclaten beim Spritzgießen

3.1 Bekannte Vergleichsverfahren

3.1.1 Technische Anwendungen von Vergleichsverfahren

Die Grundidee eines Vergleichsverfahrens bei technischen Anwendungen ist es, Einzelprozesse mit gleichen Rahmenbedingungen zu einem Vergleichsprozess zusammen zu fassen und so die Gegenüberstellung der Einzelprozesse zu ermöglichen (**Bild 1**). So kann das für einen Einzelprozess vorhandene Prozesswissen auf einen anderen übertragen werden (**Bild 2**).

Vergleichsverfahren werden beispielsweise in der Bauindustrie zur Kalkulation von Grundstückspreisen herangezogen [109]. In den Geowissenschaften werden Vergleichsverfahren zur Identifikation von linearen Geometrieobjekten, die aus unterschiedlichen Datenbeständen stammen, angewendet [110]. Auch bei der Beschreibung von Zusammenhängen in der Bioinformatik wird häufig auf Vergleichsverfahren zurückgegriffen [111].

3.1.2 Vergleichsverfahren zur Modellübertragung für Extrusionsprozesse

Das Ziel der bisher in der Kunststofftechnik angewendeten Vergleichsprozesse ist es, die mit geringem Material-, Zeit- und Energieaufwand ausgeführten Optimierungen an kleinen Extruder-Baugrößen auf Großmaschinen mit Hilfe von Modellgesetzen zu übertragen. So ist man in der Lage, die Baugröße von Schneckenmaschinen mit geringem verfahrenstechnischen Entwicklungsaufwand genau auf die geforderte Leistung hin abzustimmen.

Zur Auslegung von Extrudern wurden von Schenkel [112], [113] und Fischer [114] Modelle mit dimensionslosen Kennzahlen entwickelt. Werden diese konstant gehalten, soll der Betriebspunkt unabhängig von der Baugröße eingehalten werden und die energetische Ähnlichkeit der Baureihe gegeben sein [115].

Bei den Vergleichsprozessen zur Modellübertragung für Extrusionsprozesse wird meist ein und dasselbe Material betrachtet. Die Rohstoffeigenschaften bleiben unverändert. Aus den Verarbeitungseigenschaften des Kunststoffs beim Grundprozess wird auf das technologische Verhalten des Werkstoffs beim Einsatz einer anderen Baugröße der Maschine geschlossen. Das Ziel ist es, weitestgehend gleiche Prozessbedingungen (Durchsatz-Druck-Beziehungen) bei unterschiedlichen Maschinenbaugrößen zu realisieren (**Bild 18**). Die Ableitung der für große Maschinen geltenden Verhältnisse aus den an preiswerten, kleinen Baugrößen experimentell überprüften Beziehungen bedeutet eine erhebliche Reduzierung des Investitionsrisikos.

Vergleichsprozesse zur Maschinenauslegung

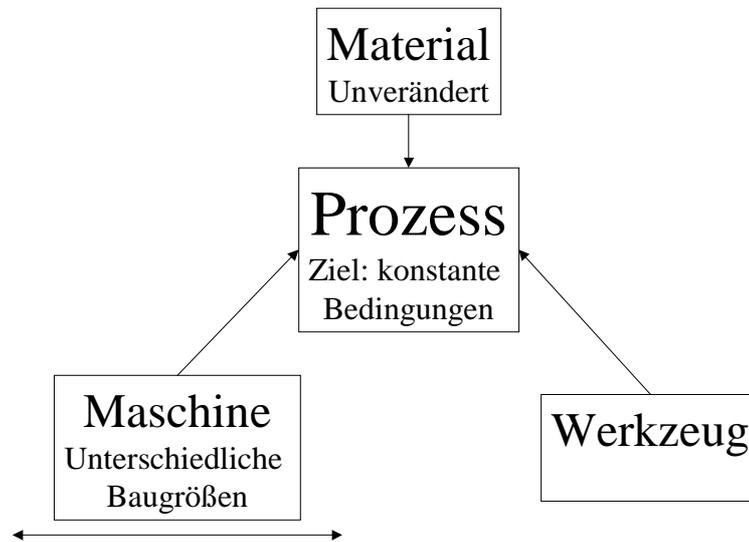


Bild 18 Prozesslage beim bekannten Vergleichsverfahren zur Extruderauslegung

Gleiche dimensionslose Kennzahlen stellen zur Baugrößenübertragung die notwendigen Rahmenbedingungen der Vergleichsprozesse dar. Mit genaueren Rahmenbedingungen [116] wird die Aussagegenauigkeit für diese Vergleichsprozesse verbessert.

3.2 Entwicklung eines Vergleichsverfahrens zur Abschätzung der Verarbeitungseigenschaften von Thermoplast-Recyclaten beim Spritzgießen

3.2.1 Das Wesen des Recyclat-Vergleichsverfahrens

Beim Vergleichsverfahren zur Abschätzung der Verarbeitungseigenschaften von Thermoplast-Recyclaten beim Spritzgießen wird die Baugröße der Maschine nicht betrachtet. Die Ausgangsbasis für den Vergleich soll eine Gruppe von Materialtypen sein, für die Materialdaten sowie verarbeiterspezifische Erfahrungen vorliegen. Bei der anderen Gruppe von Materialtypen sind keine Angaben zugänglich.

Das hier zu entwickelnde Vergleichsverfahren soll eine Einordnung der Materialtypen ermöglichen, für die nur unzureichende Daten vorhanden sind (**Bild 19**). So wird die Übertragung der für die bereits bekannten Materialtypen angesammelten Erfahrungen auf Materialtypen mit mangelhafter Datenbasis ermöglicht.

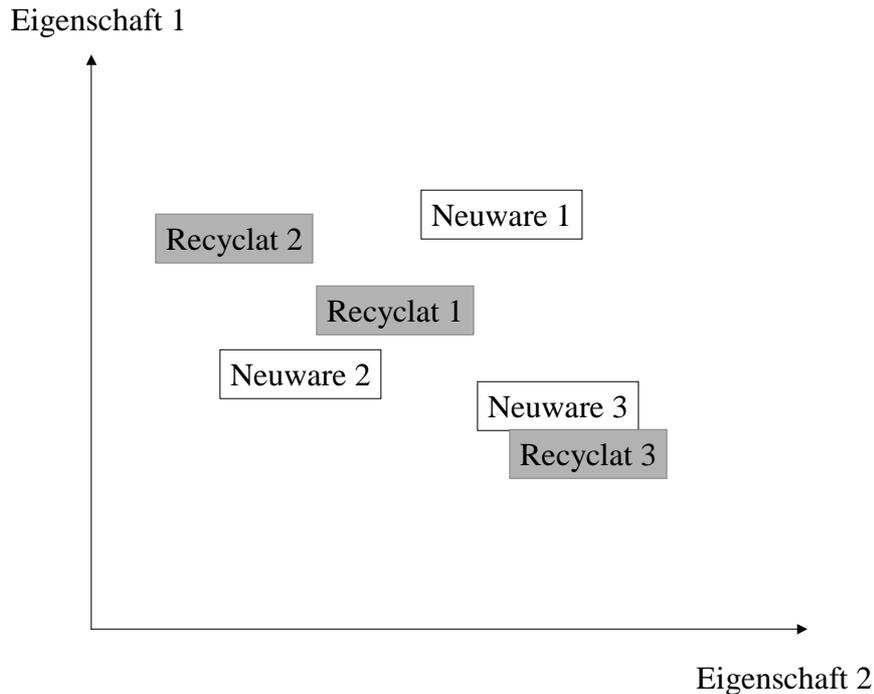


Bild 19 Einordnung der Materialeigenschaften von Neuware und Recyclattypen mit Hilfe des Vergleichsverfahrens

Mit Hilfe des hier zu entwickelnden Verfahrens soll das Verarbeitungsverhalten unterschiedlicher Materialtypen des gleichen Basispolymers - beispielsweise Polypropylen - untereinander verglichen werden, da aus einsatztechnischen Überlegungen für die meisten Anwendungen nur bestimmte Kunststoffsorten verwendbar sind. Aufgrund der Zielstellung dieser Arbeit werden dabei bestimmte Prozesseigenschaften von Neuwaren und Recyclaten des gleichen Basispolymers ermittelt, die noch definiert werden.

Es wird mit ein und derselben Maschine und dem gleichen Werkzeug gefahren und nur der zur Abstimmung auf das untersuchte Material ausgesuchte Prozessparameter verändert (**Bild 20**).

Vergleichsprozesse Neuware/Recyclat

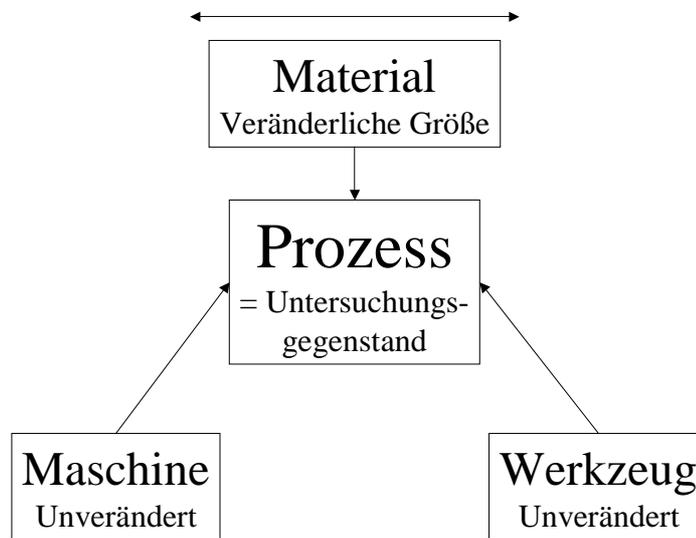


Bild 20 Prozesslage beim hier angewendeten Vergleichsverfahren zur Materialcharakterisierung

Die Grundidee des hier angewendeten Vergleichsprozesses ist, dass Werkstoffe mit ähnlichen Verarbeitungseigenschaften bei gleichen Werten von Stellgrößen eine ähnliche Lage der Zielgrößen bedingen werden.

3.2.2 Eignung der Spritzgusstechnologie für das Vergleichsverfahren

3.2.2.1 Rahmenbedingungen

Der in der Recyclingwirtschaft derzeit vorherrschende Kostendruck ist beachtlich (**Kapitel 2.2.4.3**). Kennzeichnend für Aufbereitungsbetriebe ist deshalb ein oftmals veralteter Maschinenpark und eine mangelhafte labortechnische Ausstattung.

Es besteht ein nachhaltiger Handlungsbedarf, den Recyclatanteil bei der Herstellung von technisch hochwertigen Produkten zu steigern, damit gesetzlich vorgeschriebene Verwertungsquoten erfüllt werden können.

Das hier zu entwickelnde Vergleichsverfahren muss in der Praxis nachvollziehbar sein und in jedem Unternehmen angewendet werden können, das den Einsatz von Kunststoffrecyclat plant. Es ist notwendig, die Methodik so anzulegen, dass mit einfachen - in der Praxis jederzeit zugänglichen - Mitteln ein Höchstmaß an Erkenntnissen gewonnen werden kann. Der in den Unternehmen vorhandene Maschinen- und Werkzeugtechnik zur Herstellung von Spritzlingen muss ohne Modifizierung der Verarbeitungstechnik einsetzbar sein.

Die Charakterisierung der technologischen Eigenschaften soll während der Herstellung von Formteilen mit Hilfe von Prozessparameter erfolgen. Mit den im betreffenden Unternehmen zur Verfügung stehenden Mitteln muss diese Parameterbestimmung genau und reproduzierbar möglich sein. Die Untersuchung soll auf quantitativ bestimmbare Größen ausgerichtet sein.

3.2.2.2 Spritzgießen mit mehreren veränderlichen Eingriffsstellgrößen

In der Literatur sind für das Spritzgießen im wesentlichen zwei Varianten bekannt, mit denen auf sich verändernde Prozesslagen reagiert werden kann [117].

Viele Autoren schlagen vor, die optimale Zielgrößenbeeinflussung mit Hilfe eines Prozessmodells zu erreichen [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127]. Bei der Ermittlung des Prozessmodells werden Eingriffsstellgrößen nach einem vorzugebenden Versuchsplan variiert. An den mit der jeweiligen Maschineneinstellung produzierten Teilen erfolgt die Ermittlung der Zielgrößen. Es wird ein Modell erstellt, das den Zusammenhang zwischen Eingriffsstellgrößen und Zielgrößen widerspiegelt. Zur optimalen Beeinflussung des Prozesses werden Abweichungen des Istwerts der Zielgrößen vom Sollwert durch Veränderungen der Eingriffsstellgrößen entsprechend dem aufgenommenen Prozessmodell ausgeglichen (**Bild 21**).

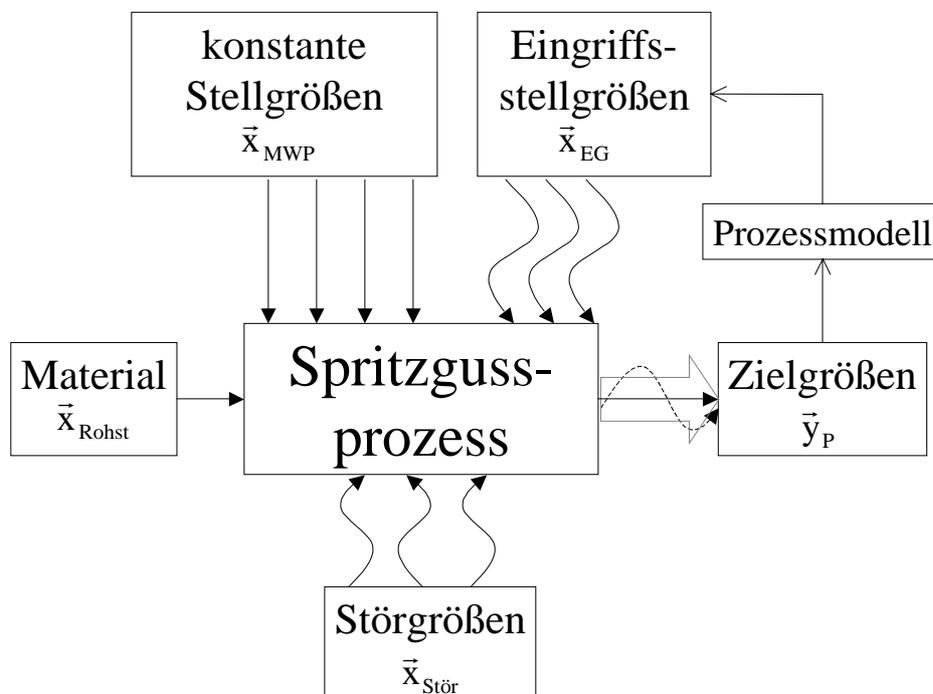


Bild 21 Variante des Spritzgießens mit mehreren veränderlichen Einstellgrößen bei Anwendung eines Prozessmodells

Die Aufnahme eines experimentell determinierten Prozessmodells setzt qualifiziertes Personal voraus. Während der Datenaufnahme müssen ein stabiler Prozess ohne Chargenschwankungen, ein stabiler Maschinenzustand und geringe Störgrößenveränderungen sichergestellt sein [128].

Man wendet mehrere veränderliche Stellgrößen zur Beeinflussung eines Spritzgussprozesses an, wenn starke Abweichungen der Zielgrößen vom Sollwert erwartet werden. Weiterhin greift man auf diese Verfahrensweise zurück, wenn eine prozessbegleitende Qualitätsüberwachung mit Hilfe der Auswertung von Prozessparametern vorgesehen ist, da dann die Aufnahme eines Prozessmodells keinen Mehraufwand darstellt.

In der Praxis werden mehrere veränderliche Eingriffstellgrößen zur Nachführung von Spritzgussprozessen aufgrund der aufwendigen Modellermittlung nur vereinzelt angewendet.

3.2.2.3 Spritzgießen mit einer veränderlichen Eingriffstellgröße

Zum anderen kann man den Prozess aufgrund von Erfahrungswerten einstellen und Schwankungen der Qualitätskennwerte durch die Veränderung einer besonders wirksamen Stellgröße ausgleichen (**Bild 22**).

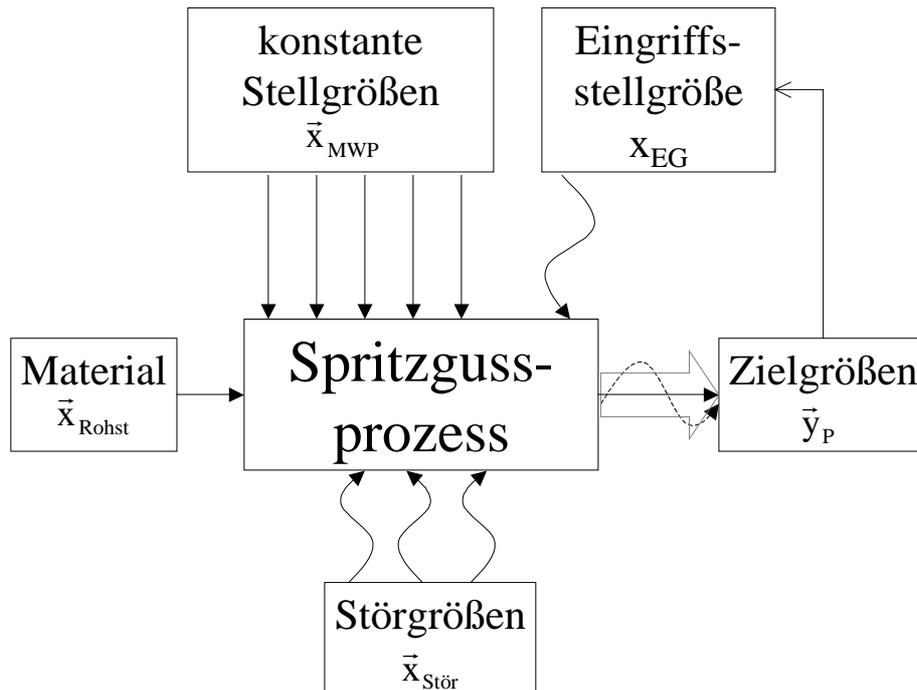


Bild 22 Variante des Spritzgießens mit einer veränderlichen Einstellgröße

Die aufwendige Aufnahme eines statistischen Prozessmodells entfällt hierbei.

Die Prozessbeeinflussung durch mehrere Eingriffstellgrößen, ohne dass ein Prozessmodell vorhanden ist, führt zu unübersichtlichen Ergebnissen, da dann die Wirkung einer Eingriffstellgrößenveränderung nicht nachvollziehbar ist und sich möglicherweise gegenseitig aufhebt.

Die Prozessnachführung mit genau einer Eingriffstellgröße wird in der Praxis sehr häufig angewendet und nutzt den umfangreichen praktischen Erfahrungsschatz der Mitarbeiter eines mittelständischen Spritzgussbetriebes.

Für bestimmte Arten von Qualitätskenngrößen sind besonders wirksame Stellgrößen aus dem Erfahrungsschatz der Verarbeiter bekannt [129].

Zur Beeinflussung der Oberflächenstruktur von Formteilen ist eine Variation der Einspritzgeschwindigkeit effektiv. Um die Formteilmaße zu korrigieren, ist die Veränderung des Nachdruckniveaus am meisten erfolgversprechend [124], [130], [131].

3.2.2.4 Fahrweise für den Vergleichsprozess

Grundsätzlich sind bei Produktionsprozessen zur Recyclatverarbeitung sowohl die Anwendung von Prozessmodellen [132], als auch die Beeinflussung der Zielgrößen mit genau einer Eingriffsstellgröße bekannt.

Für einen Vergleichsprozess zur Abschätzung der Verarbeitungseigenschaften von Kunststoffrecyclaten ist die Fahrweise mit mehreren veränderlichen Eingriffsstellgrößen ungeeignet, weil:

- Ein unmittelbarer Vergleich mehrerer Größen erfordert einen höheren Aufwand als die Betrachtung von genau einer Eingriffsstellgröße pro Materialtyp.
- Eine Modellaufnahme müsste für jeden einzelnen zu untersuchenden Materialtyp erfolgen. – Das bedeutet einen hohen Versuchsaufwand!
- In den Recyclingbetrieben steht in der Regel kein qualifiziertes Personal zur Verfügung, das die Modellerstellung beherrscht.
- Wegen der zu erwartenden Schwankungen der Materialeigenschaften von Recyclaten kann die Gültigkeit von Prozessmodellen so schlecht sein, dass nur ungenügende Genauigkeiten möglich sind.
- Aufgrund des oftmals veralteten Maschinenparks in den Recyclingunternehmen würden Schwankungen der Maschinenparameter zu einer weiteren Ungenauigkeit der Modelle führen.

Diese Nachteile bestehen bei den Spritzgussprozessen nicht, bei denen lediglich eine Eingriffsgröße verändert wird.

Für einen Vergleichsprozess geeignet ist demnach die Fahrweise mit genau einer veränderlichen Eingriffsstellgröße.

3.3 Ableitung des Vergleichsverfahrens aus der Spritzgusstechnologie

3.3.1 Zielgrößen beim Vergleichsverfahren

Vergleichsprozesse unterscheiden sich von Produktionsprozessen durch ihre spezifische Zielstellung.

Bei der Herstellung von Erzeugnissen mit dem Spritzgussverfahren verwendet man nur einen Materialtyp. Mit einem Vergleichsprozess zur Charakterisierung der Materialeigenschaften werden mehrere Materialtypen untersucht. Wie bei Produktionsprozessen wird beim hier betrachteten Vergleichsprozess immer die selbe Maschine und das selbe Werkzeug verwendet.

Bei einem Produktionsprozess gibt es mehrere durch die Einzelteilzeichnung oder die Spezifikation des herzustellenden Teils genau definierte Zielgrößen. Um diese Zielgrößen werden Toleranzbänder definiert, die bei der Herstellung der Teile eingehalten werden müssen. Bei vielen Produktionsprozessen ergibt sich eine kritische Zielgröße, deren Realisierung im Prozess sich als besonders schwierig erweist, während die anderen Anforderungen problemlos eingehalten werden können. In diesen Fällen reduziert man die Betrachtung auf die Erfüllung dieser kritischen Zielgröße mit einem engen Toleranzband (**Bild 23**).

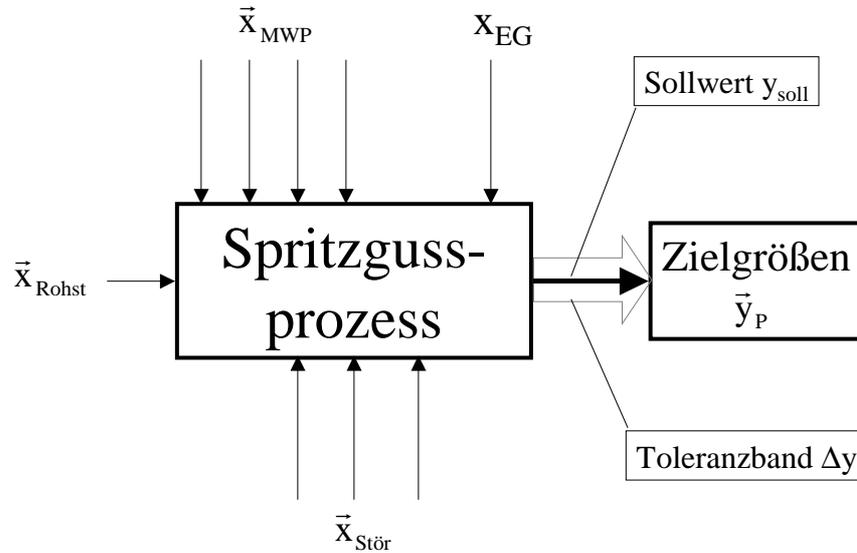


Bild 23 Zielgröße bei Produktionsprozessen

Das Ziel beim Vergleichsverfahren ist nicht die Herstellung eines Produktes, sondern die Beurteilung der Materialeigenschaften mit Hilfe eines Prozesses. Die Zielgrößen bei den hier betrachteten Vergleichsprozessen unterscheiden sich deshalb deutlich von denen der Produktionsprozesse.

Mit einem Vergleichsprozess soll ein funktionsfähiger Spritzling hergestellt werden. Dazu muss die Werkzeugkavität vollständig (untere Beeinflussungsgrenze) und gratfrei (obere Beeinflussungsgrenze) abgeformt werden (**Bild 24**). Die Erfüllung einer Spezifikation ist nicht notwendig.

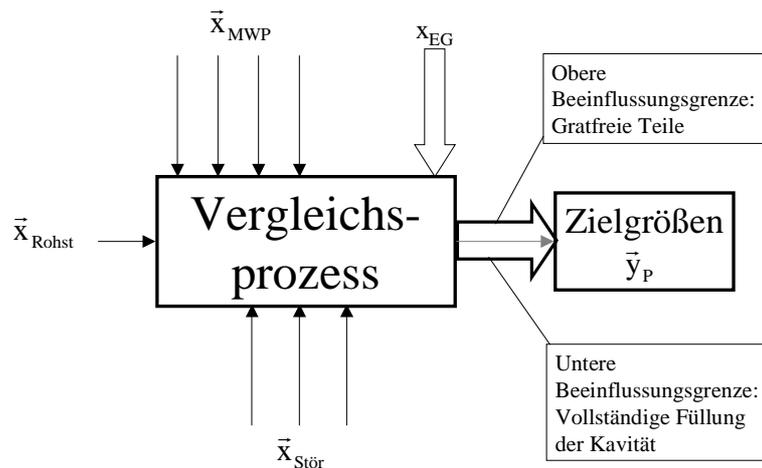


Bild 24 Zielgrößen beim Vergleichsverfahren

3.3.2 Eingriffsstellgrößen beim Vergleichsverfahren

Die Variation der Eingriffsstellgröße erfolgt beim Vergleichsverfahren mit der Zielstellung, die obere beziehungsweise die untere Beeinflussungsgrenze des Prozesses (**Bild 24**) zu ermitteln (**Bild 25**).

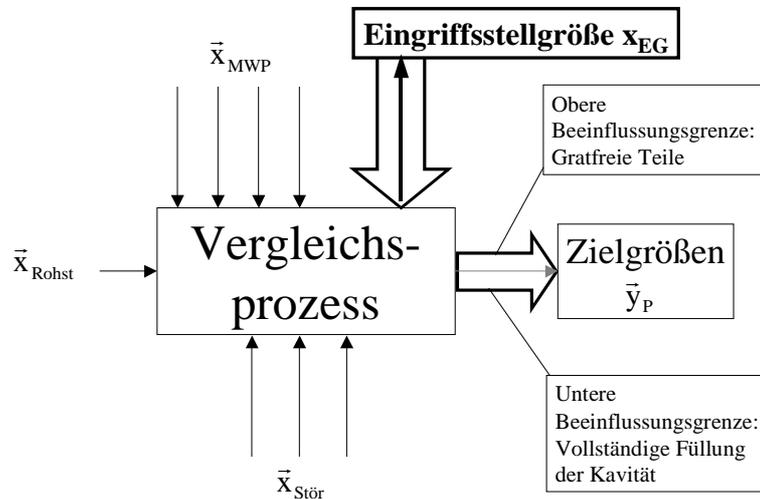


Bild 25 Eingriffsstellgrößen beim Vergleichsverfahren

Im Gegensatz zu Produktionsprozessen, bei denen die Eingriffsstellgröße zur Nachführung der Zielgröße auf den einen Sollwert hin eingesetzt wird, sind beim Vergleichsverfahren für die Eingriffsstellgröße zwei Werte zu untersuchen.

Beim Vergleichsverfahren wird einerseits der Wert der Eingriffsstellgröße betrachtet, mit dem die untere Beeinflussungsgrenze realisiert werden kann. Andererseits ermittelt man den Wert, mit dem die obere Beeinflussungsgrenze erreicht wird. Zur Festlegung der Werte für die Eingriffsstellgrößen muss der jeweilige Prozess stabil gefahren werden können. Wie bei Produktionsprozessen mit genau einer veränderlichen Eingriffsstellgröße bleiben auch beim Vergleichsverfahren die anderen Stellgrößen unverändert.

Aus den beiden ermittelten Werten der Eingriffsstellgröße kann das technologische Fenster des betrachteten Vergleichsprozesses abgeleitet werden.

3.3.3 Fahrweise beim Vergleichsverfahren zur Materialcharakterisierung

Im Gegensatz zu Produktionsprozessen werden mit dem Vergleichsverfahren mehrere Materialtypen in einem Prozess untersucht. Das erfordert eine spezielle Fahrweise des Prozesses bei der Anwendung des Vergleichsverfahrens.

Eine technologische Reaktion auf die Besonderheiten der einzelnen Materialtypen erfolgt bei der Anwendung des Vergleichsverfahrens lediglich durch eine Veränderung der für die Eingriffsstellgrößen gültigen Werte (**Bild 26**).

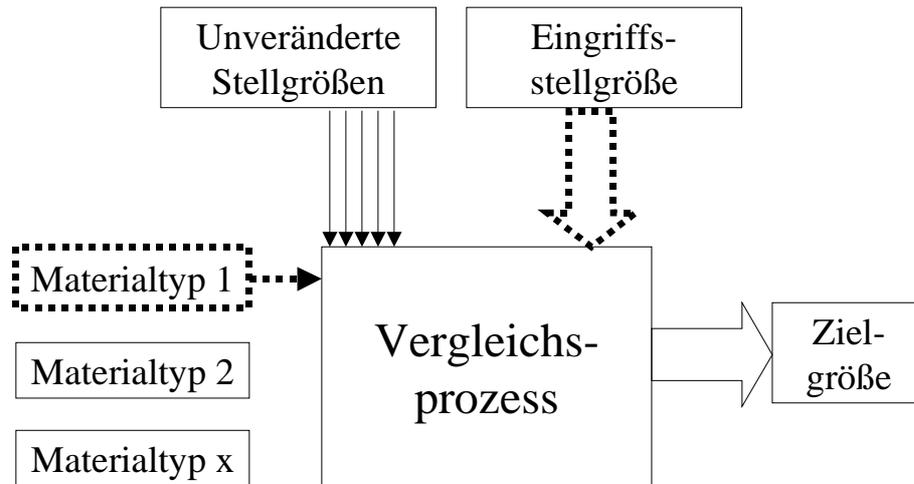


Bild 26 Fahrweise des Prozesses beim Vergleichsverfahren bei der Untersuchung des ersten zu charakterisierenden Materialtyps

Die für die einzelnen Materialtypen gültigen Werte der Eingriffsstellgrößen werden nacheinander bestimmt (**Bild 27**).

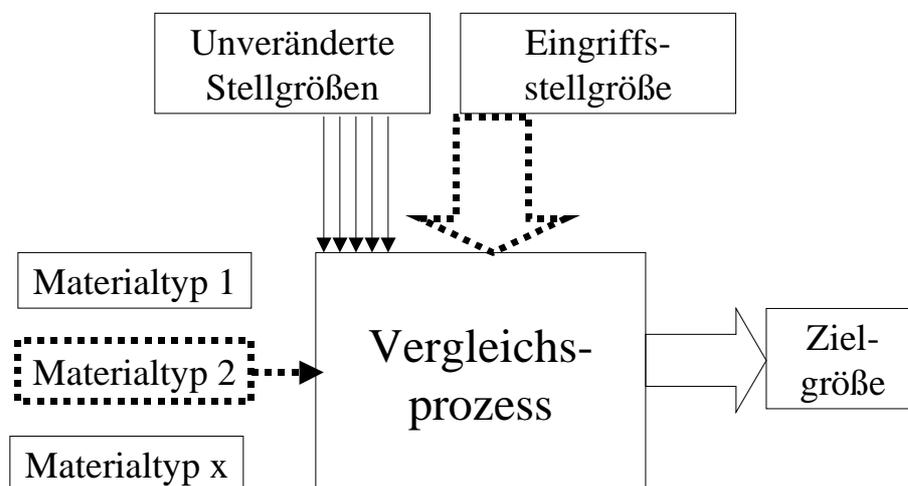


Bild 27 Fahrweise des Prozesses beim Vergleichsverfahren bei der Untersuchung des zweiten zu charakterisierenden Materialtyps

Es empfiehlt sich zunächst die Materialtypen mit bekannten Werkstoffeigenschaften zu untersuchen, um zugängliche Herstellerangaben und die mit Produktionsprozessen gesammelten Erfahrungen bei der Anwendung des Vergleichsverfahrens einfließen zu lassen.

Wesentlich für die einfache Anwendbarkeit des Vergleichsverfahrens ist es, außer der Eingriffsstellgröße alle anderen Stellgrößen unabhängig vom verarbeiteten Materialtyp konstant zu halten.

3.4 Eignung des Vergleichsverfahrens zur Charakterisierung der Materialeigenschaften für unterschiedliche Einsatzzwecke des Werkstoffs

3.4.1 Physikalische und chemische Eigenschaften als Zielgrößen beabsichtigter Produktionsprozesse

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Kunststoffmaterials werden nur in geringem Maße durch die Spritzgussbedingungen beeinflusst.

Die chemischen Eigenschaften sind im wesentlichen durch die chemischen Grundbausteine des Polymers bestimmt. Bei der sachgerechten Verarbeitung von Thermoplasten bleiben diese unverändert. Die bereits in Kapitel 2.1.1 diskutierte Veränderung der Molmasse und der Molmassenverteilung bei der Verarbeitung von Thermoplasten beeinflusst das Fließverhalten der Kunststoffe.

Auch physikalische Eigenschaften, wie die elektrische Leitfähigkeit oder das Dämpfungsverhalten von Thermoplasten, sind durch Spritzgussparameter kaum beeinflussbar.

Altkunststoffe sind für solche Produkte ungeeignet, deren Spezifikation genau definierte chemische und physikalische Eigenschaften verlangt, weil in Postconsumer-Recyclaten unbekannte Fremdstoffe die Eigenschaften stark beeinflussen können.

Die Anwendung des Vergleichsverfahrens zur Charakterisierung der Materialeigenschaften von Recyclaten kommt deshalb für solche beabsichtigte Einsatzfälle nicht in Frage.

3.4.2 Optische Eigenschaften als Zielgrößen beabsichtigter Produktionsprozesse

Aus Recyclaten können aufgrund der in **Kapitel 2.1.2** diskutierten Wirkung von Verunreinigungen keine Produkte hergestellt werden, deren technische Funktion von definiertem Brechungsverhalten abhängt.

Die optischen Eigenschaften sind aber auch bei Erzeugnissen aus Thermoplasten, die vom Konsumenten unmittelbar betrachtet werden können, ein wesentliches Qualitätsmerkmal. Wichtig sind die Farben der einzelnen zu einer Baugruppe zusammengefügt Teile [133] und deren Oberflächeneigenschaften, die durch den Glanz definiert werden [120].

Der Ton einer Einfärbung des Materials wird durch die Massetemperatur des Spritzgussprozesses beeinflusst. Die heute zur Anwendung kommenden Farbmittel sind aber aufgrund einer besseren Stabilisierung weniger empfindlich als die Produkte in der Vergangenheit. Die Intensität einer Einfärbung wird durch die Schneckenengeometrie, den bei der Verarbeitung herrschenden Staudruck und die Dosiergeschwindigkeit beeinflusst.

Beim Einsatz von Recyclaten für Anwendungen mit besonderen Anforderungen an die Farbe kommt es zu Problemen, weil die meisten Altkunststoffe bereits für ihren ursprünglichen Anwendungszweck eingefärbt wurden und die Aufnahme von Farbmittel unterschiedlich intensiv erfolgt. Um eine homogene Farbgebung auch beim Einsatz von Recyclaten zu erreichen, müssen mit nachträglichen Verfahrensschritten die Farbgebungen erfolgen [134], [135].

Der Glanz von Spritzgussteilen wird im wesentlichen durch die Einspritzgeschwindigkeit bestimmt [136]. Verunreinigungen von Recyclaten wirken sich stark auf die Glanzwerte der Spritzlinge aus. Das äußert sich durch an den Formteilen erkennbare Schlieren.

Zur Herstellung von Formteilen mit besonderen Anforderungen an die optischen Eigenschaften werden Regenerate und Recyclate aus den genannten Gründen nur vereinzelt eingesetzt [137].

Die Anwendung des Vergleichsverfahrens zur Charakterisierung der Materialeigenschaften für Recyclate, aus denen Formteile mit besonderen Ansprüchen an ihre optischen Eigenschaften gestellt werden, ist damit nicht praxisrelevant.

3.4.3 Geometrische Eigenschaften als Zielgrößen beabsichtigter Produktionsprozesse

Bei vielen Anwendungen von spritzgegossenen Produkten aus Kunststoff werden für eine einwandfreie Funktionserfüllung hohe Anforderungen an bestimmte Abmaße der Teile gestellt.

Die Maße eines Formteils können durch den Spritz- und Nachdruck während des Prozesses effizient beeinflusst werden.

Um den Messaufwand bei der Beurteilung der Prozesslage gering zu halten, geht man im allgemeinen davon aus, dass Spritzlinge mit gleichen Formteilmassen gleiche Abmaße haben. Qualitativ hochwertige Recyclate sind zur Herstellung von Produkten mit hohen Maßanforderungen potentiell gut geeignet, wenn die Einzelteile für den Betrachter nicht sichtbar in den Baugruppen montiert werden. Altkunststoffe von minderer Qualität sind dagegen zur Herstellung von Präzisionsformteilen ungeeignet, da sich Werte für Schwindung und Verzug nicht reproduzieren lassen.

Bei einem geplanten Einsatz von Recyclaten für Bauteile mit hohen Maßanforderungen müssen deshalb die Eigenschaften von Altkunststoffen abgeschätzt werden können. Weil die Materialeigenschaften von Recyclaten aufgrund der geringen Chargenmengen mit den für Neuwaren bekannten Charakterisierungsmethoden nur mit einem unvertretbaren hohen Aufwand dargestellt werden können (**Kapitel 2.3.1**), ergibt sich hier eine ideale Anwendung für das Vergleichsverfahren.

Die Mengen von zur stofflichen Verwertung anstehenden qualitativ hochwertigen Altkunststoffen werden aufgrund von gesetzlichen Bestimmungen in den nächsten Jahren stark zunehmen. Die Wiederverwendung solcher Recyclate für Präzisionsteile stellt eine Kreislaufführung auf einem hohem Niveau dar. Im Interesse einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft ist diese Art der Wiederverarbeitung der Verwendung solcher Recyclate zur Herstellung von technisch weniger anspruchsvollen Produkten vorzuziehen.

Die weitere Adaptierung des Vergleichsverfahrens zur Charakterisierung der Materialeigenschaften wurde deshalb speziell für den Einsatz von Recyclaten für Präzisionsteile vorgenommen.

3.5 Adaptierung des Vergleichsverfahrens zur Charakterisierung der Materialeigenschaften für die geplante Herstellung von Präzisionsteilen

3.5.1 Zielgrößendefinition beim Vergleichsverfahren für eine geplante Herstellung von Präzisionsteilen

Zur Herstellung von Präzisionsteilen ist es unumgänglich, dass die Kavität beim Spritzgussprozess vollständig mit Kunststoff gefüllt ist. Die vollständige Füllung des Formhohlraums mit Schmelze ist das Kriterium für die untere Beeinflussungsgrenze (**Bild 24**) von Vergleichsprozessen zur Charakterisierung der Materialeigenschaften von Recyclaten, aus denen Präzisionsteile hergestellt werden sollen. Die komplett ausgeformten Teile müssen sich in einem stabilen Prozess herstellen lassen.

Bei der Füllung der Kavität mit Schmelze muss sichergestellt werden, dass keine Freistrahlbildung [138] auftritt, um Teile mit optimalen Festigkeitseigenschaften zu produzieren [139].

Charakteristisch für die Lage der unteren Beeinflussungsgrenze der einzelnen Materialtypen sind hohe Schergeschwindigkeiten beim Füllen der Kavität. Dann ist die augenblickliche Viskosität der bewegten Kunststoffschmelze wesentlich geringer als der Wert der Nullviskosität.

In den Bereichen weit hinter der Fließfront kann die Strömung als Scherströmung betrachtet werden (**Bild 28**). Das meiste Material wird hier im Zentrum des Fließkanals in Richtung Kavität transportiert. Unmittelbar hinter der Fließfront wird Material aus dem Zentrum des Kanals in die Randbereiche der Kavität geleitet. Hier wird eine Füllung des Formhohlraums mit Material durch eine Quellströmung sicher gestellt (**Bild 28**).

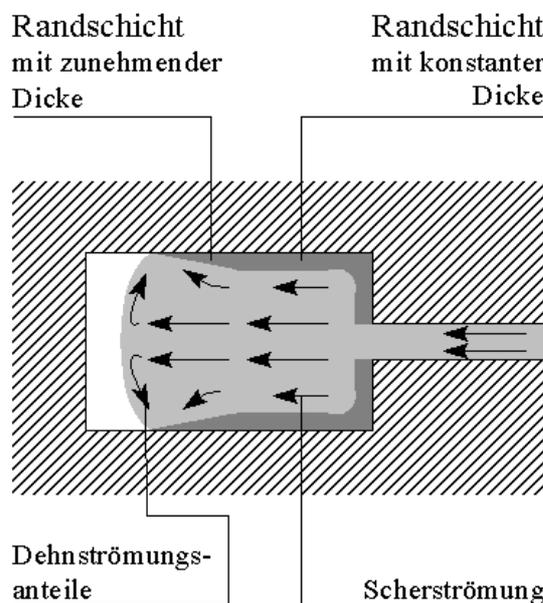


Bild 28 Scher- und Dehnströmungsanteile beim Füllen der Kavität mit Kunststoffschmelze

Die obere Beeinflussungsgrenze wird bestimmt, indem man das Gratbild des hergestellten Erzeugnisses beurteilt. Sie wird durch den Wert für den Einspritz- und Nachdruck definiert,

bei dem das Gratbild des Teils noch nicht ausgebildet ist. Dann kann ein Prozess ohne erhöhten Werkzeugverschleiß gefahren werden [140].

Die Ausbildung von Formteilgrat erfolgt nach dem im **Bild 29** dargestellten Schema.

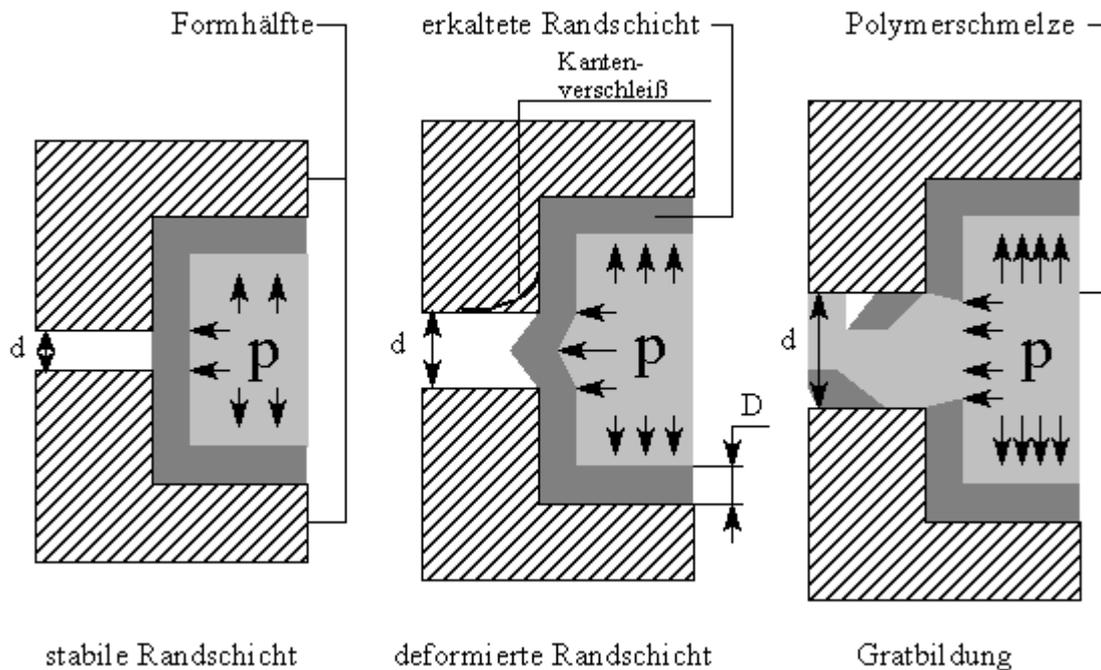


Bild 29 Mechanismus der Gratbildung beim Spritzgussprozess

Ursächlich für die Bildung von Formteilgrat ist, dass sich mit zunehmendem Spritzdruck die Spaltbreite d (**Bild 29**) zwischen beiden Formhälften vergrößert. Deformationen des verwendeten Werkzeugs oder eine nicht ausreichende Schließkraft ermöglichen das Auseinanderdrücken der beiden Formhälften aufgrund der Wirkung des Massedrucks [141]. Ab einem bestimmten Werkzeuginnendruck wird die Randschicht des Spritzlings in Richtung des gebildeten Spalts deformiert (**Bild 29** - mittlere Darstellung). Für die Qualität des produzierten Teils ist das Vorkommen dieser Erscheinung nur selten von Bedeutung. Beschädigungen des Werkzeugs kommen hier noch nicht vor.

Bei noch größerem Druck in der Kavität werden die Formhälften soweit auseinander gepresst, dass die vorher stabile, deformierte Randschicht von der Schmelze durchbrochen wird. Der Spalt zwischen den Formhälften wird dann mit heißem Kunststoff gefüllt (**Bild 29** - linke Darstellung). Nach der Entformung des Spritzlings ist dieses eingedrungene polymere Material als Formteilgrat am Teil sichtbar [141].

Charakteristisch für die Materialströmung beim Ausfüllen des Werkzeugspalts ist eine langsame Bewegung der Schmelze in den Werkzeugspalt hinein. Die Schergeschwindigkeit ist gering und die Viskosität der Masse liegt nahe am Wert der Nullviskosität des Materials.

Produkte mit Formteilgrat entsprechen nicht den notwendigen Qualitätsanforderungen. So können sich bei der Verwendung der Spritzlinge in Baugruppen mit bewegten Teilen Gratstücke ablösen und zu einem Verklemmen des mechanischen Systems führen. Die sichere Funktion der Baugruppe ist dann nicht mehr gegeben.

Werden Teile mit Formteilgrat im Spritzgussprozess hergestellt, kommen im Laufe der Zeit Schädigungen am Werkzeug vor. Die Kanten an der Trennung der Kavität werden beim Ausdrücken der Kunststoffmasse besonders belastet und nutzen sich mit der Zeit ab. In der Trennebene der Form kommt es zu Kantenverrundungen (**Bild 29** - mittlere Darstellung), die

dann am hergestellten Formteil abgeformt werden. Die Gratbildung beim Spritzgießen von Thermoplasten muss also in jedem Falle vermieden werden.

3.5.2 Definition der Eingriffsstellgröße beim Vergleichsverfahren für eine geplante Herstellung von Präzisionsteilen

Für die Korrektur von abweichenden Formteilabmaßen gilt das Druckniveau beim Einspritzen und beim Nachdrücken als effektive Korrekturgröße [124], [130], [131].

Beim Spritzgießen stellen Einspritzdruck und Nachdruck jeweils voneinander unabhängige Stellgrößen dar. Zur Erfüllung der Forderung nach genau einer Eingriffsstellgröße (**Bild 22**, **Bild 25**) ist es notwendig, bei Vergleichsprozessen zur Charakterisierung von Materialtypen, aus denen Präzisionsteile hergestellt werden sollen, eine Veränderung des Einspritz- und Nachdrucks voneinander abhängig zu gestalten.

Das Problem wird hier gelöst, indem der Nachdruck immer in einem bestimmten Verhältnis zum Spritzdruck gewählt wird.

Beim Spritzgießen zur Herstellung von Kunststoffzeugnissen wird zunächst mit einem starken Volumenstrom Kunststoffschmelze in den Formhohlraum gepresst. Die besten Ergebnisse bei der Befüllung der Kavität erreicht man nach [142] mit einer Regelung der Schneckenvorlaufgeschwindigkeit. Der Spritzdruck ist in diesem Fall nur eine Überwachungsgröße, deren Überschreitung durch die Maschinensteuerung verhindert wird. Wenn der Formhohlraum volumetrisch gefüllt ist, muss während der Nachdruckphase zum Schwindungsausgleich weitere Masse allmählich in die Kavität gepresst werden.

Maschinentechnisch müssen für das Spritzgießen zwei Betriebsweisen realisiert werden: Einerseits das Einspritzen der Schmelze, andererseits die Kompression der Masse. Der Wechsel zwischen den beiden Betriebsweisen wird als Umschaltpunkt bezeichnet und durch ein vorgegebenes Signal von der Maschine erkannt.

Wenn an die Maßhaltigkeit der Teile besonders hohe Anforderungen gestellt werden, ist der Umschaltpunkt zwischen Spritz- und Nachdruckregime eine Stellgröße, die wesentlichen Einfluss auf die Qualität der hergestellten Produkte hat. Ihr optimaler Wert ist bei einigen Umschaltverfahren abhängig vom erreichten Einspritzdruck. Die Forderung, abweichende Qualitätsmerkmale mit nur einer Stellgröße zu korrigieren, kann dann nur erfüllt werden, wenn ein Umschaltverfahren gewählt wird, bei dem eine lineare Abhängigkeit zwischen Spritzdruck und Umschaltpunkt gegeben ist. Deshalb muss der Eignung von möglichen Umschaltverfahren für das Vergleichsverfahren besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Je nach dem zur Umschaltung zwischen Spritz- und Nachdruck herangezogenen Signal unterscheidet man die werkzeuginnendruckabhängige, die wegabhängige, die hydraulikdruckabhängige oder die zeitabhängige Umschaltart [143]. Weiterhin kann ein externes Signal für die Realisierung des Umschaltvorganges angewendet werden. So ist zur Bestimmung der Formfüllung mit Hilfe einer Lichtschranke in der Kavität die Verwendung eines optischen Signals aus [144] bekannt.

Das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren ist prozesstechnisch am genauesten [145]. Die Umschaltung erfolgt dann, wenn ein bestimmtes Niveau des Werkzeuginnendrucks erreicht ist. Voraussetzung sind teure Werkzeuginnendrucksensoren in der Kavität. Wird die Anwendung der werkzeuginnendruckabhängigen Umschaltung geplant, müssen in der für den Vergleichsprozess vorgesehenen Spritzgussform die entsprechenden Sensoren vorhanden und voll funktionsfähig sein. Problematisch bei Werkzeuginnendrucksensoren ist die Gefahr der

Beschädigung während der Demontage der Form. Das Zerlegen des Werkzeugs ist aber bei Neubemusterungen und bei der Verwendung von Recyclaten oft notwendig, um die Belagbildung oder Kunststoffreste aus der Form zu entfernen.

Die wegabhängige Umschaltart wird in der Praxis am meisten angewendet. Der Vorteil ist, dass aufgrund des immer gleich ausgeregelten Schneckenweges eine volumengenaue Dosierung der Schmelze in die Kavität erfolgt.

Für die Verarbeitung von Postconsumer-Recyclaten ist diese Umschaltart aber weniger geeignet. Bei Altkunststoffen sind, wie in **Kapitel 2.1.2.4** beschrieben, in der Schmelze teilweise Gase gelöst. Deren Wirkung auf das Dosierverhalten ist von Schuss zu Schuss unterschiedlich stark, je nach Gasphasenanteil in der Schmelze. Beim Einsatz der wegabhängigen Umschaltart geht diese Unregelmäßigkeit verstärkt in den Prozessablauf ein.

Bei der Anwendung eines Vergleichsprozesses zur Charakterisierung der technologischen Eigenschaften unterschiedlicher Materialtypen wird die Vergleichbarkeit der einzelnen Materialproben bei der Anwendung der wegabhängigen Umschaltart erschwert. Dann müsste für jeden Einzelprozess mit einer anderen Charge der Umschaltpunkt neu ermittelt werden. Unsicher ist, wie genau für die einzelnen Materialtypen auch wirklich der optimale Umschaltpunkt getroffen wurde. Aufgrund der zu erwartenden starken Chargenschwankungen bei der Verarbeitung von Recyclaten wird dazu keine genaue Aussage möglich sein.

Bei der hydraulikdruckabhängigen Umschaltung zwischen Spritz- und Nachdruckregime muss der Umschaltpunkt nicht manuell bestimmt werden. Hier ist die Vorgabe in Abhängigkeit von der Höhe des gewählten Nachdrucks problemlos möglich. Materialspezifische Einflüsse auf die Nachdruckführung sind aufgrund der geringen Anzahl von wirkenden Stellgrößen minimal. Der Prozess läuft auch bei unterschiedlichem Dosierverhalten des Mahlguts relativ problemlos und reproduzierbar ab. Die vorliegenden eigenen Erfahrungen beim Spritzgießen von Recyclaten bestätigen, dass die hydraulikdruckabhängige Umschaltart zwischen Einspritz- und Nachdruckregime besonders stabil ist.

Die hydraulikdruckabhängige Umschaltart ist auch für die Einzelprozesse anzuwenden, die zu Vergleichszwecken Neuwere untersuchen.

Die zeitabhängige Umschaltung zwischen Spritzdruck- und Nachdruckregime stammt noch aus den Anfängen der Spritzgusstechnologie. Sie kann mit einfacher Technik realisiert werden. Trotz der Regelung der Schneckenvorlaufgeschwindigkeit in den heute eingesetzten Automaten gehen materialspezifische Einflüsse ein. Die angestrebte Schneckenvorlaufgeschwindigkeit ist mit leicht fließenden Formmassen eher erreicht als bei hochviskosen Schmelzen. Diese Anfahrscheinungen kann keine marktgängige Regelung ausgleichen. Ein Abgleich müsste von Hand durch die Nachführung der ersten Stufe der Einspritzgeschwindigkeit erfolgen. Dieser zusätzliche Stelleingriff würde aber die Vergleichbarkeit der technologischen Parameter erschweren.

In der Software einiger moderner Spritzgussmaschinen ist die zeitabhängige Umschaltart nicht vorgesehen. Eine generelle Anwendung dieser Umschaltart ist so nicht möglich.

Für einen Vergleichsprozess sind grundsätzlich die werkzeuginnendruckabhängige und die hydraulikdruckabhängige Umschaltart geeignet, weil bei diesen beiden Varianten eine lineare Abhängigkeit zwischen Umschaltdruck und Formmassedruck besteht. So muss aufgrund der Umschaltung kein zusätzlicher Parameter betrachtet werden.

Der Vorteil des Umschaltens in Abhängigkeit vom Werkzeuginnendruck ist die genauere Prozessführung. Allerdings sind hierzu zusätzliche Sensortechnik notwendig, die teuer und anfällig gegenüber Störungen ist.

Welche der beiden Umschaltarten für den Vergleichsprozess gewählt wird, ist von den Rahmenbedingungen abhängig, die für die beabsichtigten Vergleichsprozesse gelten. Das gewählte Umschaltverfahren ist bei der Untersuchung aller Materialtypen anzuwenden. Der Einsatz einer anderen Umschaltart während der Versuche ist nicht möglich. Die einzelnen Prozesse mit unterschiedlichen Materialtypen wären dann nicht mehr miteinander vergleichbar.

Die Eingriffsstellgröße Druckniveau ist zur Charakterisierung der Materialeigenschaften mit Hilfe des Vergleichsverfahrens geeignet, weil aufgrund der vorausgesetzten Abhängigkeit zwischen Spritz- und Nachdruck und der Anwendung eines geeigneten Umschaltverfahrens nur eine veränderliche Größe zur Charakterisierung eines Materialtyps betrachtet wird.

Jeder untersuchte Materialtyp wird durch zwei Werte des Druckniveaus beim Vergleichsprozess charakterisiert.

Der für die vollständige Füllung der Kavität notwendige Einstellwert des Druckniveaus kennzeichnet die untere Beeinflussungsgrenze (**Bild 25**) und wird als „minimales Druckniveau“ bezeichnet. Er charakterisiert die beim Füllen der Kavität vorherrschenden Strömungszustände des untersuchten Materialtyps bei großen Schergeschwindigkeiten. Beispielsweise wurde für den Materialtyp Novolen 1102 H ein hydraulischer Umschaltdruck von 25 bar als Eingriffsstellwert ermittelt, der mit der späteren Auswertung in die SI-Einheit überführt und auf den auf die Schmelze wirkenden spezifischen Druck umgerechnet wird.

Der Einstellwert für das Druckniveau, bei dem gerade noch kein Formteilgrat auftritt, kennzeichnet die obere Beeinflussungsgrenze des im jeweiligen Vergleichsprozess betrachteten Materialtyps (**Bild 25**) und wird als „maximales Druckniveau“ definiert. Dieser Wert charakterisiert Strömungszustände des Materials, wie sie beim allmählichen Einbringen von Schmelze zum Schwindungsausgleich mit geringen bis mittleren Schergeschwindigkeiten vorkommen. Beim Material Novolen 1102 H wurde beispielsweise die obere Grenze des Eingriffsstellwerts mit 40 bar ermittelt.

3.5.3 Aussagen zur Produktionseffektivität mit Hilfe des Vergleichsverfahrens für eine geplante Herstellung von Präzisionsteilen

Neben den technischen Qualitätsmerkmalen bestimmen die Materialeigenschaften eines Kunststofftyps auch die ökonomische Effektivität eines Verarbeitungsprozesses, weil die notwendige Zykluszeit zur Herstellung eines einwandfreien Formteils vom verwendeten Materialtyp abhängt.

Die Berechnung der Abkühl- und Zykluszeit mit Simulationsprogrammen ist bei der Verwendung von Neuwaren mit den gängigen Programmpaketen möglich [146]. Nach einer in [147] durchgeführten praktischen Überprüfung berechneter Werte konnte die errechnete Abkühlzeit um fast 50% reduziert werden. Damit ist das Risiko von Fehlkalkulationen der Zykluszeit im Entwicklungsprozess bei der ausschließlichen Verwendung von Rechenmodellen unbefriedigend groß. Die bekannten Simulationsrechnungen bedürfen also für den praktischen Einsatz einer experimentellen Überprüfung.

Für Recyclate liegen bisher keine Stoffdaten für eine Abkühlungssimulation vor.

Mit einfachen experimentellen Methoden kann das Abkühlverhalten einer Formmasse durch die Bestimmung des Siegelpunktes überprüft werden. Formmassen, die erst sehr spät absiegeln, müssen länger in der Form verbleiben als Massen, bei denen die Versiegelung der Kavität frühzeitig eintritt.

Bei der Anwendung des Vergleichsverfahrens zur Charakterisierung der Materialeigenschaften von Recyclaten wird die Bestimmung des Siegelpunktes in die Untersuchung eingeschlossen. Damit erhält man eine Aussage über die von der Zykluszeit des Prozesses abhängige ökonomische Effektivität beim Spritzgießen der einzelnen Materialtypen. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass der Nachdruck lange genug wirksam ist, um ein unerwünschtes Austreten der Formmasse aus der Kavität zu vermeiden. Die Untersuchungen sind für die jeweiligen Druckniveaus einzeln auszuführen.

Zur Bestimmung des Siegelpunktes sind aus der Literatur die Gewichtsmethode und die Ermittlung des Siegelindexes bekannt.

Bei der Bestimmung des Siegelpunktes mit der Gewichtsmethode [148] werden Nachdruckzeit und Abkühlzeit bei konstanter Gesamtzykluszeit variiert. Als Siegelpunkt wird der Nachdruckzeitpunkt festgelegt, ab dem das Teilgewicht nicht mehr ansteigt (**Bild 30**).

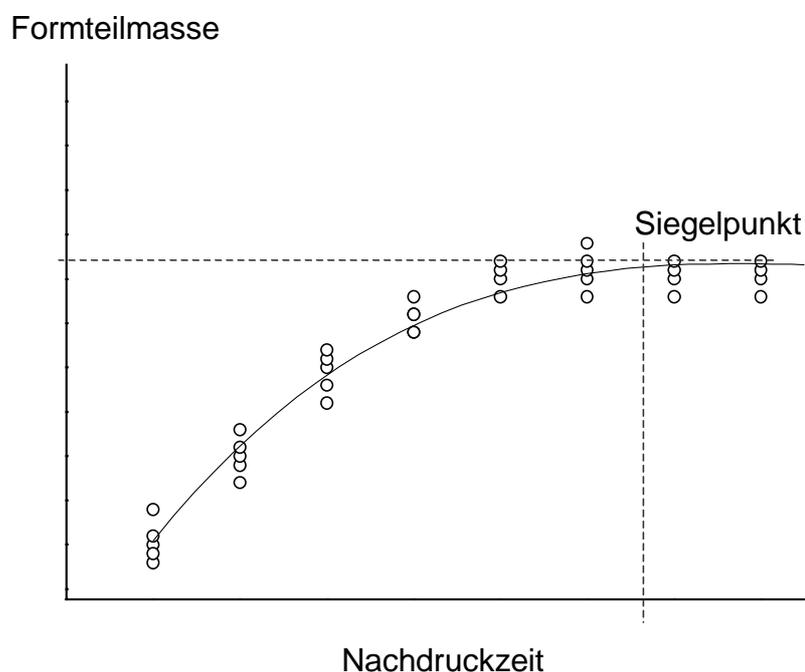


Bild 30 Ermittlung des Siegelpunktes mit der Gewichtsmethode

Bei dieser Methode kommen relativ große Fehlerintervalle vor, besonders wenn die Teilgewichte prozessbedingt stark schwanken. Es hat sich als günstig erwiesen, für eine Messung jeweils einen Stichprobenumfang von 5 Teilen zu untersuchen.

Die Methode zur Ermittlung der Siegelzeit mit Hilfe des Siegelindexes [140] erfordert eine Werkzeuginnendruckmessung. Betrachtet wird hier der Verlauf der Werkzeuginnendruckkurve im Zeitbereich der Rücknahme des Nachdrucks. Ein Sprung im Kurvenverlauf wird als Materialentlastung über die Anbindung gedeutet. Wenn kein Sprung erkennbar ist, gilt die Kavität als versiegelt. Voraussetzung für die Anwendung dieser Methode ist, dass sich der Druckaufnehmer unter der plastischen Seele der Formmasse befindet.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Untersuchung mit Hilfe von Prozesskurven erfolgt und die hergestellten Teile nicht betrachtet werden müssen. Problematisch ist, dass die Lage der plastischen Seele schwer überprüfbar ist und die Beurteilung der Werkzeuginnendruckkurven subjektiv erfolgt.

Grundsätzlich können beide hier dargestellten Methoden zur Bestimmung des Siegelpunktes angewendet werden. Die Betrachtung des Siegelindex setzt jedoch eine Werkzeuginnen-druckmessung voraus, so dass diese Methode auf Vergleichsprozesse beschränkt bleiben wird, die das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren anwenden.

Bei der Anwendung von Vergleichsprozessen zur Charakterisierung von Materialeigenschaften von Kunststoffrecyclaten unterbleibt eine allmähliche Verminderung der Kühlzeit, bis Entformungsprobleme auftreten. Diese bei Produktionsprozessen übliche Vorgehensweise ist für Vergleichsprozesse ungeeignet, weil erst nach vielen produzierten Teilen eine Aussage über die Prozesssicherheit getroffen werden kann. Eine Feinabstimmung des Werkzeugs durch Verbesserungen am Auswerfersystem der Form, ein Polieren der Werkzeugoberfläche oder eine Verlegung der Temperierkanäle [149], [150] kann nur für einen definierten Materialtyp vorgenommen werden. Zur Verbesserung des Entformungsverhaltens ist auch eine gezielte Beschichtung der Kavität [151], [152] bekannt. Bei Vergleichsprozessen unterbleiben die Anstrengungen, die Zykluszeit zu vermindern, da die verwendete Form für eine Vielzahl von Materialien und Materialtypen verwendet werden muss.

3.5.4 Aussagen zur Reproduzierbarkeit mit Hilfe des Vergleichsverfahrens für eine geplante Herstellung von Präzisionsteilen

Die Herstellung von Formteilen sollte nicht an einer Grenze des technologischen Fensters erfolgen, um auf abweichende Qualitätsmerkmale reagieren zu können.

Zur Beschreibung des Verhaltens einzelner Materialtypen unter produktionsnahen Bedingungen mit Hilfe des Vergleichsprozesses ist die Herstellung von Formteilen mit einem Druckniveau notwendig, das dem Arbeitspunkt eines Produktionsprozesses vergleichbar ist. Es wird vom Einrichter festgelegt und als das favorisierte Druckniveau bezeichnet.

Bei Materialtypen, die zu Brandstellen neigen, geht man näher an das minimale Druckniveau heran. Spielen Verbrennungen am Teil beim betrachteten Prozess keine Rolle, legt man zur Minimierung der Eigenspannungen im Teil, das optimale Druckniveau auf einen Wert geringfügig unterhalb des Druckmaximums fest.

Der Nachdruck wird über die gesamte Nachdruckzeit konstant gewählt und in Abhängigkeit vom hydraulischen Umschaltdruck nachgeführt.

Mit dem favorisierten Druckniveau werden 30 Teile nacheinander folgend hergestellt und deren Gewicht bestimmt. Diese Stichprobe wird statistisch ausgewertet und als Maschinenfähigkeitsuntersuchung bewertet.

Verglichen werden die Standardabweichungen der Massen von aus einem Materialtyp hergestellten Teilen. Eine geringe Standardabweichung bedeutet eine gute Reproduzierbarkeit der Qualitätsmerkmale.

Bei der Betrachtung von Postconsumer-Materialien muss jedoch berücksichtigt werden, dass neben prozessbedingten Gewichtsunterschieden der Formteilmassengewichte auch Schwankungen aufgrund unterschiedlicher Konzentration und unterschiedlicher Dichten von Verunreinigungen und Verschmutzungen des Materials zu erwarten sind.

Erfolgt die Gewichtsbestimmung nicht an wahllos entnommenen Spritzlingen, sondern an 30 nacheinander gefertigten Teilen, kann die graphische Darstellung der Teilmassen auf das Vorliegen eines Trends hin untersucht werden. So kann eine allmähliche Zu- oder Abnahme der Teilmassen von nacheinander hergestellten Proben - beispielsweise durch ein

unzureichend temperiertes Werkzeug - erklärt werden. Unterliegen die ermittelten Teilgewichte einem Trend, muss man von sich allmählich verändernden Qualitätsmerkmalen ausgehen, die allein durch die Untersuchung einer Stichprobe von 30 Teilen nicht erkannt werden.

Liegen keine Trends vor, kann aus den ermittelten Standardabweichungen auf die zu erwartenden Maßschwankungen geschlossen werden. Wird für einen Materialtyp ein kleiner Wert für die Standardabweichung ermittelt, so werden auch die bei stabilem Prozess auftretenden Maßschwankungen gering sein.

3.6 Mathematische Beschreibung des Vergleichsverfahrens

Charakteristisch für die Rohstoffeigenschaften eines polymeren Materials ist dessen innere chemische und physikalische Struktur und die Wechselwirkungen des Materials mit der Umgebung. Sie sind objektiv wirksam und unabhängig von der Prozesslage - wie beispielsweise der herrschenden Temperatur. So beeinflussen chemischer Grundaufbau, Molmasse und Molmassenverteilung sowie die thermischen Eigenschaften eines Polymers dessen Fließverhalten.

Zur mathematischen Darstellung der Rohstoffeigenschaften wird die Vektorschreibweise verwendet. Der Vektor „Rohstoffeigenschaften“ \vec{x}_{Rohst} fasst sämtliche relevanten chemischen und physikalischen Eigenschaften eines Kunststofftyps zusammen:

$$\vec{x}_{\text{Rohst}} = \begin{pmatrix} 1 X_{\text{Rohst}} \\ 2 X_{\text{Rohst}} \\ \dots \\ j X_{\text{Rohst}} \end{pmatrix}$$

Gleichung 1

Die Anzahl der Komponenten „j“ des in Gleichung 1 gezeigten Vektors ist sehr groß und nur teilweise bekannt, weil die Erforschung der mikroskopisch begründeten Rohstoffeigenschaften erst am Anfang steht [51]. Bei Kunststoff-Neuwaren liegen nur teilweise und nur für einige Elemente des in Gleichung 1 dargestellten Vektors Werte vor. Bei Recyclaten sind in der Regel alle Elemente des Vektors „Rohstoffeigenschaften“ unbekannt.

Zur Beschreibung der Materialeigenschaften eines Kunststofftyps ist man deshalb gezwungen, makroskopisch beobachtete Erscheinungen, wie Nullviskosität oder spezifische Wärmekapazität eines Werkstoffs, zu betrachten. Die Messung dieser Erscheinungen erfolgt mit Hilfe von in Normen definierten Verfahren und liefert als Ergebnis eine Reihe von Materialkennwerten. Sie bilden den Vektor der mikroskopisch begründeten Rohstoffeigenschaften \vec{x}_{Rohst} auf mehrere Vektoren der Materialkennwerte \vec{x}_{MKW} ab (Gleichung 2):

$$\vec{x}_{\text{Rohst}} = \begin{pmatrix} 1 X_{\text{Rohst}} \\ 2 X_{\text{Rohst}} \\ \dots \\ j X_{\text{Rohst}} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Normierte Verfahren}} \begin{pmatrix} 1 X_{\text{MKW}} \\ \dots \\ k X_{\text{MKW}} \end{pmatrix} = \vec{x}_{\text{MKW}}$$

Gleichung 2

Die Anzahl der Elemente des in Gleichung 2 gezeigten Vektors der Materialkennwerte „k“ ist geringer als die Dimension des Vektors Rohstoffeigenschaften „j“.

Als Beispiel einer Projektion nach Gleichung 2 sei die Bestimmung des Schmelzindex nach DIN ISO 1133 genannt. Bei der Ermittlung der Konstanten von Fließgesetzen erfolgt die Abbildung des Rohstoffvektors entsprechend Gleichung 2 auf einen Vektor der Materialkennwerte, dessen Dimension von der Anzahl der im gewählten Modell vorkommenden Konstanten abhängt.

Die Charakterisierung des mikroskopisch begründeten Rohstoffverhaltens mit der Beobachtung des makroskopischen Stoffverhaltens hat den Vorteil, dass die ermittelten Ergebnisse aufgrund weitgehend normierter Verfahren allgemein gültig sind. Nachteilig ist jedoch, dass das Verarbeitungsverhalten des Werkstoffes erst bei Berücksichtigung von mehreren unterschiedlichen Untersuchungen abgeschätzt werden kann.

Damit ist diese Methode für die Charakterisierung von Polymeren, die in großen Stoffmengen mit gleichen Eigenschaften vorliegen, gut geeignet. Das ist bei neu hergestellten Massenplasten und technischen Kunststoffen der Fall.

Recyclate haben jedoch aufgrund der vielen Einflussfaktoren bei der Verarbeitung und während des Gebrauchs unterschiedliche Eigenschaften, selbst wenn sie ausschließlich aus Primärerzeugnissen gewonnen und zu deren Herstellung identische Polymertypen verwendet wurden. Zur Charakterisierung der Verarbeitungseigenschaften ist diese Methode zwar grundsätzlich geeignet, aber aufgrund der Anzahl von Einzeluntersuchungen unverhältnismäßig aufwendig, so dass deren technische Anwendung zur Charakterisierung der Verarbeitungseigenschaften von Recyclaten unterbleiben muss.

Mit dem hier entwickelten Vergleichsverfahren wird eine Methode vorgeschlagen, bei der dieser Nachteil so nicht in Erscheinung tritt. Aufgrund der prozessspezifischen Beeinflussung der Ergebnisse bei der Anwendung des Vergleichsverfahrens kann aber der Anspruch der allgemeinen Gültigkeit nicht erfüllt werden. Da die Menge eines Recyclats mit identischen Rohstoffeigenschaften im Vergleich zu Neuwaren sehr gering ist und die sekundäre Verwendung eines Recyclattyps von meist nur einem Verarbeiter an Ort und Stelle erfolgt, besteht jedoch keine Notwendigkeit, eine allgemeine Zugänglichkeit der Materialkennwerte zu realisieren.

Mit dem Vergleichsverfahren werden für eine Anzahl unterschiedlicher Materialien bestimmte prozessspezifische Kennwerte bestimmt. Diese Prozesskennwerte sind die untere Grenze des Druckniveaus p_{\min} – Formhohlraum ist vollständig mit Kunststoff gefüllt – und die obere Grenze des Druckniveaus p_{\max} – am Formteil tritt gerade noch kein Spritzgrat auf.

In linearer Abhängigkeit zu diesen beiden Kenngrößen wird außerdem die Breite des technologischen Fensters Δp ermittelt:

$$\Delta p = p_{\max} - p_{\min}$$

Gleichung 3

Weiterhin wird zur Abschätzung des Abkühlverhaltens der einzelnen Materialtypen die Siegelzeit t_{Siegel} beim Vergleichsprozess betrachtet.

Mit den diskutierten Größen wird ein Vektor von Prozesskennwerten des Vergleichsverfahrens \vec{x}_{PKW} aufgestellt:

$$\vec{x}_{\text{PKW}} = \begin{pmatrix} p_{\min} \\ p_{\max} \\ t_{\text{Siegel}} \end{pmatrix}$$

Gleichung 4

Aufgrund der in Gleichung 3 dargestellten linearen Abhängigkeit der Breite des technologischen Fensters von der oberen und unteren Grenze des Verarbeitungsfensters wird auf die Betrachtung dieses Prozesskennwertes in Gleichung 4 verzichtet.

Im Gegensatz zu der in Gleichung 2 gezeigten mehrfach auszuführenden Projektion des Rohstoffvektors auf jeweils einen Vektor von Materialkennwerten ist beim Vergleichsverfahren lediglich eine Abbildung des Rohstoffvektors auszuführen. Die Größe \bar{x}_{Rohst} wird nun auf den Vektor der im Vergleichsverfahren ermittelten Prozesskennwerte \bar{x}_{PKW} abgebildet (Gleichung 5):

$$\bar{x}_{\text{Rohst}} = \begin{pmatrix} 1 X_{\text{Rohst}} \\ 2 X_{\text{Rohst}} \\ \dots \\ j X_{\text{Rohst}} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Vergleichsverfahren}} \begin{pmatrix} p_{\text{min}} \\ p_{\text{max}} \\ t_{\text{Siegel}} \end{pmatrix} = \bar{x}_{\text{PKW}}$$

Gleichung 5

Die Betrachtung von drei prozessbezogenen Größen reduziert den Aufwand gegenüber der in Gleichung 2 dargestellten Projektion erheblich. Sie enthält aber ausreichend Informationen, um das Verarbeitungsverhalten einer Gruppe von Materialtypen gegeneinander abzugrenzen.

Mit den im folgenden **Kapitel 4** ausgeführten Experimenten soll überprüft werden, ob die für das Vergleichsverfahren charakteristische Projektion des Vektors der Rohstoffeigenschaften auf den Vektor der im Vergleichsverfahren ermittelten Prozesskennwerte prinzipiell geeignet ist, um das Verarbeitungsverhalten unterschiedlicher Materialtypen miteinander zu vergleichen.

4 Experimentelles

4.1 Für den Vergleichsprozess verwendetes Werkzeug und die eingesetzte Maschine

Bei der Auswahl der Maschine muss sicher gestellt werden, dass die Technik voll funktionsfähig ist und der Wartungszustand einwandfrei ist. So werden Fehlinterpretationen der Ergebnisse aufgrund einer ungenauen, nichtlinearen Kalibrierung vermieden. Die Bedienung muss einfach sein und die Eingabe von Stellgrößen reproduzierbar durch digitale Steuerungen erfolgen können. Für eine effektive Auswertung der Ergebnisse sollte die Maschine über Schnittstellen und Speichermedien verfügen. Auch bei der Verarbeitung von Mahlgut, das gegenüber Granulat ein anderes Rieselverhalten hat [153], muss durch die Schnecke ausreichend Material eingezogen werden.

Alle hier dargelegten Versuche zur Anwendung des Vergleichsverfahrens wurden auf einer Spritzgussmaschine der Firma Engel Typ ES 200 HL Maschinenummer 19328 [154] durchgeführt, die alle oben genannten Anforderungen erfüllt.

Das Werkzeug, mit dem die Vergleichsprozesse ausgeführt werden sollen, muss kurzfristig und vielseitig einsetzbar sein. Die Verwendung einer Form, mit der keine oder nur selten Serienteile in geringen Losgrößen hergestellt werden, bietet sich an. Das Werkzeug sollte möglichst wenige Formnester enthalten sowie einfach und wartungsfreundlich [155] aufgebaut sein. Die in der Form enthaltene Luft muss beim Einspritzen der Masse durch entsprechend gewählte Maßnahmen [156] entweichen können. Weil nach [157] die Entformungseigenschaften von verschiedenen Materialgrößen abhängen, muss das Auswerfen der Spritzlinge einwandfrei funktionieren und auch bei nicht vollständig ausgespritzten Formteilen möglich sein. Aufgrund des Einsatzes unterschiedlicher Materialtypen sind überlange Fließwege in der Kavität zu vermeiden.

Für den hier ausgeführten Vergleichsprozess wurde ein Werkzeug zur Herstellung von Prüfkörpern ausgewählt, das die oben genannten Anforderungen erfüllt. So wurden im Rahmen der technologischen Untersuchungen Probekörper für den Zugversuch **EN ISO 527-2** "Probekörper Typ 1A" und Schlagprüfkörper **EN ISO 179/1eU** "Probekörper-Typ 1" mit einem kombinierten Werkzeug produziert, welches die Herstellung beider Formteile in einem Schuss ermöglicht (**Bild 31**).

Die Untersuchung der technologischen Eigenschaften parallel zur Herstellung von Probekörpern für unterschiedliche mechanische Tests ist bereits aus [158] bekannt.



Bild 31 Für den Vergleichsprozess verwendetes Spritzgusswerkzeug

4.2 Materialauswahl

4.2.1 Polypropylen

Der Kunststoff, für den das Vergleichsverfahren zur Beurteilung der technologischen Eigenschaften von Recyclaten beispielhaft angewendet wurde, sollte die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Branchenübergreifende Anwendung
- Verarbeitung von großen Mengen im Spritzgussverfahren
- Kurz- und mittelfristige Verwertung
- Umweltverträglichkeit
- Starke Entwicklungs- und Wachstumspotentiale
- Geringer Neupreis

Die genannten Punkten werden vor allem von Polypropylen erfüllt, das als Untersuchungsmaterial herangezogen wurde.

Diese Kunststoffart wird in nahezu allen Branchen eingesetzt.

In Westeuropa werden jährlich 2,8 Millionen Tonnen Polypropylen im Spritzgussverfahren verarbeitet. Hauptabnehmer der Produkte ist die Automobilindustrie. Auch Haushaltswaren, dünnwandige Verpackungen, Verschlüsse, Koffer, Kästen, Möbel und Erzeugnisse für die Elektroindustrie werden aus diesem Material produziert. [159]

Die aus Polypropylen hergestellten Erzeugnisse werden kurzzeitig, über wenige oder einige Jahre verwendet. Aufgrund der in naher Zukunft greifenden gesetzlichen Bestimmungen zur Entsorgung von technischen Gebrauchsgütern (**Kapitel 2.2.4.3**) - wie beispielsweise Kraftfahrzeuge - werden mittelfristig zusätzliche Mengen dieses Werkstoffs zur Aufbereitung anstehen.

Nach bisherigem Kenntnisstand geben Polyolefine, zu denen das Polypropylen zählt, nach ihrem Gebrauch keine Emissionen an die Umwelt ab und sind problemlos aufzubereiten.

Zu den beachtlichen Entwicklungspotentialen des Polypropylens sei auf die Arbeit von Rätzsch [160] verwiesen. Aufgrund mehrerer möglicher Kristallmodifikationen wird ein breites Einsatzspektrum abgedeckt. Die Molmassenverteilung kann sowohl eng als auch breit eingestellt werden. Polypropylen kann vielfältig modifiziert werden, so mit Kautschukpartikeln zur Erhöhung der Kerbschlagzähigkeit, aber auch mit Glas- [161] und Naturfasern [162] zur Erhöhung der Steifigkeit. Eine weitere Eigenschaftsbeeinflussung ist durch die in den letzten Jahren stetig weiterentwickelte Copolymerisation mit anderen Polymeren möglich.

Die zahllosen Anwendungsmöglichkeiten und das breite Eigenschaftsprofil führten in den letzten Jahren zu einem starken Wachstum des Absatzes von Polypropylen. So stieg der Verbrauch in Westeuropa laut [159] zwischen 1990 und 1998 jährlich um durchschnittlich acht Prozent an. Zwischen 1999 und 2010 geht der Verband der kunststoffherstellenden Industrie [59] von einem jährlichen Wachstum von 6,2 Prozent aus. Die Erwartungen sind lediglich für Polycarbonat optimistischer, dessen Produktionsmenge 1999 aber nur einem zwanzigstel der erzeugten Menge Polypropylens entsprach.

Polypropylen hat verglichen mit anderen Kunststoffen gemeinsam mit Polyvinylchlorid den niedrigsten Preis pro Kilogramm Material (**Tabelle 1**):

Tabelle 1 Durchschnittswerte der Kunststoffpreise in DM – Werte nach [59]

Kunststoff in DM/kg	1998		1999	
	niedrigster Wert	höchster Wert	niedrigster Wert	höchster Wert
PE-HD	1,29	1,70	1,08	1,89
PE-LLD	1,21	1,63	1,03	1,99
PE-LD	1,33	1,72	1,13	2,01
PP	1,06	1,50	0,99	1,56
PS	1,50	1,74	1,25	1,85
PVC	1,04	1,47	1,02	1,60

Aufgrund der geringeren Dichte des Polypropylens gegenüber anderen Polymeren kann ein Erzeugnis mit einem vorgegebenen Volumen aus PP konkurrenzlos günstig hergestellt werden. Wegen der Vielfältigkeit der Eigenschaftsbeeinflussung ist bei Produkten eine einsetztechnisch optimale Materialausnutzung möglich.

Wenn PP-Neuware durch Recyclate ersetzt werden soll, müssen aufgrund des geringen Neupreises alle Möglichkeiten zur kostengünstigen Verarbeitung des Sekundärrohstoffs ausgenutzt werden. Dazu sind Kenntnisse über das technologische Verhalten des Recyclats unumgänglich.

4.2.2 Untersuchte Polypropylentypen

Neben den vielen bekannten Modifizierungsmöglichkeiten des Grundpolymers werden sich auch die Verarbeitungseigenschaften von modifizierten Materialtypen deutlich von denen der Standardtypen unterscheiden.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen werden drei Standard-Neuwaren betrachtet. Das entspricht etwa der Anzahl von Standardtypen, die typischerweise in einem branchenorientierten mittelständischen Betrieb verwendet werden.

Einen Überblick über die einzelnen untersuchten Polypropylentypen gibt **Tabelle 2**.

Tabelle 2 Untersuchte Polypropylen-Materialien

Kurzbezeichnung	Handelsname / Bemerkung
PP_N1	Novolen 1102 H
PP_D	Daplen BE 50
PP_N2	Novolen 1184 L
PPAng	Mahlgut aus den drei hier verarbeiteten Neuwaretypen
PPRec1	Postconsumer-Recyclat - gewonnen aus Waschgeräten
PPRec2	Wiederverarbeitung von Mahlgut aus PPRec1-Teilen
PPRecA	Postconsumer-Recyclat - gewonnen aus Autoteilen

Angüsse und Restteile der untersuchten drei Neumaterialtypen wurden eingemahlen. Das Mahlgut wurde ohne weitere Aufbereitungsschritte direkt auf der Spritzgussmaschine wiederverarbeitet. Die Versuche mit diesem Gebinde werden durch die Bezeichnung "PPAng" gekennzeichnet.

Das Recyclat PPRec1 wurde durch das Einmahlen von Teilen gewonnen, die von der Firma Leunaer Elektrorecycling GmbH & Co. KG aus Waschgeräten demontiert wurden. Nachdem alle im Gebinde vorhandenen Metallteile aussortiert wurden, erfolgte die Direktverarbeitung des Mahlguts auf der Spritzgussmaschine.

Die Angüsse und Restteile aus PPRec1 wurden wieder eingemahlen. Bei der erneuten Wiederverarbeitung des Mahlguts auf der Spritzgussmaschine wurde dieses Gebinde als PPRec2 bezeichnet.

Das Recyclat PPRecA wurde überwiegend aus PKW-Stoßfängern gewonnen. Es konnte auf Teile zurückgegriffen werden, die bereits von Verwertungsbetrieben demontiert wurden. Die Grobzerkleinerung und das Einmahlen wurden labortechnisch durchgeführt.

Alle Mahlgüter wurden auf Metallteile hin untersucht. Metallsplitter wurden aussortiert. Danach erfolgte die Verarbeitung auf der Spritzgussmaschine.

Unabhängig von den Untersuchungen im Rahmen des Vergleichsverfahrens wurden die MFR-Werte nach DIN ISO 1133 der einzelnen Materialtypen bestimmt. **Tabelle 3** gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

Tabelle 3 Ergebnisse der MFR-Bestimmung nach DIN ISO 1133 für die einzelnen verwendeten Polypropylene

Kurzbezeichnung	Schmelzaustritt in g/10min	Temperatur in °C	Belastung in kg
PP_N1	0,83	200	2,16
PP_D	0,47	190	5
	0,32	230	2,16
PP_N2	3,0	200	2,16
PPAng	0,38	200	2,16
PPRec1	0,75 bis 0,95	200	2,16
PPRec2	2,6	200	2,16
PPRecA	3,2	200	2,16

Mit der Materialprobe PP_D war es nicht möglich, die MFR-Werte bei einer Temperatur von 200°C und einer Belastung von 2,16 kg aufzunehmen. Der Materialaustritt aus dem Untersuchungsgerät war zur Bestimmung des Schmelzindex viel zu gering.

Von den hier untersuchten Neuwaren sind die Molmasse und Molmassenverteilung bekannt. Es gelten die folgenden Werte (**Tabelle 4**):

Tabelle 4 Molmasse und Molmassenverteilung für die untersuchten PP-Neuwaren

Materialprobe	Molmasse in kg/mol	Molmassenverteilung
PP_N1	320	6,43
PP_D	1125	4,47
PP_N2	280	4,46

Die Molmasse und die Molmassenverteilung der Materialprobe PPAng sind unbekannt. Es handelt sich bei diesem Gebinde um ein Gemisch aus drei Materialtypen des gleichen Basispolymers. Die Beschreibung der Molmassenverteilung ist nun nicht mehr mit einer Normalverteilung zulässig (**Bild 5**). Aufgrund der in **Kapitel 2.1.1** diskutierten Veränderungen der molekularen Strukturen bei der Wiederverarbeitung von Kunststoffen darf aber aus den bekannten Größen der einzelnen Mischungsbestandteile (**Tabelle 4**) nicht bedenkenlos auf die Molmasse oder die Molmassenverteilung der Gesamtmischung geschlossen werden.

Die molekularen Eigenschaften der Postconsumer-Recyclate sind unbekannt. Bei der Untersuchung der molekularen Eigenschaften von Altkunststoffen können keine aussagefähigen Ergebnisse ermittelt werden, weil bei den dabei angewendeten Untersuchungsverfahren sehr kleine Einwaagemengen verwendet werden müssen. Weil die

einzelnen Bruchstücke des Recyclatmahlguts aus jeweils einem Materialtyp bestehen, ist die technische Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Molmasse des gesamten Gebindes unmöglich. Man würde die molekularen Kenngrößen des Werkstoffs bestimmen, aus dem das jeweilige Altkunststoffteil hergestellt wurde, dem das zu untersuchende Bruchstück entstammt. Um über die molekularen Eigenschaften des gesamten Gebindes eine Aussage treffen zu können, ist eine homogene Vermischung des Werkstoffgemisches bis in molekulare Bereiche hinein Voraussetzung, die hier nicht gegeben ist. Die Realisierung ist technisch problematisch und mit einem hohen Energieeintrag in die Schmelze verbunden. Aufgrund der in **Kapitel 2.1.1** dargelegten Zusammenhänge führt aber eine thermische Belastung der Schmelze zu Veränderungen der molekularen Kenngrößen.

So kann man nur die globale Aussage treffen, dass die Molmassenverteilung aufgrund der Vielzahl der eingebrachten Altkunststofftypen nicht einer Normalverteilung unterliegt (**Bild 5**) und sehr groß sein wird.

4.3 Versuchsdurchführung

4.3.1 Standardeinstellung des angewendeten Vergleichsprozesses

Im Vorfeld der eigentlichen technologischen Untersuchung wurden Vorversuche durchgeführt. Es wurde das in **Kapitel 4.1** beschriebene Werkzeug und die Spritzgussmaschine der Firma „Engel“ Typ ES 200/50HL verwendet.

Das Einzugsverhalten der einzelnen Materialtypen wurde analysiert und eine für alle Materialproben anwendbare Standardeinstellung ermittelt.

Die Verarbeitung der drei Neuware-Typen funktionierte erwartungsgemäß einwandfrei.

Die Herstellung von Formteilen aus Mahlgut konnte mit allen PP-Recyclaten problemlos ausgeführt werden. Nennenswerte Einzugsprobleme kamen nicht vor.

In **Tabelle 5** zeigt die zur Verarbeitung von allen zu untersuchenden Materialtypen geeignete Standardeinstellung.

Tabelle 5 Standardeinstellung für die Polypropylentypen

Schneckendurchmesser	22 mm
Druckfaktor	1,51
Eingestellte Heizzonentemperatur	230 °C - Düse 230 °C 230 °C 230 °C - Einzug
Eingestellte Werkzeugtemperatur in °C	Kaltwasser
Eingestellte Schneckenvorlaufgeschwindigkeit	70 mm/s
Eingestellte Gesamtabkühlzeit	40 s

Der in **Tabelle 5** verwendete Druckfaktor wird zur Umrechnung des beim Einspritzvorgang maschinenseitig wirksamen Hydraulikdrucks in den spezifisch wirksamen Massedruck vor

der Schneckenspitze benötigt. Der spezifische Massedruck in der Maßeinheit „MPa“ ergibt sich durch Multiplikation des von der Maschinensteuerung ausgewiesenen Hydraulikdrucks in der Maßeinheit „bar“ mit dem Druckfaktor [154]. Beispielsweise wurde für Novolen 1102 H als untere Grenze des Einstellwerts von der Maschinensteuerung ein Wert von 25bar Hydraulikdruck ausgegeben. Nach der Multiplikation mit dem in **Tabelle 5** bezifferten Druckfaktor ergibt sich dann ein spezifischer Schmelzedruck p_{\min} von 37,7 MPa.

Der Einstellwert des Staudrucks beim Dosieren wurde bei allen Materialien mit null vorgegeben. Auch wenn kein Staudruck vorgegeben wird, wirkt aufgrund der Reibung beim Zurückfahren der Schnecke eine Gegenkraft [163]. Ein höherer Staudruck würde eine bessere Homogenisierung des Materials bewirken. Allerdings nimmt mit zunehmendem Staudruck auch die in das Material eingebrachte Scherung und die notwendige Dosierzeit zu.

Mit dieser Standardeinstellung (**Tabelle 5**) war für jeden Materialtyp ein sicheres Füllen der Kavität möglich. Freistrahleffekte wurden in keinem Falle beobachtet.

4.3.2 Fahrweise des angewendeten Vergleichsprozesses

Die technologischen Untersuchungen mit Hilfe des im **Kapitel 3** entwickelten Vergleichsverfahrens erfolgten immer mit derselben Maschine und demselben Werkzeug (**Kapitel 4.1**). Eine Anpassung des Werkzeugs auf spezielle Anforderungen des jeweiligen Polypropylenmaterials unterblieb.

Für jeden einzelnen Materialtyp wurden Füllstudien hergestellt. Zu diesem Zweck wurde die Stellgröße Nachdruckzeit mit null Sekunden definiert und der Spritzdruck schrittweise erhöht. Die Gesamtkühlzeit wurde nach Erfahrungswerten mit 40s vorgegeben.

Mit der Auswertung der Füllstudien wurde nachgewiesen, dass bei keinem der untersuchten Materialtypen Freistrahlbildung vorkam.

Der zur Herstellung eines vollständig gefüllten Teils notwendige Spritzdruck p_{\min} (**Bild 32**) konnte bereits mit diesem Teilversuch bestimmt werden. Dieser wird hier als minimales Druckniveau bezeichnet (**Kapitel 3.3.2**).

Für dieses Druckniveau wurden die betreffenden Siegelpunkte bestimmt. Dazu erfolgte die schrittweise Erhöhung der Nachdruckzeiten bei konstanter Gesamtzykluszeit. Die Teilemassen von je 5 nacheinander mit gleichen Nachdruckzeiten hergestellten Probekörpern wurden ermittelt. Die Ergebnisse wurden in einem Protokoll vermerkt.

Die Bestimmung des maximal möglichen Spritzdrucks (**Kapitel 3.3.2**) erfolgte durch subjektive Beurteilung des Gratbildes am hergestellten Formteil. Vergratete Teile waren bei der Untersuchung von Polypropylenen deutlich zu erkennen. Alle Materialtypen neigen zu einem plötzlichen Überspritzen der Form. Der subjektive Fehler bei der Festlegung des maximalen Druckniveaus p_{\max} (**Bild 32**) durch die Beurteilung des Formteilgrats bei Polypropylen ist im Vergleich zu anderen Basispolymeren (beispielsweise bei Polystyrol) gering.

Die Veröffentlichung der Protokolle, die bei der Untersuchung der Polypropylen-Materialtypen aufgenommen wurden, sprengt den Rahmen dieser Arbeit.

Die Zuordnung der im **Anhang** wiedergegebenen graphischen Aufbereitungen der technologischen Daten zu den einzelnen Materialproben zeigt **Tabelle 6**.

Die Aufnahme der Siegelkurven bei maximalen Druckniveau erfolgte wieder durch

Veränderung der Nachdruckzeit. Es wurden je 5 mit gleichbleibender Maschineneinstellung hergestellte Proben ausgewogen. Die Ergebnisse der Messungen wurden protokolliert.

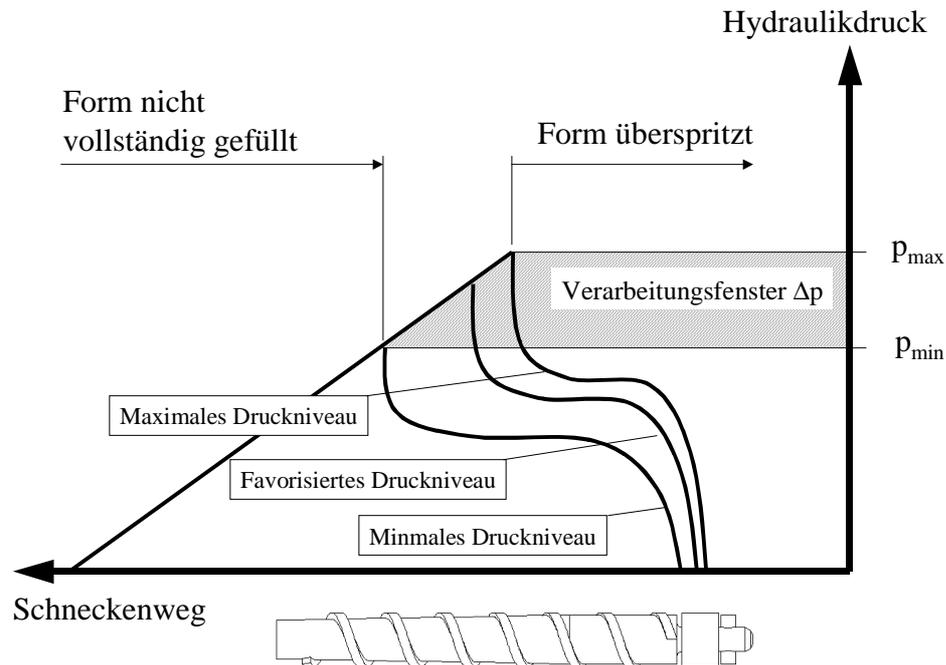


Bild 32 Variation des Hydraulikdrucks zur Ermittlung der oberen und unteren Grenze des Vergleichsprozesses

Das favorisierte Druckniveau (**Kapitel 4.1.2.5**) wurde zwischen minimalen und maximalem Druckniveau nach Erfahrungswerten festgelegt (**Bild 32**). Auch hier erfolgte die Beurteilung des Siegelverhaltens durch Gewichtsbestimmung von jeweils 5 Proben, die mit unterschiedlicher Nachdruckzeit bei gleichbleibender Gesamtzykluszeit hergestellt wurden. Die Ergebnisse dieser Siegelpunktermittlung sind ebenfalls in den Versuchsprotokollen hinterlegt.

Nach Festlegung der Siegelzeit erfolgte die Produktion von 30 Schuss, ohne dass Veränderungen an der Maschineneinstellung „favorisiertes Druckniveau“ vorgenommen wurden. An den so hergestellten Zug- und Schlagprüfkörpern erfolgte eine Gewichtsbestimmung, die statistisch ausgewertet wurde.

4.3.3 Versuchsergebnisse bei der Anwendung des Vergleichsprozesses zur Charakterisierung der technologischen Eigenschaften von PP-Recyclat

Aufgrund der vielen Daten wird sich auf die Darstellung von graphisch aufbereiteten Ergebnissen im **Anhang** beschränkt.

Gezeigt werden die Siegeldiagramme mit den bei den drei genannten Druckniveaus aufgenommenen Werten für den Zug- und den Schlagprüfstab. Bei der Darstellung der Siegeldiagramme wurde für die Ergebnisse der bei minimalem Spritzdruck aufgenommenen Kurven das Symbol "∇" gewählt. Die bei favorisiertem Spritzdruck aufgenommenen Siegelkurven wurde durch "●" gekennzeichnet. Die sich bei maximalem Spritzdruck ergebende Funktion ist am Symbol "Δ" erkennbar.

Außerdem werden im **Anhang** die Ergebnisse der Wägung von den 30 nacheinander hergestellten Einzelteilen gezeigt. Hier sind ebenfalls Zug- und Schlagprüfstab untersucht worden.

Tabelle 6 Übersicht zu den im Anhang aufgeführten Darstellungen der technologischen Eigenschaften für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Polypropylen-Materialien

Kurzbezeichnung	Siegeldiagramme	Maschinenfähigkeit Zugprüfstab	Maschinenfähigkeit Schlagprüfstab
PP_N1	Anhang - Bild 1	Anhang - Bild 2	Anhang - Bild 3
PP_D	Anhang - Bild 4	Anhang - Bild 5	Anhang - Bild 6
PP_N2	Anhang - Bild 7	Anhang - Bild 8	Anhang - Bild 9
PPAng	Anhang - Bild 10	Anhang - Bild 11	Anhang - Bild 12
PPRec1	Anhang - Bild 13	Anhang - Bild 14	Anhang - Bild 15
PPRec2	Anhang - Bild 16	Anhang - Bild 17	Anhang - Bild 18
PPRecA	Anhang - Bild 19	Anhang - Bild 20	Anhang - Bild 21

4.4 Diskussion der ermittelten technologischen Eigenschaften der untersuchten Polypropylyentypen

4.4.1 Allgemeine Aussagen zum Spritzgießen der einzelnen Materialtypen

Beim Spritzgießen der untersuchten Polypropylyentypen traten keine nennenswerten Probleme auf. Bei keinem Materialtyp kam es zu ungewollten Produktionsunterbrechungen.

Eine vollautomatische Fahrweise konnte bei allen Versuchen angewendet werden.

Die Entformung war stets einwandfrei möglich. Die Gestaltung des Hinterschnitts zur Entformung der Angusstange ist bei dem verwendeten Werkzeug gut auf die Verarbeitung von Polypropylen abgestimmt.

Der Materialtyp PPRec1 neigte bei der Verarbeitung mit maximalem Spritzdruck geringfügig zu Brandstellen und einer schwachen Belagbildung. Die Formbeläge wurden von Zeit zu Zeit durch Polieren der Trennebene des Werkzeugs entfernt. Bei Serienwerkzeugen zur Verarbeitung von PPRec1 muss auf eine gute Werkzeugentlüftung geachtet werden [24].

Formteile aus PPRec1 hatten eine mittelgraue Grundfarbe und wiesen eine dunkelgraue und helle Mamorierung auf. Die aus PPRec2 hergestellten Prüfkörper hatten die gleiche Grundfarbe, wie sie beim Spritzgießen von PPRec1 beobachtet wurde. Die Mamorierungen zeigten den gleichen Farbton, waren aber deutlich feiner gezeichnet.

Bei der Verarbeitung von PPRec1 und PPRec2 kam eine Geruchsbelästigung vor. Verursacht wurde dies durch Reste von Waschmitteln in den Recyclaten. Auf die Anwendung der in [164] genannten Möglichkeiten zur Verminderung der Geruchsbelästigung bei der Verarbeitung von Polyolefinen wurde verzichtet.

Prüfkörper aus PPRecA hatten eine anthrazitfarbene bis schwarze Tönung. Eine Mamorierung war hier nicht erkennbar.

Bei der Verarbeitung von PPRecA wurde keine Geruchsentwicklung festgestellt.

Ein Ausgasen der Materialien beim Abspritzen ins Freie wurde nicht beobachtet. Auch die drei Postconsumer-Recyclate neigten nicht zur Ausgasung. Die in **Kapitel 2.1.2.4** abgehandelten flüchtigen Bestandteile sind in den hier untersuchten Recyclaten offensichtlich nur in geringen Konzentrationen enthalten.

4.4.2 Verarbeitungsfenster

Für die einzelnen Polypropylentypen wurde das technologische Fenster beim Vergleichsprozess bestimmt. Die graphische Aufbereitung der Ergebnisse ist im **Bild 33** dargestellt.

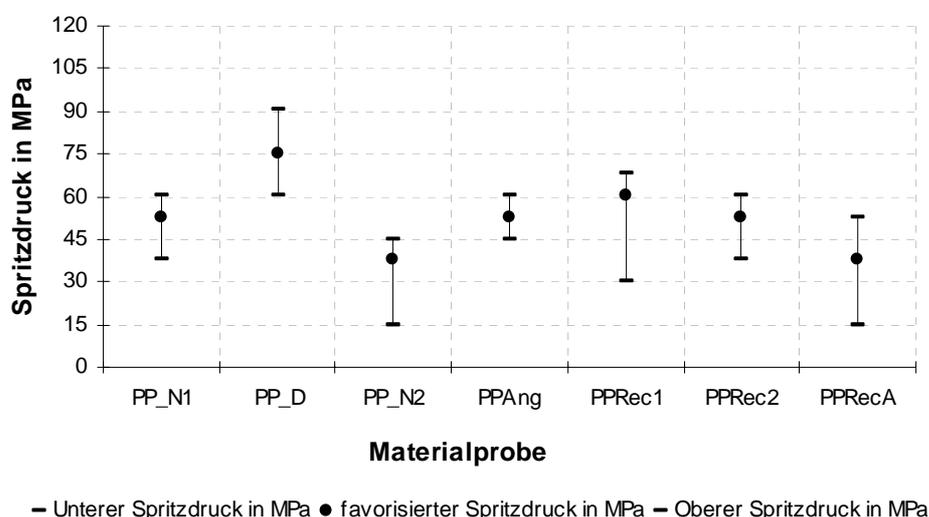


Bild 33 Verarbeitungsfenster für die mit dem Vergleichsprozess untersuchten PP-Materialtypen

Die Lage des technologischen Fensters der drei untersuchten Neuwaren widerspiegelt die in **Kapitel 2.1.2.1** dargestellten Beziehungen zwischen molekularen und rheologischen Eigenschaften.

Zum Herstellen der Formteile aus PP_D ist der größte Hydraulikdruck notwendig, um die Kavität zu füllen (**Bild 33**). Dieses Material hat die höchste Molmasse der drei untersuchten Polypropylentypen (**Tabelle 4**).

Ein geringer Hydraulikdruck reicht aus, um das Novolen 1184 L in den Formhohlraum zu pressen (**Bild 33**). Dieses Material hat die geringste Molmasse der hier untersuchten Typen (**Tabelle 4**).

Betrachtet man nur die Molmassen, müsste das technologische Fenster für PP_N1 nahe bei dem von PP_N2 liegen. Der zur Füllung des Formhohlraums notwendige Hydraulikdruck entspricht aber etwa dem Mittelwert der für PP_N2 und PP_D gemessenen Werte (**Bild 33**). Das ist mit der deutlich höheren Molmassenverteilung dieses Materialtyps gegenüber den beiden anderen untersuchten Neu-Polypropylenen (**Tabelle 4**) erklärbar.

Bei den drei untersuchten Neuwaren ist die Breite der Verarbeitungsfenster nahezu gleich. Lediglich bei dem Prozess zur Verarbeitung von Novolen 1102 H wurde eine etwas geringere

Differenz zwischen oberer und unterer Grenze des Verarbeitungsfensters beobachtet als bei den anderen beiden Kunststofftypen. Als Ursache für das etwas schmalere Verarbeitungsfenster von PP_N1 können Messungenauigkeiten nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der geringen Ausprägung dieses Effekts soll auf eine umfassende Diskussion der beobachteten Verengung des technologischen Fensters bei der Herstellung von Prüfkörpern aus Novolen 1102 H verzichtet werden.

Bereits aus der Untersuchung der Neuwaren wird deutlich, dass bei einem Wechsel des Materialtyps immer eine erneute technologische Untersuchung notwendig ist. Es würde bei Verwendung von Novolen 1184 L anstelle des Daplen BE 50 ohne Veränderung des Spritzdruckniveaus ein extremes Überspritzen der Form auftreten, was meist eine Werkzeugdemontage mit entsprechenden Produktionsausfällen bedeutet.

Bei der Betrachtung der technologischen Fenster von Neu-Polypropylentypen wurde eine deutliche Abhängigkeit der Prozesslage vom jeweils verwendeten Materialtyp festgestellt. Die gewählte Kombination Werkzeug – Maschine – Standardeinstellung ist so für einen Vergleichsprozess zur Einordnung der Materialeigenschaften von Recyclaten gut geeignet.

Die Bestimmung von molekularen Eigenschaften der aus den Angüssen und Restteilen der drei untersuchten Neumaterialtypen gewonnenen Probe PPAng war aufgrund der in **Kapitel 4.2.2** getroffenen Aussagen nicht möglich. Zur Charakterisierung der Fließeigenschaften steht lediglich der MFR-Wert nach **EN ISO 1133** zur Verfügung (**Tabelle 3**).

Die Produktionsabfälle weisen keine nennenswerten Verunreinigungen auf. Demnach ist keine Beeinflussung der Fließfähigkeit der Schmelze aufgrund der in **Kapitel 2.1.2.2** bis **2.1.2.4** diskutierten Effekte zu erwarten. Das wird bei der Betrachtung der Lage des technologischen Fensters beim Vergleichsprozess mit PPAng bestätigt. Sie entspricht fast genau dem Mittelwert der drei untersuchten Neuwaren (**Bild 33**).

Die Breite des technologischen Fensters von PPAng ist deutlich schmaler als die der Neumaterialien (**Bild 33**).

Aufgrund der Mischung von drei Materialtypen wird PPAng eine außerordentlich breite Molmassenverteilung entsprechend **Bild 5** aufweisen. Die Schmelze dieser Materialprobe wird deshalb eine weitaus größere Dehnviskosität beim Füllen der Kavität mit hohen Schergeschwindigkeiten haben als bei der Verwendung von Neumaterialien mit Normalverteilung der Molmasse (**Kapitel 2.1.2.1**). Um die Kavität mit PPAng zu füllen, wird so ein relativ großer Hydraulikdruck am Schneckenkolben zur Überwindung der Dehnviskosität der Schmelze erforderlich. Das erklärt das hohe Niveau der unteren Grenze des technologischen Fensters beim Spritzgießen von PPAng. Dieser Effekt führt zu einer Verminderung des Niveaus der unteren Grenze des technologischen Fensters.

Bei der Strömung an der oberen Grenze des technologischen Fensters spielen Dehneffekte keine Rolle. Das Fließverhalten wird nicht mehr in dem Maße durch die breite Molmassenverteilung beeinflusst wie bei der Ermittlung der unteren Grenze des technologischen Fensters und ist mit dem Verhalten der Neumaterialien vergleichbar. Bei einer unvollständigen Homogenisierung der Einzelkomponenten könnten sich aber die leichtfließenden Anteile aus Novolen 1184 L noch nach dem Einspritzen in das Werkzeug aus der Schmelzematrix entbinden und in Werkzeugspalten eindringen. Dann kommt es zu einem vorzeitig auftretenden Formteilgrat. Diese Tendenz führt zu einer Absenkung der oberen Grenze des Verarbeitungsfensters.

Die Erhöhung der Dehnviskosität und das Entbinden von leichtfließenden Material erklären die geringere Breite des technologischen Fensters der Probe PPAng.

Das Fließverhalten der Postconsumer-Recyclate wird im Gegensatz zur Wiederverarbeitung von Produktionsabfällen nicht allein durch die molekularen Eigenschaften des Basispolymers

bestimmt. In **Kapitel 2.1.2.2** bis **Kapitel 2.1.2.4** wurden die Einflüsse von unterschiedlichen Fremdstoffen auf die Verarbeitungseigenschaften des Materials analysiert.

Die Lage der technologischen Fenster von Postconsumer-Recyclaten aus Waschgeräten (PPRec1 und PPRec2) ist vergleichbar mit dem Niveau des für PP_N1 ermittelten Verarbeitungsfensters (**Bild 33**).

Die Breite des Verarbeitungsfensters von PPRec1 ist deutlich größer als bei den mit dem Vergleichsprozess untersuchten Neuwaren.

Beim Spritzgießen von PPRec1 liegt die untere Grenze des Verarbeitungsfensters auf einem relativ geringen Niveau (**Bild 33**). Nur mit der Neuware Novolen 1184 L ist es möglich, die Kavität mit einem geringeren Hydraulikdruck zu füllen. Das ist auf die starke Wirkung der in **Bild 12** gezeigten Mechanismen der Gleitbahnbildung durch in der Schmelze enthaltene flüssige Fremdstoffe zurückzuführen. Die Verschlechterung der Fließfähigkeit aufgrund von sich in der Schmelze befindenden festen Bestandteilen tritt dagegen in den Hintergrund.

Die Ursache für das hohe Niveau der oberen Grenze des Verarbeitungsfensters von PPRec1 liegt in der Unwirksamkeit der während der Formfüllung gebildeten Gleitbahnen (**Bild 12**) bei der Füllung des Spalts in der Trennebene (**Bild 29**). Ein Nachschieben der Masse erfordert nun einen ähnlich hohen Hydraulikdruck am Schneckenkolben wie bei Systemen, bei denen die Mechanismen der Gleitbahnbildung nicht wirksam wurden.

Die Probe PPRec2 stellt eine zweite Verarbeitungsstufe von PPRec1 dar. Die Breite des technologischen Fensters von PPRec2 ist gegenüber PPRec1 geringer.

Das ist einerseits mit einer Aufnahme von flüssigen Fremdstoffen durch die Matrix aufgrund der intensiveren Homogenisierung bei zwei Verarbeitungen zu erklären. So können die für die untere Grenze des technologischen Fensters beim Spritzgießen im Vergleichsprozess von PPRec1 verantwortlichen Gleitbahnen (**Bild 12**) sich bei den für das Füllen der Kavität notwendigen großen Schergeschwindigkeiten nicht mehr im vollen Maße ausbilden. Um die Schmelze in den Formhohlraum zu pressen, muss deshalb bei PPRec2 ein größerer Hydraulikdruck angelegt werden als beim Spritzen von PPRec1.

Zum anderen ist bei PPRec2 die Viskosität bei geringen Schergeschwindigkeiten aufgrund der intensiveren Materialhomogenisierung und wegen des bei der zusätzlichen Verarbeitung stärker wirksamen chemischen Abbaus der Makromoleküle geringer als bei PPRec1. Das widerspiegelt sich in dem höheren MFR-Wert dieser Probe (**Tabelle 3**). So kommt es bereits bei niedrigeren Massedrücker zu einem Eindringen von Kunststoffschmelze in den Spalt zwischen den Werkzeughälften (**Bild 29**). Deshalb erfolgt die Gratbildung beim Spritzgießen der Materialprobe PPRec2 bereits bei geringeren Hydraulikdrücken als bei der Verarbeitung von PPRec1. Die obere Grenze des technologischen Fensters von PPRec2 beim Vergleichsprozess liegt so bei kleineren Werten als bei PPRec1.

Beide Effekte erklären die im Vergleich zu PPRec1 geringere Breite des technologischen Fensters der Materialprobe PPRec2.

Das technologische Fenster des aus Stoßfängern von Altautos gewonnenen Recyclats PPRecA ähnelt dem von PPRec1.

Das Verarbeitungsfenster von PPRecA liegt zwischen dem Niveau der technologischen Fenster der beiden Neumaterialien PP_N1 und PP_N2 (**Bild 33**).

Die Breite des technologischen Fensters ist bei der Anwendung des Vergleichsprozesses auf PPRecA größer als bei den verarbeiteten Neuwaren und nur etwas geringer als beim Spritzgießen von PPRec1. Die Ausbildung von Gleitbahnen ist auch hier die Erklärung für ein breiteres Verarbeitungsfenster.

4.4.3 Siegelverhalten

Die für die einzelnen Materialtypen aufgenommenen Siegeldiagramme sind im **Anhang** veröffentlicht. Aus **Tabelle 6** – Seite 73 - kann entnommen werden, mit welchen einzelnen Bildern die jeweiligen Siegeldiagramme dargestellt werden.

Beim Spritzgießen von Polypropylenen unterscheiden sich die für einen Materialtyp aufgenommenen Siegeldiagramme für Zug- und Schlagprüfstab (**Bild 31**) voneinander. Allgemein wird beim Schlagprüfstab erst nach längeren Nachdruckzeiten Massekonstanz erreicht. In die Kavität, die den Schlagprüfkörper abformt (**Bild 31** - Hintergrund), kann also längere Zeit Schmelze einfließen als in den Formhohlraum, der den Zugprüfkörper abformt (**Bild 31** - Vordergrund).

Bei der Untersuchung von Polystyroltypen mit dem Vergleichsprozess wurden für beide Formteile nahezu gleiche Siegelzeiten ermittelt.

Die Ursache für die Unterschiede im Siegelverhalten der beiden Formnester zwischen Polystyrol und Polypropylen ist der unterschiedliche Erstarrungsmechanismus der beiden Materialien. Die Erstarrung der Polystyrole erfolgt aufgrund der Unterschreitung der Glasübergangstemperatur (**Bild 34** - links). Polypropylene kristallisieren (**Bild 34** - rechts).

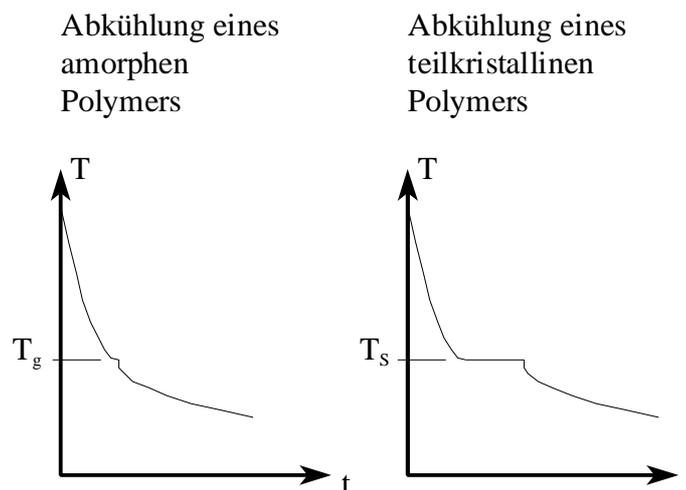


Bild 34 Lokale Abkühlung für ein amorphes und für ein teilkristallines Polymer

Der Kristallisationsgrad ist neben der Anzahl und der Verteilung von im Material enthaltenen Kristallisationskeimen vom Massedruck zum Zeitpunkt des Phasenübergangs und von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Damit wird die Zeit, durch die der Abkühlvorgang aufgrund der Kristallisation vermindert wird, von den technologischen Bedingungen beeinflusst.

Aufgrund des Erstarrungsmechanismus werden Prozesse, bei denen teilkristalline Polymertypen verarbeitet werden, eine größere Schwankungsbreite für die Siegelzeit aufweisen als Prozesse, bei denen amorphe Materialien verspritzt werden.

Die Festlegung der Nachdruckzeit für den jeweiligen Spritzgussprozess erfolgte immer nach dem Siegelverhalten des Zugprüfstabes, der entsprechend **EN ISO 527-2** "Prüfkörper 1A" gestaltet ist (**Bild 31** - Vordergrund), weil die Anbindungen der beiden unterschiedlichen Formnester geometrisch ähnlich ausgelegt sind. Die mehr als doppelt so große Masse des

Zugprüfkörpers gegenüber dem Schlagprüfstab bedeutet einen geringeren Anteil von absoluten Fehlerbestandteilen.

Tabelle 7 gibt die bei den jeweiligen Versuchen verwendeten Nachdruckzeiten an.

Tabelle 7 Nachdruckzeiten für die untersuchten Polypropylene

Materialprobe	minimales Druckniveau	favorisiertes Druckniveau	maximales Druckniveau
PP_N1	18s	18s	18s
PP_D	11s	11s	11s
PP_N2	22s	21s	23s
PPAng	16s	17s	17s
PPRec1	20s	20s	20s
PPRec2	16s	18s	18s
PPRecA	18s	18s	18s

Aus den in **Tabelle 7** gezeigten Werten ist ersichtlich, dass das vorherrschende Druckniveau nur einen geringen Einfluss auf die notwendige Nachdruckzeit eines Materialtyps hat.

Für die Probe mit dem Materialtyp PPN_2 wurde bei optimalem Spritzdruck ein Minimum für die notwendige Nachdruckzeit beobachtet (**Tabelle 7**). Diese Tendenz widerspricht der in [129] getroffenen Aussage. Nach dieser Quelle durchläuft die Siegelzeit über das wirksame Nachdruckniveau ein Maximum.

Die für die einzelnen Druckniveaus unterschiedlich lange eingeschätzten Nachdruckzeiten bei PP_N2 (**Anhang - Bild 7**), PPAng (**Anhang - Bild 10**) und PPRec2 (**Anhang - Bild 19**), sind auf Abweichungen der real aufgenommenen Siegeldiagramme von der in **Bild 30** gezeigten Idealform zurückzuführen.

Die in **Tabelle 7** erkennbaren unterschiedlichen Siegelzeiten bei verschiedenen Druckniveaus erklären sich also durch Messungenauigkeiten. Deshalb kann der Prozess bei abdriftenden Qualitätsmerkmalen durch eine Veränderung des Druckniveaus ausgeglichen werden, ohne dass eine Nachstellung der Nachdruckzeit erfolgen muss. Damit bestätigt sich die Höhe des Druckniveaus beim Spritzgießen für die untersuchten Polypropylene als geeignete und unabhängige Größe zur Prozessnachführung.

Bei der Materialprobe PPRec1 sind die Schwankungen zwischen den einzelnen Teilemassen so groß, dass eine realistische Einschätzung der notwendigen Nachdruckzeit nicht möglich ist (**Anhang - Bild 13**). Für diese Materialprobe wurde die Nachdruckzeit von 20s aus den bei der Untersuchung der anderen Materialtypen gewonnenen Erfahrungen festgelegt.

Der Siegelzeitpunkt unterscheidet sich bei den einzelnen untersuchten Materialtypen deutlich voneinander (**Tabelle 7**).

Beim leichtfließend eingestellten Novolen 1184 L ist der Siegelzeitpunkt erst nach doppelt so langer Zeit erreicht als bei Daplen BE50, das extrem hohe MFR-Werte zeigt (**Tabelle 3** – Seite 69).

Die Ursache für das schnelle Erstarren des schwer fließenden Materialtyps ist in einer schlechteren Druckübertragung in der Schmelze während der Nachdruckphase zu sehen.

Beim Füllen der Kavität mit Schmelze herrscht im Formhohlraum nahezu Umgebungsdruck. Zur Strömung der Schmelze steht in dieser Prozessphase die Druckdifferenz zwischen Massedruck im Stauraum des Spritzgussaggregats und dem Umgebungsdruck zur Verfügung. Während der Nachdruckphase wird die Schmelze komprimiert. Die für die Strömung des Polymers entscheidende Druckdifferenz ergibt sich dann aus dem um den Kompressionsdruck der Masse im Formhohlraum verminderten Druck im Schneckenorraum.

Aufgrund der geringen Druckdifferenz und der hohen Viskosität kommt bei Daplen BE 50 nur ein im Vergleich zu den anderen Polypropylenen sehr geringer Volumenstrom während der Nachdruckphase vor. Wegen der geringen Massebewegungen ist die dissipative Erwärmung der Schmelze in dem Gebiet der Anbindung der Kavität vernachlässigbar. Die Abkühlung findet bei nur geringem Masseaustausch statt.

Die scheinbar möglichen geringeren Zykluszeiten von Formteilen aus Daplen BE 50 bedeuten höhere Schwindungswerte. Das kann zu Qualitätsproblemen bei eng tolerierten Maßen führen. Zur Herstellung von Präzisionsteilen ist Daplen BE 50 daher wenig geeignet.

Bei der Betrachtung der Teilmassen der aus den unterschiedlichen Materialtypen hergestellten Probekörper bestätigt sich diese Argumentation. Aus **Bild 35** ist erkennbar, dass mit zunehmend notwendiger Nachdruckzeit die gemessene Formteilmasse zunimmt. Dies gilt für die hergestellten Zugprüfstäbe und die mit dem gleichen Prozess hergestellten Schlagprüfstäbe.

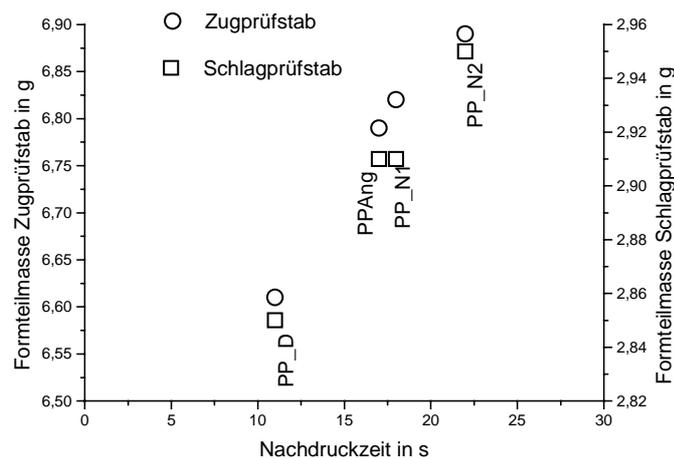


Bild 35 Die Beziehung Nachdruckzeit - Teilmasse für PPN_1, PP_D, PP_N2 und PPAng

Beim Spritzgießen von Polypropylen erstarrt die Schmelze im Anbindungsbereich, bevor genügend Masse zum Schwindungsausgleich in die Kavität gepresst wurde.

Das aus unverschmutzten Produktionsabfällen unterschiedlicher Materialtypen gewonnene Recyclat PPAng zeigt in **Bild 35** keine erkennbaren Unterschiede zu den untersuchten Neuwaren.

Die Formteilmasse der Postconsumer-Recyclate darf aufgrund von Verschmutzungen mit Fremdkörpern unterschiedlicher Dichte hier nicht mit betrachtet werden.

Beim Siegelverhalten der Recyclate sind keine Unterschiede gegenüber den mit dem Vergleichsprozess untersuchten Neuwaren zu erkennen. Das Siegelverhalten aller hier betrachteten Recyclate entspricht in etwa dem des Novolen 1102 H.

4.4.4 Reproduzierbarkeiten der Formteilmassen

Bei der Betrachtung der mittleren Formteilmassen wird deutlich, dass Spritzlinge aus Post-consumer-Recyclaten deutlich schwerer sind als die von Formteilen aus Neuwaren. Das gilt sowohl für Zugprüfstäbe (**Bild 36**) als auch für die hergestellten Schlagprüfstäbe (**Bild 37**).

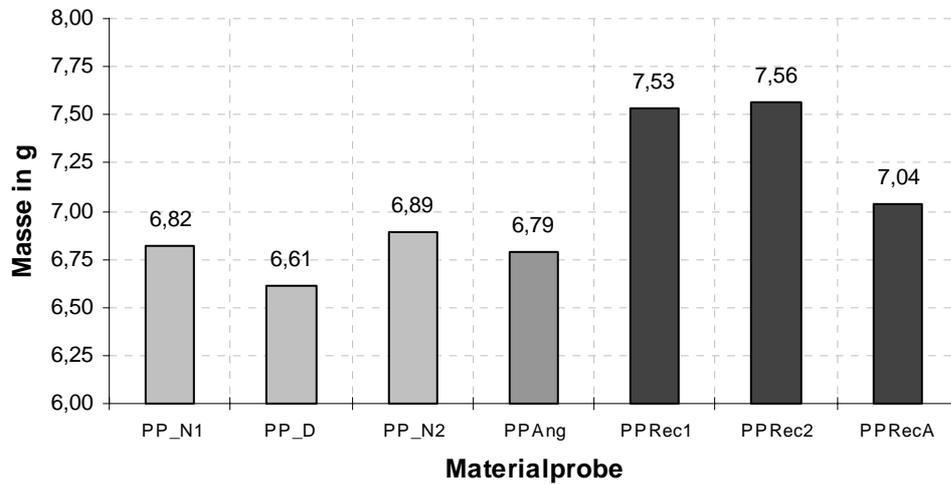


Bild 36 Mittlere Formteilmassen von Zugprüfkörpern aus den untersuchten Materialtypen

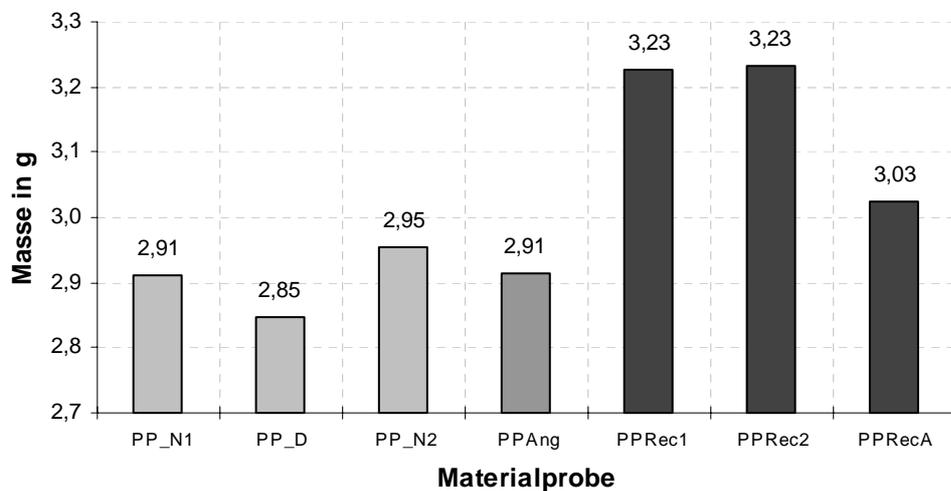


Bild 37 Mittlere Formteilmassen von Schlagprüfkörpern aus den untersuchten Materialtypen

Die Ursache für die höheren Formteilgewichte der Sekundärkunststoffe ist ein Anteil von Fremdmaterialien mit hohen Dichten im Recyclat. Dabei kann es sich um Verunreinigungen und Verschmutzungen handeln. Weiterhin ist ein Anteil von Talkum, Glasfasern oder ähnlichen Stoffen zur Modifizierung von Kunststoffen im Gebinde anzunehmen.

Die Anteile von schweren Fremdmaterialien sind in den Materialproben PPRec1 und PPRec2 größer als in PPRecA. Das erklärt die deutlich größere Masse von Formteilen aus PPRec1 und PPRec2 gegenüber Spritzlingen aus PPRecA.

Bei den Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit werden die Masseschwankungen von 30 nacheinander mit unveränderter Maschineneinstellung gefertigten Formteilen betrachtet.

Im **Anhang** sind die Formteilmassen von Spritzlingen aus den unterschiedlichen Materialtypen für den Schlag- und den Zugprüfstab dargestellt. **Tabelle 6** – Seite 73 – gibt eine Übersicht, an welcher Stelle diese Darstellungen im **Anhang** erfolgen.

Ein aufsteigender oder abfallender Trend wurde bei keiner dieser Darstellungen beobachtet. Die Herstellung der jeweils 30 Teile erfolgte stets bei einer stabilen Prozesslage ohne Abdriften einzelner Parameter.

Oberschwingungen sind bei der Herstellung von Spritzlingen aus Polypropylen-Neuware nicht erkennbar. Bei der Untersuchung von Zugprüfstäben aus Postconsumer-Recyclaten kann in den betreffenden Darstellungen (**Anhang - Bild 14**, **Anhang - Bild 17** und **Anhang - Bild 20**) eine Oberschwingung gedeutet werden.

Das Auftreten einer Oberschwingung beim Spritzgießen von Postconsumer-Recyclaten ist auf eine inhomogene Zusammensetzung des Ausgangsmaterials zurückzuführen. In den Phasen der Produktion von Formteilen mit großer Formteilmasse ist die Konzentration von schweren Fremdstoffen im Material besonders hoch. Werden relativ leichte Formteile hergestellt, sind weniger schwere Fremdstoffe in dem zu diesem Zeitpunkt verarbeiteten Ausgangsmaterial vorhanden.

Ein Maß für eine statistische Abweichung stellt die Standardabweichung dar [165].

In **Bild 38** wird die Standardabweichung der Teilegewichte von den 30 nacheinander hergestellten Zugprüfstäben aus den unterschiedlichen Materialtypen miteinander verglichen.

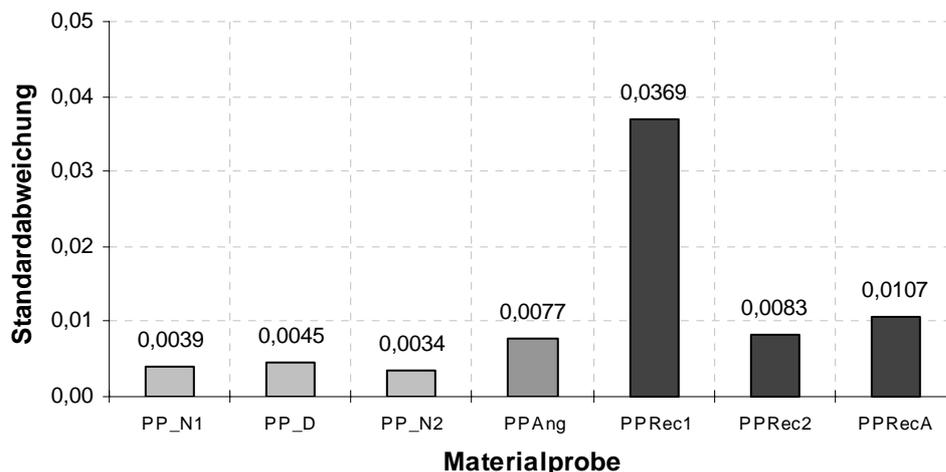


Bild 38 Standardabweichung des Teilegewichts von Zugprüfstäben

Mit **Bild 39** werden analog die für die einzelnen Materialtypen ermittelten Daten für Schlagprüfstäbe gegenübergestellt.

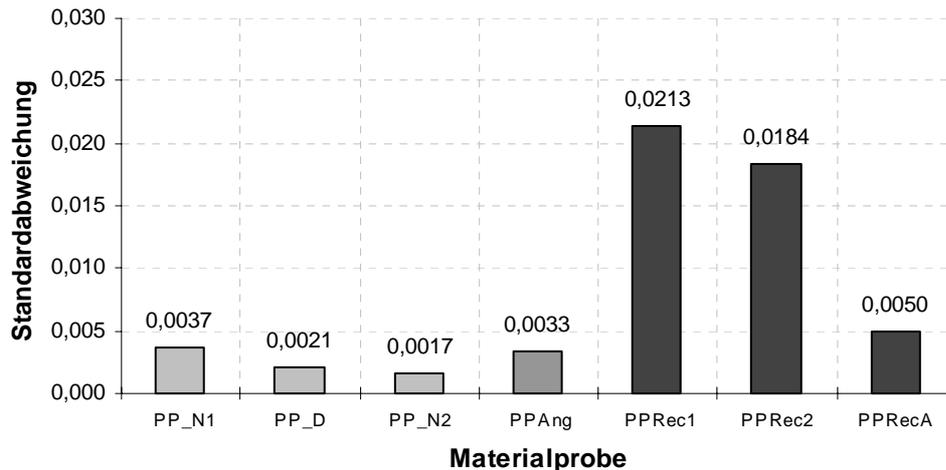


Bild 39 Standardabweichung des Teilgewichts von Schlagprüfstäben

Die Standardabweichungen für Prüfkörper aus den Materialproben PP_N1, PP_D und PP_N2 liegen auf gleichen Niveaus (**Bild 38** und **Bild 39**). Lediglich die Zugprüfstäbe aus PPAng zeigen eine leichte Überhöhung gegenüber den verarbeiteten Neumaterialien (**Bild 38**).

Dies ist auf eine in **Anhang - Bild 11** erkennbare Fraktionierung der Einzelmessungen zurückzuführen. Die ersten zehn hergestellten Zugprüfkörper haben eine etwas geringere Masse als die letzten zwanzig produzierten. Obwohl die Herstellung der beiden betrachteten Formteile aus einem Kombi-Werkzeug (**Bild 31**) in einem Schuss erfolgte, zeigt sich diese Fraktionierung bei den Schlagprüfstäben (**Anhang - Bild 12**) nicht. Eine naheliegende Erklärung für diese Erscheinung ist eine unbemerkte Dekalibrierung der zur Gewichtsbestimmung verwendeten Oberschalenwaage.

Bei der Verarbeitung im Vergleichsprozess von unverschmutztem Recyclat aus Produktionsabfällen ist die Reproduzierbarkeit der Teilemasse also nicht unbedingt schlechter als beim Spritzgießen von Neuware.

Die Standardabweichung der Teilgewichte für Formteile aus Postconsumer-Recyclaten ist wesentlich größer als bei Spritzlingen aus den Neuwaren (**Bild 38** und **Bild 39**). Die unterschiedlichen Konzentrationen von schweren Fremdstoffen im für den jeweiligen Schuss verarbeiteten Ausgangsmaterial sind die Erklärung dafür.

Besonders deutlich werden diese Dichteunterschiede bei der Verarbeitung der Probe PPRec1 (**Anhang - Bild 14** und **Anhang - Bild 15**).

Die Aufbereitung des Ausgangsmaterials war bei dieser Materialprobe auf das Sortieren und Einmahlen der Altteile beschränkt. Die Bruchstücke des Grobshredderware sind jeweils aus genau einem Altmaterial. Werden Postconsumer-Kunststoffen mit unterschiedlicher Dichte (beispielsweise aufgrund von Füllstoffen) eingemahlen, haben die einzelnen Bruchstücken des Mahlguts unterschiedlich große Dichten.

Das Gebinde muss als ein mehrphasiges Schüttgut betrachtet werden. Die Problematik bei der Vermischung von mehrphasigen Schüttgütern wird ausführlich in [166] sowie in [153] abgehandelt. Bekannt sind aus diesen Quellen Entmischungserscheinungen aufgrund unterschiedlicher Dichten und verschiedener Rieselfähigkeit der Partikel bei unterschiedlicher Bruchstückgeometrie.

Während der Plastifizierung erfolgt eine Homogenisierung der Formmasse. Dabei können aber nur kurzzeitig auftretende Dichteschwankungen des Ausgangsmaterials ausgeglichen werden (**Bild 40**).

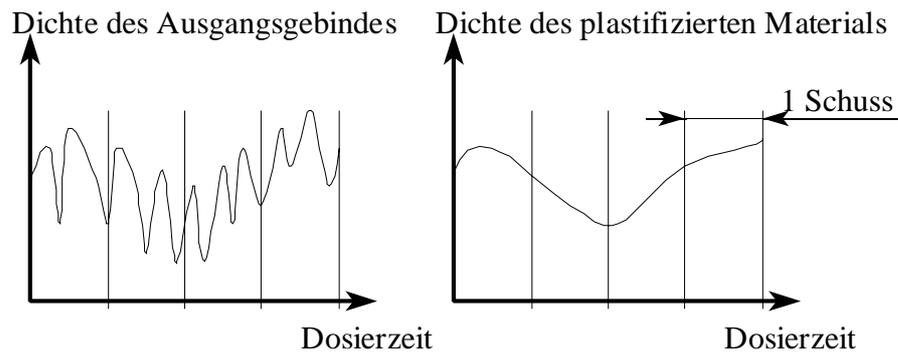


Bild 40 Homogenisierung von starken, längerfristigen Dichteunterschieden des Ausgangsgebundes nach dem Plastifiziervorgang (schematisch)

Längerfristig vorkommende Dichteunterschiede des Gebundes bleiben auch nach dem Plastifiziervorgang erhalten (**Bild 40** - rechts).

Plastifiziersysteme mit einem großen Rückströmungsanteil sind eher in der Lage, Dichteunterschiede über längere Zeiträume auszugleichen, als Schnecke-Zylinderpaarungen mit geringem Rückströmungsanteil. Mit großen Zylinderdurchmessern und tief geschnittenen Schnecken sowie mit hohen Staudrücken können Dichteunterschiede über längere Zeiträume ausgeglichen werden.

Werden die aus PPRec1 hergestellten Kunststoffteile eingemahlen, ist die Verteilung der Fremdpartikel im Gebinde PPRec2 wesentlich homogener. Die einzelnen Bruchstücke enthalten im Innern zwar mehrere Phasen, zeigen aber analoge Rieseigenschaften und haben ähnliche Dichten. Die zu erwartende Entmischung des Schüttguts im Trichter der Spritzgussmaschine ist dann geringer. Das Gebinde zur Herstellung von PPRec2 (eingemahlene Produktionsabfälle aus PPRec1) kann deshalb als einphasiges Schüttgut betrachtet werden.

Noch vorhandene geringe Dichteunterschiede der Bruchstücke wirken so nur kurzzeitig und können während des Plastifiziervorgangs besser ausgeglichen werden (**Bild 41**).

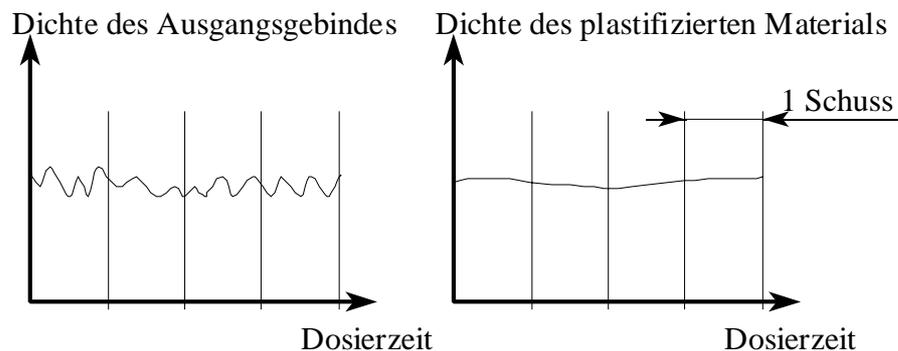


Bild 41 Homogenisierung von geringen, kurzzeitigen Dichteunterschieden des Ausgangsgebundes nach dem Plastifiziervorgang (schematisch)

Dieser Zusammenhang begründet die geringere Standardabweichung der Teilgewichte für Zugprüfkörper aus PPRec2 gegenüber denen aus PPRec1 (**Bild 38**).

Die Ursache für die im Vergleich zu **Bild 38** relativ große Standardabweichung für die Formteilmasse von Schlagprüfkörpern aus PPRec2 (**Bild 39**) ist eine einmalig aufgetretene Fehlmessung beim 27. Schlagprüfkörper der Maschinenfähigkeit (**Anhang - Bild 18**).

Die Aufbereitungsmethode der Materialprobe PPRecA ist identisch mit PPRec1.

Die ermittelten Standardabweichungen für die Teilmasse liegen jedoch auf einem deutlich geringeren Niveau und sind mit den für die Materialprobe PPRec2 ermittelten Werten vergleichbar (**Bild 38** und **Bild 39**).

Die Anzahl von Einzelteilen und die Vielfalt der Funktionsanforderungen an Stoßfänger, aus denen PPRecA gewonnen wurde, ist viel geringer als bei Waschgeräten. Deshalb werden weniger unterschiedliche Materialtypen zur Herstellung von neuen Stoßfängern eingesetzt. Die Verwendung von mit Glasfasern oder mit Mineralien gefüllten Kunststoffen ist nicht üblich. Allerdings werden Schlagzähmodifikationen durchgeführt. Die Modifikatoren bestehen jedoch ebenfalls aus polymerem Material und haben deshalb eine ähnliche Dichte wie das Polypropylen.

Die Bruchstücke zeigen relativ gleichmäßige Verschmutzungen. Entmischungerscheinungen aufgrund von Dichteunterschieden der Bruchstücke sind nicht zu erwarten. Noch vorkommende Dichteunterschiede sind kurzzeitig und werden beim Plastifizieren der Formmasse ausgeglichen. Für die Materialprobe PPRecA gelten so die in **Bild 41** gezeigten Zusammenhänge.

4.5 Einordnung der Verarbeitungseigenschaften der mit dem Vergleichsprozess untersuchten Recyclattypen

Zur Beurteilung der technologischen Eigenschaften von Recyclaten werden mit dem Vergleichsprozess zwei Gruppen von Werkstoffen gegenübergestellt. Die eine Gruppe umfasst die untersuchten Neuwaren, deren Rohstoffeigenschaften aus Datenbanken bekannt sind und für die Erfahrungswerte bei der Verarbeitung vorliegen. Die andere Gruppe bilden die Recyclate mit unbekanntem Rohstoffdaten. Die für die einzelnen Materialtypen im Vergleichsprozess ermittelten technologischen Fenster werden miteinander verglichen und aus diesen das Verarbeitungsverhalten der Recyclate abgeleitet (**Bild 2**).

Die Lage der Verarbeitungsfenster von PPRec1 und PPRec2 sowie PPAng ist ähnlich der Lage des Verarbeitungsfensters von PP_N1. Bei der Materialprobe PPRecA wurde ein Verarbeitungsfenster beobachtet, das mehr dem technologischen Fenster von Novolen 1184 L entspricht, als dem von PP_N1.

Die Breite des Verarbeitungsfensters ist für das aus unverschmutzten Produktionsabfällen gewonnene Recyclat PPAng geringer als für die Neuwaren. Bei Postconsumer-Recyclaten wurde ein breiteres Verarbeitungsfenster als bei Neuwaren ermittelt.

Bei abweichenden Qualitätsmerkmalen hat man bei der Verarbeitung von PPAng aufgrund des schmalen Verarbeitungsfensters einen geringeren Spielraum als beim Spritzgießen von Neuwaren. Beim Einsatz von Postconsumer-Recyclaten kann zur Reaktion auf abweichende Qualitätsmerkmale der Prozess in einem größeren technologischen Fenster gesteuert werden als bei den untersuchten Neuwaren. Für die allgemein als verarbeitungstechnisch problematisch eingeschätzten Postconsumer-Recyclate hat man also einen breiten Reaktionsspielraum zur Verfügung.

Das Siegelverhalten aller untersuchter Recyclate entspricht etwa dem von Novolen 1102 H.

Bei der Beurteilung der Maschinenfähigkeit von Spritzgussteilen aus Neuware wird aus der Standardabweichung der Formteilmasse von 30 nacheinander gefertigten Teilen eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Funktionsmaße abgeleitet. Prozesse, für die eine geringe Standardabweichung charakteristisch ist, werden als gut reproduzierbar eingeschätzt.

Die Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Funktionsmaße mit der Standardabweichung der Teilemasse setzt in jedem Fall eine konstante Dichte des Ausgangsmaterials voraus. Das ist nur bei der Verarbeitung von Neuware gegeben. **Bild 40** zeigt, dass bei der Verarbeitung von Postconsumer-Recyclaten Dichteschwankungen des Ausgangsmaterials sich auf die Massekonstanz der Formteile auswirken. Die Folgerung, dass die Reproduzierbarkeit von Funktionsmaßen bei Spritzgussteilen aus Recyclat aufgrund der größeren Standardabweichung der Formteilmasse schlechter ist, als bei Spritzlingen aus Neuware, ist aufgrund der möglichen Dichteunterschiede in Recyclatgebinden nicht korrekt.

Die Beurteilung der Prozesssicherheit von Formteilen mit hohen Anforderungen an die geometrischen Eigenschaften muss beim Einsatz von Recyclatmaterialien über die Vermessung von Funktionsmaßen erfolgen. Erst diese Vorgehensweise lässt eine Aussage über die Maßgenauigkeit der hergestellten Teile zu.

Vergleicht man die Ergebnisse des in der vorliegenden Arbeit ausgeführten Vergleichsprozesses, wird deutlich, dass alle untersuchten Recyclate etwa dem Materialtyp Novolen 1102 H entsprechen. Die Abweichungen zu Daplen BE50 sind am stärksten ausgeprägt (**Bild 42**).

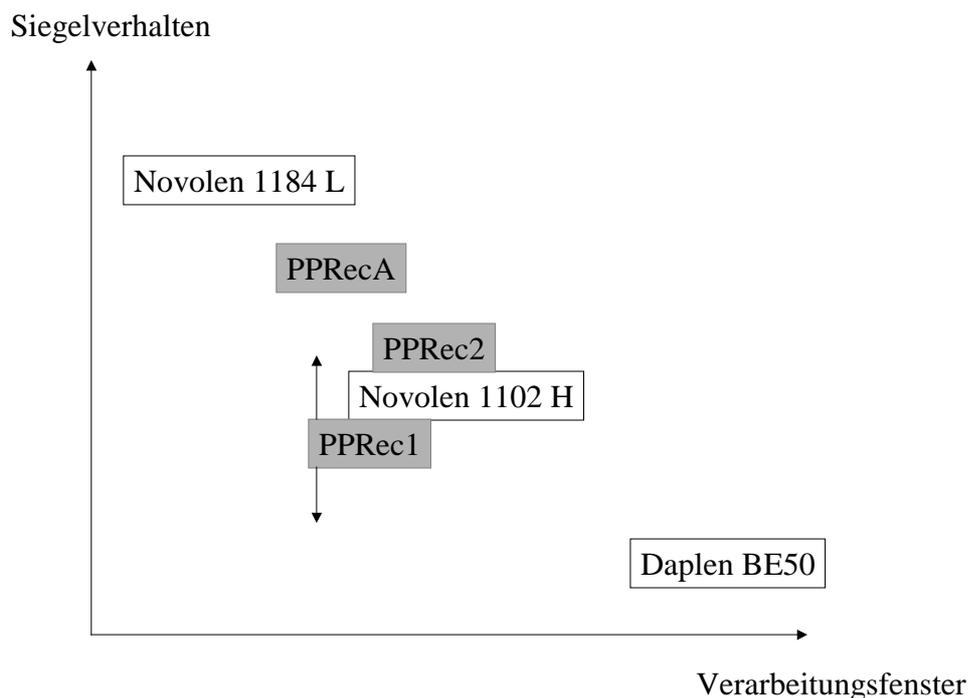


Bild 42 Einordnung der Verarbeitungseigenschaften von Neuwaren und Recyclattypen durch den hier angewendeten Vergleichsprozess

Die für PPAng ermittelten technologischen Eigenschaften sind nahezu identisch mit denen von PP_N1, so dass auf die Darstellung dieses Materialtyps in **Bild 42** verzichtet wurde.

Aufgrund der mit Hilfe des Vergleichsprozesses gewonnenen Erkenntnisse bietet sich ein Einsatz der Recyclate für Erzeugnisse an, die bisher aus Novolen 1102 H hergestellt wurden.

Auch bei Formteilen, deren Herstellung sonst aus Novolen 1184 L erfolgt, sollte die Anwendbarkeit von PPRecA am konkretem Prozess untersucht werden.
Als Materialersatz für Daplen BE 50 sind alle hier untersuchten Recyclate ungeeignet.

Aufgrund der mit dem Vergleichsverfahren gefundenen Ähnlichkeiten zwischen Recyclaten mit unbekanntem Materialeigenschaften und Neuwaren, für die Rohstoffkennwerte bekannt sind und Erfahrungen bei der Spritzgussverarbeitung vorliegen, kann das Risiko des in **Bild 17** gezeigten Prozesses der Erzeugnientwicklung wesentlich vermindert werden. Soll das Verarbeitungsverhalten eines mit dem Vergleichsverfahren untersuchten Recyclats eingesetzt werden, ist man nun in der Lage, bereits während der Konstruktion und Kalkulation auf charakteristische Rohstoffdaten zurück zu greifen (**Bild 43**).

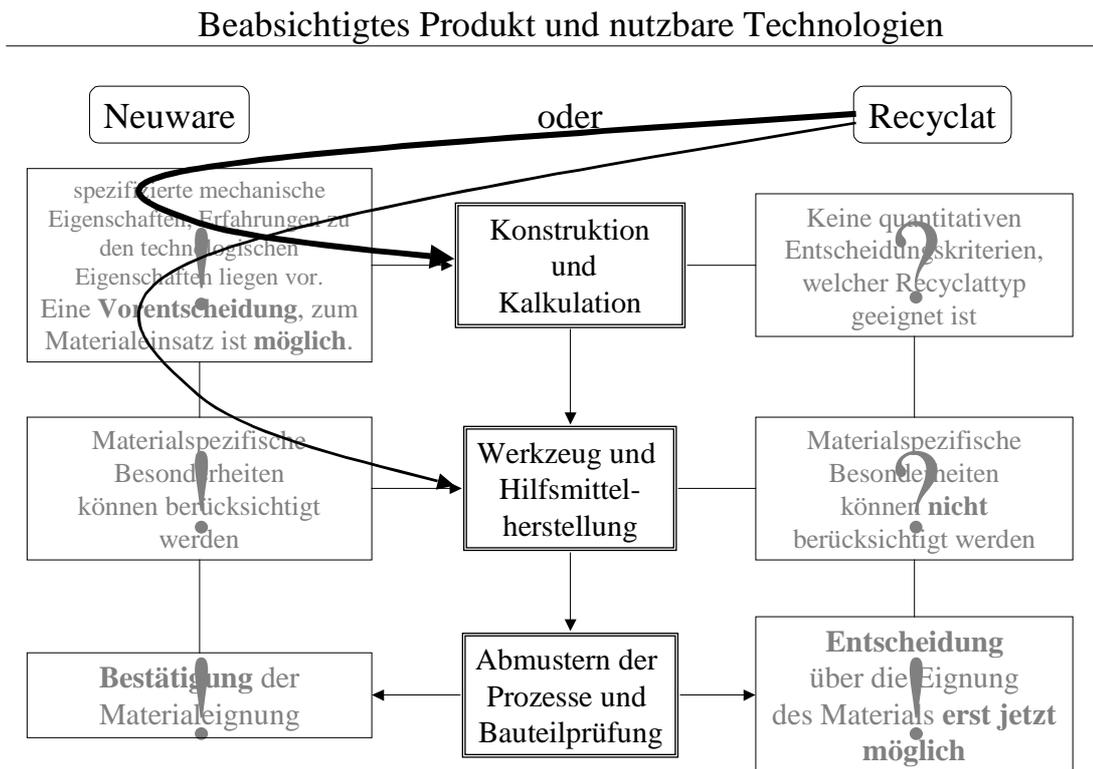


Bild 43 Anwendung der Ergebnisse des Vergleichsverfahrens beim Entwicklungsprozess von Kunststoffprodukten aus Recyclaten

Aufgrund der Ergebnisse des hier untersuchten Vergleichsprozesses können nun im Entwicklungsprozess für die unbekanntem Materialeigenschaften der Postconsumer-Recyclate PPRec1 und PPRec2 die bekannten Rohstoffdaten von Novolen 1102 H angesetzt werden. Die Charakterisierung der Materialdaten von PPRecA ist durch eine Mittlung der jeweiligen Rohstoffdaten von Novolen 1102 H und Novolen 1184 L möglich.

4.6 Weitere Anwendungen für das Vergleichsverfahren

4.6.1 Andere untersuchte Polymersorten

Das Vergleichsverfahren wurde neben der ausführlich beschriebenen Charakterisierung von Polypropylentypen auch auf Polystyrole und Polyethylene angewendet.

Für beide Kunststoffsorten wurde die grundsätzliche Eignung des Vergleichsverfahrens zur Einordnung von Polymertypen mit unbekanntem Rohstoffeigenschaften in eine Reihe von bekannten Kunststofftypen nachgewiesen.

Sowohl bei Polystyrol als auch bei Polyethylen wurden bei der Untersuchung der einzelnen Polymertypen deutliche Unterschiede der jeweils realisierbaren technologischen Fenster festgestellt.

Charakteristisch für Polystyrole sind die gegenüber Polypropylenen wesentlich geringer ausfallenden Unterschiede der einzelnen typspezifischen Siegelzeiten.

Bei Polyethylenen-Recyclaten besteht das Problem, dass in vielen Fällen PE-HD und PE-LD-Typen miteinander vermischt vorliegen. Eine saubere Trennung beider Fraktionen bei der Demontage der Baugruppen ist Voraussetzung für einen aussagefähigen Materialvergleich der Recyclate mit PE-HD beziehungsweise PE-LD-Neuwaren.

4.6.2 Anwendung des Vergleichsverfahrens zur Wareneingangskontrolle

Weil die Materialeigenschaften eines Kunststofftyps sein Prozessverhalten bestimmen (**Bild 1**) werden gleiche Kunststofftypen mit identischen Rohstoffeigenschaften immer ein gleiches Prozessverhalten zeigen. Dabei muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass die von der Verarbeitungsmaschine und dem –werkzeug ausgehenden Einflüsse während der Untersuchung unverändert bleiben.

Neben der bereits ausführlich beschriebenen Anwendung des Vergleichsverfahrens zur Klassifizierung von unterschiedlichen Kunststofftypen kann man einen Vergleichsprozess anwenden, um die Typgleichheit von vermutlich gleichen Kunststoffmengen nachzuweisen. So können die üblichen Verfahren der Wareneingangskontrolle durch aussagefähige prozessnahe Untersuchungen ergänzt werden. Das ist effektiv, wenn ein Recyclat für die Verarbeitung in mehreren Spritzgussprozessen zur Herstellung unterschiedlicher Erzeugnisse vorgesehen ist.

Zum Nachweis der Eignung des Vergleichsverfahrens zur Wareneingangskontrolle wurden die beschriebenen Versuche für die zu überprüfende Charge mehrmals wiederholt.

Erfolgte die Versuchswiederholung zeitnah, ergaben sich stets die gleichen Verarbeitungseigenschaften wie bei der Untersuchung der Urcharge. In diesem Fall ist die Eignung des hier entwickelten Vergleichsverfahrens zur Wareneingangskontrolle gegeben.

Bei einer mehrfachen Wiederholung der Versuche nach etwa einem Jahr waren die dann ermittelten Ergebnisse reproduzierbar, wichen jedoch von den in der Vergangenheit bestimmten Werten ab. Als Ursache wurden Veränderungen an den als konstant angenommenen Maschinen- und Werkzeuggrößen vermutet. So kann sich beispielsweise die Viskosität des Hydrauliköls der Spritzgussmaschine durch fortschreitenden Verschleiß verändern. Die Effektivität der Werkzeugkühlung kann aufgrund von Kalkablagerungen in den Kühlkanälen vermindert sein.

Um die Vermutung zu beweisen, erfolgte ein Kontrollversuch mit einem definiertem Neumaterial identischer Charge. Auch hier kam es zu einer Abweichung der neuen

Ergebnisse von den in der Vergangenheit ermittelten, so dass man von einer unveränderten Konstellation Maschine – Werkzeug ausgehen muss.

Der hier angewendete Vergleichsprozess ist also nur über relativ kurze Zeit zur Wareneingangskontrolle ungeeignet, weil nur dann reproduzierbare Maschineneinstellungen gegeben sind.

Wird bei einem Vergleichsprozess das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren angewendet, liegen aufgrund der Messwerterfassung unmittelbar an der erkaltenden Kunststoffschmelze weniger Umgebungseinflüsse vor. Ein solcher Vergleichsprozess ist deshalb zur Wareneingangskontrolle besser geeignet.

Bei einer geplanten Anwendung des Vergleichsverfahrens zur Wareneingangskontrolle sollte deshalb das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren angewendet werden, um die Vorteile einer prozessnahen Wareneingangskontrolle von Recyclaten zu realisieren.

Derzeit angewendete Verfahren der Wareneingangskontrolle sind die Bestimmung der MFR-Werte nach **EN ISO 1133**, die Ermittlung der Rohstoffdichte, die Messung des Schmelzpunktes oder der Wärmeformbeständigkeit [167].

Bei all diesen Verfahren wird nur eine sehr geringe Stichprobe des Rohstoffes untersucht, die aufgrund des inhomogenen Charakters von Postconsumer-Mahlgütern oft nicht für die gesamte Menge repräsentativ ist. Der zur Beurteilung des Fließverhaltens herangezogene MFR-Wert ist zur komplexen Charakterisierung der Zusammenhänge beim Spritzgießen ungeeignet, weil nur das Fließverhalten der Schmelze bei lediglich einer Schergeschwindigkeit gemessen wird [168]. Materialkennwerte, die praxisnahe Bedingungen beschreiben, sind zur Beurteilung der technologischen Eigenschaften wesentlich besser geeignet als der Schmelzindex [117].

Mit der hier dargestellten Anwendung des Vergleichsverfahrens zur Wareneingangskontrolle bestimmt man die verarbeitungsrelevanten Größen unmittelbar beim Spritzgussprozess. So verbessert man die Prozesssicherheit bei der Formteilherstellung. Produktionsunterbrechungen werden vermieden, was sich positiv auf den Unternehmensgewinn auswirkt.

Der Nachteil einer Wareneingangskontrolle mit Hilfe des Vergleichsverfahrens ist, dass die ermittelten prozessspezifischen Daten derzeit durch keine gesetzliche Norm geregelt ist. So findet diese Art der Qualitätskontrolle bei Lieferantenauditorien keine Anerkennung.

5 Materialeigenschaften von Recyclaten und Möglichkeiten zu deren Verbesserung

5.1 Die mechanischen Eigenschaften von Prüfkörpern aus den untersuchten Polypropylentypen

Im Zusammenhang mit weiteren wissenschaftlichen Arbeiten [169] wurden die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Prüfkörper untersucht. Es wurde die Kerbschlagzähigkeit nach EN ISO 179/1eA ermittelt und der Zugversuch nach EN ISO 527-1 durchgeführt.

Für die Werte der Kerbschlagzähigkeit zeigten die untersuchten Recyclate aus Produktionsabfällen und die aus Waschgeräten demontierten Altkunststoffe keine signifikant schlechteren Ergebnisse als die untersuchten Neuwaren (**Bild 44**).

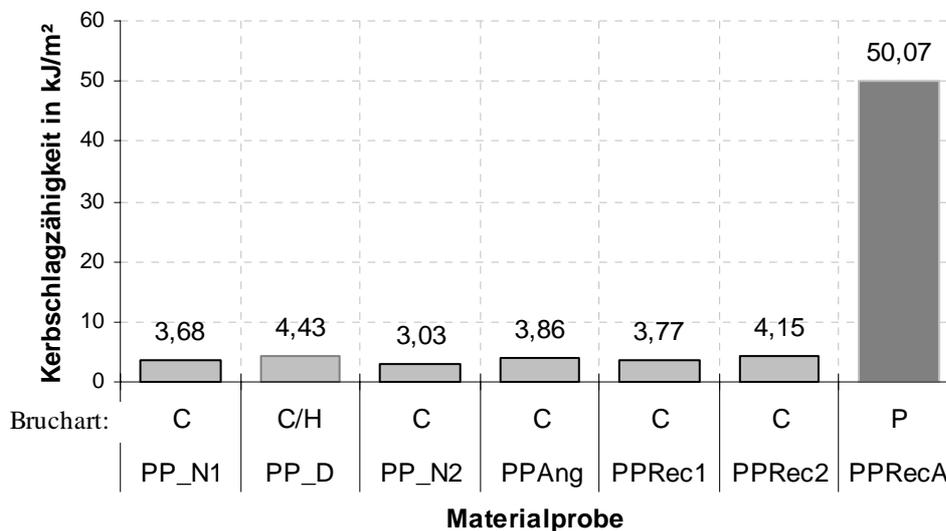


Bild 44 Werte der Kerbschlagzähigkeit nach EN ISO 179/1eA für unterschiedliche mit dem Vergleichsprozess verarbeitete Materialtypen

Das widerspricht Beobachtungen von Lutterbeck in [33], nach denen die Werte der Kerbschlagzähigkeit von Recyclaten nur bei der Hälfte der an Neuwaren bestimmten Ausgangswerte liegen.

Die Ursache dafür ist in der Vielfalt der unterschiedlichen Wirkmechanismen von Fremdmaterialien in Recyclaten zu sehen. Die an einem bestimmten Recyclattyp beobachteten Eigenschaften dürfen deshalb nicht als allgemeingültig angesehen werden.

Die in **Bild 44** erkennbare extreme Überhöhung der Kerbschlagzähigkeit von Prüfkörpern aus PPRecA ist auf die Modifizierung des Ausgangsmaterials zurückzuführen. Diese Kunststofftypen werden schlagzäh modifiziert, um für den Anwendungszweck als Stoßfänger optimale Eigenschaften sicherzustellen und dürfen nicht an den hier untersuchten Standard-Polypropylenen gemessen werden. Nach [72] ist bei diesen modifizierten Materialien die Kerbschlagzähigkeit nach dem Einsatz so stark vermindert, dass ein Recyclateinsatz zur erneuten Herstellung von Stoßfängern nicht möglich ist. Lediglich eine Zugabe bis zu 20%

Recyclat zur Neuware ist nach [170] zur Herstellung von neuen Stoßfängern möglich.

Bei der Durchführung der Zugversuche wurden für die Prüfkörper aus PPAng den Neuwaren ähnliche Kurvenverläufe ermittelt. Der Zug-E-Modul ist geringfügig erhöht (**Bild 45**).

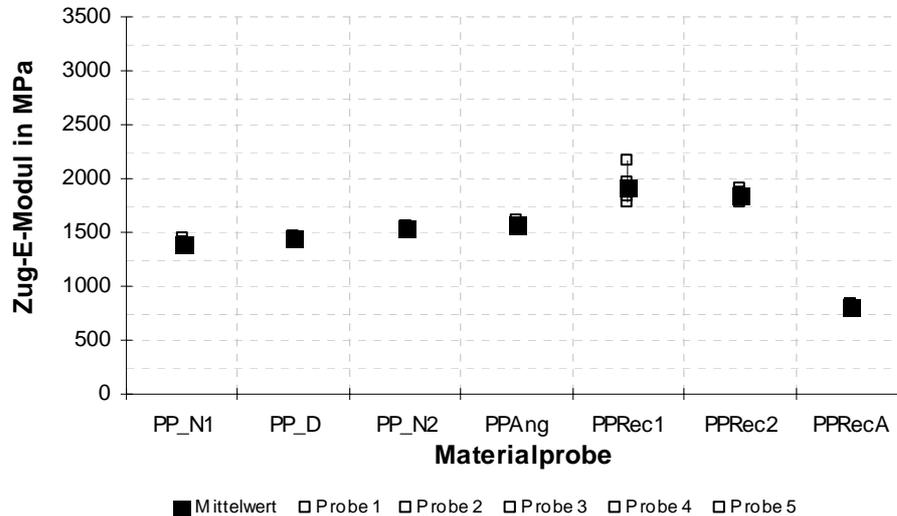


Bild 45 Zug-E-Modul für mit dem Vergleichsprozess hergestellte Prüfkörper aus unterschiedlichen Materialtypen

Aus anwendungstechnischer Sicht ist diese Abweichung unbedenklich.

Der Zug-E-Modul von Prüfkörpern aus PPRec1 und PPRec2 ist deutlich höher als bei den untersuchten Neuwaren (**Bild 45**). Die Ursache sind feste Einlagerungen, die eine verstärkende Wirkung haben.

Konstruktionen, bei denen aus Waschgeräten gewonnenes Polypropylen an Stelle von Standard-Polypropylen eingesetzt werden soll, müssen vollständig überarbeitet werden. Werkzeugänderungen werden in den meisten Fällen notwendig sein.

Der Zug-E-Modul von Prüfkörpern aus PPRecA ist deutlich geringer (**Bild 45**) als bei den untersuchten Neuwaren. Die Ursache für die geringere Steifigkeit des aus Stoßfängern gewonnenen Recyclats gegenüber Standard-PP-Neuwaren ist die Schlagzäh-Modifizierung des Materials für den ursprünglichen Einsatzzweck.

Auch hier ist bei einer geplanten Werkstoffsubstitution von Standard-Polypropylen durch das aus Stoßfängern gewonnene Recyclat die konstruktive Überarbeitung der Erzeugnisse und der jeweiligen Werkzeuge notwendig.

Die mit Prüfkörpern aus PPRec1 oder PPRec2 aufgenommenen Spannungs-Dehnungs-Kurven sind durch einen vorzeitigen Bruch charakterisiert. Als Ursache für das Versagen bereits bei geringen Deformationen wurden makroskopische Inhomogenitäten im Prüfkörper erkannt, die an deren Bruchflächen mehr oder weniger deutlich zu erkennen sind.

Probekörper aus PPRecA können ähnlich weit gedehnt werden wie Prüflinge aus Neuware. Allerdings werden bei der Verformung nur halb soviel Spannung aufgenommen wie bei den untersuchten Neumaterialien.

5.2 Möglichkeiten zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Recyclaten

5.2.1 Nachstabilisierung von Recyclaten

Mit der Stabilisierung von Polymeren wird erreicht, dass Folgereaktionen unterbleiben, die zu einer Veränderung des Makromoleküls führen. Durch Startreaktionen gebildete Radikale werden durch Stabilisierungsmittel gebunden.

Mit zunehmender Anzahl von abgebundenen Radikalen lässt die Wirksamkeit von Stabilisierungsmitteln nach. Bei Recyclaten sind die Stabilisierungsmittel in vielen Fällen verbraucht und unwirksam.

Um die Folgereaktionen weiterhin erfolgreich zu unterbinden, ist eine nachträgliche Zugabe von Stabilisierungsmitteln möglich. Man bezeichnet diesen Aufbereitungsschritt als Nachstabilisierung.

Möglichkeiten zur Stabilisierung von Polypropylenen und die unterschiedlichen Stabilisierungsmechanismen sind aus der Literatur bekannt [171], [172], [173], [174], [175].

5.2.2 Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Homogenisierung der Recyclate

Als Ursache für einen vorzeitigen Bruch der Proben aus Recyclat, das von verschrotteten Waschgeräten gewonnen wurde, wurden großvolumige Fremdkörper erkannt. Gelingt es, das Volumen von in der Matrix eingelagerten Fremdkörpern zu vermindern, verringern sich die bei Zugbelastung vorkommenden Spannungsspitzen. Wird dies realisiert, ist eine deutliche Steigerung der Materialeigenschaften von Postconsumer-Recyclaten zu erwarten.

Dies kann durch die Abtrennung von Fremdstoffen aus dem Recyclat erfolgen. Eine andere Möglichkeit ist, nach einer Zerkleinerung der eingelagerten Fremdkörper deren gleichmäßige Verteilung im hergestellten Erzeugnis zu realisieren. Damit wird die Wirkung der mechanischen Schwachstellen vermindert. Eine kostengünstige Möglichkeit ist der Einsatz von statischen Mischelementen an der Plastifiziereinheit von Spritzgussmaschinen.

5.2.2.1 Anwendung des Schwimm-Sink-Trennverfahrens bei Polypropylen-Postconsumer-Recyclaten

Die Dichte von reinem Polypropylen beträgt 0,9 bis 0,907 g/cm³ [21] und ist damit etwas geringer als die des Wassers. Die meisten anderen Polymere haben eine größere Dichte als Wasser. Deshalb schwimmen PP-Partikel an der Oberfläche eines Wasserbades, während sich die schweren Fremdmaterialien am Boden des Trenngefäßes ansammeln, wenn ein mit Fremdstoffmahlgut versetztes Polypropylenrecyclat in ein Trennbad gegeben wird.

Eine vollständig Abtrennung von Fremdmaterialien ist allerdings nicht möglich. Auch Polyethylene haben eine geringere Dichte als Wasser. Alle Bruchstücke aus geschäumten Fremdmaterialien sind in der Schwimmfraktion vorhanden. Haften an den einzelnen Polypropylenbruchstücken Fremdmaterialien direkt an, können sie ebenfalls aufschwimmen.

Auch Bruchstücke aus gefüllten Polypropylyentypen haben aufgrund der eingebundenen Füllstoffe – beispielsweise Glasfasern - eine größere Dichte als Wasser. Dadurch wird der Anteil von füllstoffhaltigen Materialtypen im Recyclat vermindert. Die Auswirkungen der in **Kapitel 2.1.2.2** diskutierten festen Einlagerungen sind dadurch bei dem aus der Schwimmfraktion gewonnenem Recyclat geringer.

Die Anwendung der Schwimm-Sink-Trennung erfordert eine energieaufwendige Trocknung des Recyclats, um die Restfeuchte auf ein für die Verarbeitung unbedenkliches Maß zu reduzieren und so die in **Kapitel 2.1.2.4** beschriebene Wirkung von im Schmelzzustand gasförmigen Fremdstoffen (Wasser) zu vermeiden.

Das Schwimm-Sink-Verfahren kann kostenneutral zur Stofftrennung eingesetzt werden, wenn bereits die Zerkleinerung im Nassmahlverfahren erfolgte.

Für die Abnahme der Schwimmfraktion aus dem Wasserbad haben sich im Laborversuch Siebe bewährt. Auf diese Weise wird der Staubanteil im Mahlgut gering gehalten. Das vermindert Einzugsprobleme beim Spritzgießen.

Das Recyclat PPreCSF wurde gewonnen, indem Mahlgut PPreC1 (**Tabelle 2** – Seite 68) im Schwimm-Sink-Trennverfahren aufbereitet wurde. Die Schwimmfraktion (PPreCSF) umfasste etwa 80%, die Sinkfraktion entsprechend 20% des Aufgabematerials.

Durch die Abtrennung der Schwerfraktion wird eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von aus Waschgeräten gewonnenen Recyclaten erreicht. Im Zugversuch kommt es bei dem so aufbereitetem Material erst nach deutlich größeren Dehnungen zum Bruch (**Bild 46**).

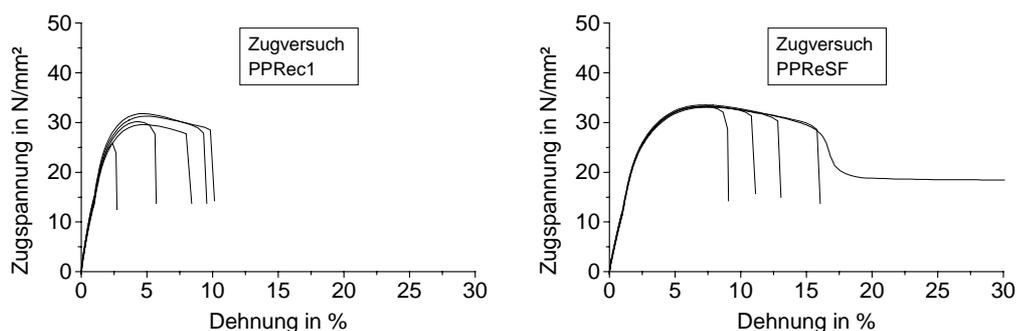


Bild 46 Spannungs-Dehnungs-Diagramme von nicht aufbereitetem Recyclat PPreC1 und der daraus gebildeten Schwimmfraktion PPreCSF

Das technologische Verhalten im Vergleichsprozess der Schwimmfraktion PPreCSF ist nahezu identisch mit den für PPreC1 ermittelten Eigenschaften.

Bei dem aus Autoteilen gewonnenen Recyclat PPreCA wurde nach der Anwendung des Schwimm-Sink-Verfahrens ein Anteil der Sinkfraktion von unter einem Prozent ermittelt. Das lässt auf einen geringen Anteil von Fremdmaterialien im Recyclat schließen. Die mechanischen Eigenschaften der Schwimmfraktion bleiben auf dem gleichen Niveau wie bei dem nicht aufbereiteten Recyclat.

5.2.2.2 Einsatz von statischen Mischelementen für Spritzgussmaschinen bei der Recyclatverarbeitung

Gegenüber den klassischen Homogenisierungsverfahren mit Hilfe von Ein- oder Doppelschneckenextrudern hat der Einsatz von statischen Mixern in Spritzgussmaschinen zur Recyclatverarbeitung folgende Vorteile:

- Es erfolgt kein mehrmaliges Aufschmelzen der Masse. Die thermische Belastung des Materials ist somit gering.

- Entmischungserscheinungen beim Wiederaufschmelzen kommen nicht vor.
- Für die Homogenisierung ist nur geringfügig zusätzliche Energie erforderlich.
- Es entstehen keine zusätzlichen Prozesskosten.
- Die Investitionskosten für statische Mischelemente sind gering.
- Für die Durchführung der Materialhomogenisierung werden keine zusätzlichen Stellflächen benötigt.
- Der mit dem Spritzgussprozess vertraute Personalbestand muss nicht erweitert werden.
- Die Anpassung an die konkreten Materialien kann durch den einfachen Austausch von auf den jeweiligen Anwendungsfall hin optimierten statischen Mischelementen erfolgen.
- Die Homogenisierung von kleinen Mengen ist problemlos möglich.

Statische Mischelemente sind vor der Düse der Spritzgussmaschine angeordnet (**Bild 47**). Sie werden so beim Einspritzen der Masse in das Werkzeug durchströmt und vermengen die Schmelze unmittelbar vor dem Abformen der Kavität.

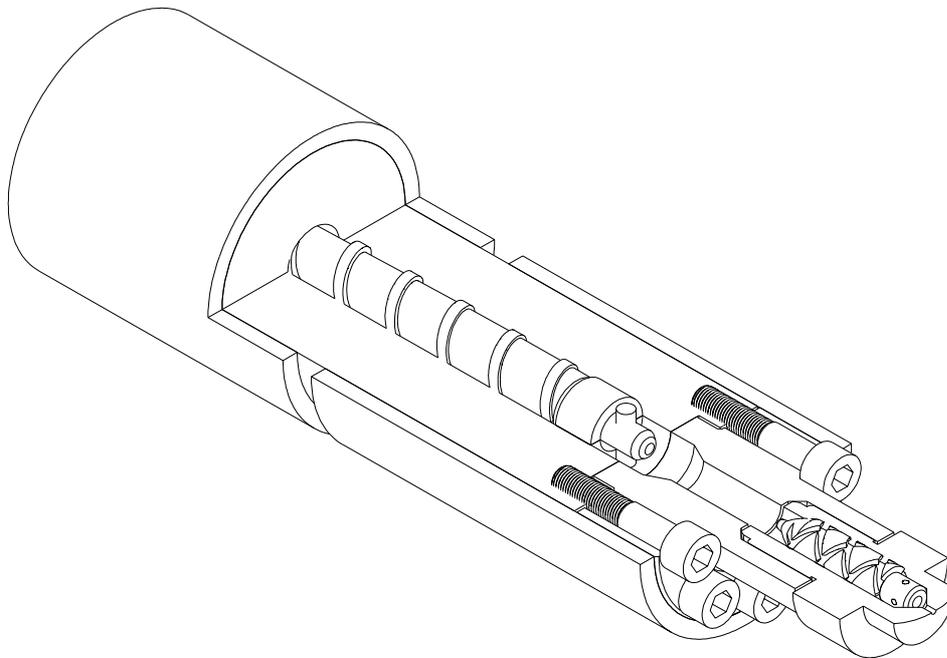


Bild 47 Anordnung eines statischen Mischelements an der Plastifiziereinheit einer Spritzgussmaschine

Die Verwendung von statischen Mischelementen bei der Verarbeitung von vermischten Kunststoffabfällen ist aus der Literatur bekannt [176]. Auch zur Homogenisierung von eingefärbten Neukunststoffen werden statische Mischelemente in Spritzgussmaschinen verwendet [177]. Bei der Optimierung von statischen Mixern besteht jedoch noch ein großer Forschungsbedarf [177].

Grundsätzlich werden für statische Mischer die Prinzipien Scherung und Massekonvektion angewendet. Das Prinzip Scherung erfordert eine höhere Druckreserve der Spritzgussmaschine.

Für die Anwendung von statischen Mischern zur Verarbeitung von Recyclaten muss aufgrund der Größe der Fremdpartikel das Prinzip der Massekonvektion überwiegen.

Um die Auswirkungen eines statischen Mischelementes auf die mechanischen Eigenschaften von Formteilen aus Recyclatmaterial zu untersuchen, wurde die Schwimmfraktion von PP-Mahlgut, das aus verschrotteten Waschgeräten stammte, (PPRecSF - **Kapitel 5.2.1**) mit einem statischen Mischelement zu Prüfkörpern verarbeitet. Eingesetzt wurde dazu eine Mischdüse, die das in **Bild 47** dargestellte Prinzip der sich kreuzenden Stoffströme (Massekonvektion) anwendet.

Die im Zugversuch ermittelten Ergebnisse zeigen eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften beim Spritzgießen mit statischen Mischelementen von diesem Recyclatmaterialtyp (**Bild 48**).

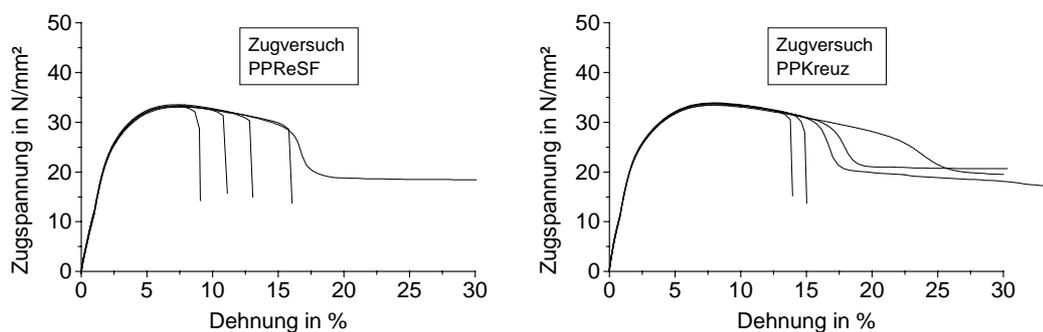


Bild 48 Spannungs-Dehnungs-Diagramme von PPreSF bei Herstellung mit herkömmlicher Spritzgussmaschine (links) und beim Einsatz von statischen Mischelementen (rechts)

Die höheren möglichen Dehnungswerte bei der Anwendung von statischen Mischelementen werden durch die homogenere Verteilung von Einlagerungen im Matrixmaterial verursacht. So sind die bei Beanspruchung auftretenden Spannungsspitzen im Material geringer als bei den mit herkömmlichen Spritzgussmaschinen hergestellten Formteilen mit großvolumigen Einlagerungen.

Aufgrund einer veränderten Maschinenkonstellation können die Prozesse, die statische Mischer anwenden, auch bei der Verwendung des gleichen Werkzeugs nicht in die Betrachtungen des Vergleichsprozesses einbezogen werden. Das technologische Verhalten des Materials kann aus den bei der Untersuchung von PPreSF gewonnenen Erkenntnissen abgeleitet werden, bei welcher auf den Einsatz von statischen Mischelementen verzichtet wurde.

5.3 Mischung unterschiedlicher Recyclate zur gezielten Eigenschaftseinstellung

Die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Recyclate unterscheiden sich von denen der Neuwaren deutlich. Die Ursache ist nicht allein in der Schädigung der Altkunststoffe zu sehen. Für den ursprünglichen Einsatzzweck (Herstellung von Teilen für Waschgeräte beziehungsweise Stoßfänger) wurden die Kunststoffe modifiziert. Verglichen wurden die von Teilen aus diesen modifizierten Kunststoffen gewonnenen Recyclate aber mit Standard-PP-Typen. Dies ist sinnvoll, weil die Recyclate aufgrund ihrer Schädigungen nicht wieder zur Herstellung der ursprünglichen Produkte verwendet werden können [170].

Beim Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Diagramme von PPRecSF und PPRecA mit denen von Neuware (**Bild 49**) wird deutlich, dass die aus Waschgeräten separierten Recyclate steifer sind als die Neuware. Die aus alten Stoßfängern gewonnenen Altkunststoffe sind wesentlich weicher als Standard-Neuware.

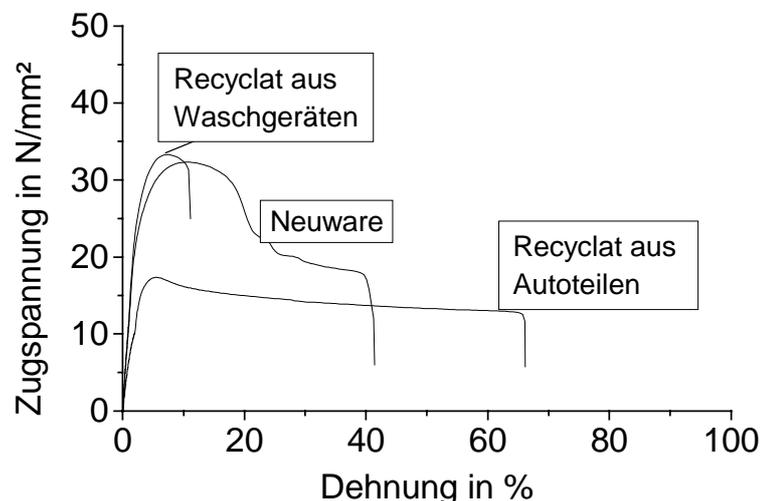


Bild 49 Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Standard-PP-Neuware und PP-Postconsumer-Recyclaten aus speziellen Anwendungen

Die Steifigkeit des Materials ist eine wichtige anwendungstechnische Eigenschaft. Sie muss unter anderem bei Biegebelastungen und bei Montagevorgängen von Kunststoffteilen berücksichtigt werden. In [178] wurde untersucht, ob mit einer Mischung der beiden Recyclate die Steifigkeit der Neuware erreicht werden kann.

Eine charakteristische Kenngröße für die Steifigkeit eines Materials ist der Zug-E-Modul.

Es wurde eine Mischungsreihe aus PPRecSF und PPRecA gebildet.

Zur Herstellung der Prüfkörper wurde ein speziell entwickeltes statisches Mischelement eingesetzt. Die Massekonvektion wird bei diesem Element durch entgegengesetzt rotierende Stoffströme realisiert. Zusätzlich werden an engen Spalten Scherungen auf die Schmelze aufgebracht, um an den Grenzflächen zwischen den beiden Ausgangskomponenten einen allmählichen Übergang zu realisieren und damit die Ausbildung von Spannungsspitzen an der Materialgrenze zu vermindern.

Die Zug-E-Module bei unterschiedlichen Temperaturen für die Prüfkörper, die aus den einzelnen Mischungen hergestellt wurden, zeigt **Bild 50**.

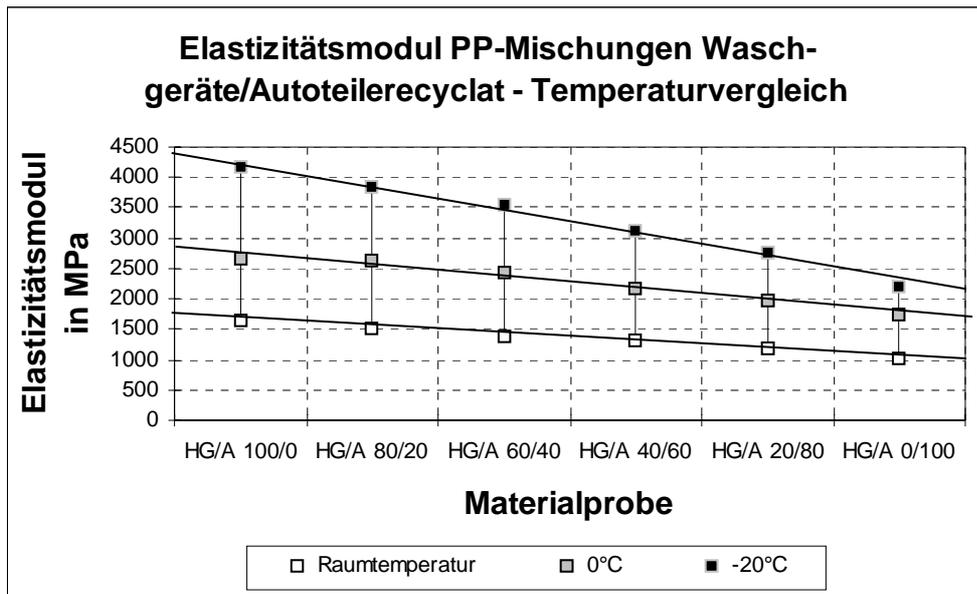


Bild 50 Zug-E-Module von Mischungen aus PPRcSF und PPRcA bei unterschiedlichen Temperaturen

Ein linearer Zusammenhang zwischen Konzentration und Zug-E-Modul ist in **Bild 50** deutlich erkennbar. Die Streckspannung und die Streckdehnung sind ebenfalls von der Konzentration der Mischungsbestandteile weitgehend linear abhängig.

Durch unterschiedliche Konzentration der Mischungskomponenten (Recyclate aus unterschiedlichen Anwendungen) ist man in der Lage, gewünschte Materialeigenschaften gezielt einzustellen.

Das Niveau der Neuware wird dabei allerdings nicht erreicht (**Bild 51**). Für die anwendungstechnisch interessanten Bereiche geringer Dehnung (kritische Dehnung) kann man sich aber bei entsprechender Mischungseinstellung den mit Neuwaren gemessenen Kurven nähern.

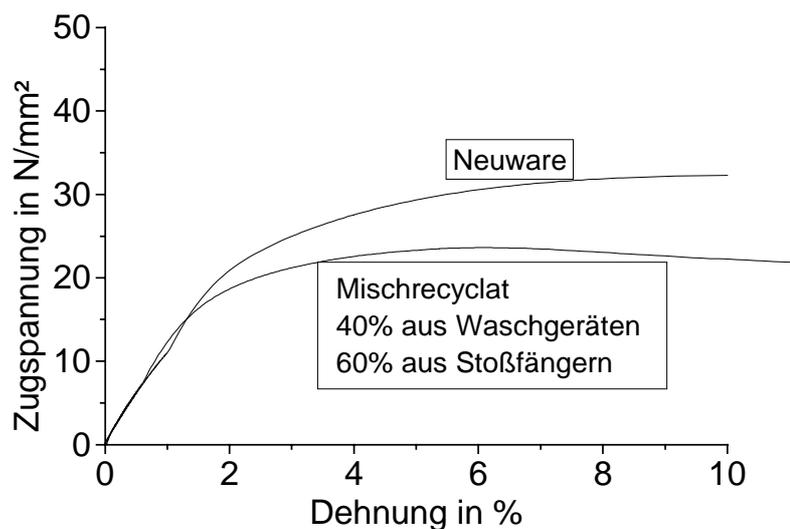


Bild 51 Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Standard-PP-Neuware und einer Mischung von zwei PP-Recyclaten aus speziellen Anwendungen

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer beabsichtigten Materialsubstitution von Novolen 1102 H (PP_N1) durch ein Postconsumer-Recyclat eine Mischung von 40% PP-Schwimmfraktion aus Waschgeräten und 60% aus Stoßfängern gewonnenem Altkunststoff verwendet werden sollte.

Der Zug-E-Modul ist bei diesem Postconsumer-Mischrecyclat fast gleich mit dem der Neuware. Eine grundsätzliche konstruktive Überarbeitung der Erzeugnisse ist so nicht notwendig.

Die aufgrund der verarbeitungs- und gebrauchsbefindlichen Schädigung verminderten mechanischen Eigenschaften von Altkunststoffen können in vielen Fällen mit den vorhandenen technischen Sicherheiten der Formteilkonstruktion ausgeglichen werden. Eventuell ist eine geringfügige Veränderung des Designs der Teile an besonders belasteten Stellen erforderlich, die aber erst nach Abschluss von Bauteiluntersuchungen erfolgen sollte. Aufwendige Werkzeugänderungen für die Herstellung von Erzeugnissen aus Postconsumer-Recyclaten sind so nicht mehr notwendig.

Zusammenfassung

Gesetzliche Regelungen, die in nächster Zeit voll wirksam werden, setzen den Übergang von der Durchflusswirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft durch. Sie schreiben bestimmte Verwertungsarten und -quoten der gewonnenen Materialien vor. In diesem Zusammenhang stellt der effektive Wiedereinsatz von thermoplastischen Kunststoffen eine Aufgabe dar, für deren Lösung die technischen Voraussetzungen geschaffen werden müssen.

Die Zielstellung dieser Arbeit war es, ein effektives Verfahren zum Vergleich der technologischen Materialeigenschaften von Neuwaren mit denen bestimmter Recyclate zu entwickeln, um das für die Verarbeitung von Neuwaren vorhandene Wissen auf Recyclate übertragen zu können. Dabei wurden die Untersuchungen auf das Polymerverarbeitungsverfahren „Spritzgießen“ konzentriert.

Bekannt ist, dass die Kreislaufführung von Kunststoff-Recyclaten durch eine werkstoffliche Wiederverarbeitung zu technisch anspruchsvollen Produkten, eine werkstoffliche Verwertung zu weniger anspruchsvollen Erzeugnissen, eine rohstoffliche Verwertung oder mit der energetischen Restnutzung erfolgen kann. Einen hohen ökologischen Wert haben Kreislaufführungen dann, wenn sie eine starke Ressourcenschonung bewirken und nur geringe Emissionen freisetzen. Das ist beim Umschmelzen von Thermoplast-Recyclaten zu neuen Erzeugnissen der Fall.

Derzeit ist es jedoch schwierig, für ein bestimmtes Recyclat die am besten geeignete technische Anwendung auszuwählen. Neben dem ökologischen Aspekt muss eine gewinnorientierte Produktion sichergestellt werden können.

Zur Ermittlung der geeignetsten Kreislaufführung für ein bestimmtes Recyclat ist die Abschätzung des Eigenschaftsprofils von Altkunststoffen unumgänglich.

Das Rohstoffverhalten eines Kunststofftyps wird durch dessen chemische und physikalische Eigenschaften - wie Molmasse und Molmassenverteilung - bestimmt. Die komplex wirkenden chemischen und physikalischen Eigenschaften sind in vielen Fällen nicht vollständig bekannt. Mit den bisher angewendeten Methoden zur Charakterisierung des Rohstoffverhaltens eines Kunststoffs werden mit Hilfe von definierten Verfahren die chemischen und physikalischen Eigenschaften durch eine Reihe von Materialkennwerten (beispielsweise der Schmelzindex nach DIN ISO 1133) beschrieben. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die ermittelten Ergebnisse aufgrund weitgehend normierter Verfahren allgemein gültig sind. Nachteilig ist jedoch, dass das Verarbeitungsverhalten des Werkstoffes erst bei Berücksichtigung von mehreren unterschiedlichen Untersuchungen abgeschätzt werden kann.

Die Anwendung der bekannten Methode ist nur dann effektiv möglich, wenn die ermittelten Materialkennwerte für eine große Menge Kunststoff repräsentativ sind. Das ist aber nur bei neu hergestellten Polymeren der Fall. Die Menge von Recyclaten mit gleichen Eigenschaften umfassen demgegenüber aber oft eine geringe Tonnage, so dass die Charakterisierung der Rohstoffeigenschaften mit Hilfe von Materialkennwerten bei Recyclaten unverhältnismäßig teuer ist und so oft aus wirtschaftlichen Gründen unterbleibt.

Das dargestellte Problem des nicht abschätzbaren Verarbeitungsverhaltens von Kunststoff-Recyclaten wurde mit dem hier entwickelten Vergleichsverfahren gelöst.

Es wurde herausgearbeitet, dass die Verarbeitungseigenschaften der Neuwaren nicht ohne weiteres auf die gewonnen Recyclate übertragen werden können und dürfen, weil Unterschiede im jeweiligen Rohstoffverhalten bestehen.

Neben chemischen Veränderungen an Recyclaten, die beispielsweise eine nicht der Normalverteilung entsprechende Molmassenverteilung bewirken, zeigen auch eine Reihe von in den Altkunststoffen enthaltenen Fremdstoffen physikalische Auswirkungen bei der Wiederverarbeitung. Gezeigt wurde, dass die Fließprozesse, die zur Formgebung von verunreinigten Recyclaten notwendig sind, nach vollkommen anderen Mechanismen ablaufen können, als bei der Verarbeitung von Neuware.

Zur Abschätzung des Rohstoffverhaltens von Recyclaten müssen spezielle Untersuchungsmethoden entwickelt werden, die sich an gängige Verarbeitungsverfahren anlehnen.

Weil die Herstellung der meisten technisch anspruchsvollen Produkte durch das Spritzgießen erfolgt, wurde das hier zu diesem Zweck entwickelte Vergleichsverfahren aus dem Spritzgussverfahren abgeleitet und speziell auf die Anforderungen eines Verarbeitungsunternehmens zugeschnitten. So erfolgt die Anwendung des Vergleichsverfahrens mit demselben Werkzeug und auf derselben Maschine. Die Abstimmung auf den jeweils untersuchten Materialtyp wird durch die Variation von lediglich einer Eingriffs-Stellgröße vorgenommen.

Es wurde herausgearbeitet, dass der Einsatz von Recyclaten für technisch anspruchsvolle Produkte mit hohen Anforderungen an die Maß- und Formhaltigkeit der Teile besonders vorteilhaft ist.

Als wirksamste Einflussgröße zur Beeinflussung des Prozesses hat sich eine Veränderung des Spritz- und Nachdruckniveaus als effektiv erwiesen. Mit der Lage der hier definierten Größen obere Grenze– Formhohlraum ist vollständig mit Kunststoff gefüllt – und untere Grenze– am Formteil tritt gerade noch kein Spritzgrat auf – sowie der Breite des technologischen Fensters wurden drei prozessabhängige Materialkennwerte definiert, welche die Verarbeitungseigenschaften der jeweils untersuchten Materialtypen charakterisieren. Zur Abschätzung des Abkühlverhaltens der einzelnen Materialtypen wurde weiterhin die Siegelzeit beim Vergleichsprozess betrachtet.

Die Charakterisierung des Rohstoffverhaltens mit der hier entwickelten Methode hat den Vorteil, dass das Verarbeitungsverhalten des Werkstoffes nur nach Berücksichtigung von lediglich einer Untersuchung abgeschätzt werden kann. Allerdings sind die ermittelten Ergebnisse nicht allgemein gültig, was jedoch wegen der geringen Tonnage eines Recyclattyps unerheblich ist.

Für die zum Nachweis der Anwendbarkeit des Vergleichsverfahrens hier durchgeführten Versuche wurde Polypropylen verwendet. Dieser Kunststoff ist als Untersuchungsmaterial geeignet, weil er in großen Mengen zu technischen Produkten verarbeitet wird, die aufgrund des Inkrafttretens von gesetzlichen Bestimmungen in absehbarer Zeit werkstofflich aufbereitet werden müssen. Weiterhin werden für dieses Polymer sehr große Wachstumspotentiale vorausgesagt.

Die Versuche erfolgten mit drei Standard-Polypropylenen als Neuwaren, zwei Postconsumer-PP-Recyclaten und einem Gebinde, das aus den Produktionsabfällen der untersuchten drei Neuwaren gewonnen wurde.

Als Eingriffsstellgröße für den Vergleichsprozess wurde das Druckniveau herangezogen und das hydraulikdruckabhängige Umschaltverfahren angewendet.

Mit der bei jeder untersuchten Materialprobe vorgegebenen stets gleichen Abhängigkeit zwischen hydraulischem Umschaltdruck und Nachdruck wurde sichergestellt, dass die Abstimmung der Einzelprozesse mit nur einer veränderlichen Stellgröße erfolgte.

Für jede Materialprobe wurde das durch Variation der Eingriffsstellgröße realisierbare technologische Fenster ermittelt. Die Siegelzeiten wurden bestimmt und überprüft, ob diese von dem jeweiligen Druckniveau abhängen.

Die für die drei Neuwaren ermittelten technologischen Fenster unterschieden sich in ihrer Lage deutlich voneinander. Die Breite der Verarbeitungsfenster war nahezu gleich. Die Lage

der für die Recyclate ermittelten technologischen Fenster entsprach etwa der von einem untersuchten Neuwaretyp. Gezeigt werden konnte, dass die Breite des Verarbeitungsfensters für die untersuchten Produktionsabfälle geringer und für die Postconsumer-Recyclate größer war als bei den betrachteten Neuwaren. Das bedeutet, dass abweichende Qualitätsmerkmale bei den betrachteten Postconsumer-Recyclaten in einem größerem Maße ausgeglichen werden können als bei den untersuchten Neuwaretypen.

Auch die für die drei Neuwaretypen ermittelten Siegelzeiten unterschieden sich deutlich voneinander. Bei der Produktion von Teilen aus den Postconsumer-Recyclaten wurden Siegelzeiten gemessen, die etwa den Werten des Neuwaretyps entsprachen, mit dem bereits bei der Betrachtung des technologischen Fensters Ähnlichkeiten festgestellt wurden.

Mit den durch die Anwendung des hier entwickelten Vergleichsverfahrens gewonnenen Erkenntnissen wurde festgestellt, dass die untersuchten Recyclate in ihrem Verarbeitungsverhalten einer der betrachteten Neuwaren ähneln. Bei der beabsichtigten Verarbeitung der hier untersuchten Recyclate kann so zukünftig auf das für diese Neuware gesammelte Know-how zurückgegriffen werden.

Zur Herstellung von technisch hochwertigen Erzeugnissen ist es in vielen Fällen notwendig, das Werkstoffpotential der Altkunststoffe zu verbessern. Um den ökonomischen Nutzen bei der Wiederverarbeitung der Altkunststoffe zu erhalten, muss die Aufbereitung mit möglichst geringem Aufwand erfolgen.

Es wurde nachgewiesen, dass sich nach Anwendung des Schwimm-Sink-Verfahrens die Dehnungswerte des untersuchten Recyclats steigern lassen. Eine weitere Verbesserung konnte durch eine zusätzliche Homogenisierung der Schmelze mit Hilfe eines im Rahmen dieser Arbeit speziell zur Verarbeitung von Altkunststoffen entwickelten statischen massekonvektiv wirksamen Mischelements erreicht werden.

Mit der vorliegenden Arbeit konnte weiterhin gezeigt werden, dass durch ein Mischen definierter Mengen von Altkunststoffen aus unterschiedlichen Aufkommensquellen die mechanischen Eigenschaften von Recyclat-Werkstoffen in einem bestimmten Intervall reproduzierbar eingestellt werden können. Dies wurde durch die Entwicklung eines weiteren statischen Mischelements möglich, welches die Mischprinzipien Massekonvektion und distributives Mischen miteinander kombiniert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Vergleichsverfahren entwickelt, das es gestattet, die technologische Eignung der untersuchten Recyclattypen für bestimmte Anwendungszwecke abzuschätzen. Damit ist man nun in der Lage, die aus einsatztechnischer Sicht beste Ausnutzung des Werkstoffpotentials der Recyclate zu realisieren. Der dazu notwendige Aufwand wird mit der Anwendung des Vergleichsverfahrens erheblich reduziert, so dass zukünftig Kunststoffprodukte nach dem Ende der Gebrauchsphase auf einem deutlich höherem Niveau in den Stoffkreislauf zurück geführt werden können, als es bisher wirtschaftlich möglich war.

Summary

Legal regulations, which become fully effective in next time, intersperse the transition of the flow-economy to a cycle-economy. The regulations prescribe certain types and rates of utilization of the extracted materials. In this connection the effective re-use of thermoplastics represents a task, for whose solution the technical preconditions must be created.

It was the goal of this work to develop an effective technique for the comparison of the technological material properties of new goods with those of certain recycled polymers, in order to be able to transfer the available knowledge for processing of new goods to used plastics. The investigations were concentrated on the polymer processing method injection moulding

It is known that the circulation process of recycled polymers can occur through material reprocessing to technically pretentious products, material utilization to less pretentious manufactures, raw-material utilization or with energetic reutilization. Circulation processes have a high ecological value if they cause a strong preservation of resources and set only small emissions free. That is the case with remelting of recycled thermoplastic polymers to new manufactures.

Currently it is difficult to select the best suitable technical use for a specific recycled plastic. Next to the ecological aspect a profit-based production must be guaranteed.

For the determination of a suitable circulation process for a specific recycled polymer an estimation of the characteristic of properties of used plastics is unavoidable.

The raw material behaviour of a plastic-type is determined by its chemical and physical characteristics like molecular mass and molecular mass distribution. The complex working chemical and physical characteristics are not completely well-known in many cases. With the up to now used methods for the characterization of the raw material behaviour of a plastic are described chemical and physical properties by a series of material constants (for example the melt-flow index according to DIN ISO 1133). This procedure has the advantage that the determined results are universal due to mostly standardized techniques. It is however disadvantageous that the processing behaviour of the material can only be estimated by consideration of several different studies.

The use of the known method is only then effectively possible if the determined material constants are representative for a great amount of plastic. That is, however, the case only for newly-made polymers. The amount of recycled polymers with identical characteristics cover only a small tonnage, so that the characterization of the raw material properties with the aid of material constants is disproportionately expensive in case of used plastics, and is therefore often omitted for economical reasons.

The represented problem of the not assessable processing behaviour of recycled plastics was solved with the here developed comparison technique.

It was elaborated, that the processing characteristics of the new goods can not easily be assigned to recycled polymers, because differences exist in the respective raw material behaviour.

Next to chemical changes in used plastics, which cause for example a non-Gaussian molecular weight distribution, a series of cruds contained in used plastics show physical effects during reprocessing. It was shown, that the flowing-processes, which are necessary for the shaping of contaminated post-consumer polymers, can run according to completely different mechanisms, as with processing of a new product.

For the estimation of the raw material behaviour of recycled plastics special research methods must be developed, which follow usual processing methods.

Because the production of most technically pretentious products occurs via injection moulding, the here for this purpose developed comparison technique was derived from the injection-moulding technique and tailored especially to the requirements of a processing enterprise. Thus the use of the comparison technique occurs with the same instrument and on the same machine. The tuning to the in each case examined material type is carried out by variation of only one correction-variable.

It was elaborated, that the application of used polymers is in particular favourable for technically pretentious products with high requirements for geometrical and dimensional stability of the parts.

As the most effective actuating variable for influencing of the process a modification of the squirting and reproduction level was proved to be effective. There were defined the upper boundary: "Form cavity is completely filled with plastic" and lower boundary: "at the shaped part even still no spraying burr steps on" as well as the width of the technological window. Thus three process dependent material indices were defined, which examined the manufacturing properties of the characterize material types. For the estimation of the cooling behaviour of the individual material types further the seal time was considered in the comparison process.

The characterization of the raw material behaviour with the here developed method has the advantage that the processing behaviour of the material can be estimated by consideration of only one study. However, the determined results are not generally valid, which is unimportant because of the small tonnage of a post-consumer polymer.

Polypropylene was used for the experiments, which were carried out as proof of the application of the comparison technique. This plastic is suitable as a testing-material because it is converted to technical products in great amounts due to the commencement of legal regulations in near future. Furthermore is forecasted for this polymer a very large growth potential.

The experiments were performed with three standard polypropylenes as new goods, two post-consumer polypropylenes and a bundle which was obtained from the production waste of the examined three new goods.

As correction-variable for the comparison process was consulted the pressure level and was applied the hydraulic-pressure-dependent switching procedure.

With the always same dependence between hydraulic switching pressure and post-pressure for every examined material sample, it was guaranteed that the tuning of the single processes occurred only with one variable.

For every material-sample was determined the realizable technological window by variation of the manipulated variable. The seal times were determined and checked whether these depend on the respective pressure level.

The technological windows determined for the three new goods are clearly different in their position. The width of the processing windows was almost identical. The position of the technological windows determined for the recycled polymers was similar to that of an examined new product type. It could be shown that the width of the processing window was smaller for the production waste and larger for the post-consumer plastics if compared with the considered new goods. That means, that differing high-quality features with the considered post-consumer plastics can be balanced in a greater measure than with the examined new product types.

Also the seal times determined for the three new product-types differed clearly from each other. During the production of parts from the post-consumer polymers seal-times were

measured, which corresponded to the values of the new-product-types, which showed already similarities from point-of-view of the technological window.

With the findings gained by the use of the here developed comparison technique it was stated that the investigated recycled polymers resemble in their processing behaviour one of the considered new goods. With the intended processing of the here investigated recycled polymers one can in the future use the collected know-how gathered for this new product.

For the production of technically high-quality products it is in many cases necessary to improve the material potential of the old plastics. In order to preserve the economic use during the reprocessing of the old plastics, the expenditure must occur at lowest expense.

It was proven that after application of the swimming-sinking-procedure the strain-values of the examined used polymers can be increased. A further improvement could be achieved by additional homogenisation of the melt with the help of one in the context of this work, particularly for the processing of old plastics developed static mass-convectively effective mixing element.

With the presented work it could further be further shown that by mixing defined quantities of old plastics from different sources the mechanical properties of recycled plastic can be reproduced in a certain interval. This became possible by the development of a further static mixing element, which combines the mixing principles mass convection and distributives mixing.

In the context of the presented work a comparison technique was developed that permits an estimation of the technological suitability of the examined types of recycled polymers for certain applications. Therefore one can realize an optimum utilization of recycled polymers from applicational point-of-view. The necessary expenditure for this purpose is considerably reduced with the use of the comparison technique, so that in future plastic products at the end of the using phase can be led back on a clearly higher level into the material circuit, than it was up to now economically possible.

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

ABS	Acrylnitril/Butadien/Styrol-Copolymer
Elektroind.	elerotechnische und elektronische Industrie
Haushaltw.	Haushaltwaren
HCl	Chlor-Wasserstoff
PA	Polyamid
PBT	Polybuthylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PE-LD	Polyethylen niedriger Dichte
PE-LLD	Polyethylen niedriger Dichte und linearer Struktur
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmetacrylat
POM	Polyoximethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
MFI / MFR	Schmelzindex
PP_D	Interne Kurzbezeichnungen für untersuchte Materialtypen Erklärungen siehe Tabelle 2 (Seite 68)
PP_N1	
PP_N2	
PPAng	
PPRecA	
PPRec1	
PPRec2	
PPReSF	Interne Kurzbezeichnung für einen untersuchten Materialtyp - Erklärung siehe Seite 92
i, j, k	Laufindexvariablen
p_{\max}	Gemessener Hydraulikdruck, bei dem gerade noch kein Formteilgrat auftritt
p_{\min}	Gemessener Hydraulikdruck, bei dem der Formhohlraum grade vollständig mit Kunststoff gefüllt ist
Δp	Breite des technologischen Fensters
t_{siegel}	Siegelzeit
\vec{x}_{MKW}	Vektor Materialkennwert
\vec{x}_{Rohst}	Vektor Rohstoffeigenschaften
\vec{x}_{PKW}	Vektor Prozesskennwerte

Lebenslauf

Name: Kies
 Vorname: Torsten
 Geburtsort: Dornreichenbach
 Geburtsdatum: 21.12.1963
 Anschrift: Dryanderstraße 22
 06110 Halle
 Familienstand: Verheiratet, ein Sohn

Ausbildung

1970 – 1978 Polytechnische Oberschule in Leipzig
 1978 - 1982 Erweiterte Thomasoberschule Leipzig
 1982 Abitur
 1982 - 1985 Wehrdienst
 1985 – 1986 Physikstudium an der Technischen Hochschule
 Merseburg
 1986 – 1991 Studium der Polymerwerkstofftechnik an der
 Technischen Hochschule Merseburg
 1991 Abschluss als Diplomingenieur

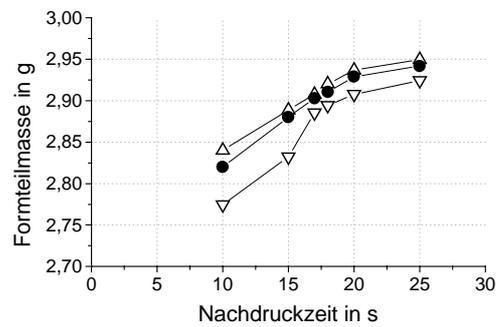
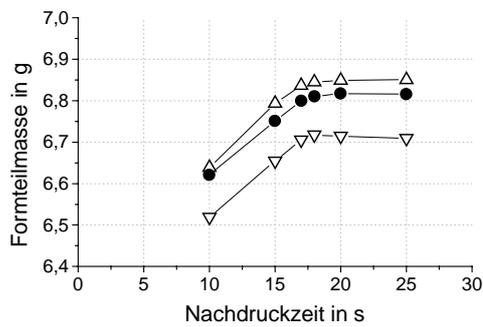
Berufliche Tätigkeit

1991-1992 Versuchsingenieur für Spritzgussprozesse in einem
 mittelständischen Unternehmen der
 Automobilzulieferindustrie
 1992-1995 Konstrukteur und Projektingenieur im gleichen
 Unternehmen
 seit 1995 Laboringenieur für Spritzgießen am Fachbereich
 Ingenieurwissenschaften der Martin-Luther-Universität
 Halle-Wittenberg

Anhang

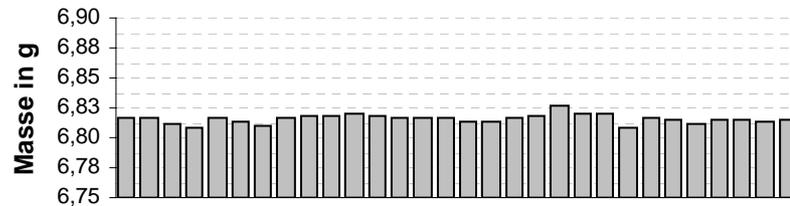
Materialtyp	Polypropylen
Handelsname	Novolen 1102 H
Charge	542-300183
Herstellungsdatum	12.11.1998
Kurzbezeichnung	PP_N1

Anhang - Bild 1 Siegeldiagramme für PP_N1; links: Zugprüfstab, rechts: Schlagprüfstab



Anhang - Bild 2

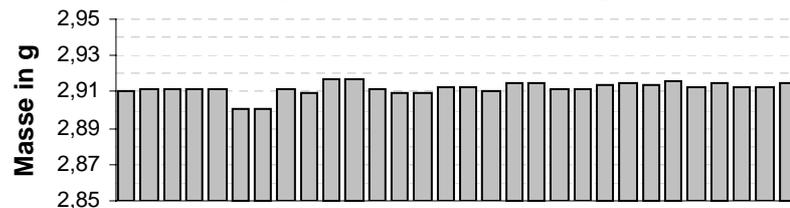
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Zugprüfstäbe PP_N1 in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

Anhang - Bild 3

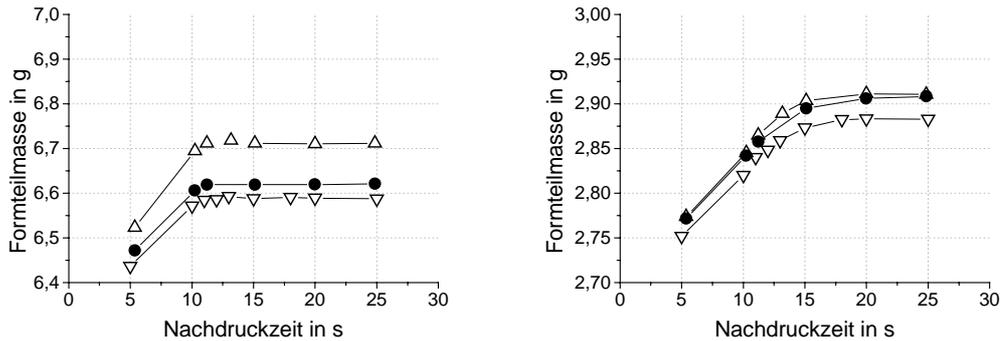
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Schlagprüfstäbe PP_N1 in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

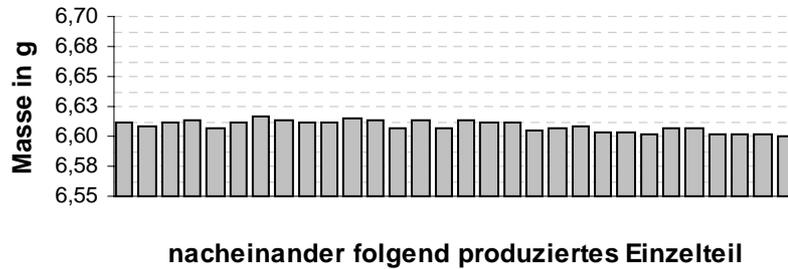
Materialtyp	Polypropylen
Handelsname	Daplen BE 50 natur
Charge	90180790
Herstellungsdatum	13.11.1998
Kurzbezeichnung	PP_D

Anhang - Bild 4 Siegeldiagramme für PP_D; links: Zugprüfstab, rechts: Schlagprüfstab



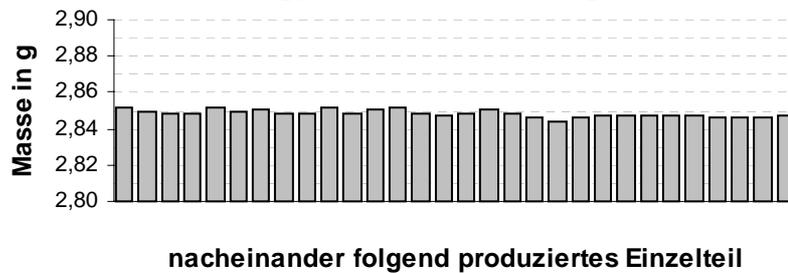
Anhang - Bild 5

**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Zugprüfstäbe PP_D in g**



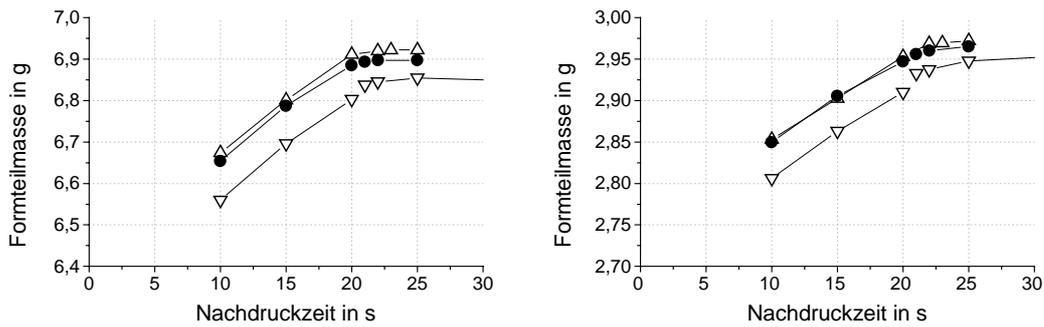
Anhang - Bild 6

**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Schlagprüfstäbe PP_D in g**



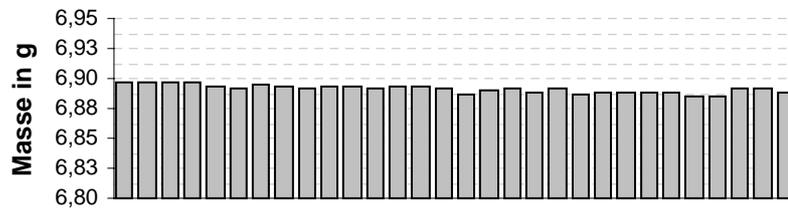
Materialtyp	Polypropylen
Handelsname	Novolen 1184 L
Charge	542-300051
Herstellungsdatum	17.11.1998
Kurzbezeichnung	PP_N2

Anhang - Bild 7 Siegeldiagramme für PP_N2; links: Zugprüfstab, rechts: Schlagprüfstab



Anhang - Bild 8

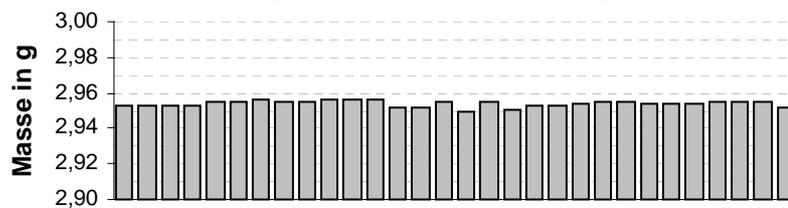
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Zugprüfstäbe PP_N2 in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

Anhang - Bild 9

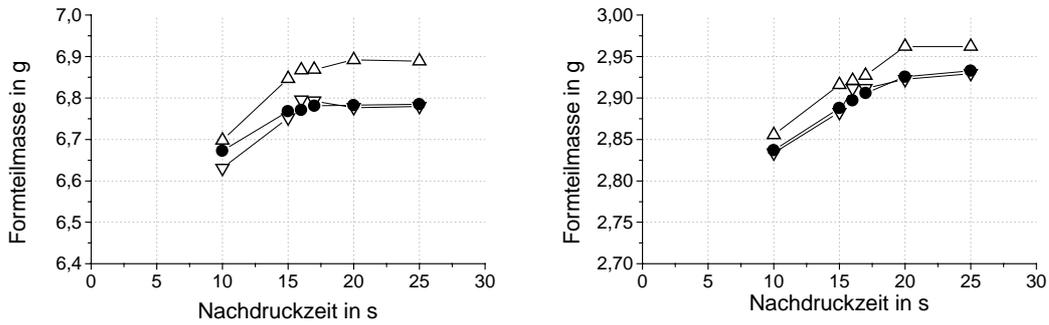
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Schlagprüfstäbe PP_N2 in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

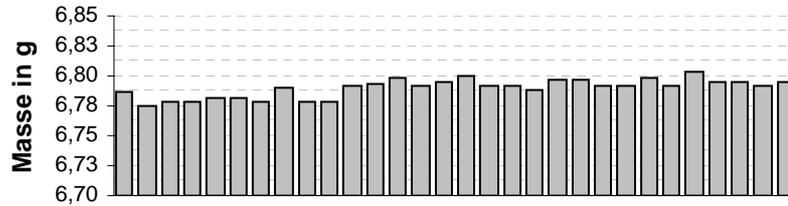
Materialtyp	Polypropylen
Handelsname	Mahlgut 8mm Sieb
Charge	Angüsse und Restteile aus bisher verarbeiteter PP-Neuware
Herstellungsdatum	21.01.1999
Kurzbezeichnung	PPAng

Anhang - Bild 10 Siegeldiagramme für PPAng; links: Zugprüfstab, rechts: Schlagprüfstab



Anhang - Bild 11

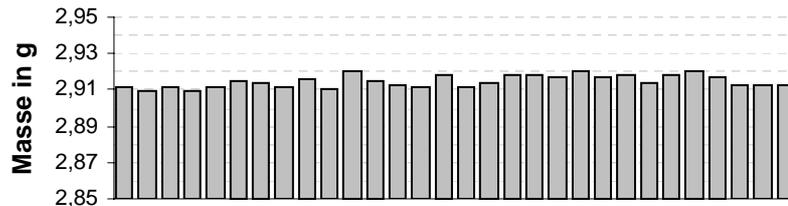
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Zugprüfstäbe PPAng in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

Anhang - Bild 12

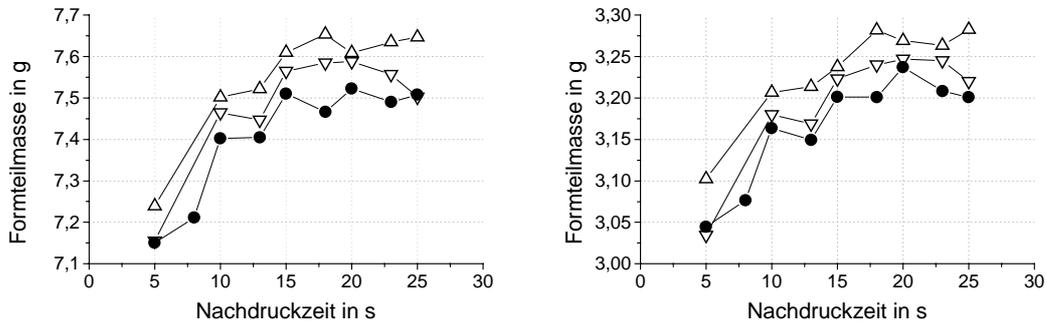
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Schlagprüfstäbe PPAng in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

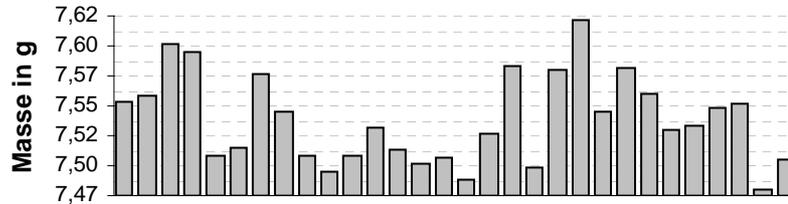
Materialtyp	Polypropylen
Handelsname	PP-Recyclat Mahlgut 8mm Sieb; gewonnen aus Waschgeräten
Charge	ASG Leuna demontiert April-Okt. 1998
Herstellungsdatum	19.11.1998
Kurzbezeichnung	PP_Rec1

Anhang - Bild 13 Siegeldiagramme für PPRec1; links: Zugprüfstab, rechts: Schlagprüfstab



Anhang - Bild 14

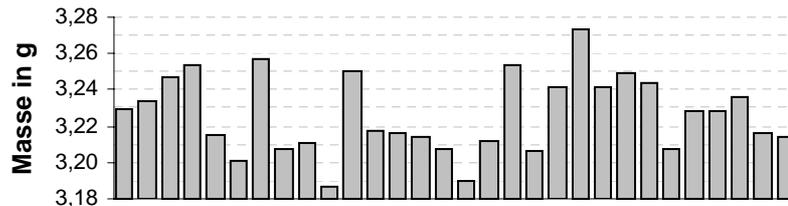
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Zugprüfstäbe PPRec1 in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

Anhang - Bild 15

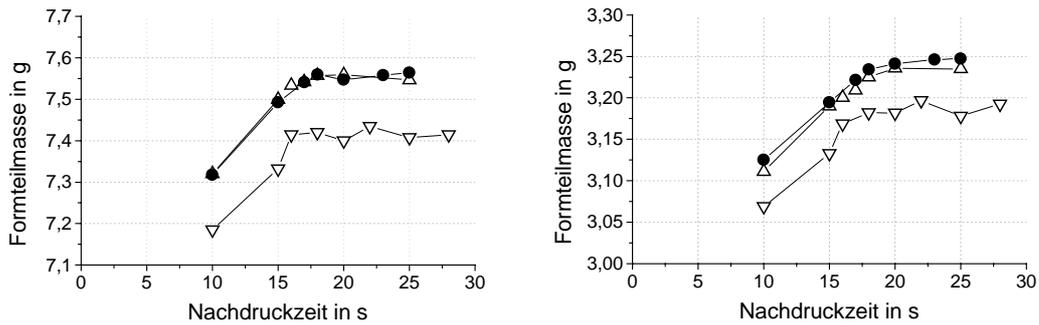
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Schlagprüfstäbe PPRec1 in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

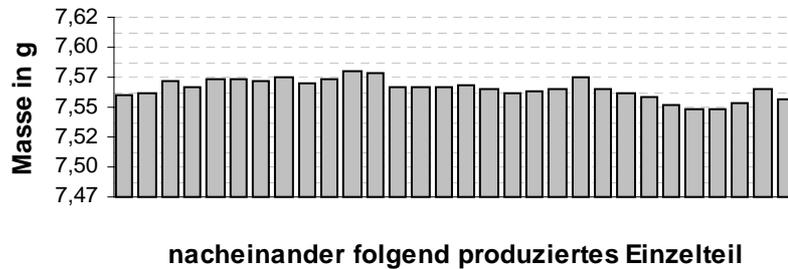
Materialtyp	Polypropylen
Handelsname	PP-Recyclat - Mahlgut 8mm Sieb
Charge	Wiederverarbeitung der Proben PPRec1
Herstellungsdatum	25.11.1998
Kurzbezeichnung	PPRec2

Anhang - Bild 16 Siegeldiagramme für PPRec2; links: Zugprüfstab, rechts: Schlagprüfstab



Anhang - Bild 17

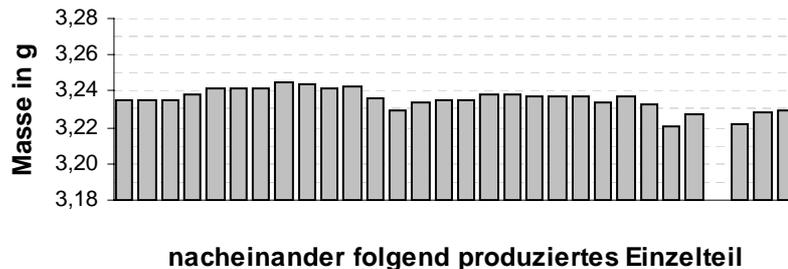
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Zugprüfstäbe PPRec2 in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

Anhang - Bild 18

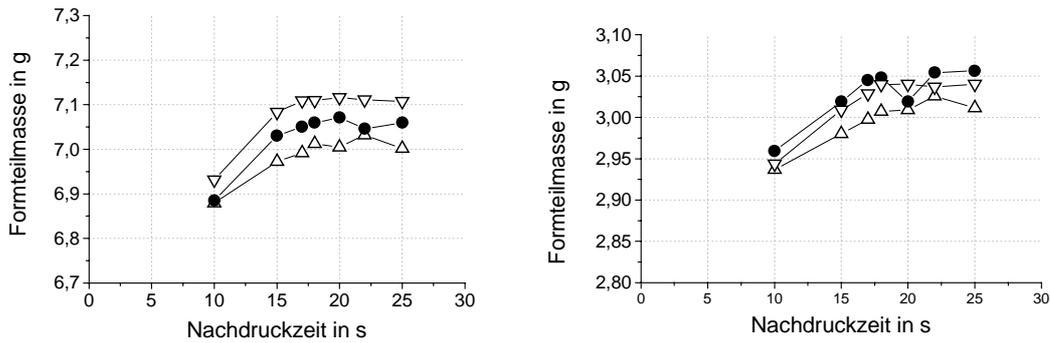
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Schlagprüfstäbe PPRec2 in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

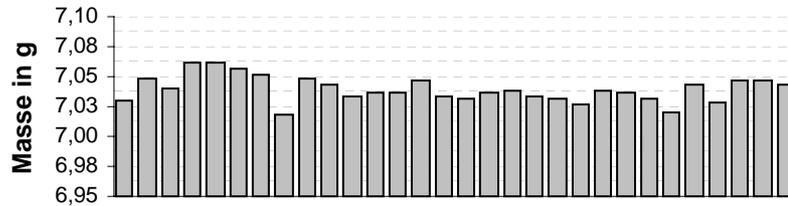
Materialtyp	Polypropylen
Handelsname	PP-Recyclat Mahlgut 8mm Sieb; gewonnen aus Altautos
Charge	Labortechnische Aufbereitung
Herstellungsdatum	6.4.1999
Kurzbezeichnung	PPRecA

Anhang - Bild 19 Siegeldiagramme für PPRecA; links: Zugprüfstab, rechts: Schlagprüfstab



Anhang - Bild 20

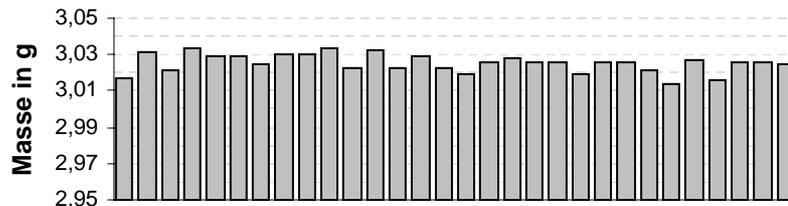
**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Zugprüfstäbe PPRecA in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

Anhang - Bild 21

**Maschinenfähigkeit der Formteilmasse
Schlagprüfstäbe PPRecA in g**



nacheinander folgend produziertes Einzelteil

Literaturverzeichnis

- 1 R. Weinlein: Vergleichende Umweltanalyse von Thermoplast-Bauteilen aus Recyclat und Neuware; Dissertation TU Berlin 1996
- 2 J. Trittin: Die Abfallpolitik der Bundesregierung; Rede des Herrn Bundesumweltministers anlässlich der Auftaktveranstaltung zum 3. Deutschen Recyclingtag am 1. Juni 1999 in Bonn
- 3 J. Wagenblast: Verfahrens- und maschinentechnische Verbesserungen bei der Verarbeitung von Thermoplasten mit Schneckenmaschinen; Schriftenreihe Kunststoff-Forschung herausgegeben von Helmut Käufer, Berlin 1997 ISBN 3-7983-1718-6
- 4 L. I. Manevitch, L. S. Zarkhin, N.S. Enikolopian: Nonlinear Dynamics and the Problem of Polymer Fracture; Journal of Applied Polymer Science, Vol. 39 (1990) S. 2245-2258
- 5 R. Blum: Einflussgrößen auf die Recyclingfähigkeit; in Kunststoffrecycling - Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele; Hanserverlag München 1997 ISBN 3-446-18264-0
- 6 A. Casale, R. S. Porter: Polymer Stress Reactions; Academic Press Inc., New York 1978, ISBN 0-12-162801-9
- 7 F. Beuche: Mechanical Degradation of high Polymers; Journal of Applied Polymer Science, Vol. IV (1960) 10 S. 101-106
- 8 A. Mädebach, G. Wilde, K.-H. Mädebach: Verarbeitungs- und Gebrauchsverhalten von Polyamid 6 in Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte des Granulats am Beispiel der Miramidsorten; Plaste und Kautschuk 36 (1989) 11 S. 398-401
- 9 W. Bartel: Einfluß der Granulatfeuchte von PBTP auf den Materialabbau beim Spritzgießen; Kunststoffe 77 (1987) 4 S. 384-386
- 10 J.-H. Kallweit, O. Zipp: Feuchtigkeitsaufnahme von thermoplastischen Polyurethan; Plastverarbeiter 46 (1995) 10 S. 94-104
- 11 K. Kircher: Chemische Reaktionen in der Kunststoffverarbeitung; Carl Hanser Verlag 1982 ISBN 3-446-13488-3
- 12 M.A. Shariati: Versagensvergleich zwischen Kurz- und Langzeitversuch bei ein- bzw. mehrfachverarbeiteten Polyethylen; Kunststoffberater 1990 6 S. 41-44
- 13 C. Meißner, J. Vogel, B. Poltersdorf: Eigenschaftsveränderungen polymerer Werkstoffe infolge thermomechanischer Belastungen im Verarbeitungsprozess; Plaste und Kautschuk 34 (1987) 12 S. 449-451
- 14 Muras, Janacek, Dostal: Influence of repeated extrusion on viscoelastic properties and molecular parameters of polyethylene Progress and Trends; Rheology 2 (1988) S. 402-404
- 15 M.A. Sharati: Eigenschaftsänderungen durch wiederholtes Spritzgießen Teil 1; Plastverarbeiter 41 (1990) 9 S. 196-198
- 16 D. Brunner, B. Poltersdorf: Eigenschaftsveränderungen durch Mehrfachverarbeitung - Rheologische Untersuchungen an Polyethylenen; Kunststoffe 88 (1998) 1 S. 90-93
- 17 M. Gierth: Prozesssicherheit und Recycling - Ein nicht zu lösender Widerspruch; in N.N: Recycling im Spritzgießbetrieb; Düsseldorf 1993, ISBN 3-18-234168-5
- 18 M.A. Sharati: Eigenschaftsänderungen durch wiederholtes Spritzgießen Teil 2; Plastverarbeiter 41 (1990) 10 S. 78-83

-
- 19 D. Bilwatsch: Qualitätssicherung bei wiederaufbereiteten technischen Kunststoffen - praxisnahe Methoden der Werkstoffcharakterisierung; *Kunststoffe* 81 (1991) 9 S. 812-816
 - 20 G. Schmitz: Zusammenhang zwischen Verarbeitungsbedingungen und Eigenschaften; in *Kunststoffrecycling - Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele*; Hanserverlag München 1997 ISBN 3-446-18264-0
 - 21 H. Dominghaus: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*; VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf 1992
 - 22 H. Daug: Einfluss von Mehrfachverarbeitung auf die Eigenschaften - Glasfaserverstärktes Polyamid; *Plastverarbeiter* 41 (1990) 11 S. 24-26
 - 23 W. Michaeli, A. Rogalla: Klein kommt ganz groß raus - Mikrostrukturen Spritzgießen; *Plastverarbeiter* 47 (1996) 8 S.28-29
 - 24 F. Notz: Entlüftung von Spritzgießwerkzeugen; *Kunststoffberater* 1995 1-2 S. 28-33
 - 25 M. Rohr: Werkstoffrecycling von Kunststoffen; in Nickel (hrsg.): *Recycling-Handbuch - Strategien, Technologien, Produkte*; VDI-Verlag 1996 ISBN 3-540-62191-1
 - 26 W. Retting, H. M. Laun: *Kunststoff-Physik*; Carl Hanser Verlag München Wien 1991 ISBN 3-446-16235-6
 - 27 H. M. Laun: Rheologie von Kunststoffschmelzen mit unterschiedlichen molekularem Aufbau; *Kautschuk+Gummi, Kunststoffe* 40 (1987) 6 S.554-562
 - 28 E. Bürkle: Direktrecycling verunreinigter Kunststoffe. Ein Weg zum geschlossenen, wirtschaftlichen Kreislauf im Spritzgießbetrieb; in N.N: *Recycling im Spritzgießbetrieb*; Düsseldorf 1993, ISBN 3-18-234168-5
 - 29 H. Lehmann: Beeinflussung der Eigenschaften von Kunststoffrecyclaten durch definierte Modifizierung der Molmassen; genehmigte Dissertation Martin-Luther-Universität Halle Fachbereich Werkstoffwissenschaften 10. September 1998
 - 30 K.K. Kabanemi, A. Ajt-Kadi, P.A. Tanguy: Prediction of residual flow and thermoviscoelastic stresses in injection molding; *Rheol Acta* 34 (1995) 1 S. 97-108
 - 31 H.-M. Laun, H. Münstedt: Elongational behavior of low density Polyethylene melt; *Rheol. Acta* 17 (1978) 4 S. 415-425
 - 32 M. Pahl, W. Gleißle, H.M. Laun: *Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere*; VDI-Verlag Kunststofftechnik Düsseldorf 1995 ISBN 3-18-234192-8
 - 33 J. Lutterbeck: Materielles Recycling auf hohem Qualitätsniveau; in N.N: *Recycling im Spritzgießbetrieb*; Düsseldorf 1993, ISBN 3-18-234168-5
 - 34 J. Dassow, A. Oelgarth: Besonderheiten beim Recycling von Faserverstärkten Thermoplasten; in *Kunststoffrecycling - Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele*; Hanserverlag München 1997 ISBN 3-446-18264-0
 - 35 J. Rabe: Möglichkeiten und Grenzen der Wiederaufbereitung technischer Kunststoffe; *Polymerwerkstoffe '94 Merseburg* 27.-29. September 1994, Tagungsband S. 537-554
 - 36 K. Goracy, A. K. Bledzki: Untersuchungen zur Wiederverwertung von SMC-Recyclat; *Polymerwerkstoffe '94 Merseburg* 27.-29. September 1994, Tagungsband S. 576-582
 - 37 J. Scheirs: *Polymer recycling - science, technologie and applications*; Wiley 1998, ISBN: 0-471-97054-9

-
- 38 W. Nickel: Materialeinsatz; in Nickel (hrsg.): Recycling-Handbuch - Strategien, Technologien, Produkte; VDI-Verlag 1996 ISBN 3-540-62191-1
- 39 B. Woite, K. Graser: Recyclinggerichtetes Konstituieren in der Automobilindustrie; in N.N: Recycling im Spritzgießbetrieb; Düsseldorf 1993, ISBN 3-18-234168-5
- 40 H. Hähnsen, F. Johannaber, P. Orth: Recycling spritzgegossener Formteile aus der Sicht der Kunststoffherstellenden Industrie; in N.N: Recycling im Spritzgießbetrieb; Düsseldorf 1993, ISBN 3-18-234168-5
- 41 J. Dassow : Einfluss von Verunreinigungen; in Kunststoffrecycling - Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele; Hanserverlag München 1997 ISBN 3-446-18264-0
- 42 J. J. Elmendrop: A Study on Polymer Blending Microrheologie; Dissertation Techn. Hogesch. Delft 1986
- 43 L. A. Utracki: Processing Two-Phase Polymer Systems; in L. A. Utracki: Two-Phase Polymer Systems; Hanserverlag Munich, Vienna, New York, Barcelona 1991, ISBN 3-446-15576-7
- 44 D. R. Paul u.a.: Polymer Blends; New York 2000, ISBN 0-471-24825-8
- 45 B. Mlekusch: Kurzfaserverstärkte Spritzgussteile; Kunststoffe 89 (1999) 7 S.33-37
- 46 M. Vincent, J. F. Agassant: Prediction Fiber Orientation In Injection Molding; in L. A. Utracki: Two-Phase Polymer Systems; Hanserverlag Munich, Vienna, New York, Barcelona 1991, ISBN 3-446-15576-7
- 47 T. Aurich, G. Mennig: Faserorientierungen in spritzgegossenen naturfaserverstärkten Polypropylen-Formteilen; Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren - Chemnitz 11. bis 13. November 1999 Vortrag B23, ISBN 3-00-004710-7
- 48 J. A. van der Lelij: 3D ist genauer als 2D - Spritzgießsimulation mit Volumenelementen; Kunststoffe 87 (1997) 1 S. 51-53
- 49 J. Ogando: Fast & Easy - Flow Analysis; Plastic Technology 1998 1 S. 40-43
- 50 H.G. Braun: Morphologie und mechanisches Verhalten; in VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik: Aufbereiten von Polymeren VDI-Verlag Düsseldorf 1990 , ISBN 3-18-234142-1
- 51 H.M. Laun, H. Schuch: Rheologische Aspekte der Blendaufbereitung; in VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik: Aufbereiten von Polymeren VDI-Verlag Düsseldorf 1990 , ISBN 3-18-234142-1
- 52 M. H. Pahl: Mischen von ineinander nicht löslichen Flüssigkeiten; in VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik: Aufbereiten von Polymeren VDI-Verlag Düsseldorf 1990 , ISBN 3-18-234142-1
- 53 J. J. Elmendrop: Fundamentals Of Morphology Formation in Polymer Blending; in L. A. Utracki: Two-Phase Polymer Systems; Hanserverlag Munich, Vienna, New York, Barcelona 1991, ISBN 3-446-15576-7
- 54 M. Bittner, J. van Marwick, L. Wolters: Aufbereitung von Kunststoffresten; in Kunststoffrecycling - Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele; Hanserverlag München 1997 ISBN 3-446-18264-0
- 55 M. Kahlmeyer, R. Rupprecht: Recyclinggerechte Produktgestaltung; Würzburg 1996 ISBN 3-8023-1560-X
- 56 D. Bothmer: Untersuchungen von Wandeffekten fluider Medien zur Beschreibung von Prozessgrenzen in verarbeitungstechnischen Prozessen; Dissertation an der Technischen Hochschule "Carl Schorlemmer" Merseburg 1988

-
- 57 A. Köhler, I. Bittner: Werkstoffliche Anforderungen und Bewertungsmethoden für den Kunststoffkraftstoffbehälter (KKB); Polymerwerkstoffe '96 Merseburg 18.-20. September 1996, Tagungsband S. 284-287
- 58 M. Bielinski, R. Gruszka: Production of microcellular PP in injection moulding process; Technomer '99, 16. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren - Chemnitz 11. bis 13. November 1999 Posterbeitrag P19, ISBN 3-00-004710-7
- 59 Verband der Kunststoffherstellenden Industrie e.V., VKE Arbeitsausschuss Statistik und Marktforschung: Wirtschaftsdaten und Graphiken zu Kunststoffen; Download
unter:<http://www.vke.de/text/deutsch/download.htm><http://www.vke.de/text/deutsch/download.htm>
- 60 B. Rickert: Kritische Anmerkungen zum Dualen System aus Verbrauchersicht; in Tagungsberichte vom 5. und 6. Aachener Kolloquium Abfallwirtschaft, Getrennte Sammlung - getrennte Aufbereitung - Erste Erfahrungen mit der Verpackungsverordnung; Herausgeber: Prof. Dr. Ing. Dohmann 1994, S. 15-24, ISSN 0940-4511
- 61 C. Ackermann: Recycling von Kunststoffen - eine ökonomische und ökologische Betrachtung des Recyclings von Kunststoffabfällen aus langlebigen Gebrauchsgütern der Branchen Automobil- und Elektroindustrie; Dissertation Universität -Gesamthochschule Siegen 1995
- 62 J. Dassow: Beispiele zum Recycling von Thermoplasten; in Kunststoffrecycling - Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele; Hanserverlag München 1997 ISBN 3-446-18264-0
- 63 H. Kindler, A. Nikles: Energieaufwand zur Herstellung von Werkstoffen - Berechnungsansätze und Energieäquivalenzwerte von Kunststoffen; Kunststoffe 70 (1980) 12 S. 802-807
- 64 U. Bauermeister, L. Maiburg, J. Huber, W. Gutzer, S. Vick: Wirtschaftlichkeit und stofflich-ökologischer Nutzwert von werkstofflichen, rohstofflichen und energetischen Verfahren des Kunststoffrecyclings; Polymerwerkstoffe '94 Merseburg 27.-29. September 1994, Tagungsband S. 526-536
- 65 M. Nöthe: Abfall - Behandlung, Management, Rechtsgrundlagen; Wiley.VCH - Weinheim, New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto 1999, ISBN 3-527-29620-4
- 66 N.N: Zementindustrie will Einsatz von Sekundärbrennstoffen erhöhen; EUWID Recycling & Entsorgung Nr. 24 1997
- 67 H.-W. Gudenau, G. Schwanekamp: Rohstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen in Hochöfen und Kuppelöfen; in: Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung in thermischen Prozessen - Tagungsband des 9. Aachener Kolloquiums Abfallwirtschaft im Dezember 1996; Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dohmann, S. 7/1-7/12, ISSN 0940-4511
- 68 G. Wirsig: Kunststoffe im Hochofen entsorgen; Umwelt Bd. 25 (1995) 11/12 S. 508-509
- 69 H.-J. Roos, T. Buer: Abfallpotentiale zur Verwertung in thermischen Prozessen; in: Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung in thermischen Prozessen - Tagungsband des 9. Aachener Kolloquiums Abfallwirtschaft im Dezember 1996; Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dohmann, S. 4/1-4/23, ISSN 0940-4511
- 70 N.N: Der Kunststoff wird wertvoll; Kunststoffe-Synthetics 2000 7 S. 15-16
- 71 H. Püchert: Autorecycling - Demontage und Verwertung, wirtschaftliche Aspekte, Logistik und Organisation; Bonn 1994, ISBN 3-87081-354-7

-
- 72 A. Jungbauer: Recycling von Kunststoffen; Würzburg 1994 ISBN 3-8023-1512-X
- 73 A. K. Bledzki: Recycling von Polymer-Compositen; Polymerwerkstoffe '98 Merseburg 23.-25. September 1998, Tagungsband S. 483-493 ISBN 3-86010-541-8
- 74 H. Sinn: Wertstoff- und Energierückgewinnung aus hochkalorigen Abfallstoffen wie Altreifen und Kunststoffschrott; Nordrheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften Vortrag N413; 1995; ISBN 3-531-08413-5
- 75 G. Menges, W. Michaeli, M. Bittner: Recycling von Kunststoffen; München 1992, ISBN 3-446-16437-5
- 76 U. Leuschner: Abfall nutzen und entsorgen; Reihe Strombasiswissen Nr. 114 - Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft e.V. Frankfurt/Main
- 77 H. Snell: Verwertung von Kunststoff- und Verbundverpackungen - Gegenwart und Zukunft, Einfluss auf die Kunststoffherzeugung; in Tagungsberichte vom 5. und 6. Aachener Kolloquium Abfallwirtschaft, Getrennte Sammlung - getrennte Aufbereitung - Erste Erfahrungen mit der Verpackungsverordnung; Herausgeber: Prof. Dr. Ing. Dohmann 1994, S. 55-73, ISSN 0940-4511
- 78 G. Härdtle: Recycling von Kunststoffabfällen; Erich Schmidt, Berlin 1991, ISBN 3-503-03248-7
- 79 J. Schiemann: Zerlegung von Elektro- und Elektronikgeräten - Erfahrungen aus einem Modellversuch; in Tagungsberichte vom 5. und 6. Aachener Kolloquium Abfallwirtschaft, Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten; Herausgeber: Prof. Dr. Ing. Dohmann 1994, S. 76- 89, ISSN 0940-4511
- 80 J. Müller, S. Marinow: Verwertung gemischter Kunststoffabfälle durch selektives Lösen; Polymerwerkstoffe '94 Merseburg 27.-29. September 1994, Tagungsband S. 615-625
- 81 M. Siebert: Entfärben von Thermoplasten beim Recycling über Lösen; Dissertation TU Berlin 1996
- 82 N.N: Multitalent für gemischte Kunststoffreste; Kunststoffberater 1998 10 S. 32
- 83 R. Hoffmann, S. Marinow: Bewertung der Recyclingfähigkeit von LDPE-Folienmaterial mit Hilfe der IR-Spektroskopie; Polymerwerkstoffe '94 Merseburg 27.-29. September 1994, Tagungsband S. 555-564
- 84 N.N.: Wieviel passt noch?; Plastverarbeiter 49 (1998) 2 S. 40
- 85 Bundesumweltministerium: Pressemitteilung 191/99; Berlin, den 3 November 1999 Textquelle: <http://www.bmu.de/fset800.htm>
- 86 N.N: Umwelterklärung der Grundig Fernseh-Video Produkte und Systeme GmbH CTV Werk Nürnberg; Grundig AG Fürth 1998 Download unter: <http://www.grundig.de/aktuelles/intern.html>
- 87 P. Riller, D. Kern: Recyclinggerechte Konstruktion von Hausgeräten; in Nickel (hrsg.): Recycling-Handbuch - Strategien, Technologien, Produkte; VDI-Verlag 1996 ISBN 3-540-62191-1
- 88 G. Fleischer: Ökologische Bilanzierung; in Nickel (hrsg.): Recycling-Handbuch - Strategien, Technologien, Produkte; VDI-Verlag 1996 ISBN 3-540-62191-1
- 89 N. Jung: Günstige Energiebilanz für Neuteile und Recyclingware; Plastverarbeiter 41 (1990) 7 S. 114-116
- 90 W.-P. Schmidt: Ökologische Grenzkosten der Kreislaufwirtschaft; Dissertation TU Berlin 1997
- 91 V. Albrecht, A. Janke, F. Simon, E. Nemeth, G. Schubert: Untersuchungen zur elektrostatischen Aufladbarkeit und Ladungsstabilität von Polymeren;

-
- Polymerwerkstoffe 2000 Halle/Saale 25.-27. September 2000, Tagungsband S. 406, ISBN 3-86010-605-8
- 92 © Statistisches Bundesamt, Pressestelle, Gustav-Stresemann-Ring 11, 65189 Wiesbaden, Quelle: <http://www.statistik-bund.de/basis/d/bevoe/bevoetxt.htm>
- 93 Textquelle: http://www.bionet.net/gesetz/KREISL_D.HTM ; Stand 13.11.2000
- 94 N.N: Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen - VerpackV; Textquelle: <http://www.lga.de/deutsch/u/verpack.htm> - Stand: 14.11.2000
- 95 M. Vetter: PVC-Recycling in der Praxis; Sonderdruck der Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e.V. Bonn
- 96 E Schadhauser: PVC-Recycling - Möglichkeiten, Grenzen, Wirtschaftlichkeit; Polymerwerkstoffe '94 Merseburg 27.-29. September 1994, Tagungsband S. 593-604
- 97 N.N: Verordnung über die Entsorgung von Altautos und die Anpassung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften vom 4. Juli 1997; BGBl. 1997 I S. 1666 – Textquelle: <http://www.raekoeve.de/Altauto.htm>
- 98 R. Linkohr: Autoindustrie in der Region wird von Autorichtlinie profitieren; Pressemitteilung als Mitglied des Europäischen Parlaments vom 03.02.2000 unter http://www.linkohr.de/pm_altauto.html
- 99 F. Eichstaedt-Bohlig, M. Hustedt: Altautorichtlinie dringend erforderlich; Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen Pressemitteilung 0298/1999 – Textquelle: <http://www.gruene-fraktion.de/archiv/pm/1999/99-0298.htm>
- 100 L. Giesberts, J. Hilf: Altautoverordnung und freiwillige Selbstverpflichtung - Rechtsfragen und praktische Umsetzung; Berlin 1998, ISBN 3-503-04394-2
- 101 L. Lohse, K. Sandner, J. Wulf-Schnabel: Anforderungen an das Monitoring im Rahmen der Verwertung langlebiger, technisch komplexer Produkte am Beispiel des Altautos - Kurzfassung; Januar 1999 Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Forschungsbericht FKZ 297 929 08 – im Auftrag des Umweltbundesamtes - Textquelle: <http://www.oekopol.de/Archiv/Stoffstrom/Autodeut.htm>
- 102 P. Wiedemann: Stoffliches Recycling; Kunststoffe 90 (2000) 2 S. 65-68
- 103 P. Bayerweck, T. Fritzsche, A. Schiemann, B. Willenberg: Betriebsmittelkontaminierte Teile wiederverwerten; Kunststoffe 82 (1992) 10 S. 915-920
- 104 H. Meyer, A. Schiemann, J. Seesing, E. Froberg, A. Germer, R. Köhn: Recycling von VW-Kühlergrills aus ABS Novodur von Bayer; Kunststoffe 83 (1993) 1 S. 35-38
- 105 A. Weber: Aspekte zum Entsorgen von Kunststoffabfällen aus Altautos; Kunststoffe 80 (1990) 4 S.478
- 106 G. Thomas: Rohstoffrückgewinnung aus gebrauchten Stoßfängern; Kunststoffe 80 (1990) 4 S. 515-517
- 107 G. Teteris: Der Einfluß der Recyclingmethode auf den Polyolefinabbau; Polymerwerkstoffe '98 Merseburg 23.-25. September 1998, Tagungsband S. 494-501 ISBN 3-86010-541-8
- 108 N.N.: Simulation mit Schnittstelle zur Campus-Datenbank; Kunststoffe 87 (1997) 4 S. 466
- 109 U. Schröder: Empfehlungen des Oberen Gutachterausschusses; Vermessung Brandenburg Nr.2/96 S. 68-70, Download unter: http://www.lverma-bb.de/veroeff/vbb_296.htm#Mitteilungen

-
- 110 M. Engelke: Ermittlung identischer Geometrien für den Aufbau von integrierten GIS-Datenmodellen, Download der Zusammenfassung unter: http://www.ikg.uni-hannover.de/publikationen/diplomarbeiten/1997/da_engelke.html
- 111 Übersicht einer Fallbeispielsammlung unter <http://www.bioinf.uni-hannover.de/ausbildung/beispiel/index.html>
- 112 G. Schenkel: Kunststoff-Extrudertechnik; Hanser-Verlag München 1963, 2. Auflage
- 113 G. Schenkel: Modelltheorie der Kunststoffextruder; Industrieanzeiger 94 (1972) S. 113-118
- 114 W. Fischer: Auslegung von Einschneckenextrudern auf der Grundlage verfahrenstechnischer Kenndaten (Modelltheorie) Ein Beitrag zur Systematik im Kunststoffmaschinenbau; Dissertation RWTH Aachen 1976
- 115 H. Potente: Eine umfassende Modelltheorie für Kunststoff-Einschneckenmaschinen; Rheologica Acta 17 (1978) S. 406-414
- 116 G. Schenkel: Extruderbaureihen mit variablen L/D-Werten; Kunststoffe 68 (1978) 3 S. 155-162
- 117 G. Steinbichler: Trends in der Prozessoptimierung; Kunststoffe 82 (1992) 10 S.902-907
- 118 R. Bourdon, G. W. Ehrenstein: Qualitätssicherung mit statistischen Methoden; Kunststoffe 82 (1992) 9 S. 807- 812
- 119 K. Pleßmann, W. Michaeli, H. Stabrey, J. Koske, M. Cremer, D. Klee: Formteileigenschaften korrelieren mit Fertigungsparametern - Spritzgießen von Polybutylenterephthalat; Kunststoffe 82 (1992) 9 S. 844-846
- 120 W. Michaeli, P. Breuer, K. Hohenauer, R. von Oepen, M. Philipp, G. Pötsch, H. Recker, T. Robers, R. Vaculik: Qualitätsgesichertes Spritzgießen - Qualitätsregelung hält Formteileigenschaften konstant; Kunststoffe 82 (1992) 12 S.1167-1171
- 121 E. Neuhäusl, M. Brummel, L. Linhart, L. Zeman: Multiparametrische Optimierung des Spritzgußprozesses; Plaste und Kautschuk 39 (1992) 2 S. 49-54
- 122 I. Catic, N. Razi: Systemanalyse des Spritzgießens von Polymeren; Plaste und Kautschuk 34 (1987) 2 S. 50-55
- 123 G. Kretzschmar: Prozeßoptimierung beim Elastomerspritzgießen mittels statistischer Modellbildung; Dissertation RWTH Aachen 1991
- 124 H. Potente, T. Huchtmeier, M. Brinkschröder, H.-P. Heim: Mit Continuous Process Control zu mehr Qualität II; Kunststoffberater 1997 3 S. 24-31
- 125 H. Offergel, M. Haupt, H. Reichenstein, O. Kaiser: Spritzgießen automatisch optimieren; Kunststoffe 82 (1992) 8 S.636-640
- 126 M. M. Gierth: Methoden und Hilfsmittel zur prozessnahen Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten; Dissertation Aachen 1991
- 127 H. Potente, V. Schöppner, H.-P. Heim, T. Huchtmeier, B. Krell, A. Ujma, T. Wenniges: Optimierung mit Hilfe statistischer Modelle; Kunststoffberater 1998 3 S. 27-35
- 128 A. Schneider, A. Krannich: Rationelles Einfahren von Spritzgießwerkzeugen zur Erzielung von qualitätsgerechten und kostengünstigen Formteilen; Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren - Chemnitz 11. bis 13. November 1999 Vortrag B09, ISBN 3-00-004710-7
- 129 T. W. Schmidt: Abschätzung der Schwindung; Dissertation RWTH Aachen, 1986

-
- 130 H. Potente, T. Huchtemeier, M. Brinkschröder, H.-P. Heim: Mit Continuous Process Control zu mehr Qualität I; Kunststoffberater 1997 1-2 S. 16-20
- 131 H. Potente, A. Ujma, H. Stockbrügger: Regelung der Formteilmasse von spritzgegossenen Formteilen; Kunststoffberater 1998 1-2 S. 20-28
- 132 G.W. Ehrenstein, K. Kuhmann: Prozessführung und Qualitätssicherung beim Kunststoffrecycling; Polymerwerkstoffe '94 Merseburg 27.-29. September 1994, Tagungsband S. 450-459
- 133 N.N: Weiß ist nicht gleich weiß; Plastverarbeiter 49 (1998) 9 S. 167
- 134 T. Wright: Oberflächig mit Tiefenwirkung; Kunststoffberater 1999 6 S. 39-40
- 135 F. A. Eigl, C. Kukla, G. R. Langecker: Mehr Verständnis für den Kern; Kunststoffe 88 (1998) 1 S. 46-50
- 136 E. Schmidberger, O. Gutbrod, F. Heinzelmann, D. Ohngemach: Neuronale Netze beim Spritzgießen, ein neuer Weg zur Qualitätssicherung; Kunststoffe 85 (1995) 5 S. 620-626
- 137 N.N.: Wieviel passt noch?; Plastverarbeiter 49 (1998) 2 S. 40
- 138 P. Lenfeld, J. Loufek, A. Ausperger: Weld lines with several holes of different sharps and processing conditions; Technomer '99, 16. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren - Chemnitz 11. bis 13. November 1999 Posterbeitrag P06, ISBN 3-00-004710-7
- 139 B. Hupfer, B. Kretzschmar: Antrazitpulver als Füllstoff; Kunststoffberater 1997 1-2 S.25-27
- 140 K. Kierig: Qualitätssicherung beim Spritzgießen durch Prozeßdatenerfassung; Mitteilung der Plastic Service GmbH Mannheim; Plaste und Kautschuk 40 (1993) 10/11 S. 375-380
- 141 D. H. Müller, Y. Feng: Spaltweiten reduzieren - Austrieb in Trennebenen beim Spritzgießen vermeiden; Kunststoffe 86 (1996) 9 S. 1248-1254
- 142 W. Bongardt: Verbesserte Prozeßführung beim Spritzgießen durch selbsteinstellende Regelung; Dissertation RWTH Aachen 1982
- 143 W. Roth: Geregelte oder gesteuerte Spritzeinheit - Auswirkungen auf die Qualität des Formteils; Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren - Chemnitz 11. bis 13. November 1999 Vortrag B03, ISBN 3-00-004710-7
- 144 W. Michaeli, N. Kudlick: Optisches Umschalten - Prozeßunabhängige Steuerung des Umschaltvorganges; Kunststoffe 86 (1996) 7 S.1011
- 145 G. Mayer: Einfluß der Verarbeitungsparameter auf die Qualität von Spritzgußteilen, Bedeutung des Werkzeuginnendruckes bei der Qualitätssicherung; Plastverarbeiter 33 (1982) 3 S.253-262
- 146 C. Nedeß, T. Kosin: Simulationsprogramme für das Spritzgießen auswählen; Kunststoffe 82 (1992) 6 S.464-468
- 147 J.C. Rowland, N. Hauser: Automatische Maschineneinrichtung; Kunststoffe 87 (1997) 3 S. 330-331
- 148 K. Slaweski, W. Schneider: Neue Impulse für die Werkstoff- und Verfahrensentwicklung durch Prozeßdatenerfassung und -verarbeitung beim Spritzgießen; Plaste und Kautschuk 39 (1992) 10 S. 329-335
- 149 R. Zeppenfeld: Temperierung beim thermoplastischen Spritzgießen; Kunststoffberater 1997 1-2 S. 21-24
- 150 N.N.: Kühlkanäle folgen der Formteilkontur; Kunststoffe 87 (1997) 1 S.36-37
- 151 M. Pohl: Schneller entformbar - Werkzeugbeschichtung mit modifizierten Wolframsulfid; Kunststoffe 87 (1997) 6 S. 754-756

-
- 152 R. Sauer: Wenn die Ansprüche wachsen - Beschichtungen senken die Kosten beim Spritzgießen; *Kunststoffe* 88 (1998) 2 S. 190-192
- 153 S. Mohr, R. Schnabel: Schüttguteigenschaften von Kunststoff-Recyclaten; *Technomer '99*, 16. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren - Chemnitz 11. bis 13. November 1999 Posterbeitrag P31, ISBN 3-00-004710-7
- 154 N.N.: Bedienungsanleitung 07/89Pe für ES 200/50 HL Maschinenummer 19328; Fa. Ludwig Engel KG, Schwertberg 1989
- 155 A. Kölz: Wartungsfreundliche Spritzgießwerkzeuge; *Kunststoffe* 88 (1998) 3 S. 402-406
- 156 F. Notz: Entlüftung von Spritzgießwerkzeugen; *Kunststoffberater* 1995 1-2 S. 28-33
- 157 K. Salewski, Schneider: Neue Impulse für die Werkstoff- und Verfahrensentwicklung durch Prozeßdatenerfassung und -verarbeitung beim Spritzgießen; *Plaste und Kautschuk* 39 (1992) 10 S. 329-335
- 158 S. Anders, K. Salewski, R. Steinbüchel, Rupprecht: Anwendung der Fülldruckmessung bei Entwicklung und Verarbeitung von Kunststoffen; *Kunststoffe* 81 (1991) 6 S. 512-514
- 159 G. Krotine, C. Sondern, D. Purps, B. Marczinke, R. Meyer zu Westram, W. Schoene: Polypropylen; *Kunststoffe* 89 (1999) 10 S. 42-50
- 160 M. Rätzsch: PP-Entwicklung ungebremst; *Kunststoffe* 88 (1998) 8 S. 1108-1116
- 161 I. Kühnert, H.-D. Fischer, J. Muras: Einfluss von Kompatibilisatoren auf PP-GF; *Kunststoffberater* 1997 6 S. 29-31
- 162 D. Schermaul, H. Gebauer: Lignocellulosehaltiges Material als Verstärkungstoff; *Kunststoffberater* 1997 6 S. 26-28
- 163 F. Johannaber: Füllindex, eine Größe zur Charakterisierung von Formmasse, Maschine und Prozeß beim Spritzgießen; *Kunststoffe* 74 (1984) 1 S. 2-5
- 164 A. K. Bledzki, A. Kessler, A. Lorenz: Geruchsminderung von Recyclaten aus Polyolefinabfällen; *Kunststoffberater* 1997 4 S.4-7
- 165 O. Beyer, Hackel, Pieper, Tiedge: Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik - in *Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Ökonomen und Landwirte* Band 17; BSB BG. Teubner Verlagsgesellschaft 1985
- 166 M. H. Pahl: Mischen von Schüttgütern; *VDI-K Jahrbuch 1999* herausgegeben vom Verein Deutscher Ingenieure VDI_Gesellschaft Kunststofftechnik, Düsseldorf, Januar 1999 ISBN: 3-18-231630-7
- 167 J. Wortberg: Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten; *Kunststoffe* 79 (1989) 2 S. 121-132
- 168 S. Anders, K. Salewski, R. Steinbüchel, L. Rupprecht: Fülldruckmessung zum Bestimmen der Fließfähigkeit von Kunststoffschmelzen; *Kunststoffe* 81 (1991) 4 S.336-339
- 169 W. Anton, T. Kies, R. Schnabel: Notwendige Entwicklung des Kunststoffrecyclings zur Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele im Spannungsfeld zwischen ökologischen und ökonomischen Anforderungen – in Zabel (Hrsg.): *Sustainability als interdisziplinäre Herausforderung*; UZU-Schriftenreihe, Neue Folge Band 4 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Universitätszentrum für Umweltwissenschaften (UZU) 2000, ISBN 3-86010-614-7
- 170 J. Schmidt: Altautoverwertung und -entsorgung - Stand und Aktivitäten beim Automobilrecycling; *Renningen-Malsheim* 1995, ISBN 3-8169-1185-4
- 171 F. Gugumus: Effect of temperature on the lifetime of stabilized and unstabilized PP films; *Polymer Degradation and Stability* 63 (1999) 1 S. 41-52

-
- 172 S.A. Kyriakou, M. Stapherpoulos, G.K. Parissakis, G. K. Papaspyrides, C.N. Kartalis: Oxidative induction time method based on thermogravimetry for monitoring the restabilisation of post-use LDPE; *Polymer Degradation and Stability* 66 (1999) 1 S. 49-54
- 173 J.M. Zenner, R.E. Lee, V. Malatesta: Aryl-substituted dithianes and dithiolanes as process stabilizers for polyolefins; *Polymer Degradation and Stability* 67 (2000) 3 S. 553-562
- 174 A. Bolodizar, A. Jansson, T. Gevert, K. Möller: Simulated recycling of post-consumer high density polyethylene material; *Polymer Degradation and Stability* 68 (2000) 3 S. 317-320
- 175 C. N. Kartalis, C.D. Papaspyrides, R. Pfaendner: Recycling of post-used PE packing film using the restabilisation technique; *Polymer Degradation and Stability* 70 (2000) 2 S. 189-198
- 176 M. Cavic: Spritzgießen von Recyclatmaterial; *Kunststoffe* 89 (1999) 6 S. 66-68
- 177 F. Johannaber: Was noch zu tun ist; *Kunststoffe* 89 (1999) 9 S. 44-48
- 178 T. Kies, R. Schnabel, H.-J. Radosch: Einsatz von statischen Mischelementen beim Spritzgießen gemischter Kunststoffrecyclate; 10. Problemseminar Polymermischungen 28. und 29. März 2001 Merseburg – Tagungsband S. 51-54