

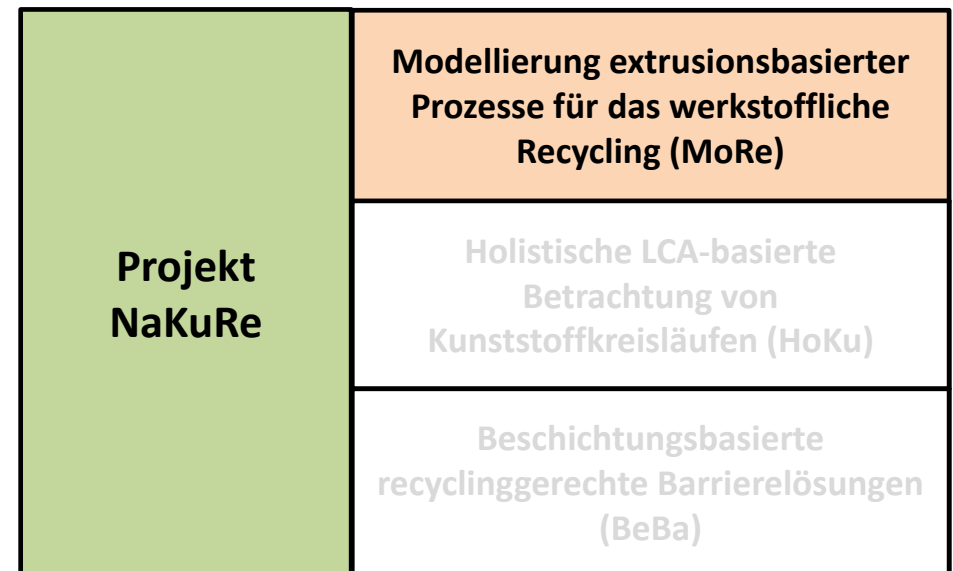


Prozessbeschreibung beim mechanischen Recycling gemischter Kunststoffe

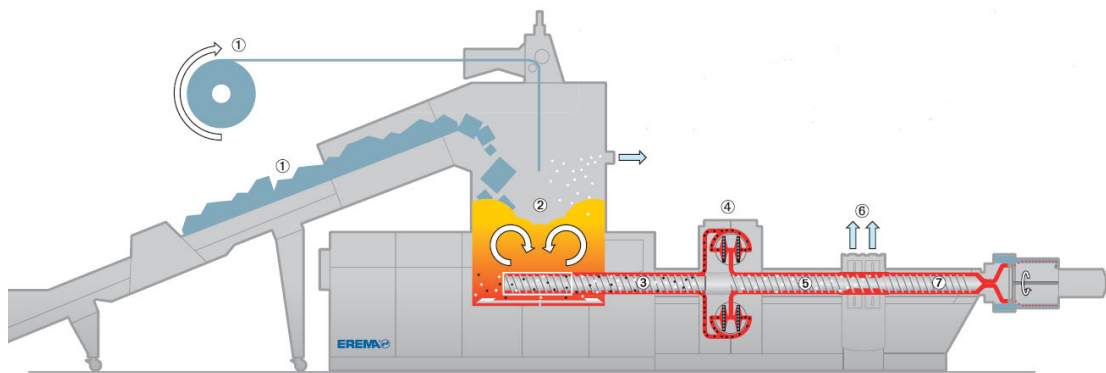
FH-Prof. Priv.-Doz. DI Dr.mont. Gernot Zitzenbacher

Ausgangslage – Forschungsprojekt NaKuRe

- Für die Erreichung der Recyclingziele ist ein höherer Rezyklatanteil in Kunststoffprodukten erforderlich
- Rezyklate müssen dazu eine ausreichend hohe Qualität aufweisen
- Hierzu muss an den unterschiedlichen Stellen des Kunststoffkreislaufs eingewirkt werden
- Wesentliche Problemstellungen entlang des Kunststoffkreislaufs werden im Projekt behandelt



Beispiel einer Anlage für das mechanische Kunststoffrecycling

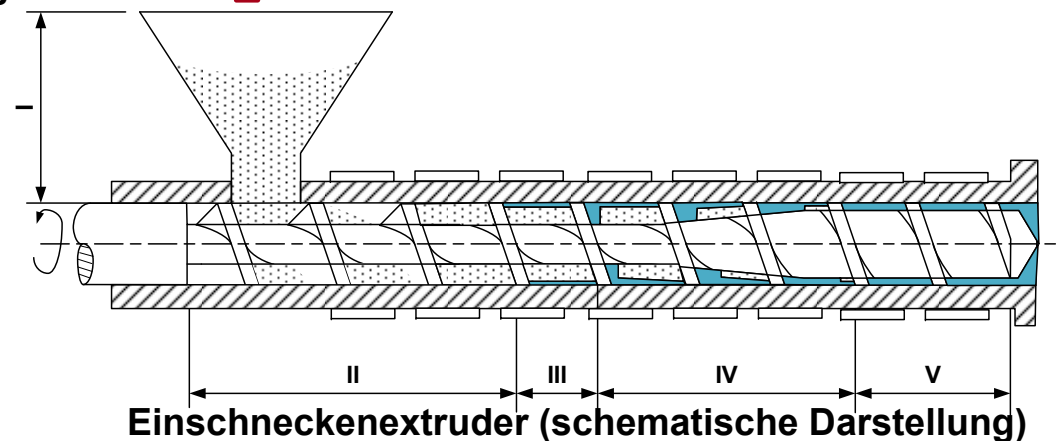


- (1) Beschickung mit Kunststoffabfall
- (2) Preconditioning Unit
- (3) Extruderschnecke
- (4) Schmelzefilter
- (5) Homogenisierung der Schmelze
- (6) Entgasungszone
- (7) Austragszone
- (8) Werkzeug und Granulierung

Beispiel einer Kunststoffrecyclinganlage

Quelle: Erema

Der Extruder ist das Kernelement beim mechanischen Kunststoffrecycling



Einschneckenextruder (schematische Darstellung)

Fragestellungen

Problemstellung:

- a) Kunststoffe liegen in abweichender Form im Vergleich zu Neuware vor
- b) Kunststoffe liegen im Recyclingprozess nicht in Reinform vor (Verunreinigung durch Fremdpolymere)

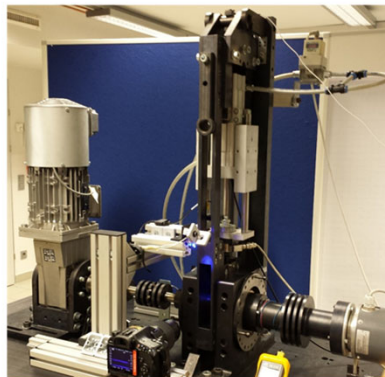
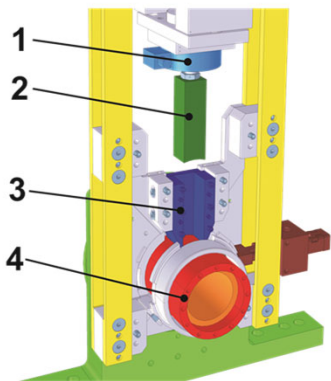
Behandelte Fragestellungen:

- a) Welche Stoffeigenschaften von Kunststoffen sind für den Recyclingprozess relevant?
Wie können diese Eigenschaften durch Materialmodelle beschrieben werden?
- b) Wie kann der Einfluss der Form in der Simulation berücksichtigt werden?
- c) Wie kann der Einfluss von Fremdkunststoffen beim mechanischen Recycling mittels Simulation im Vorfeld abgeschätzt werden?

Kunststoffe mit abweichender Schüttgutform: Eigenschaften

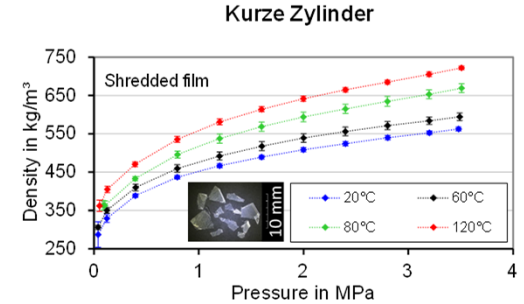
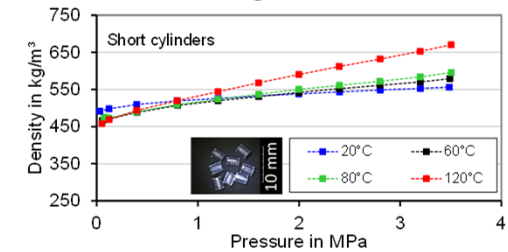
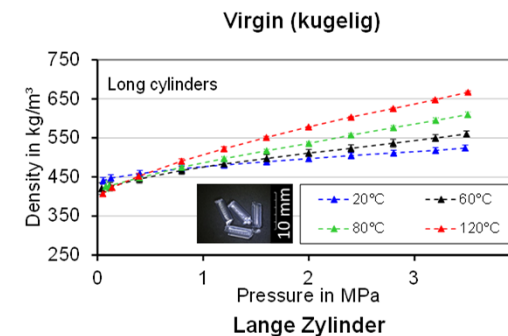
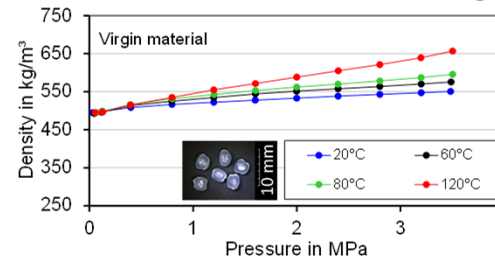
- Messung der prozessrelevanten Eigenschaften „Schüttgutdichte“ und „äußere Reibkoeffizienten“ für das mechanische Recycling von Kunststoffen

Prüfapparatur zur Messung prozessrelevanter Eigenschaften



- (1) Kraftaufnehmer
- (2) Stempel
- (3) Temperierbare Probenkammer
- (4) Rotierende Welle

Prozessrelevante Eigenschaften: Schüttgutdichte



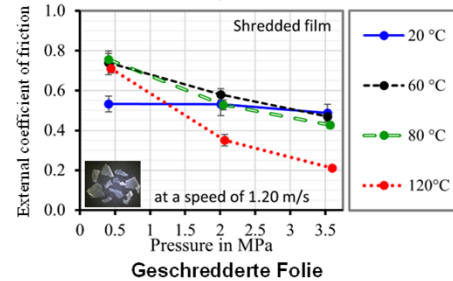
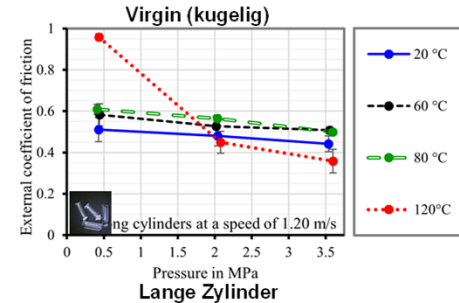
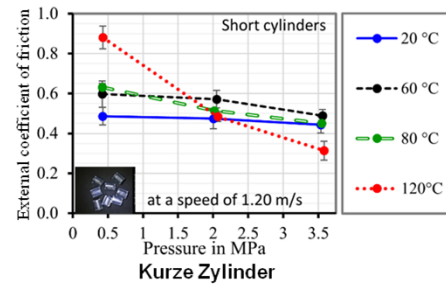
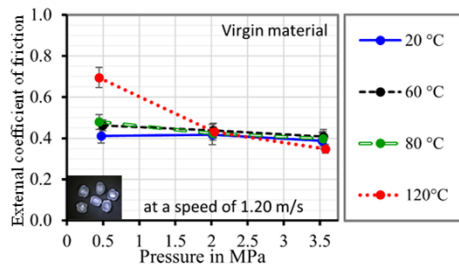
Brunmayr, T.G.; Kneidinger, C.; Zitzenbacher, G.; Burgstaller, C.: Determination of the bulk density of different plastic granules as a function of pressure and temperature. AIP Conference Proceedings 3158 - Proceedings of PPS-38 (St. Gallen, Switzerland). p 130003-1 – 130003-6 (2024)

Kunststoffe mit abweichender Schüttgutform: Eigenschaften

- Beschreibung der gemessenen prozessrelevanten Eigenschaften durch Materialfunktionen

Prozessrelevante Eigenschaften: äußerer Reibkoeffizient

Materialfunktionen für prozessrelevante Eigenschaften

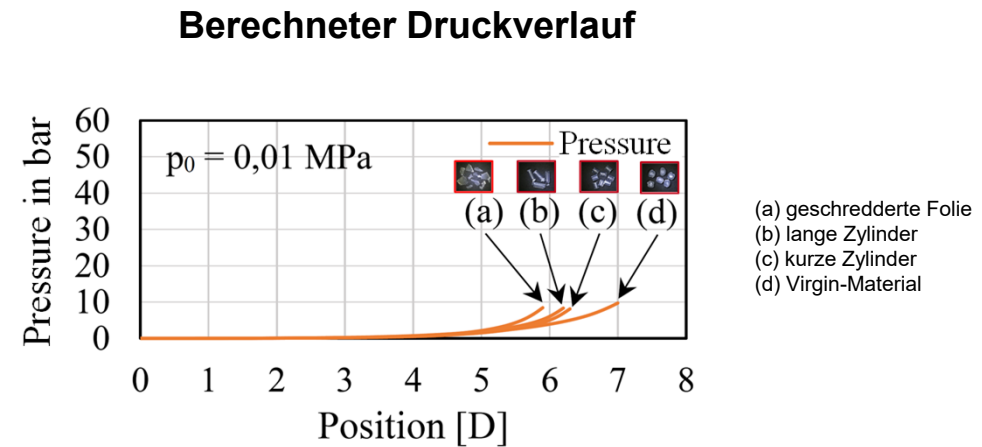
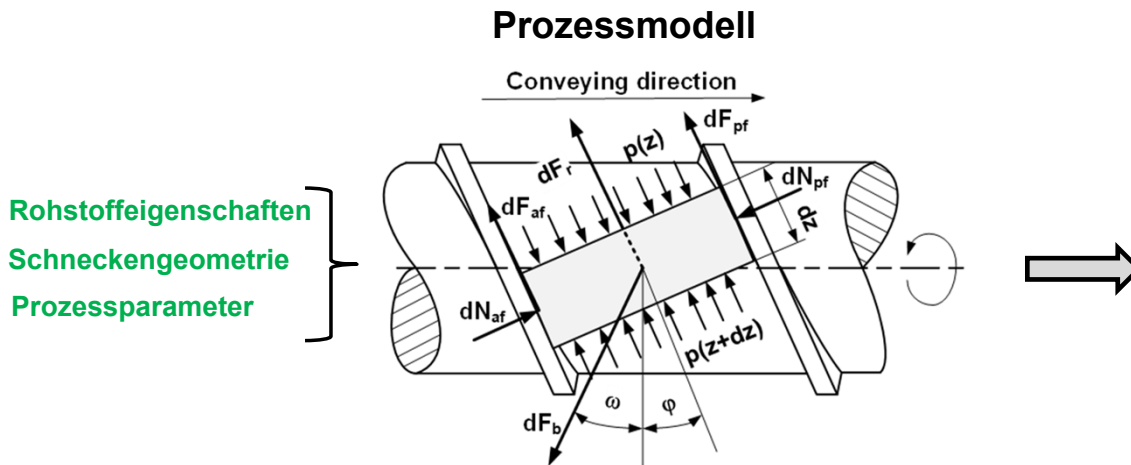


$$\mu_a(p, v, T) = b_0 + b_1 v + b_{11}(v - 0,426)^2 + b_2 \frac{1}{p+1} + b_{22} \left(\frac{1}{p+1} - 0,0918 \right)^2 + b_3 T + b_{33}(T - 70)^2 + b_{12}(v - 0,426) \left(\frac{1}{p+1} - 0,0918 \right) + b_{13}(v - 0,426)(T - 70) + b_{23} \left(\frac{1}{p+1} - 0,0918 \right) (T - 70)$$

	<i>Virgin Material</i>	<i>Kurze Zylinder</i>	<i>Lange Zylinder</i>	<i>Geschredderte Folie</i>
b_0	0,2208329	0,2772023	0,1550124	0,3423627
b_1	0,2649571	0,2646079	0,2886031	0,2253052
b_{11}	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000
b_2	0,5982141	0,0000000	0,6655073	0,0000000
b_{22}	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000
b_3	0,0006213	0,0014232	0,0023353	0,0011421
b_{33}	0,0000119	0,0000169	0,0000103	0,0000090
b_{12}	0,1550908	0,5713538	1,1622831	1,4428407
b_{13}	0,0059722	0,0000000	0,0000000	0,0000000
b_{23}	0,0000000	0,0000000	0,0015765	0,0000000

Kunststoffe mit abweichender Schüttgutform: Prozessmodell

- Einfließen der prozessrelevanten Eigenschaften durch Materialfunktionen in das Prozessmodell



$$p_{i+1} = \left(\frac{1}{hW} \cdot (W\mu_b f_b [\cos(\omega + \varphi) - \mu_s \sin(\omega + \varphi)] - \mu_s (Wf_r + 2hk)) (z_{i+1} - z_i) \right) p_i + p_i$$

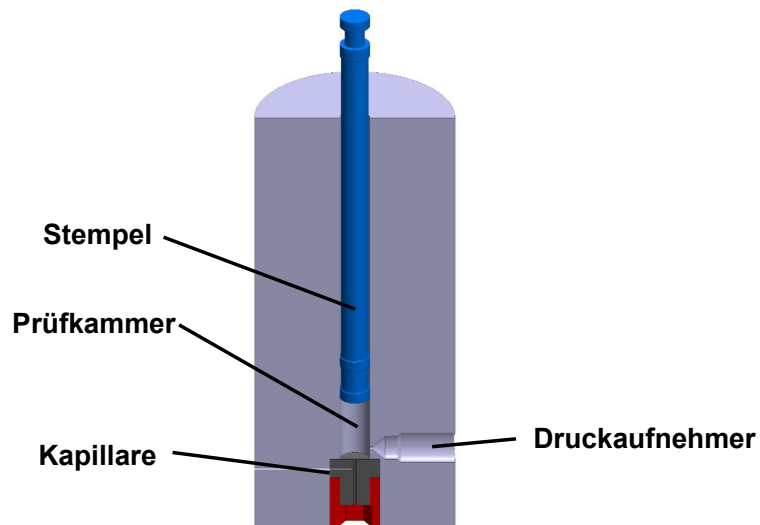
$$T_R(t) = \frac{T_{KS,0} \cdot b_{KS} + T_{ST,0} \cdot b_{ST}}{b_{KS} + b_{ST}} + \frac{p \cdot \mu \cdot v \sqrt{\pi \cdot t_{i+1}}}{b_{KS} + b_{ST}}$$

Brunmayr, T.G.: Tribologische Charakterisierung unterschiedlich geformter Kunststoffschüttgüter und Modellbildung in der Feststoffförderzone für Recyclinganwendungen. Masterarbeit, FH OÖ Campus Wels, 2023

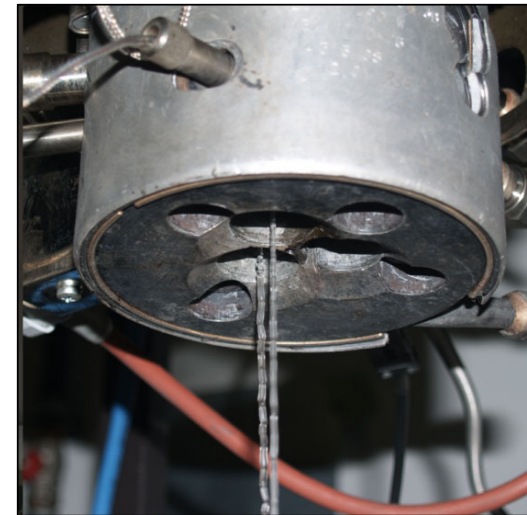
Gemischte Kunststoffe: Fließeigenschaften

- Messung der Fließeigenschaften mittels Hochdruckkapillarrheometer:
 - a) Messung der Einzelpolymere
 - b) Messung definierter Mischungen für die Gegenüberstellung

Prinzip Hochdruckkapillarrheometer



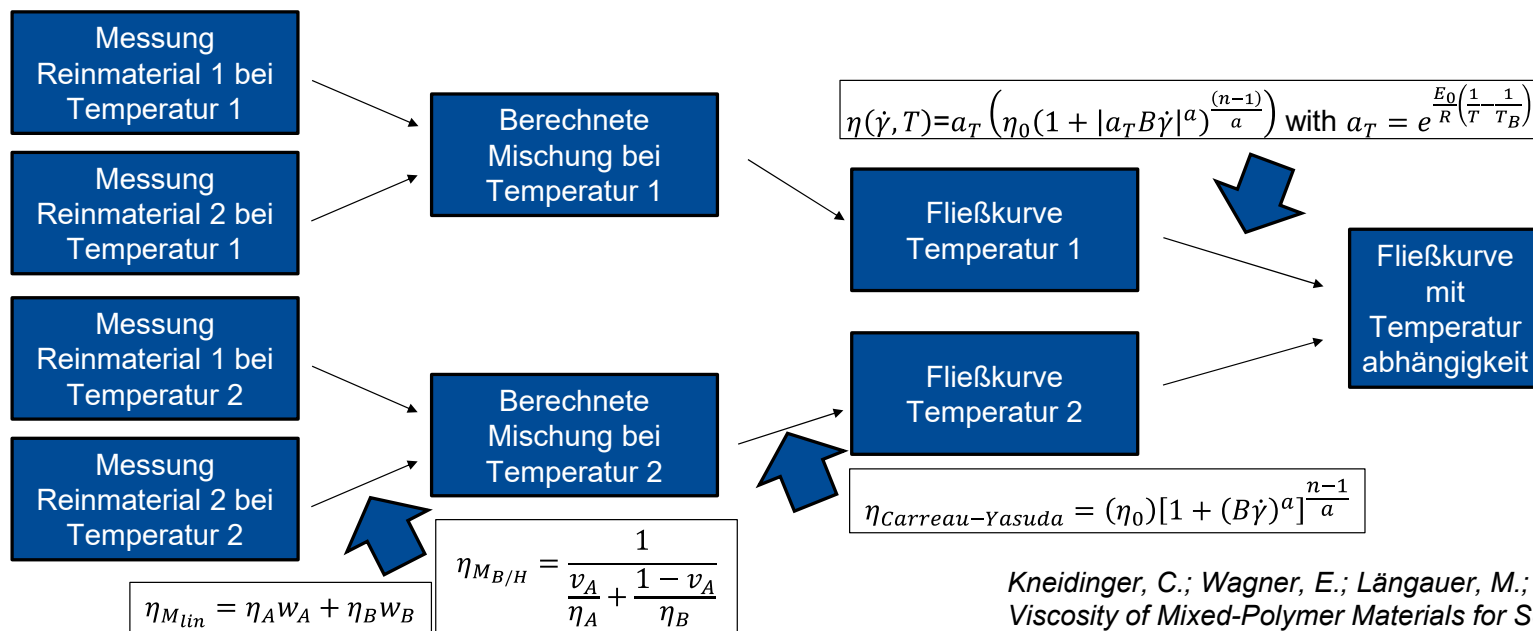
Verwendetes Hochdruckkapillarrheometer



Gemischte Kunststoffe: Fließeigenschaften

- Vorausberechnung der Viskositätskurve von gemischten Kunststoffen (Einfluss von Verunreinigungen durch Fremdpolymere beim Recycling)

Berechnungsschema für die Viskositätskurve gemischter Kunststoffe

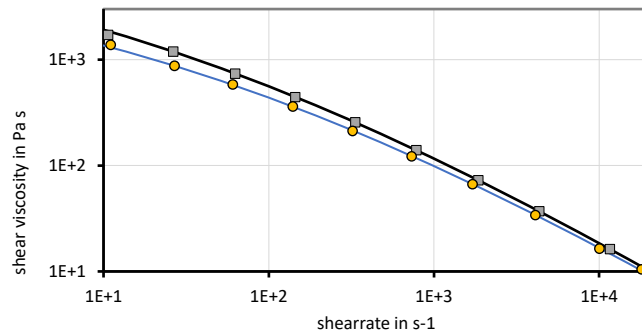


Kneidinger, C.; Wagner, E.; Längauer, M.; Zitzenbacher, G. Estimation of the Shear Viscosity of Mixed-Polymer Materials for Screw Extrusion-Based Recycling Process Modeling. *Polymers* 2024, 16, 1339. <https://doi.org/10.3390/polym16101339>

Gemischte Kunststoffe: Fließeigenschaften

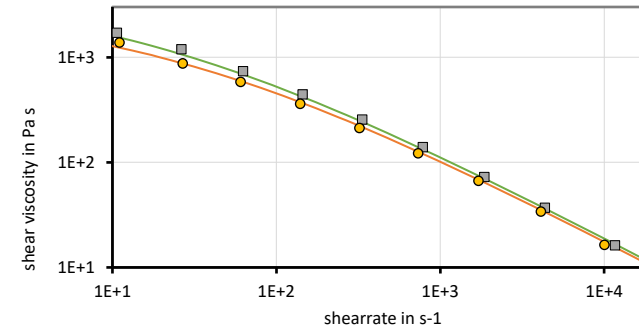
- Viskositätskurve gemischter Kunststoffe:
 - Messung der jeweiligen Polymermischung (Bsp: 90 PP₁/PPgMAH / 10 PA12)
 - Mischungsmodell aus den Daten der Reinpolymeren (Prognosemodell)

Von Messdaten



— Vis. 90PP/PPgMAH_10PA12, Temp.: 230 °C
— Vis. 90PP/PPgMAH_10PA12, Temp.: 250 °C
■ 90PP/PPgMAH_10PA12 Temp. 230 °C
● 90PP/PPgMAH_10PA12 Temp. 250 °C

Mittels Mischungsmodell



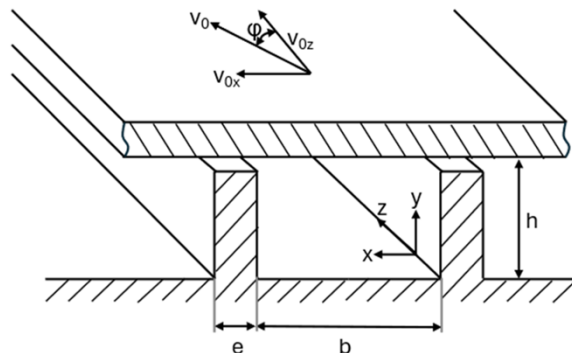
— Vis. 90PP/PPgMAH_10PA12, Temp.: 230 °C, mixing rule
— Vis. 90PP/PPgMAH_10PA12, Temp.: 250 °C, mixing rule
■ 90PP/PPgMAH_10PA12 Temp. 230 °C
● 90PP/PPgMAH_10PA12 Temp. 250 °C

Mittels Mischungsmodell wird eine sehr gute Übereinstimmung erzielt

Gemischte Kunststoffe: Simulation der Schmelzeförderung

- Einbindung des Viskositätsmischungsmodells in das Simulationsmodell:
 - a) Flaches Kanalmodell
 - b) Leckströmung über die Schneckenstege und Seitenwandeinfluss werden mittels Korrekturfunktionen berücksichtigt
 - c) Schergeschwindigkeitsabhängigkeit der Viskosität wird mittels Methode der repräsentativen Größen berücksichtigt

Flaches Kanalmodell



Durchsatz / Druck:

$$\dot{V} = \frac{v_{0z} i b h}{2} f_s f_{LS} f_{\eta_s} - \frac{i b h^3}{12 \eta_{rep}} \frac{\Delta p}{Z} f_p f_{LP} f_{\eta_p}$$

Repräsentative Viskosität:

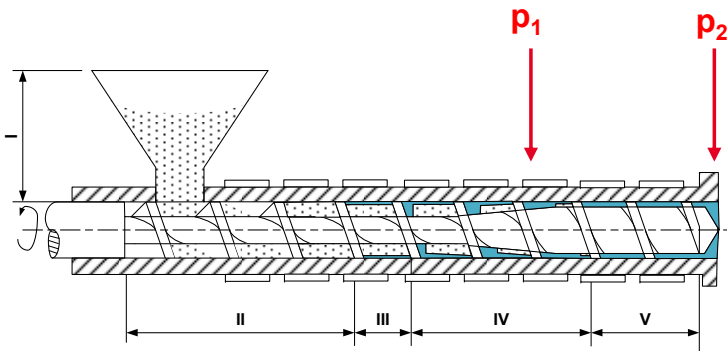
$$\eta_{rep} = (\eta_0) \left[1 + (B \dot{\gamma}_{rep})^a \right]^{\frac{n-1}{a}}$$

Wagner, E.; Kneidinger, C.; Burgstaller, C.; Zitzenbacher, G. Simulation of the Melt Conveying Zone of a Single-Screw Extruder for Mixed Polymer Materials Using an Isothermal Analytical Flat Plate Model. *Polymers* **2025**, *17*, 3145. <https://doi.org/10.3390/polym17233145>

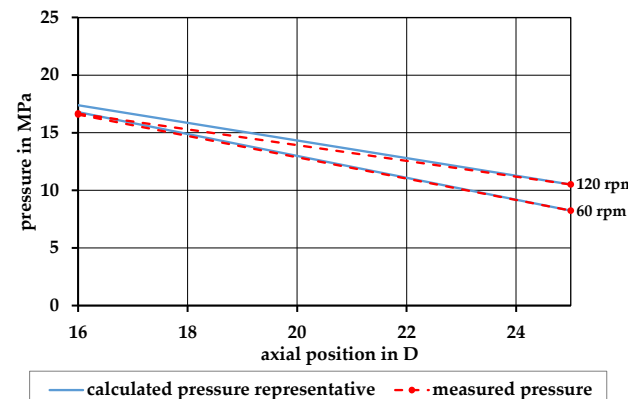
Gemischte Kunststoffe: Simulation der Schmelzeförderung

- Simulation des Druckverlaufs für gemischte Kunststoffe:
 - Verunreinigung des Basispolymers durch eine andere Polymer-Type
 - Verunreinigung des Basispolymers durch Polyamid

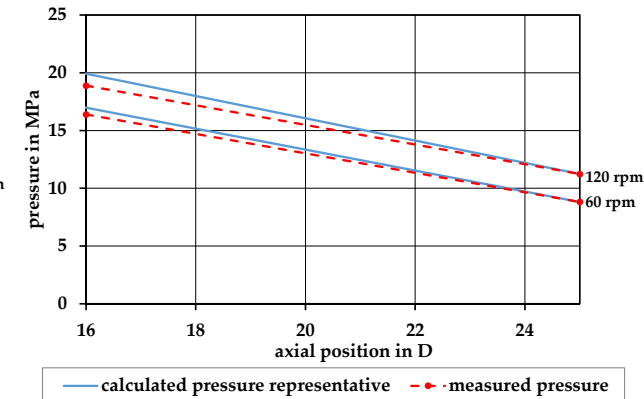
Extruder (Prinzip) mit Druckmessstellen



Vergleich gemessener und simulierter Druckverlauf



90 PP₁ / 10 PP₂, T = 230°C



90 PP₁/PPgMAH / 10 PA 12, T = 230°C

Zusammenfassung



- Kunststoffe liegen im Recyclingprozess in abweichender Form im Vergleich zu Neuware vor
- Die prozessrelevanten Stoffeigenschaften (Schüttgutedichte, äußerer Reibkoeffizient) und das Förderverhalten des festen Kunststoffes werden durch die Form beeinflusst
- Ein Prozessmodell ermöglicht in Verbindung mit Materialmodellen die Druckberechnung im Feststoffbereich für diese unterschiedlichen Formen
- Kunststoffe liegen im Recyclingprozess in der Regel nicht in Reinform vor, sondern sind durch Fremdpolymere verunreinigt
- In Abhängigkeit von der Art und Konzentration des Fremdkunststoffes werden die Fließeigenschaften verändert
- Ein rheologisches Mischungsmodell ermöglicht in Kombination mit der Simulation der Schmelzeförderzone die Voraussage der Auswirkungen auf Durchsatz und Druck

Danksagung

Das Projekt NaKuRe mit der Projektnummer: "Wi-2021-305611/21-Au / NaKuRe" wurde aus Forschungsförderungsmitteln des Landes Oberösterreich finanziert.



Ich danke den Mitarbeiter*innen der Forschungsgruppe "NaKuRe", insbesondere Christian Kneidinger, Manuel Längauer, Katharina Lindau, Thomas Günther Brunmayr, Emil Wagner, Kevin Ngo, Alexander Syrowatka und Wolfgang Kofler.

Kontakt:

FH-Prof. Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. mont. Gernot Zitzenbacher

FH OÖ, Stelzhamerstraße 23, 4600 Wels, Austria

Email: g.zitzenbacher@fh-wels.at

Tel.: +43 (0)50804 44520