

Zeitschrift Kunststofftechnik Journal of Plastics Technology

archivierte, rezensierte Internetzeitschrift des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik (WAK)
archival, reviewed online Journal of the Scientific Alliance of Polymer Technology
www.kunststofftech.com; www.plasticseng.com

eingereicht/handed in: 01.09.2006
angenommen/accepted: 17.11.2006

**Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg, Dipl.-Ing. Hassan Rahal,
Institut für Product Engineering/ Konstruktion und Kunststoffmaschinen,
Universität Duisburg-Essen**

Einfluss der tribologischen Eigenschaften der Schneckenoberfläche auf die Feststoffförderung und Belagbildung im Extruder mit axial profilierter Einzugszone

Die Entwicklung von Einschneckenextrudern mit schnelldrehenden Schnecken (High Speed Extrusion) erfordert grundlegende Untersuchungen zum Feststoffförderverhalten über einen weiten Bereich der Umfangsgeschwindigkeit.

Hierzu wurden die Auswirkungen verschiedener Rauigkeiten und Oberflächenbeschichtungen der Schnecke bei verschiedenen Additiven und Konzentrationen (Gleitmittel und Verarbeitungshilfsmittel) untersucht. Die Effekte wurden bei Schneckenumfangsgeschwindigkeiten bis ca. 2 m/s untersucht. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Reibkräfte und damit die Förderrate im Einzugsbereich nur durch die Deformation der Mikrokontaktstellen beeinflusst werden.

Influence of the tribological properties of the screw surface on the solids conveying and plastic deposit in extruders with axial grooved feed zone

The development of high speed single screw extruders requires fundamental investigations of solids conveying behaviour above a wide field of peripheral screw speed. In this study, the influence of several roughness and coatings of the screw surface are investigated on several additives and concentration (slip agent and processing aid). The influences are investigated up to a peripheral screw speed approximately 2 m/s. The experimental results shown, that the friction forces and so the throughput in the feed section are only to be affect through the deformation work between the friction partners.

Autor/author

Dipl.-Ing. Hassan Rahal,
Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg,
Universität Duisburg-Essen
Institut für Product Engineering
Lotharstr. 1
47057 Duisburg

E-Mail-Adresse: Hassan.Rahal@uni-due.de
Webseite: www.uni-due.de
Tel.: +49(0) 203 379-4268
Fax: +49(0) 203 379-4379

Einfluss der tribologischen Eigenschaften der Schneckenoberfläche auf die Feststoffförderung und Belagbildung im Extruder mit axial profilierter Einzugszone

J. Wortberg, H. Rahal,
Institut für Product Engineering / Konstruktion und Kunststoffmaschinen,
Universität Duisburg-Essen

Die Entwicklung von Einschneckenextrudern mit schnelldrehenden Schnecken (High Speed Extrusion) erfordert grundlegende Untersuchungen zum Feststoffförderverhalten über einen weiten Bereich der Umfangsgeschwindigkeit. Hierzu wurden die Auswirkungen verschiedener Rauigkeiten und Oberflächenbeschichtungen der Schnecke bei verschiedenen Additiven und Konzentrationen (Gleitmittel und Verarbeitungshilfsmittel) untersucht. Die Effekte wurden bei Schneckenumfangsgeschwindigkeiten bis ca. 2 m/s untersucht. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die Reibkräfte und damit die Förderrate im Einzugsbereich nur durch die Deformation der Mikrokontaktstellen beeinflusst werden. Eine feine Metalloberfläche und die Zugabe von Gleitmittel führen zur Erhöhung des Förderwirkungsgrades und zu einer verringerten Neigung zur Belagbildung im Einzugsbereich des Extruders. Das Gleitmittel verringert die Reibungskoeffizienten auf der Schneckenoberfläche, der Zylinderinnenfläche und in den Nuten und verbessert zusätzlich das Materialrieselverhalten insbesondere bei hohen Drehzahlen. Fluor basierte Verarbeitungshilfsmittel bewirken eine Vermeidung bzw. eine Reduzierung der Belagbildung, jedoch hatten keinen ersichtlichen Einfluss auf die Förderrate. Bei sehr hohen Schneckendrehzahlen ist bei allen untersuchten Kombinationen kein signifikanter Einfluss der Oberflächenrauigkeit und der Beschichtung auf die Förderrate mehr zu erkennen.

The development of high speed single screw extruders requires fundamental investigations of solids conveying behaviour above a wide field of peripheral screw speed. In this study, the influence of several roughness and coatings of the screw surface are investigated on several additives and concentration (slip agent and processing aid). The influences are investigated up to a peripheral screw speed approximately 2 m/s. The experimental results shown, that the friction forces and so the throughput in the feed section are only to be affect through the deformation work between the friction partners. A low screw surface roughness and a slip agent contribute significant to increase the specific throughput and to reduce the propensity for deposit on the screw in the feed section. The slip agent reduces the friction coefficient on the screw surface, on the barrel surface and in the groovings. It improves additional the material free-

flowing properties particularly at high screw speeds. The processing aid only leads to avoid and to decrease the propensity for deposit respectively. It hasn't an obvious influence on the throughput. The screw surface roughness and the coatings don't exhibit any influence on the solids conveying at screw high.

1 EINLEITUNG

Im Bereich der Einzugszone, in der das Material als Feststoff erhalten bleibt, bestimmen die Reibkräfte den Förderprozess im Extruder. In der Literatur werden bei der Berechnung des Durchsatzes häufig die äußeren Reibwerte (Feststoff/Stahl) am Zylinder, in den Nuten und auf der Schnecke gleich betrachtet. Dieser äußere Reibwert wird normalerweise experimentell ermittelt [1]. Für eine effektive Förderung des Feststoffes sind ein hoher Reibwert auf der Zylinderinnenfläche und ein sehr niedriger Reibwert auf der Schneckenoberfläche wünschenswert [2-6]. Außerdem trägt ein geringerer Reibwert in den Zylindernuten noch zur Erhöhung der effektiven Förderwinkel bzw. des Förderwirkungsgrades bei [5]. Bei der Verarbeitung von PVC wurde früh erkannt, dass die Oberflächenrauigkeit die Reibwerte von Zylinder und Schnecke bestimmt [7].

Ist das Polymer vollständig aufgeschmolzen, wird die Schmelze an den Oberflächen von Schnecke und Zylinder anhaften. Zudem treten unabhängig vom Material Wechselwirkungen zwischen Polymerschmelzen und Metallteilen auf, welche zu Belagbildungsreaktionen führen [8] und den Prozess negativ beeinflussen können.

Die Grenzschichtphänomene und der Einfluss von Gleitmittel und Verarbeitungshilfsmittel auf Strömungsphänomene im Schmelzebereich wurden umfassend untersucht. Gezielte Untersuchungen über den Einfluss der Effekte bei der Feststoffförderung im Einzugsbereich sind nicht bekannt. Ein Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Untersuchung dieser Phänomene im Einzugsbereich.

2 THEORIE UND GRUNDLAGEN

Die Feststoffförderung im Extruder mit einer genuteten Einzugszone hängt von der Geometrie im Einfüll-/Einzugsbereich und der Reibung zwischen dem zu verarbeitenden Material und der Schneckenoberfläche sowie der Zylinderinnenfläche ab. Bild 1 stellt die Definition der Einfüllöffnung, Einfüllzone und Einzugszone dar.

Heute angewendete Durchsatzberechnungsmodelle gehen davon aus, dass nach der Vorderkante der Einfüllöffnung der Durchsatz des Extruders bestimmt

wird [8]. Für die Berechnung des Durchsatzes in genuteten Einzugszonen bei Granulatförderung gilt immer noch die folgende Formel:

$$\dot{m} = \rho_s \cdot n \cdot D^3 \cdot 2,34 \cdot \left(\frac{\bar{\mu}_z}{\mu_s^{1,2}} - 1,3 \right)^{1/6} \cdot \left(\frac{h}{D} \right) \cdot \left(\frac{T}{D} \right) \cdot \left(1 - 2,3 \cdot \frac{b}{D} \right) \cdot \left(1 + 0,9 \cdot \frac{t_{\max}}{D} \right) \quad (1)$$

Für den Fördervorgang sind die vier Reibwerte Schneckenreibwert (μ_s), Zylinderreibwert (μ_z), Nutenreibwert (μ_N) und der innere Reibwert (μ_i) maßgeblich.

Der Reibungskoeffizient (μ_i) ist eine Rohstoffkonstante, daher bietet es sich an, die Anzahl der Einflussgrößen auf die Reibwertverhältnisse

$$\mu_s / \mu_i, \mu_z / \mu_i \text{ und } \mu_N / \mu_i \quad (2)$$

zu reduzieren [5].

Die Berücksichtigung dieser Verhältnisse ergibt für den mittleren Zylinderreibwert die folgende Beziehung [5]:

$$\bar{\mu}_z / \mu_i = \mu_z / \mu_i + (1 - \mu_z / \mu_i) N_N b_N / \pi D \quad (3)$$

Die theoretischen Überlegungen zeigen, dass ein niedriger Förderwirkungsgrad bzw. ein geringer spezifischer Durchsatz zu einem großen Teil auf einen hohen Reibwert zwischen dem Rohstoff und der Schneckenoberfläche zurückzuführen ist. Zudem wird der Förderwirkungsgrad durch die oben beschriebenen Reibwerte beeinflusst.

Für die Berechnung des Förderwirkungsgrads $\eta_{\dot{m}}$ gilt [5]

$$\eta_{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_{\text{experimentell}}}{\dot{m}_{\text{th,max}}} \quad (4)$$

Die zwei Haupteinflüsse bei der Festkörpergleitreibung sind die Adhäsion der Grenzflächenschichten und die Deformation der Mikrokontaktstellen [10-12].

Die aufzuwendende Reibungskraft F_R setzt sich demgemäß aus einem Adhäsionsterm $F_{R,adh}$ und einem Deformationsterm $F_{R,def}$ zusammen:

$$F_R = F_{R,adh} + F_{R,def} \quad (5)$$

Der adhäsive Anteil ist durch die Oberflächenenergien der Reibpartner bestimmt und ist proportional zur realen Kontaktfläche und umso höher, je höher die Polarität und je glatter die Oberfläche der Partner ist. Der deformative Anteil geht dagegen auf die Elastizitätsmodule der Reibpartner und die Oberflächenrauigkeit zurück und ist umso höher, je größer die Rauigkeit und damit die Eindringtiefe ist. Es muss allerdings beachtet werden, dass die beiden Anteile von der Temperatur und der Gleitgeschwindigkeit abhängen.

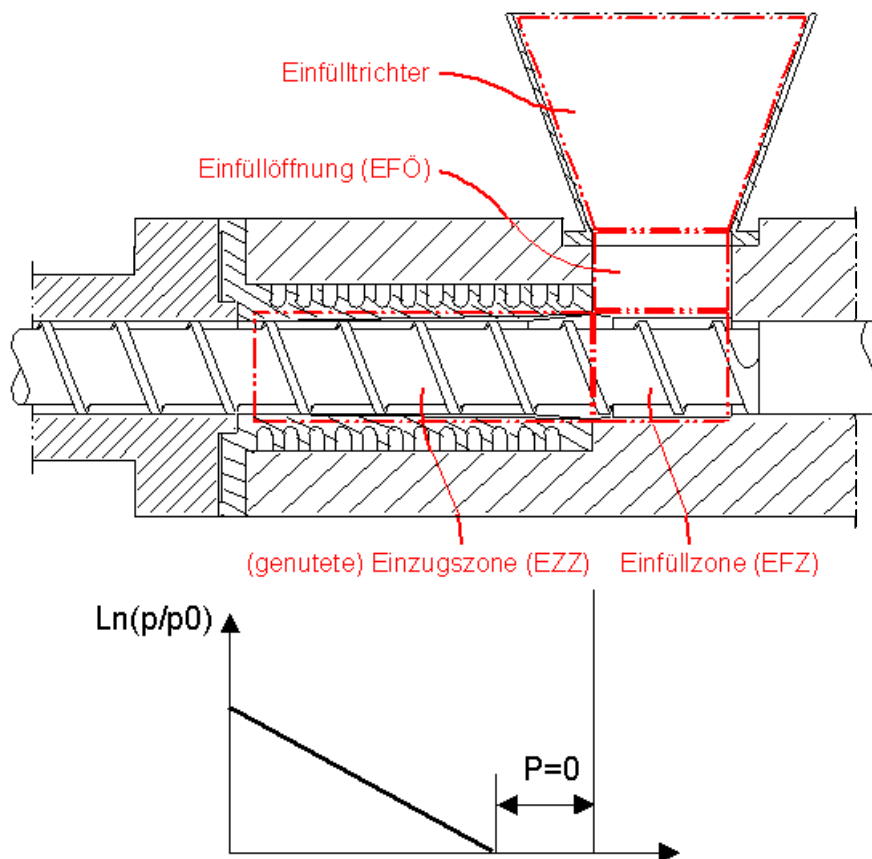


Bild 1: Funktionszonen im Anfangsbereich eines Einschneckenextruders mit genutzter Einzugszone [5]

2.1 Oberflächenenergie und -spannung von Feststoffen und Flüssigkeiten

Unter der Oberflächenspannung versteht man die an einer flüssigen oder festen Oberfläche wirkende Spannung, die bestrebt ist, die Oberflächen zu minimieren, um die energetisch günstigste Form der Oberfläche in Bezug auf ein gegebenes Volumen (Kugel) einzunehmen.

Der Zusammenhang zwischen den Oberflächenspannungen und dem Kontaktwinkel, welcher sich im Benetzungsgleichgewicht einstellt, ist in Bild 2 dargestellt und wird durch die Young'sche Gleichung beschrieben:

$$\sigma_s = \sigma_l \cos \theta + \sigma_{sl} \tag{6}$$

wobei σ_s : Oberflächenspannung des Festkörper
 σ_l : Oberflächenspannung der Flüssigkeit

Die Grenzflächenspannung σ_{sl} hängt von der Art und dem Umfang der Wechselwirkungen zwischen der Substratoberfläche und der Benetzungsflüssigkeit ab.

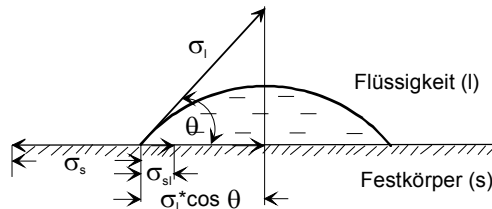


Bild 2: Prinzip der Kontaktwinkelmessung am stehenden Tropfen

Als Maß für die Benetzung dient der Kontaktwinkel θ . Atomare bzw. molekulare Wechselwirkungen treten auch im Fall von zwei aufeinander gleitenden Feststoffkörpern auf. Eine solche Wechselwirkung ist beim Reibungskontakt von Paarungen mit Polymerwerkstoffen die Ausbildung physikalischer Adhäsionsenergien zwischen den real kontaktierten Oberflächen aufgrund ihrer Oberflächenenergie.

Da die Grenzflächen- und Oberflächenenergien in ihren Grundlagen auf Kräften zwischen Atomen oder Molekülen beruhen, ist eine Unterscheidung im Hinblick auf die Ursachen dieser Kräfte bezüglich ggf. vorhandener Polarität vorzunehmen. Die Oberflächenenergie kann entsprechend der Wirkung von Dispersionskräften und Dipolwechselwirkung in einen dispersen Anteil γ^d und einen polaren Anteil γ^p aufgeteilt werden [11].

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^p \quad (7)$$

Bei der Trennung von zwei Kontaktpartnern a und b muss die auf die Kontaktfläche bezogene Adhäsionsarbeit W_{ab} aufgebracht werden, welche sich z. B. nach OWENS und WENDT berechnet zu [11]:

$$W_{ab} = \sqrt{\gamma_a^d \cdot \gamma_b^d} + \sqrt{\gamma_a^p \cdot \gamma_b^p} \quad (8)$$

Da die Mikrokontaktstellen bei einem Gleitvorgang der Partner ständig getrennt und neu gebildet werden, lässt sich anhand der Adhäsionsarbeit der Energieumsatz bzw. die Intensität der Reibung beurteilen.

Niedrig energetische unpolare Polymerwerkstoffe (PE-HD, PTFE) leisten unter adhäsiven Gleitbedingungen (glatte Stahloberfläche, geringe Flächenpressung) nur einen geringeren Beitrag zum adhäsiven Teil der Reibung; andererseits wird der adhäsive Anteil bei stärker polaren Polymerwerkstoffen (PA, PMMA, PVC) hoch sein [11]. Die dispersiven Anteile liegen bei den meisten Polymerwerkstoffen zwischen 30 und 45 mN/m. Eine Ausnahme ist PTFE mit einem Wert von nur 18,5 mN/m. Typische polare Anteile für unpolare Polymerwerkstoffe liegen zwischen 0,1 und 0,7 mN/m und für polare Werkstoffe zwischen 3 und 10 mN/m (Randwinkelmessungen am Feststoff, ausgewertet nach dem Verfahren von OWENS und WENDT [11]).

2.2 Einfluss der Oberflächenrauigkeit des Stahlpartners

Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Reibwerte ist vor allem für Gleitlager mit den Reibpartnern Kunststoff und Stahl ausführlich untersucht worden [11]. Eine Verringerung der Oberflächenrauigkeit des Stahlpartners führt bei unpolaren Polymerwerkstoffen zu geringeren Reibwerten, während es bei polaren Polymerwerkstoffen zu hohen Reibwerten führt. Aufgrund dieser unterschiedlichen Rauigkeitsempfindlichkeit haben die Polymerwerkstoffe dementsprechend eine unterschiedliche optimale Rauigkeit. Die optimalen R_z -Werte für Gleitlager liegen zwischen $< 0,2$ (für PTFE) und 3 (für PA6, PA66 und PI). Ein optimaler R_z -Wert für HDPE ist $< 0,5$ [12].

2.3 Oberflächenbeschichtung

Hinsichtlich der Adhäsionsarbeit führt vor allem die große Bandbreite des polaren Energieanteils bei den Polymerwerkstoffen zu einem unterschiedlichen Adhäsions- und Reibungsverhalten gegenüber Metalloberflächen. Besitzt die Oberfläche des Metallpartners eine geringere polare Energie, wird die Adhäsionsarbeit bei polaren Polymeren geringer, während eine geringere dispersive Energie des Metallpartners zu einer geringeren Adhäsionsarbeit bei allen Polymeren führt. Anhand dieses Zusammenhangs wurden im Bereich der Kunststoffverarbeitung die Oberflächen der Schnecken und der Werkzeuge mit unterschiedlichen Beschichtungen zur Reduzierung der Entformungskräfte (bei Spritzgießwerkzeugen) und zur Verringerung der Ablagerung und des Reinigungsaufwands sowie zum Schutz gegen Korrosion beschichtet [z. B.13-16].

Der Einfluss der Beschichtung auf die Förderleistung des Nutbuchsenextruders wurde in [5] untersucht. Die Ergebnisse zeigen kein einheitliches Bild.

Durch die Modifikation mit verschiedenen Elementen lassen sich die Schichteigenschaften in einem weiten Bereich gezielt verändern [17,18]. Mit dem Einbau von Substitutionselementen wie z. B. Fluor, Silicium, Sauerstoff oder Stickstoff in die molekulare Struktur der Schichten können vor allem die Oberflächenenergieanteile gezielt beeinflusst werden. Stickstoff und Sauerstoff vergrößern die Oberflächenenergie, insbesondere den polaren Anteil, während Fluor und Silicium eine Verringerung bis hin zu Minimalwerten in der Nähe der Eigenschaften des PTFE erlauben.

Die Oberflächenenergie hängt von der chemischen Struktur der zu untersuchenden Oberfläche ab, kann aber auch durch Änderungen physikalischer Effekte an der Oberfläche beeinflusst werden.

Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Oberflächenenergie ist bis heute vielfach Gegenstand von Untersuchungen gewesen [19]. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen erweisen sich jedoch häufig als widersprüchlich bzw. stark voneinander abweichend.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Ziel der Untersuchungen ist die Analyse der Einflüsse von

- Rauigkeit der Schneckenoberfläche,
- Schneckenoberflächenbeschichtungen und
- Zugabe von Gleitmittel und Verarbeitungshilfsmittel

auf den Durchsatz in Extrudern mit profilierten Einzugszonen und schnelllaufenden Schnecken unter Berücksichtigung der Grenzschichtbildung im stationären Prozess. So konzentrieren sich die Untersuchungen auf den Bereich bis zum Ende der profilierten Einzugszone und beschränken sich auf ein axial feststehendes Schnecke/Zylinder-System, Bild 1. Die maximal erreichbare Schneckenumfangsgeschwindigkeit beträgt ca. 2 m/s.

Zur Durchführung der Versuche stehen drei Schneckenstummel zur Verfügung, die eine Länge von nur 4 D aufweisen. Der Schneckendurchmesser beträgt 50 mm, wobei die Gangtiefe und -steigung $4,8 \times 0,8 D$ betragen. Die Schnecken sind eingängig ausgeführt und unterscheiden sich durch ihre Oberflächenbeschichtungen und Rauigkeiten.

Die Messergebnisse bezüglich der Rauigkeiten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Schnecken- oberfläche	Stahl	Stahl (nachpoliert)	CrN- mod.	CrN-mod. (neu besch.)	Lunac2	Lunac1
R _a (arith. Mittelw.)	0,262	0,0432	0,306	0,22	0,173	0,0233
R _z (arith. Mittelw.)	2,008	0,307	2,266	1,962	1,803	0,135

Tabelle 1: Die Oberflächenrauigkeiten der untersuchten Schnecken

3.2 Untersuchte Beschichtungen

3.2.1 CrN-modifizierte Beschichtung

Diese Beschichtung wurde auf CrN-Basis entwickelt, um die Belagbildung in Extrusionswerkzeugen oder beim Spritzgießen zu vermeiden [14].

Durch Zugabe geeigneter Dotierstoffe soll die Oberflächenenergie der Beschichtung gesenkt werden. Zudem soll sich hierdurch eine weitgehend amorphe, besonders glatte Oberfläche einstellen. Anders als eine Stahloberfläche bildet die CrN-modifizierte Beschichtung keine freien Valenzen

mit polaren Kunststoffen, sodass chemisch gebundene Ablagerungen und Zwischenbindungszustände vermieden werden.

3.2.2 Lunac 1

Bei Lunac 1 handelt es sich um eine Metalloglas-Beschichtung. Diese Beschichtung ist darauf ausgelegt, dass die Bildung und Haftung von Abbauprodukten auf der Werkzeugoberfläche verhindert werden sollen. Weiterhin soll sie eine sehr gute Korrosionsresistenz haben [15], ist aber im Vergleich zu Lunac 2 weniger verschleißfest und bruchempfindlicher im Kantenbereich. Wegen des guten Fließpolier-Effektes lassen sich Endrauhigkeiten von $R_a = 0,02$ bis $R_a = 0,002$ erzielen.

3.2.3 Lunac 2

Bei Lunac 2 handelt es sich ebenfalls um eine Metalloglas-Beschichtung. Diese Beschichtung hat eine hohe adhäsive und abrasive Verschleißfestigkeit sowie geringe Fressgefahr auf Schneckenstegen. Es wird behauptet, dass der Reibungskoeffizient im Vergleich zu Stahl um 30 % niedriger [15] sei.

Neben den notwendigen geringeren Reibungskoeffizienten und der guten Antihafwirkung auf der Schneckenoberfläche soll diese Oberfläche im Bereich der Einzugszone verschleißfest sein. So wurden hinsichtlich der Eigenschaften von Lunac 1 und Lunac 2 die Stege eines Schneckenstummels mit Lunac 2 und der Schneckenrund mit Lunac 1 beschichtet.

3.3 Material

3.3.1 Polymer

Hierbei handelt es sich um ein Vestolen A 6060/R (PE-100) der Fa. Sabic. Das Material zeichnet sich durch eine hohe Dichte aus und ist frei von Gleitmitteln und Fluor basierten Stoffen, ist aber schwarz (Ruß-Pigment) eingefärbt. Der Schmelzindex beträgt $0,1$ [g/10 min]. Das Material wird für die Rohrherstellung verwendet.

3.3.2 Gleitmittel

Bei dem verwendeten Gleitmittel handelt es sich um ein Erucamide der Fa. Schulman. Die Konzentration des Erucamids in dem Trägermaterial (Polyethylen) beträgt 5 %. Typische Zugabe von Erucamide-Masterbatch bei der Verarbeitung ist in der Praxis zwischen 1 - 2 %.

3.3.3 Verarbeitungshilfsmittel

Es handelt sich hierbei um 3 % in PE-LLD konzentriertem Fluorpolymer Copolymer (PPA). Typische Zugabe von PPA-Masterbatch liegt zwischen 0,5 – 2 %.

3.4 Charakterisierung der Oberflächenenergie

Zur genauen Charakterisierung und Auswertung wurden neben der Rauigkeit die Kontaktwinkel gemessen und die entsprechenden Oberflächenenergien berechnet. Alle Messungen wurden mittels der Sessile Drop Methode durchgeführt. So stand das Kontaktwinkelmessgerät OCA 20 der Fa. Dataphysics zur Verfügung. Es handelt sich wie bei allen Kontaktwinkelmessgeräten hierbei um ein optisches Messsystem. Weitere Informationen zum Messverfahren sind in [16] zu finden.

3.4.1 Oberflächenenergie der Schnecken

Anhand der gemessenen Kontaktwinkel wurden die Oberflächenenergien nach (Owens) berechnet. Es ist in Bild 3 zu erkennen, dass die Oberflächenenergien aller Beschichtungen zwischen 38 und 41 mN/m liegen. Im Vergleich zu einem unbeschichteten Chromstahl (1.2379) liegen die Oberflächenenergien aller Beschichtungen unterhalb der des Stahls. Zwar sind die Differenzen relativ gering, doch haben sich in vielen Untersuchungen Vorteile dieser Beschichtungen im Adhäsionsverhalten (z. B. geringere Ausformkräfte, Vermeidung von Belagbildung [14,15]) gezeigt, weshalb sie in der Industrie meist erfolgreich eingesetzt werden. Dabei werden die vorliegenden Rauigkeiten nicht erwähnt.

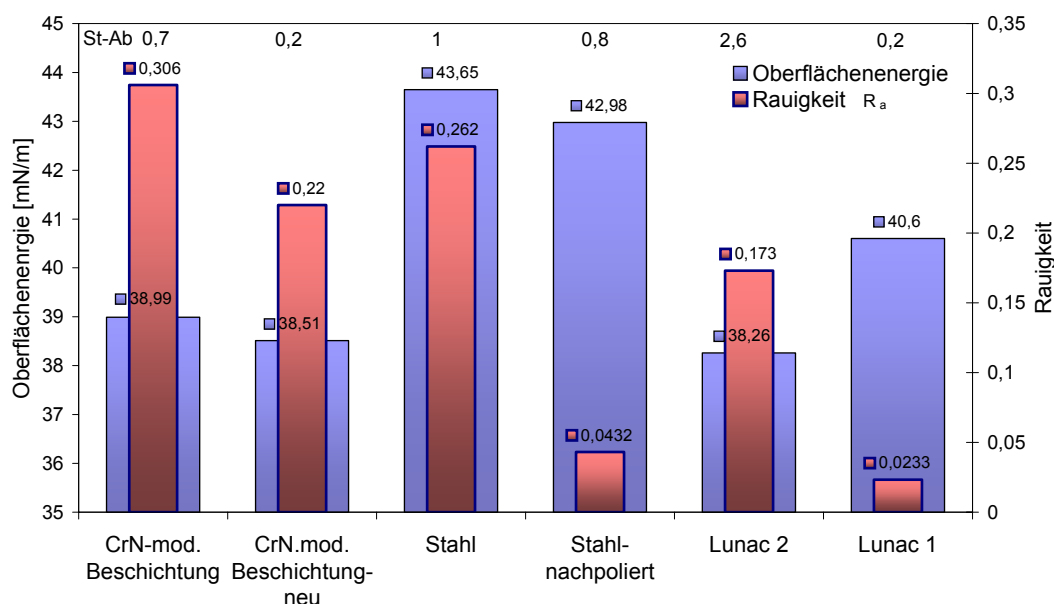


Bild 3: Die Oberflächenenergie der untersuchten Oberflächen

Die Standardabweichungen sind sehr gering und beeinflussen das qualitative Ergebnis der Messung nicht. Eine Ausnahme ist hierbei die Lunac 2 Beschichtung mit einer Abweichung von 2,6 %. Es ist davon auszugehen, dass die Inhomogenität, Bild 4, in der Oberfläche Grund für diese Abweichung ist.

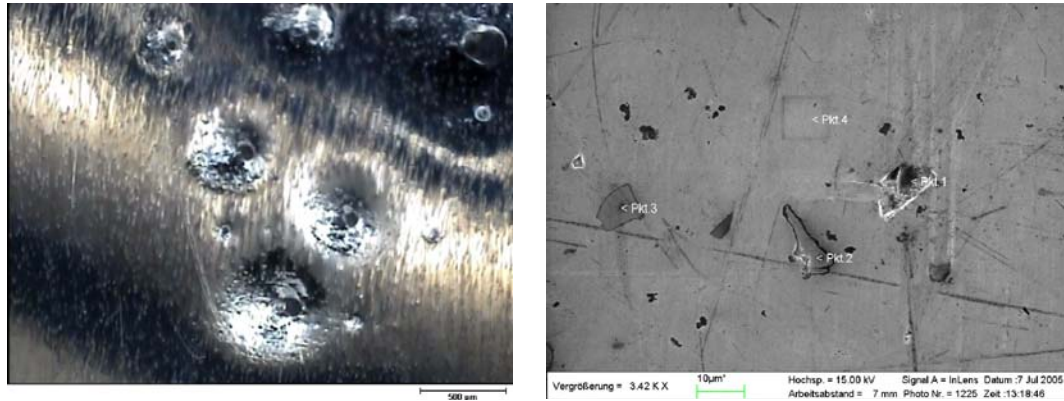


Bild 4: Lunac 2

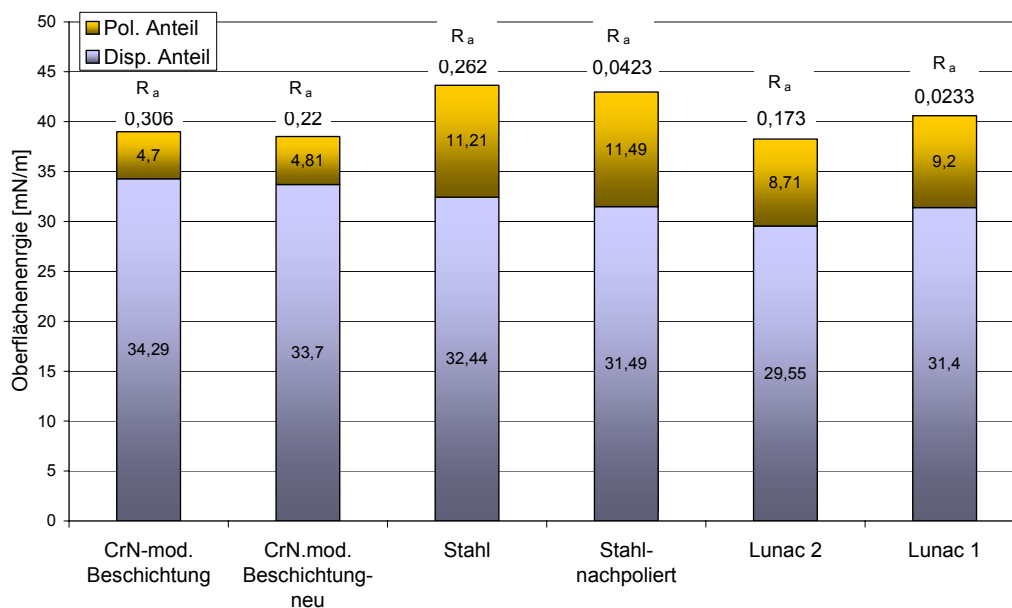


Bild 5: Die dispersiven und polaren Anteile der Oberflächenenergie

Betrachtet man die polaren und die dispersiven Anteile der Oberflächenenergie, Bild 5, so zeigt sich, dass alle Oberflächen zum überwiegenden Teil disperse Anteile besitzen. Dieses Verhältnis von dispersiven zu polaren Anteilen stimmt mit den Ergebnissen anderer Autoren überein [16,19]. Die polaren Anteile aller Beschichtungen sind deutlich unterschiedlich. Diese Unterschiede werden je-

doch zum Teil durch ihre dispersiven Anteile bei der Betrachtung der gesamten Oberflächenenergie kompensiert. Mit Abnahme der Rauigkeit bei der unbeschichteten Stahloberfläche und bei der mit CrN-mod. beschichteten Oberfläche nimmt die Oberflächenenergie ab. Ein Abfall der Oberflächenenergie bzw. die Zunahme des Kontaktwinkels mit abnehmender Rauigkeit wurde in vielen Arbeiten beobachtet [16,19,21].

Begründet wird dieses Verhalten mit dem Energiegehalt pro Fläche. Die Oberflächenrauigkeiten von $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ haben den Untersuchungen zufolge keinen Einfluss mehr auf das Benetzungsverhalten bzw. auf das Adhäsionsvermögen [19]. Zudem war der Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauigkeit und den Oberflächenenergien der beschichteten Oberflächen (R_a -Werte zwischen 0,11 und 0,0095 Oberflächenrauigkeit) nicht ersichtlich [16].

Die gleichzeitige Änderung der polaren und dispersiven Anteile kann jedoch durch keine bekannte Theorie erklärt werden. Allerdings muss beachtet werden, dass die chemische Zusammensetzung (polar/dispersiv) des Substrats unverändert blieb.

Die entstehende physikalische Änderung der Oberflächenenergie bei Änderung der Rauigkeit kann sich nach einiger Zeit durch die Reibung zwischen den Kontaktpartnern ändern. Zudem wird diese durch die Randbedingungen wie z. B. Temperatur und Gleitgeschwindigkeit beeinflusst.

3.4.2 Oberflächenenergie des polymeren Materials

Um die Oberflächenenergie eines Polymers mit ihren polaren und dispersiven Anteilen zu bestimmen, wird der Kontaktwinkel gemessen und nach dem Verfahren von Wu ausgewertet [22].

Aus Bild 6 ist ersichtlich, dass der polare Anteil sich bei einer Zugabe von Gleitmittel (Erucamide) bzw. Verarbeitungshilfsmittel (PPA) erhöht, und zwar umso mehr, je höher die Konzentration der Additive in der Mischung ist. Dies kann auf die höheren polaren Anteile der Oberflächenenergie in den beiden Additiven zurückgeführt werden.

Betrachtet man die Gleichung (6), so nimmt die Adhäsionsarbeit mit einer Erhöhung der beschriebenen Additivkonzentration im Vergleich zu reinem Polymer zu. D. h., es muss der Adhäsionsterm der Reibungskraft zu-nehmen.

Darüber hinaus wird die Reibung zwischen einer Metalloberfläche und dem reinen PE-HD geringer sein als bei der Zugabe von Erucamide bzw. PPA. So müsste eine höhere Förderrate bei der Verarbeitung von reinem Polymer sowie eine geringere Belagbildung erreicht werden.

Die experimentellen Erfahrungen belegen jedoch ein gegenteiliges Verhalten.

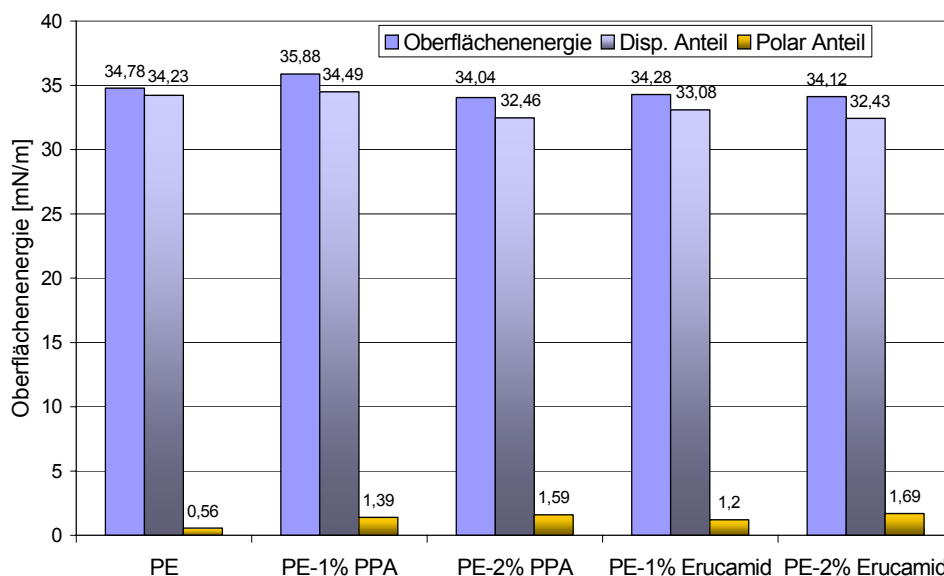


Bild 6: Oberflächenenergie der untersuchten Materialien

3.5 Experimentelle Ergebnisse

3.5.1 Belagbildung

Bei der Verarbeitung von reinem PE-HD ist optisch erkennbar, dass sich auf der unbeschichteten Schnecke ($R_a = 0,262$) und den sowohl mit CrN-mod. ($R_a = 0,306$) als auch mit Lunac 2 beschichteten Schnecken Beläge auf der Schneckenoberfläche im Bereich der durchsatzbestimmenden Zone gebildet haben, Bild 7.

Das schlechteste Ergebnis ist bei Lunac 2 zu sehen. Der Grund liegt darin, dass die untersuchte Oberfläche inhomogen war und Löcher in der Oberfläche vorhanden waren. Diese Beschichtung wurde daraufhin entfernt und mit Lunac 1 im Schneckenrund und Lunac 2 auf den Stegen beschichtet.

Dank der sehr geringen Rauigkeiten bei der neuen Oberfläche und bei der nachpolierten Stahloberfläche konnten bei den mikroskopischen Aufnahmen sehr geringe Spuren von schwarzem PE-HD beobachtet werden, Bild 8.

Bei den mit einer CrN-mod. beschichteten Schnecken ($R_a = 0,22$) wurde auch weniger Belag beobachtet als bei CrN-mod. Beschichtung ($R_a = 0,306$).

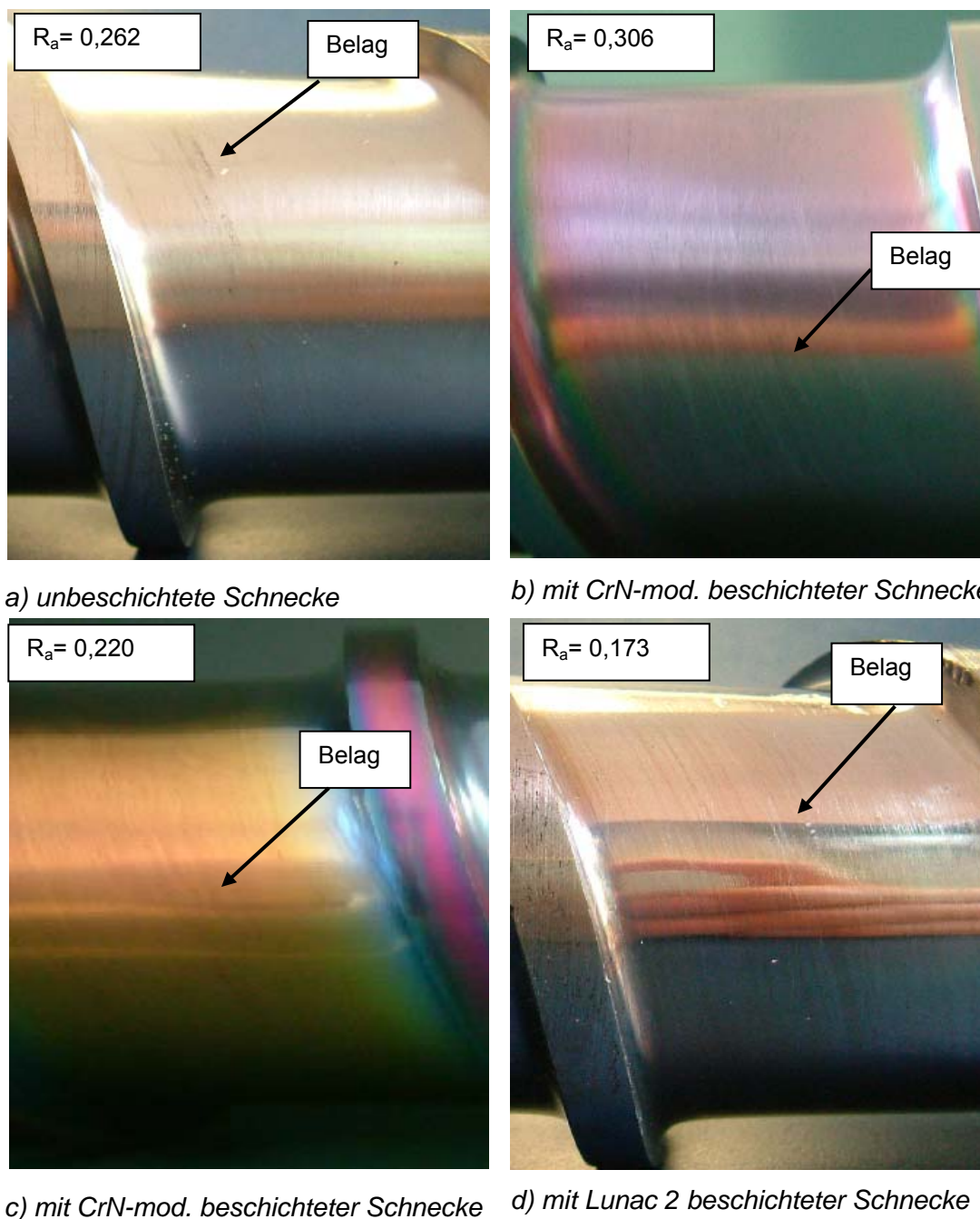


Bild 7: Belagbildung auf der Schneckenoberfläche

Die Zugabe von Erucamide oder PPA bei der Verarbeitung reduziert bei allen getesteten Schnecken die Belagbildung, und zwar umso mehr, je höher die prozentuale Konzentration in der Mischung ist.

Die mikroskopischen Aufnahmen zeigen, dass bei der Zugabe von PPA die Neigung zur Belagbildung geringer ausfällt als bei der Zugabe von Erucamide.

Die Fluor basierten Stoffe wurden in vielen Arbeiten [z. B. 23-25] aber auch in der Industrie erfolgreich zur Vermeidung von Fließinstabilitäten und Belagbildungen im Schmelzbereich der Schnecke bei der Verarbeitung von PE eingesetzt, während Erucamide zur Verringerung des Reibungskoeffizienten von Folienoberflächen bei der Folienherstellung eingesetzt werden [25,26].

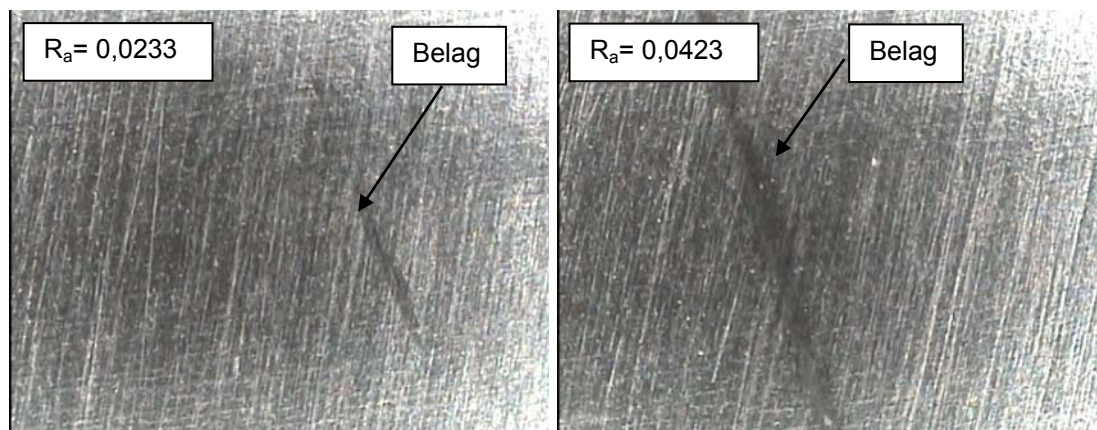


Bild 8: *Belagbildung auf der Schneckenoberfläche*
links: Mit Lunac 1/Lunac 2 beschichteter Schnecke
rechts: Nachpolierte unbeschichtete Schnecke

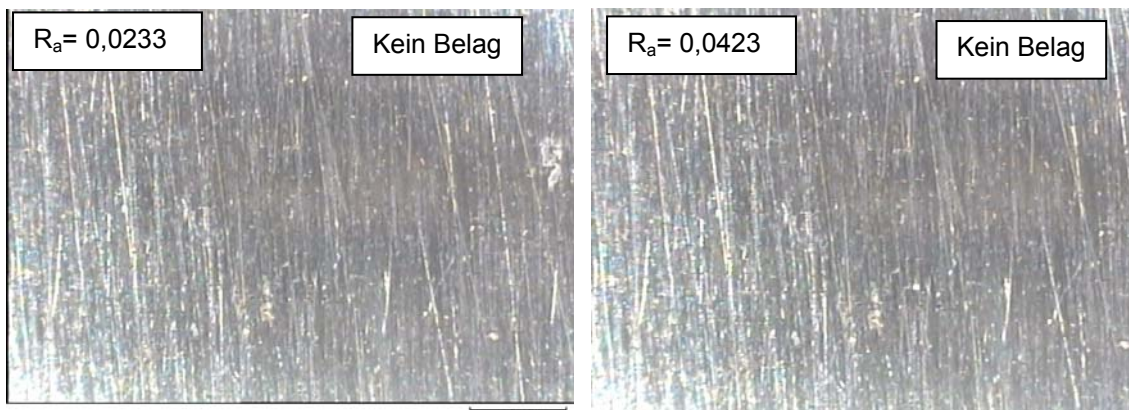
Bei einer Zugabe von 1 % PPA wurde keine Belagbildung auf der mit Lunac 1 beschichteten sowie auf der nachpolierten unbeschichteten Schnecke beobachtet, Bild 9. Die Zugabe von 1 % Erucamide führt bei Lunac 1 zu keiner Belagbildung. Bei der nachpolierten unbeschichteten Schnecke wurde dieses Ergebnis erst bei einer Zugabe von 2% Erucamide erreicht, Bild 10.

Dies konnte auf die bessere Homogenität der Oberfläche der mit Lunac 1 beschichteten Schnecke im Vergleich zu der nachpolierten unbeschichteten Schnecke zurückgeführt werden. Bei allen anderen Versuchen wird immer weniger Belag mit zunehmender Additivkonzentration beobachtet.

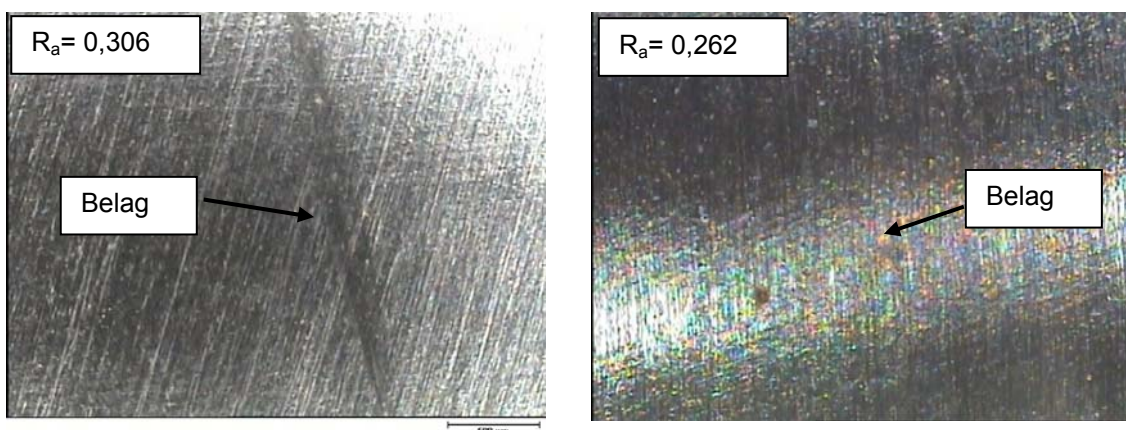
Die Reduzierung der Belagbildung bei Verringerung der Rauigkeit kann nur auf die Reduzierung der harten Rauigkeitsspitzen, die eine geringere Deformation der Mikrokontaktstellen verursacht, zurückgeführt werden. Die geringere Oberflächenenergie kann hierbei nicht ausschlaggebend sein, da bei der Zugabe von den oben erwähnten Additiven nach der Theorie und der Messung der Oberflächenenergie (Anstieg der Adhäsionsarbeit) dies zur Belagbildung führen sollte.

Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die untersuchten Additive zur Reduzierung der Belagbildung beitragen.

Diese Additive beeinflussen den Kontakt an der Grenzfläche der Partner und bewirken eine Vermeidung bzw. Verringerung der Kunststoffablagerung.



a) mit Lunac 1-Lunac 2 Kombination beschichteter Schnecke b) nachpolierte unbeschichtete Schnecke



c) mit CrN-mod. beschichteter Schnecke d) unbeschichtete Schnecke

Bild 9: *Belagbildung auf der Schneckenoberfläche*
oben: Zugabe von 1 % PPA bei der Verarbeitung
unten: Zugabe von 2 % PPA bei der Verarbeitung

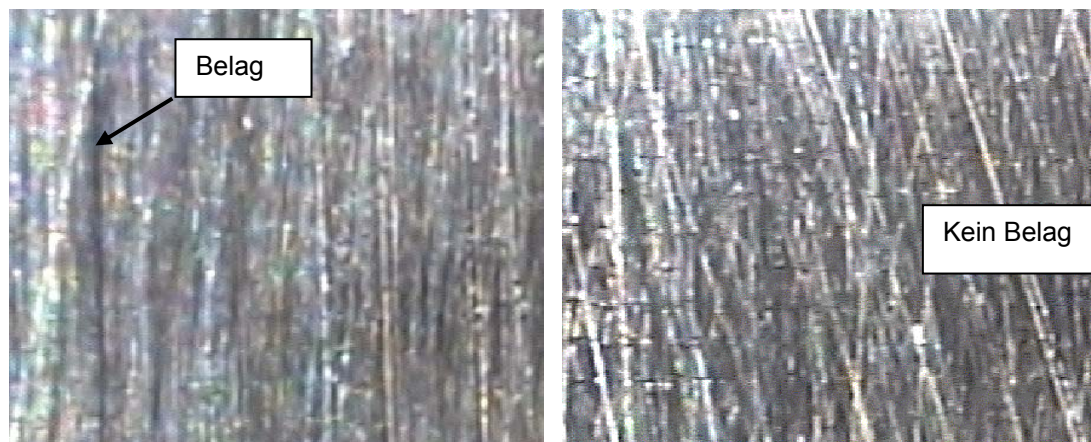


Bild 10: *Nachpolierte unbeschichtete Schnecke (Ra= 0,0423)*
links: Zugabe von 1 % Erucamide
rechts: Zugabe von 2 % Erucamide

3.5.2 Einfluss auf die Förderrate

Bei der Betrachtung der Massedurchsätze im stationären Prozess bei der Verarbeitung von PE-HD mit und ohne Zugabe von Additiven ist ersichtlich, dass die Förderrate sich in Bezug auf die unterschiedlichen eingesetzten Schnecken unter ansonsten konstanten Randbedingungen verändert. Für den unbeschichteten Schneckenstummel wurde eine Verbesserung des Massedurchsatzes bei der Verarbeitung von reinem Material um ca. 5,85 % durch das Nachpolieren der Schnecke erreicht, Bild 11. Der Reibungskoeffizient wird hierbei maßgeblich durch den Festkörperkontakt bestimmt. Die Verringerung der Rauigkeitspitzen der Schneckenoberfläche führt zur Reduzierung des Abriebs und Verbesserung des Gleitvorgangs. Eine ähnliche Verbesserung wird auch bei einer Zugabe von 1% Gleitmittel (Erucamide) erreicht, Bild 11. Die Zunahme des Gleitmittelanteiles bewirkt eine weitere Steigerung des spezifischen Durchsatzes. Grund für diese Verbesserung ist die Bildung eines Gleitfilms in der Grenzfläche der beiden Reibpartner. Die Filmdicke nimmt mit Erhöhung der Erucamidekonzentration zu und erreicht die Gesamtrauhigkeitstiefe von Grund- und Gegenkörper. Die Reibkräfte werden teilweise auch durch den direkten Kontakt der Rauigkeitsspitzen auf den Grundkörper übertragen. Weiterhin ist der Reibungskoeffizient zwischen dem Polymerwerkstoff und der Grenzschicht kleiner im Vergleich zu dem bei Polymer/Metall [24], was geringere deformative Reibkräfte und ein besseres Gleiten des Feststoffes mit sich bringt. Entsteht ein dickerer Film, so werden die Rauigkeitsspitzen von Grund- und Gegenkörper getrennt. Die Reibung hängt demnach vor allem von der inneren Reibung im Film ab. Bei der Zugabe von Fluor basierten Stoffen (PPA) ist kein Einfluss auf die Förderrate bei den durchgeführten Versuchen ersichtlich. Es könnte sein, dass der Reibungskoeffizient (Grenzschicht/Polymer) nicht niedriger als der (Metall/Polymer) ist.

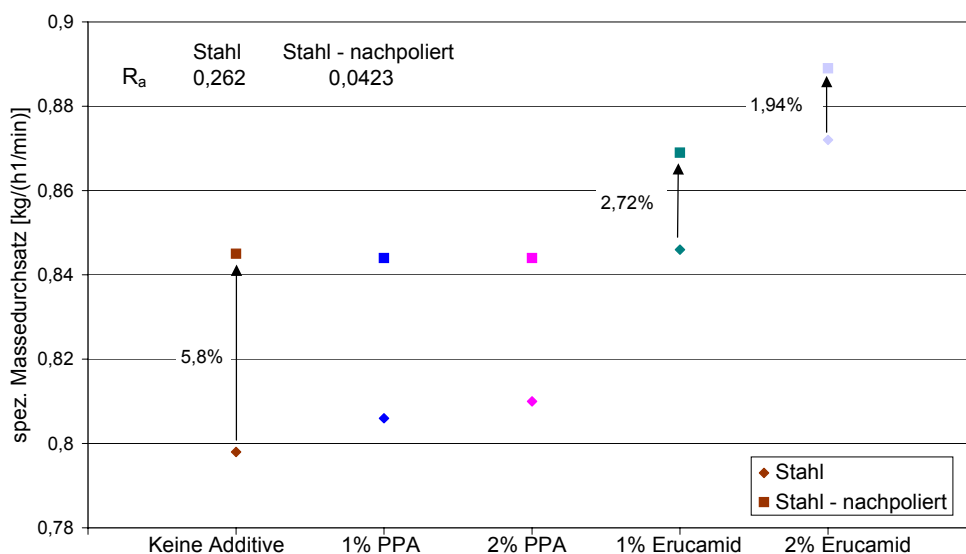


Bild 11: Spez. Durchsatz bei verschiedenen Additiven und unterschiedlichen Rauigkeiten der unbeschichteten Schnecke

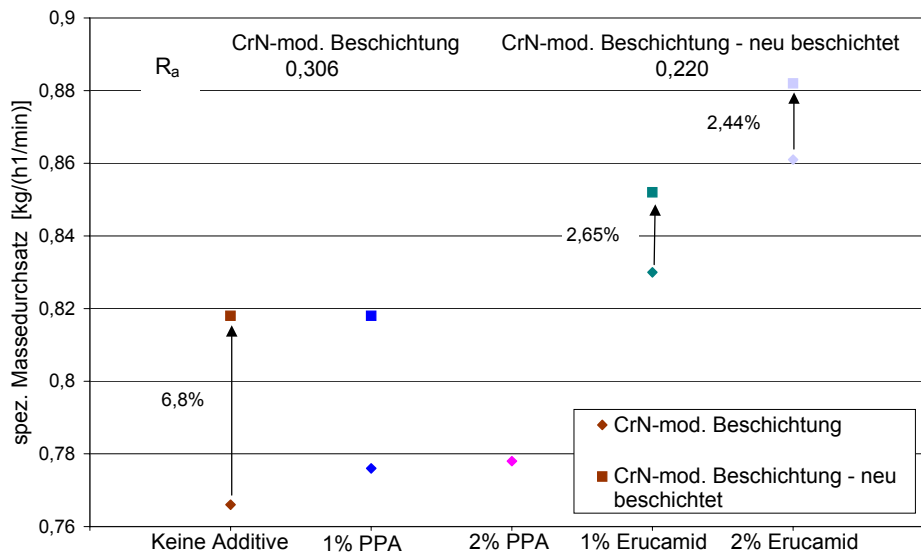


Bild 12: Spez. Durchsatz bei verschiedenen Additiven und unterschiedlichen Rauigkeiten der mit CrN-mod. beschichteten Schnecke

Die Reduzierung der Rauigkeit von $R_a = 0,306$ bis $R_a = 0,22$ bei der mit CrN-mod. beschichteten Schnecke hat einen erheblichen Anstieg des spezifischen Durchsatzes von bis zu 6,8 % zur Folge, Bild 12. Eine feinere Rauigkeit könnte den Effekt einer Zugabe von 1 % Erucamide entsprechen. In Bezug auf die oben beschriebenen Ergebnisse sollte die Adhäsionsarbeit bei einer Zugabe von Erucamide und PPA zunehmen. Dies hätte eine Zunahme der Reibkräfte und damit einen Abfall des spezifischen Durchsatzes zur Folge. Im Gegensatz dazu zeigen die gewonnenen Ergebnisse eine Zunahme des spezifischen Durchsatzes bei der Zugabe von Gleitmittel. Die Zugabe von PPA hat keine ersichtliche Auswirkung auf die Förderrate. Der Vergleich der Ergebnisse zwischen der nachpolierten, unbeschichteten und mit Lunac 1 beschichteten Schnecke ($R_{aLunac1} = 0,0233$ und $R_{aSt-nachpoliert} = 0,0432$) zeigt einheitliche Ergebnisse bei allen Versuchsreihen, Bild 13, trotz unterschiedlicher chemischer Struktur und Oberflächenenergien der Schnecken (polare und dispersive Anteile). Der Grund kann nur auf die quasi ähnlichen Rauigkeiten zurückgeführt werden, da eine Zugabe von Erucamide oder PPA unterschiedliche Werte des polaren Anteiles des Polymerwerkstoffpartners und unterschiedliche Adhäsionsarbeiten verursacht. Darüber hinaus hängt der Reibungskoeffizient im Einzugsbereich des Extruders nur von deformativen Reibkräften ab. Dies erläutert das Ergebnis in [5]. Dabei wurde mit der unbeschichteten Schnecke das beste Ergebnis bei der Verarbeitung von Polyamid (polarer Rohstoff) erreicht. Die Stahloberfläche dieser Schnecke sollte den höchsten polaren Anteil und die höchste Oberflächenenergie im Vergleich zu den untersuchten Oberflächen besitzen, weist aber eine feinere Oberfläche auf.

Vergleicht man alle Ergebnisse hinsichtlich der Rauigkeit, so wurde ein Anstieg des spezifischen Durchsatzes bis zu 10,31 % bei einer Verringerung der Rauigkeit von 0,306 bis zu 0,0233 erreicht. Der spezifische Durchsatz als Funktion der Rauigkeit ist in Bild 14 dargestellt. Der Kurvenverlauf ändert sich bei der Zugabe von Gleitmittel und wird schwächer, je höher die Gleitmittelkonzentration ist. Würden die entstehenden Gleitfilmdicken der Gesamtrauhigkeitstiefe von Grund- und Gegenkörper entsprechen, würden ähnliche spezifische Durchsätze erreicht werden.

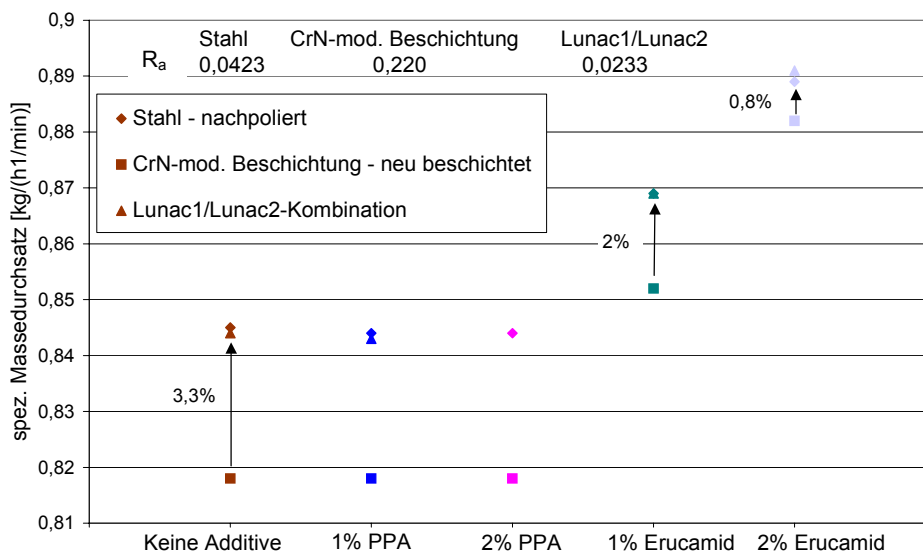


Bild 13: Spez. Durchsatz bei verschiedenen Additiven und verschiedenen Schneckenstummeln

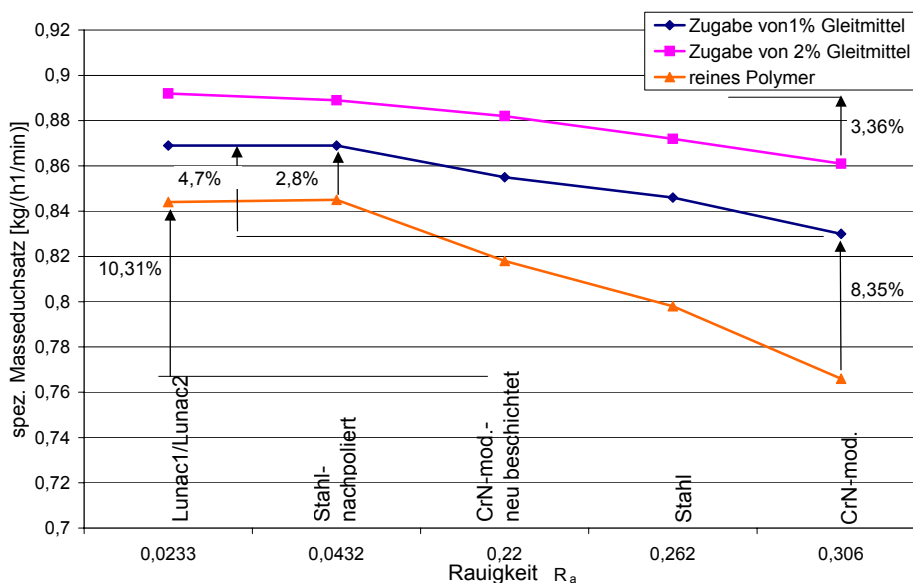


Bild 14: Spez. Durchsatz als Funktion der Rauigkeit

3.5.3 Einflüsse bei hohen Schneckendrehzahlen

Mit zunehmender Schneckendrehzahl wird der Einfluss der Rauigkeit auf den spezifischen Durchsatz schwächer. Dies zeigt sich bei allen untersuchten Schnecken, und zwar mit und ohne Zugabe von Additiven, Bild 15, 6, wobei ab einer Drehzahl von 500 1/min (Schneckenumfangsgeschwindigkeit von ca. 1.31 m/s) eine Reduzierung der Rauigkeit keinen weiteren Einfluss auf die Förderrate hat. Der Grund des Abfalls des spezifischen Durchsatzes mit zunehmender Schneckendrehzahl besteht darin, dass mit steigender Schneckendrehzahl weniger Zeit zur Verfügung steht, den Schneckenkanal im durchsatzbestimmenden Bereich komplett zu füllen, was eine verringerte effektive Schüttdichte hervorruft [27].

Eine weitere Ursache für den geringeren Einfluss der Rauigkeit ist, neben der verringerten realen Kontaktfläche, eine Änderung der Gleitgeschwindigkeit und der Elastizitätsmodule des Polymers und dem davon abhängigen Gleitvorgang zwischen den Reibpartnern. So wird, hervorgerufen durch die geringere Reibfläche, die durch Reibung umgesetzte Energie reduziert, wodurch die Ist-Temperatur an der Schnecke abnimmt. Dies wird durch die Untersuchungen bestätigt; so steigt die Temperatur der Einzugszone zunächst bei steigenden Drehzahlen an, um dann ab 500 1/min wieder abzufallen. Die Temperaturen der Schneckenoberfläche wurden unmittelbar nach den Versuchen mit einem Schneckenstummel gemessen. Diese betragen 62 °C und 54 °C bei Schneckendrehzahlen von 50 und 740 1/min.

Weiterhin sinkt mit zunehmender Schneckendrehzahl die Verweilzeit des Granulates im ausschlaggebenden Schneckenbereich und damit auch die Temperatur der Kornoberflächen. Dadurch ergibt sich eine im Vergleich zu geringen Umfangsgeschwindigkeiten der Schnecke veränderte Kontaktsituation, d.h. die Verformung des Granulates und damit die Größe der Mikrokontaktstellen nehmen ab. Die Auswirkungen des beschriebenen Vorgangs kompensieren die Unterschiede in den Oberflächenrauigkeiten, so dass der spez. Massedurchsatz bei hohen Drehzahlen für alle untersuchten Schnecken auf gleichem Niveau liegt.

Diese Erklärung stimmt mit der Untersuchung des Reibungskoeffizienten von zwei Gleitebenen (Stahl/PE-HD) hinsichtlich der Temperatur aus [28] überein. Hier wurde gezeigt, dass der dynamische Reibungskoeffizient im Bereich von Raumtemperatur bis 60 °C steigt und dann im Temperaturbereich von 60 – 90 °C auf konstantem Niveau bleibt. Bezugnehmend auf die oben beschriebenen Effekte sollten die hohen Schneckendrehzahlen zu einer Reduzierung bzw. Vermeidung der Belagbildung auf der Schneckenoberfläche führen.

Die Verbesserung des spezifischen Durchsatzes ab einer Drehzahl von 650 1/min bei der Zugabe von Erucamide im Vergleich zu dem reinen PE-HD kann auf die bessere Rieselfähigkeit der Granulatkörner und damit die bessere Füllung des Schneckenkanals zurückgeführt werden, Bild 16. Die prozentuale Zunahme beträgt ca. 5 % bei einer Schneckendrehzahl von 740 1/min, während

es ca. 2,4 % bei einer Schneckendrehzahl von 500 1/min sind. Dies bedeutet, dass die Verbesserung des Materialeinrieselverhaltens zu einer Zunahme des spezifischen Durchsatzes führt.

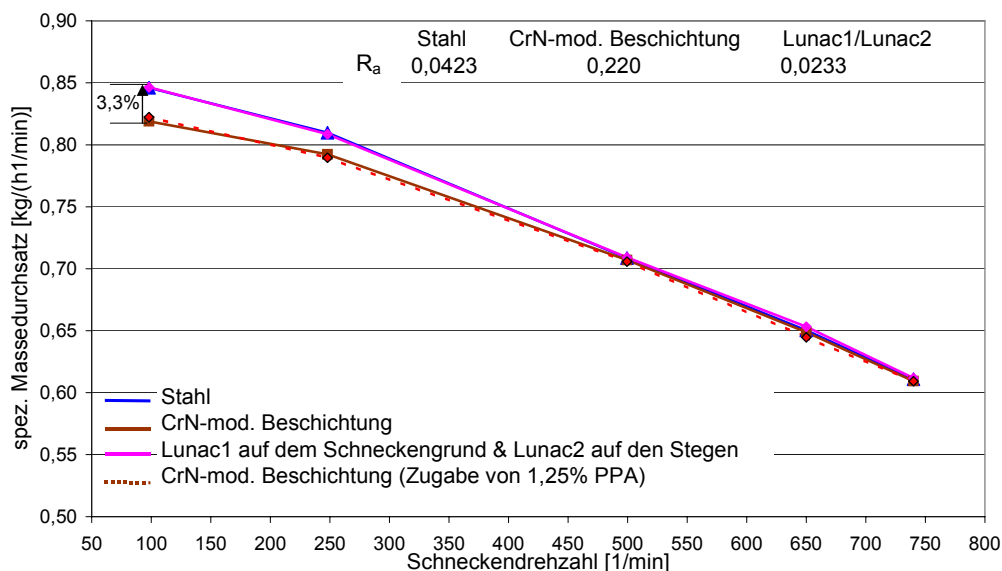


Bild 15: Spez. Durchsatz als Funktion der Schneckendrehzahl

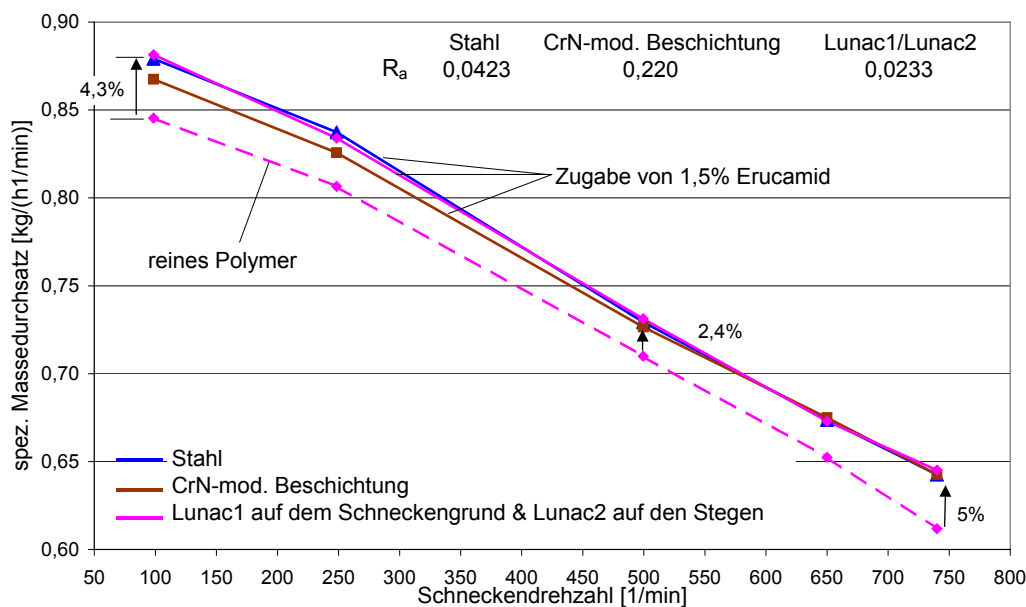


Bild 16: Spez. Durchsatz als Funktion der Schneckendrehzahl (Zugabe von Gleitmittel)

Bei der Zugabe von PPA ist kein Einfluss auf die Förderrate bei hohen Drehzahlen zu erkennen, Bild15.

4 BESCHREIBUNG DES REIBUNGSKOEFFIZIENTEN

Hinsichtlich der oben gewonnenen experimentellen Ergebnisse wird festgestellt, dass die Reibkräfte im durchsatzbestimmenden Bereich bei einem Einschneckenextruder mit axial profilierter Einzugszone nur von deformativen Reibkräften abhängen.

$$F_R = F_{R,def}$$

Die unmittelbar nach den Versuchen (niedrige Drehzahlbereiche) gemessenen Ist-Temperaturen auf den Schneckenoberflächen betragen ca. 62 - 69 °C, d. h., der Reibungskoeffizient ist in diesem Bereich konstant [28].

Bei Vernachlässigung der Temperatur- und Gleitgeschwindigkeitseffekte wird dies durch die Elastizitätsmodule der Reibpartner und die Oberflächenrauigkeit beeinflusst.

Mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse wird der Reibungskoeffizient als Funktion der Schneckenoberflächenrauigkeit und des Gleitmittels (G) beschrieben. So lässt sich ein Ansatz für die Berechnung des Reibungskoeffizienten auf der Schneckenoberfläche aufstellen.

Den Ausgangspunkt der analytischen Betrachtung stellt die Gleichung (1) dar. Dabei wurden für die erste Berechnung des Reibungskoeffizienten (reines Polymer bzw. Polymer mit Gleitmittel/Stahl) auf der rauesten Schneckenoberfläche die Reibungskoeffizienten μ_s , μ_z und μ_N gleich betrachtet. Unter Berücksichtigung der experimentellen Durchsätze wurden dann die Reibwerte μ_s für alle getesteten Schnecken bei gleichen μ_N und μ_z berechnet. Es muss hier allerdings beachtet werden, dass die Zugabe des Gleitmittels nicht nur zur Reduzierung des Reibungskoeffizienten auf der Schneckenoberfläche führt, sondern auch auf der Zylinderinnenfläche. Die inneren Reibwerte (μ_i) wurden aus der Berechnung der Schüttkegelwinkel (α_s) (nach DIN ISO 4324) über die Beziehung

$$\mu_i = \tan(0,75\alpha_s)$$

berechnet [29]. Daraus ergeben sich folgende Werte (Tabelle 2):

PE-HD	PE-HD (1% Gleitmittel)	PE-HD (2% Gleitmittel)
0,429	0,389	0,338

Tabelle 2: Innere Reibwerte

Mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse wird ausgehend von einer Grundgesamtheit anhand einer Stichprobe versucht, die Zusammenhänge zwischen den Variablen abzuschätzen.

Die Reibwerte zeigten hinsichtlich der Rauigkeit einen exponentiellen Verlauf. Die Berechnungen ergeben den folgenden Ansatz, Tabelle 3.

$\mu_s = a + b \cdot \exp(-R_a / c)$					0,999
	Index	a	b	c	R ²
$a = a_0 + a_1 \cdot G + a_2 \cdot G^2$	0	0,2159117	0,000219548	0,074575740	1,00
$b = b_0 + b_1 \cdot G + b_2 \cdot G^2$	1	-1,0204	0,0138699	6,47270526	1,00
$c = c_0 + c_1 \cdot G + c_2 \cdot G^2$	2	26,3023	-1,19636	-345,43992	1,00

Tabelle 3: Berechnungsansatz für den Reibungskoeffizienten als Funktion der Rauigkeit und der Gleitmittelkonzentration

Die Faktoren a, b und c sind von der Gleitmittelkonzentration abhängig und haben einen quadratischen Verlauf. Ein graphischer Vergleich zeigt, mit welcher Genauigkeit die realen Reibungskoeffizienten durch den gewählten Ansatz abgebildet werden können, Bild 17.

Bei einer Erhöhung der Gleitmittelkonzentration wird der Kurvenverlauf immer flacher sein, was eine Verringerung des Rauigkeitseinflusses des Metallpartners widerspiegelt.

Die graphische Darstellung gibt Hinweise auf einen Beschreibungsansatz für den Reibungskoeffizienten bei Zugabe von unterschiedlichen Gleitmittelkonzentrationen.

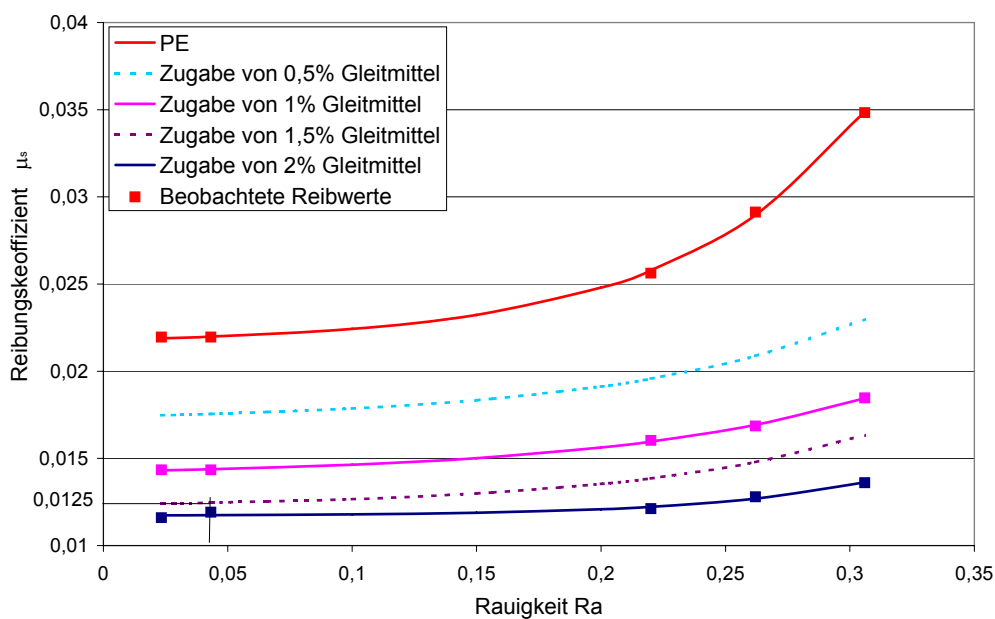


Bild 17: Graphischer Vergleich der berechneten und beobachteten Reibungskoeffizienten als Funktion der Rauigkeit

Betrachtet man das Reibwertverhältnis (μ_s/μ_i), so wird eine Reduzierung dieses Verhältnisses von 0,085 auf 0,051 bei einer Verringerung der Rauigkeit von 0,306 auf 0,0233 erreicht, welches eine Erhöhung des Förderwirkungsgrades bewirkt [5]. Dieses Verhalten ist auch bei der Zugabe von Gleitmittel zu erkennen. Dabei wird bei einer Rauigkeit von 0,0233 und einer 2%igen Gleitmittelzugabe ein Reibwertverhältnis (μ_s/μ_i) von 0,034 erreicht. Daraus ergibt sich eine weitere Erhöhung des Förderwirkungsgrades des Extruders, was wiederum eine höhere Förderrate bedeutet.

Des Weiteren trägt die Verringerung des Reibwertverhältnisses (μ_N/μ_i) bei der Zugabe von Gleitmittel zur weiteren Anhebung der Förderrate bei. Diese Theorie stimmt sehr gut mit den experimentellen Untersuchungen überein. Dabei wird durch die Zugabe von Gleitmitteln die Förderrate weiter gesteigert, Bild 14. Das oben beschriebene Modell zeigt, dass auch bei einer absolut glatten Oberfläche ($Ra \approx 0$) der Reibwert an der Schneckenoberfläche (μ_s) nicht zu Null geht. Dieser Wert hängt von dem zu verarbeitenden Polymerwerkstoff ab.

5 FAZIT

Die tribologischen Eigenschaften und die Qualität der Schneckenoberfläche wirken sich auf die Förderleistung des Extruders und auf die Bildung einer Grenzschicht auf der Schneckenoberfläche aus.

Bei hohen Schneckendrehzahlen verhält sich das System verfahrenstechnisch anders als im niedrigen Drehzahlbereich, wodurch sich neue verfahrenstechnische und konstruktive Randbedingungen ergeben. Das Verständnis dieser Randbedingungen bilden die Grundlage bei Modellierung und Auslegung eines Extruders mit schnelldrehender Schnecke.

Diese Arbeit wurde in Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes und mit Unterstützung der Fa. WMV GmbH/Niederlande und Fa. Sabc GmbH/Deutschland bearbeitet.

Wir bedanken uns für die Förderung dieses Projektes.

6 LITERATUR

- [1] Hennes, J., P. Ermittlung von Materialkennwerten von Kunststoffschüttgütern und Simulation der Vorgänge im Einzugsbereich von konventionellen Einschneckenextrudern
Dissertation RWTH Aachen, 2000
- [2] Peiffer, H. Zum Förderproblem in der genuteten Einzugszone von Einschneckenextrudern
Dissertation, RWTH Aachen, 1981
- [3] Schneider, K. Der Fördervorgang in der Einzugszone eines Extruders
Dissertation, RWTH Aachen, 1968
- [4] Schöppner, V. Simulation der Plastifiziereinheit von Einschneckenextrudern
Dissertation, Universität-GH Paderborn, 1995
- [5] Michels, R. Verbesserung der Verarbeitungsbandbreite und der Leistungsfähigkeit von Einschneckenextrudern
Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2005
- [6] Grünschloß, E. Feststoffförderung im Einschneckenextruder
in: Der Einschneckenextruder, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001
- [7] Biedenkopf, G. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit von Schnecke und Zylinder auf die Förderleistung in der Einzugszone eines Einspindelextruders
Kunststoff und Gummi 2 (1963) 3, S. 107-116
- [8] Mennig, G. Verschleiß in der Kunststoffverarbeitung. Phänomene und Schutzmaßnahmen
München, Wien, Hanser Verlag, 1990
- [9] Potente, H. Einschneckenextruder – Plastifizierextruder
in: Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik, Band I – Grundlagen, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1989
- [10] Uetz, H.;
Wiedemeyer, J. Tribologie der Polymere
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1985
- [11] Erhard, G. Konstruieren mit Kunststoffen
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1993
- [12] Ehrenstein, G.W. Mit Kunststoffen konstruieren
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995
- [13] Cremer, M.;
Broszeit, E.;
Berg, G.;
Heinze, M. Schichten in der Kunststoffverarbeitung
Mat.-wiss. U. Werkstofftech. 29 (1998), S. 555-561

- [14] Kayser, O. Kombinierte Anwendung von Plasmanitrieren und PVD-Beschichtung im Kunststoffmaschinen und -formenbau Vakuum in Forschung und Praxis 14 (2002) 3, S. 156-160
- [15] Rauwendaal, C.; Van der Sluis, G. Effect of Screw Surface on Extruder Performance Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC), 2004
- [16] Niemeier, H. Analyse und Optimierung wandnaher Schmelzeströmungen in Extrusionswerkzeugen für die Kunststoffverarbeitung Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2006
- [17] Brand, J.; Dimigen, H.; Grischke, M. Schichten auf DLC-Basis für industrielle Anwendungen Galvanotechnik 88 (1997) 7, S. 2338-2342
- [18] Brand, J. Gering adhäsive Kohlenstoffschichten für Formen und Werkzeuge in der Kunststoffverarbeitung Vortragsmanuskript, Fraunhofer Institut Schicht und Oberflächentechnik, Braunschweig, 2001
- [19] Semal, S.; Blake, T. D.; Geskin, V. Influence of Surface Roughness on Wetting Dynamics American Chemical Society, 15 (1999), pp. 8765-8770
- [20] Hieke, A. Verschleißfeste Antihafschichten auf Basis modifizierter diamantähnlicher Kohlenstoffschichten Vakuum in Forschung und Praxis 1 (2001), S. 9-13
- [21] Wenzel, R. Surface Roughness and Contact Angle J. Phys. Colloid Chem. 53, S. 1466-1467 (1949)
- [22] Wu, S. Polymer Interface and Adhesion New York, Marcel Dekker, 1982
- [23] Münstedt, H.; Schwetz, M. Fluorpolymer vermeidet Fließinstabilitäten Kunststoffe, 91(2001) 5, S. 86-89
- [24] Orani, S.-R. The Effect of LLDPE Type and Mixing on the Performance of Fluoropolymer Process Aids ANTEC, 2004
- [25] Amos, S.-E.; Horns, J.-H.; Van Esche, G. Plastics Additives Handbook Publishers, Munich, 2000
- [26] Shuler, C.-A. ; Janorker, A.-V.; Hirt, D.-E. Fate of Erucamide in Polyolefin Films at elevated Temperature Polymer Engineering and Science, 44 (2004) 12, pp. 2247-2253
- [27] Rahal, H.; Wortberg, J. Examination of feeding behaviour and solids conveying in high speed extruder Polymer processing society (PPS), 2005

- [28] Hegemann, B.; Eyerer, P. Polymer-Polymeric Friction at Temperatures and Rates Simulating the Thermoforming Process ANTEC, 2003
- [29] Rauwendaal, C. Polymer Extrusion Hanser Publishers, Munich, 2001

Stichworte:

deutsch:

Feststoffförderung im Extruder, genutete Einzugszone, Rauigkeit der Schneckenoberfläche, Oberflächenbeschichtung, Reibungskoeffizient

englisch:

Solids conveying in extruder, grooved feed zone, screw surface roughness, surface coating, coefficient of friction

Kontakt:

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg,
Dipl.-Ing. Hassan Rahal

Herausgeber: Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein,
Prof. Dr. Tim Osswald

Erscheinungsdatum: Januar/Februar 2007

Herausgeber/Editor:

Europa/Europe
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. W. Ehrenstein, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Phone: +49(0)9131/85 - 29703
Fax.: +49(0)9131/85 - 29709
E-Mail-Adresse: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de

Amerika/The Americas
Prof. Dr. Tim A. Osswald, responsible
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Phone: +1/608 263 9538
Fax.: +1/608 265 2316
E-Mail-Adresse: osswald@engr.wisc.edu

Verlag/Publisher:

Carl-Hanser-Verlag
Jürgen Harth
Ltq. Online-Services & E-Commerce,
Fachbuchanzeigen und Elektronische Lizenzen
Kolbergerstrasse 22
81679 Muenchen
Tel.: 089/99 830 - 300
Fax: 089/99 830 - 156
E-mail: harth@hanser.de

Beirat/Editorial Board:

Professoren des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik/
Professors of the Scientific Alliance of Polymer Technology