



Masterarbeit

**Berechnung der Einzugszone und der
Aufschmelzzone eines konisch gleichlaufenden
Doppelschneckenextruders**

verfasst von

Martin Münzer, BSc.

eingereicht am



KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung

Vorstand: Prof. Dr. Clemens Holzer

Montanuniversität Leoben

Leoben, 12.09.2011

Eidesstattliche Erklärung

Eidesstattliche Erklärung:

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, September 2011

Martin Münzer

Danksagung

Mein erster Dank gilt meiner Familie, die mir während des gesamten Studiums den Rücken gestärkt hat. Ohne ihren Rückhalt und ihre Unterstützung wäre es nicht zur Fertigstellung dieser Arbeit gekommen.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn DI Stephan Schuschnigg für die tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung meiner Diplomarbeit. Vielen Dank für die hilfreichen Anregungen und die Engelsgeduld.

Mein Dank gilt auch der Firma M-A-S für die Möglichkeit, diese Arbeit zu verfassen.

Des Weiteren möchte ich mich bei DI Ramesh-Kumar Selvasankar für seine Hilfe beim Erstellen dieser Arbeit bedanken. DI Leonhard Perko danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit und den interessanten Gedankenaustausch. Bei Dr. Christian Frühwirth bedanke ich mich für die ungezählten Espressi und die interessanten Gespräche.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des FFG Bridge Projektes „Auslegung eines kämmend konisch gleichlaufenden Doppelschneckenextruders“ verfasst.

Kurzfassung

Extruder sind wichtige Verarbeitungsmaschinen in der Kunststoffindustrie. Meist werden sie zum Aufschmelzen von festen Kunststoffgranulaten eingesetzt. Die Kunststoffschmelze wird in angeschlossenen Formgebungsprozessen weiterverarbeitet. Je nach Formgebungswerkzeug sind dabei unterschiedlichste Prozessparameter wie Schmelztemperatur, Massedurchsatz oder Druck einzuhalten. Gleichläufige Doppelschneckenextruder mit kämmenden Schnecken haben sich aufgrund ihres Selbstreinigungseffekts zu wichtigen Aufbereitungsmaschinen entwickelt.

Die Firma M-A-S Maschinen- und Anlagenbau Schulz GmbH entwickelt und produziert konische gleichläufige Doppelschneckenextruder mit dicht-kämmenden Schnecken. Aufgrund der konischen Form und der daraus resultierenden großen Geometrien am Anfang der Schnecke kann auch Material verarbeitet werden, das in ungünstiger Form, wie zum Beispiel Flakes, vorliegt. Des Weiteren können auch bei Materialien mit geringer Schüttdichte hohe Massedurchsätze erzielt werden. Durch die kleiner werdenden Geometrien am Ende der Schnecke ist bei kürzerer Baulänge das Druckaufbauvermögen erhöht.

Durch die mathematische Beschreibung der physikalischen Vorgänge im Extruder ist es möglich, gezielte Verbesserungen und Anpassungen der Extrudergeometrie vorzunehmen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Feststoffförderzone und der Aufschmelzzone des konisch gleichläufigen Doppelschneckenextruders; dabei wird vom Rinnenmodell ausgegangen. Die Beschreibung der Geometrie erfolgt durch elementweise Berechnung in Axialrichtung, wobei für jedes Element parallele Verhältnisse angenommen werden.

Die Berechnung des maximal förderbaren Massestroms erfolgt für das Erdmenger-Profil, das Schubflankenprofil und das doppelte Schubflankenprofil. Dabei wird eine Korrektur der Schüttdichte und der maximalen Feststoffbettbreite durchgeführt. Bei der Berechnung des Aufschmelzverlaufs wird von einem modifizierten Tadmor-Modell ausgegangen, welches eine ortsabhängige Schmelzefilmstärke berücksichtigt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Viskosität der Schmelze dem Potenzgesetz folgt und für die Temperaturverschiebung wird ein Exponentialansatz verwendet.

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist ein VBA-Programm zur Berechnung des maximalen Durchsatzes der Feststoffförderzone und der Aufschmelzlänge sowie der Schmelztemperatur am Ende des Aufschmelzvorgangs. Es wurde festgestellt, dass bei steigender Zylindertemperatur die Aufschmelzlänge ansteigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei steigender Zylindertemperatur die Dicke des Schmelzefilms zunimmt während die Viskosität der Schmelze abnimmt, was eine Verringerung des Dissipationsanteils am Aufschmelzvorgang zur Folge hat. Wie die Berechnungen zeigen ist die maximale Förderleistung des doppelten Schubflankenprofils am größten, gefolgt vom Schubflankenprofil. Das Erdmengerprofil hat die geringste Förderleistung.

Abstract

In the plastic industry extruders are crucial processing machines. The common processing task, extruders are utilized for, is the melting of polymer pellets. Subsequently the polymer melt is processed by different dies to achieve the desired product shape such as pipes or profiles. For each of these shaping tools various process parameters like pressure drop, melt temperature or throughput have to be accomplished. Because of their self-wiping effect tightly intermeshing co-rotating twin screw extruders are important machines for compounding.

The company M-A-S Maschinen- und Anlagenbau Schulz GmbH has developed a new extruder-design. The NCT (new conical technology) is a conical intermeshing co-rotating twin screw extruder with exceptional advantages. Thanks to the conical design the feeding zone of the extruder has a large intake volume. NCT extruders have the ability to process materials with shapes difficult to handle, for example flakes. Moreover it is possible to obtain high throughputs even if materials with low bulk density are processed. As the geometry gets smaller towards the end of the extruder, the NCT has a high pressure-built up at a shorter overall length.

Mathematical models of the physical processes inside the extruder give the possibility to target-oriented improvements of the geometry and parameters.

The present work deals with the feeding zone and the melting zone of the NCT. The geometry is described by the flat channel model. Because of the conical geometry the screw is divided into small elements, for each element parallel conditions are assumed.

The calculation of the maximum throughput of the feeding zone is performed for the Erdmenger profile, the shear edge profile and the box profile. A correction for the bulk density and the maximum solid bed width are included.

The melting zone is described by a modified Tadmor model, which takes a location-dependent melt film thickness into consideration. The melt viscosity is assumed to follow the power law and the temperature dependency is considered with an exponential model.

The result of the present work is a VBA-program to calculate the maximum throughput of the feeding zone and the melting length as well as the melt

temperature at the end of the melting zone. It was found that the melting length is increasing when the cylinder temperature is raised. This effect can be explained when considering that a higher cylinder temperature results in an increased melt film thickness and a lower melt viscosity. Both of these result in a lower energy dissipation rate for the melting process. As calculations show the box-profile has the highest throughput rate followed by the shear edge profile and the Erdmenger profile.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	GEOMETRISCHE BESCHREIBUNG	7
2.1	ALLGEMEINE GEOMETRIE.....	8
2.2	ERDMENGER-PROFIL	10
2.3	SCHUBFLANKENPROFIL	14
2.4	DOPPELTES SCHUBFLANKENPROFIL.....	15
3	FESTSTOFFFÖRDERZONE	17
3.1	PHYSIKALISCHES MODELL DER FESTSTOFFFÖRDERUNG	17
3.2	GRENZDURCHSÄTZE	19
3.3	BERECHNUNG DER RÜCKSTAU LÄNGE	20
3.4	BERECHNUNG DER MAXIMALEN FESTSTOFFBETT BREITE	26
3.5	SCHÜTTDICHT EKORREKTUR	28
4	AUFSCHMELZVORGANG	34
4.1	AUFSCHMELZMODELL.....	35
4.2	TEMPERATURERHÖHUNG.....	42
5	PRAKTISCHE VERSUCHE	47
6	BERECHNUNG SERGEBNISSE	49
7	ZUSAMMENFASSUNG	55
8	LITERATUR	57
9	VERWENDETE ABKÜRZUNGEN	59
10	ANHANG	66

1 Einleitung

In der Kunststoffverarbeitung werden Extruder vor allem zum Umwandeln fester Kunststoffe in Schmelze eingesetzt, welche in nachfolgenden Formgebungsprozessen unter anderem in Rohre, Profile oder zu Granulat weiterverarbeitet wird. Diese Prozesse unterscheiden sich untereinander in einer Vielzahl von Parametern, wie zum Beispiel Druckverbrauch, Schmelztemperatur und Massedurchsatz. Des Weiteren muss jeder Kunststoff bei für ihn passenden Bedingungen verarbeitet werden. Eine Anpassung der Verfahrensparameter ist für einen wirtschaftlichen Betrieb und die Einhaltung vorgegebener Qualitätsmerkmale deshalb unumgänglich. Neben dem Verfahren der empirischen Optimierung ermöglichen mathematische Modelle eine gezielte Beeinflussung der Verfahrensparameter. Des Weiteren kann schon im Vorfeld eine Abschätzung über die Durchführbarkeit von Extrusionsaufgaben getroffen werden.

Doppelschneckenextruder lassen sich in die gegenläufige und die gleichläufige Bauform unterteilen. Des Weiteren wird zwischen kämmenden und nicht kämmenden Schnecken unterschieden. Bei kämmenden Schnecken greifen die Stege der einen Schnecke in die Gänge der anderen Schnecke während bei nicht kämmenden Schnecken sich die Schneckenprofile in axialer Richtung nicht überschneiden. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Lage der Schnecken zueinander. Dabei wird zwischen parallelen Schnecken und konisch angeordneten Schnecken unterschieden. Abbildung 1 zeigt die Einteilung der Doppelschneckenextruder.

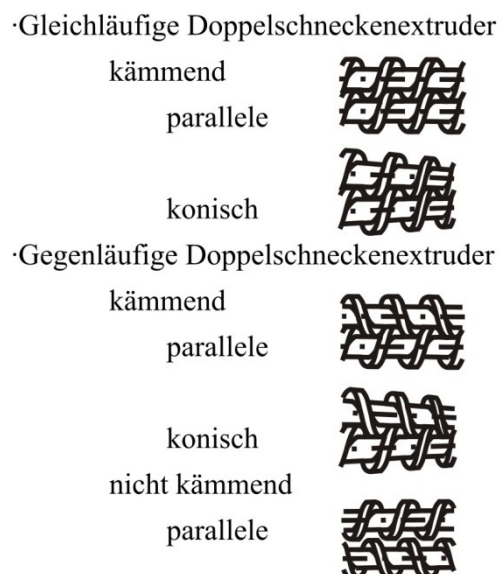


Abbildung 1: Einteilung der Doppelschneckenextruder [21]

Gegenläufig kämmende Doppelschneckenextruder bilden C-förmige, geschlossene Förderkammern aus, welche die Extrusionsmasse unabhängig von ihren tribologischen Eigenschaften durch den Extruder fördern. Diese Art des Stofftransports wird als Zwangsförderung bezeichnet. Die Schnecken drehen sich an der Oberseite - vergleichbar mit einer Zahnradschnecke - auseinander, um den Materialeinzug zu erleichtern. Durch die geschlossenen Förderkammern ist der Massedurchsatz vom Gegendruck unabhängig. Im Eingriffsbereich der Schnecken bildet sich eine Kalandersströmung aus, wodurch in den Spalten hohe Scherkräfte auftreten. Diese Kräfte lassen sich für das Dispergieren von Zusatzstoffen ausnutzen. Gegenläufige Doppelschneckenextruder werden vorwiegend zur Verarbeitung von PVC eingesetzt. Schwierigkeiten bei der Verarbeitung von PVC entstehen durch die Neigung zum Wandgleiten und die thermische Empfindlichkeit des Materials. Durch den Einsatz von gegenläufigen Doppelschneckenextrudern wird das Material zwangsgefördert und ein enges Verweilzeitspektrum erreicht. Zum einen wird dadurch dem Wandgleiten entgegengewirkt, zum anderen wird der übermäßige Abbau des Materials durch eine zu lange thermische Belastung verhindert.

Bei konischen Doppelschneckenextrudern sind die Schneckenachsen nicht mehr parallel sondern unter einem Winkel angeordnet, sodass sich der Achsabstand der Schnecken in Richtung Austragszone verringert. Die konische Bauform bietet die Vorteile einer kürzeren Baulänge bei vergleichbarem Durchsatz, geringerer Scherung im Austragsbereich aufgrund der abnehmenden Schneckenumfangsgeschwindigkeit und der erleichterten Drehmomenteinbringung durch die größeren Achsabstände [9]. Es können drei Unterscheidungen getroffen werden. Eine konstante, eine abnehmende oder eine zunehmende Gangtiefe ermöglichen die Anpassung des benötigten Volumens an die jeweilige Aufgabe [10].

Doppelschneckenextruder mit gleichlaufenden Schnecken bilden keine geschlossenen Förderkammern, sondern stellen ein axial offenes System dar. Es findet demzufolge keine Zwangsförderung statt, sondern die Förderung basiert größtenteils auf der Schlepplströmung. Die Extrusionsmasse wird in Kanälen gefördert, welche beide Schnecken wendelförmig in Form einer Acht umschließen, wobei sich der Querschnitt geometriebedingt im Eingriffsbereich verengt. Ein Teil der Schmelze wird unabhängig von den Haftbedingungen zwangsgefördert; dies geschieht aufgrund der geometrischen Verhältnisse im Eingriffsbereich. An allen Punkten des Eingriffsbereichs gleiten beide Schnecken mit der gleichen Relativgeschwindigkeit dicht aneinander vorbei, dadurch wird die haftende Extrusionsmasse abgestreift.

Gleichläufige Doppelschneckenextruder stellen auch aufgrund dieses Selbstreinigungseffekts wichtige Aufbereitungsmaschinen dar [9].

Zur Anpassung an eine Vielzahl an Verarbeitungs- und Produktanforderungen sind Doppelschneckenextruder im Allgemeinen modular aufgebaut. Die Extruderschnecken bestehen aus Elementen, welche auf eine zentrale Welle geschoben und befestigt werden. Die Vorteile einer solchen Bauart sind unter anderem: leichte Veränderung der Schneckenengeometrie für Versuchsaufbauten beim Anfahren von Anlagen oder bei geänderten Prozessbedingungen, Standardisierung der Schneckenelemente und die Bildung verschiedener und optimierter Verfahrenszonen.

Typische Verfahrenszonen eines Doppelschneckenextruders sind:

- die Einzugszone
- die Aufschmelzzone
- die distributive Mischzone
- die dispersive Mischzone
- die Entgasungszone
- und die Austragszone

In der Einzugszone wird dem Extruder der feste Kunststoff zugeführt. Der Feststoff wird nach vorne gefördert und komprimiert. Eine weitere Aufgabe der Einzugszone besteht im Entfernen von miteingezogener Luft. Die Förderkapazität der Feststoffförderzone ist abhängig vom freien Schnecken volumen, der Drehzahl und der Schüttdichte des Feststoffs. Die Aufschmelz- oder Plastifizierungszone dient der Umwandlung des Feststoffs in Schmelze, des Weiteren sollen Füllstoffe vordispersiert werden. Abhängig von den nachfolgenden Verfahrenszonen ist es nicht immer notwendig, am Ende der Plastifizierungszone einen Aufschmelzgrad von 100% zu erreichen. Unaufgeschmolzene Feststoffpartikel können in nachfolgenden Zonen, wie der dispersiven Mischzone, aufgeschmolzen werden. Die Aufgaben der distributiven Mischzone bestehen in der Verteilung von Feststoffen und Fluiden in der Schmelze sowie der Homogenisierung der Massetemperatur. Die Mischwirkung wird durch Aufteilen und Umleiten des Schmelzestroms erzielt. Mischelemente sind im Allgemeinen so ausgelegt, dass die scherintensive Dispersion minimiert wird, was zu einer reduzierten Selbstreinigung führt. In der dispersiven Mischzone sollen Feststoff- oder Polymeragglomerate sowie Flüssigkeitstropfen durch hohe Scherkräfte zerteilt werden. Neben der Schubspannung ist für die Zerteilwirkung auch die Dauer der Beanspruchung ausschlaggebend. Die Entgasungszone dient dem Entfernen von Wasser, Restmonomeren und gelösten Gasen. Um ein Austreten der Schmelze durch die Entgasungsöffnung zu verhindern, muss der Druck der Schmelze zuvor dem

Umgebungsdruck angepasst werden. Die Kanäle vor der Entgasungszone müssen vollständig gefüllt sein, um ein Extrahieren von noch nicht eingearbeiteten Komponenten oder das Ansaugen von Luft über den Einfülltrichter zu verhindern. Dies wird durch geeignete Abstaulemente erzielt. Die Austragszone dient dem Aufbau des erforderlichen Drucks für die nachfolgenden Prozesse [12].

Die Firma M-A-S Maschinen- und Anlagenbau Schulz GmbH entwickelt und produziert konische, gleichläufige Doppelschneckenextruder mit dicht-kämmenden Schnecken und hält ein Patent auf diese Technologie [18]. Die Baureihenbezeichnung NCT leitet sich von „new conical technology“ ab. Die konische Form bietet eine Vielzahl an Vorteilen: Durch die großen Geometrien am Anfang der Schnecke kann auch Material verarbeitet werden, das in ungünstiger Form, wie zum Beispiel Flakes, vorliegt. Des Weiteren können auch bei Materialien mit geringer Schüttdichte hohe Massedurchsätze erzielt werden. Durch die kleiner werdenden Geometrien am Ende der Schnecke ist bei kürzerer Baulänge das Druckaufbauvermögen erhöht. Die Schergeschwindigkeit und somit die Dissipation nehmen in diesem Bereich ebenfalls ab. Dies führt zu einer geringeren Temperaturerhöhung, was im Allgemeinen für reine Schmelzeförderung angestrebt wird. Abbildung 2 zeigt einen NCT Extruder der Firma M-A-S.

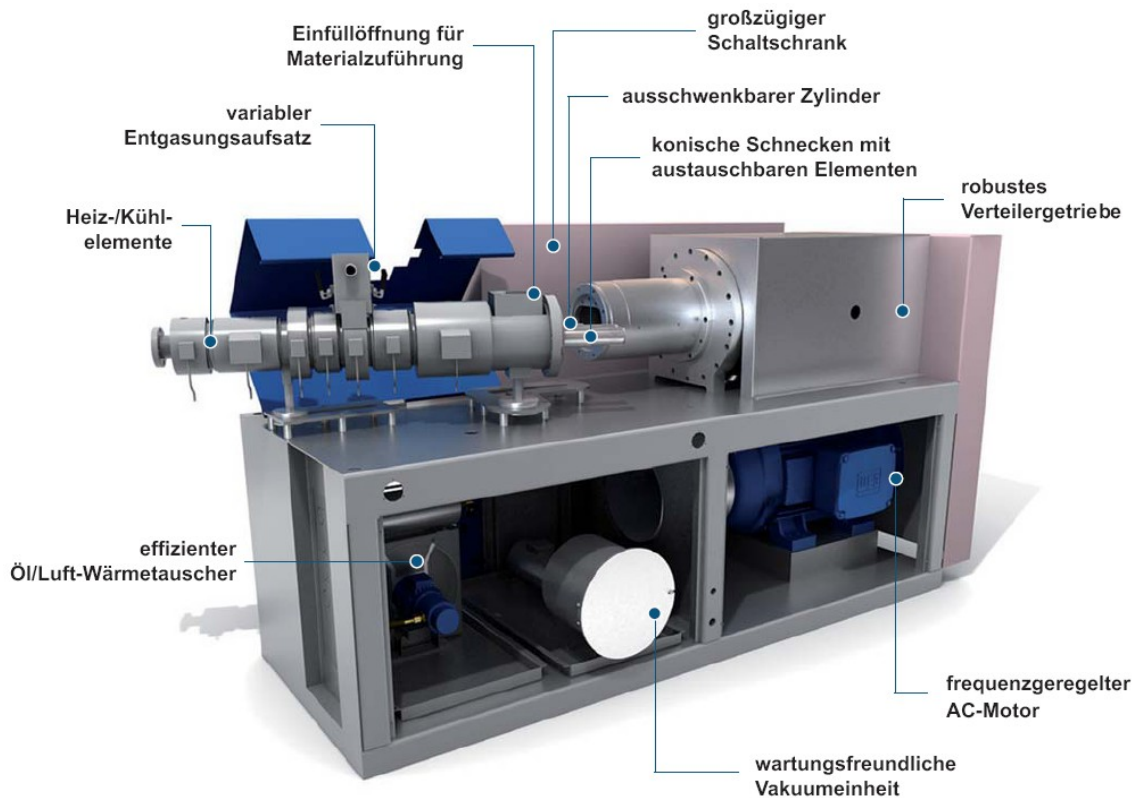


Abbildung 2: NCT Extruder [14]

Diese Arbeit wurde im Rahmen des FFG Bridge Projektes Nr.: 818087 „Auslegung eines k ä m m e n d k o n i s c h g l e i c h l a u f e n d e n D o p p e l s c h n e c k e n e x t r u d e r s “ verfasst und soll einen weiteren Beitrag zur mathematischen Beschreibung des NCT liefern. Zu den bereits beschriebenen Zonen zählen die Austragszone, Förderelemente, Knetblöcke und Scherteile. Das endgültige Ziel ist die Beschreibung des gesamten Extruders.

Viele grundlegende Erkenntnisse aus der Einschnecken­theorie lassen sich auf den gleichläufigen Doppelschneckenextruder übertragen. Beide Bauarten werden mit dem Rinnenmodell beschrieben. Dies ist sinnvoll, da beide Extrudertypen axial offene Systeme darstellen und ein ähnliches Förderverhalten aufweisen. Die durch den Eingriffsbereich entstehenden Unterschiede werden durch die Erweiterung des Rinnenmodells mit Modellen zur Beschreibung des Förderverhaltens in diesem Bereich erfasst.

Experimentelle Untersuchungen des Feststoffförderverhaltens von Gleichdrall-Doppelschneckenextrudern wurden von Häring [8] durchgeführt. Durch den Einbau eines transparenten Zylindergehäuses konnten Aussagen über das Füllverhalten und die Verteilung des Feststoffs in den Schneckengängen getroffen werden. Unter anderem wurde beobachtet, dass sich bei - in Extrusionsrichtung gesehen - gegen den Uhrzeigersinn drehenden Schnecken der Füllgrad der rechten Schnecke mit Zunahme des zudosierten Durchsatzes bis zur Vollfüllung erhöhte. Die linke Schnecke blieb hingegen leer und füllte sich erst bei weiterer Durchsatzsteigerung. Jedoch blieb die linke Schnecke selbst bei einer Befüllung aus dem vollgefüllten Trichter nur teilweise gefüllt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen einen großen Einfluss der Reibverhältnisse und der Korngröße auf das Förderverhalten. Eine mathematische Beschreibung dieses Verhaltens wurde von Potente et al. veröffentlicht [15]. Dabei wurde von einer vollständigen Verdrehhemmung des Schüttguts ausgegangen. Diese Verdrehhemmung kommt durch den Widerstand im oberen Eingriffsbereich zustande. Die Länge der Feststoffansammlung in der linken Schnecke wurde aufgrund der Reibverhältnisse und dem daraus resultierenden Druckaufbau vor dem Eingriffsbereich berechnet. Aufgrund der Kanalgeometrie kann der zu fördernde Feststoff, abhängig vom mittleren Partikeldurchmesser, nicht die gesamte Kanalbreite ausfüllen. Zur Berücksichtigung dieses Effekts wurde ebenfalls in [15] eine Berechnungsmöglichkeit dargelegt. Melisch [13] führte eine Methode zur Korrektur der Schüttdichte ein, um den Verhältnissen im Schneckenkanal Rechnung zu tragen.

Eine theoretische Behandlung des Aufschmelzprozesses in gleichläufigen Doppelschneckenextrudern ist von Anshl [1] aufgezeigt worden. Dieses Modell basiert auf einem, aus der Einschnecken-theorie stammenden, modifizierten Tadmor-Modell, welches eine ortsabhängige Schmelzefilmdicke berücksichtigt. Das vorgestellte Modell berücksichtigt einige Aspekte der in Gleichdrall-Doppelschneckenextrudern ablaufenden Vorgänge nicht, jedoch zeigen Experimente eine brauchbare Übereinstimmung.

Für die vorliegende Arbeit wurde, soweit für die konische Geometrie möglich, auf die oben genannten Forschungsergebnisse zurückgegriffen. Diese Modelle liefern bei der Berechnung paralleler gleichläufiger Doppelschneckenextruder brauchbare Ergebnisse und finden auch im Berechnungsprogramm SIGMA Anwendung.

Für die vorliegende Arbeit wurde ein Berechnungsprogramm mittels Visual Basic for Applications (VBA) erstellt. Aufgrund der konischen Bauform erfolgt die geometrische Beschreibung des Extruders dabei elementweise, wobei für jedes Element parallele Verhältnisse vorausgesetzt werden.

Auf einen direkten Vergleich zwischen Berechnungsergebnissen und Versuchsdaten musste verzichtet werden, da eine messtechnische Realisierung nicht möglich war.

2 Geometrische Beschreibung

Gleichläufige Doppelschneckenextruder mit kämmenden Schnecken sind Extruder mit zwei ineinandergreifenden Schnecken, welche sich mit gleicher Drehzahl und in die gleiche Richtung drehen. Im Allgemeinen haben beide Schnecken einen über die Länge konstanten Außendurchmesser. Diese Extruderbauform stellt ein axial offenes Fördersystem dar, es werden keine geschlossenen Förderkammern gebildet und somit keine Zwangsförderung der Schmelze durchgeführt. Die durch die Geometrie gebildeten Kanäle umschließen wendelförmig beide Schnecken in Form einer Acht. In diesen Kanälen wird die Extrusionsmasse gefördert. Im Eingriffsbereich beider Schnecken kommt es geometriebedingt zu einer Verengung des Querschnitts. Im Eingriffsbereich gleiten beide Schnecken an jedem Punkt mit der gleichen Relativgeschwindigkeit aneinander vorbei. Jeder Punkt der einen Schnecke wird dadurch von der Gegenschnecke abgestreift („gekämmt“), wodurch eine Selbstreinigung erzielt wird. Aus diesem Grund sind gleichläufige Doppelschneckenextruder mit kämmenden Schnecken wichtige Aufbereitungsmaschinen [9].

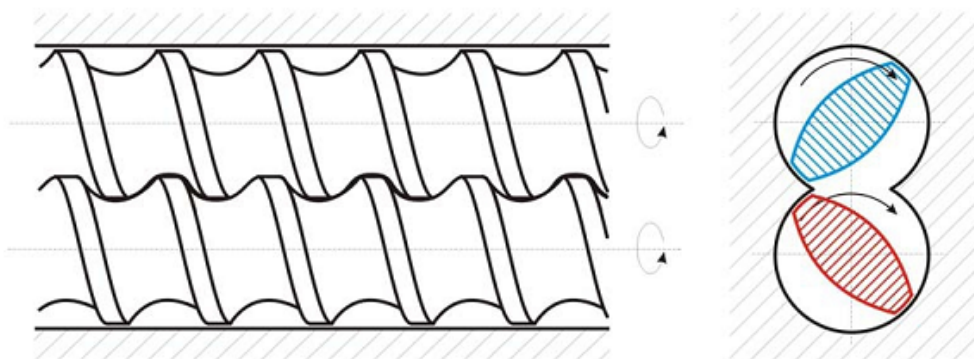


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Doppelschneckenextruders [9]

Die NCT-Bauart stellt eine Neuerung auf dem Gebiet der Extruderbauformen dar. Dabei wird ein gleichläufiger Doppelschneckenextruder mit kämmenden Schnecken zum ersten Mal in konischer Bauform realisiert, dabei verringern sich der Schneckendurchmesser und der Achsabstand beider Schnecken über die Länge, was eine Reihe von Vorteilen mit sich bringt. Durch die großen Abmessungen in der Einzugszone können Materialien, die in ungünstiger Form vorliegen, zum Beispiel Flakes, leicht eingezogen werden, was sich positiv auf den förderbaren Massestrom auswirkt. Auch bei Materialien mit geringer Schüttdichte wirkt sich die vergrößerte Geometrie im Einzugsbereich positiv auf den Massedurchsatz aus. Des Weiteren wird

durch die sich verkleinernde Geometrie der Druckaufbau erleichtert, durch die großen Abmessungen am Beginn der Schnecke kann mehr Material in die Bereiche mit kleineren Geometrien gedrückt werden. In der Einzugszone der NCT-Extruder kommen, je nach zu verarbeitendem Material, das Erdmenger-Profil, das Schubflankenprofil oder das doppelte Schubflankenprofil zum Einsatz. In der Aufschmelzzone, welche durch Abstaeuelemente abgegrenzt wird, wird das Erdmenger-Profil verwendet.

2.1 Allgemeine Geometrie

Die wesentlichen Gleichungen zur Beschreibung des kämmenden Profils wurden von M. Booy [2] formuliert. Für alle zu betrachtenden Kanalprofile lassen sich einige allgemein gültige geometrische Beziehungen angeben. Die maximale Kanalhöhe h_{\max} sowie der Achsabstand a hängen, wie in Abbildung 4 ersichtlich, gemäß den Gleichungen 1 und 2 nur vom Außendurchmesser D_a und Innendurchmesser D_i der beteiligten Schnecken ab.

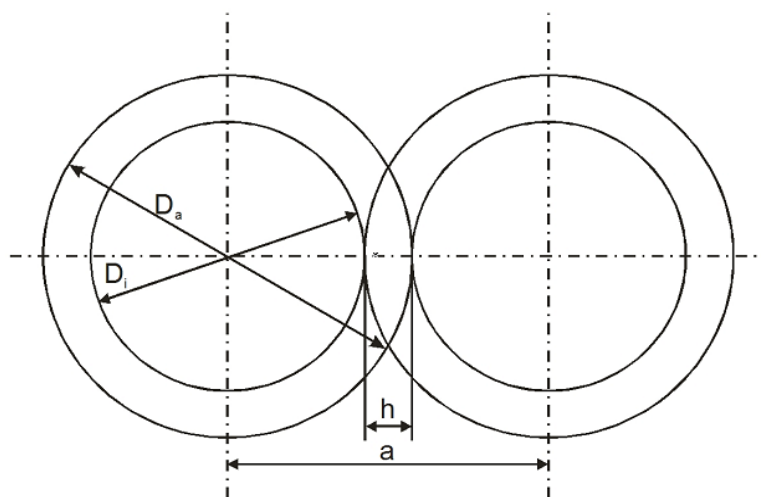


Abbildung 4: Durchmesser und Kanalhöhe [20]

$$h_{\max} = \frac{D_a - D_i}{2} \quad (1)$$

$$a = \frac{D_i}{2} + h_{\max} + \frac{D_i}{2} = \frac{D_a + D_i}{2} \quad (2)$$

Weitere wichtige Größen zur Beschreibung der Schneckengeometrie sind der Kammwinkel ϕ laut Gleichung 4 und der Eingriffswinkel Ω laut Gleichung 3, welche in Abbildung 5 dargestellt sind. Der Eingriffswinkel ergibt sich aus der Überschneidung der zwei Zylinderbohrungen in denen sich die Schnecken befinden. Der

Gangsteigungswinkel φ_s wird gemäß Gleichung 5 berechnet und ist abhängig von der Gangsteigung t und vom Schneckendurchmesser. Der Kammwinkel ϕ ergibt sich aus der Stegbreite in geschnittener Ansicht, er ist für die Schneckenflanke und für den Schneckengrund gleich groß, da sonst das selbstreinigendes Profil nicht gegeben wäre [1].

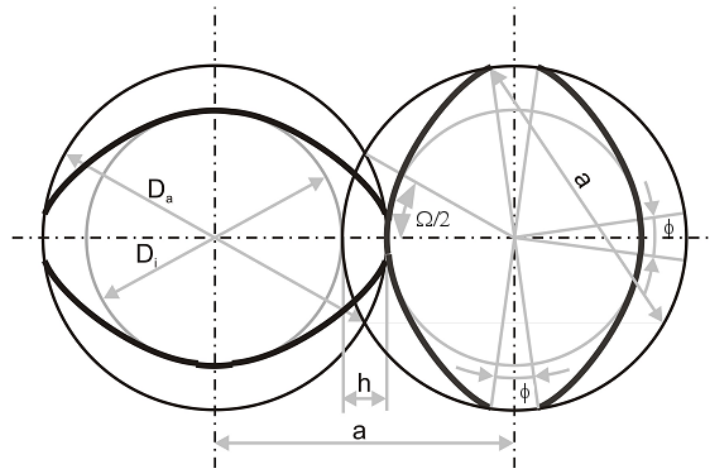


Abbildung 5: Wichtige Winkel [20]

$$\Omega = 2 \cdot \arccos\left(\frac{a}{D_a}\right) \quad (3)$$

$$\phi = \frac{\pi}{i} - \Omega \quad (4)$$

$$\varphi_s = \arctan\left(\frac{t}{\pi \cdot D_a}\right) \quad (5)$$

Für Bereiche, in denen Feststoff gefördert wird, sind außerdem der Umlenkwinkel γ und die abgewickelte Länge zwischen zwei Eingriffsbereichen Z_K wichtig. Der Umlenkwinkel beschreibt das Maß der Umlenkung des Schüttgutes bei der Übergabe von der abgebenden zur aufnehmenden Schnecke. Die Formel zur Berechnung des Umlenkwinkels ist in Gleichung 6 angegeben. Er ergibt sich, wie in Abbildung 6 zu sehen ist, bei einem Schnitt des Eingriffsbereichs unter dem Winkel φ_s [13]. Z_K entspricht der Kanallänge zwischen zwei Zwickelbereichen und wird gemäß Gleichung 7 berechnet.

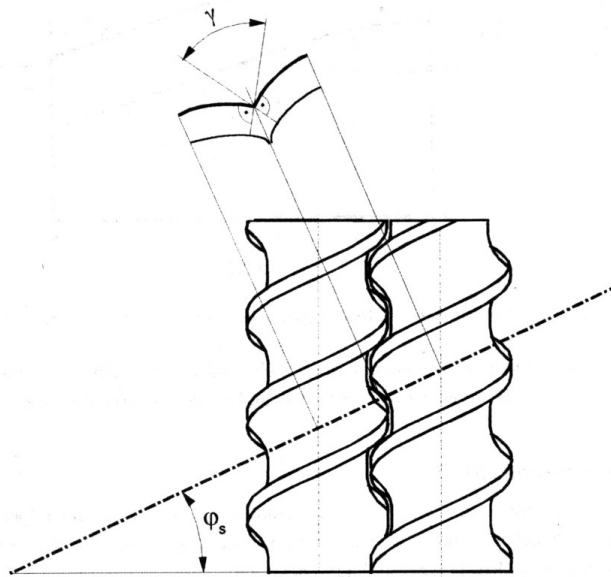


Abbildung 6: Umlenkwinkel [1]

$$\gamma = \pi - 2 \cdot \arctan \left(\frac{\tan\left(\frac{\Omega}{2}\right)}{\cos(\varphi_s)} \right) \quad (6)$$

$$Z_k = \frac{\left(\pi - \frac{\Omega}{2}\right) \cdot D_a}{\cos(\varphi)} \quad (7)$$

2.2 Erdmenger-Profil

Wegen seiner Arbeiten auf dem Gebiet der Gleichdrallschnecken wird das selbstreinigende Profil nach Rudolf Erdmenger benannt. Erdmenger hat vor allem in der Entwicklungsphase der gleichlaufenden Doppelschneckenextruder Pionierarbeit geleistet [2, 4-7].

Durch die Bedingung für ein dichtkämmendes Profil, bei dem jeder Punkt der Oberfläche der einen Schnecke von der Gegenschnecke abgestreift wird, ist die Schneckengeometrie nicht frei wählbar. Die gesamte Geometrie ist durch die Angabe des Schneckenaußendurchmessers D_a , des Schneckeninnendurchmessers D_i , der Gangzahl i und der Gangsteigung t festgelegt [1].

Die Kanaltiefe h kann als Funktion der Polarkoordinate θ wie in Gleichung 8 angegeben werden.

$$h(\theta) = \frac{D_a}{2} (1 + \cos(\theta)) - \sqrt{a^2 - \left(\frac{D_a}{2}\right)^2 \cdot \sin^2(\theta)} \quad (8)$$

Wenn der Schneckenkanal im Raum abgewickelt wird, erhält man durch Koordinatentransformation die Schneckenkanalgeometrie in kartesischen Koordinaten. In Abbildung 7 ist die Geometrie eines Erdmenger-Profiles dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Kanalhöhe abschnittsweise definiert ist.

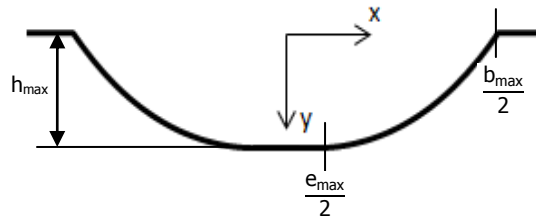


Abbildung 7: Erdmenger-Profil

Da der Schneckenkanal des Erdmenger-Profiles symmetrisch aufgebaut ist, werden im Folgenden nur die Gültigkeitsbereiche für x-Werte größer 0 angegeben.

Für den Bereich am Schneckengrund mit konstanter Kanalhöhe gilt der Zusammenhang aus Gleichung 10, der Gültigkeitsbereich liegt im in Gleichung 9 angegebenen Bereich.

$$0 \leq x \leq \frac{e_{\max}}{2} \quad (9)$$

$$h(x) = h_{\max} \quad (10)$$

Für den Bereich variabler Kanalhöhe gilt der Zusammenhang aus Gleichung 12, der Gültigkeitsbereich liegt im in Gleichung 11 angegebenen Bereich [20].

$$\frac{e_{\max}}{2} < x \leq \frac{b_{\max}}{2} \quad (11)$$

$$h(x) = \frac{D_a}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \left(\left| x \right| - \frac{e_{\max}}{2} \right)}{t \cdot \cos(\varphi_s)} \right) \right] - \sqrt{a^2 - \left(\frac{D_a}{2} \right)^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \left(\left| x \right| - \frac{e_{\max}}{2} \right)}{t \cdot \cos(\varphi_s)} \right)} \quad (12)$$

Für den Bereich außerhalb des Kanals gilt der Zusammenhang aus Gleichung 14, der Gültigkeitsbereich liegt im in Gleichung 13 angegebenen Bereich.

$$\frac{b_{\max}}{2} < x \quad (13)$$

$$h(x) = 0 \quad (14)$$

Die maximale Stegbreite e_{\max} und die maximale Kanalbreite b_{\max} berechnen sich aus den Gleichungen 15 und 16.

$$e_{\max} = \frac{t \cdot \phi \cdot \cos(\varphi_s)}{2 \cdot \pi} \quad (15)$$

$$b_{\max} = \frac{t \cdot \cos(\varphi_s)}{i} - e_{\max} \quad (16)$$

Die Querschnittsfläche des Schneckenkanals kann mithilfe eines Integrals, wie in Gleichung 17, gebildet werden.

$$A = \int_{\frac{b_{\max}}{2}}^{\frac{b_{\max}}{2}} h(x) dx \quad (17)$$

Im Computerprogramm wird das Integral abschnittsweise mit Hilfe der Gleichungen 9 bis 14 numerisch mittels Trapezverfahren berechnet.

Als weitere Größe wird die mittlere wirksame Kanalhöhe \bar{h} eingeführt. Sie entspricht, wie in Gleichung 18 zu sehen ist, der Höhe eines flächengleichen Rechtecks mit der Breite b_{\max} .

$$\bar{h} = \frac{A}{b_{\max}} \quad (18)$$

Aufgrund der Rotation der Schnecken ändert sich die freie Fläche im Zwickelbereich periodisch, wodurch sich auch das Zwickelvolumen periodisch verändert. Aus diesem Grund ist die Berechnung eines mittleren Zwickelvolumens sinnvoll. Nach Booy [2] wird das mittlere Zwickelvolumen V_{zw} unter Zuhilfenahme der Gleichungen 19 bis 21 folgendermaßen berechnet.

Die mittlere freie Querschnittsfläche des Zwickels \bar{A}_{zw} berechnet sich aus Gleichung 19, wobei der in Gleichung 20 definierte Faktor als mittlerer Zwickelbereichs-Strömungskoeffizient bezeichnet wird.

$$\bar{A}_{zw} = m \cdot D_a^2 \quad (19)$$

$$m = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{a}{D_a} \right) \cdot \sin\left(\frac{\Omega}{2}\right) - \left(1 - \frac{\phi \cdot i}{\pi}\right) \cdot \left[\begin{array}{l} \phi \cdot \left(\left(\frac{a}{D_a} \right)^2 - \left(\frac{a}{D_a} \right) + \frac{1}{2} \right) \\ + \Omega \cdot \left(\frac{a}{D_a} \right)^2 - \left(\frac{a}{D_a} \right) \cdot \sin\left(\frac{\Omega}{2}\right) \end{array} \right] \right\} \quad (20)$$

Das mittlere Zwickelvolumen erhält man durch Multiplikation mit der axialen Länge des Eingriffsbereichs.

$$V_{zw} = m \cdot D_a^2 \cdot \frac{\Omega \cdot t}{\pi} \quad (21)$$

Eine weitere wichtige Größe ist der axiale freie Querschnitt A_{fr} . Für ein theoretisch dichtkämmendes Profil kann A_{fr} nach den Gleichungen 22 bis 28 berechnet werden [1].

$$A_{fr} = A_{zyl} - 2 \cdot A_{pr} \quad (22)$$

A_{zyl} ist die axiale Querschnittsfläche der Zylinderbohrung und A_{pr} ist die axiale Querschnittsfläche einer Schnecke, welche nach den Gleichungen 23 und 24 berechnet werden.

$$A_{zyl} = \frac{1}{4} (2 \cdot \pi - \Omega) \cdot D_a^2 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot D_a \cdot \sin\left(\frac{\Omega}{2}\right) \quad (23)$$

$$A_{pr} = (A_1 + A_2) \cdot i + A_3 \cdot 2 \cdot i \quad (24)$$

$$A_1 = \frac{1}{8} \cdot \phi \cdot D_a^2 \quad (25)$$

$$A_2 = \frac{1}{8} \cdot \phi \cdot (2 \cdot a - D_a)^2 \quad (26)$$

$$A_3 = \frac{1}{4} \cdot \Omega \cdot a^2 - A_4 \quad (27)$$

$$A_4 = \frac{1}{4} \cdot a \cdot D_a \cdot \sin\left(\frac{\Omega}{2}\right) \quad (28)$$

Die Größen A_1 bis A_4 sind Teilflächen des Schneckenquerschnitts und werden mittels den Gleichungen 25 bis 28 berechnet; für eine genauere Abhandlung sei auf Anshl [1] verwiesen.

2.3 Schubflankenprofil

Beim Schubflankenprofil ist, wie in Abbildung 8 zu sehen, im Gegensatz zum Erdmenger-Profil der Schneckenkanal asymmetrisch. Bei der Betrachtung des Kanals normal zur Gangsteigung folgt eine Flanke dem Erdmenger-Profil, während die andere Flanke linear ansteigt. Vorteil dieser Konfiguration ist das größere freie Volumen und somit ein höherer maximaler Massedurchsatz. Das Schubflankenprofil entspricht nicht den Anforderungen für theoretisch dichtkämmende Profile, weil hier eine Selbstreinigung nicht mehr an allen Punkten der Schnecke gegeben ist. Aus diesem Grund findet es fast ausnahmslos in der Feststoffförderzone Anwendung.

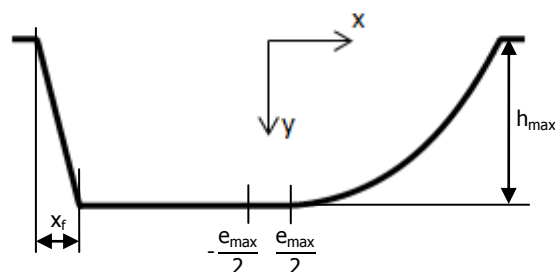


Abbildung 8: Schubflankenprofil

Für den Bereich am Schneckengrund mit konstanter Kanalhöhe gilt der Zusammenhang aus Gleichung 30, der Gültigkeitsbereich liegt im in Gleichung 29 angegebenen Bereich.

$$-\frac{b_{\max}}{2} + x_f \leq x \leq \frac{e_{\max}}{2} \quad (29)$$

$$h(x) = h_{\max} \quad (30)$$

Für den Bereich mit Erdmenger-Profil gilt der Zusammenhang aus Gleichung 12, der Gültigkeitsbereich liegt im in Gleichung 31 angegebenen Bereich.

$$\frac{e_{\max}}{2} < x \leq \frac{b_{\max}}{2} \quad (31)$$

Für den Bereich mit linear ansteigendem Profil gilt der Zusammenhang aus Gleichung 33, der Gültigkeitsbereich liegt im in Gleichung 32 angegebenen Bereich.

$$-\frac{b_{\max}}{2} \leq x < -\frac{b_{\max}}{2} + x_f \quad (32)$$

$$h(x) = h_{\max} + \frac{h_{\max}}{x_f} \cdot \left[x + \left(\frac{b_{\max}}{2} - x_f \right) \right] \quad (33)$$

Für den Bereich außerhalb des Kanals gilt der Zusammenhang aus Gleichung 35, der Gültigkeitsbereich liegt im in Gleichung 34 angegebenen Bereich.

$$\frac{b_{\max}}{2} < |x| \quad (34)$$

$$h(x) = 0 \quad (35)$$

Die maximale Stegbreite e_{\max} und die maximale Kanalbreite b_{\max} berechnen sich, wie beim Erdmenger-Profil, aus den Gleichungen 15 und 16.

Die Querschnittsfläche des Schneckenkanals kann wiederum mithilfe eines Integrals, wie es beim Erdmenger-Profil erwähnt wurde, gebildet werden. Die weitere Vorgehensweise ist identisch.

2.4 Doppeltes Schubflankenprofil

Beim doppelten Schubflankenprofil gibt es, wie in Abbildung 9 dargestellt, keinen runden Übergang zwischen Schneckengrund und Schneckensteg. Wird der Schneckenkanal parallel zur Richtung der Schneckensteigung betrachtet, ergibt sich ein rechteckiger Kanal. Wie auch schon beim Schubflankenprofil ist hier eine Selbstreinigung nicht mehr gegeben, weshalb das doppelte Schubflankenprofil fast ausschließlich in der Einzugszone Anwendung findet.

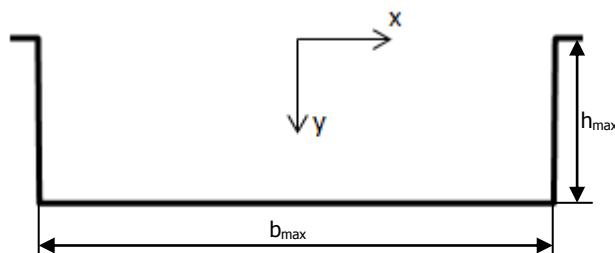


Abbildung 9: *doppeltes Schubflankenprofil*

Für den Bereich am Schneckengrund mit konstanter Kanalhöhe gilt der Zusammenhang aus Gleichung 37, der Gültigkeitsbereich liegt im in Gleichung 36 angegebenen Bereich.

$$-\frac{b_{\max}}{2} \leq x \leq \frac{b_{\max}}{2} \quad (36)$$

$$h(x) = h_{\max} \quad (37)$$

Für den Bereich außerhalb des Kanals gilt der Zusammenhang aus Gleichung 39, der Gültigkeitsbereich liegt im in Gleichung 38 angegebenen Bereich.

$$\frac{b_{\max}}{2} < |x| \quad (38)$$

$$h(x) = 0 \quad (39)$$

Die maximale Stegbreite e_{\max} und die maximale Kanalbreite b_{\max} berechnen sich wiederum nach den Gleichungen 15 und 16.

Die Querschnittsfläche des Schneckenkanals kann mithilfe eines Integrals, wie es beim Erdmenger-Profil erwähnt wurde, gebildet werden. Die weitere Vorgehensweise ist identisch.

3 Feststoffförderzone

3.1 Physikalisches Modell der Feststoffförderung

Die Feststoffförderzone gleichläufiger Doppelschneckenextruder besteht aus der teilgefüllten Einzugszone und der vollständig gefüllten, aber nicht immer vorhandenen Kompressionszone. Für den maximalen Durchsatz der Feststoffförderzone ist die Einzugszone ausschlaggebend, wobei der Position der Materialzuführung eine große Bedeutung zukommt.

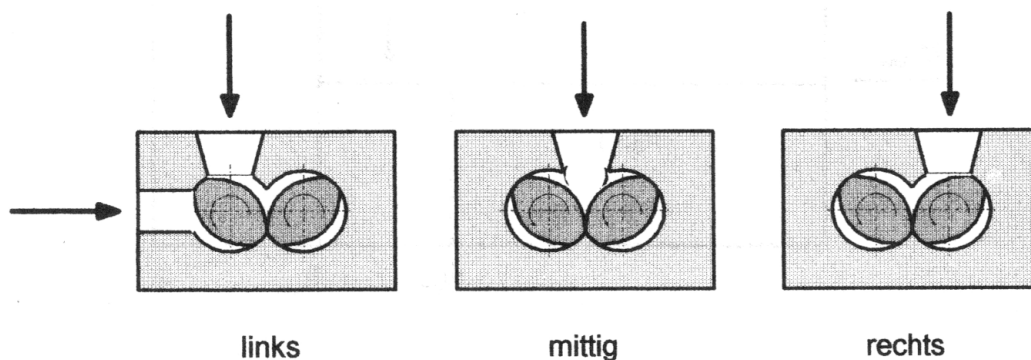


Abbildung 10: Positionen für die Materialzuführung [13]

Bei sich - in Extrusionsrichtung gesehen - gegen den Uhrzeigersinn drehenden Schnecken wird der maximale Durchsatz durch eine Materialzuführung erreicht, welche sich an der linken Schnecke oder mittig befindet. Dies gilt auch wie in Abbildung 10 dargestellt bei der Verwendung einer Hauptdosierung (links von Oben) und Hilfsdosierung (links von der Seite). Bei einer Materialzuführung auf die rechte Schnecke wird ein Übertritt des Materials auf die linke Schnecke durch den Widerstand im oberen Eingriffsbereich verhindert, was zu einem stark verringerten Einzugsvermögen führt. Da dieser Fall praktisch ohne Bedeutung ist, wird im Weiteren die Beschreibung auf die ersten beiden Fälle beschränkt.

Für die Beschreibung des Einzugsverhaltens muss zwischen 3 Fällen unterschieden werden.

Im Fall 1 wird der Extruder mit sehr kleinen zudosierten Masseströmen \dot{m} betrieben. Dabei erfolgt der Feststofftransport mittels Schwerkraftförderung, wobei das lose Schüttgut im unteren Bereich der rechten Schnecke transportiert wird. Durch die Gewichtskraft des Schüttguts und der Reibung an der Zylinderwand wird eine Drehung des Materials mit der Schnecke verhindert. Die Schwerkraftförderung stellt

eine Zwangsförderung dar, bei der das Schüttgut mit der maximalen Fördergeschwindigkeit in Axialrichtung bewegt wird [3]. Die benötigte Antriebsleistung wird im Fall der Schwerkraftförderung als vernachlässigbar angesehen.

Wird bei konstanter Drehzahl der zudosierte Massestrom erhöht, erhöht sich der Füllgrad der rechten Schnecke. Bei Erreichen des ersten Grenzdurchsatzes \dot{m}_{Gr1} füllt sich der obere Zwickelbereich mit Schüttgut, dadurch wird ein Übertritt des Materials auf die linke Schnecke verhindert. Durch diesen Widerstand bildet sich vor dem Zwickel ein Rückstau mit der Länge Z_r in Kanalrichtung, in welchem aufgrund von Reibungskräften ein Druck aufgebaut wird. Das restliche Kanalvolumen der rechten Schnecke wird mit drucklosem Schüttgut aufgefüllt, die linke Schnecke bleibt leer. Dieser Zustand wird als Fall 2 bezeichnet. Das schlagartige Füllen des Zwickelbereichs und der daraus resultierende Rückstau zeigen sich, wie in Abbildung 11 dargestellt, in einem sprunghaften Anstieg des Antriebsmomentes M_E beim ersten Grenzdurchsatz auf $M_{E_{max}}/2$.

Nach Erreichen des ersten Grenzdurchsatzes und bei weiterer Erhöhung des zudosierten Massestroms füllt sich die untere Hälfte der linken Schnecke mit lockerem Schüttgut. Dies setzt sich bis zum zweiten Grenzdurchsatz fort, dabei bildet sich auch vor dem unteren Zwickelbereich ein Rückstau mit der Länge Z_r . Durch die Äquivalenz des oberen und unteren Druckprofils erfolgt der Drehmomentsprung um denselben Betrag wie beim ersten Grenzdurchsatz auf $M_{E_{max}}$. Der zweite Grenzzustand, oder Fall 3, ist in Abbildung 12 dargestellt und beschreibt den maximal einziehbaren Massestrom \dot{m}_{max} .

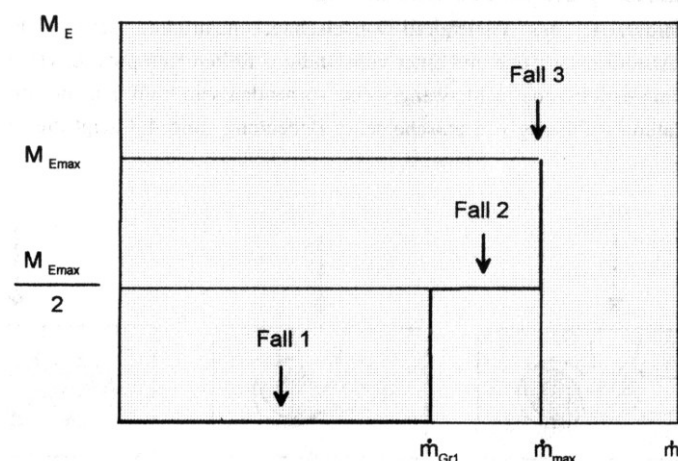


Abbildung 11: Antriebsmoment der Einzugszone in Abhängigkeit vom zudosierten Massestrom [13]

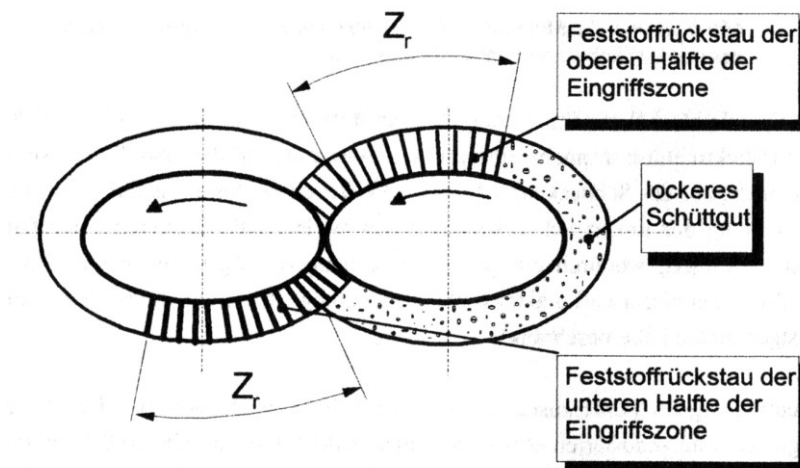


Abbildung 12: Kanalfüllung beim zweiten Grenzzustand [13]

3.2 Grenzdurchsätze

Der erste Grenzdurchsatz wird durch Zwangsförderung des Granulats im oberen Zwickelbereich und im freien Volumen der rechten Schnecke charakterisiert. Unter Vernachlässigung der Druckabhängigkeit der Schüttdichte kann er nach Gleichung 40 berechnet werden.

$$\dot{m}_{Gr1} = n_0 \cdot \rho_{SKorr} \cdot i \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot V_{ZW} + Z_K \cdot h_{Fm} \cdot b_{Fmax} \right) \quad (40)$$

Dabei ist n_0 die Schneckendrehzahl, ρ_{SKorr} ist die gemäß Gleichung 82 korrigierte Schüttdichte und i die Gangzahl. V_{ZW} ist das gemäß Kapitel 2 berechnete Volumen des Eingriffsbereichs, Z_K ist die Kanallänge zwischen zwei Eingriffsbereichen gemäß Gleichung 7. Des Weiteren ist b_{Fmax} die maximale Feststoffbettbreite, abhängig vom vorhandenen Kanalprofil laut Gleichung 77, 78 oder 81. Die mittlere Höhe des Feststoffbetts h_{Fm} wird laut Gleichung 41 berechnet.

$$h_{Fm} = \frac{2}{b_{Fmax}} \cdot \left(\frac{h_{max} \cdot e_{St}}{2} + \int_{\frac{e_{St}}{2}}^{\frac{b_{Fmax}}{2}} h(x) dx \right) \quad (41)$$

Wichtiger als der erste Grenzdurchsatz ist der maximal förderbare Massedurchsatz der Feststoffförderzone; dieser berechnet sich nach Gleichung 42. Er wird durch die Förderung des freien Volumens der rechten Schnecke, des Volumens des gesamten Eingriffsbereichs und des Volumens des Rückstaus in der linken Schnecke gebildet. Die Länge des Rückstaus Z_r wird mittels Gleichung 76 berechnet.

$$\dot{m}_{\max} = n_0 \cdot \rho_{\text{SKorr}} \cdot i \cdot (V_{\text{ZW}} + (Z_r + Z_K) \cdot h_{\text{Fm}} \cdot b_{\text{Fmax}}) \quad (42)$$

Ursache für die Ausbildung des Feststoffrückstaus sind die innere Reibung des Schüttguts und die Verklemmung der Feststoffpartikel. Diese Einflüsse werden zur inneren Reibung μ_{ir} zusammengefasst. Die mathematische Beschreibung erfolgt nach Formel 43, welche die genannten Einflüsse berücksichtigt [11]. Wobei μ_i der Reibwert der inneren Reibung, d_p der Partikeldurchmesser und h_{max} die maximale Kanaltiefe ist.

$$\mu_{\text{ir}} = \mu_i \cdot \left(1 - \frac{d_p}{h_{\text{max}}}\right) \quad (43)$$

3.3 Berechnung der Rückstaulänge

Zur Berechnung der Rückstaulänge Z_r werden Kräftebilanzen an den drei in Abbildung 13 dargestellten Volumenelementen durchgeführt. Der Umlenkwiderstand setzt sich aus dem Umlenkwiderstand im Eingriffsbereich und dem Stegwiderstand zusammen; er wird mittels der Elemente 1 und 2 beschrieben. Volumenelement 3 dient zur Beschreibung der Kräfte im freien Kanalabschnitt.

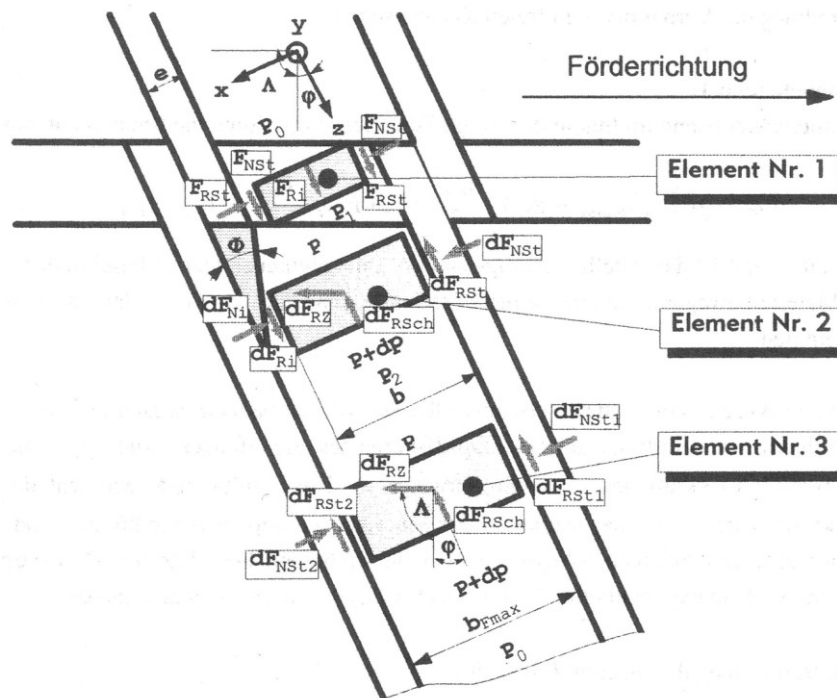


Abbildung 13: Volumenelemente und daran angreifende Kräfte [13]

Der Umlenkwiderstand im Volumenelement 1 wird mittels einer Momentenbilanz um den in Abbildung 14 dargestellten Punkt A in Gleichung 44 beschrieben; dabei wird eine Materialbewegung auf einer Kreisbahn um den Punkt A angenommen.

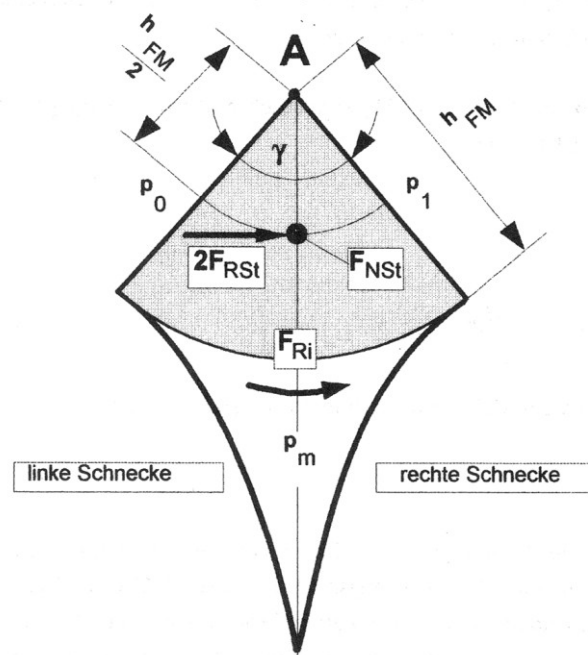


Abbildung 14: Kräfte im oberen Eingriffsbereich [13]

$$(p_1 - p_0) \cdot (b_{F_{\max}} - e_{St}) \cdot \frac{h_{Fm}^2}{2} = 2 \cdot F_{RSt} \cdot \frac{h_{Fm}}{2} + F_{Ri} \cdot h_{Fm} \quad (44)$$

Durch die Druckdifferenz zwischen dem Umgebungsdruck p_0 und dem durch den Rückstau aufgebauten Druck p_1 wird ein Drehmoment aufgebaut. Dieses resultierende Moment wird durch das Moment der inneren Reibung und durch die Reibmomente am Schneckensteg im Gleichgewicht gehalten. Für den Druckverlauf im Schüttgut wird ein exponentieller Druckabfall zwischen p_1 und p_0 angenommen. Die Berechnung der Reibkräfte erfolgt gemäß Gleichung 45 für die innere Reibkraft F_{Ri} und gemäß Gleichung 46 für die Stegreibkraft F_{RSt} . Der mittlere Druck p_m wird, wie in Gleichung 47 zu sehen ist, aufgrund der angenommenen exponentiellen Druckverteilung mittels des logarithmischen Mittelwerts berechnet.

$$F_{Ri} = \mu_{ir} \cdot k_y \cdot p_m \cdot \gamma \cdot h_{fm} \cdot (b_{F_{\max}} - e_{St}) \quad (45)$$

$$F_{\text{RSt}} = \mu_s \cdot k_x \cdot p_m \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h_{\text{Fm}}^2 \quad (46)$$

$$p_m = \frac{p_1 - p_0}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right)} \quad (47)$$

Der anisotropen Druckausbreitung in Schüttgütern wird durch die Druckanisotropiekoeffizienten k_x , k_y und k_z Rechnung getragen. Die Berechnung der Koeffizienten wurde zur Ermittlung des Feststoffförderwinkels in Einschneckenextrudern hergeleitet [16] und wird hier zur Berücksichtigung dieses Effektes herangezogen. Dabei muss von einem ähnlichen Verhalten der Druckübertragung in Schüttgütern zwischen Doppelschneckenextruder und Einschneckenextruder ausgegangen werden.

$$k_x = 0,88 \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_z} \cdot \frac{D_a - 2 \cdot h_{\text{Fm}}}{D_a} \right)^{0,7315} \quad (48)$$

$$k_y = k_z = 1 \quad (49)$$

Aus der Momentenbilanz in Gleichung 44 und den Gleichungen 45 bis 49 kann der Druck hinter der Eingriffszone p_1 in der in Gleichung 50 dargestellten Form ausgedrückt werden. Der Exponent a_z berechnet sich laut Gleichung 51 und kann als Maß für den Umlenkwiderstand in der Eingriffszone angesehen werden.

$$p_1 = p_0 \cdot e^{a_z} \quad (50)$$

$$a_z = \left(\mu_s \cdot k_x \cdot \frac{h_{\text{Fm}}}{b_{\text{Fmax}} - e_{\text{St}}} + 2 \cdot \mu_{\text{ir}} \cdot k_y \right) \cdot \gamma \quad (51)$$

Vor dem Steg der Gegenschnecke befindet sich ein Volumen, welches auch bei Umlaufstrom zwangsgefördert wird. Dieses Volumenelement 2 wird auf Scherung unter dem Winkel Φ zur Kanalrichtung, wie in Abbildung 13 dargestellt, beansprucht. Der Winkel Φ wird als Winkel des stationären Scherfließens bezeichnet und für die meisten Kunststoffschüttgüter mit 30° angegeben. Die Stegrückstaulänge Z_e berechnet sich, wie in Gleichung 52 angegeben, aus dem Winkel Φ und der Stegbreite e_{St} .

$$Z_e = \frac{e_{\text{St}}}{\tan \Phi} \quad (52)$$

Zur Bestimmung des Drucks am Ende des Stegrückstaus muss zunächst eine Kräftebilanz am infinitesimalen Volumenelement 2 aufgestellt werden. Gleichung 53 beschreibt das Kräftegleichgewicht in Schneckenkanalrichtung und Gleichung 54 orthogonal auf den Schneckensteg. Die Koordinate z_1 bezeichnet dabei die z-Koordinate für das Volumenelement 2.

$$dF_{Ri} - dF_{RSt} - dF_{RSch} - dp \cdot b(z_1) \cdot h_{Fm} = 0 \quad (53)$$

$$dF_{Ni} - dF_{NSt} - dF_{RZ} \cdot \cos(\varphi_S) = 0 \quad (54)$$

Neben den Druckkräften Stegnormalkraft dF_{NSt} , Zylindernormalkraft dF_{NZ} , Normalkraft des Stegrückstaus dF_{Ni} und Schneckennormalkraft dF_{NSch} greifen Stegreibkraft dF_{RSt} , die Reibkraft am Schneckenfundament dF_{RSch} , die Zylinderreibkraft dF_{RZ} und die innere Reibung an der Flanke des Stegrückstaus dF_{Ri} an. Die entsprechenden Gleichungen sind nachfolgend zusammengestellt.

$$dF_{NSt} = k_x \cdot p(z_1) \cdot h_{Fm} \cdot dz \quad (55)$$

$$dF_{Ni} = dF_{NSch} = k_y \cdot p(z_1) \cdot b(z_1) \cdot dz \quad (56)$$

$$dF_{RSt} = \mu_s \cdot dF_{NSt} \quad (57)$$

$$dF_{RSch} = \mu_s \cdot dF_{NSch} \quad (58)$$

$$dF_{Ri} = \mu_{ir} \cdot dF_{Ni} \quad (59)$$

$$dF_{RZ} = \mu_z \cdot dF_{NZ} \quad (60)$$

Die Breite des Volumenelementes $b(z_1)$ ist abhängig von der Breite des Stegrückstaus und in Gleichung 61 wiedergegeben.

$$b(z_1) = \frac{e_{St}}{Z_e} \cdot z_1 + b_{Fmax} - e_{St} \quad (61)$$

Durch Zusammenführen der Kräftegleichgewichte aus Gleichung 54 und 53 und den Gleichungen 55 bis 59 sowie unter Berücksichtigung der variablen Breite aus Gleichung 61 erhält man die in Gleichung 62 angegebene Differentialgleichung.

$$\frac{dp}{p} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{k_x}{z \cdot \tan \Phi + b_{Fmax} - e_{St}} \cdot (\mu_{ir} - \mu_s) + \\ \frac{k_y}{h_{Fm}} \cdot (\mu_{ir} \cdot \mu_z \cdot \cos \varphi_S - \mu_s - \mu_z \cdot \sin \varphi_S) \end{array} \right\} \cdot dz \quad (62)$$

Die Differentialgleichung wird mit der Randbedingung $p(z_1=0)=p_1$ gelöst. Der Druck p_1 entspricht dem Druck p_1 aus dem Volumenelement 1; somit werden die beiden Elemente gekoppelt. Als Lösungsergebnis erhält man den Druck am Ende des Stegrückstaus, welcher in Gleichung 63 dargestellt ist. Der Exponent Θ_1 wird in Gleichung 64 beschrieben, er ist ein Maß für den zusätzlichen Stegwiderstand, welcher aus dem zwangsgeführten Volumenelement entsteht.

$$p_2 = p_1 \cdot e^{\Theta_1} \quad (63)$$

$$\Theta_1 = \left\{ \begin{array}{l} k_x \cdot (\mu_{ir} - \mu_s) \cdot \ln \frac{b_{Fmax}}{b_{Fmax} - e_{St}} + \\ \frac{e_{St} \cdot k_y}{h_{Fm}} \cdot (\mu_{ir} \cdot \mu_z \cdot \cos \varphi_s - \mu_s - \mu_z \cdot \sin \varphi_s) \end{array} \right\} \cdot \frac{1}{\tan \Phi} \quad (64)$$

Analog zum Volumenelement 2 wird auch am Volumenelement 3 eine Kräftebilanz aufgestellt, um den Druckaufbau im freien Kanal zu berechnen. Im Unterschied zum Volumenelement 2 wirkt anstelle der inneren Reibkraft an der Grenzfläche zum zwangsgeführten Volumen eine entgegengesetzt gerichtete Stegreibkraft. Des Weiteren ist keine Abhängigkeit der Feststoffbettbreite von der Koordinate in Kanalrichtung gegeben. Die Gleichungen 65 und 66 beschreiben das entsprechende Kräftegleichgewicht.

$$dF_{NSt2} - dF_{NSt1} - dF_{RZ} \cdot \cos(\varphi_s) = 0 \quad (65)$$

$$-dF_{RSt2} - dF_{RSt1} - dF_{RSch} - dp \cdot b_{Fmax} \cdot h_{Fm} = 0 \quad (66)$$

Nachstehend sind die Gleichungen für die einzelnen Variablen der Kräftebilanz angeführt. Die Koordinate z_2 bezeichnet dabei die z-Koordinate für das Volumenelement 3.

$$dF_{NSt1} = dF_{NSt2} = k_x \cdot p(z_2) \cdot h_{Fm} \cdot dz \quad (67)$$

$$dF_{NZ} = dF_{NSch} = k_y \cdot p(z_2) \cdot b_{Fmax} \cdot dz \quad (68)$$

$$dF_{RSt} = \mu_s \cdot dF_{NSt} \quad (69)$$

$$dF_{RSch} = \mu_s \cdot dF_{NSch} \quad (70)$$

$$dF_{RZ} = \mu_z \cdot dF_{NZ} \quad (71)$$

Durch Zusammenführen der Gleichungen 65 bis 69 erhält man die in Gleichung 72 angeführte Differentialgleichung.

$$\frac{dp}{p} = - \left\{ \frac{2 \cdot \mu_s \cdot k_x}{b_{Fmax}} + \frac{k_y}{h_{Fm}} \cdot (\mu_s \cdot \mu_z \cdot \cos \varphi_s + \mu_s + \mu_z \cdot \sin \varphi_s) \right\} \cdot dz \quad (72)$$

Als physikalische Verbindung beider Volumenelemente wird die Randbedingung aus Gleichung 73 zum Lösen der Differentialgleichung 72 eingesetzt.

$$p(z_2 = 0) = p_2 \quad (73)$$

Als Lösung erhält man die Exponentialgleichung 74, welche zusammen mit dem Druckübertragungsexponenten Θ_2 aus der Gleichung 75 den Druckverlauf im Schneckenkanal beschreibt.

$$p_3 = p_2 \cdot e^{\Theta_2} \quad (74)$$

$$\Theta_2 = - \left\{ \frac{2 \cdot \mu_s \cdot k_x}{b_{Fmax}} + \frac{k_y}{h_{Fm}} \cdot (\mu_s \cdot \mu_z \cdot \cos \varphi_s + \mu_s + \mu_z \cdot \sin \varphi_s) \right\} \cdot z_2 \quad (75)$$

Die gesamte Rückstaulänge Z_r setzt sich zusammen aus der Stegrückstaulänge Z_e und der Länge, bei der der Druck $p_3(z_2)$ wieder dem Umgebungsdruck p_0 entspricht. In Gleichung 76 ist dieser Zusammenhang wiedergegeben.

$$Z_r = \frac{e_{st}}{\tan \Phi} + \frac{\ln \left(\frac{p_2}{p_0} \right)}{\frac{2 \cdot \mu_s \cdot k_x}{b_{Fmax}} + \frac{k_y}{h_{Fm}} \cdot (\mu_s \cdot \mu_z \cdot \cos \varphi_s + \mu_s + \mu_z \cdot \sin \varphi_s)} \quad (76)$$

Abbildung 15 zeigt eine qualitative Darstellung des Druckverlaufs im Stegrückstau.

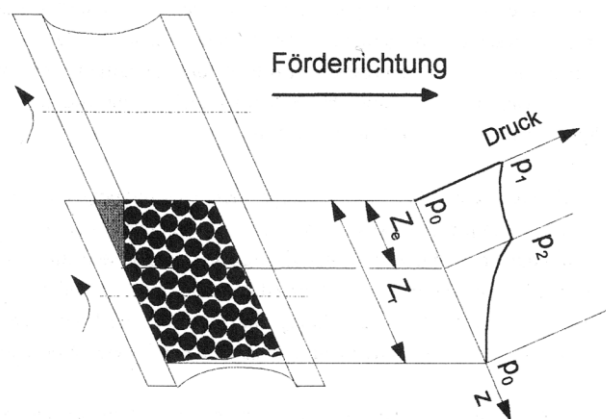


Abbildung 15: Druckverteilung im Rückstau [13]

In Abbildung 16 ist der Druckverlauf über zwei Eingriffsbereiche hinweg dargestellt.

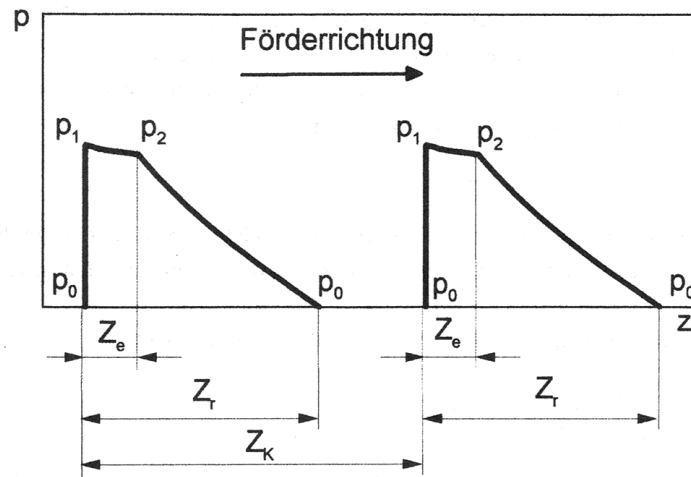


Abbildung 16: Druckverlauf über zwei Eingriffsbereiche [13]

3.4 Berechnung der maximalen Feststoffbettbreite

Nur im Falle eines doppelten Schubflankenprofils kann das Schüttgut die gesamte Kanalbreite b_{\max} ausfüllen. Aus geometrischen Gründen bleibt beim Erdmenger-Profil und beim Schubflankenprofil ein Teil der Kanalbreite ungefüllt, wie in Abbildung 17 dargestellt ist. Dieses leere Volumen wird maßgeblich vom Durchmesser der Granulat Körner beeinflusst und mittels der maximalen Feststoffbettbreite $b_{F\max}$ beschrieben. Der Partikeldurchmesser des Granulats ist mit d_p bezeichnet. Die Längen x_1 und x_2 bezeichnen den Abstand der Kanalmitte vom Kontaktpunkt zwischen Granulateilchen und Zylinderwand beziehungsweise Kanalprofil. Der Winkel α bezeichnet den Winkel den Tangentennormale bei $x=x_2$ und y -Achse einschließen.

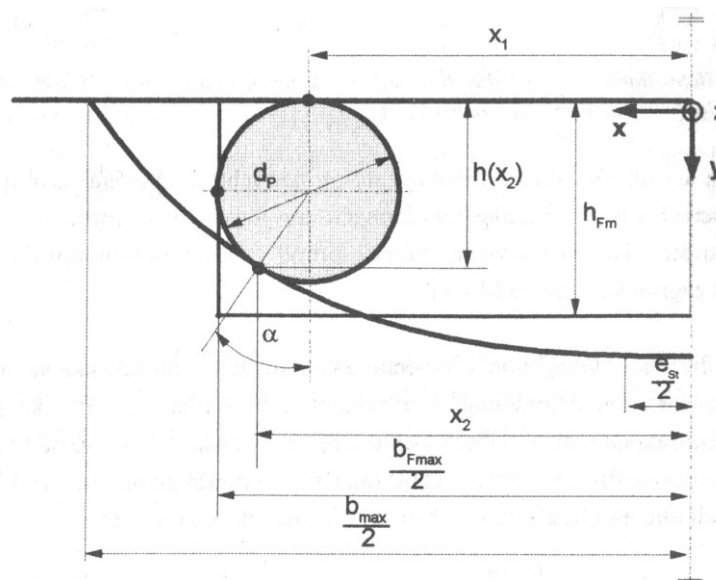


Abbildung 17: Bestimmung der maximalen Feststoffbettbreite [13]

Wie in Gleichung 77 zu sehen ist, entspricht im Falle des rechteckigen Kanals die maximale Feststoffbettbreite b_{Fmax} der maximalen Kanalbreite b_{max} .

$$b_{Fmax} = b_{max} \quad (77)$$

Im Falle eines Erdmenger-Profiles kann b_{Fmax} mittels Gleichung 78 berechnet werden, die Länge x_1 kann iterativ mittels der Gleichungen 79 und 80 bestimmt werden.

$$b_{Fmax} = d_p + 2 \cdot x_1 \quad (78)$$

$$\frac{d_p}{2} \cdot (1 + \cos \alpha) = h \left(x_1 + \frac{d_p}{2} \cdot \sin \alpha \right) \quad (79)$$

$$\alpha = -\arctan \left(\frac{dh(x)}{dx} \right)_{x=x_2} \quad (80)$$

Bei der Bestimmung der maximalen Feststoffbettbreite für das Schubflankenprofil kann die Länge x_1 ebenfalls mittels der Gleichungen 79 und 80 berechnet werden, jedoch ändert sich die Berechnung für b_{Fmax} zu der in Gleichung 81 dargestellten Form.

$$b_{Fmax} = \frac{b_{max}}{2} + x_1 + \frac{d_p}{2} \quad (81)$$

Abbildung 18 zeigt den Einfluss des Granulatdurchmessers und der Gangzahl auf die maximale Feststoffbettbreite im Falle des Erdmenger-Profiles. Die maximale Kanalhöhe der für die zugrundeliegende Berechnung verwendeten Schnecke beträgt 13,65 mm. Der durchschnittliche Granulatdurchmesser d_p kann dementsprechend 0 mm bis h_{max} betragen. Mit zunehmendem Partikeldurchmesser nimmt die maximale Feststoffbettbreite b_{fmax} ab, wobei der Einfluss mit zunehmender Gangzahl größer wird. Aufgrund der speziellen Geometrie der verwendeten Schnecke ist eine Gangzahl größer drei nicht realisierbar. Die maximale Feststoffbettbreite b_{Fmax} ist nur vom mittleren Partikeldurchmesser d_p abhängig - die berechneten Ergebnisse lassen sich somit auf Granulate unterschiedlicher Schüttdichte übertragen.

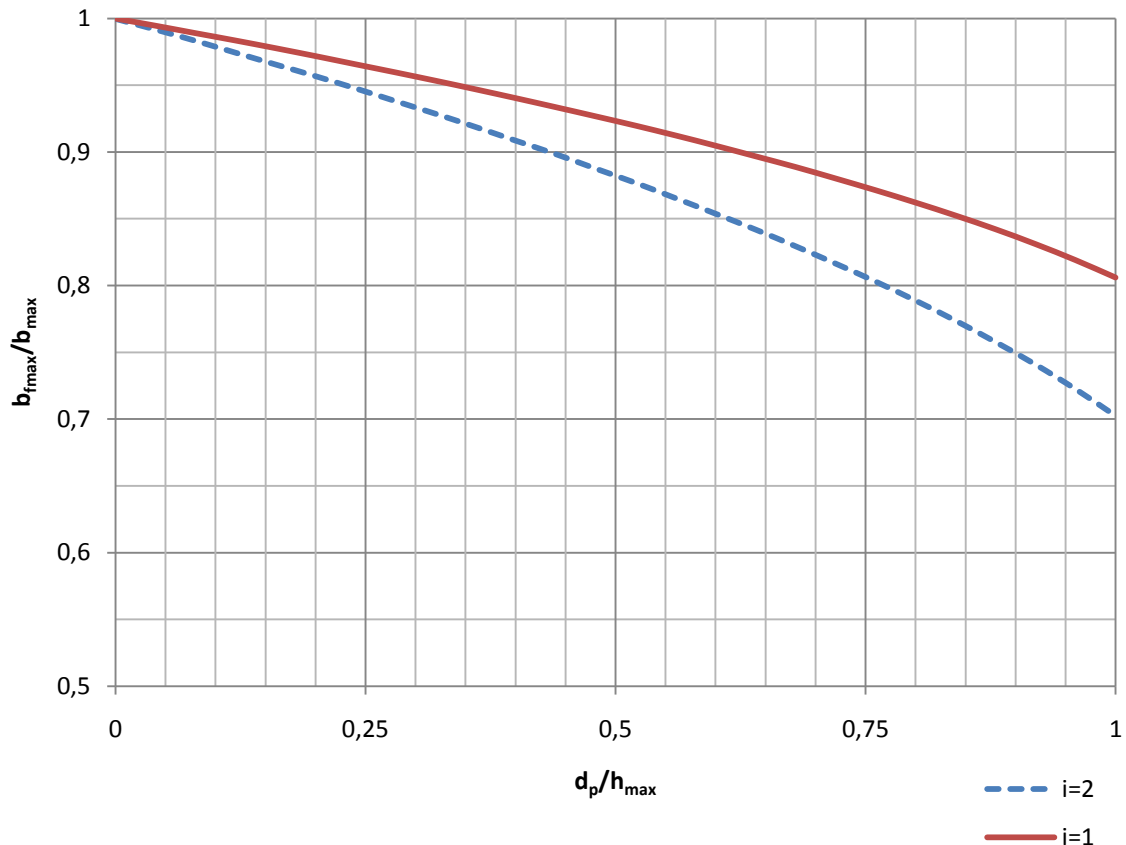


Abbildung 18: Normierte Feststoffbettbreite in Abhängigkeit des normierten Granulatdurchmessers für PE-LD 159 AC

3.5 Schüttdichtekorrektur

Die Bestimmung der Dichte von Kunststoffschüttgütern erfolgt nach DIN 53466. Diese so bestimmte Schüttdichte gilt nur für Partikel bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck. Dabei ist ein Messgefäß zu verwenden, bei dem die Ausdehnung bezogen auf den mittleren Partikeldurchmesser so groß ist, dass ein Einfluss der begrenzenden Wände auf das Ergebnis vernachlässigbar ist. Die Übertragung der mit dieser Methode bestimmten Schüttdichten auf die Verhältnisse in Extrudern ist demnach nur zulässig, wenn auch hier die Kanäle genügend groß, beziehungsweise die Partikelgrößen genügend klein sind, damit die Wandeinflüsse vernachlässigt werden können. Ist dies nicht der Fall, ist eine Korrektur der Schüttdichte notwendig, um den Verhältnissen im Extruder Rechnung zu tragen. Die Korrektur kann mit der in Gleichung 82 dargelegten Beziehung erfolgen [17]. Die korrigierte Schüttdichte ρ_{SKorr} berechnet sich aus der im Verfahren nach DIN 53466 ermittelten Schüttdichte $\rho_{S,DIN}$ multipliziert mit dem Verhältnis der Belegungsdichte unter Berücksichtigung der Schneckenengeometrie F_0 und der Belegungsdichte im unendlichen Gefäß $F_{0,\infty}$. Als

Annahme muss dabei gelten, dass die Partikelanordnung im unendlichen Gefäß und im Schneckenkanal identisch ist.

$$\rho_{\text{SKorr}} = \rho_{\text{S,DIN}} \cdot \frac{F_0}{F_{0,\infty}} \quad (82)$$

Zur Ermittlung von F_0 wird zunächst ein Schneckenabschnitt der Länge Z betrachtet. Das von den Partikeln belegte Volumen lässt sich nach Gleichung 83 berechnen und ergibt sich aus dem Produkt der noch zu bestimmenden Partikelanzahl $N_{\text{P,ges}}$ und dem Volumen eines Partikels V_{P} .

$$V_{\text{P,ges}} = N_{\text{P,ges}} \cdot V_{\text{P}} \quad (83)$$

Das entsprechende Kanalvolumen V_{Kanal} ist in Gleichung 84 angegeben.

$$V_{\text{Kanal}} = \bar{h} \cdot b_{\text{max}} \cdot Z \quad (84)$$

Werden als Vereinfachung die Partikel als ideale Kugeln mit dem Durchmesser d_p aufgefasst, ergibt sich für die Belegungsdichte F_0 der in Gleichung 85 genannte Zusammenhang.

$$F_0 = \frac{V_{\text{P,ges}}}{V_{\text{Kanal}}} = \frac{N_{\text{P,ges}} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3}{V_{\text{Kanal}}} \quad (85)$$

Um die unbekannte Anzahl der Partikel $N_{\text{P,ges}}$ zu ermitteln, muss zunächst von idealisierten, berechenbaren Partikelanordnungen ausgegangen werden. Als Anordnungen werden im Weiteren die kubisch-primitive, kubisch-raumzentrierte und kubisch-flächenzentrierte Partikelanordnung betrachtet. Abbildung 19 zeigt die Belegung des Schneckenkanals unter kubisch-flächenzentrierter Anordnung. Da Partikel teilweise außerhalb der Schneckenkontur auftreten, wird die Partikelanzahl gemäß der in Abbildung 19 dargestellten Bereiche Außenfläche, Kante und Mitte ermittelt und anschließend mit einem Flächenfaktor f , laut Gleichung 86, korrigiert. Der Flächenfaktor berechnet sich als Verhältnis von realer Kanalquerschnittsfläche und ausgewerteter Querschnittsfläche.

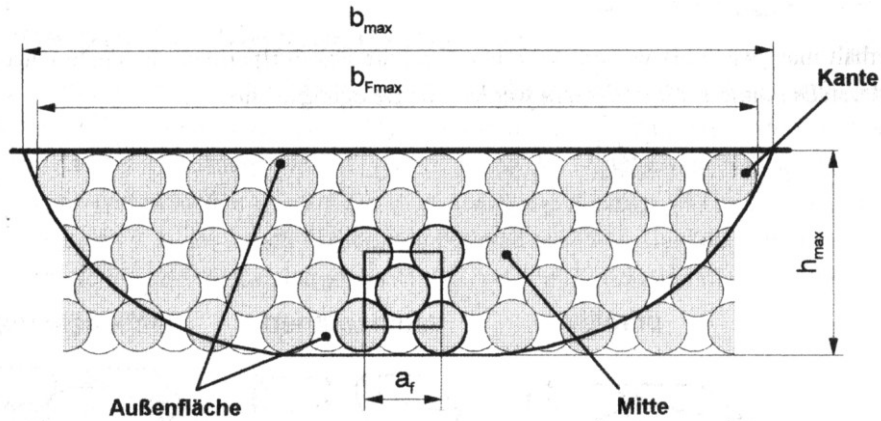


Abbildung 19: Partikel im Schneckenkanal [13]

$$f = \frac{e_{St} \cdot h_{max} + 2 \cdot \int_{\frac{e_{St}}{2}}^{\frac{b_{Fmax}}{2}} h(x) \cdot dx}{h_{max} \cdot (b_{Fmax} - d_p) + d_p^2} \quad (86)$$

Die Anzahl der Partikel berechnet sich nach Gleichung 87. Die Größen n_h , n_b und n_z geben die Anzahl von Elementarzellen entlang der Kanalhöhe, Kanalbreite und Kanallänge an und werden gemäß den Gleichungen 88 bis 90 berechnet. Die Größen N_M , N_A und N_K geben die Partikelanzahl pro Elementarzelle abhängig von ihrer Position wieder und sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Partikelanzahl von Elementarzellen in Abhängigkeit ihrer Lage

Lage	Formelzeichen	Partikelanzahl		
		flächenzentriert	raumzentriert	primitiv
Mitte	N_M	4	2	1
Außenfläche	N_A	1	1/2	1/2
Kante	N_K	1/4	1/4	1/4

$$N_{P,ges} = (n_h \cdot n_b \cdot n_z \cdot N_M + 2 \cdot n_b \cdot n_z \cdot N_A + 4 \cdot n_z \cdot N_K) \cdot f \quad (87)$$

$$n_h = \frac{d_p}{a_j} \cdot \left(\frac{h_{max}}{d_p} - 1 \right) \quad (88)$$

$$n_b = \frac{d_p}{a_j} \cdot \left(\frac{b_{F_{\max}}}{d_p} - 1 \right) \quad (89)$$

$$n_z = \frac{d_p}{a_j} \cdot \left(\frac{Z}{d_p} - 1 \right) \quad (90)$$

Die Kantenlänge a_j der jeweiligen Partikelanordnung wird mittels der Gleichungen 91 für kubisch-primitiv, 92 für kubisch-flächenzentriert und 93 für kubisch-raumzentriert berechnet.

$$a_p = d_p \quad (91)$$

$$a_F = \sqrt{2} \cdot d_p \quad (92)$$

$$a_R = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot d_p \quad (93)$$

Die Belegungsichte im unendlichen Gefäß $F_{0,\infty}$ lässt sich für die jeweilige Partikelanordnung gemäß Gleichung 94 aus dem Verhältnis von Partikelvolumen pro Einheitszelle $V_{p,z}$ und dem Volumen der Einheitszelle V_z berechnen. Für die kubisch-flächenzentrierte Anordnung ergibt sich daraus eine Belegungsichte von 0,74.

$$F_{0,\infty} = \frac{V_{p,z}}{V_z} = \frac{N_M \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3}{a_j^3} \quad (94)$$

In Abbildung 20 ist die Belegungsichte F_0 in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser für die drei betrachteten Partikelanordnungen ersichtlich. Aufgrund der herrschenden Kräfte in den Schneckenkanälen kann davon ausgegangen werden, dass diejenige Partikelanordnung den realen Umständen am nächsten kommt, welche die höchste Packungsdichte ergibt; dies ist für die kubisch-flächenzentrierte Anordnung gegeben. Nur bei Partikeldurchmessern in der Größenordnung 0,6 der Kanalhöhe ergibt die kubisch-primitive Anordnung eine größere Packungsdichte. Die kubisch-flächenzentrierte Partikelanordnung wird aus diesem Grund im Berechnungsprogramm verwendet. Die Packungsdichte ist nur abhängig vom mittleren Partikeldurchmesser d_p , weshalb das Ergebnis dieser Berechnung auf Granulate mit unterschiedlicher Schüttdichte angewendet werden kann. Für diese Berechnung betrug die maximale Kanaltiefe $h_{\max}=13,65$ mm, der Schneckendurchmesser $D_a=109,8$ mm, die Steigung $t=60$ mm und die Gangzahl $i=2$.

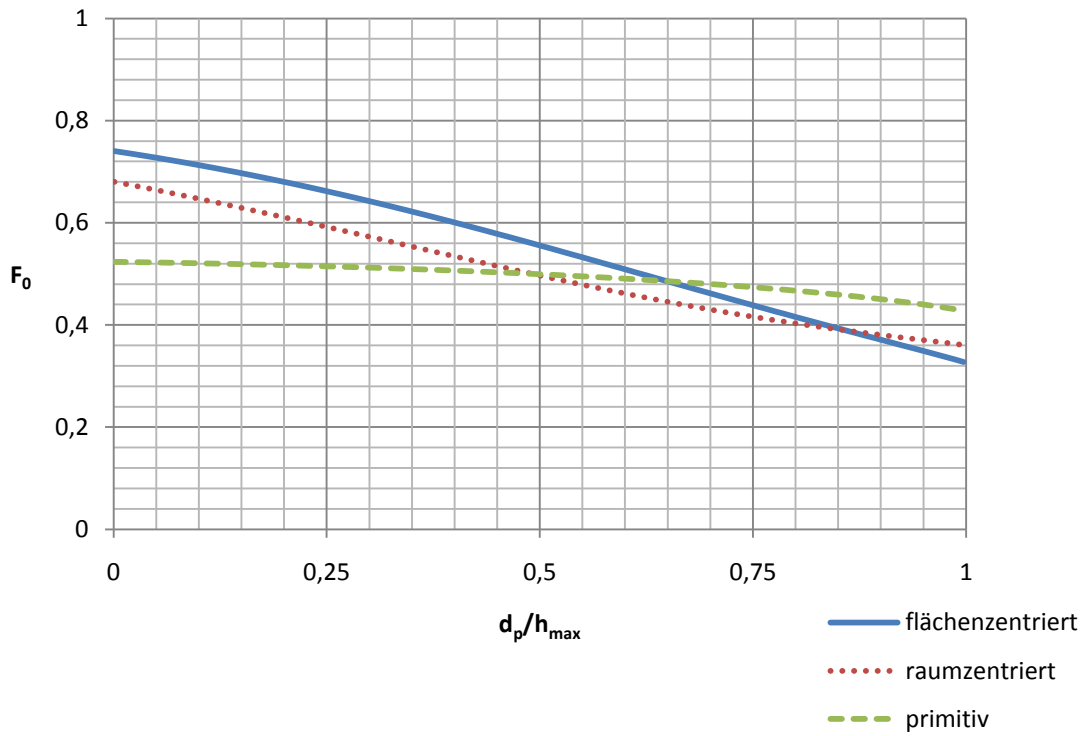


Abbildung 20: Belegungsdichte in Abhängigkeit vom normierten Partikeldurchmesser für LD-PE 159 AC

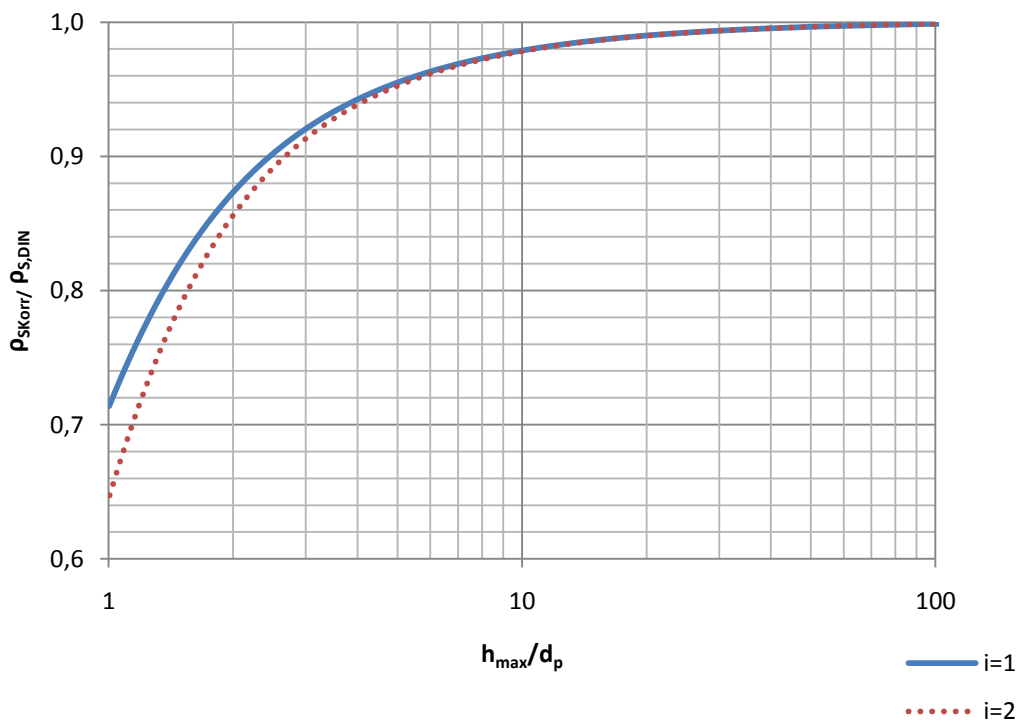


Abbildung 21: korrigierte Schüttdichte als Funktion des Partikeldurchmessers für LD-PE 159 AC

In Abbildung 21 ist die normierte Schüttdichte als Funktion des reziproken normierten Partikeldurchmessers für ein- und zweigängige Schnecken dargestellt. Die Werte sind im Anhang in Tabelle 7 aufgelistet.

Bei Schnecken mit höherer Gangzahl ist der Einfluss stärker als bei eingängigen Schnecken. Eingängige Schnecken haben somit aufgrund der höheren Belegungsdichte eine bessere Förderleistung als mehrgängige Schnecken. Für diese Berechnung betrug die maximale Kanaltiefe $h_{\max}=13,65$ mm, der Schneckendurchmesser $D_a=109,8$ mm und die Steigung $t=60$ mm.

4 Aufschmelzvorgang

Für die Berechnung des Aufschmelzens wird ein modifiziertes Tadmormodell für Einschneckenextruder verwendet. Für den Doppelschneckenextruder wird das Rinnenmodell verwendet und durch die schrittweise Berechnung an die konische Bauform angepasst. Dabei werden für jedes Element, abhängig von seiner Position in Schneckenrichtung, die Geometrie und die auftretenden Geschwindigkeiten berechnet. Des Weiteren wird die Breite des Feststoffbettes beim Übergang auf das nächste Berechnungselement auf die neue Kanalbreite normiert. Die Berechnung der Schmelztemperatur wird basierend auf den Ergebnissen der Aufschmelzberechnung ebenfalls schrittweise im Rinnenmodell durchgeführt.

Der zudosierte Kunststoff wird aufgrund der Schneckendrehung in Richtung der Schnecken spitze gefördert, dabei beginnen die zylinderwandnahen Granulatschichten durch den Kontakt mit der beheizten Zylinderwand anzuschmelzen, bis sich ein durchgehender Schmelzefilm bildet. Durch die konische Form des NCT-Extruders wird der Feststoff verdichtet, was einen besseren Kontakt mit der Zylinderwand und damit eine Unterstützung des Anschmelzvorgangs zur Folge hat. Bei herkömmlichen Doppelschneckenextrudern wird dies durch eine Verringerung der Schneckensteigung vor der Aufschmelzzone erreicht. Gleichzeitig mit dem Anschmelzen der zylinderwandnahen Schichten werden die tiefer liegenden Feststoffschichten durch Wärmeleitung erwärmt.

Durch das Ausbilden des Schmelzefilms ändern sich die Reibverhältnisse dermaßen, dass die reibungsdominierte Förderung zusammenbricht und Material durch den Zwickelbereich gefördert wird. Durch die Geschwindigkeitskomponenten im Eingriffsbereich kommt es zu einer intensiven Durchmischung des Materials. Sobald der Anteil an Schmelze ausreicht, bildet sich eine Dispersion von Granulatteilen in Schmelze. Da die Granulatteile keinen direkten Kontakt mehr zur Zylinderoberfläche haben, können sie nur mehr durch Wärmeleitung aufgeschmolzen werden. Dieses Aufschmelzverhalten kann jedoch nur bei Feststoffen mit markanten Partikelabmessungen beobachtet werden. Werden dem Extruder Kunststoffe in Form von Pulver oder Gries zugeführt, kann ein mit Einschneckenextrudern vergleichbares Aufschmelzverhalten beobachtet werden [13]. Zur Berechnung des Aufschmelzverhaltens wird in dieser Arbeit ein modifiziertes Tadmormodell nach Ansahl [1], welches eine ortsabhängige Schmelzefilmstärke an der Zylinderwand sowie Radialspaltleckströme berücksichtigt, verwendet. Abbildung 22 zeigt qualitativ das

Aufschmelzverhalten kompaktierter Feststoffe, auf welchem die nachstehenden Berechnungen beruhen.

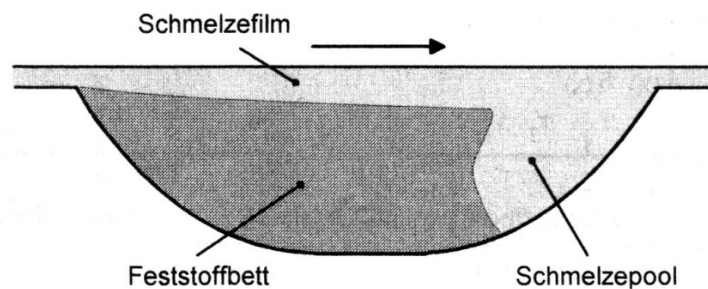


Abbildung 22: Aufschmelzverhalten kompaktierter Feststoffe [13]

Der an der Zylinderwand gebildete Schmelzefilm wird von der aktiven Flanke abgeschabt und sammelt sich in einem wachsenden Schmelzpool, welcher das Feststoffbett an die passive Flanke drückt. Das Ende des Aufschmelzvorgangs ist erreicht, wenn das Feststoffbett verschwunden ist.

4.1 Aufschmelzmodell

Die Berechnung des Aufschmelzverlaufs erfolgt im Rinnenmodell. Dabei wird von einem abgewinkelten Zylinder und abgewinkelten Schneckenkanälen ausgegangen. Des Weiteren wird eine kinematische Umkehr durchgeführt, was bedeutet, dass die Schnecke als stillstehend angesehen wird, während der Zylinder sich um die Schnecke dreht. Aufgrund der Abwicklung erhält man k parallele Kanäle, deren Anzahl von der Gangzahl i abhängig ist und laut Gleichung 95 berechnet wird.

$$k = 2 \cdot i - 1 \quad (95)$$

In Abbildung 23 ist das modifizierte Tadmormodell dargestellt. Die Kanalgeometrie wird hierbei durch einen rechteckigen Kanal angenähert. Auf der linken Seite der Abbildung 23 ist die ortsabhängige Schmelzefilmdicke $\delta(x)$ dargestellt, welche gemäß Gleichung 96 in eine mittlere Schmelzefilmdicke $\bar{\delta}$ umgerechnet wird. Die Berechnung des Exponenten c wird im weiteren Verlauf der Arbeit erläutert.

$$\bar{\delta} = \frac{\delta(x)}{1+c} \quad (96)$$

In Abbildung 23 bezeichnen e die Stegbreite, s_R die Radialspaltweite, \bar{h} und \bar{b} die mittlere wirksame Kanalhöhe beziehungsweise Kanalbreite, v_{0x} die Umfangsgeschwindigkeit in x -Richtung, T_{Zyl} die Zylindertemperatur und T_{FI} die

Fließtemperatur. X ist eine wichtige Größe für diese Betrachtung, denn dieser Wert stellt die noch verbleibende Feststoffbettbreite dar. Auf der rechten Seite der Abbildung 23 wird die ortsabhängige Schmelzeschichtdicke durch einen Mittelwert $\bar{\delta}$ ersetzt.

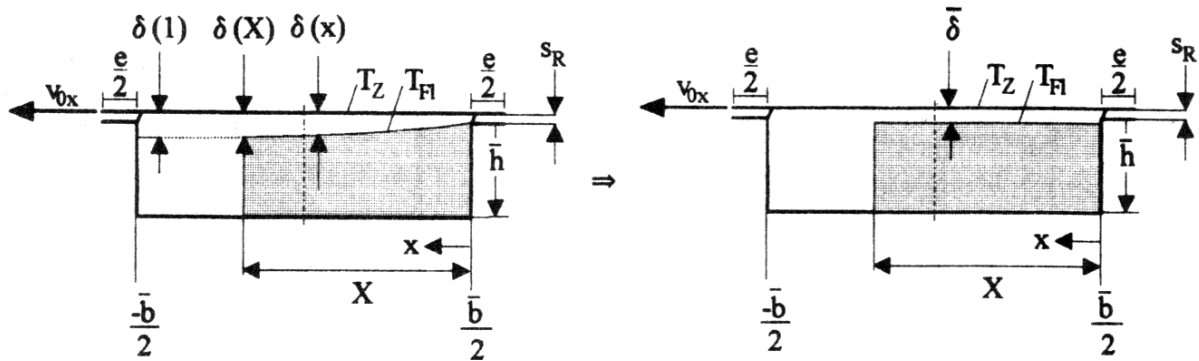


Abbildung 23: modifiziertes Tadmormodell

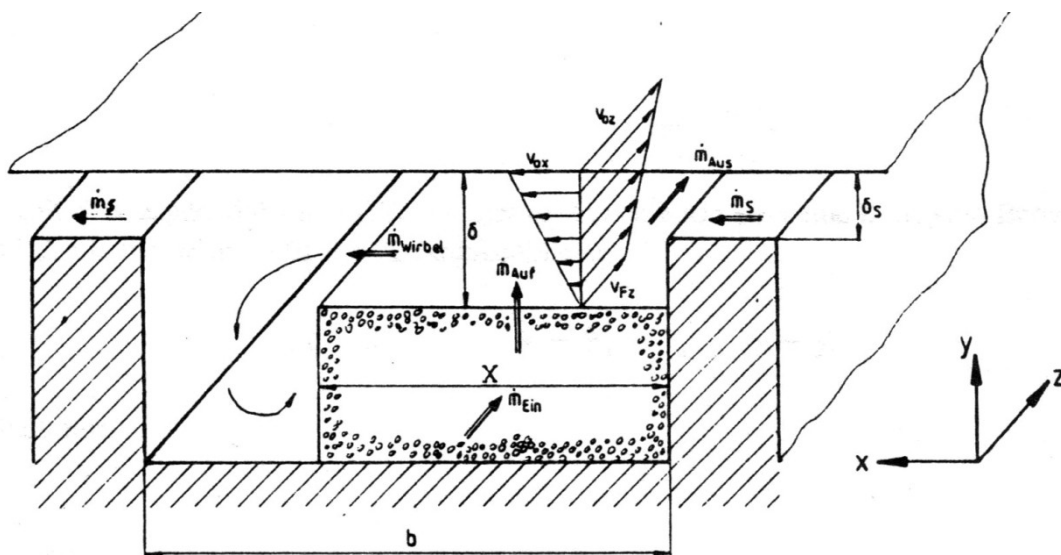


Abbildung 24: Massebilanz [16]

Abbildung 24 zeigt die von Potente [16] aufgestellte Massebilanz am Feststoffbett beim Rinnenmodell. Die Massedurchsätze \dot{m}_{Ein} und \dot{m}_{Aus} bezeichnen den eintretenden beziehungsweise den austretenden Feststoffmassenstrom aus dem betrachteten Element. Der Massenstrom \dot{m}_s bezeichnet den über die Schneckenflanke strömenden Leckstrom während \dot{m}_{Auf} den aufgeschmolzenen Massenstrom und \dot{m}_{Wirbel} den in den Schmelzewirbel übertretenden Massenstrom bezeichnet. Die Spaltweite wird mit δ_s bezeichnet. Ausgehend von dieser Massebilanz erhält man die in Gleichung 97 dargestellte Differentialgleichung, welche nicht mehr trivial lösbar ist. Durch

Einführen geeigneter Kennzahlen und Darstellung der Gleichung in einem doppellogarithmischen Diagramm kann die Differentialgleichung in einer lösbaren Form, laut Gleichung 107, dargestellt werden. Die Vorgehensweise ist in [16] ausführlich abgehandelt, aus diesem Grund wird in dieser Arbeit auf die Darlegung dieser, soweit sie nicht zum unmittelbaren Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendig ist, verzichtet.

$$-\frac{\partial}{\partial z}(\rho_F \cdot v_F \cdot x \cdot h_F) = \frac{1}{2} \cdot \rho_S \cdot k_1 \cdot v_{ox} \cdot (\bar{\delta} - \delta_S) \quad (97)$$

In den Gleichungen 98 bis 106 sind die eingeführten Größen und Normierungen dargestellt. Die Brinkmann-Zahl Br ist eine dimensionslose Kennzahl und beschreibt das Verhältnis der Dissipationswärme zur radialen Wärmeleitung.

$$Br = \frac{K(T_{FI}) \cdot k_2 \cdot v_{rel}^{1+n} \cdot \bar{\delta}_0^{1-n}}{\lambda_S \cdot (T_Z - T_{FI})} \quad (98)$$

$$\Psi = \frac{\delta}{\delta_0} \quad (99)$$

$$\Psi_S = \frac{\delta_S}{\delta_0} \quad (100)$$

$$u = \frac{h_F}{h_{F0}} = 1 - \beta \cdot \zeta \quad (101)$$

$$y = \frac{X}{b} \quad (102)$$

$$\zeta = \frac{z}{D_s} \quad (103)$$

$$w = \frac{\rho_F \cdot v_F}{\rho_{F0} \cdot v_{F0}} \quad (104)$$

$$\pi_1 = \frac{\rho_S \cdot v_0 \cdot k_1 \cdot \delta_0 \cdot D \cdot \sin \varphi_s}{2 \cdot \dot{m}} \quad (105)$$

$$(\Psi - \Psi_S) = (1 - \Psi_S) \cdot y^c \quad (106)$$

Damit erhält man Gleichung 107.

$$-\frac{d}{d\zeta}(u \cdot w \cdot y) = \pi_1 \cdot (1 - \Psi_S) \cdot y^c \quad (107)$$

Des Weiteren wird eingeführt:

$$w = u^{-a} \quad (108)$$

Für diese Arbeit wurde Gleichung 107 unter nachstehenden Randbedingungen gelöst. Da das Berechnungsprogramm den Aufschmelzverlauf elementweise ermittelt, muss eine variable normierte Anfangsfeststoffbettbreite gemäß Gleichung 109 eingeführt werden. Für die einzelnen Elemente kann die Kanaltiefe als konstant angesehen werden, was durch die Randbedingung nach Gleichung 110 berücksichtigt wird. Als normierte Schmelzefilmdicke Ψ wird durch Gleichung 111 eine noch zu ermittelnde Dicke Ψ_1 eingeführt. Des Weiteren wird von einem konstanten Massestrom pro Flächeneinheit ausgegangen, was durch Gleichung 112 berücksichtigt wird.

$$y = y_1 \quad (109)$$

$$u = 1 \quad (110)$$

$$\Psi = \Psi_1 \quad (111)$$

$$a = 0 \quad (112)$$

Gleichung 113 ist das Ergebnis der gelösten Differentialgleichung unter den oben genannten Randbedingungen.

$$y = \frac{X}{b} = \left[y_1^{1-c} + (c-1) \cdot (1 - \Psi_S) \cdot \pi_1 \cdot \zeta \right]^{\frac{1}{1-c}} \quad (113)$$

Für die weitere Berechnung wird auf die Arbeit von Anshl [1] zurückgegriffen. In den Gleichungen 114 bis 122 sind die notwendigen Gleichungen angegeben, welche aus [1] übernommen wurden.

$$A = \frac{\beta}{n} \cdot (T_Z - T_{Fl}) \quad (114)$$

$$k_1 = 2 \cdot \left(\frac{1}{1 - e^A} + \frac{1}{A} \right) \quad (115)$$

$$k_2 = \frac{2}{A^2} \cdot \left(\frac{A}{e^A - 1} \right)^{1+n} \cdot (e^A - A - 1) \quad (116)$$

$$v_{rel} = \sqrt{(v_{0z} - \bar{v}_{Fz})^2 + v_{0x}^2} \quad (117)$$

$$c = \frac{\log\left(\frac{\psi_1 - \psi_s}{\psi_2 - \psi_s}\right)}{\log\left(\frac{y_1}{y_2}\right)} \quad (118)$$

$$\delta_0 = (\delta_1 - s_R) \cdot y_1^{-c} + s_R \quad (119)$$

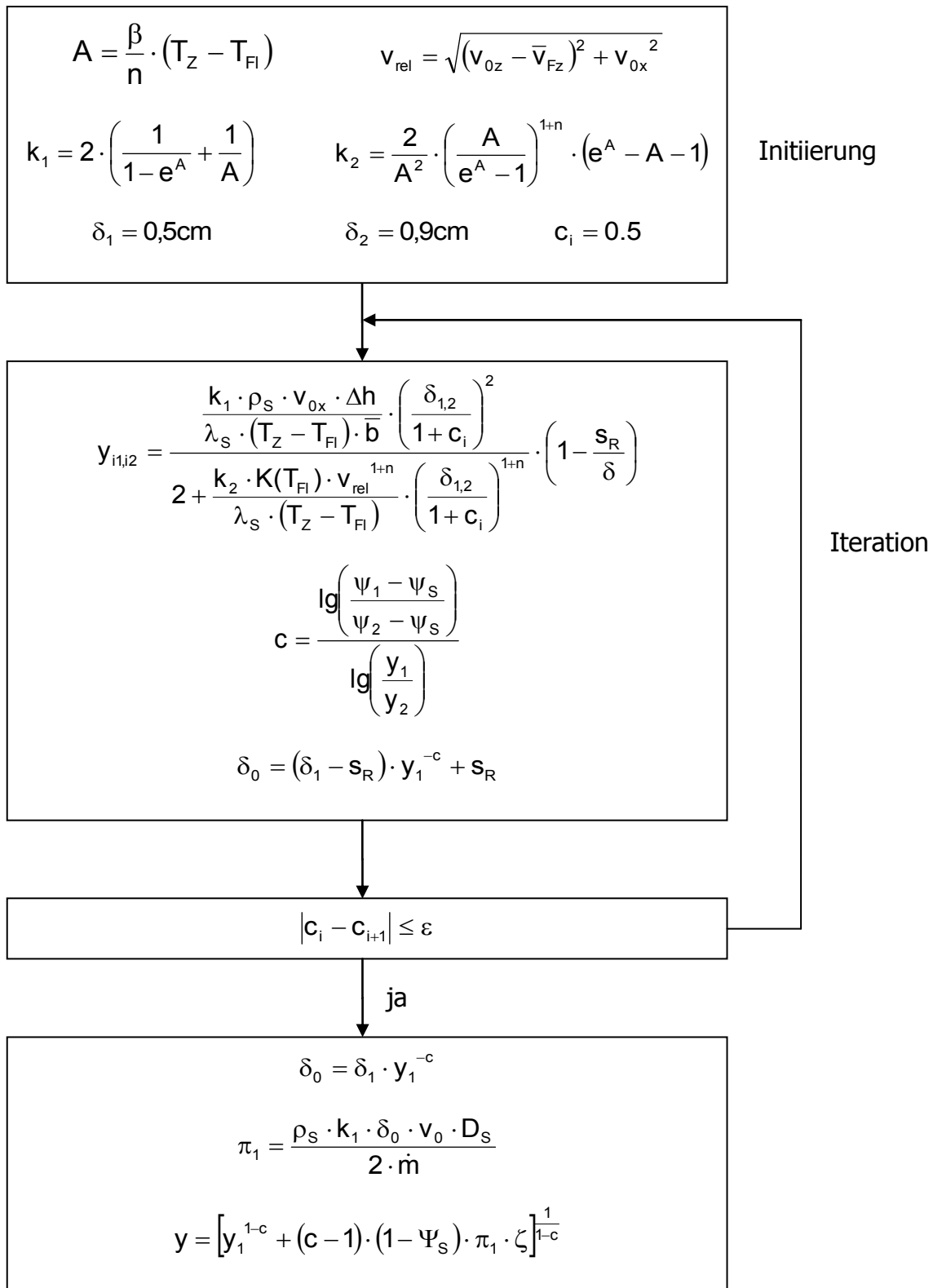
$$\pi_1 = \frac{\rho_s \cdot k_1 \cdot \delta_0 \cdot v_0 \cdot D_s}{2 \cdot \dot{m}} \quad (120)$$

$$\zeta = \frac{z}{D_s} = \frac{L}{D_s \cdot \sin\varphi_s} \quad (121)$$

$$y = \frac{X}{b} = \frac{\frac{k_1 \cdot \rho_s \cdot v_{0x} \cdot \Delta h}{\lambda_s \cdot (T_Z - T_{FI}) \cdot b} \cdot \left(\frac{\delta}{1+c}\right)^2}{2 + \frac{k_2 \cdot K(T_{FI}) \cdot v_{rel}^{1+n}}{\lambda_s \cdot (T_Z - T_{FI})} \cdot \left(\frac{\delta}{1+c}\right)^{1+n}} \cdot \left(1 - \frac{s_R}{\delta}\right) \quad (122)$$

Der Exponent c lässt sich durch ein Iterationsverfahren bestimmen, welches in Tabelle 2 dargestellt ist [1]. Als sehr gute Initialisierungswerte für die Iteration haben sich die in Tabelle 2 genannten Werte herausgestellt. Die notwendigen Größen werden im Berechnungsprogramm für jedes Teilstück, abhängig von der Position in Schneckenrichtung, berechnet.

Tabelle 2: Iteration zur Ermittlung des Faktors c



Die Enthalpiedifferenz Δh berechnet sich nach Gleichung 123. Sie setzt sich zusammen aus dem Energiebedarf zum Erwärmen des Feststoffs auf die Fließtemperatur T_{FI} und der Schmelzenthalpie Δh_A .

$$\Delta h = c_F \cdot (T_{FI} - T_F) + \Delta h_A \quad (123)$$

Als weitere Größen für den Aufschmelzverlauf werden die Geschwindigkeiten benötigt. Die Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke v_0 wird laut Gleichung 124 berechnet. Sie kann in die Geschwindigkeitskomponente in Kanalrichtung v_{0z} sowie die Komponente senkrecht zum Schneckensteg v_{0x} zerlegt werden, wie in den Gleichungen 125 und 126 zu sehen ist [12].

$$v_0 = \pi \cdot D_S \cdot n_0 \quad (124)$$

$$v_{0z} = v_0 \cdot \cos \varphi_S \quad (125)$$

$$v_{0x} = v_0 \cdot \sin \varphi_S \quad (126)$$

Da die reibungsdominierte Förderung des Feststoffs in der Aufschmelzzone zusammenbricht, setzt die Berechnung der Feststoffgeschwindigkeit v_{Fz} zuerst die Ermittlung des Feststoffförderwinkels Λ voraus. Der dafür relevante Massestrom errechnet sich aus der Differenz des zudosierten Massestroms \dot{m}_{dos} und des im Stegrückstau zwangsgeförderten Massestroms \dot{m}_{ZwSt} . Dieser Massestrom wird in Gleichung 127 aus dem Produkt der freien Querschnittsfläche A_{fr} , der korrigierten Schüttdichte ρ_{SKorr} und der axialen Fördergeschwindigkeit v_{ax} berechnet [13].

$$\dot{m}_{dos} - \dot{m}_{ZwSt} = \rho_{SKorr} \cdot A_{fr} \cdot v_{ax} \quad (127)$$

Der im Stegrückstau zwangsgeförderte Massestrom kann gemäß Gleichung 128 berechnet werden.

$$\dot{m}_{ZwSt} = n_0 \cdot \rho_{SKorr} \cdot i \cdot (Z_e + e_{St} \cdot \tan \varphi_S) \cdot e_{St} \cdot h_{Fm} \quad (128)$$

Die axiale Fördergeschwindigkeit v_{ax} berechnet sich nach Gleichung 129.

$$v_{ax} = \frac{\tan \varphi_S \cdot \tan \Lambda}{\tan \varphi_S + \tan \Lambda} \cdot \pi \cdot D_S \cdot n_0 \quad (129)$$

Aus den Gleichungen 127 bis 129 lässt sich der Förderwinkel Λ , wie in Gleichung 130 dargelegt, berechnen.

$$\Lambda = \arctan \left(\frac{\tan \varphi_S}{\frac{\rho_{SKorr} \cdot A_{fr} \cdot \pi \cdot D_S \cdot n_0 \cdot \tan \varphi_S}{\dot{m}_{dos} - \dot{m}_{ZwSt}} - 1} \right) \quad (130)$$

Abbildung 25 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Geschwindigkeitskomponenten in einem gleichläufigen Doppelschneckenextruder - daraus lässt sich die in Gleichung 131 dargestellte Beziehung für die Feststoffbettgeschwindigkeit herleiten.

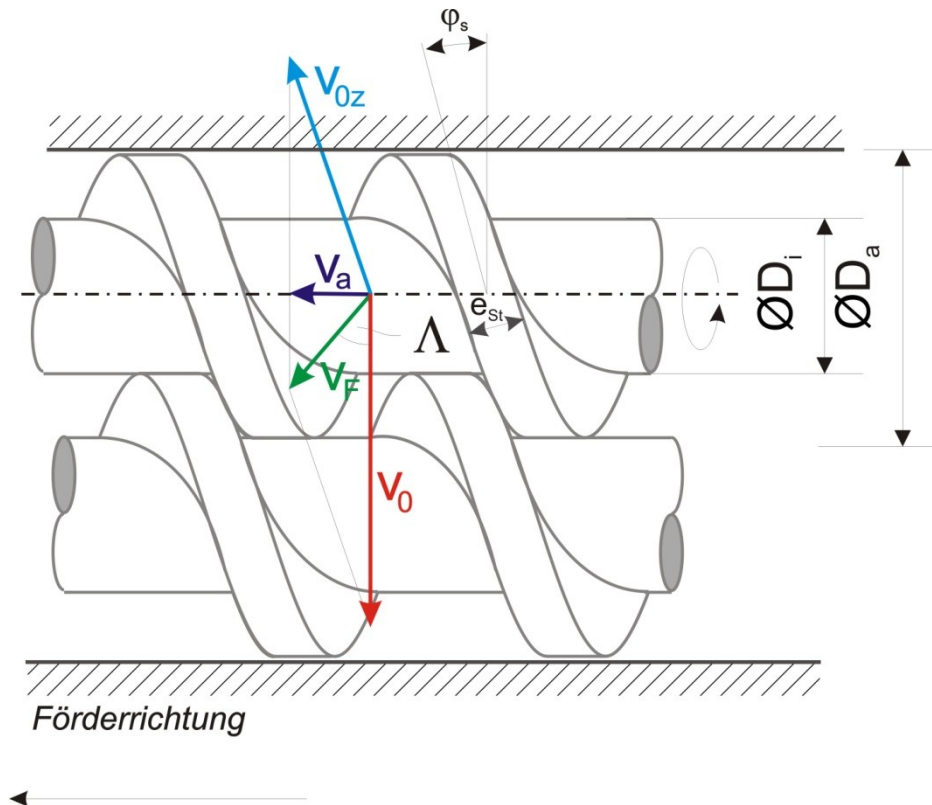


Abbildung 25: Geschwindigkeitskomponenten [21]

$$v_{Fz} = \frac{v_0 \cdot \tan \Lambda}{\cos \varphi_S \cdot (\tan \varphi_S + \tan \Lambda)} \quad (131)$$

4.2 Temperaturerhöhung

Das Einhalten oder Erreichen vorgegebener Massetemperaturfenster ist beim Extrusionsprozess von großer Bedeutung. Die Schmelztemperatur ist eine entscheidende Größe für die Durchführbarkeit von Extrusionsaufgaben. Der Kenntnis über den Schmelztemperaturverlauf während des Aufschmelzvorgangs kommt somit eine wichtige Rolle zu. Die Berechnungsgrundlage des Temperaturverlaufs basiert

auf der Arbeit von Anshl [1] und wurde für das Berechnungsprogramm zur elementweisen Berechnung herangezogen.

Zunächst wird die Starttemperatur ermittelt. Dazu wird die mittlere Schmelzefilmtemperatur am Aufschmelzbeginn berechnet; diese Temperatur ist zugleich die mittlere Starttemperatur \bar{T}_{Start} für die Temperaturverlaufsberechnung. Die vereinfachte Energiegleichung für den Schmelzefilm ist in Gleichung 132 angegeben.

$$\lambda_s \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \tau_{yj} \frac{\partial v_j}{\partial y} = 0 \quad (132)$$

Löst man diese Gleichung unter den Randbedingungen aus Gleichung 133 und 134, erhält man die in Gleichung 135 dargestellte Lösung.

$$T(0) = T_{\text{Fi}} \quad (133)$$

$$T(\bar{\delta}) = T_z \quad (134)$$

$$T(\xi) = T_{\text{Fi}} + (T_z - T_{\text{Fi}}) \cdot \left\{ \xi + \text{Br} \cdot \left[\frac{1}{A^2} \cdot \left(\frac{A}{e^A - 1} \right)^{1+n} \cdot (1 - e^{A \cdot \xi} - \xi \cdot (1 - e^A)) \right] \right\} \quad (135)$$

Die Brinkmann-Zahl Br ist in Gleichung 136 definiert. Des Weiteren sind ξ , die dimensionslose Koordinate in y-Richtung, laut Gleichung 137 und der Berechnungsparameter A gemäß Gleichung 138 definiert.

$$\text{Br} = \frac{K(T_{\text{Fi}}) \cdot v_{\text{rel}}^{1+n} \cdot \bar{\delta}^{1-n}}{\lambda_s \cdot (T_z - T_{\text{Fi}})} \quad (136)$$

$$\xi = \frac{y}{\bar{\delta}} \quad (137)$$

$$A = \frac{\beta \cdot (T_z - T_{\text{Fi}})}{n} \quad (138)$$

Die Starttemperatur \bar{T}_{Start} lässt sich gemäß Gleichung 139 berechnen.

$$\bar{T}_{\text{Start}} = \frac{\int_0^1 v(\xi) \cdot T(\xi) d\xi}{\int_0^1 v(\xi) d\xi} \quad (139)$$

Wobei das Geschwindigkeitsprofil im Schmelzefilm nach Gleichung 140 definiert ist.

$$v(\xi) = v_{\text{rel}} \cdot \frac{e^{A \cdot \xi} - 1}{e^A - 1} \quad (140)$$

Als Lösung zum Berechnen der mittleren Starttemperatur erhält man Gleichung 141, mit den Parametern aus den Gleichungen 142 bis 147.

$$\bar{T}_{\text{Start}} = [B \cdot \Delta T \cdot (A - 1) \cdot 2 \cdot e^{2A} - (A \cdot B \cdot \Delta T \cdot e^{2A} + A_3 - A_2)] \cdot A_4 \quad (141)$$

$$B = Br \cdot \frac{1}{A^2} \cdot \left(\frac{A}{e^A - 1} \right)^{1+n} \quad (142)$$

$$\Delta T = T_Z - T_{\text{Fl}} \quad (143)$$

$$A_1 = A^2 \cdot (B + 1) + 3 \cdot A \cdot B + 2 \cdot (B - 1) \quad (144)$$

$$A_2 = [\Delta T \cdot (A \cdot (B + 1) + 2 \cdot B - 1) + A \cdot T_{\text{Fl}}] \cdot 2 \cdot e^A \quad (145)$$

$$A_3 = A^2 \cdot B \cdot \Delta T \cdot e^A + \Delta T \cdot A_1 + 2 \cdot A \cdot T_{\text{Fl}} \cdot (A + 1) \quad (146)$$

$$A_4 = \frac{1}{2 \cdot A \cdot (e^A - A - 1)} \quad (147)$$

Bei Annahme von $Br=0$ kann die mittlere Starttemperatur mithilfe der vereinfachten Lösung nach Gleichung 148 berechnet werden [22].

$$\bar{T}_{\text{Start}} = T_{\text{Fl}} + (T_Z - T_{\text{Fl}}) \cdot \frac{\frac{1}{A} - \frac{A}{2} + e^A \cdot \left(1 - \frac{1}{A}\right)}{e^A - A - 1} \quad (148)$$

Zur Berechnung des Temperaturverlaufes werden folgende Voraussetzungen gemacht:

- Der Schneckenkanal wird als Flachkanal mit $\bar{b} \gg \bar{h}$ betrachtet, dadurch kann der Stegeinfluss vernachlässigt werden.
- Die Schmelze ist wandhaftend.
- Die Strömung ist laminar und inkompressibel.
- Für alle Stoffwerte, ausgenommen der Viskosität, werden Mittelwerte verwendet.
- Die Viskosität der Schmelze soll dem Potenzgesetz, gemäß Gleichung 149, folgen [16], dabei wird für die Temperaturverschiebung ein Exponentialansatz verwendet.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = K_{0T} \cdot e^{-\beta(T-T_0)} \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (149)$$

Der Koeffizient K des Potenzfließgesetzes wird im Berechnungsprogramm für jedes Schneckenteilstück auf Basis der jeweiligen Eintrittsschmelztemperatur berechnet. Für einen Abschnitt mit konstanter Geometrie lautet die beschreibende Differentialgleichung [16]:

$$\rho \cdot c \cdot \bar{v}_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + (\overline{\tau \cdot \dot{\gamma}})_0 \cdot e^{-\beta(T-T_0)} \quad (150)$$

Die linke Seite der Gleichung beschreibt die Temperaturentwicklung in Kanalrichtung z , der erste Term der rechten Seite beschreibt die Wärmeleitung über die Kanalhöhe y , $(\overline{\tau \cdot \dot{\gamma}})_0$ beschreibt die über den Kanalquerschnitt gemittelte dissipierte Energie pro Volumeneinheit bei T_0 und die Exponentialfunktion beschreibt die Temperaturabhängigkeit der Viskosität. Zum Lösen der Differentialgleichung werden die dimensionslosen Kennzahlen gemäß den Gleichungen 151 bis 155 eingeführt.

$$\Theta_0 = \frac{T_0 - T_z}{T_z} \quad (151)$$

$$\xi = \frac{y}{h} \quad (152)$$

$$\zeta = \frac{z}{Z} \quad (153)$$

$$\text{Br} = \frac{(\overline{\tau \cdot \dot{\gamma}})_0 \cdot \bar{h}^2}{\lambda \cdot T_z} \approx \frac{K \cdot v_0^{1+n} \cdot \bar{h}^{-1-n}}{\lambda \cdot T_z} \quad (154)$$

$$\text{Gz} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot \bar{h} \cdot \dot{V}}{\lambda \cdot b \cdot Z \cdot k} \quad (155)$$

Die Graetz-Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl und beschreibt das Verhältnis der axialen Konvektion zur radialen Wärmeleitung. Die Anzahl der parallelen Kanäle nach dem Rinnenmodell k wird für den Doppelschneckenextruder gemäß Gleichung 95 berechnet. Die beschreibende Differentialgleichung 156 ist aufgrund der Exponentialfunktion nicht mehr auf einfache Weise lösbar.

$$\text{Gz} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \zeta} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \text{Br} \cdot e^{-\beta T_z \Theta} \quad (156)$$

In [16] wird als Lösungsmethode die Annäherung der Exponentialfunktion durch einen Polygonzug vorgeschlagen; dies wird in Gleichung 157 verdeutlicht.

$$e^{-\beta(T-T_0)} = c_1 - c_2 \cdot \beta \cdot (T - T_0) \quad (157)$$

Wird von einer abschnittswisen Berechnung ausgegangen, bei der die Temperaturänderung in Schneckenkanalrichtung klein ist, kann die Vereinfachung laut Gleichung 158 getroffen werden.

$$\beta \cdot \Delta T \rightarrow 0 \quad (158)$$

Daraus folgt als beschreibende Differentialgleichung:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - Gz \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} = -Br \quad (159)$$

Die Lösung der Gleichung 159 ist in [1] unter den nachstehenden Voraussetzungen dargelegt:

- Im Bereich $\xi > 0$ herrscht die gemittelte Starttemperatur $\theta(\zeta=0) = \bar{\theta}_{\text{Start}}$.
- Die Wärmequelle (Scherung) ist pro $\Delta \zeta$ und $\zeta > 0$ als Mittelwert in die Berechnung einzubeziehen.
- Die Zylindertemperatur T_z ist konstant.

Unter Einbeziehung der oben genannten Anfangs- und Randbedingungen gelangt man zum Lösungssatz aus den Gleichungen 160 und 161.

$$\theta(\zeta, \xi) = \left[\bar{\theta}_0 + \frac{Br}{Gz} \cdot \zeta + \frac{Br}{2} \cdot \xi^2 \right] \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\xi}{2 \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{Gz}}} \right) + Br \cdot \xi \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{Gz \cdot \pi}} \cdot e^{\left(-\frac{Gz \cdot \xi^2}{4 \cdot \zeta} \right)} - \frac{Br}{2} \cdot \xi^2 \quad (160)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{T} - T_z}{T_z} = \int_0^1 \theta(\zeta, \xi) d\xi \quad (161)$$

5 Praktische Versuche

Messungen im Rahmen des FFG Bridge Projektes Nr.: 818087 „Auslegung eines k ämmend konisch gleichlaufenden Doppelschneckenextruders“ am Versuchs-extruder NCT 55 der Firma M-A-S in Pucking durchgeföhrt. Der Versuchsextruder hat radial angebrachte Bohrungen im Zylinder, in welche die Messaufnehmer eingeschraubt werden können. Zum Erfassen verschiedener Betriebspunkte wird eine Düse mit verstellbarer Spalthöhe eingesetzt. Die Messung der Spalthöhe erfolgt über einen induktiven Wegaufnehmer mit Messverstärker. Als Messwerterfassung kommen als A/D-Wandler das System „Spider8“ von HBM sowie die dazugehörige Software „Catman Easy“ zum Einsatz [19].

Abbildung 26 zeigt den Extruder mit dem Messaufbau und der verstellbaren Düse. Als Granulat wurde ein Polyethylen der Type LD 159AC der Firma ExxonMobil mit der Chargennummer 295610 verwendet.

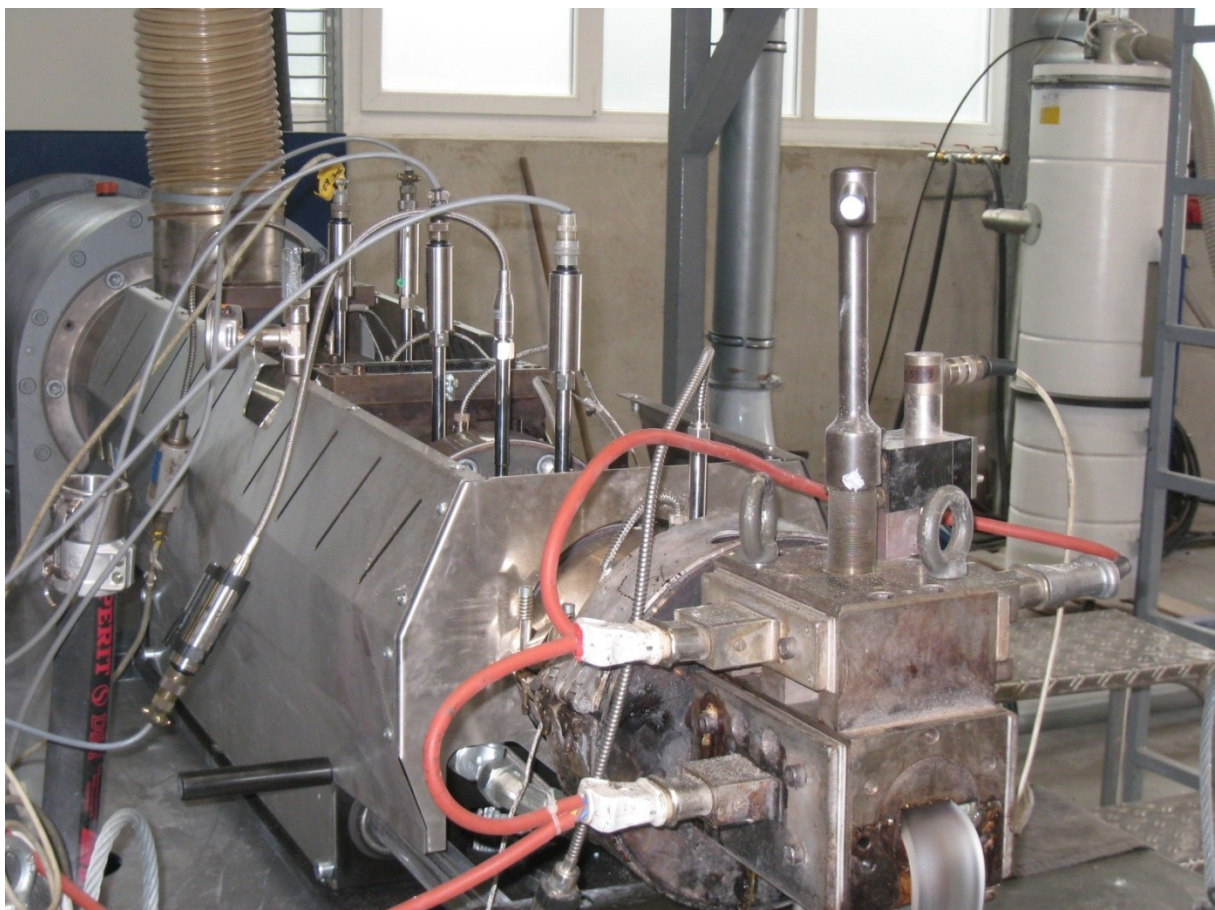


Abbildung 26: Extruder mit Messaufbau [21]

Am Extruder wurden die Temperaturen der 6 Heizzonen, die Drehzahl und der zudosierte Massestrom vorgegeben, die Temperierung der Düse erfolgte über ein separates Regelgerät. Die Temperaturen sind während der Versuche nicht geändert worden und in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Temperaturzonen am NCT 55

Zylinder Zone E1	Heizzone 1	170	°C
Zylinder Zone E2	Heizzone 2	180	°C
Zylinder Zone E3	Heizzone 3	180	°C
Zylinder Zone E4	Heizzone 4	175	°C
Zylinder Zone E5	Adapterheizung	175	°C
Zylinder Zone E6	Heizzone Sieb	200	°C
Düse	externe Düsentemperierung	210	°C

Tabelle 4 zeigt eine Auswahl der Ergebnisse der ersten Messreihen. Die Masse-temperatur bezieht sich dabei auf die Temperatur der Schmelze in der Düse. Die Drücke P5 bis P1 sind die Messwerte der Drucksensoren in Extrusionsrichtung, während P Düse den Druck direkt vor der verstellbaren Düse bezeichnet. Der Messwert P4 stellt den Druck vor der Entgasungszone dar. Dieser Druck muss dem Umgebungsdruck entsprechen, ansonsten würde die Schmelze aus der Entgasungsöffnung austreten. Die Schwankungen zwischen 0 und 1 bar sind auf einen geringen Messfehler zurückzuführen.

Tabelle 4: Ergebnisse der ersten Messreihen

Spalt (mm)	\dot{m}_{dos} (kg/h)	Drehzahl (1/min)	Massetemperatur (°C)	Druck (bar)					
				P5	P4	P3	P2	P1	P Düse
2	200	200	228	3	1	52	76	113	132
3	300	200	216	20	1	46	60	97	110
3	250	200	214	9	1	27	55	88	106
3	200	200	213	3	0	1	35	75	96
4	300	200	204	21	1	15	48	74	93
4	350	200	206	33	1	37	61	82	97
4	250	200	205	10	0	0	34	64	86
4	400	200	207	48	0	45	65	85	98

Die Ermittlung der Schüttdichte erfolgte bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck durch Abwiegen einer Probe des Granulats mit definiertem Volumen. Dabei wurde der Mittelwert aus 5 Messungen herangezogen. Der mittlere Granulatdurchmesser wurde durch Messung mit einer Schublehre an 10 Granulatkörnern gebildet.

6 Berechnungsergebnisse

Für die Berechnung wurden Materialdaten des Polyethylen LD 159AC von ExxonMobil verwendet. Die Materialdaten in Tabelle 5 wurden aus Messungen, welche am Institut für Kunststoffverarbeitung durchgeführt wurden, berechnet. Des Weiteren basieren die Berechnungen auf der Geometrie des NCT 55 der Firma M-A-S.

Tabelle 5: Materialdaten PE-LD 159 AC

$\rho_{S,DIN}$	598 kg/m ³
ρ_S	797 kg/m ³
d_p	3,71 mm
μ_s	0,047 /
μ_z	0,069 /
μ_{ir}	0,13 /
c_F	1,9 J/gK
Δh_A	175 J/g
c_P	2,2 J/gK
β	0,003972 1/°C
$K(T_0)$	11735,71 Pa*s ⁿ
n	0,348278 /
T_0	230 °C
T_{Fl}	110 °C
λ_s	0,25 W/mK
$F_{0,\infty}$	0,74 /
Φ	30 °

Abbildung 27 zeigt den maximalen Durchsatz in Abhängigkeit von der Drehzahl für die drei behandelten Kanalprofile, die entsprechenden Werte sind im Anhang dargestellt. Wie zu erwarten war, steigt der Durchsatz linear mit der Drehzahl. Des Weiteren ist der Einfluss der steigenden Kanalquerschnittsfläche vom Erdmengerprofil über das Schubflankenprofil bis zum Rechteckprofil in einem höheren maximalen Durchsatz ersichtlich. Anzumerken ist, dass dieser Durchsatz dem Grenzdurchsatz der Feststoffförderzone unter idealen Bedingungen entspricht. Einflüsse weiterer Extruderzonen auf den maximalen Durchsatz sind in diesen Werten nicht berücksichtigt. Die bei den Messungen ermittelten Durchsätze liegen um etwa 30% unter den berechneten Werten. Eine Erklärung für diesen Unterschied könnte sein, dass das Berechnungsmodell keine Gegendrücke berücksichtigt.

6. Berechnungsergebnisse

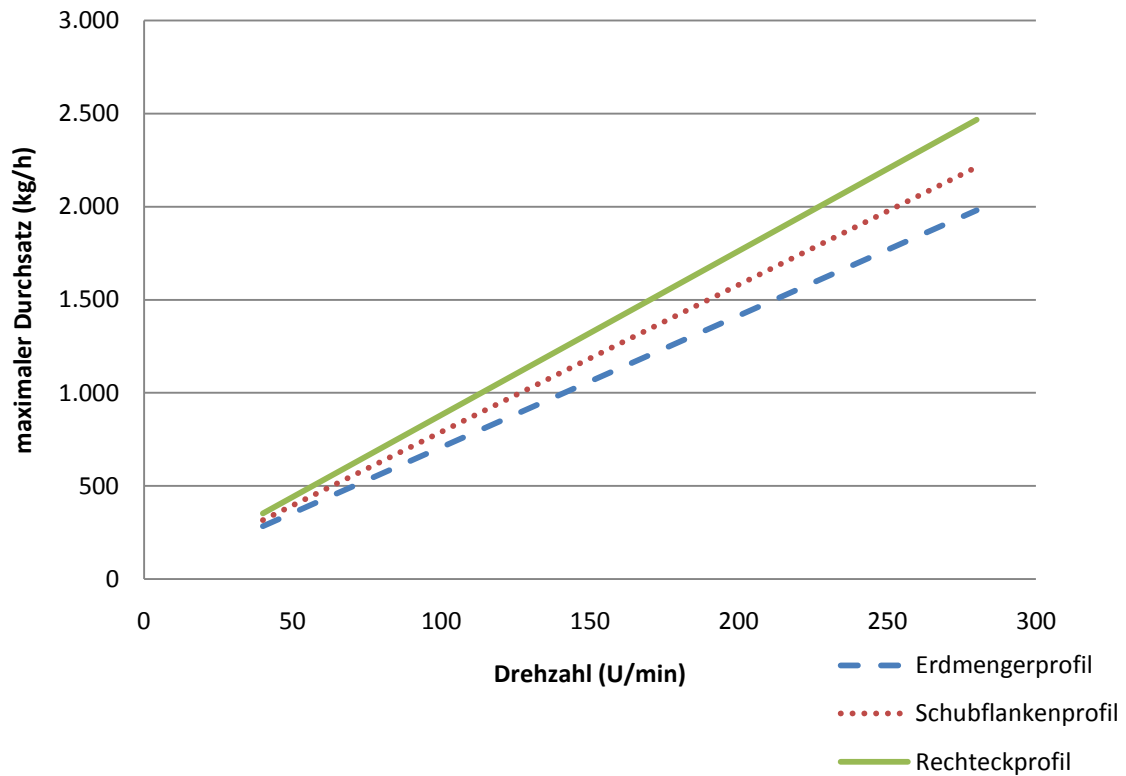


Abbildung 27: zweiter Grenzdurchsatz

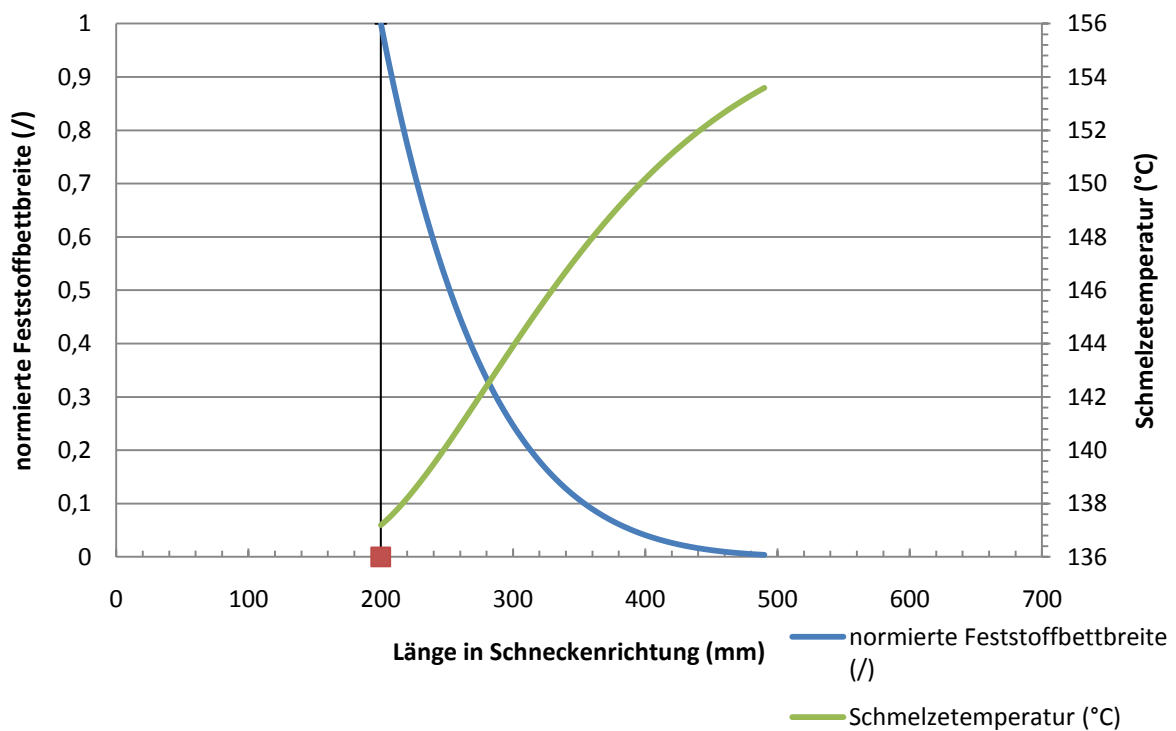


Abbildung 28: Aufschmelzverlauf

In Abbildung 28 ist der berechnete Aufschmelzverlauf bei einer Schneckendrehzahl von 200 U/min, einem Massedurchsatz von 400 kg/h und einer Zylindertemperatur von 150 °C dargestellt. Als Startpunkt der Berechnung wurden 200 mm angenommen. Die normierte Feststoffbettbreite nimmt innerhalb von 290 mm vom Wert 1 (kein Aufschmelzen) auf den Wert 0 (alles aufgeschmolzen) ab. Die durchschnittliche Schmelztemperatur steigt von 137 °C auf 154 °C an.

Abbildung 29 zeigt die Aufschmelzlänge und die Schmelztemperatur in Abhängigkeit vom angenommenen Startpunkt des Aufschmelzens. Aufgrund der sich verengenden, konischen Geometrie des NCT-55 sinkt die Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke in Extrusionsrichtung und somit auch die Schergeschwindigkeit und Dissipation im Schmelzefilm. Aus diesem Grund wirkt sich ein Verschieben des Aufschmelzbeginns nach vorne in einer Erhöhung der Aufschmelzlänge aus. Des Weiteren steigt auch die Temperatur der Schmelze am Ende des Aufschmelzvorgangs an. Die Berechnungen wurden für eine Schneckendrehzahl von 200 U/min und einen Massedurchsatz von 400 kg/h durchgeführt.

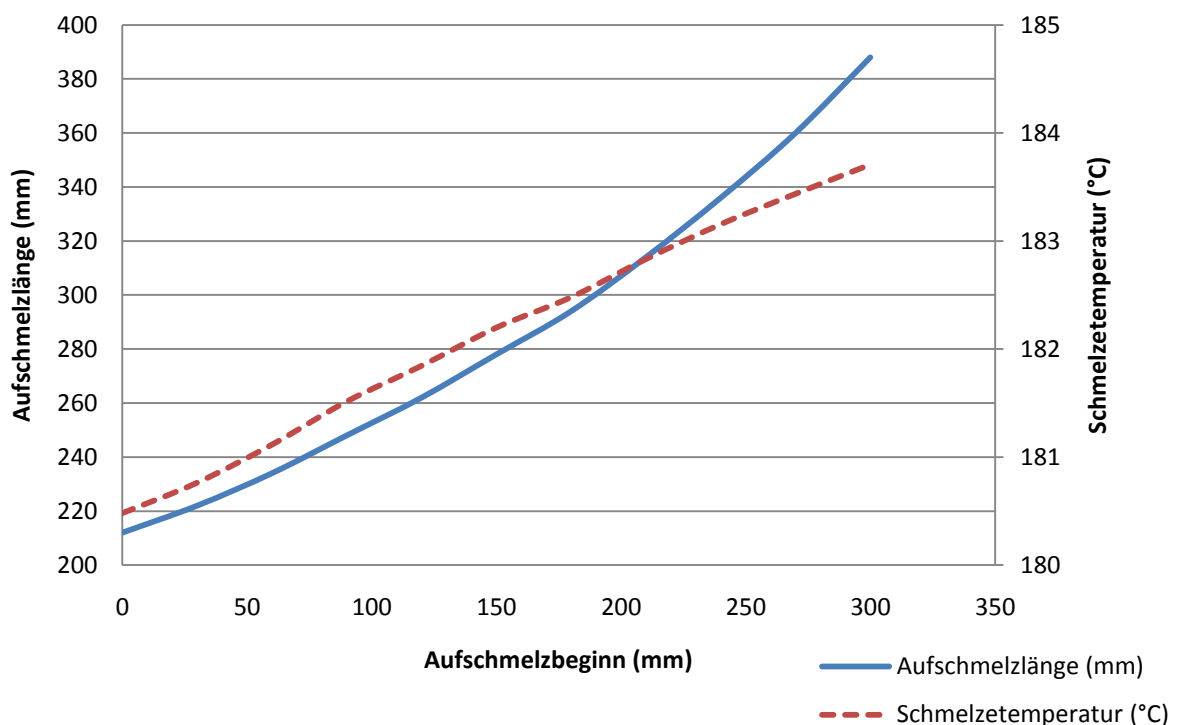


Abbildung 29: Aufschmelzlänge und Schmelztemperatur

In Abbildung 30 ist der Verlauf der Schmelztemperatur während des Aufschmelzens für drei Berechnungsstartpunkte dargestellt, die entsprechenden Werte sind im Anhang zu finden. Zur besseren Darstellung wurden die drei Kurven, parallel zur x-Achse, in einen Startpunkt verschoben. Je größer die Geometrie des Extruders

während des Aufschmelzens ist, desto stärker steigt die Schmelztemperatur an. Bei kleinen Geometrien steigt die Temperatur zwar nicht so stark an, jedoch steigt sie, aufgrund der größeren Aufschmelzlängen, weiter an. Ein Verschieben des Aufschmelzpunkts nach vorne hat somit eine erhöhte Schmelztemperatur zur Folge. Die Berechnungen wurden für eine Schneckendrehzahl von 200 U/min und einen Massedurchsatz von 400 kg/h durchgeführt.

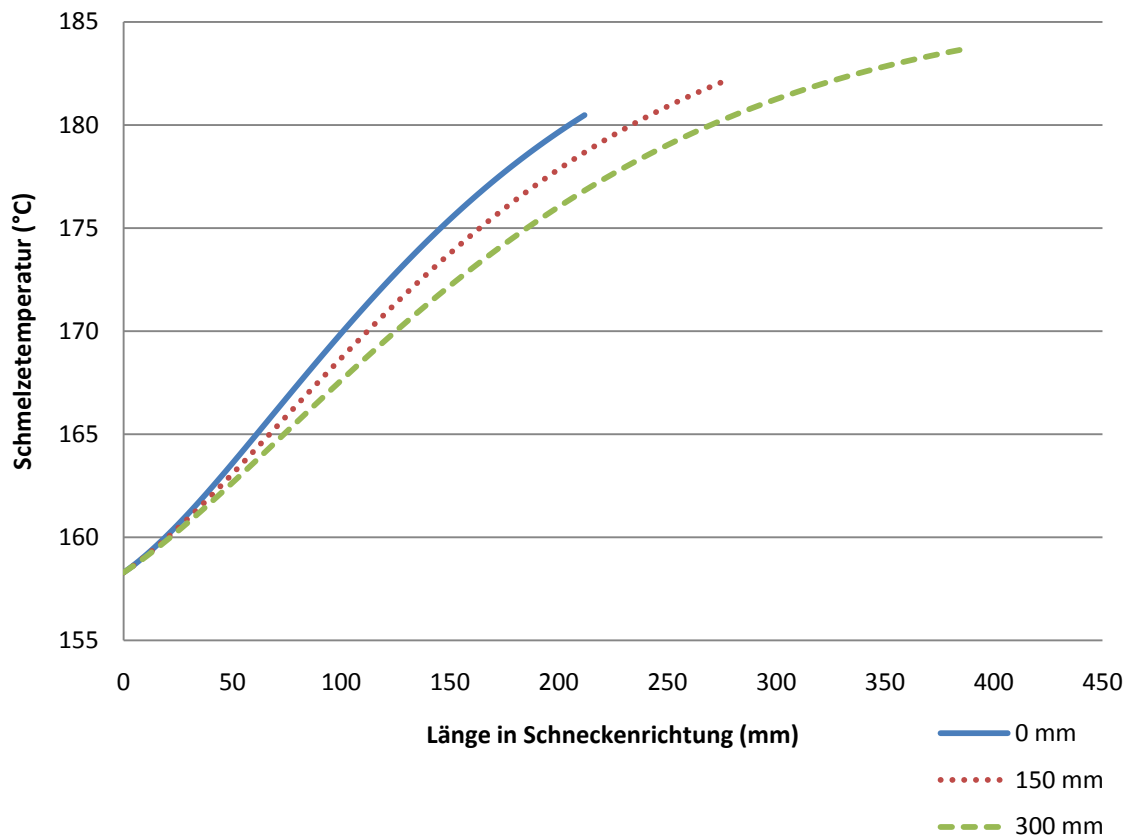


Abbildung 30: Schmelztemperaturverlauf für drei Startpunkte

In Abbildung 31 ist die Aufschmelzlänge in Abhängigkeit von der Zylindertemperatur für vier verschiedene Drehzahl/Durchsatz-Paare mit einem Drosselkoeffizienten von jeweils 0,6369 dargestellt; die Werte sind im Anhang dargestellt. Auffällig ist, dass bei höheren Drehzahlen die Aufschmelzlänge mit der Zylindertemperatur steigt. Die Erhöhung der Zylindertemperatur hat eine Erhöhung der Temperatur im Schmelzefilm zur Folge, was sich in einer Senkung der dissipierten Energie auswirkt. Bei geringen Drehzahlen ist der Beitrag der Schererwärmung nicht in dem Maße am Aufschmelzvorgang beteiligt, sodass die Aufschmelzlänge sinkt. Dies zeigt sich auch im Betrag der Brinkmann-Zahl. In Tabelle 6 sind die Brinkmann-Zahlen für vier Drehzahl/Durchsatz-Paare bei einer Zylindertemperatur von 140 °C und 190 °C dargestellt.

Tabelle 6: Brinkman-Zahlen für verschiedene Durchsatz/Drehzahl-Paare

	Brinkmann-Zahl	
	$T_z=140\text{ °C}$	$T_z=190\text{ °C}$
200 U/min 500 kg/h	11,22	3,311
100 U/min 250 kg/h	4,154	1,232
50 U/min 125 kg/h	1,549	0,463
25 U/min 62,5 kg/h	0,583	0,177

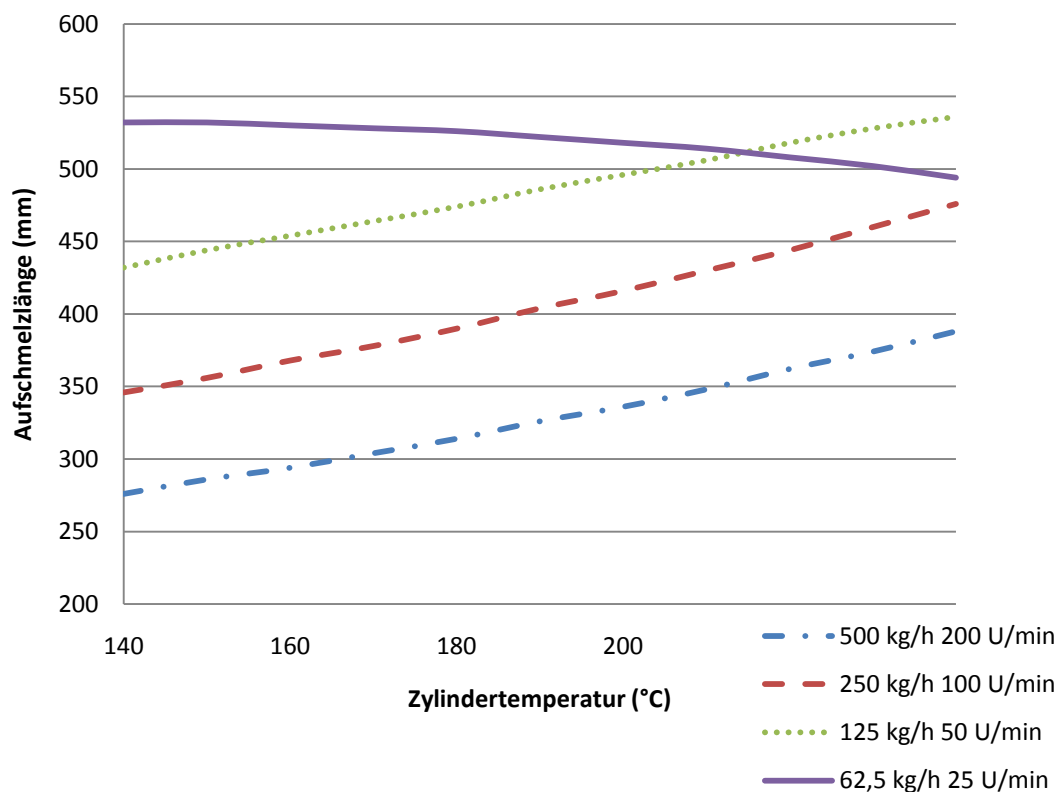


Abbildung 31: Aufschmelzlänge in Abhängigkeit von der Zylindertemperatur

Die vorhandenen Messergebnisse lassen keinen direkten Vergleich mit den Berechnungsergebnissen zu, da die berechneten Größen nicht gemessen werden können.

Die Messung der Feststoffbettbreite, beziehungsweise der daraus resultierenden Aufschmelzlänge, ist nur unter erheblichem Aufwand möglich. Eine gängige Methode zur Bestimmung der Feststoffbettbreite ist das Abstellen des Extruders während des

Betriebs und das Ausbauen der Schnecken, wenn der Kunststoff im Extruder unter die Fließtemperatur abgekühlt ist.

Die Messung des Schmelzetemperaturverlaufs in der Aufschmelzzone stellt keine so triviale Aufgabe dar, wie es auf den ersten Blick den Anschein hat. Es müssen in den Zylinder eingebracht werden. Um nicht beschädigt zu werden, dürfen die Temperatursensoren nicht aus der Zylinderwand ragen. Des Weiteren müssen die Sensoren eine sehr geringe Ansprechzeit aufweisen. Aus diesen Gründen kommen als Temperatursensoren fast nur Infrarot-Sensoren in Frage. Um diese sinnvoll einsetzen zu können, muss das Transmissionsspektrum der Kunststoff-schmelze bekannt sein und Strahlungsreflexionen und in diesem Fall die Strahlung der Schnecke berücksichtigt werden. Aufgrund der Schneckendrehung erhält man einen Temperaturwert, der zwischen der Feststoffbetttemperatur, der Schnecken-temperatur, der Schmelzetemperatur und einer Mischung dieser Temperaturen periodisch schwankt.

Aufgrund des großen messtechnischen Aufwands wurde auf eine vergleichende Messung der berechneten Daten verzichtet. Die Berechnungen mit Versuchsdaten zeigen aber, dass der berechnete Aufschmelzvorgang vor dem Erreichen der Entgasungsöffnung abgeschlossen ist, was sich mit den Beobachtungen während der Versuche deckt.

7 Zusammenfassung

Die Entwicklungen am Kunststoffsektor verlangen nach einem vermehrten Einsatz von Rezyklat aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen. Die Firma M-A-S bietet mit ihrem neuen NCT-Extruder eine Verarbeitungsmaschine an, die durch ihren Aufbau viele Vorteile bietet. Einerseits wird durch ihre großen Geometrien am Anfang der Schnecke die Verarbeitung von Materialien mit ungünstiger Form oder geringer Schüttdichte ermöglicht. Andererseits ergeben sich durch die sich verengende Geometrie im Bereich der Austragszone weitere Vorteile wie ein Verbesserter Druckaufbau oder geringere Scherung des Materials.

Die vorliegende Arbeit stellt einen weiteren Schritt innerhalb des FFG Bridge Projektes „Auslegung eines kämmend konisch gleichlaufenden Doppelschneckenextruders“ dar. Das Interesse liegt vor allem bei der verfahrenstechnischen Beschreibung des neuen, konischen Extruderkonzepts. Nur mit einer vollständigen mathematischen Beschreibung der Vorgänge im Extruder ist es möglich, Geometrieparameter gezielt zu verändern. In dieser Arbeit erfolgte die Betrachtung der physikalischen Vorgänge in der Feststoffförderzone und der Aufschmelzzone durch Anwendung des Rinnen-Modells. Der konischen Geometrie wurde durch die elementweise Berechnung in axialer Richtung Rechnung getragen.

Bei der Ermittlung der maximalen Durchsätze der Feststoffförderzone wurde von einer Verdrehhemmung aufgrund der Kräfte im Eingriffsbereich ausgegangen. Die Schüttdichte des Materials wurde korrigiert, um die geometrischen Verhältnissen im Extruder zu berücksichtigen. Des Weiteren wurde die maximale Feststoffbettbreite in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser und der Kanalgeometrie ermittelt. Der maximale Durchsatz ergibt sich aus der Berechnung der Rückstaulänge in der linken Schnecke und dem freien Volumen der rechten Schnecke und des Eingriffsbereichs. Die Berechnungen wurden für das Erdmenger-Profil, das Schubflankenprofil und das doppelte Schubflankenprofil durchgeführt. Wie die Berechnungen zeigen ist die maximale Förderleistung beim doppelten Schubflankenprofil um 24% größer als beim Erdmengerprofil und um 11% größer als beim einfachen Schubflankenprofil. Die berechneten Durchsätze lassen sich aus zwei Gründen nicht mit den bei Messungen ermittelten maximalen Durchsätzen vergleichen. Zum Ersten haben die Reibwerte einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis. Da die Reibwerte für die vorliegende Materialpaarung nicht bekannt sind, wurde auf Werte anderer Projekte zurückgegriffen. Zum Zweiten ergibt sich das Problem, dass bei Messungen am Extruder

der Gegendruck durch die Aufschmelzzone einen Einfluss auf den maximal förderbaren Durchsatz ausübt.

Die Berechnung der Aufschmelzlänge beruht auf einem modifizierten Tadmor-Modell, welches eine ortsabhängige Schmelzeschichtdicke voraussetzt. Durch geeignete Lösungsansätze ist es möglich, die beschreibende Differentialgleichung zu lösen. Die Schmelzeviskosität wurde mittels Potenzgesetz und eines Exponentialansatzes für die Temperaturverschiebung berücksichtigt. Je weiter vorne, also bei kleineren Durchmessern, der Beginn des Aufschmelzens liegt, desto größer ist die Aufschmelzlänge und die Schmelzetemperatur am Ende des Aufschmelzvorgangs ist höher. Eine Erhöhung der Zylindertemperatur hat eine Erhöhung der Aufschmelzlänge zur Folge, da durch diese die Schmelzeschichtdicke ansteigt, was zu einer geringeren Schergeschwindigkeit führt. Des Weiteren sinkt die Viskosität der Schmelze durch die höhere Schmelzetemperatur im Schmelzefilm. Beide Effekte haben eine geringere Dissipation zur Folge. Wird der Aufschmelzvorgang überwiegend durch dissipierte Energie vorangetrieben, kommt es dadurch zu einer längeren Aufschmelzlänge. Bei geringen Drehzahlen wird, aufgrund der niedrigeren Scherung, der Aufschmelzvorgang nur zu einem geringeren Teil aus der Dissipation gespeist. In diesem Fall überwiegt der Energieeintrag durch Wärmeleitung und eine Erhöhung der Zylindertemperatur hat eine kürzere Aufschmelzlänge zur Folge.

Aus messtechnischen Gründen musste auf einen Vergleich der berechneten Ergebnisse mit realen Versuchen leider verzichtet werden. Beobachtungen während der Versuche zeigen, dass der Aufschmelzvorgang vor der Entgasungszone abgeschlossen ist, was sich mit den Berechnungen deckt.

8 Literatur

- [1] *Ansahl J.:* Grundlagen für die Auslegung dichtkämmender Gleichdrall-Doppelschneckenextruder, Dissertation, Uni-GH Paderborn, 1993
- [2] *Booy M.:* Geometry of fully wiped twin-screw equipment, *Polymer Engineering and Science*, 18(12):973–984, 1978
- [3] *Ephredimis Ch.:* Untersuchungen zum Fördervorgang beim waagrechten Schneckenförderer, *Fördern und Heben*, Heft 9 und 10, 1957
- [4] *Erdmenger R.:* Mixing and Kneating Machine, US Patent 2 670 188, 1954
- [5] *Erdmenger R.:* Means for feeding to machines sticky or crust-forming materials US Patent 2 782 963, 1957
- [6] *Erdmenger R.:* Worm arrangement, US Patent 3 122 356, 1964
- [7] *Erdmenger R.:* Screw Apparatus, US Patent 3 254 367, 1966
- [8] *Häring E.:* Feststoffförderverhalten einer Doppelschneckenpresse, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 1974
- [9] *Hensen F., Knappe W., und Potente H.:* Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik, Band I: Grundlagen, Hanser Verlag, München, 1986
- [10] *Jäcker M.:* The Conical Concept of the Future, *Kunststoffe international*, Vol.90, 22-23, 2000
- [11] *Koch M.:* Berechnung und Auslegung von Nutbuchsenextrudern, Dissertation, Uni-GH Paderborn, 1987
- [12] Kohlgrüber K.: *Co-Rotating Twin-Screw Extruders: Fundamentals, Technology, and applications*, Hanser Verlag, München, 2008
- [13] *Melisch U.:* Grundlagen zur Simulation des Förder- und Plastifizierprozesses dichtkämmender Gleichdrall-Doppelschneckenextruder, Dissertation, Uni-GH Paderborn, 1998
- [14] *N.N.:* NCT-Extruder für die Kunststoffverarbeitung, Firmenschrift M-A-S, <http://www.mas-neuconic.com>
- [15] *Potente H.:* A Physico Mathematical Model for Solids Conveying in Co-rotating Twin Screw Extruders, *International Polymer Processing*, Vol.11, No.1, 29-41, 1996

- [16] *Potente H.:* Rechnergestützte Extruderauslegung, Kunststofftechnisches Seminar an der Universität-GH Paderborn, 1990
- [17] *Schöppner V.:* Simulation der Plastifiziereinheit von Einschneckenextrudern
Dissertation, Uni-GH Paderborn, 1994
- [18] *Schulz H.:* Device for processing material by mixing and/or plasticitation or agglomeration, World patent WO 2007/059547 A1, 2007
- [19] *Schuschnigg S.:* Extrusionsversuche bei M-A-S vom 2.4.2009, interner Untersuchungsbericht, 2009
- [20] *Schuschnigg S.:* Geometrie und Verfahrensbeschreibung von gleichlaufenden Doppelschneckenextrudern, interner Untersuchungsbericht, 2009
- [21] *Schuschnigg S.:* interne Daten, 2011
- [22] *Tadmor Z., Gogos G.:* Principles of polymer processing, Wiley, New York, 1979

9 Verwendete Abkürzungen

Lateinische Symbole

A	Kanalquerschnittsfläche
A	Parameter zur Temperaturberechnung im Schmelzefilm
a	Achsabstand
A_1 - A_4	Teilflächen
A_1 - A_4	Parameter zur Temperaturberechnung
a_F	Seitenlänge der kubisch flächenzentrierten Einheitszelle
A_{fr}	Axialer freier Querschnitt
a_j	Seitenlänge der Einheitszelle
a_P	Seitenlänge der kubisch primitiven Einheitszelle
A_{pr}	Profilfläche
a_R	Seitenlänge der kubisch raumzentrierten Einheitszelle
a_z	Druckübertragungskoeffizient
\bar{A}_{zw}	Mittlere freie Querschnittsfläche im Zwickelbereich
A_{zyl}	Querschnitt der Zylinderbohrung
b	Kanalbreite
\bar{b}	Mittlere wirksame Kanalbreite
b_{Fmax}	Maximale Feststoffbettbreite
b_{max}	Maximale Kanalbreite
B	Parameter zur Temperaturberechnung im Schmelzefilm
Br	Brinkmann-Zahl
c	Steigungskonstante für den Aufschmelzverlauf
$c_{1,2}$	Konstanten zur Lösung der DGL
c_F	Spezifische Wärmekapazität des Feststoffs
c_i	Steigungskonstante für den Aufschmelzverlauf
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck

9. Verwendete Abkürzungen

D_a	Schneckenaußendurchmesser
dF_{Ni}	Normalkraft des Stegrückstaus
dF_{NSch}	Schneckenormalkraft
dF_{NSt}	Stegnormalkraft
dF_{NSt1}	Stegnormalkraft Volumenelement 3
dF_{NZ}	Zylindernormalkraft
dF_{Ri}	Reibung an der Flanke des Stegrückstaus
dF_{RSch}	Reibkraft am Schneckengrund
dF_{RSt}	Stegreibkraft
dF_{RSt1}	Stegreibkraft Volumenelement 2
dF_{RSt2}	Stegreibkraft Volumenelement 3
dF_{RZ}	Zylinderreibkraft
D_i	Schneckeninnendurchmesser
d_p	Mittlerer Partikeldurchmesser
dp	Druckgradient
dz	Differentielle Kanallänge
e_{max}	Maximale Stegbreite
e_{St}	Stegbreite
f	Korrekturfaktor bei der Schüttdichtekorrektur
F_0	Belegungsdichte im Schneckenkanal
$F_{0,\infty}$	Belegungsdichte im unendlichen Gefäß
F_{NSt}	Normalkraft, die auf den Steg wirkt
F_{Ri}	Kraft der inneren Reibung
F_{RSt}	Stegreibkraft
Gz	Graetz-Zahl
h	Kanalhöhe
\bar{h}	Mittlere wirksame Kanalhöhe
h_F	Höhe des Feststoffbetts

9. Verwendete Abkürzungen

h_{F0}	Höhe des Feststoffbetts am Beginn
h_{Fm}	Mittlere Höhe des Feststoffbetts
h_{max}	Maximale Kanalhöhe
Δh	Enthalpiedifferenz
Δh_A	Schmelzenthalpie
i	Gangzahl
k	Anzahl der Kanäle im Rinnenmodell
K	Koeffizient des Potenzfließgesetzes
K_{0T}	Koeffizient Potenzfließgesetzes bei Bezugstemperatur
k_1, k_2	Konstante für den Aufschmelzvorgang
k_x, k_y, k_z	Druckanisotropiekoeffizient
m	Mittlerer Zwickelbereichs-Strömungskoeffizient
\dot{m}	Massestrom
\dot{m}_{Auf}	Aufschmelzender Massestrom
\dot{m}_{Aus}	Austretender Feststoffmassestrom
\dot{m}_{dos}	Zudosierter Massestrom
M_E	Antriebsmoment
\dot{m}_{Ein}	Eintretender Feststoffmassestrom
M_{Emax}	Maximales Antriebsmoment bei $\dot{m} = \dot{m}_{max}$
\dot{m}_{Gr1}	Erster Grenzdurchsatz der Einzugszone
\dot{m}_{max}	Maximal förderbarer Massedurchsatz der Einzugszone
\dot{m}_S	Leckströmung
\dot{m}_{Wirbel}	Massestrom der in den Schmelzewirbel übertritt
\dot{m}_{ZwSt}	Zwangsgeförderter Massestrom im Stegrückstau
n	Fließgesetzexponent
n_0	Schneckendrehzahl
N_A	Partikelanzahl in Einheitszelle, Außenfläche
n_b	Anzahl der Elementarzellen entlang der Kanalbreite

9. Verwendete Abkürzungen

n_h	Anzahl der Elementarzellen entlang der Kanalhöhe
N_K	Partikelanzahl in Einheitszelle, Kante
N_M	Partikelanzahl in Einheitszelle, Mitte
$N_{P,ges}$	Partikelanzahl im Kanalabschnitt
n_z	Anzahl der Elementarzellen entlang der Kanallänge
p	Druck
p_0	Umgebungsdruck
P1-P5	Drücke am Extruder
p_1	Druck hinter der Eingriffszone
p_2	Druck hinter dem Stegrückstau
p_3	Druck vor der Eingriffszone
P Düse	Druck vor der Extrusionsdüse
p_m	Mittlerer Druck
s_R	Radialspaltweite
t	Gangsteigung
T	Temperatur
T_F	Feststofftemperatur
T_{Fl}	Fließtemperatur
\bar{T}_{Start}	Mittlere Starttemperatur
T_Z	Zylindertemperatur
u	Parameter der Änderung der Feststoffbetthöhe
V	Volumenstrom
v_0	Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke
v_{0x}	x-Komponente der Umfangsgeschwindigkeit
v_{0z}	z-Komponente der Umfangsgeschwindigkeit
v_{ax}	Axiale Fördergeschwindigkeit des Feststoffs
v_{Fz}	Feststoffbettgeschwindigkeit
V_{Kanal}	Kanalvolumen

9. Verwendete Abkürzungen

V_P	Partikelvolumen
$V_{P,ges}$	Partikelvolumen im Schneckenkanal
$V_{P,Z}$	Partikelvolumen pro Einheitszelle
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit
V_Z	Volumen der Einheitszelle
V_{zw}	Mittleres Zwickelvolumen
w	Parameter der Änderung des Massestroms
X	Feststoffbettbreite
x	Längenkoordinate über die Breite
$x_{1,2}$	Längen zur Berechnung von b_{Fmax}
x_f	Steigung der Schubflanke
y	Längenkoordinate über die Höhe
y	Normierte Feststoffbettbreite
y_1	Normierte Feststoffbettbreite am Beginn des Elements
z	Längenkoordinate in Kanalrichtung
z_1	z-Koordinate für Volumenelement 2
z_2	z-Koordinate für Volumenelement 3
Z_e	Stegrückstaulänge
Z_K	Abgewickelte Länge zwischen zwei Eingriffsbereichen
Z_r	Rückstaulänge im Eingriffsbereich

Griechische Symbole

α	Winkel zwischen Tangentennormale und y-Achse
β	Temperaturverschiebungsfaktor nach Arrhenius
γ	Umlenkwinkel des Schüttgutes in der Eingriffszone
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
ΔT	Temperaturunterschied zwischen T_Z und T_{FI}
δ	Schmelzeschichtdicke
δ_0	Anfangsschmelzeschichtdicke
δ_s	Spaltweite
$\bar{\delta}$	Mittlere Schmelzeschichtdicke
ζ	Dimensionslose Koordinate in z-Richtung
η	Schmelzeviskosität
Θ	Polarkoordinate
Θ_0	Normierte Anfangstemperatur
Θ_1	Druckübertragungskoeffizient des Stegrückstaus
Θ_2	Druckübertragungskoeffizient im freien Kanal
$\bar{\Theta}_{Start}$	Mittlere normierte Starttemperatur
Λ	Förderwinkel
λ_s	Wärmeleitfähigkeit der Schmelze
μ_i	Reibwert der inneren Reibung
μ_{ir}	Resultierender Reibwert
μ_s	Reibwert der Schneckenoberfläche
μ_z	Reibwert der Zylinderoberfläche
ξ	Dimensionslose Koordinate in y-Richtung
π	$\pi=3,14159265$
π_1	Dimensionslose Kennzahl
ρ_F	Feststoffdichte
ρ_S	Schmelzedichte

9. Verwendete Abkürzungen

$\rho_{S,DIN}$	Nach DIN 53466 ermittelte Schüttdichte
ρ_{SKorr}	Korrigierte Schüttdichte
τ_{yi}	Schubspannung
Φ	Winkel des stationären Scherfließens
φ_s	Gangsteigungswinkel
ϕ	Kammwinkel
ψ	Normierte Schmelzefilmdicke
ψ_s	Normierte Radialspaltweite
Ω	Eingriffswinkel

10 Anhang

Tabelle 7: korrigierte Schüttdichte als Funktion des Partikeldurchmessers bei $h_{\max}=13,65$ mm

d_p (mm)	h_{\max}/d_p (/)	$i=1$ (/)	$i=2$ (/)
0,01	1365,000	1,000	1,000
0,11	124,091	0,999	0,999
0,21	65,000	0,997	0,997
0,31	44,032	0,996	0,996
0,41	33,293	0,994	0,994
0,51	26,765	0,993	0,993
0,61	22,377	0,991	0,991
0,71	19,225	0,989	0,989
0,81	16,852	0,988	0,988
0,91	15,000	0,986	0,986
1,01	13,515	0,985	0,984
1,11	12,297	0,983	0,983
1,21	11,281	0,981	0,981
1,31	10,420	0,980	0,979
1,41	9,681	0,978	0,977
1,51	9,040	0,976	0,976
1,61	8,478	0,975	0,974
1,71	7,982	0,973	0,972
1,81	7,541	0,971	0,970
1,91	7,147	0,969	0,968
2,01	6,791	0,968	0,966
2,11	6,469	0,966	0,965
2,21	6,176	0,964	0,963
2,31	5,909	0,962	0,961
2,41	5,664	0,961	0,959
2,51	5,438	0,959	0,957
2,61	5,230	0,957	0,955
2,71	5,037	0,955	0,953
2,81	4,858	0,954	0,951
2,91	4,691	0,952	0,949
3,01	4,535	0,950	0,947
3,11	4,389	0,948	0,945
3,21	4,252	0,946	0,943
3,31	4,124	0,944	0,941
3,41	4,003	0,942	0,938
3,51	3,889	0,941	0,936
3,61	3,781	0,939	0,934
3,71	3,679	0,937	0,932
3,81	3,583	0,935	0,930
3,91	3,491	0,933	0,928
4,01	3,404	0,931	0,925

4,11	3,321	0,929	0,923
4,21	3,242	0,927	0,921
4,31	3,167	0,925	0,919
4,41	3,095	0,923	0,916
4,51	3,027	0,921	0,914
4,61	2,961	0,919	0,912
4,71	2,898	0,917	0,909
4,81	2,838	0,915	0,907
4,91	2,780	0,913	0,905
5,01	2,725	0,911	0,902
5,11	2,671	0,909	0,900
5,21	2,620	0,907	0,897
5,31	2,571	0,905	0,895
5,41	2,523	0,903	0,893
5,51	2,477	0,901	0,890
5,61	2,433	0,899	0,888
5,71	2,391	0,897	0,885
5,81	2,349	0,895	0,883
5,91	2,310	0,893	0,880
6,01	2,271	0,891	0,877
6,11	2,234	0,888	0,875
6,21	2,198	0,886	0,872
6,31	2,163	0,884	0,870
6,41	2,129	0,882	0,867
6,51	2,097	0,880	0,864
6,61	2,065	0,878	0,862
6,71	2,034	0,876	0,859
6,81	2,004	0,873	0,856
6,91	1,975	0,871	0,854
7,01	1,947	0,869	0,851
7,11	1,920	0,867	0,848
7,21	1,893	0,865	0,845
7,31	1,867	0,863	0,843
7,41	1,842	0,860	0,840
7,51	1,818	0,858	0,837
7,61	1,794	0,856	0,834
7,71	1,770	0,854	0,831
7,81	1,748	0,851	0,829
7,91	1,726	0,849	0,826
8,01	1,704	0,847	0,823
8,11	1,683	0,845	0,820
8,21	1,663	0,842	0,817
8,31	1,643	0,840	0,814
8,41	1,623	0,838	0,811
8,51	1,604	0,836	0,808
8,61	1,585	0,833	0,805
8,71	1,567	0,831	0,802
8,81	1,549	0,829	0,799
8,91	1,532	0,826	0,796
9,01	1,515	0,824	0,793

9,11	1,498	0,822	0,790
9,21	1,482	0,819	0,787
9,31	1,466	0,817	0,784
9,41	1,451	0,815	0,781
9,51	1,435	0,812	0,778
9,61	1,420	0,810	0,775
9,71	1,406	0,808	0,772
9,81	1,391	0,805	0,769
9,91	1,377	0,803	0,766
10,01	1,364	0,801	0,763
10,11	1,350	0,798	0,759
10,21	1,337	0,796	0,756
10,31	1,324	0,794	0,753
10,41	1,311	0,791	0,750
10,51	1,299	0,789	0,747
10,61	1,287	0,786	0,744
10,71	1,275	0,784	0,741
10,81	1,263	0,782	0,737
10,91	1,251	0,779	0,734
11,01	1,240	0,777	0,731
11,11	1,229	0,774	0,728
11,21	1,218	0,772	0,724
11,31	1,207	0,770	0,721
11,41	1,196	0,767	0,718
11,51	1,186	0,765	0,715
11,61	1,176	0,762	0,712
11,71	1,166	0,760	0,708
11,81	1,156	0,758	0,705
11,91	1,146	0,755	0,702
12,01	1,137	0,753	0,699
12,11	1,127	0,750	0,695
12,21	1,118	0,748	0,692
12,31	1,109	0,745	0,689
12,41	1,100	0,743	0,685
12,51	1,091	0,741	0,682
12,61	1,082	0,738	0,679
12,71	1,074	0,736	0,676
12,81	1,066	0,733	0,672
12,91	1,057	0,731	0,669
13,01	1,049	0,728	0,666
13,11	1,041	0,726	0,663
13,21	1,033	0,724	0,659
13,31	1,026	0,721	0,656
13,41	1,018	0,719	0,653
13,51	1,010	0,716	0,649
13,61	1,003	0,714	0,646

Tabelle 8: Werte der Durchsatzberechnung

Drehzahl (U/min)	Maximaler Durchsatz (kg/h)		
	Erdmenger- Profil	Schubflanken- Profil	Rechteck- Profil
40	283	316	353
60	424	474	529
80	566	632	705
100	707	790	881
120	849	948	1.058
140	990	1.106	1.234
160	1.132	1.264	1.410
180	1.273	1.422	1.586
200	1.415	1.581	1.763
220	1.556	1.739	1.939
240	1.698	1.897	2.115
260	1.839	2.055	2.291
280	1.981	2.213	2.468

Tabelle 9: Schmelztemperatur in Abhängigkeit vom Startpunkt

	0mm	150mm	300mm
0	158,29	158,29	158,29
2	158,44	158,44	158,44
4	158,60	158,59	158,58
6	158,77	158,75	158,73
8	158,94	158,91	158,88
10	159,12	159,08	159,04
12	159,30	159,25	159,20
14	159,49	159,42	159,37
16	159,69	159,60	159,53
18	159,89	159,79	159,70
20	160,09	159,97	159,87
22	160,30	160,16	160,04
24	160,52	160,36	160,22
26	160,74	160,55	160,40
28	160,96	160,75	160,58
30	161,18	160,95	160,76
32	161,41	161,16	160,94
34	161,64	161,36	161,12
36	161,88	161,57	161,31
38	162,12	161,78	161,50
40	162,36	161,99	161,69

42	162,60	162,21	161,88
44	162,84	162,42	162,07
46	163,09	162,64	162,26
48	163,34	162,86	162,45
50	163,59	163,08	162,65
52	163,84	163,30	162,84
54	164,09	163,52	163,04
56	164,34	163,75	163,24
58	164,60	163,97	163,43
60	164,85	164,20	163,63
62	165,11	164,42	163,83
64	165,36	164,65	164,03
66	165,62	164,87	164,23
68	165,87	165,10	164,43
70	166,13	165,33	164,63
72	166,38	165,55	164,83
74	166,64	165,78	165,03
76	166,89	166,01	165,23
78	167,15	166,23	165,43
80	167,40	166,46	165,63
82	167,65	166,69	165,83
84	167,91	166,91	166,03
86	168,16	167,14	166,23
88	168,41	167,36	166,43
90	168,66	167,58	166,62
92	168,91	167,81	166,82
94	169,15	168,03	167,02
96	169,40	168,25	167,22
98	169,64	168,47	167,41
100	169,89	168,69	167,61
102	170,13	168,91	167,80
104	170,37	169,12	168,00
106	170,61	169,34	168,19
108	170,85	169,55	168,38
110	171,08	169,77	168,57
112	171,32	169,98	168,77
114	171,55	170,19	168,96
116	171,78	170,40	169,14
118	172,01	170,61	169,33
120	172,24	170,82	169,52
122	172,47	171,03	169,71
124	172,69	171,23	169,89
126	172,91	171,44	170,08
128	173,13	171,64	170,26
130	173,35	171,84	170,44

132	173,57	172,04	170,62
134	173,78	172,24	170,80
136	173,99	172,43	170,98
138	174,20	172,63	171,16
140	174,41	172,82	171,33
142	174,62	173,01	171,51
144	174,82	173,20	171,68
146	175,02	173,39	171,85
148	175,22	173,58	172,03
150	175,42	173,77	172,20
152	175,61	173,95	172,37
154	175,81	174,13	172,53
156	176,00	174,31	172,70
158	176,19	174,49	172,86
160	176,37	174,67	173,03
162	176,56	174,84	173,19
164	176,74	175,02	173,35
166	176,92	175,19	173,51
168	177,10	175,36	173,67
170	177,27	175,53	173,83
172	177,45	175,69	173,98
174	177,62	175,86	174,14
176	177,79	176,02	174,29
178	177,96	176,18	174,44
180	178,12	176,34	174,60
182	178,28	176,50	174,74
184	178,44	176,66	174,89
186	178,60	176,81	175,04
188	178,76	176,97	175,18
190	178,91	177,12	175,33
192	179,07	177,27	175,47
194	179,22	177,42	175,61
196	179,37	177,56	175,75
198	179,51	177,71	175,89
200	179,66	177,85	176,03
202	179,80	177,99	176,16
204	179,94	178,13	176,30
206	180,08	178,27	176,43
208	180,21	178,40	176,56
210	180,35	178,54	176,69
212	180,48	178,67	176,82
214	Ende	178,80	176,95
216		178,93	177,08
218		179,06	177,20
220		179,19	177,32

222		179,31	177,45
224		179,43	177,57
226		179,55	177,69
228		179,67	177,81
230		179,79	177,92
232		179,91	178,04
234		180,02	178,15
236		180,14	178,27
238		180,25	178,38
240		180,36	178,49
242		180,47	178,60
244		180,58	178,71
246		180,68	178,81
248		180,79	178,92
250		180,89	179,02
252		181,00	179,12
254		181,10	179,23
256		181,19	179,33
258		181,29	179,43
260		181,39	179,52
262		181,48	179,62
264		181,58	179,72
266		181,67	179,81
268		181,76	179,91
270		181,85	180,00
272		181,94	180,09
274		182,03	180,18
276		182,11	180,27
278		182,20	180,36
280		Ende	180,44
282			180,53
284			180,61
286			180,69
288			180,78
290			180,86
292			180,94
294			181,02
296			181,09
298			181,17
300			181,25
302			181,32
304			181,40
306			181,47
308			181,54
310			181,61

312			181,68
314			181,75
316			181,82
318			181,89
320			181,95
322			182,02
324			182,08
326			182,14
328			182,21
330			182,27
332			182,33
334			182,39
336			182,45
338			182,51
340			182,56
342			182,62
344			182,68
346			182,73
348			182,78
350			182,84
352			182,89
354			182,94
356			182,99
358			183,04
360			183,09
362			183,14
364			183,19
366			183,23
368			183,28
370			183,33
372			183,37
374			183,42
376			183,46
378			183,50
380			183,54
382			183,59
384			183,63
386			183,67
388			183,71

Tabelle 10: Aufschmelzlänge in Abhängigkeit von der Zylindertemperatur

T _{Zyl} (°C)	Aufschmelzlänge (mm)			
	500 kg/h 200 U/min	250 kg/h 100 U/min	125 kg/h 50 U/min	62,5 kg/h 25 U/min
140	276	346	432	532
150	286	356	444	532
160	294	368	454	530
170	304	378	464	528
180	314	390	474	526
190	326	404	486	522
200	336	416	496	518
210	348	430	506	514
220	362	444	518	508
230	374	460	528	502
240	388	476	536	494

Tabelle 11: Werte der Aufschmelzberechnung aus Abbildung 28

Länge (mm)	normierte Feststoffbettbreite	Feststoffbettbreite (mm)	Schmelzetemperatur (°C)
200	1,000	24,488	137,188
202	0,975	23,876	137,271
204	0,950	23,278	137,360
206	0,926	22,692	137,453
208	0,903	22,119	137,551
210	0,880	21,558	137,652
212	0,857	21,010	137,757
214	0,836	20,474	137,864
216	0,814	19,949	137,975
218	0,793	19,436	138,088
220	0,773	18,935	138,204
222	0,752	18,444	138,323
224	0,733	17,965	138,444
226	0,714	17,496	138,567
228	0,695	17,038	138,693
230	0,677	16,589	138,820
232	0,659	16,152	138,949
234	0,641	15,724	139,081
236	0,624	15,305	139,214
238	0,607	14,897	139,348
240	0,591	14,497	139,484
242	0,575	14,107	139,622

244	0,559	13,726	139,761
246	0,544	13,354	139,902
248	0,529	12,990	140,044
250	0,515	12,635	140,187
252	0,501	12,288	140,330
254	0,487	11,949	140,475
256	0,473	11,618	140,621
258	0,460	11,295	140,768
260	0,447	10,980	140,915
262	0,435	10,672	141,063
264	0,422	10,372	141,211
266	0,410	10,079	141,360
268	0,399	9,792	141,510
270	0,387	9,513	141,659
272	0,376	9,241	141,809
274	0,365	8,975	141,959
276	0,355	8,716	142,109
278	0,344	8,463	142,259
280	0,334	8,216	142,409
282	0,324	7,976	142,559
284	0,315	7,741	142,709
286	0,306	7,513	142,859
288	0,296	7,290	143,008
290	0,288	7,073	143,157
292	0,279	6,861	143,306
294	0,271	6,654	143,455
296	0,262	6,453	143,603
298	0,254	6,257	143,751
300	0,247	6,066	143,898
302	0,239	5,880	144,045
304	0,232	5,699	144,192
306	0,224	5,523	144,337
308	0,217	5,351	144,483
310	0,211	5,183	144,627
312	0,204	5,021	144,771
314	0,197	4,862	144,914
316	0,191	4,708	145,057
318	0,185	4,557	145,199
320	0,179	4,411	145,340
322	0,173	4,269	145,480
324	0,168	4,131	145,620
326	0,162	3,996	145,758
328	0,157	3,865	145,896
330	0,152	3,738	146,033
332	0,147	3,614	146,169

334	0,142	3,494	146,304
336	0,137	3,377	146,439
338	0,132	3,264	146,572
340	0,128	3,153	146,704
342	0,124	3,046	146,836
344	0,119	2,942	146,966
346	0,115	2,840	147,096
348	0,111	2,742	147,224
350	0,107	2,647	147,351
352	0,104	2,554	147,478
354	0,100	2,464	147,603
356	0,096	2,377	147,727
358	0,093	2,292	147,851
360	0,090	2,210	147,973
362	0,086	2,130	148,094
364	0,083	2,053	148,214
366	0,080	1,978	148,333
368	0,077	1,905	148,451
370	0,074	1,835	148,567
372	0,072	1,766	148,683
374	0,069	1,700	148,797
376	0,066	1,636	148,911
378	0,064	1,574	149,023
380	0,061	1,514	149,134
382	0,059	1,456	149,244
384	0,057	1,399	149,353
386	0,054	1,345	149,460
388	0,052	1,292	149,567
390	0,050	1,241	149,672
392	0,048	1,192	149,776
394	0,046	1,144	149,880
396	0,044	1,098	149,982
398	0,043	1,053	150,083
400	0,041	1,010	150,182
402	0,039	0,968	150,281
404	0,038	0,928	150,379
406	0,036	0,889	150,475
408	0,034	0,852	150,570
410	0,033	0,815	150,664
412	0,032	0,781	150,757
414	0,030	0,747	150,849
416	0,029	0,714	150,940
418	0,028	0,683	151,030
420	0,026	0,653	151,119
422	0,025	0,624	151,206

424	0,024	0,596	151,293
426	0,023	0,569	151,378
428	0,022	0,543	151,463
430	0,021	0,518	151,546
432	0,020	0,494	151,628
434	0,019	0,470	151,709
436	0,018	0,448	151,789
438	0,017	0,427	151,869
440	0,016	0,406	151,947
442	0,016	0,386	152,024
444	0,015	0,367	152,100
446	0,014	0,349	152,175
448	0,013	0,332	152,249
450	0,013	0,315	152,322
452	0,012	0,299	152,394
454	0,011	0,284	152,465
456	0,011	0,269	152,535
458	0,010	0,255	152,604
460	0,010	0,241	152,673
462	0,009	0,228	152,740
464	0,009	0,216	152,806
466	0,008	0,204	152,872
468	0,008	0,193	152,936
470	0,007	0,182	153,000
472	0,007	0,172	153,062
474	0,007	0,162	153,124
476	0,006	0,152	153,185
478	0,006	0,143	153,245
480	0,005	0,135	153,304
482	0,005	0,127	153,363
484	0,005	0,119	153,420
486	0,005	0,112	153,477
488	0,004	0,105	153,533
490	0,004	0,098	153,588