

Stefan Rakitsch

Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer

Lehrstuhl für
Fördertechnik Materialfluss Logistik
der Technischen Universität München

Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer

Stefan Peter Rakitsch

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Friedrich Krause (i. R.),
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Die Dissertation wurde am 24. September 2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 30. November 2012 angenommen.

Stefan Rakitsch

**Dimensionierung und Auslegung
stark geneigter Schneckenförderer**

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner
Technische Universität München

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich:

Dissertation. München: Technische Universität München, 2012

ISBN: 978-3-941702-32-5

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Copyright © Stefan Rakitsch 2012.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Layout und Satz: Stefan Rakitsch

Printed in Germany 2012

*... daß doch am Ende jedes Buch nur
für Teilnehmer,
für Freunde,
für Liebhaber
des Verfassers geschrieben sei.*

Johann Wolfgang von Goethe

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München und basiert auf meiner Arbeit am Projekt „Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Hochleistungs-Schneckenförderer für Schüttgut“. Für die finanzielle Förderung dieses Forschungsvorhabens möchte ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft bedanken.

Mein Dank gilt besonders Herrn Prof. Dr. Willibald A. Günthner, der mir an seinem Lehrstuhl nicht nur die Promotion sondern auch eine abwechslungsreiche und interessante Arbeit, mit vielen, auch internationalen, Projekten und Konferenzen, ermöglichte. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Friedrich Krause für die Übernahme des Koreferats und dem Interesse an meiner Arbeit sowie Herrn Prof. Dr. Karsten Stahl für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Auch gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für die jederzeit angenehme und freundschaftliche Atmosphäre. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Stephan Kessler, der mir den Weg an den Lehrstuhl bereitet hat, sowie meine (teils ehemaligen) Kollegen aus der Arbeitsgruppe „Schüttgut“ Herrn Dr. Niels Bloemeyer, Herrn Dr. Christoph Tilke, Frau Zuzana Čirková und Herrn Gabriel Fischer. Nicht zuletzt danke ich auch allen Angestellten des Lehrstuhls, die mir bei allen kleineren und größeren Problemen stets hilfreich zur Seite standen, insbesondere Herrn Tobias Hemmauer und der gesamten Werkstatt.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern, Marlene und Peter Rakitsch, für die Unterstützung und Förderung während meines ganzen bisherigen Lebenswegs. Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Heidi für die liebevolle Unterstützung und Zuneigung seit wir uns kennen.

Danke!

Garching b. München im Dezember 2012

Stefan Rakitsch

Kurzzusammenfassung

Schneckenförderer gehören zu den am längsten bekannten Stetigförderern für Schüttgut und sind seit mehr als 50 Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Dennoch bestand wegen erweiterter Möglichkeiten bei Konstruktion und Betrieb sowie geänderter Rahmenbedingungen beim Einsatz auch in den letzten Jahren weiterhin Forschungsbedarf. Die Forschungsvorhaben waren und sind in Forderungen nach einfachen und sicheren Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren begründet. Nachdem solche Verfahren für horizontale bis leicht geneigte und vertikale Schneckenförderer in den letzten Jahren bereits erarbeitet wurden, kann mit den Ergebnissen dieser Arbeit nun die noch bestehende Lücke bei den stark geneigten Schneckenförderern geschlossen werden.

Da eine analytische Beschreibung aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren auf einfache Art und Weise nicht möglich ist, werden im Rahmen dieser Arbeit semiempirische Verfahren zur Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer entwickelt. Grundlage sind dabei auf Normen basierende und in der Fachwelt anerkannte analytische Grundansätze, die jeweils um einen empirischen Parameter erweitert werden. Die zur Bestimmung der empirischen Parameter nötigen Datensätze werden mit drei verschiedenen Methoden erhoben. Neben der Berechnung durch numerische Verfahren, die in Vorgängerprojekten erarbeitet wurden, und Simulationen nach der Diskrete Elemente Methode, werden experimentelle Untersuchungen an einer Großversuchsanlage durchgeführt. Die gewonnenen Datensätze werden anschließend mit statistischen Methoden auf die Einflüsse der einzelnen Parameter hin deskriptiv untersucht. Aufbauend darauf werden Modelle für die Regressionsrechnungen gebildet, deren Ergebnis einfache und sichere Formeln zur Vorhersage der empirischen Parameter sind. Zusammen mit dem analytischen Grundansatz können damit der mögliche Volumenstrom und die dazu nötige Antriebsleistung berechnet werden.

Abstract

Screw conveyors are amongst the longest-established continuous conveyor systems for bulk material. They have been the subject of scientific study for over 50 years. Nevertheless in the last few years there has once more been a need for research into the subject of screw conveyors as a result of wider options in design and operation as well as changed general conditions of use. The research intentions were and are justified by demands for simple and secure sizing and dimensioning procedures. Such procedures for horizontal to slightly inclined and vertical screw conveyors having already been developed in recent years, the remaining gap regarding steeply inclined screw conveyors can now be filled with the results of this work.

Since it is not possible to give a simple analytical description because of the numerous influencing factors, semi-empirical procedures for the sizing and dimensioning of steeply inclined screw conveyors are developed in the course of this work. Here the basis is analytical principles based on standards and recognised by specialists which are each expanded by an empirical parameter. The data records required to determine the empirical parameters are gathered by three different methods. In addition to calculation by numerical procedures that were developed in previous projects and simulations using the Discrete Elements Method, experimental studies are being conducted at a large-scale test facility. The data records gained will then be studied in a descriptive fashion by statistical methods in terms of the impact of the individual parameters. Based on this, models are being built for the regression calculations, the result of which are simple and secure formulas for predicting the empirical parameters. Together with the fundamental analytical approach, this will allow the possible volume flow and the drive power required for it to be calculated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufbau und Anwendung von Schneckenförderern	2
1.2	Problemstellung und Motivation	7
1.3	Zielsetzung	8
1.4	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	10
2	Stand der Forschung für Schneckenförderer	13
3	Grundlagen zur Entwicklung der Berechnungsverfahren	29
3.1	Grundlagen zu Schüttgütern	29
3.2	Funktionsprinzip von Schneckenförderern	44
3.3	Grundlegende Ansätze für Berechnungsverfahren	49
3.4	Analytisches Modell eines Einzelkörpers im geneigten Schneckenförderer	50
3.5	Analytisches Modell von Schüttgut im stark geneigten Schneckenförderer	55
3.6	Semi-analytische Berechnungsansätze für Schneckenförderer	65
3.7	Semi-empirische Berechnungsansätze für Schneckenförderer	68
4	Berechnungsmodelle zur Dimensionierung und Auslegung	73
4.1	Beschreibung der betrachteten Einflussgrößen	73
4.2	Berechnung des erzielbaren Volumenstroms	75
4.3	Berechnung des erforderlichen Leistungsbedarfs	78
5	Vorgehen und Durchführung der Datenermittlung	83
5.1	Experimentelle Untersuchungen	83
5.1.1	Beschreibung von Fördertechnik und Materialfluss	85
5.1.2	Messdatenerfassung	87
5.1.3	Analyse der untersuchten Schüttgüter	91
5.1.4	Aufbereitung der aufgezeichneten Messdaten	92
5.1.5	Versuchsprogramm	94
5.1.6	Beschreibung der Versuchsdurchführung	96
5.2	Simulationen nach der Diskrete Elemente Methode	97
5.2.1	Die Diskrete Elemente Methode	97

5.2.2	Modellierung und Kalibrierung des Schüttguts	101
5.2.3	Modellierung des Schneckenförderers	105
5.2.4	Aufbereitung der Simulationsergebnisse	108
5.2.5	Simulierte Parameter und Ablauf der Simulationen	109
5.2.6	Validierung des Simulationsmodells	112
5.3	Analytisches Berechnungsmodell	114
5.3.1	Beschreibung des Berechnungsmodells	115
5.3.2	Aufbereitung der Berechnungsergebnisse	118
5.3.3	Berechnete Datensätze	119
6	Entwicklung der Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren	121
6.1	Vorgehen zur Entwicklung der empirischen Beiwerte	121
6.2	Geschwindigkeitsbeiwert	123
6.2.1	Analyse der ermittelten Daten des Geschwindigkeitsbeiwerts	123
6.2.2	Entwicklung des Berechnungsverfahrens für den Geschwindigkeitsbeiwert	125
6.2.3	Modellgüte des Berechnungsverfahrens für den Geschwindigkeitsbeiwert	129
6.3	Leistungsbeiwert	132
6.3.1	Analyse der ermittelten Daten des Leistungsbeiwerts	132
6.3.2	Entwicklung des Berechnungsverfahrens für den Leistungsbeiwert	135
6.3.3	Modellgüte des Berechnungsverfahrens für den Leistungsbeiwert	138
6.4	Berechnungsverfahren für stark geneigte Schneckenförderer	141
7	Anwendung des Dimensionierungs- und Auslegungsverfahrens	143
7.1	Manuelle Berechnung	143
7.2	Rechnergestützte Berechnung – „ScrewTech“	150
8	Zusammenfassung	153
	Literaturverzeichnis	157
	Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten	171
	Abbildungsverzeichnis	173
	Tabellenverzeichnis	177

Verwendete Formelzeichen

Folgende Formelzeichen und Indizes finden in der vorliegenden Arbeit Anwendung. Alle Formeln und Gleichungen sind für die hier angegebenen Einheiten gültig.

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	[m ²]	Fläche
a	[m/s ²]	Beschleunigung
B	[-]	Anzahl vorliegender Beobachtungen
C	[m]	Integrationskonstante
D	[m]	Schneckendurchmesser
D_{Part}	[m]	Partikeldurchmesser
d	[m]	Schneckenwellendurchmesser
e	[m]	Erzeugende Strecke der Schneckenwendel
F_{Hub}	[N]	Hubwiderstand
F_{N}	[N]	Normalkraft
F_{Reib}	[N]	Fiktiver Gesamtreibungswiderstand
F_{S}	[N]	Scherkraft
F_{Z}	[N]	Zentrifugalkraft
G	[N]	Gewichtskraft
g	[m/s ²]	Fallbeschleunigung
H	[m]	Förderhöhe
I_m	[kg/s]	Massenstrom
I_V	[m ³ /s]	Volumenstrom
I_{Wirk}	[A]	Wirkstromaufnahme des Antriebsmotors
J	[-]	Anzahl Sektorelemente
K	[-]	Spannungsverhältnis

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
K_0	[-]	Kritisches Hauptspannungsverhältnis
$k(r)$	[m]	Kontur der Schüttgutoberfläche
L	[m]	Förderlänge
L_R	[-]	Reduktionsfaktor
M	[Nm]	Drehmoment an der Schneckenwelle
\sqrt{MQF}	[-]	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
m	[kg]	Masse
m'	[kg/m]	Streckenlast
N	[N]	Normalkraft
\bar{N}	[N]	Reduzierte Normalkraft
n	[1/s]	Schneckendrehzahl
n_{krit}	[1/s]	Kritische Schneckendrehzahl
$P_{A, \text{el}}$	[W]	Elektrisch aufgenommene Leistung des Antriebsmotors
$P_{A, \text{mech}}$	[W]	Mechanisch abgegebene Leistung des Antriebsmotors
P_F	[W]	Leistungsbedarf zur Förderung
P_{Hub}	[W]	Hubleistung
P_{Leer}	[W]	Leerlaufleistung des Antriebsmotors
P_{Reib}	[W]	Fiktiver Gesamtreibleistungsbedarf
R	[N]	Reibkraft
\bar{R}	[N]	Reduzierte Reibkraft
r	[m]	Radius, Radialkoordinate
r_x	[m]	Trennradius
S	[m]	Schneckenganghöhe
s	[m]	Dicke der Schneckenwendel
t	[s]	Zeit
U_{eff}	[V]	Effektive Spannung
V	[m ³]	Volumen
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v_{ax}	[m/s]	Axiale Fördergeschwindigkeit
v_G	[m/s]	Absolute Gutgeschwindigkeit

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
v_{rel}	[m/s]	Relative Geschwindigkeit
W'	[W]	Dissipierte Energierate
W'_C	[W]	Dissipierte Energierate aus Coulombscher Reibung
W'_{St}	[W]	Dissipierte Energierate aus Partikelstößen
X	[-]	Allgemeine Variable
x	[m]	Abszissenkoordinate
y	[m]	Ordinatenkoordinate
Z	[N/m ³]	Verteilfaktor der Wandschubspannung
z	[m]	Axialkoordinate, Applikatenkoordinate

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
α	[°]	Steigungswinkel der Schneckenwendel
β	[°]	Schneckenneigung
β_{krit}	[°]	Kritische Schneckenneigung
β_{Part}	[-]	Stoßfaktor bei Partikelstößen
γ	[°]	Wirkrichtungswinkel
Δ	[%]	Relative Abweichung
δ	[°]	Neigungswinkel einer Schnittebene / Bruchebene
ζ	[-]	Geschwindigkeitsbeiwert
η	[-]	Gesamtwirkungsgrad des Antriebs
Θ	var.	Regressionskoeffizient für den Leistungsbeiwert
ϑ	[rad]	Azimutwinkel, Azimutkoordinate
θ	var.	Regressionskoeffizient
κ	[1/s]	Gradient der Schergeschwindigkeit
λ	[-]	Leistungsbeiwert
λ_{DIN}	[-]	Verschiebewiderstandsbeiwert nach <i>DIN 15262</i>
λ_n	[-]	Geschwindigkeitsbeiwert für Leistungsbedarf

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
λ_S	[-]	Schüttgutbeiwert
λ_β	[-]	Neigungsbeiwert
μ	[-]	Reibwert
μ_F	[-]	Äußerer Reibwert gegen Schneckenwendel und Rohr
μ_S	[-]	Innerer Reibwert des Schüttguts
μ^*	[-]	Fiktiver Reibwert
Ξ	var.	Regressionskoeffizient für den Geschwindigkeitsbeiwert
ρ	[kg/m ³]	Schüttdichte
ρ_{Part}	[kg/m ³]	Partikeldichte
σ	[N/m ²]	Normalspannung
σ_M	[N/m ²]	Mittelpunkt Mohrscher Spannungskreis (Abszissenwert)
σ_{Rad}	[N/m ²]	Radius des Mohrschen Spannungskreises
σ_W	[N/m ²]	Wandnormalspannung
$\sigma_{1, 2, 3}$	[N/m ²]	Hauptspannung
σ_δ	[N/m ²]	Normalspannung einer um den Winkel δ geneigten Ebene
τ	[N/m ²]	Schubspannung
τ_M	[N/m ²]	Mittelpunkt Mohrscher Spannungskreis (Ordinatenwert)
τ_W	[N/m ²]	Wandschubspannung
τ_δ	[N/m ²]	Schubspannung einer um den Winkel δ geneigten Ebene
Φ	[-]	Beiwert für die Füllungsgradberechnung
φ	[-]	Füllungsgrad
φ_F	[-]	Äußerer Reibungswinkel gg. Schneckenwendel und Rohr
φ_S	[-]	Innerer Reibungswinkel des Schüttguts
ϕ	[-]	Förderfaktor
ψ	[°]	Förderwinkel
ω	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit
ω_S	[1/s]	Schneckenwinkelgeschwindigkeit
ω_G	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit des Förderguts

Zusätzliche Indizes

Alle genannten Formelzeichen können zusätzlich mit einem oder mehreren der hier aufgeführten Indizes versehen sein.

Index	Bedeutung
a	außen, am Förderrohr
akt	aktiver Grenzzustand
alt	Wert zu Beginn des Iterationsschritts
b	binormale Komponente im t,n,b -Koordinatensystem
exp	Experimentell bestimmte Werte
h	horizontal, horizontale Komponente
i	innen, an der Schneckenwelle
j	Laufindex der Sektorelemente
k	Allgemeiner Zählindex
m	am Schwerpunkt
max	Maximalwert
n	normale Komponente im t,n,b -Koordinatensystem
neu	Wert am Ende des Iterationsschritts
o	oben
pas	passiver Grenzzustand
R	am Förderrohr
r	radiale Komponente im r,ϑ,z -Koordinatensystem
sim	Durch Simulation bestimmte Werte
Start	Startwert der Iteration
t	tangentiale Komponente im t,n,b -Koordinatensystem
u	unten
v	vertikal, vertikale Komponente
W	an der Schneckenwendel
z	axiale Komponente im r,ϑ,z -Koordinatensystem
I, II, III, IV	Füllungskonfiguration I, II, III, IV in der Schneckenkammer

Verwendete Formelzeichen

Index	Bedeutung
β	Wert für Schneckenneigung β
ϑ	azimutale Komponente im r, ϑ, z -Koordinatensystem
*	Empirisch ermittelter Wert

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CAD	Computer-Aided Design
DEM	Diskrete Elemente Methode
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DMS	Dehnungsmessstreifen
FEM	Finite Elemente Methode
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
KOS	Koordinatensystem
LOESS	Lokal gewichtete Regression

1 Einleitung

Im Zuge der weltweiten Wirtschafts- und Finanzkrise brach im Jahr 2009 der Wert aller in der Europäischen Union hergestellten Produkte gegenüber dem Vorjahr, nach zuvor kontinuierlichem Wachstum, stark ein. Auch im Bereich der Hebezeuge und Fördermittel sank der Wert der produzierten Güter gegenüber dem Höchststand im Jahr 2008 um ca. 30 % auf heute noch 33 Mrd. EUR. Davon entfallen 15 % auf Stetigförderer [Eur-2012]. Wie der Übersicht in Abbildung 1-1 entnommen werden kann, ist dieser Anteil, entgegen dem Trend der früheren Jahre, seit der Krise sogar ansteigend. Stetigförderer stellen damit auch in der heutigen modernen Welt einen nicht unbeträchtlichen Teil der produzierten Güter in der Europäischen Union dar.

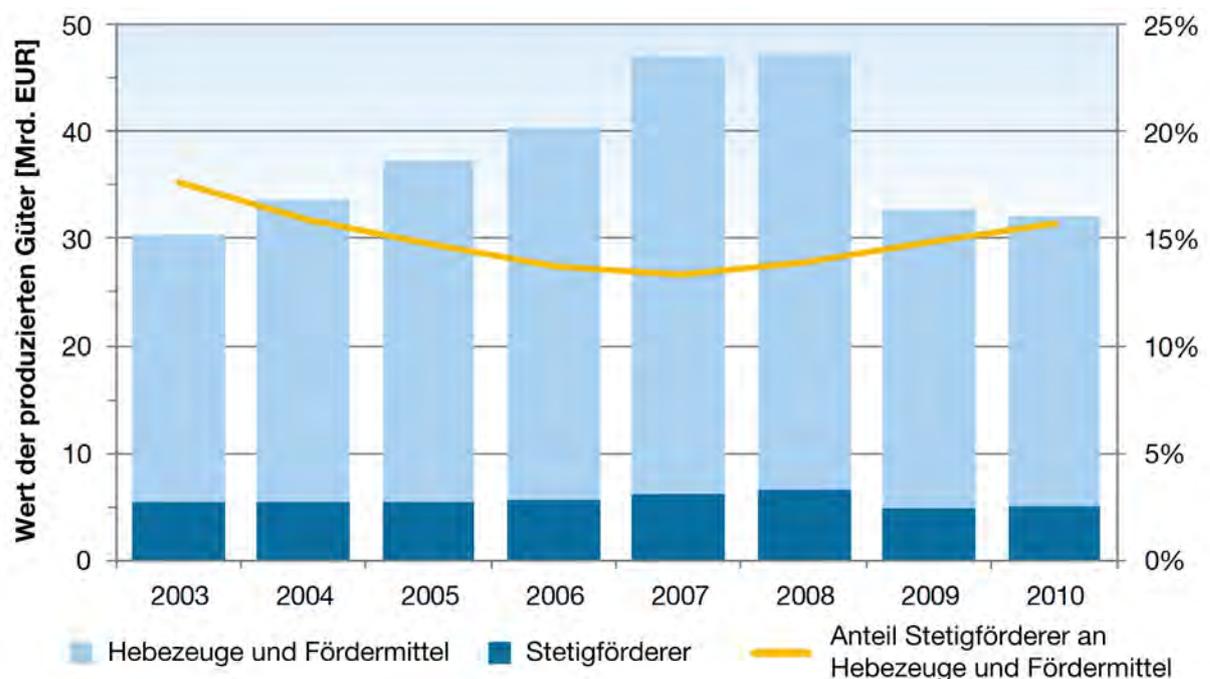


Abbildung 1-1: Wert aller in der Europäischen Union produzierten Hebezeuge und Fördermittel sowie der produzierten Stetigförderer und deren Anteil daran [Eur-2012]

Gemäß *DIN 15201* sind zur stetigen Förderung von Schüttgut verschiedenste Fördermittel und Transportkonzepte im Einsatz, die sowohl auf mechanischen als auch pneumatischen oder hydraulischen Förderprinzipien beruhen. Das Fördergut wird unabhängig vom gewählten Förderprinzip stets auf einem festen Förderweg von der Aufgabestelle zur Abgabestelle transportiert und dabei stetig, mit wechselnder Geschwindigkeit oder im Takt bewegt [DIN 15201-1].

1.1 Aufbau und Anwendung von Schneckenförderern

Eine klassische Ausprägung mechanischer Stetigförderer für Schüttgut stellen die Schneckenförderer dar. Diese bestehen im Wesentlichen aus einem geschlossenen, ruhenden Rohr oder halbrundförmigen Trog als Tragorgan und einer rotierenden Förderschnecke, die das einzige bewegliche Bauteil darstellt, als Schuborgan [DIN 15201-1]. Weitere elementare Baugruppen eines Schneckenförderers sind die Gutaufgabe- und Gutabgabestellen, die Antriebseinheit und bei Bedarf Zwischenlager. Der damit sehr einfache Aufbau eines Schneckenförderers ist schematisch in Abbildung 1-2 dargestellt.

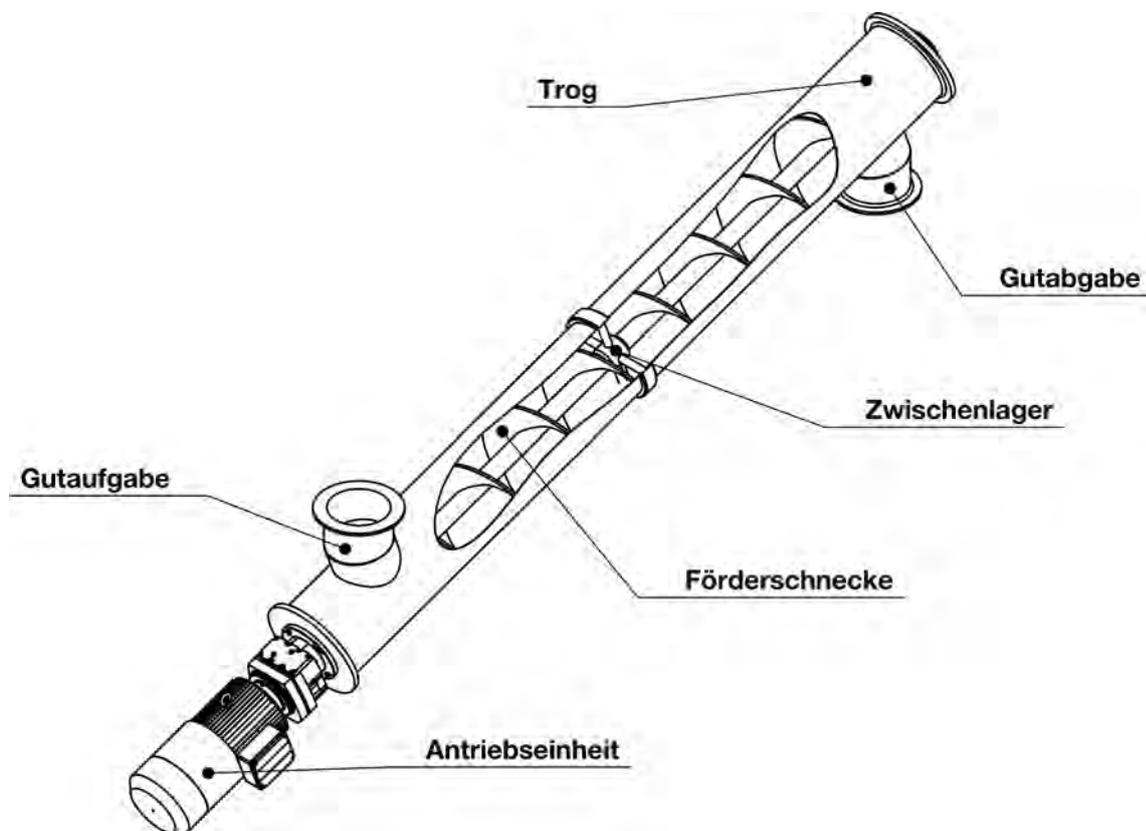


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung eines Schneckenförderers für Schüttgut

Die Förderschnecke ist üblicherweise als Welle mit darauf befestigter durchgehender Schneckenwendel – entweder aus endlos gewalztem Bandstahl oder aus ausgeschnittenen und gezogenen Blechronden – gestaltet. Als Abwandlung dieser meist genutzten Standardausführung kann die Förderschnecke auch mit Doppelwendel, konischer Wendel oder Wendel mit veränderlicher Schneckenganghöhe ausgeführt sein. Sonderformen sind die Paddelschnecke, bei der die Wendel durch einzelne Paddel ersetzt wird, die Bandschnecke, bei der die Schneckenwendel als

mit Stegen an der Welle befestigtem Band ausgeführt ist, und der Wendelförderer, bei dem die Welle fehlt [VDI 2330]. Der Wendelförderer ist auch in biegsamer Ausführung bekannt [Kun-1983, Sch-1989a]. Eine weitere Sonderbauform stellt der Schneckenrohrförderer dar. Bei diesem ist die Wendel am Förderrohr befestigt, das nun rotiert.

Die Förderschnecke rotiert in der Regel in einem Rohr. Fördertröge mit halbrundem Boden und steilen bis senkrechten Seitenwänden, abgeschlossen mit Deckblechen, finden nur im Fall von horizontalen oder leicht geneigten Schneckenförderern Anwendung [Sta-1994]. Entlang der Förderstrecke sind mehrere Gutauf- bzw. Gutabgabestellen möglich. Als Werkstoff für Förderschnecke und Förderrohr wird meist Stahl verwendet. Ebenso finden für spezielle Anwendungen auch andere metallische Werkstoffe oder Kunststoffe Verwendung. Zur Erhöhung der Standzeit ist eine Beschichtung mit verschleißmindernden Materialien möglich [Vol-2000].

Ist die Förderstrecke nicht länger als ca. 5 m kann sie komplett außerhalb des Förderbereichs gelagert werden. Neben hoher Betriebssicherheit und Wartungsfreundlichkeit führt dies zu einer einfachen Bauweise des Schneckenförderers [Sta-1994]. Bei längeren Förderstrecken muss ein Zwischenlager die Förderschnecke radial abstützen, um die zulässige Durchbiegung nicht zu überschreiten. Es muss verhindert werden, dass das nötige Spiel zwischen der Schneckenwendel und dem Förderrohr unterschritten wird. Andernfalls treten, bedingt durch eingeklemmtes Fördergut, eine erhöhte Beschädigung am Fördergut sowie ein höherer Leistungsbedarf auf. Berührt die Schneckenwendel gar das Förderrohr, tritt erheblicher Verschleiß auf [Gre-1994]. Nachteilig beim Einsatz eines Zwischenlagers ist die notwendige Unterbrechung der Schneckenwendel im Bereich des Zwischenlagers, wodurch der Förderprozess gestört wird. Da das Lager vom Fördergut umströmt wird, müssen zudem hohe Anforderungen an die Dichtigkeit des Zwischenlagers gestellt werden [Sta-1994]. Einerseits muss aus hygienischen Gründen eine Kontamination des Schüttguts durch Schmierstoffe vermieden werden, andererseits gewährleistet eine ausreichende Schmierung ohne Verunreinigung eine hohe Lebensdauer des Lagers.

Der Antrieb eines Schneckenförderers erfolgt heute meist durch Getriebemotoren, die über eine Sicherheitskupplung an die Förderschnecke angeflanscht sind. Gerade in Zeiten, in denen vermehrt Wert auf einen energieeffizienten Betrieb von Maschinen geachtet wird, setzen sich vermehrt Frequenzumrichter-gesteuerte Antriebe

durch, bei denen genau so viel Leistung bereit gestellt wird, wie gerade notwendig ist. Bei der Dimensionierung des Antriebs ist darauf zu achten, dass der Antrieb für alle bestimmungsgemäßen Betriebszustände ausgelegt sein muss. Beispielsweise erfordert das Wiederanfahren eines gefüllten Schneckenförderers einen deutlich höheren Leistungsbedarf als der stationäre Betriebszustand [VDI 2330].

Der Schneckenförderer kann grundsätzlich für Förderaufgaben beliebiger Neigung verwendet werden. Aufgrund unterschiedlicher Betriebsweisen, die im weiteren Verlauf der Arbeit noch genauer beschrieben werden, unterscheidet man horizontal bis leicht geneigte und stark geneigte bis vertikale Schneckenförderer. Der Grenzwinkel der Schneckenneigung gegenüber der Horizontalen liegt bei ca. 20°. Der vertikale Schneckenförderer wird als Sonderfall des stark geneigten Bereichs oft separat betrachtet [Vol-2000].

Kriterien bei der Wahl für oder gegen einen Förderer sind neben der grundsätzlichen Eignung für die Förderaufgabe auch wirtschaftliche Überlegungen, Anforderungen des Arbeitsschutzes und in zunehmenden Maß des Umweltschutzes [Gab-1981]. Der Aufbau bringt Schneckenförderern diesbezüglich einige vorteilhafte Eigenschaften. So führt die einfache und robuste Konstruktion mit der Förderschnecke als einzigem bewegtem Bauteil zu einer geringen Störanfälligkeit und damit neben niedrigen Investitionskosten auch zu einem geringen Wartungsaufwand [Ron-2004a]. Da Schneckenförderer im Gegensatz zu beispielsweise Becherwerken, Band- oder Kettenförderern kein endloses Zugmittel aufweisen, das entlang der gesamten Förderstrecke umläuft, beanspruchen sie nur sehr wenig Bauraum [Sta-1994] und weisen folglich ein geringes Gewicht auf. Auf Grund ihrer Bauweise sind Schneckenförderer zudem voll gekapselt und erlauben daher eine nahezu staubfreie und umweltfreundliche Förderung bei gleichzeitiger hoher Unfallsicherheit. Diese Vorteile führen trotz des relativ hohen spezifischen Leistungsbedarfs im Vergleich zu anderen Stetigförderern in der Gesamtbetrachtung oftmals zu einer besseren Wirtschaftlichkeit und damit zum häufigen Einsatz von Schneckenförderern [Fot-2002].

Prinzipiell eignen sich Schneckenförderer zur Förderung von staubförmigen und feinkörnigen bis stückigen Fördergütern. Obwohl auch die Förderung von schweren, stark schleißenden Fördergütern möglich ist, liegt der Haupteinsatzzweck bei gut fließenden Schüttgütern [DIN 15262], die nur wenig Verschleiß verursachen. Gemäß der in der Norm *DIN ISO 3435* [DIN ISO 3435] eingeführten Klassifikation bezüglich

des Fließverhaltens sind daher Schüttgüter der Klassen 1 bis 3 für den Transport in Schneckenförderer besonders geeignet. Müssen grobstückige, langfasrige, klebrige oder stark anbackende Schüttgüter transportiert werden, eignet sich die Sonderbauform Wendelförderer besser [Bru-1998]. Für Fördergüter die empfindlich gegen Kornbruch sind, ist der Schneckenförderer wenig geeignet.

Für den erzielbaren Volumenstrom und damit der Menge geförderten Guts gibt es heute nur wenige Beschränkungen. Abhängig von der Baugröße und den Betriebsbedingungen können sowohl kleinste als auch sehr große Mengen gefördert werden [Fot-2002]. Dies spiegelt sich auch in den Einsatzbereichen für Schneckenförderer wider. Während er heute hauptsächlich zur Förderung von Schüttgut Anwendung findet, wurde er ursprünglich zum Heben von Wasser eingesetzt. Als Schneckenrohrförderer ausgeführt und nach seinem Erfinder als *Archimedische Wasserschraube* bezeichnet, wurde er schon im 1. Jahrhundert vor Christus beschrieben [Vit-1511]. Eine grafische Darstellung aus dem 16. Jahrhundert zeigt Abbildung 1-3. Das Prinzip des Hebens von Wasser mittels Schneckenförderern findet noch heute in Kläranlagen, zum Heben von Schmutzwasser und Schlamm [Lei-1999a], oder im Nahen Osten zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen Anwendung.

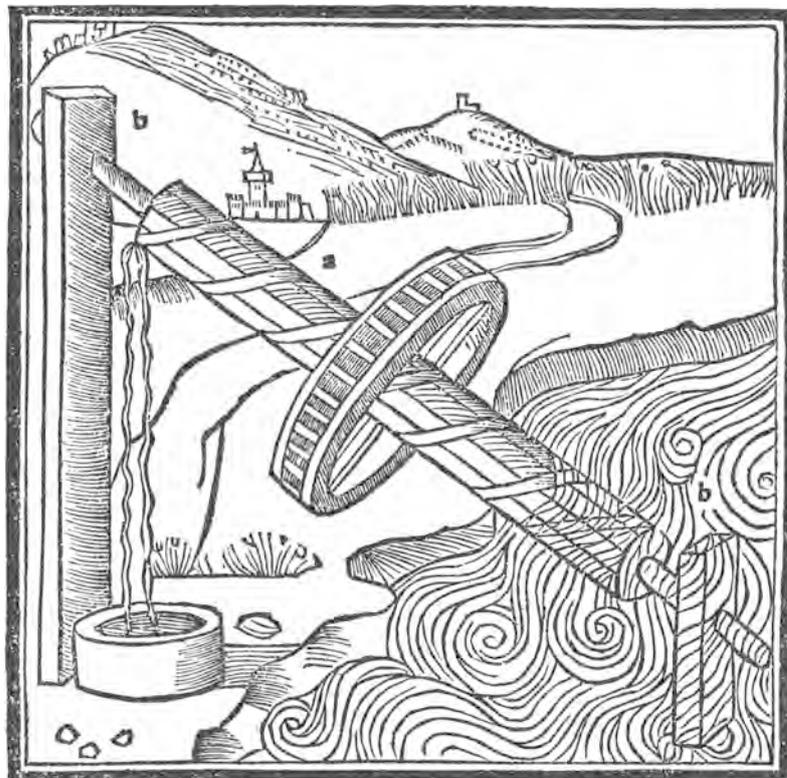


Abbildung 1-3: Archimedische Wasserschraube nach Beschreibung des Vitruvius [Vit-1511]

Die heutigen Einsatzbereiche für Schneckenförderer für Schüttgut liegen in vielen Branchen, wie der verfahrenstechnischen, chemischen, agrarrohstoffverarbeitenden oder Nahrungsmittelindustrie [Lei-1999a]. Dort werden sie sowohl für innerbetrieblichen Transport als auch für Umschlagaufgaben eingesetzt. Gerade die Entladung von seegängigen Massengutfrachtern oder Binnenschiffen ist in den letzten Jahren zu einem Haupteinsatzzweck von Schneckenförderern, die vertikal oder stark geneigt betrieben werden, geworden und auch reichhaltig dokumentiert [Bah-1981, Hin-1986, Dod-2009, Til-2010, Ven-2010]. Heute realisierte Anlagen erreichen dabei für Kohle Massenströme von über 2.500 t/h und Förderhöhen bzw. Auslegerlängen von über 30 m [Car-2010]. Ein Beispiel für einen Schiffsentlader bei der Entladung von Sojabohnen im Hafen von Amsterdam ist in Abbildung 1-4 dargestellt.



Abbildung 1-4: Schiffsentlader mit Schneckenförderern beim Massengutumschlag

Weitere Anwendungen für Schneckenförderer liegen im innerbetrieblichen Transport, wie beispielsweise in der Befüllung von Silos oder deren Austrag mit direktem Weitertransport in einen Sammelbehälter [Sch-2003b]. Neben der eigentlichen Förderaufgabe kann der Schneckenförderer auch noch weitere verfahrenstechnische Aufgaben übernehmen. So kann durch den Einsatz von doppelwandigen Fördertrögen oder Schneckenwendeln mit Kanälen für Kühl- oder Heizmedien der Transport im Schneckenförderer zum Kühlen oder Heizen des Förderguts genutzt werden. Weiter kann durch den Einsatz der oben bereits erwähnten Paddelschnecken das Förder-

gut durchmischt werden [Vol-2000]. Auch eine Aufteilung des Förderguts ist durch die Nutzung mehrerer Gutabgabestellen mit steuerbaren Schiebern möglich. Langsam laufende, waagrechte Schneckenförderer mit 100 % Füllung können zum exakten Dosieren auch niedrigster Massenströme eingesetzt werden [Fot-2002].

1.2 Problemstellung und Motivation

Stark geneigte Schneckenförderer für Schüttgut sind, wie beschrieben, bereits seit Langem unverzichtbare Fördergeräte der Intralogistik. Sie werden unter anderem zum innerbetrieblichen Transport, der Entleerung von Silos oder der Entladung von Hochsee- und Binnenschiffen eingesetzt. Dennoch existieren für sie keine einfachen Berechnungsvorschriften, die in Form von Normen oder Richtlinien für Anwender in der Praxis zugänglich sind. Vielmehr stützen sich die Hersteller bei der Projektierung auf ihr oft langjähriges Erfahrungswissen. Für geneigte Schneckenförderer mit bekannten Anforderungen bezüglich Baugröße, Betriebsbedingungen und Fördergut ist so eine sichere Dimensionierung und Auslegung möglich [Blo-2008]. Sollen aber Anlagen in bisher unbekanntem Größenordnungen projektiert werden, stößt diese Vorgehensweise an ihre Grenzen. Die richtige konstruktive Gestaltung, die Festlegung der Betriebsparameter sowie die Vorhersage des erzielbaren Volumenstroms und des benötigten Leistungsbedarfs sind von großen Unsicherheiten begleitet, die auch zu ausbleibenden Innovationen am Fördergerät führen [Sta-1994]. Da durch den Druck des Wettbewerbs dennoch viele Anlagen gefragt sind, die in immer kleinerer und leichter Bauweise möglichst hohe Volumenströme fördern sollen, setzen viele Hersteller zur Gewährleistung des sicheren Betriebs und der Erfüllung der Förderaufgabe auf eine Überdimensionierung [Fot-2002]. Dies ist aber heute nicht mehr zeitgemäß und wird vom Markt auch zunehmend nicht mehr toleriert, da durch den großen Kapitaleinsatz bei der Investition und steigenden Energiekosten beim Betrieb eine hohe Auslastung und Effizienz der Systeme gefordert wird, die zu großzügig ausgelegte Antriebe und Fördergeräte nicht mehr zulässt.

Diese Forderung nach Berechnungsverfahren für Schneckenförderer, die in ihren Geometrie- und Betriebsparametern jenseits der Grenzen der bekannten Normen und Richtlinien liegen, führte zu wissenschaftlichen Untersuchungen in diesem Bereich. Im Rahmen dieser Arbeiten konnten einfache Berechnungsverfahren für horizontal bis leicht geneigte und vertikale Schneckenförderer ermittelt werden. Für den Bereich der stark geneigten Schneckenförderer gelang dies bisher noch nicht um-

fassend. So ist durch die Arbeit von *Vollmann* zwar die Bestimmung des erzielbaren Volumenstroms mit einigem Rechenaufwand möglich [Vol-2000], einfache Berechnungsmethoden „per Hand“, wie in Normen und Richtlinien üblich, oder Verfahren zur Vorhersage der zu installierenden Antriebsleistung gibt es aber weiterhin nicht. Die Notwendigkeit für Berechnungsverfahren die einfach handhabbar und ausreichend sicher in den Ergebnissen sind, besteht für stark geneigte Schneckenförderer also weiterhin. Dieses Defizit gab den Anstoß für eine eingehende wissenschaftliche Untersuchung des Problems im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsvorhabens, welches die Grundlage für die vorliegende Arbeit darstellt [Gün-2010].

1.3 Zielsetzung

Um den beschriebenen Problemen begegnen zu können, verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, einfache und sichere Berechnungsverfahren zur Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer für Schüttgut unter Berücksichtigung von Konstruktions-, Betriebs- und Schüttgutparametern zu entwickeln. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Dimensionierung eines Schneckenförderers als die Berechnung des erzielbaren Volumenstroms mit einer bestimmten Baugröße und festgelegten Betriebsbedingungen verstanden. Auslegung ist die Berechnung der zur Lösung der reinen Förderaufgabe notwendigen Leistungsaufnahme des Antriebs im stationären Betrieb.

Durch solche Berechnungsverfahren kann bereits in der Konzeptphase eine optimale Gestaltung mit energieeffizientem Betrieb und niedrigen Investitionskosten bei vollständiger Erfüllung der Förderaufgabe ermöglicht werden. Die Ermittlung derartiger Berechnungsverfahren setzt die Beherrschung der komplexen Förderbewegung im stark geneigten Schneckenförderer voraus. Diese resultiert aus einem Zusammenspiel verschiedener Kräfte, die auf das Schüttgut wirken. Die wirkenden Kräfte wiederum sind von den Konstruktions-, Betriebs- und Schüttgutparametern sowie der Förderbewegung selbst abhängig [Gre-1994]. Für die horizontal bis leicht geneigten und vertikalen Schneckenförderer wurde bereits gezeigt, dass dieses komplexe Bewegungsverhalten und dessen Einfluss auf den erzielbaren Volumenstrom und die Leistungsaufnahme durch empirische Kennzahlen abgebildet werden kann [Gün-2002a, Gün-2006a]. Dieser Ansatz soll deshalb auch für die stark geneigten Schneckenförderer verfolgt werden. Natürlich können Verfahren, die auf empiri-

schen Untersuchungen basieren, nicht so genaue Ergebnisse liefern wie analytische Verfahren. Dennoch erscheint ein derartiges Verfahren im Rahmen dieser Arbeit als zielführend, da ein Großteil der Genauigkeit von analytischen Verfahren im Bereich der Schüttgutfördertechnik von der Güte der zugrundeliegenden Schüttguteigenschaften abhängt, die meist weder konstant sind noch exakt bestimmt werden können [Fot-2002].

Die Ermittlung der Berechnungsverfahren für die beiden Bereiche Dimensionierung und Auslegung erfolgt jeweils ähnlich und wird in mehreren Teilzielen erarbeitet. Als erstes Teilziel müssen abstrahierte, semi-empirische Berechnungsmodelle gefunden werden, die eine ausreichende Genauigkeit ermöglichen. Die nötigen empirischen Beiwerte sind ebenfalls in diesem Schritt zu definieren und in das Berechnungsmodell zu integrieren. Als zweites Teilziel müssen Datensätze für die empirischen Beiwerte erhoben und für die Analyse aufbereitet werden. Da die Beiwerte als mehrdimensionale Größen definiert sein müssen, um eine ausreichende Genauigkeit gewährleisten zu können (siehe Kapitel 2), geschieht dies in Abhängigkeit aller relevanten Einflussparameter. Das dritte Teilziel beinhaltet schließlich die Analyse der Datensätze bezüglich der signifikanten Einflussgrößen und die Art des Einflusses, die Ableitung der Berechnungsformeln für die benötigten Beiwerte zur Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer sowie die Überprüfung der gefundenen Berechnungsverfahren auf deren Genauigkeit.

Bei der Durchführung der Untersuchungen zur Ermittlung der Berechnungsverfahren gelten die folgenden Einschränkungen:

- Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich eine quasi-stationäre Förderung in einem kontinuierlich und gleichmäßig beschickten Schneckenförderer untersucht, wie sie sich nach einer gewissen Einlaufzeit einstellt. Einflüsse durch die Gutaufgabe, Gutabgabe oder beim Anfahren eines gefüllten Schneckenförderers finden keine Berücksichtigung.
- Betrachtet werden weiterhin nur kohäsionslose, gut fließende Schüttgüter, da mit stark geneigten Schneckenförderern in der Hauptsache solche Schüttgüter transportiert werden [Gab-1981]. Es werden deshalb nur trockene Schüttgüter mit Korngrößen größer ca. 0,25 mm untersucht, da bei diesen von Kohäsionslosigkeit ausgegangen werden kann [Pah-1993].

- Keine Berücksichtigung findet der Einfluss des Spalts zwischen der Schneckenwendel und dem Förderrohr. Es werden weder Verluste durch zurückfließendes Schüttgut noch ein erhöhter Leistungsbedarf durch Einklemmen, Deformation oder Zerstörung von Partikeln betrachtet. Bei der Entwicklung der Berechnungsverfahren wird die Spaltweite daher auf Null gesetzt, im Rahmen der Datenermittlung wird der Spalt so gewählt, dass der Einfluss minimal ist.
- Bei der Berechnung des Leistungsbedarfs wird nur diejenige Leistung betrachtet, die zur Lösung der reinen Förderaufgabe nötig ist. Andere Verlustleistungsanteile, wie in Lagern und Dichtungen, die auch im Leerlauf auftreten, werden nicht berücksichtigt. Ebenso finden auftretende Wirkungsgrade zwischen Antrieb und Schneckenwendel keine Berücksichtigung. Diese zusätzlichen Verlustleistungsanteile müssen vom Anwender separat abgeschätzt und auf die berechnete Leistung aufgeschlagen werden.

1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Um die genannten Ziele zu erreichen, folgt die Arbeit dem im Folgenden aufgeführten Ablauf. Die Vorgehensweise ist schematisch in Abbildung 1-5 dargestellt und gliedert sich in drei Teile.

Im ersten Teil werden nach der Hinführung zum Thema in Kapitel 1 die Problemstellung und daraus resultierenden Ziele abgeleitet. Anschließend werden die Ausgangssituation für die wissenschaftliche Arbeit und die theoretischen Grundlagen erläutert. In Kapitel 2 wird dazu der aktuelle Stand der Forschung im Bereich Schneckenförderer dargelegt. Die bisher durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen werden gegliedert und die für diese Arbeit wichtigsten Ergebnisse aufgeführt und bewertet. Im folgenden Kapitel 3 werden die theoretischen Grundlagen zur Erreichung der Ziele detailliert vorgestellt. Besonderes Augenmerk wird auf verschiedene Berechnungsansätze gelegt, die für diese Arbeit relevant sind. Damit soll auch ein Nachvollziehen der Arbeit ohne weiterführende Literatur ermöglicht werden.

Im zweiten Teil wird die Basis für die Berechnungsverfahren gelegt. In Kapitel 4 werden dazu, nach der Beschreibung der betrachteten Einflussgrößen, zunächst die grundlegenden Berechnungsmodelle zur Berechnung des erzielbaren Volumensstroms und des benötigten Leistungsbedarfs erarbeitet und notwendige empirische

Beiwerte definiert. In Kapitel 5 wird beschrieben, wie die Daten, die den empirischen Beiwerten zugrunde liegen, ermittelt werden. Dazu werden die Methoden, die zur Erhebung der Datensätze eingesetzt werden, im Einzelnen vorgestellt und die jeweilige Vorgehensweise zur Ermittlung der Daten und zur Aufbereitung der Datensätze beschrieben. Als Ergebnis der Datenermittlung stehen die Datensätze für die benötigten, in Abschnitt 4 eingeführten, empirischen Beiwerte in Abhängigkeit der betrachteten Einflussgrößen.

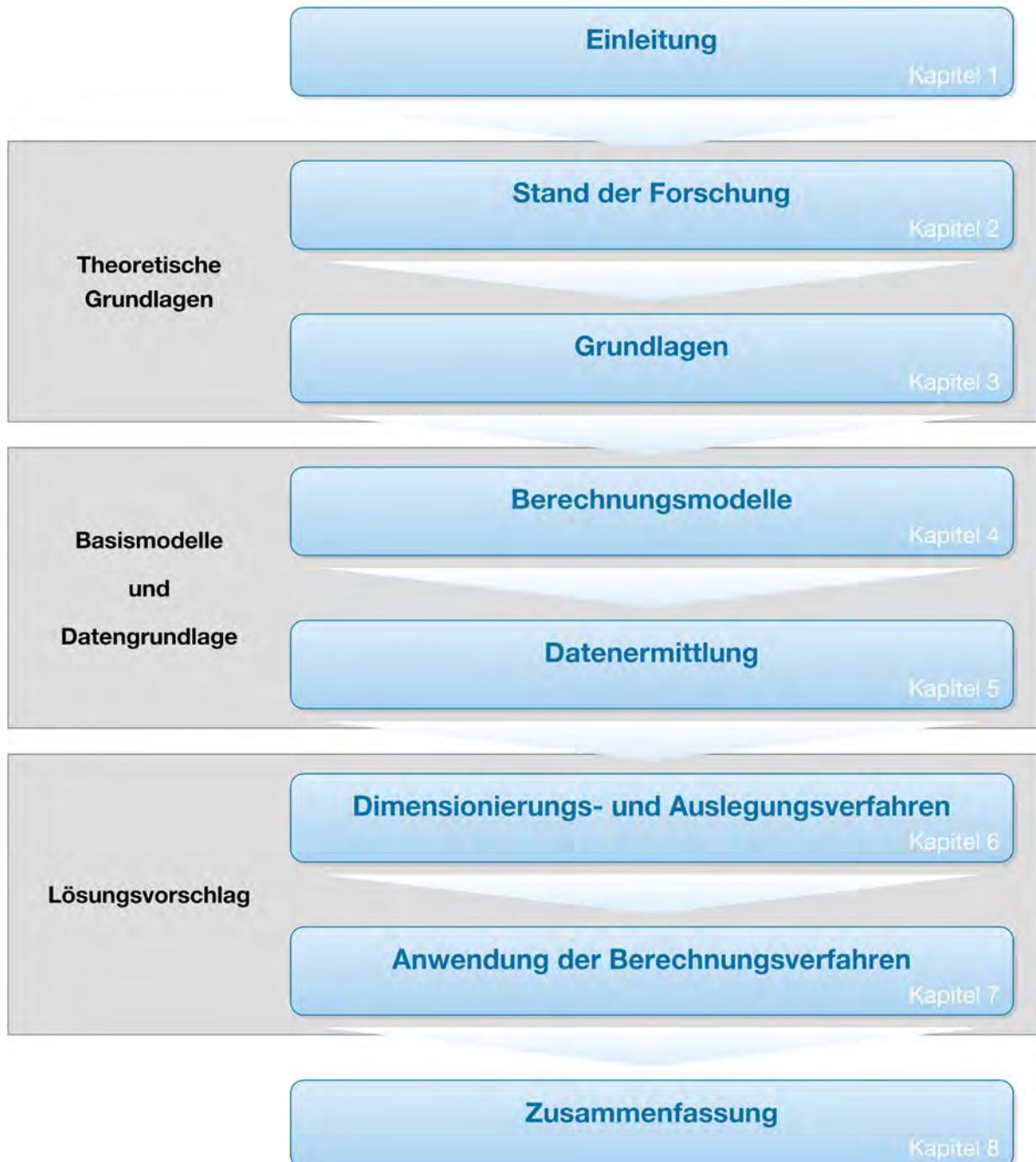


Abbildung 1-5: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit zur Entwicklung von Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren für stark geneigte Schneckenförderer

In Kapitel 6, dem Kernteil der Arbeit, wird schließlich ein Lösungsvorschlag für die Berechnung des erzielbaren Volumenstroms und des nötigen Leistungsbedarfs erarbeitet und verifiziert. Zunächst wird das für die Dimensionierung und Auslegung jeweils analoge Verfahren vorgestellt. Anschließend erfolgt die Entwicklung der Berechnungsvorschriften für die empirischen Beiwerte auf Basis von Regressionsanalysen. Die entwickelten Formeln werden dann mit den grundsätzlichen Berechnungsmodellen aus Kapitel 4 zu den gesuchten Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren zusammengeführt. In Kapitel 7 wird ein Überblick über die Anwendung der entwickelten Berechnungsverfahren gegeben.

In Kapitel 8 werden schließlich die Ergebnisse der Arbeit noch einmal kurz zusammengefasst.

2 Stand der Forschung für Schneckenförderer

Bereits früh führte der immer häufiger werdende Einsatz von Schneckenförderern für den Transport von Schüttgut zur Notwendigkeit wissenschaftlicher Untersuchungen. Besonders seit Mitte des letzten Jahrhunderts wurde deshalb eine Vielzahl experimenteller und theoretischer Arbeiten auf dem Gebiet der Schneckenförderer durchgeführt, die sich gemäß den gesetzten Schwerpunkten unterscheiden. Während zu Beginn der wissenschaftlichen Behandlung des Themas der Schwerpunkt auf der Untersuchung der Einflüsse von Geometrie-, Betriebs- und Schüttgutparametern, der analytischen Beschreibung des Fördervorgangs sowie dem experimentellen Nachweis der theoretischen Untersuchungen gelegt wurde, versuchte man in den letzten Jahren durch eine abstraktere Herangehensweise einfache und dennoch sichere Berechnungsverfahren zu entwickeln. Die bis heute durchgeführten Arbeiten und deren wichtigste Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Untersuchung der Einflussgrößen

Zu Beginn der Untersuchungen an Schneckenförderern stand eine Vielzahl experimenteller Arbeiten, die sich mit den Einflüssen der verschiedenen Parameter befassen. Zur Vereinheitlichung wurde früh versucht, einheitliche Bezeichnungen und Vorgehensweisen festzulegen [Pea-1967]. Die Untersuchungen wurden dabei hauptsächlich an horizontal bis leicht geneigten oder vertikalen Schneckenförderern durchgeführt, da der erste Einsatzfall leicht beschreibbar ist und der Zweite den ungünstigsten Förderfall darstellt. Grundsätzlich können die untersuchten Einflussparameter nach *Fehlauer* [Feh-1978] in drei Gruppen unterteilt werden:

- Konstruktionsparameter
- Betriebsparameter
- Stoffkennwerte

Die Konstruktionsparameter bilden dabei alle Einflussgrößen ab, welche die konstruktive Ausgestaltung des Fördergeräts betreffen. Sie können weiter in Konstruktionsparameter erster Art und solche zweiter Art unterteilt werden. Als Konstruktions-

parameter erster Art werden alle Parameter bezeichnet, die direkten Einfluss auf die Förderung haben, wie der Schneckendurchmesser, die Schneckenganghöhe, die Schneckenneigung oder die Förderlänge. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie als zahlenmäßige Werte beschrieben werden können. Andere Parameter, die die Förderung zwar beeinflussen, aber nicht direkt ursächlich dafür sind, werden als konstruktive Parameter zweiter Art bezeichnet. Da ihr Einfluss hauptsächlich durch qualitative Erkenntnisse belegt ist, lassen sie sich meist nicht durch Parameter oder Kennzahlen ausdrücken. Zu ihnen zählen die Gestaltung und Anordnung von Zwischenlagern oder die Gutaufgabe- und Gutabgabestellen [Feh-1978].

Zu den Betriebsparametern werden nach *Fehlauer* [Feh-1978] in der Hauptsache der Füllungsgrad und die Schneckendrehzahl gezählt. Weiter wird noch der Volumenstrom genannt. Da der Füllungsgrad im Schneckenförderer nicht ohne weiteres bestimmt werden kann, haben sich die Untersuchungen weitestgehend auf die Schneckendrehzahl und den erzielbaren Volumenstrom konzentriert.

Zur letzten Gruppe der Schüttgutkennwerte gehören alle Eigenschaften, die helfen, ein Schüttgut zu spezifizieren. Als Wichtigste sind hier die Schüttdichte, der innere Reibwert und der äußere Reibwert zu nennen [Feh-1978]. Einen Überblick über weitere Kennwerte und deren Einfluss auf die Förderung liefern die Norm *DIN ISO 3435* [DIN ISO 3435] sowie die Richtlinie *FEM 2.581* [FEM 2.581] mit ihren untergeordneten Teilen [FEM 2.125, FEM 2.181, FEM 2.582].

Die einzelnen Parameter führen im komplexen Zusammenspiel zu einem bestimmten Förderzustand im Schneckenförderer. Wie *Greinwald* [Gre-1994] zeigte, führt diese Komplexität dazu, dass sich die Parameter auch gegenseitig beeinflussen und daher eigentlich nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. Dies ist auch der Nachteil der durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Sie liefern zwar für sich gute Ergebnisse und können verschiedene Effekte aufzeigen, eine Übertragbarkeit auf andere Einsatzfälle ist aber nur eingeschränkt gegeben.

Ein Großteil der Untersuchungen beschäftigte sich mit Untersuchungen bezüglich der Konstruktionsparameter erster Art und deren optimaler Größe für bestimmte Einsatzfälle. So wurden die Einflüsse von Schneckendurchmesser, Schneckenganghöhe und Spaltgröße [Rie-1959, Kön-1960, Ste-1962, Nie-1964, Ste-1966, Bur-1967, Ste-1968, Bru-1969, Ste-1971, Rob-1994] untersucht. Weiter konnten unter

anderem vorteilhafte Verhältnisse von Schneckenganghöhe zu Schneckendurchmesser identifiziert werden [Rad-1972, Rad-1973, Rad-1974]. Ein Vorteil von nicht achsorthogonalen Erzeugenden der Schneckenwendel konnte in Untersuchungen nicht nachgewiesen werden [Rad-1977, Gab-1981]. Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss der Förderlänge [Thü-1958, Bru-1969, Ste-1971]. Es zeigte sich, dass die Länge des Schneckenförderers keinen Einfluss auf den Fördervorgang hat und somit von einem stationären Zustand entlang der Förderstrecke ausgegangen werden kann. Die Förderlänge ist zudem proportional zum nötigen Leistungsbedarf. Weiter wurde der Einfluss der Spaltgröße zwischen Schneckenwendel und Förderrohr untersucht. Bei geeigneter Wahl können entscheidende Einflüsse auf den erzielbaren Volumenstrom und den Leistungsbedarf vermieden werden [Rie-1959, Rad-1981a, Sta-1994, Gri-1995, Gün-1998, Lei-1999a]. Einige Arbeiten widmeten sich auch dem Einfluss verschiedener Schneckenneigungen auf den Förderprozess [Reg-1959, Ste-1962, Ste-1968, Bru-1969, Ste-1971, Gün-1998, Gün-1999a, Gün-2000b, Gün-2000c, Vol-2000]. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass mit steigender Schneckenneigung und ansonsten gleichen Bedingungen der erzielte Volumenstrom sinkt, während der Leistungsbedarf steigt.

Auch Konstruktionsparameter der zweiten Art waren schon früh Gegenstand von Untersuchungen. Ziel war zunächst die Steigerung des Füllungsgrads und damit des erzielbaren Volumenstroms durch optimierte Gutaufgabestellen [Rie-1959, Kön-1960, O'C-1961, O'C-1962, Nie-1964, Bru-1969, Nil-1971, Böt-1987a, Böt-1987b, Hun-1987, Sto-1987, Lei-1999b]. Untersucht wurden beispielsweise längere Einlaufbereiche, konische Abschnitte, spezielle Zuführgeräte oder optimierte Geometrieformen der Aufgabetrichter. Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss eines Zwischenlagers auf die Förderung [Gre-1994]. *Greinwald* konnte in seiner Arbeit feststellen, dass sich das Fördergut im Bereich des Zwischenlagers mit konstanter axialer Geschwindigkeit vorwärts bewegt, dazu aber ein erhöhter Leistungsbedarf nötig ist.

Für den Bereich der Betriebsparameter wurden bisher hauptsächlich Untersuchungen durchgeführt, die sich mit dem Einfluss der Schneckendrehzahl auf den erzielbaren Volumenstrom beschäftigten [Reg-1959, Rie-1959, Kön-1960, O'C-1961, Ste-1962, Bou-1964, Nie-1964, Bur-1967, Reh-1967, Ste-1968, Bru-1969, Nil-1971, Ste-1971, Feh-1977, Feh-1980a, Rob-1994, Gün-1998, Gün-1999a]. Die Arbeiten ermittelten meist ein Ansteigen des Volumenstroms mit steigender Schneckendrehzahl,

wobei der ansteigende Volumenstrom durch eine ungenügende Gutzuführung begrenzt wurde. Um auch den Einfluss verschiedener Füllungsgrade bewerten zu können, wurde sogar versucht, mittels radioaktiver Strahlung einen Blick in einen laufenden Schneckenförderer zu werfen [Har-1962].

Untersuchungen bezüglich der Schüttgutkennwerte beschäftigten sich unter anderem mit der Bestimmung der Reibwerte zwischen Fördergut und Schneckenförderer [Rad-1978], beziehungsweise der Auswirkung verschiedener Schüttgüter auf den Fördervorgang [Gho-1967, Reh-1967, Wil-1969, Bar-1975, Feh-1978, Sch-2003a]. Des Weiteren wurden Untersuchungen zum Schadenspotential für das Schüttgut bei der Förderung im Schneckenförderer durchgeführt [Bou-1964, Ste-1966, Ste-1968, San-1971, Rad-1981b]. Es konnte gezeigt werden, dass bei sinnvoller Wahl der Spaltgröße keine große Beschädigung zu erwarten ist.

Insgesamt lassen sich die Folgenden für diese Arbeit relevanten Ergebnisse der bisher durchgeführten Arbeiten festhalten:

- Mit steigender Schneckenneigung sinkt bei ansonsten gleichen Einflussgrößen der erzielbare Volumenstrom, während der erforderliche Leistungsbedarf ansteigt.
- Die Schneckendrehzahl ist der wohl stärkste Einflussfaktor auf die Förderung. Mit steigender Schneckendrehzahl steigen sowohl der erzielbare Volumenstrom als auch der Leistungsbedarf.
- Ein Ansteigen von Volumenstrom und Leistungsbedarf ist auch mit dem Füllungsgrad gegeben.
- Die Förderlänge ist proportional zum Leistungsbedarf und hat keinen direkten Einfluss auf den erzielbaren Volumenstrom.
- Bei geeigneter Spaltgröße zwischen Schneckenwendel und Förderrohr kann ein Einfluss auf Volumenstrom und Leistungsbedarf vermieden werden.

Analytische Berechnungsverfahren

Nachdem mit den vorgestellten Arbeiten die Einflussparameter auf die Förderung im Schneckenförderer gut beschrieben waren, konnten diese Erkenntnisse im Rahmen theoretischer Arbeiten in detaillierte Beschreibungen des Fördervorgangs fließen. Die Erkenntnisse wurden meist wieder experimentell überprüft. Neben dem reinen Fördervorgang wurden auch spezielle Probleme untersucht.

Grundlegend für die Betrachtung des Fördervorgangs ist die Art und Weise der Abbildung des Schüttguts im Inneren des Schneckenförderers. In den verschiedenen Arbeiten fanden dazu in der Hauptsache drei verschiedene Möglichkeiten Anwendung. Diese sind in Abbildung 2-1 für den Sonderfall des vertikalen Schneckenförderers schematisch dargestellt.

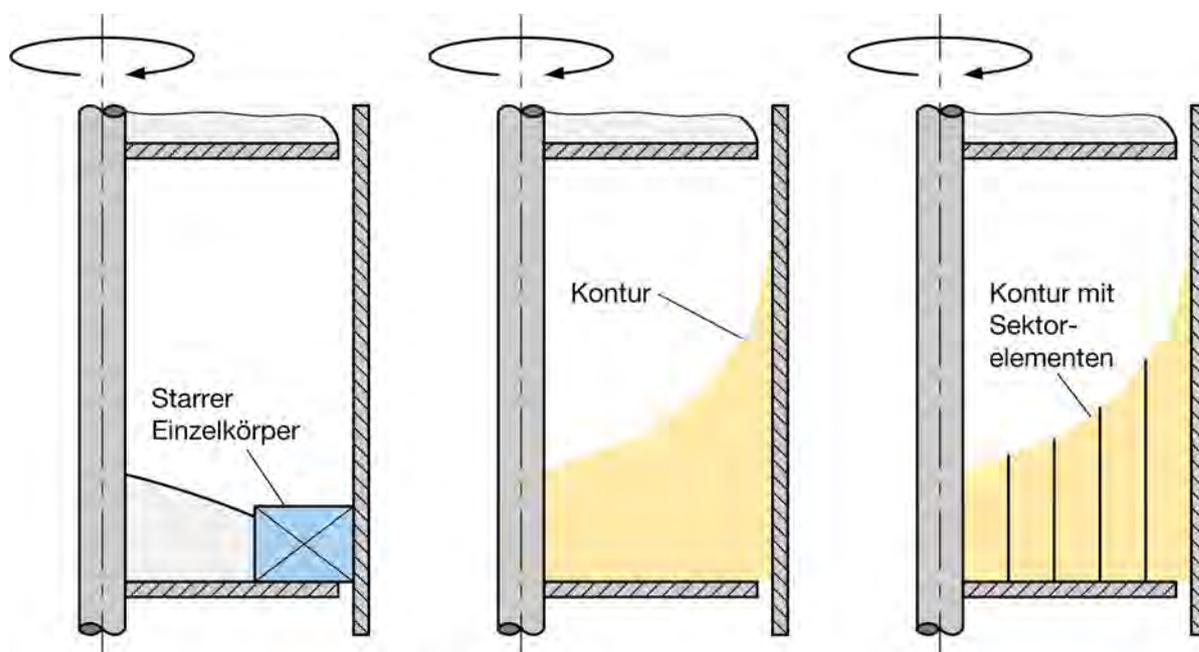


Abbildung 2-1: Darstellung der verschiedenen Betrachtungsweisen für Schüttgut im vertikalen Schneckenförderer (Eigene Darstellung in Anlehnung an [Fot-2002])

Die erste Variante bildet das Schüttgut als punktförmigen, starren Einzelkörper ab. Man geht davon aus, dass sich das Bewegungsverhalten des Schüttguts von dem einer Punktmasse, welche immer mit der Schneckenwendel und dem Förderrohr in Kontakt ist, nicht wesentlich unterscheidet [Ert-1988]. In den Beschreibungen nach diesem Einzelkörpermodell oder auch Punktmassenmodell können somit Reibkräfte zwischen Schüttgut und Schneckenwendel oder Schüttgut und Förderrohr abgebildet werden. In der Weiterentwicklung dieses Modells wurde die Punktmasse durch

einen Schüttgutkörper mit bestimmter Verteilung im Schneckenförderer ersetzt. Es ist somit möglich den von der freien Schüttgutoberfläche abhängigen Schwerpunkt des Schüttguts mit zu berücksichtigen. Das Schüttgut wird aber weiterhin als ein zusammenhängender Körper betrachtet. Erst in der dritten Abbildungsart wird das Schüttgut durch die Einführung einer endlichen Anzahl von Sektoren zum Mehrkörpermodell, das auch Bewegungen und Kräfte innerhalb des Schüttguts zulässt.

Die ersten Untersuchungen zum Bewegungsverhalten im Schneckenförderer wurden unter Anwendung des Einzelkörpermodells unter anderem von *Böttcher* [Böt-1963, Böt-1982] durchgeführt. Er stellte für eine Punktmasse die Bewegungsgleichungen bei der Förderung in einem Schneckenförderer beliebiger Neigung auf und erhielt eine nichtlineare, transzendente Differentialgleichung zweiter Ordnung zur Beschreibung des Problems. Zur Charakterisierung des Schüttguts fanden die Schüttdichte sowie die Reibwerte zum Schneckenförderer und die innere Reibung Anwendung. Aus der Lösung der Differentialgleichung ergibt sich ein grundsätzlich unterschiedliches Bewegungsverhalten des Einzelkörpers in Abhängigkeit von der Schneckenneigung. Während sich der Körper beim horizontal bis leicht geneigten Schneckenförderer geradlinig auf einer, gegenüber der untersten Mantellinie des Förderrohrs ausgelenkten, Mantellinie bewegt, wird er bei der stark geneigten bis vertikalen Förderung auf einer schraubenförmigen Bahn, deren Steigung nicht konstant aber periodisch ist, gefördert. Auf Basis eines Einzelkörpers konnten auch erstmals die Fördergeschwindigkeit sowie Ansätze zur Leistungsberechnung bestimmt werden [Thü-1958, Sin-1959, Vie-1960, Feh-1978, Feh-1980a, Böt-1987a]. Mit den gleichen Überlegungen konnten *Böttcher* und *Ertl* auch die Bewegung eines Einzelkörpers in einem geneigten konischen Schneckenförderer beschreiben [Böt-1987a, Böt-1987b].

Für die horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderer konnte bereits in früheren Untersuchungen ein analoges Bewegungsverhalten für Schüttgut beobachtet werden. *Ephremidis* [Eph-1957] zeigte, dass sich das Schüttgut im Schneckenförderer auf gekrümmten, nach unten durchgebogenen Flächen translatorisch bewegt. Ist der Füllungsgrad aber zu groß böschst das Schüttgut auf der Schneckenwendel in Drehrichtung auf und fließt über die Schneckenwelle hinweg. Das Bewegungsverhalten ist dann grundsätzlich verschieden vom Einzelkörpermodell nach *Böttcher*. Dieses Rückfließen des Schüttguts konnte auch in anderen Arbeiten nachgewiesen werden [Sch-1987].

Auch für die stark geneigten bis vertikalen Schneckenförderer zeigte *Gabler* [Gab-1981], dass das Punktmassenmodell nicht ohne weiteres auf Schüttgut übertragbar ist. Entgegen dem Ergebnis von *Böttcher* wird das Schüttgut mit konstanter Winkelgeschwindigkeit auf einer schraubenlinienförmigen Bahn transportiert. Unter bestimmten Voraussetzungen können bei Anwendung des Punktmassenmodells so Fehler bis zu 32 % auftreten [Rad-1979]. Als Ursache wird angeführt, dass sich das Schüttgut aufgrund seiner Fließfähigkeit unter dem Einfluss der Drehbewegung im Schneckenförderer nach außen aufböschet. Durch diese Verteilung des Schüttguts in der Schneckenkammer, der Raum begrenzt durch Förderrohr, Schneckenwelle und einer Schneckenganghöhe, ergeben sich andere Wirkradien im Vergleich zur Förderung einer Punktmasse [Nil-1971, Rad-1979, Ert-1988, Gre-1994, Sta-1994]. Als Folge dieser Erkenntnisse wurde in den weiterentwickelten Modellen die Verteilung des Schüttguts in der Schneckenkammer mit berücksichtigt [Nil-1971, Rad-1972, Ted-1974, Feh-1978, Rad-1979]. Dennoch werden, ähnlich dem Punktmassenmodell, eine kompakte Gutfüllung sowie eine konstante Winkelgeschwindigkeit und damit auch konstante axiale Geschwindigkeit des Schüttguts an jeder Stelle im Schneckenförderer angenommen [Gre-1994]. Die Verteilung des Schüttguts lässt sich am einfachsten durch die Querschnittsfläche des Schüttguts im Längsschnitt durch den Schneckenförderer darstellen. Diese wird durch das Förderrohr, die Schneckenwendel, eventuell der Schneckenwelle und der freien Schüttgutoberfläche begrenzt. Die Form der freien Schüttgutoberfläche war Bestandteil verschiedener Arbeiten. In ersten Ansätzen zur Beschreibung ging *Sinha* noch von einer Geraden aus, deren Steigung dem Böschungswinkel entspricht [Sin-1959, Vie-1960]. Von *Rademacher* wurde die Modellvorstellung eingeführt, dass die Oberfläche von Schüttgut im Schneckenförderer, in Analogie zu einer rotierenden Flüssigkeit in einem zylindrischen Behälter, eine parabolische Form annimmt [Rad-1972]. Obwohl damit Einflüsse der Schneckengeometrie, wie die Steigung der Schneckenwendel, nicht erfasst und das Schüttgutverhalten sehr stark vereinfacht werden [Ert-1988], wird diese Vorstellung von nahezu allen folgenden Arbeiten übernommen [Nil-1971, Ted-1974, Feh-1978, Gab-1981, Böt-1982]. Eine experimentelle Bestätigung erfolgte zunächst nur anhand eines vereinfachten Grundmodells, einer in einem zylindrischen Rohr rotierenden ebenen Scheibe [Rad-1972, Rad-1979]. Für vertikale Schneckenförderer konnte die Form der freien Schüttgutoberfläche auch experimentell ermittelt werden [Feh-1977, Ert-1988]. Die parabolische Form konnte prinzipiell nachgewiesen werden, auch wenn sich unter dem Einfluss des Spalts zwischen Förderrohr und Schneckenwendel sogar degressive Formen zeigten. Da in den Ar-

beiten eine konstante Gutgeschwindigkeit im Schüttgutkörper angenommen wird, diente zur Berechnung der Fördergeschwindigkeit wieder die Modellvorstellung eines Einzelkörpers. Bei der Berechnung der auftretenden Kräfte konnte aber nun ein von der Gutverteilung abhängiger Schwerpunkt des Schüttguts berücksichtigt werden [Gab-1981]. Einzelne Verlustleistungsanteile konnten damit genau bestimmt werden. Eine analytische Berechnung des gesamten Leistungsbedarfs war aber nicht möglich.

Insgesamt zeigte sich jedoch, dass aufgrund des komplexen Verhaltens von Schüttgut – ein umfassendes Stoffgesetz existiert nicht [Wei-1990] – auch dieses erweiterte Modells nicht ausreichend ist. Die Gründe sind vielfältig und wurden in mehreren Arbeiten, die meist die Anwendbarkeit auf vertikale Schneckenförderer betrachten, untersucht. So verteilen sich die Spannungen in Schüttgütern. Neben Zentrifugal- und Eigengewichtskräften muss daher zusätzlich ein „hydrostatischer“ Kraftanteil berücksichtigt werden, der noch von der Wandreibkraft abhängig ist [Gre-1994, Vol-2000]. Im Gegensatz zu einem Einzelkörper können im Schüttgut zudem einzelne Gutschichten aneinander abgleiten [Rad-1972, Gre-1994]. Dies wurde auch im Rahmen früherer experimenteller Untersuchungen bereits nachgewiesen [Rie-1959, Kön-1960, Nie-1964]. Eine Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf den gesamten stark geneigten Bereich ist nach *Vollmann* [Vol-2000] ebenso gegeben.

Um den beschriebenen Nachteilen zu begegnen, wurde das Modell um Ansätze aus der Kontinuumsmechanik erweitert. Das Schüttgut wurde dabei in einzelne Sektoren aufgeteilt, die sich nun relativ zueinander bewegen und Kräfte übertragen können. Mit diesen Mehrkörpermodellen ist es möglich, schüttgutspezifische Eigenschaften und die Relativbewegungen innerhalb des Schüttguts zu berücksichtigen. Die freie Schüttgutoberfläche und die Verteilung des Schüttguts in der Schneckenkammer können damit in Abhängigkeit der Einflussgrößen für vertikale Schneckenförderer berechnet werden [Ert-1988]. Der Spannungszustand im Inneren des Schüttguts wurde in weiteren Arbeiten ebenfalls berücksichtigt, wobei *Greinwald* zusätzlich den Einfluss eines Zwischenlagers betrachtete [Gre-1994] und *Stahl* dem Einfluss des Spalts zwischen Schneckenwendel und Förderrohr genauer untersuchte [Sta-1994]. *Vollmann* schließlich erweiterte das Modell für beliebige Schneckenneigungen [Vol-2000]. In diesen Mehrkörpermodellen können für jeden Sektor die Geschwindigkeitsanteile berechnet werden. Durch Aufsummierung der daraus folgenden Teilvolumenströme ergibt sich der erzielbare Volumenstrom. Ebenfalls ist es möglich, ein-

zelne Leistungsanteile genau zu berechnen. Dazu zählen die Hubleistung, die Reibleistung zwischen Schüttgut und Schneckenwendel, die Reibleistungen am Förderrohr und der Schneckenwelle sowie die dissipierte Reibleistung infolge der Relativbewegungen im Schüttgut. Für andere Verlustanteile, wie das Einklemmen von Schüttgut im Spalt zwischen Schneckenwendel und Förderrohr, ist eine genaue Berechnung weiterhin nicht möglich [Gün-1999b, Gün-2000c, Vol-2000]. Ein Nachteil dieser Verfahren ist zudem der hohe Rechenaufwand, der in der iterativen Berechnungsweise begründet ist.

Für die durchgeführten Arbeiten zur Ermittlung analytischer Berechnungsverfahren lassen sich folgende relevanten Ergebnisse zusammenfassen:

- Die Beschreibung mit Hilfe punktförmiger Einzelkörper erklärt den prinzipiellen Fördervorgang zwar gut. Eine exakte Darstellung lässt sie aber aufgrund der zu großen Abstrahierung nicht zu.
- Durch Beschreibung des Fördervorgangs mit Hilfe von Mehrkörpermodellen kann der Fördervorgang besser dargestellt werden, da auch Vorgänge im Inneren des Schüttguts abgebildet werden können.
- Mit dem Mehrkörpermodell kann der Volumenstrom in einem Schneckenförderer beliebiger Neigung ausreichend genau berechnet werden, allerdings ist dazu ein hoher Rechenaufwand nötig.
- Die Berechnung aller relevanten Verlustleistungen ist mit analytischen Ansätzen weiterhin nicht möglich.

Praxistaugliche Berechnungsverfahren

Die bisher vorgestellten Arbeiten liefern somit Ergebnisse, mit denen aus wissenschaftlicher Sicht eine sehr gute Beschreibung von Schneckenförderern möglich ist. Aufgrund des hohen Rechenaufwands ist der Einsatz dieser Berechnungsverfahren in der Praxis aber schwierig. Ziel weiterer Arbeiten war es daher, die errungenen Erkenntnisse in praxistauglichen Berechnungsverfahren für Anwender einfach nutzbar zu machen.

Erste einfache Ansätze in diese Richtung werden für horizontale und leicht geneigte Schneckenförderer unter anderem von *Spiwakowski* vorgeschlagen. Sowohl der erzielbare Volumenstrom als auch der nötige Leistungsbedarf berechnen sich nach zwei einfachen Formeln aus den vorhandenen Geometrie- und Betriebsparametern. Zur Berücksichtigung des Einflusses der leicht geneigten Förderung sowie zur Berechnung der Reibleistungen werden Beiwerte eingeführt. Werte für diese Faktoren werden für eine Vielzahl an Schüttgütern angegeben [Spi-1959, Dol-1968, Bra-1969]. Auf ähnliche Berechnungsvorschriften stützen sich einige Normen und Richtlinien [ISO 7119, DIN 15262, VDI 2330, FEM 2.121]. Diese lassen aber nur die Berechnung für horizontal bis leicht geneigte Schneckenförderer zu, die zudem im Füllungsgrad und teilweise der Schneckendrehzahl stark eingeschränkt sind. Um alle Verlustleistungsanteile berücksichtigen zu können, wird der rein schüttgutspezifische Verschiebewiderstandbeiwert eingeführt, der neben der Reibung zwischen Schüttgut und Schneckenförderer auch die Umwälzung des Schüttguts während der Förderung und sonstige Verluste erfasst [VDI 2330]. Die Berechnung von erzielbarem Volumenstrom und Leistungsbedarf basiert jeweils auf dem Einzelkörpermodell. Der Nachteil dieser Verfahren liegt in den engen Grenzen der zulässigen Betriebsparameter Füllungsgrad und Schneckendrehzahl. Werden diese überschritten, fließt, wie oben beschrieben, Schüttgut über die Schneckenwelle hinweg in zurückliegende Schneckenkammern und eine einfache Vorwärtsbewegung des Schüttguts findet nicht mehr statt. Diese Zustände werden in den Normen und Richtlinien nicht erfasst [Blo-2008]. Die empfohlenen Betriebsbedingungen der Normen und Richtlinien basieren auf den beiden Teilen der Norm *DIN 15261* [DIN 15261-1, DIN 15261-2].

Für vertikale Schneckenförderer wurde ein der *DIN 15262* ähnliches Berechnungsverfahren von *Gabler* vorgeschlagen. Die zur Berechnung von Volumenstrom und Leistungsbedarf nötige axiale Fördergeschwindigkeit wird wiederum nach dem Einzelkörpermodell bestimmt. Die folgende Berechnung des erzielbaren Volumenstroms folgt der Norm *DIN 15262* [DIN 15262] unter Einbeziehung der berechneten axialen Fördergeschwindigkeit. Die Berechnung des Leistungsbedarfs unterscheidet ebenfalls die Hubarbeit zum Heben des Schüttguts und die Reibarbeit, in der alle Reibanteile zusammengefasst sind. Die Hubleistung wird in der Hauptsache aus der geförderten Masse und der Förderhöhe berechnet. Die Reibleistung berechnet sich aus der durch das Schüttgut auf das Förderrohr ausgeübten Normalkraft und einem fiktiven Reibwert, dem aus der *DIN 15262* bekannten Verschiebewiderstandsbeiwert [DIN 15262], der alle Verlustleistungen berücksichtigt. Die Berechnung der

maßgeblichen Normalkraft folgt in Abhängigkeit der Verteilung des Schüttguts in der Schneckenkammer [Gab-1981]. Daneben existieren auch noch weitere stark vereinfachende Berechnungsverfahren, allerdings ist für diese teilweise noch kein Nachweis der Genauigkeit geliefert worden [Reh-1962, Hof-2004, Rei-2010].

Die vorgestellten Berechnungsverfahren können dennoch nur eine grobe Abschätzung liefern. Der Grund liegt hauptsächlich in der Verwendung des Verschiebewiderstandsbeiwerts aus der *DIN 15262*, der nur für die Förderung in horizontal bis leicht geneigten Schneckenförderern bei geringen Füllungsgraden und Schneckendrehzahlen ermittelt wurde [Gün-1997, Fot-2002]. Dass dieser bei heute eingesetzten Schneckenförderern, die mit höheren Füllungsgraden und Schneckendrehzahlen betrieben werden oder stärker geneigt sind, nicht anwendbar ist, zeigten experimentelle Untersuchungen. Folglich postulierte *Vollmann* den Verschiebewiderstandsbeiwert für stark geneigte Schneckenförderer als nicht konstante Größe und ermittelte exemplarisch einige Werte. Zur Unterscheidung vom rein schüttgutspezifischen Verschiebewiderstandsbeiwert wird für die geneigte Förderung der Begriff Förderfaktor eingeführt [Vol-2000]. Für horizontale bis leicht geneigte Schneckenförderer mit hohen Drehzahlen und Füllungsgraden sowie für vertikale Schneckenförderer konnte ebenfalls festgestellt werden, dass der Verschiebewiderstandsbeiwert teilweise stark von Füllungsgrad, Schneckendrehzahl und Schneckenneigung abhängig ist [Fot-2002, Gün-2002a, Gün-2002b, Gün-2002c, Gün-2003, Gün-2004, Ron-2004b]. Die Verwendung eines rein schüttgutspezifischen Verschiebewiderstandsbeiwerts schließt demnach eine genaue Berechnung des Leistungsbedarfs aus [Ron-2004a].

Diese Erkenntnisse führten zur Entwicklung neuer Berechnungsverfahren, in denen der Verschiebewiderstandsbeiwert als mehrdimensionale Kenngröße angesetzt wird. Zunächst erarbeitete *Fottner* im Rahmen experimenteller und theoretischer Untersuchungen Kennfelder der wichtigsten Einflussgrößen auf den erzielbaren Volumenstrom und den Leistungsbedarf. Darauf aufbauend entwickelte er die Grundlagen für Berechnungsverfahren [Fot-2002, Gün-2002a], die, untermauert durch weitere experimentelle Untersuchungen, in semi-empirische Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte und vertikale Schneckenförderer, betrieben mit hohen Füllungsgraden und Schneckendrehzahlen, mündeten [Gün-2004, Ron-2004a, Ron-2004b, Gün-2006a, Blo-2008, Gün-2008]. Die Berechnungsverfahren wurden von *Blomeyer* verifiziert [Gün-2006b, Blo-2008] und sind Grundlage des neuen Entwurfs der Richtlinie *VDI 2330* [VDI 2330-2, VDI 2330-3].

Die Berechnungsverfahren sind jeweils gleich aufgebaut. Zunächst wird jeweils die Baugröße des Schneckenförderers dimensioniert, anschließend erfolgt die Berechnung der erforderlichen Leistungsaufnahme. Beim Berechnungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte Schneckenförderer erfolgt die Baugrößendimensionierung auf Basis der Norm *DIN 15262* [DIN 15262]. Auch die Auslegung des Schneckenförderers bezüglich der Leistungsaufnahme folgt prinzipiell der bekannten Norm. Abweichend wird der Verschiebewiderstandsbeiwert aber als mehrdimensionale Größe in Abhängigkeit von Schneckenneigung, Schneckendrehzahl, dem Verhältnis von Schneckenganghöhe zu Schneckendurchmesser und dem Verschiebewiderstandsbeiwert der *DIN 15262* berechnet. Bei der Baugrößendimensionierung für vertikale Schneckenförderer wird auf den Berechnungsansatz von *Greinwald* zurückgegriffen, der auf einem Mehrkörpermodell basiert [Gre-1994]. Aufgrund der Komplexität der analytischen Berechnungsmethode wird aber ein grafisches Verfahren in Abhängigkeit von Füllungsgrad, Schneckendrehzahl und Schneckendurchmesser verwendet, in dem die Ergebnisse der analytischen Berechnung integriert sind. Zur Berechnung der zur Förderung nötigen Leistungsaufnahme werden zunächst die Reibleistungen zwischen Schüttgut und Förderrohr sowie Schüttgut und Schneckenwendel berechnet. Als Alternative hierzu wird wieder eine grafische Lösung angeboten. Anschließend wird der Verschiebewiderstandsbeiwert, entsprechend dem Vorschlag von *Vollmann* Förderfaktor genannt [Vol-2000], als mehrdimensionale Kenngröße bestimmt. Dieser ist abhängig von einem empirisch ermittelten Schüttgutbeiwert, dem Füllungsgrad und der Gutwinkelgeschwindigkeit. Der erforderliche Leistungsbedarf ergibt sich aus dem Produkt der Reibleistungen mit dem Verschiebewiderstandsbeiwert sowie der Hubleistung. Die angegebenen Gleichungen für Verschiebewiderstandsbeiwert und Förderfaktor beruhen jeweils auf Regressionsrechnungen, basierend auf experimentell ermittelten Datensätzen [Ron-2004a].

Auch für geneigte Schneckenförderer werden bereits einfache Berechnungsverfahren in der Literatur beschrieben [Rei-2011]. Diese konnten sich aber, zumindest in Form von Normen oder Richtlinien, bisher nicht durchsetzen. Der Grund liegt augenscheinlich in der sehr stark vereinfachenden Herangehensweise, die sich an der Norm *DIN 15262* [DIN 15262] orientiert. Wie bei den Berechnungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte und vertikale Schneckenförderer finden die Einflüsse von Schüttgut und Schneckenneigung nur durch konstante Beiwerte Berücksichtigung. Weitere Verfahren werden zwar bezüglich ihrer Vorgehensweise vorgestellt, sind aber inhaltlich noch nicht vollständig ausgearbeitet [Rob-2001, Rob-2002].

Als relevante Ergebnisse der Arbeiten lassen sich folgende Aussagen nennen:

- In diversen Normen und Richtlinien existieren bereits praxistaugliche Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte Schneckenförderer, die in der Praxis anerkannt sind.
- Zur Vereinfachung der analytischen Berechnungsverfahren haben sich auf Regressionsrechnungen basierende Ersatzgleichungen und grafische Verfahren als geeignet gezeigt.
- Der eingeführte Verschiebewiderstandsbeiwert muss als mehrdimensionale Größe betrachtet werden, da nur so eine ausreichende Genauigkeit des Berechnungsverfahrens erzielt werden kann.

Rechnergestützte Berechnungs- und Simulationsmethoden

Mit den wachsenden Möglichkeiten fanden in verschiedenen Arbeiten vermehrt rechnerbasierte Werkzeuge Verwendung. Die ersten Anwendungen nutzen solche Werkzeuge zunächst, um für die gefundenen komplexen Funktionen eine große Anzahl an Funktionswerten für eine spätere Auswertung berechnen zu können [Böt-1963, Rad-1973]. Später wurden numerische Verfahren zur Lösung beispielsweise transzendenter Differentialgleichungen genutzt, die das Ergebnis von analytischen Berechnungsverfahren nach dem Einzelkörpermodell darstellten. Dabei kamen auch Großrechenanlagen zum Einsatz [Gab-1981]. Ferner versuchte man durch den Einsatz von Rechnerprogrammen eine iterative Optimierung einzelner Förderprobleme zu erreichen [Feh-1980b].

Mit der Entwicklung der Berechnungsverfahren mit Mehrkörpermodellen entstand schließlich die Notwendigkeit von Rechnerprogrammen, um den iterativen Berechnungsvorschriften gerecht zu werden. So wurden bei allen analytischen Berechnungsverfahren entsprechende Berechnungsprogramme mitgeliefert [Ert-1988, Gre-1994, Sta-1994, Vol-2000]. Während diese zunächst noch der reinen Lösung des Rechenproblems dienten, wurden später komplette Programme entwickelt, um den Anwender in der Praxis zu unterstützen. Lange Rechenzeiten und der noch eher wissenschaftliche Charakter der Programme behinderten aber einen direkten Einsatz

in der Praxis. Die Ergebnisse der letzten Arbeiten zur Entwicklung von praxistauglichen Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren können dagegen in Form von nutzerfreundlichen Rechnerprogrammen praxisnah genutzt werden [Ron-2004a].

Die beschriebenen Programme basieren auf vorher entwickelten Berechnungsverfahren und dienen nur deren Lösung. Eine Weiterentwicklung stellen Programme dar, mit deren Hilfe die Bewegung von Schüttgut, ohne vorhergehende theoretische Beschreibung des Fördervorgangs, berechnet werden kann [Grö-2003]. Es ist damit möglich, das Schüttgut und seine Auswirkungen zu simulieren. Prinzipiell stehen für den Bereich der Simulation von Schüttgütern numerische Verfahren mit finiten oder diskreten Elementen zur Verfügung. Die Finite Elemente Methode (FEM), die wie die analytischen Mehrkörpermodelle auf kontinuumsmechanischen Ansätzen und den dazu nötigen Stoffgesetzen basiert [Gre-1994], fand vor allem bei der Dimensionierung von Silos Anwendung [Lan-1983, Häu-1984, Run-1986, Abd-1989, Sch-1989b]. Die Spannungs- und Verformungszustände können dort für quasistatische Füll- und Entleerungsvorgänge berechnet werden. Da FEM-Simulationen aber auf zusammenhängenden Flächenelementen basieren, können große Relativbewegungen im Schüttgut, wie sie bei der Förderung im Schneckenförderer auftreten, nicht praktikabel abgebildet werden [Gre-1994]. Noch bevor aufgrund unzureichender Hardwaremöglichkeiten ein umfassender Einsatz möglich war, wurde deshalb das Potential der Diskrete Elemente Methode (DEM) erkannt. Diese wurde zwar ursprünglich für die Simulation von terramechanischen Problemen entwickelt [Cun-1979, Kuh-1992], sehr schnell wurden aber auch ihre Potentiale für Aufgabenstellungen der Verfahrenstechnik oder Fördertechnik erkannt [Tho-1992, Als-2002, Kat-2006]. Für den Bereich der Fördertechnik sind dies insbesondere [Kra-2003]

- der meist kostengünstige Nachweis der Funktionalität eines Fördergeräts durch Simulation;
- die Überprüfung von einzelnen Problembereichen wie Gutaufgabe-, Gutabgabe- oder Gutübergabestellen usw.;
- die Überprüfung, ob eine Integration verfahrenstechnischer Prozesse wie Mischen oder Trennen in den Förderprozess möglich ist;
- die Möglichkeit der Visualisierung des Transportvorgangs durch Videosequenzen und Bilder aus dem Inneren eines Fördergeräts.

Die bisher durchgeführten Arbeiten mit großem Bezug zur DEM-Simulation lassen sich hauptsächlich in zwei Bereiche einteilen: Zum Einen die grundlagenorientierten Arbeiten, die sich mit der Weiterentwicklung der Simulationsmethode als solcher beschäftigen, und zum Anderen die anwendungsorientierten Arbeiten, die Simulationen nach der Diskrete Elemente Methode als Werkzeug zur Klärung der Fragestellungen verstehen [Kat-2005b].

In den grundlagenorientierten Untersuchungen werden die der Simulationsmethode zugrundeliegenden Berechnungsabläufe und Algorithmen optimiert, um eine möglichst schnelle und effiziente Berechnung zu ermöglichen und die Anwendbarkeit der DEM-Simulation zu erhöhen [Blo-2008]. Darunter fallen Arbeiten zur Verbesserung der Kontaktmodelle oder zur Verifikation des Schüttgutverhaltens beispielsweise in Scherzellen [Tom-2003] oder Böschungswinkelversuchen [Zho-2002]. Durch eine Vielzahl solcher grundlegenden Arbeiten konnte die Nutzbarkeit der DEM als Simulationsmethode für Schüttgüter und die gute Übereinstimmung mit Laborversuchen bewiesen werden [Kat-2005b].

In der anwendungsorientierten Forschung fand die DEM-Simulation zunächst in der Schüttgut-Verfahrenstechnik bei der Untersuchung von schüttgutmechanischen Prozessen wie Lagern, Mischen oder Mahlen Verwendung [Cle-2000, Lun-2002, Kat-2005b, Mus-2010]. Im Bereich der Fördertechnik wurden als erste Anwendungen die Förderung in einem senkrechten Schlauchgurtförderer [Grö-1999, Grö-2003] oder Probleme an Übergabestellen von Gurtförderern [Als-2002, Dew-2003, Kat-2005a] beschrieben. Weitere Fördergeräte, die Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode waren, sind Rohrkettenförderer [Kat-2004, Kat-2005b], Becherwerke und Kratzerförderer. Beispiele für DEM-Simulationen dieser Förderer und die Verifikation der Ergebnisse zeigen *Krause* und *Katterfeld* [Kra-2003, Kat-2006]. Ebenfalls untersucht wurden Wendelförderer. *Minkin* erläutert dazu in seiner Arbeit die Grundlagen der Simulation von Wendel- und Schneckenförderern mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode [Kra-2005, Min-2005]. Die Möglichkeit, Schneckenförderer mit DEM-Simulationen zu untersuchen zeigte aber schon *Shimizu* auf, als er zum ersten Mal die helixförmige Fläche einer Schneckenwendel innerhalb einer DEM-Simulation abbilden und simulieren konnte [Shi-2002]. Die DEM-Simulation eines Schneckenförderers wurde auch von *Katterfeld* und *Gröger* durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen von *Ephremidis* [Eph-1957] konnte qualitativ eine gute Übereinstimmung zwischen Expe-

riment und Simulation für das Bewegungsverhalten von Filterkies in einen horizontalen Schneckenförderer mit niedrigen Schneckendrehzahlen nachgewiesen werden [Kat-2006]. Ausführliche Simulationen von Schneckenförderern führte zudem *Blomeyer* durch. Für horizontale bis leicht geneigte Schneckenförderer variierte er für verschiedene Schneckendrehzahlen das Verhältnis von Schneckenganghöhe zu Schneckendurchmesser. Quantitativ konnte so der Einfluss der veränderten Geometrie auf den nötigen Leistungsbedarf untersucht werden. Die Ergebnisse wurden im oben beschriebenen Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte Schneckenförderer berücksichtigt [Blo-2008]. In allen Arbeiten konnte gezeigt werden, dass sich die Diskrete Elemente Methode sehr gut eignet, um qualitative und quantitative Problemstellungen der Fördertechnik zu bearbeiten. Dies scheint auch für die Dimensionierung und Auslegung von Schneckenförderern sowie Sonderproblemen wie dem Zwischenlagereinfluss zu gelten [Ron-2004a]. Um eine ausreichende Übereinstimmung von Realität und Simulationen zu gewährleisten, ist aufgrund der notwendigen Abstrahierung des Simulationsmodells aber immer eine ausreichende Kalibrierung des simulierten Schüttguts erforderlich [Grö-2005, Kat-2005b, Kra-2005, Kat-2006, Blo-2008].

Für den Bereich der rechnerbasierten Methoden lässt sich in Bezug auf die vorliegende Arbeit folgendes festhalten:

- Zur Lösung der analytischen Berechnungsverfahren nach dem Mehrkörpermodell stehen Rechnerprogramme zur Verfügung, die eine Anwendung vereinfachen.
- DEM-Simulationen sind für Untersuchungen zur Dimensionierung und zur Berechnung des Leistungsbedarfs von Schneckenförderern geeignet.
- Eine sorgfältige Kalibrierung des Schüttguts im abstrahierten Simulationsmodell ist notwendig, um eine ausreichende Genauigkeit der Simulation zu gewährleisten.

3 Grundlagen zur Entwicklung der Berechnungsverfahren

Die Berechnungsverfahren, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden sollen, stehen konzeptionell in engem Zusammenhang mit den Ergebnissen von früheren Untersuchungen im Bereich der Schneckenförderer, welche in Kapitel 2 aufgeführt sind. Die Ergebnisse der für den weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit relevanten Untersuchungen werden deshalb im Folgenden genauer beschrieben. Dabei soll das Verständnis der Ergebnisse – als Grundlage für die weiteren Kapitel – und nicht deren Erarbeitung im Vordergrund stehen. Für Details zu den Untersuchungen sei auf die einzelnen Arbeiten verwiesen.

3.1 Grundlagen zu Schüttgütern

Da gerade in den Arbeiten mit analytischem Schwerpunkt das Verhalten des Schüttguts von elementarer Bedeutung ist, werden zunächst die nötigen Grundlagen zum Schüttgutverhalten dargelegt.

Eigenschaften, Wesen und Kenngrößen von Schüttgütern

Als Schüttgut bezeichnet man alle schüttfähigen Materialien, die lose lager- und transportfähig sind, wie Agrarrohstoffe, Sand, Zement, Kohle und ähnliche Materialien. Aufgrund der Verschiedenartigkeit ihrer Art und ihres Ursprungs weisen sie sehr verschiedene physikalische Eigenschaften auf. Während einige davon für ein bestimmtes Schüttgut als konstant anzusehen sind, hängen andere stark von den physikalischen Randbedingungen sowie der Behandlungsweise ab und müssen für jeden Einsatzzweck unter den jeweils relevanten Randbedingungen neu bestimmt werden [FEM 2.581]. Je nach Verfahrensschritt – Fördern, Lagern, Mischen, usw. – sind dabei unter Umständen verschiedene Eigenschaften relevant. Die wichtigsten Eigenschaften zur allgemeinen Klassifizierung von Schüttgütern werden in der Norm *DIN ISO 3435* [DIN ISO 3435] und der Richtlinie *FEM 2.582* [FEM 2.582] aufgezählt. Für die mechanische Förderung, dem auch der stark geneigte Schneckenförderer zuzuordnen ist, nennt die Richtlinie *FEM 2.181* [FEM 2.181] weitere relevante Eigenschaften zur Unterscheidung. Insgesamt sind unter anderem zu berücksichtigen:

- Kornbeschaffenheit, beschrieben durch Kornform und Korngröße
- Zusammenhalt (Kohäsion), Fließverhalten
- Böschungswinkel
- Auslaufwinkel
- Schüttdichte
- Physikalische und chemische Eigenschaften (Besonderheiten)
- Temperatur
- Neigung zum Fluidisieren
- Änderung der Konsistenz – Neigung zum Erhärten

Unter anderem bedingt durch diese Vielzahl an verschiedenen, oft nicht konstanten, Schüttguteigenschaften existiert bis heute kein allgemeingültiges Stoffgesetz für Schüttgüter, das zur Beschreibung des Schüttgutverhaltens herangezogen werden kann. Auch können die Stoffgesetze der Festkörper- oder Fluidmechanik nicht direkt auf Schüttgüter angewendet werden, da je nach Zustand und Beanspruchung sowohl zu Festkörpern als auch zu Flüssigkeiten Analogien vorliegen. Schüttgüter nehmen daher eine Zwischenstellung ein und haben sowohl im ruhenden wie im bewegten Zustand unterschiedliches Verhalten gegenüber Beiden. Entscheidend dafür, welchem Stoffverhalten das Schüttgut in seiner vorliegenden Kondition näher kommt, ist unter anderem der Zusammenhalt der einzelnen Partikel des Schüttguts. Dieser Zusammenhalt wird bei Schüttgütern Kohäsion genannt und beruht auf Effekten wie van der Waals-Anziehungskräften, Flüssigkeitsbrücken, Schmelzhaftung und Sinterung, Auskristallisation von Salzen sowie elektrostatischen Anziehungskräften [Sch-1968]. Neben diesen Effekten beeinflusst die Korngröße beziehungsweise die Verteilung verschiedener Korngrößen im Schüttgut die Stärke der Kohäsion. So kann ein und dasselbe Material bei einer mittleren Korngröße von ca. 1 mm völlig kohäsionslos sein, während es sich, gemahlen auf eine mittlere Korngröße von ca. 20 µm, merklich kohäsiv verhält [Mol-1985]. Untersuchungen haben gezeigt, dass Kohäsion bei nicht zu feuchten Schüttgütern ab einer Korngröße von 100 – 200 µm vernachlässigt werden kann [Pah-1993]. Zur Verdeutlichung der Zwischenstellung

werden in Tabelle 3-1 einige Eigenschaften von Hookeschen Festkörper, Newtonscher Flüssigkeit und Schüttgut vergleichend gegenübergestellt [Sti-2009].

Tabelle 3-1: Vergleich der Eigenschaften von Festkörper, Flüssigkeit und Schüttgut

	Hookescher Festkörper	Schüttgut	Newtonsche Flüssigkeit
Übertragung von Zugspannungen	Ja	Nein oder nur sehr klein	Nein
Übertragung von Druckspannungen	Ja	Nur Ruhend	Nur Ruhend
Übertragung von Schubspannungen	Ja	Nur Ruhend	Nur bei Bewegung
Verformung, Fließen	Reversible Deformation	Irreversible Deformation	Irreversible Deformation
Fließgrenze	Konstant	Abhängig vom Spannungszustand	Nicht vorhanden
Dichte	Inkompressibel	Abhängig von Bewegung & Belastung	Inkompressibel
Spannungsverhältnis	$K = 0$	$0 < K < 1$	$K = 1$

Um ein Schüttgut in seinem Verhalten beschreiben zu können, besteht prinzipiell die Möglichkeit, die Kräfte zwischen den einzelnen Partikeln zu betrachten. Dies ist aufgrund der enormen Anzahl an Partikeln und deren Verschiedenartigkeit aber sehr aufwendig und erst in den letzten Jahren durch den Einsatz entsprechender rechnerbasierter Berechnungsverfahren – die Diskrete Elemente Methode – praktikabel einsetzbar. Der klassische Ansatz dagegen betrachtet das Schüttgut als ein Kontinuum. Entsprechend werden die Kräfte auf die Begrenzungsflächen der einzelnen Volumenelemente und die daraus resultierenden Verformungen betrachtet. Werden die Volumenelemente gegenüber den einzelnen Partikeln hinreichend groß gewählt, müssen die lokalen Vorgänge an den einzelnen Partikelkontakten nicht berücksichtigt werden und das Vorgehen ist zulässig [Sch-2009]. Betrachtet man, wie in dieser Arbeit vorgesehen, zudem nur kohäsionslose Schüttgüter, kann das Schüttgut durch die folgenden drei Kenngrößen hinreichend beschrieben werden:

- Schüttdichte ρ
- Innerer Reibwert des Schüttguts μ_S
- Äußerer Reibwert gegen Schneckenwendel und Rohr μ_F

Die Schüttdichte ρ ist die Dichte des Schüttguts inklusive der eingeschlossenen Luft oder Flüssigkeit. Sie ist als die Masse m einer Schüttgutprobe bezogen auf das von ihr eingenommene Volumen V gemäß

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3-1)$$

definiert. Im Gegensatz zur Partikeldichte ρ_{part} , die nur vom Schüttgut selbst abhängt, ist die Schüttdichte, neben der Korngröße, deren Verteilung und der enthaltenen Feuchtigkeit, stark vom Verfestigungszustand und damit den Spannungen im Schüttgut abhängig. Da diese während der Förderung im Schneckenförderer sehr volatil sind, kann die Schüttdichte keinesfalls als konstant angesehen werden. Als Kenngröße im Rahmen dieser Arbeit wird daher die Schüttdichte eines in Ruhe befindlichen, frei aufgeschütteten Schüttguts verwendet.

Die einzelnen Partikel des Schüttguts sind, auch wenn Kohäsionslosigkeit vorausgesetzt wird, dennoch reibungsbehaftet. Diese Reibung im Inneren des Schüttguts kann durch den inneren Reibwert des Schüttguts zahlenmäßig beschrieben werden. Der innere Reibwert μ_s ist durch die Beziehung

$$\mu_s = \tan \varphi_s \quad (3-2)$$

mit dem inneren Reibungswinkel φ_s , verknüpft. Der innere Reibungswinkel kann durch Messungen mit Translations- oder Ringschergeräten bestimmt werden. Dazu werden die Ober- und Unterseite einer mit einer Normalkraft F_N belasteten Schüttgutprobe mit konstanter Geschwindigkeit v horizontal gegeneinander verschoben und die dazu nötige Scherkraft F_S gemessen. Die prinzipielle Funktionsweise eines Translationsschergeräts nach *Jenike* [Jen-1964] ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

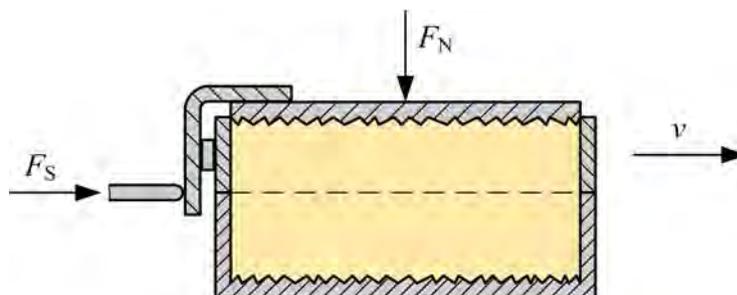


Abbildung 3-1: Funktionsprinzip eines Translationsschergeräts nach *Jenike* (Eigene Darstellung in Anlehnung an [Jen-1964])

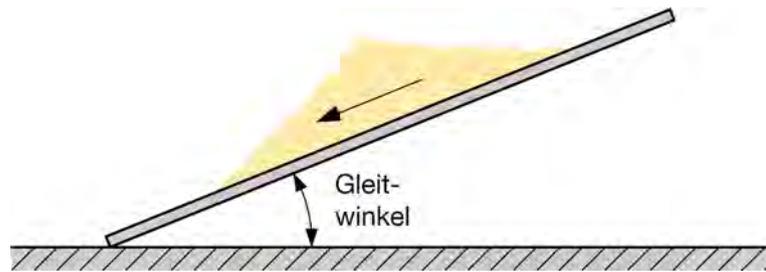


Abbildung 3-2: Gleitwinkel von Schüttgut auf einer geneigten Ebene

Ähnlich erfolgt die Bestimmung des äußeren Reibwerts, der die Gleitreibung zwischen dem Schüttgut und Bauteilen des Schneckenförderers beschreibt. Der äußere Reibwert μ_F kann ebenso wie der innere Reibwert durch den entsprechenden äußeren Reibungswinkel φ_F dargestellt werden. Der äußere Reibwinkel kann bei Vernachlässigung der Adhäsion – der Fall bei kohäsionslosen, gut fließenden Schüttgütern – mit dem Gleitwinkel des Schüttguts gleichgesetzt werden. Der Gleitwinkel ist der Winkel, den eine Ebene gegenüber der Horizontalen einnimmt, wenn das darauf liegende Schüttgut zu gleiten beginnt [FEM 2.481] (Abbildung 3-2). Zur Bestimmung des äußeren Reibwerts wird deshalb der Gleitwinkel des Schüttguts ermittelt.

Eine weitere Kenngröße zur Beschreibung von Schüttgütern ist die Korngröße. Sie stellt eine wichtige Klassifikationsgröße dar und beeinflusst in Simulationen nach der Diskrete Elemente Methode die Anzahl der Kontakte im System. Sie kann durch eine Siebanalyse nach *DIN 66165* [DIN 66165-1, DIN 66165-2] bestimmt werden.

Spannungen im Schüttgut

Da die wichtigsten Kenngrößen von Schüttgütern von den Spannungen im Schüttgut abhängen, wird auf diese im Folgenden näher eingegangen. Zunächst wird dazu ein Teil eines mit Schüttgut gefüllten Behälters, wie in Abbildung 3-3 dargestellt, betrachtet. Der Behälter sei dabei unendlich tief und hat reibungsfreie Innenwände. Auf das Schüttgutelement wirkt in vertikaler Richtung die positive Normalspannung σ_v . Aufgrund dieser vertikalen Normalspannung stellt sich im Schüttgut eine horizontale Normalspannung σ_h ein, die kleiner als die vertikale Normalspannung ist. Das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Normalspannung ist gemäß

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (3-3)$$

als Spannungsverhältnis K definiert. Typische Werte für Schüttgut liegen im Bereich von $K = 0,3 \dots 0,6$ [Sch-2009] und unterstreichen die Zwitterstellung von Schüttgut zwischen Festkörper und Fluid, wie bereits in Tabelle 3-1 aufgeführt.

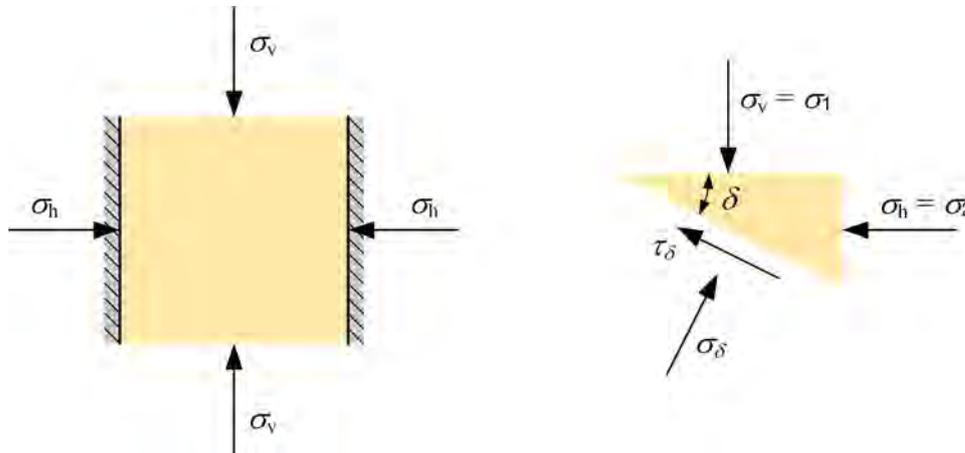


Abbildung 3-3: Spannungen an einem Schüttgutelement und einem daraus herausgeschnittenen dreieckigen Volumenelement

Da Schüttgut also in verschiedenen Richtungen verschieden große Spannungen aufweisen kann, können, ähnlich zu einem Festkörper, auch in anderen Ebenen als der Horizontalen und der Vertikalen Spannungen berechnet werden. Dies geschieht durch ein Kräftegleichgewicht an einem dreieckigen Volumenelement, das entlang einer um den Winkel δ geneigten Schnittebene aus dem Schüttgutelement herausgeschnitten wird. Der Einfachheit halber wird zunächst nur der ebene Spannungszustand, wie in Abbildung 3-3 dargestellt, betrachtet. Auf der Oberseite des Volumenelements wirken keine Schubspannungen. Da die Innenwände des Behälters als reibungsfrei angenommen sind, treten auch dort keine Schubspannungen auf. Die auftretenden horizontalen und vertikalen Normalspannungen sind damit Hauptspannungen. Die größere vertikale Hauptspannung wird als σ_1 , die kleinere Hauptspannung als σ_2 bezeichnet. Mit Hilfe eines Kräftegleichgewichts am freigeschnittenen Volumenelement lassen sich die Normalspannung σ_δ und die Schubspannung τ_δ in der um den beliebigen Winkel δ geneigten Schnittebene berechnen:

$$\sigma_\delta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos(2\delta) \quad (3-4)$$

$$\tau_\delta = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin(2\delta) \quad (3-5)$$

Die Hauptspannungen sowie die für beliebige Neigungswinkel der Schnittebene berechneten Wertepaare für Normalspannung und Schubspannung lassen sich in einem σ, τ -Diagramm darstellen und bilden einen Kreis, den Mohrschen Spannungskreis [Sch-2009]. Der Mohrsche Spannungskreis für den Spannungszustand des in Abbildung 3-3 eingeführten Volumenelements ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

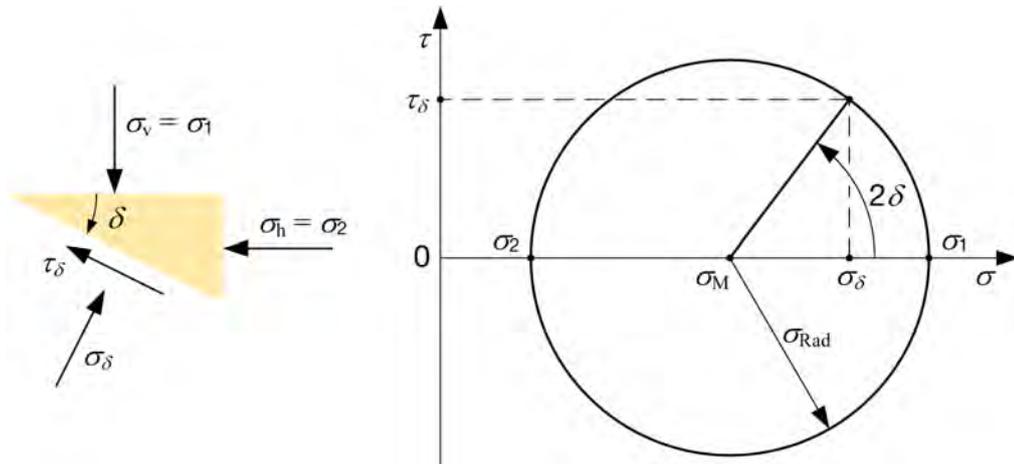


Abbildung 3-4: Mohrscher Spannungskreis für einen ebenen Spannungszustand

Der Neigungswinkel δ der Schnittebene eines Punkts zur Schnittebene eines anderen Punkts kann ebenfalls direkt abgelesen werden. Ausgehend vom Punkt einer bekannten Schnittebene, in Abbildung 3-4 die Hauptspannung σ_1 , ist der Punkt der gesuchten Schnittebene um den Winkel 2δ entgegengesetzt der Neigungsrichtung der Schnittebenen um den Mittelpunkt gedreht [Sch-2009]. Dessen Lage auf der Abszisse lässt sich rein aus den Hauptspannungen gemäß

$$\sigma_M = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (3-6)$$

berechnen, der Ordinatenwert beträgt $\tau_M = 0$. Der Radius des Mohrschen Spannungskreises σ_{Rad} ist ebenfalls ausschließlich von den Hauptspannungen abhängig und beträgt [Sch-2009]:

$$\sigma_{Rad} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (3-7)$$

Die Lage und Größe des Mohrschen Spannungskreises und damit der aktuelle Spannungszustand sind durch die Kenntnis der beiden Hauptspannungen somit hinreichend beschrieben.

Bei der Förderung im Schneckenförderer ist die Betrachtung eines ebenen Spannungszustands nicht mehr ausreichend, da eine dreiaxige Beanspruchung auf das Schüttgut wirkt. Es existieren damit drei aufeinander senkrechte Hauptspannungen, die den räumlichen Spannungszustand eindeutig beschreiben [Sch-2009]. Dieser ist ebenfalls im σ, τ -Diagramm darstellbar, indem für alle Kombinationen der drei Hauptspannungen jeweils die Mohrschen Spannungskreise eingezeichnet werden. Dies ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Per definitionem wird dabei die größte der drei Hauptspannungen mit σ_1 bezeichnet, die kleinste mit σ_2 und die mittlere mit σ_3 .

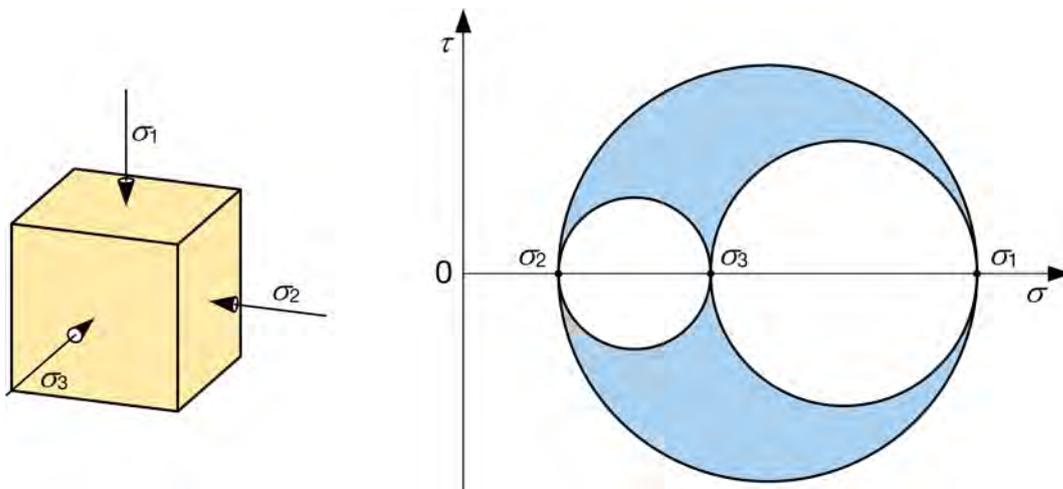


Abbildung 3-5: Mohrscher Spannungskreis für einen räumlichen Spannungszustand

Die Normal- und Schubspannungen einer beliebig geneigten Schnittebene liegen innerhalb des größten aber außerhalb der beiden kleineren Kreise im farbig markierten Bereich. Den größten Mohrschen Spannungskreis erhält man für die Ebene, in der die größte und die kleinste Hauptspannung wirken. Da die größten Schubspannungen ebenfalls in dieser Ebene wirken, ist es meist ausreichend, nur diese Ebene zu betrachten, wenn das Schüttgutverhalten beurteilt werden soll [Sch-2009].

Fließen von Schüttgütern

Bisher wurde bei den Betrachtungen des Schüttguts stets von einer elastischen Verformung ausgegangen. Ab einer gewissen Beanspruchung kommt es aber auch zu einer plastischen Verformung des Schüttguts, dem sogenannten Fließen. Dabei wirkt, hervorgerufen durch eine äußere Belastung, im Inneren des Schüttguts eine Schubspannung, die einen kritischen Wert überschreitet und durch die Reibung zwischen den Partikeln nicht mehr übertragen werden kann. Das Schüttgut gleitet dann entlang der Schnittebene aneinander ab, es fließt. Wie groß dieser kritische Wert ist,

der dem Fließen entgegenwirkt, und welche Kräfte das Schüttgut damit durch Reibung übertragen kann, wird durch Fließkriterien beschrieben. Wesentlich sind der wirkende Spannungszustand und dessen Vorgeschichte [Ros-1958].

Als klassisches Fließkriterium für Schüttgüter wird das Mohr-Coulombsche Fließkriterium aus der Bodenmechanik genutzt, das eine Analogie zur Festkörperreibung darstellt, aber prinzipiell nur für Schüttgüter mit konstanter Schüttdichte gilt [Pah-1993]. Da der Spannungszustand für kohäsionslose Schüttgüter nur geringen Einfluss auf die Schüttdichte hat, ist die Anwendung für ruhende oder langsam fließende Schüttgüter aber zulässig [Sch-1982]. Für schnellfließende Schüttgüter müssten dagegen noch weitere Aspekte berücksichtigt werden [Sta-1986]. Die maximal übertragbare Schubspannung τ in einer Schnittebene wird beim Fließkriterium nach Mohr-Coulomb in Abhängigkeit der wirkenden Normalspannung σ und des inneren Reibungswinkels φ_S des Schüttguts angegeben. Für Kohäsionslose Schüttgüter, wie in dieser Arbeit betrachtet, lautet das Mohr-Coulombsche Fließkriterium:

$$\tau = \tan \varphi_S \cdot \sigma \quad (3-8)$$

Die übertragbare Schubspannung lässt sich ebenfalls in ein σ, τ -Diagramm eintragen und bildet die sogenannte Coulombgerade, deren Winkel zur Abszisse dem inneren Reibungswinkel φ_S entspricht. Die Coulombgerade ist, zusammen mit Mohrschen Spannungskreisen verschiedener Spannungszustände, in Abbildung 3-6 dargestellt. Der räumliche Spannungszustand des Schüttguts wird dabei durch den Mohrschen Spannungskreis der größten und der kleinsten Hauptspannung repräsentiert.

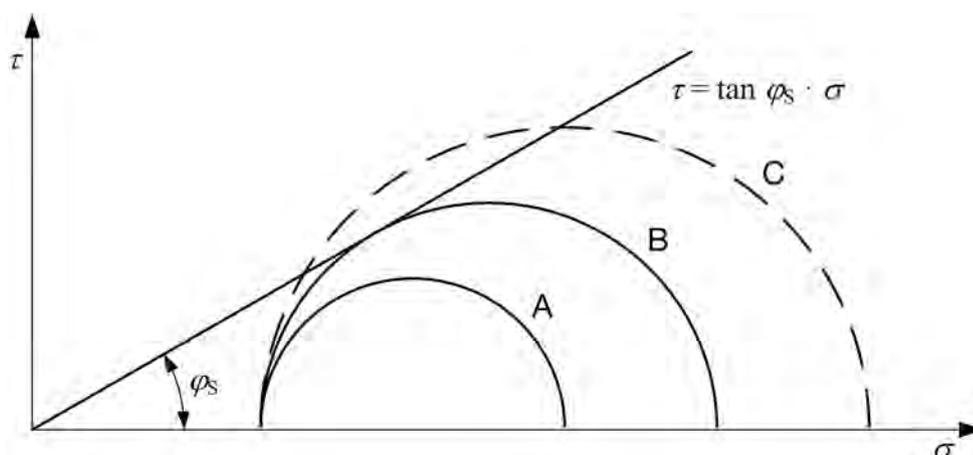


Abbildung 3-6: Fließkriterium für kohäsionslose Schüttgüter nach Mohr-Coulomb

Die Darstellung im σ, τ -Diagramm erlaubt eine einfache Interpretation des Mohr-Coulombschen Fließkriteriums. Liegt der Mohrsche Spannungskreis komplett unterhalb der Coulombgeraden, Fall A in Abbildung 3-6, befindet sich das Schüttgut in einem stabilen Zustand und unterliegt nur einer elastischen Verformung. Tangiert der Mohrsche Spannungskreis, wie bei Fall B, dagegen die Coulombgerade, befindet sich das Schüttgut im Grenzzustand des beginnenden Fließens. Die Coulombgerade wird deshalb nach *Jenike* auch Fließort genannt [Jen-1964]. Eine weitere Erhöhung der Spannung führt zum Bruch und damit zur plastischen Verformung. Ein Mohrscher Spannungskreis, wie Fall C, der die Coulombgerade in zwei Punkten schneidet, ist daher aus physikalischen Gründen nicht möglich, da mit Beginn des Fließens die Spannungen im Schüttgut abgebaut werden und eine weitere Erhöhung nicht mehr möglich ist.

Kritisches Hauptspannungsverhältnis

Der Grenzzustand zum Fließen kann auch durch das Verhältnis der Hauptspannungen beschrieben werden, die auf das Schüttgut im Moment des beginnenden Fließens wirken. Da, wie oben bereits genannt, alle möglichen Spannungszustände beim dreiachsigen Belastungsfall innerhalb des größten aber außerhalb der beiden kleineren Mohrschen Spannungskreise liegen, setzt das Fließen ein, wenn der Mohrsche Spannungskreis der größten Hauptspannung σ_1 und der kleinsten Hauptspannung σ_2 die Coulombgerade tangiert. Die mittlere Hauptspannung σ_3 hat auf den Beginn des Fließens demnach keinen Einfluss, da deren Mohrscher Spannungskreis die Coulombgerade nicht berühren. Abbildung 3-7 stellt dies für den räumlichen Spannungszustand eines kohäsionslosen Schüttguts dar.

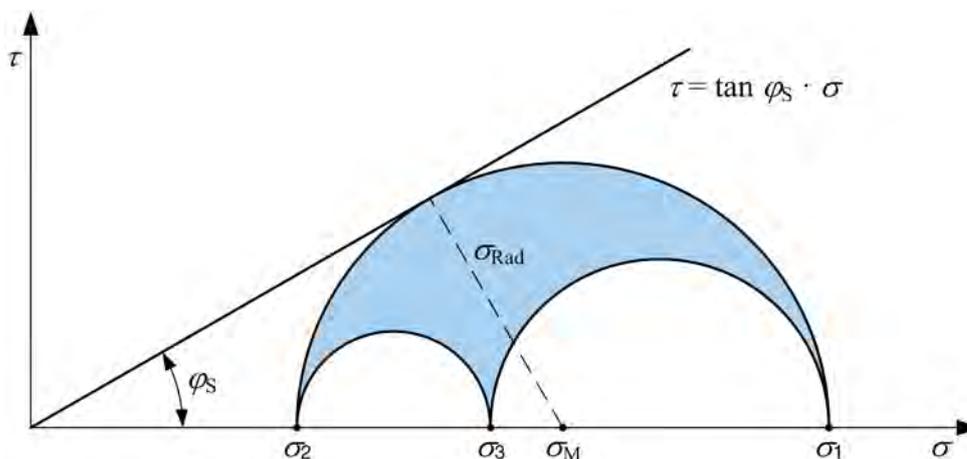


Abbildung 3-7: Räumlicher Grenzspannungszustand für kohäsionsloses Schüttgut

Das Verhältnis aus der größten Hauptspannung σ_1 und der kleinsten Hauptspannung σ_2 bei dem das Schüttgut zu Fließen beginnt, wird als kritisches Hauptspannungsverhältnis K_0 bezeichnet und berechnet sich gemäß

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = K_0 \quad (3-9)$$

Fließen tritt also nur bei einem bestimmten Verhältnis der größten und kleinsten Hauptspannung auf und ist nicht von der absoluten Höhe dieser abhängig. Das kritische Hauptspannungsverhältnis K_0 kann zudem in Abhängigkeit des inneren Reibungswinkels φ_s dargestellt werden:

$$K_0 = \frac{1 + \sin \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \varphi_s \right) \quad (3-10)$$

Das kritische Hauptspannungsverhältnis lässt nur Aussagen zum Spannungszustand zu, wenn sich das Schüttgut im Grenzzustand zum beginnenden Fließen befindet. Dann ermöglicht es aber bei einer gegebenen Hauptspannung die Bestimmung des Maximal- oder Minimalwerts der zweiten Hauptspannung. Als Ursache für das Fließen eines durch eine vertikale Spannung belasteten Schüttguts werden dabei zwei verschiedene Vorgänge unterschieden: das Zusammendrücken oder das Entfernen der seitlichen Begrenzungsfläche. Diese beiden Vorgänge führen zu verschiedenen Grenzzuständen im Schüttgut, die als aktiver und passiver Grenzzustand bezeichnet werden. Diese sind in Abbildung 3-8 schematisch dargestellt.

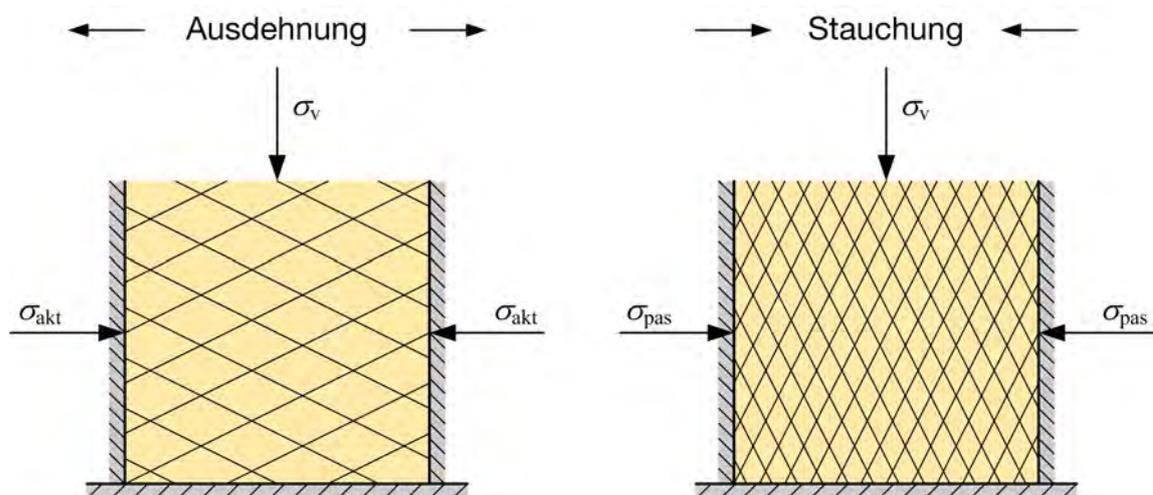


Abbildung 3-8: Aktiver und passiver Grenzzustand von Schüttgut

Die Schüttgüttkörper werden jeweils durch eine gleich große vertikale Hauptspannung σ_v belastet. Da die Seitenwände als reibungsfrei angenommen werden, sind die sich einstellenden horizontalen Normalspannungen ebenfalls Hauptspannungen. Die verschiedenen Grenzzustände lassen sich damit folgendermaßen erläutern, wobei die Definition des kritischen Hauptspannungsverhältnisses als Verhältnis von größter zu kleinster Hauptspannung zu beachten ist:

- Aktiver Grenzzustand

Durch das Entfernen der Seitenwände dehnt sich das Schüttgut zunächst elastisch aus und die horizontale Normalspannung verringert sich. Beim Erreichen der aktiven Grenzspannung beginnt das Schüttgut zu fließen, da das kritische Hauptspannungsverhältnis überschritten wird. Die aktive Grenzspannung σ_{akt} ist dabei kleiner als die vertikale Normalspannung σ_v und folgt aus

$$\sigma_{\text{akt}} = \frac{1}{K_0} \cdot \sigma_v \quad . \quad (3-11)$$

- Passiver Grenzzustand

Werden die Seitenwände zusammengedrückt und das Schüttgut gestaucht, erhöht sich die horizontale Normalspannung. Beim Erreichen der passiven Grenzspannung wird das kritische Hauptspannungsverhältnis überschritten und das Schüttgut fließt. Die passive Grenzspannung σ_{pas} berechnet sich nach

$$\sigma_{\text{pas}} = K_0 \cdot \sigma_v \quad . \quad (3-12)$$

In Abbildung 3-9 sind der aktive und passive Grenzzustand im σ, τ -Diagramm sowie die entsprechenden freigeschnittenen Schüttgüttkörper mit den Spannungen in den Bruchebenen dargestellt. Daraus lassen sich die Neigungswinkel der Bruchebenen des aktiven und passiven Zustands δ_{akt} und δ_{pas} bestimmen. Diese sind nur vom inneren Reibungswinkel φ_s abhängig und lauten für den aktiven Zustand

$$\delta_{\text{akt}} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \varphi_s \quad (3-13)$$

sowie für den passiven Zustand

$$\delta_{\text{pas}} = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \varphi_s \quad . \quad (3-14)$$

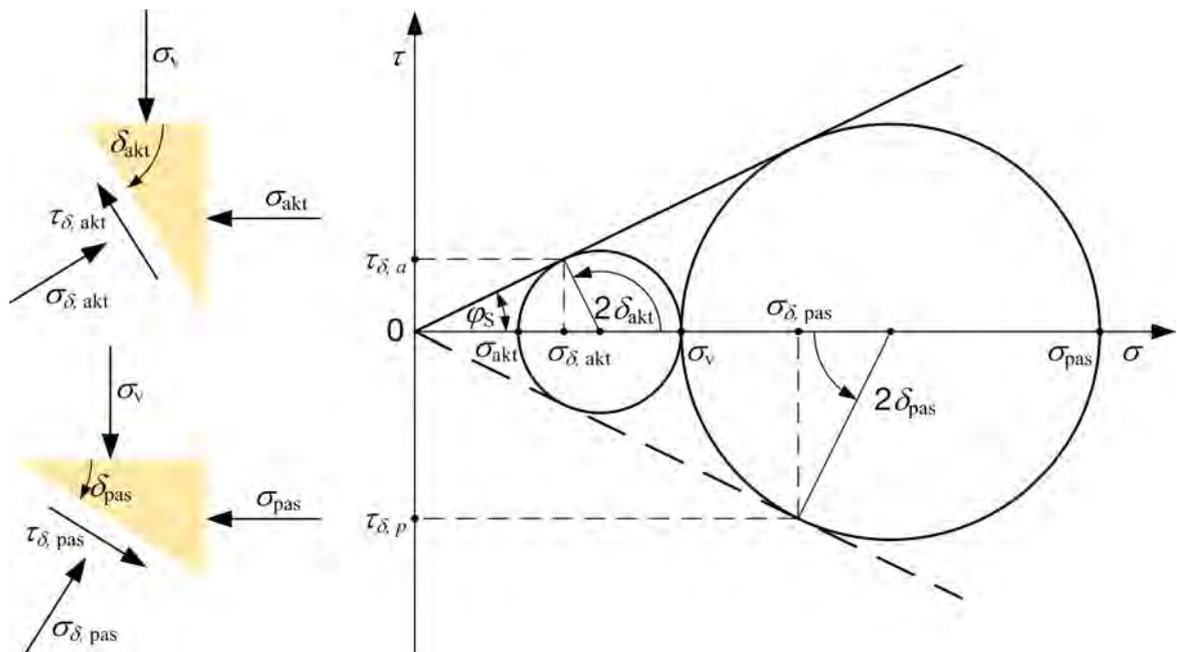


Abbildung 3-9: Aktiver und Passiver Grenzzustand im Mohrschen Spannungskreis

Mit den beschriebenen Zusammenhängen ist es somit möglich, ausgehend von einem bekannten Grenzzustand, den zugehörigen anderen Grenzzustand zu berechnen [Str-1968]. Die Grenzzustände wurden früh von *Rankine* beschrieben und werden nach ihm deshalb auch als aktiver und passiver Rankinescher Zustand bezeichnet [Ran-1857].

Erweitertes Fließgesetz

Wie bereits beschrieben gilt das Fließkriterium nach Mohr-Coulomb nur für ruhende oder langsam fließende Schüttgüter, da es aus der Bodenmechanik stammt. Treten, wie beim stark geneigten Schneckenförderer zu erwarten ist, im Schüttgut aber schnelle Scherbewegungen auf, ist ein erweitertes Fließgesetz zur Beschreibung der Schubspannungen nötig. Ein solches wurde von *Stadler* vorgeschlagen, indem er die in einem Volumenelement dissipierte Energie betrachtete [Sta-1986]. Mit Hilfe einer Energiebilanz kann zunächst der Zusammenhang zwischen der dissipierten Energierate dW' und der in der Scherzone übertragene Schubspannung τ am differentiellen Volumenelement dV mit dem Gradienten κ der Schergeschwindigkeit $v(r)$ beschrieben werden:

$$dW' = \tau \cdot \kappa \cdot dV \quad (3-15)$$

Für die Förderung im Schneckenförderer wird hierbei das in Abbildung 3-10 dargestellte Modell zweier, gegeneinander bewegter, unendlich ausgedehnter Zylinder genutzt.

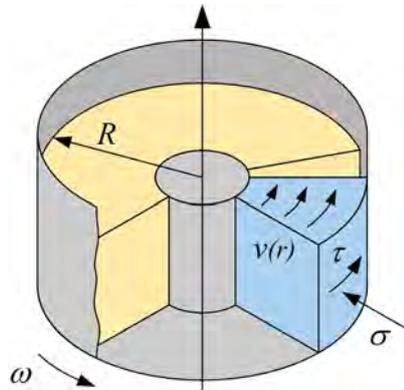


Abbildung 3-10: Geschwindigkeitsprofil von Schüttgut zwischen schnell bewegten Zylindern

Der Gradient der Schergeschwindigkeit κ kann für die rotatorische Bewegung in der um die Hochachse gekrümmten Scherzone in Abhängigkeit von Winkelgeschwindigkeit ω und Radius r angegeben werden [Gre-1994]:

$$\kappa = r \cdot \frac{d}{dr} \left(\frac{v(r)}{r} \right) = r \cdot \frac{d\omega}{dr} \quad (3-16)$$

Die im differentiellen Volumenelement dV dissipierte Energierate dW' ist die Summe der in den interpartikulären Vorgängen dissipierten Energieraten. Bei Vernachlässigung der dissipierten Energierate zur Deformation von Einzelpartikeln sind dies für trockenes und kohäsionsloses Schüttgut ein Anteil Coulombscher Reibung dW'_C und ein Impulsaustauschanteil dW'_{St} durch Partikelstöße [Sta-1986]:

$$dW' = dW'_C + dW'_{St} \quad (3-17)$$

Da auch geschwindigkeitsabhängige Festkörperreibung und interpartikuläre Zugspannungen vernachlässigt werden können, berechnet sich die dissipierte Energierate durch Festkörperreibung dW'_C aus dem inneren Reibwert μ_s , der Normalspannung σ auf das Schüttgut, dem betrachteten Volumen dV und dem Gradienten der Schergeschwindigkeit κ gemäß [Sta-1986]

$$dW'_C = \mu_s \cdot \sigma \cdot \kappa \cdot \text{sgn } \kappa \cdot dV \quad (3-18)$$

Der Anteil der dissipierten Energierate durch Partikelstöße dW'_{St} folgt mit dem Stoßfaktor β_{Part} , der von der Porosität des Schüttguts abhängt, der Partikeldichte ρ_{Part} , dem Partikeldurchmesser D_{Part} , dem betrachteten Volumen dV und dem Gradienten der Schergeschwindigkeit κ aus [Sta-1986]

$$dW'_{St} = \beta_{Part} \cdot \rho_{Part} \cdot D_{Part}^2 \cdot \kappa^3 \cdot \text{sgn } \kappa \cdot dV \quad (3-19)$$

Damit kann die im schnell fließenden Schüttgut übertragene Schubspannung in der Scherzone zusammenfassend angegeben werden:

$$\tau = (\mu_S \cdot \sigma + \beta_{Part} \cdot \rho_{Part} \cdot D_{Part}^2 \cdot \kappa^2) \cdot \text{sgn } \kappa \quad (3-20)$$

Gleichung (3-20) entspricht damit dem Fließgesetz nach Mohr-Coulomb, wie in Gleichung (3-8) angegeben, wenn der Anteil aus Partikelstößen, wie beim langsamen Fließen der Fall, wegfällt. Das Signum des Gradienten der Schergeschwindigkeit gibt lediglich die Richtung der Schubspannung vor.

Reibung zwischen Schüttgut und Wand

Bisher wurde, da das Verhalten im Inneren des Schüttguts von Interesse war, bei der Betrachtung eines Schüttgutelements vereinfachend davon ausgegangen, dass die Wände des Behälters reibungsfrei sind. Da das Schüttgut in der Realität aber immer an Wände grenzt, muss auch das dortige Reibverhalten berücksichtigt werden. Gerade beim Schneckenförderer ist der Widerstand, den das Schüttgut einer Verschiebung auf seiner Stützfläche entgegensetzt, von großer Bedeutung für den Fördervorgang und den Leistungsbedarf [Ron-2004a]. Analog zum Verhalten im Inneren des Schüttguts wird die übertragbare Wandschubspannung τ_W und damit der Widerstand gegen eine Bewegung für adhäsionsloses Schüttgut in Abhängigkeit von der herrschenden Wandnormalspannung σ_W zwischen Schüttgut und Stützfläche und dem äußeren Reibungswinkel φ_F bzw. dem äußeren Reibwert μ_F gegen die Wand gemäß

$$\tau_W = \tan \varphi_F \cdot \sigma_W = \mu_F \cdot \sigma_W \quad (3-21)$$

berechnet. Diese Funktion der übertragbaren Wandschubspannung kann, wie in Abbildung 3-11 gezeigt, ebenfalls im σ, τ -Diagramm dargestellt werden und bildet wieder eine Gerade, die als Wandfließort bezeichnet wird [Jen-1961]. Der Winkel des

Wandfließorts zur Abszisse ist dabei der äußere Reibungswinkel φ_F , der kleiner ist als der innere Reibungswinkel φ_S . Die Schnittpunkte des Wandfließorts mit dem Mohrschen Spannungskreis kennzeichnen das beginnende Fließen des Schüttguts an der Wand.

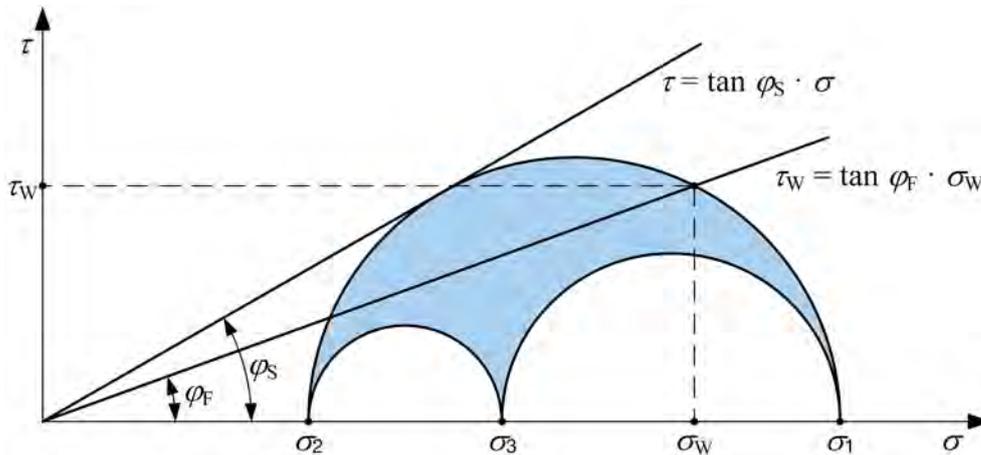


Abbildung 3-11: Wandfließort und Mohrscher Spannungskreis

3.2 Funktionsprinzip von Schneckenförderern

Die Förderung im Schneckenförderer ist, wie bereits beschrieben, abhängig von einer Vielzahl verschiedener Parameter. Wesentlich für die Förderbewegung ist dabei mit Sicherheit die Geometrie der Schneckenwendel. Bevor im Folgenden die Bewegung des Schüttguts und damit das Funktionsprinzip des Schneckenförderers erläutert werden, folgt daher zunächst die Beschreibung der Schneckenwendel unter geometrischen Gesichtspunkten. Die Schneckenwendel stellt, aus Sicht der Geometrie, eine Wendelfläche dar und kann als Verschraubung einer Strecke um eine Rotationsachse beschrieben werden, wie in Abbildung 3-12 dargestellt. Die erzeugende Strecke e , bei der Schneckenwendel begrenzt durch Schnecken- und Wellenradius, wird dazu, während einer vollen Umdrehung der Schneckenwendel, um genau eine Schneckenganghöhe S entlang der Rotationsachse proportional vorwärts geschoben. Aus Sicht der Geometrie sind die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten achsorthogonalen Schneckenwendeln geschlossene, gerade Strahlschraubflächen [Gie-1987].

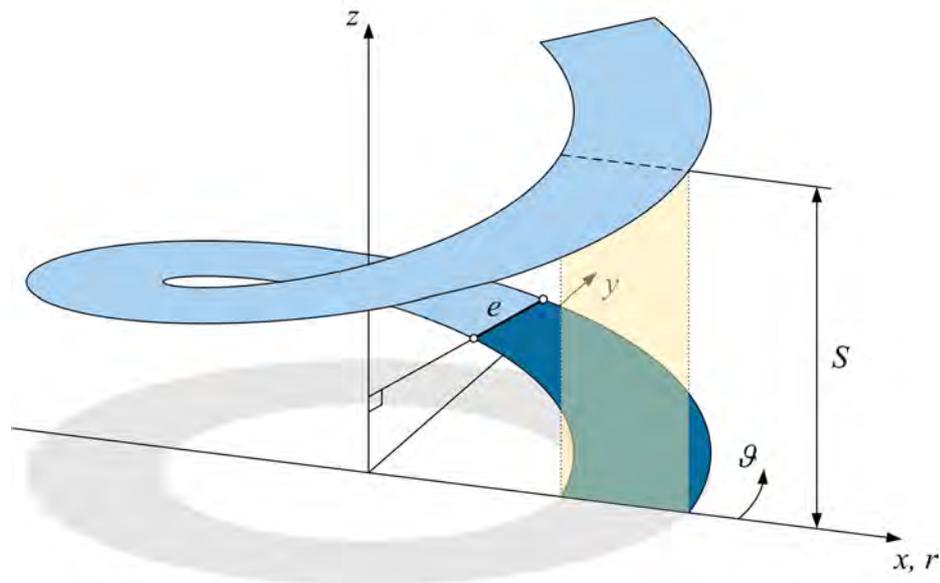


Abbildung 3-12: Geometrische Darstellung der Schneckenwendel als Verschraubung einer Strecke um eine Achse (Eigene Darstellung nach [Vol-2000])

Jeder beliebige Punkt der Schneckenwendel kann damit durch die in Abbildung 3-12 eingetragenen Koordinaten Radius r , Azimutwinkel ϑ und Höhe z im zylindrischen r, ϑ, z -Koordinatensystem eindeutig beschrieben werden. Die Umrechnung in Koordinaten eines kartesischen x, y, z -Koordinatensystems erfolgt mit Hilfe der Schneckenganghöhe S durch

$$x = r \cdot \cos \vartheta , \quad (3-22)$$

$$y = r \cdot \sin \vartheta , \quad (3-23)$$

$$z = \frac{S}{2\pi} \cdot \vartheta . \quad (3-24)$$

Der Steigungswinkel α der Schneckenwendel gegenüber der achsorthogonalen Ebene ist nur abhängig von der Radialkoordinate r . Mit der Schneckenganghöhe S berechnet er sich gemäß

$$\tan \alpha = \frac{S}{2\pi \cdot r} . \quad (3-25)$$

Die Steigung der Schneckenwendel ist damit an der Schneckenwelle am Größten und nimmt mit wachsendem Radius kontinuierlich ab.

Nach Klärung der zugrundeliegenden Geometrie kann nun im Folgenden das Funktionsprinzip des Schneckenförderers beschrieben werden. Die Bewegung des Schüttguts und damit die Förderung im Schneckenförderer basiert, wie von *Vollmann* beschrieben wurde, unabhängig von den vorliegenden Einflussparametern immer auf einer Relativbewegung zwischen der Schneckenwendel und dem zu fördernden Schüttgut. Ursächlich für diese Geschwindigkeitsdifferenz sind eine Normalkraft, die das Schüttgut auf den Trog ausübt, und die daraus resultierende Reibungskraft, die der absoluten Schüttgutbewegung entgegenwirkt. In Folge der Reibungskraft wird das Schüttgut gegenüber der Schneckenwendel verzögert, diese gleitet unter dem Schüttgut hinweg und bewegt das Schüttgut in axialer Richtung vorwärts. Die Entstehung der Normalkraft ist in Abhängigkeit der Schneckenneigung aber auch der Schneckendrehzahl völlig verschieden und liegt in der unterschiedlichen Bewegung des Schüttguts begründet [Vol-2000]. Nach *Vollmann* lassen sich hier drei charakteristische Bereiche identifizieren. Es zeigen sich damit deutliche Parallelen zwischen der Förderung von Schüttgut und der eines Einzelkörpers, die von *Böttcher* [Böt-1963] beschrieben wurde und ebenfalls in drei Bereiche eingeteilt werden kann. Im Folgenden wird die verschiedenartige Bewegung des Schüttguts in den drei Bereichen gemäß den Ergebnissen von *Vollmann* näher beschrieben, da sie entscheidenden Einfluss auf die Vorgehensweise in dieser Arbeit hat [Vol-2000].

Bereich I: Translatorische Schüttgutbewegung

Nach *Vollmann* und *Fottner* beschreibt der Bereich I die Förderung in horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderern und entspricht bezüglich des Gültigkeitsbereichs der *DIN 15262* [DIN 15262]. Die Bewegung des Schüttguts ist dadurch gekennzeichnet, dass das Schüttgut während der Förderung im Trog liegt und dessen Gewichtskraft ursächlich für die oben beschriebene notwendige Normalkraft ist. Da ein kleiner Anteil der Gewichtskraft auch normal zur Schneckenwendel wirkt, tritt dort ebenfalls eine Reibungskraft auf, die das Schüttgut mit Beginn der Förderung von der untersten Lage des Trogs in Drehrichtung der Schneckenwendel auslenkt. Der Winkel, um den das Schüttgut gegenüber der Ruheposition ausgelenkt wird, steigt dabei mit der Schneckendrehzahl an. Die Reibungskraft zwischen Schüttgut und Trog wirkt dieser Bewegung entgegen und es stellt sich ein stabiles Gleichgewicht ein. Der maximale Auslenkwinkel kann dabei einen Wert von $\vartheta = 90^\circ$ nicht überschreiten, da anschließend keine Gewichtskraftkomponente mehr normal zum Trog wirkt. Die rotierende Schneckenwendel schiebt das Schüttgut damit stationär

und rein translatorisch in axialer Richtung vorwärts. Während einer Umdrehung der Schneckenwendel legt das Schüttgut dabei genau den Weg einer Schneckenganghöhe zurück. Diese rein translatorische Bewegung des Schüttguts liegt auch bei Schneckendrehzahlen oberhalb der in der *DIN 15262* [DIN 15262] empfohlenen Werte noch vor und kann analytisch einfach beschrieben werden [Vol-2000, Fot-2002].

Bereich II: Übergangsbereich zwischen translatorischer und schraubenlinienförmiger Schüttgutbewegung

Außerhalb des Gültigkeitsbereichs der *DIN 15262* [DIN 15262] ändert sich nach *Vollmann* das Bewegungsverhalten des Schüttguts grundlegend. Dieses böschet bei der Förderung grundsätzlich in Drehrichtung der Schneckenwendel und an dieser auf. Werden nun die Schneckenneigung oder der Füllungsgrad zu groß, erreicht das Schüttgut die Oberkante der Schneckenwelle und fließt über diese hinweg ohne axial gefördert zu werden, durchaus auch in den vorherigen Schneckengang zurück. Mit steigender Schneckendrehzahl nimmt dieser Bewegungsanteil immer mehr zu. Aufgrund dieser Nebenströme, die nicht in Förderrichtung weisen, sinkt der Volumenstrom gegenüber einer ausschließlich geradlinigen Förderung bei ansonsten gleichen Parametern ab. Entgegen der von *Böttcher* [Böt-1963] beschriebenen Einzelkörperförderung ist bei der Förderung von Schüttgut dennoch ein stabiler Fördervorgang möglich, der allerdings analytisch nicht beschrieben werden kann. Der Bereich II bildet demnach den Übergang von der rein translatorischen Schüttgutbewegung des Bereichs I zur gleichmäßigen schraubenlinienförmigen Schüttgutbewegung im Bereich III, die im Folgenden beschrieben wird [Vol-2000].

Bereich III: Schraubenlinienförmige Schüttgutbewegung

Die Förderung in stark geneigten bis vertikalen Schneckenförderern wird nach *Vollmann* durch den Bereich III beschrieben. Durch die große Neigung der Schneckenachse gegenüber der Horizontalen wirkt hier ein großer Anteil oder die gesamte Gewichtskraft des Schüttguts auf der Schneckenwendel und nicht mehr auf dem Trog. Bei beginnender Förderung rotiert das Schüttgut nun, bedingt durch die Reibung zwischen Schneckenwendel und Trog, zunächst mit der Schneckenwendel und übt infolge der aus der Drehbewegung resultierenden Zentrifugalkraft die zur Förderung notwendige Normalkraft auf den Trog, wie oben beschrieben, aus. Der translatorische Vorschub entlang der Schneckenachse wird also durch eine Rotationsbewegung überlagert und das Schüttgut bewegt sich folglich entlang einer Schraubenlinie

mit über dem Umfang gleichmäßiger Steigung vorwärts. Der sich einstellende Steigungswinkel der Schraubenlinie, auf der sich das Schüttgut bewegt, gegenüber einer zur Schneckenachse orthogonalen Ebene ist dabei verschieden vom Steigungswinkel der Schneckenwendel und wird als Förderwinkel ψ bezeichnet. Da einzig die Zentrifugalkraft infolge der Rotation das Abwärtsgleiten des Schüttguts auf der Schneckenwendel verhindert und die zur Förderung notwendige Reibungskraft aufbaut, ist zur Förderung im Bereich III wie auch teilweise schon im Bereich II eine Mindestdrehzahl der Schneckenwendel erforderlich. Diese muss so groß sein, dass das Schüttgut im ständigen Kontakt mit dem Trog steht, das heißt, die Zentrifugalkraft, mit der das Schüttgut auf den Trog wirkt, muss größer als die entgegengesetzt wirkende Normalkomponente der Gewichtskraft sein. Die analytische Beschreibung der Förderung im Bereich III ist möglich, aber sehr rechenintensiv [Vol-2000].

Neben der Beschreibung dieser drei Bereiche stellte *Vollmann* fest, dass eine scharfe Abtrennung der Bereiche oder die Definition von exakten Übergangsbedingungen aufgrund des komplexen Schüttgutverhaltens nicht möglich sind. Eine Einteilung der Förderung in die drei Bereiche kann daher nur qualitativ erfolgen, wie in Abbildung 3-13 dargestellt. In Anlehnung an die Aufteilung von Vollmann, aber um heute gebräuchliche höhere Werte für die Schneckendrehzahl erweitert, sind die Bereiche in Abhängigkeit von Schneckenneigung und Schneckendrehzahl dargestellt [Vol-2000].

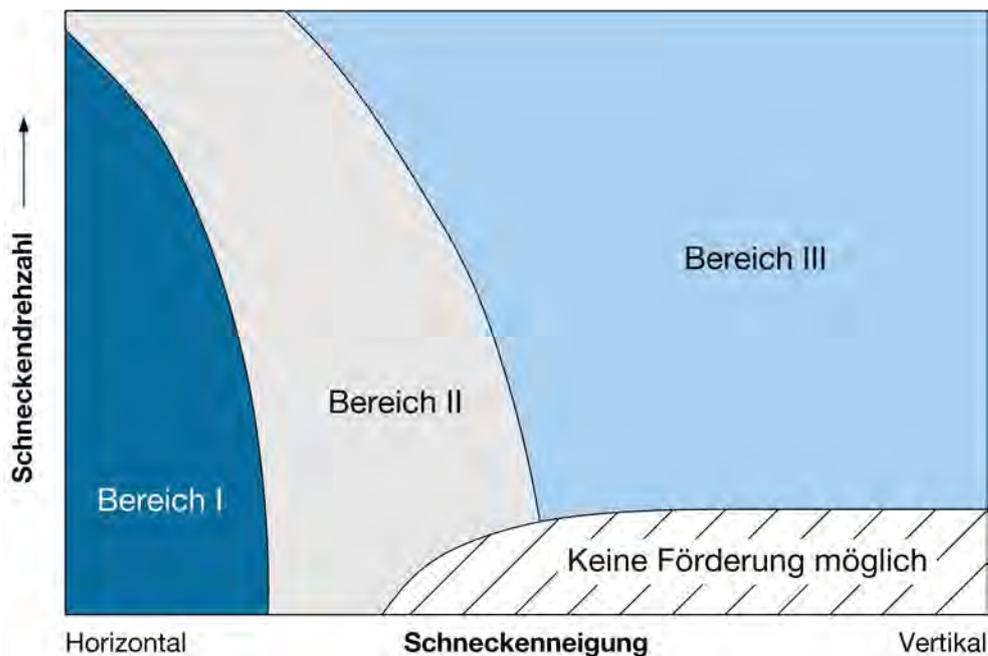


Abbildung 3-13: Qualitative Einteilung der Förderung im Schneckenförderer in die Bereiche I, II und III in Abhängigkeit von Schneckendrehzahl und Schneckenneigung (in Anlehnung an [Vol-2000])

3.3 Grundlegende Ansätze für Berechnungsverfahren

Grundlegende Ansätze zur Auslegung von Schneckenförderern hat *Fottner* in seiner Arbeit dargelegt. Diese sind zwar für die Leistungsberechnung von Schneckenförderern beschrieben, können aber auch auf die Dimensionierung von Schneckenförderern übertragen werden. Die Verfahren basieren auf theoretischen Herangehensweisen der Analytik, auf versuchsgestützten Methoden der Empirik oder auf Mischformen aus Beiden. Je nach Gewichtung der analytischen und empirischen Bestandteile werden die im Folgenden erläuterten vier Ansätze unterschieden [Fot-2002].

Analytischer Ansatz

Der analytische Ansatz baut auf den physikalischen Wirkprinzipien auf und soll das Problem, also die Bewegung und Wechselwirkungen des Schüttguts während der Förderung, über bekannte Rechenverfahren und Modelle möglichst exakt und vollständig beschreiben. Dadurch führen analytische Ansätze oft zu Modellen mit hoher Komplexität. Beim Schneckenförderer sind analytische Ansätze für manche Anteile, wie die Hubleistung oder die Wendelreibleistung, gut möglich, für andere, wie die Leistungsverluste im Schneckenspalt, hingegen nicht [Fot-2002]. Dennoch wurden analytische Berechnungsverfahren im Bereich der Schneckenförderer bereits mehrfach zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens des Schüttguts im Schneckenförderer eingesetzt. Da sie wichtige Erkenntnisse für den weiteren Verlauf dieser Arbeit liefern, werden die von *Böttcher* durchgeführte Analyse eines Einzelkörpers [Böt-1963] und die von *Vollmann* durchgeführte Beschreibung der Schüttgutförderung [Vol-2000] in den nächsten Abschnitten genauer beschrieben.

Semi-analytischer Ansatz

Auch beim semi-analytischen Ansatz liegt der Schwerpunkt auf analytisch berechenbaren Größen. Um analytisch nicht greifbare Einflüsse integrieren zu können, werden empirisch ermittelte oder abgeschätzte konstante Koeffizienten verwendet. Der Berechnungsaufwand sinkt dadurch deutlich. Dies wird allerdings mit dem Nachteil erkauft, dass nicht analytisch erfasste, sondern durch den Vorfaktor integrierte Einflüsse, bei Variation der Parameter mit immer analogem Verhalten in die Rechnung eingehen. Dies entspricht nicht immer der Wirklichkeit [Fot-2002]. Ein Beispiel für diesen Ansatz stellt die Leistungsberechnung der *DIN 15262* [DIN 15262] dar, die im Anschluss an die analytischen Ansätze ebenfalls beschrieben wird.

Semi-empirischer Ansatz

Der semi-empirische Ansatz erweitert den semi-analytischen Ansatz indem er den empirischen Faktor als mehrdimensionale Größe definiert. Dadurch können mehrere Einflussfaktoren differenziert betrachtet und in das Berechnungsverfahren integriert werden. Es liegt damit nahe, dass ein Schwerpunkt des Berechnungsverfahrens auf der Bestimmung des empirischen Beiwerts liegt. Bezugswert für den empirischen Beiwert bleibt ein analytischer Grundansatz. Durch diese Vorgehensweise stellt ein semi-empirischer Ansatz in der Regel ein handhabbares Berechnungsverfahren dar, das die Realität bei vertretbarem Rechenaufwand möglichst genau abbildet [Fot-2002]. Die Berechnungsansätze von *Fottner*, *Rong* und *Blomeyer* für horizontale bis leicht geneigte und vertikale Schneckenförderer sind als semi-empirische Verfahren realisiert und werden am Ende dieses Kapitels vorgestellt [Fot-2002, Ron-2004a, Blo-2008].

Empirischer Ansatz

Beim empirischen Vorgehen schließlich spielt es nur noch eine untergeordnete Rolle, welche physikalischen Effekte der Förderung zugrunde liegen. Die jeweiligen Einflussgrößen müssen aber gemäß ihrer tatsächlichen Bedeutung berücksichtigt werden und gehen, ebenso wie die angesetzten mathematischen Zusammenhänge, als rein empirisch ermittelte Faktoren, ohne Verwendung einer analytischen Bezugsgröße, in die Rechnung ein. Obwohl solche rein empirischen Ansätze in manchen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen schon lange angewendet werden, der Bereich der Werkzeugmaschinen kann hier als Beispiel genannt werden, hat sich ein solches Vorgehen für Schneckenförderer bisher noch nicht durchgesetzt [Fot-2002].

3.4 Analytisches Modell eines Einzelkörpers im geneigten Schneckenförderer

Die erste umfassende Analyse der Förderung in einem geneigten Schneckenförderer wurde von *Böttcher* durchgeführt. Er betrachtete dazu einen Einzelkörper und beschrieb analytisch dessen Bewegungsgleichung sowie die grundlegenden Verlustleistungsanteile. Obwohl die Betrachtung eines Einzelkörpers die tatsächliche Situation bei der Förderung von Schüttgut im Schneckenförderer stark vereinfacht und die Ergebnisse, wie spätere Untersuchungen zeigten [Gab-1981], nicht komplett übertragbar sind, bietet sie dennoch einen sehr guten Einblick in das Förderprinzip

3.4 Analytisches Modell eines Einzelkörpers im geneigten Schneckenförderer

und stellt die Basis für alle bisher erarbeiteten analytischen Modelle für die Schüttgutförderung dar. Im Folgenden werden daher die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit von *Böttcher* dargelegt [Böt-1963].

Die Betrachtung eines punktförmigen Einzelkörpers erfordert die Festlegung von zwei Randbedingungen, die der Bestimmung der Bewegungsgleichung zugrunde liegen:

- Der Einzelkörper ist während der Förderung immer mit der Innenseite des Förderrohrs und der Schneckenwendel in Kontakt. Er gleitet entlang dieser Flächen und wird von ihnen geführt.
- Die Förderung des Einzelkörpers resultiert aus den am Einzelkörper angreifenden Kräften. Dies sind die auf den Einzelkörper wirkende Gewichtskraft sowie die Reibungskräfte in den Berührungspunkten zwischen Einzelkörper und Schneckenwendel beziehungsweise Einzelkörper und Förderrohr.

Aus der ersten Randbedingung und der Bestrebung die auftretenden Kräfte, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen möglichst einfach berechnen zu können, folgt für die weiteren Betrachtungen die Einführung eines bewegten Koordinatensystems (KOS). Das gewählte t,n,b -KOS mit Koordinaten in tangentialer, normaler und binormaler Richtung der Bahnkurve des Einzelkörpers ist in Abbildung 3-14 in einem um den Winkel β beliebig geneigtem Schneckenförderer dargestellt.

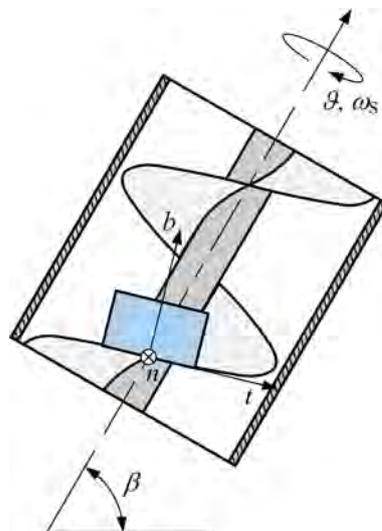


Abbildung 3-14: Bei der Betrachtung eines Einzelkörpers benutztes t,n,b -Koordinatensystem eines beliebig geneigten Schneckenförderers

Aus der zweiten Randbedingung folgen die Kräfte, die am Einzelkörper angreifen. Für die Gewichtskraft ergeben sich in Abhängigkeit der Masse des Einzelkörpers m , der Schneckenneigung β , des Steigungswinkels der Schneckenwendel α sowie der Winkellage des Einzelkörpers in azimuthaler Richtung ϑ die in das t,n,b -KOS transformierten Komponenten

$$G_t = m \cdot g \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \vartheta - \sin \alpha \cdot \sin \beta) , \quad (3-26)$$

$$G_n = m \cdot g \cdot (-\cos \vartheta \cdot \cos \beta) , \quad (3-27)$$

$$G_b = m \cdot g \cdot (-\sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \vartheta - \cos \alpha \cdot \sin \beta) . \quad (3-28)$$

Die Reibkraft zwischen Einzelkörper und Förderrohr R_R berechnet sich gemäß der Coulombschen Reibung aus dem Reibwert zwischen Einzelkörper und Förderrohr μ_R sowie der wirkenden Normalkraft. Diese setzt sich aus der Normalkomponente der Gewichtskraft G_n und der Zentrifugalkraft F_Z aufgrund der Rotation des Einzelkörpers zusammen. Für die Reibkraft am Förderrohr R_R folgt

$$R_R = \mu_R \cdot (m \cdot r_a \cdot \omega_G^2 - G_n) \quad (3-29)$$

mit der Masse des Einzelkörpers m , dem Schneckenradius r_a und der Winkelgeschwindigkeit des Einzelkörpers ω_G . Wie bereits für die Förderung von Schüttgut beschrieben, wird auch für den Einzelkörper die momentane Bewegungsrichtung durch den Förderwinkel ψ beschrieben. Da eine Reibungskraft immer entgegen der Bewegung wirkt, schließt auch die Wirkungslinie der Reibkraft am Förderrohr R_R gegenüber einer achsorthogonalen Ebene den Förderwinkel ψ ein.

Die Reibkraft zwischen Einzelkörper und Schneckenwendel R_W wirkt in tangentialer Richtung und entgegen der relativen Bewegungsrichtung des Einzelkörpers zur Schneckenwendel. Sie berechnet sich, wiederum nach dem Coulombschen Ansatz, aus dem Reibwert zwischen Einzelkörper und Schneckenwendel μ_W und der wirkenden Normalkraft auf die Schneckenwendel. Diese setzt sich hier aus den Binormalkomponenten der Gewichtskraft G_b und der Reibungskraft am Förderrohr R_R nach Gleichung (3-29) zusammen:

$$R_W = \mu_W \cdot (R_R \cdot \sin(\alpha + \psi) - G_b) \quad (3-30)$$

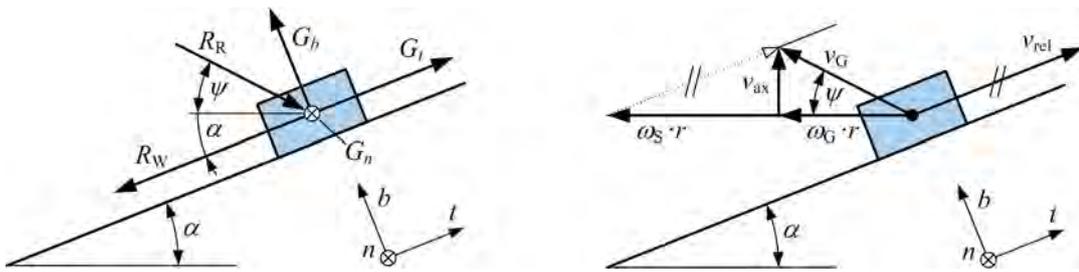


Abbildung 3-15: Kräftegleichgewicht (links) und Geschwindigkeitsdreieck (rechts) für einen Einzelkörper in der t,b -Ebene

Damit sind alle auf den Einzelkörper wirkenden Kräfte, wie in Abbildung 3-15 (links) dargestellt, dem Betrag und der Richtung nach beschrieben und die Bewegungsgleichung des Einzelkörpers kann aus dem 2. Newtonschen Gesetz abgeleitet werden. Dazu genügen die Kraftkomponenten in tangentialer Richtung:

$$m \cdot a_t = \sum F_t = G_t + R_R \cdot \cos(\alpha + \psi) - R_W \quad (3-31)$$

In Gleichung (3-31) sind damit nur noch der Förderwinkel ψ und die Beschleunigung des Einzelkörpers in tangentialer Richtung a_t als unbekannte Größen enthalten. Gemäß den oben beschriebenen Randbedingungen und den bereits bekannten Wirkungslinien der Kräfte auf den Einzelkörper können diese Größen aus den in Abbildung 3-15 (rechts) dargestellten Geschwindigkeitsdreiecken abgeleitet werden. Für den Förderwinkel ψ ergibt sich

$$\psi = \arctan\left(\left(\frac{\omega_S}{\omega_G} - 1\right) \cdot \tan \alpha\right) \quad (3-32)$$

aus den Winkelgeschwindigkeiten des Einzelkörpers ω_G und der Schneckenwendel ω_S sowie dem Steigungswinkel der Schneckenwendel α . Die Beschleunigung des Einzelkörpers in tangentialer Richtung a_t folgt aus der zeitlichen Ableitung der relativen Geschwindigkeit v_{rel} des Einzelkörpers zur Schneckenwendel

$$a_t = \frac{dv_{rel}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{r_a \cdot (\omega_S - \omega_G)}{\cos \alpha}\right) = -\frac{r_a}{\cos \alpha} \cdot \dot{\omega}_G \quad (3-33)$$

mit dem Schneckenradius r_a , der Winkelbeschleunigung des Einzelkörpers $\dot{\omega}_G$ sowie dem Steigungswinkel der Schneckenwendel α .

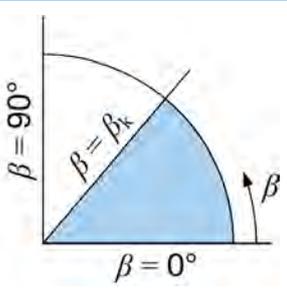
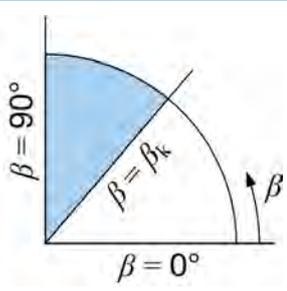
Setzt man nun die Gleichungen (3-26), (3-27), (3-28), (3-29), (3-30), (3-32) und (3-33) in Gleichung (3-31) ein, folgt die Bewegungsgleichung eines Einzelkörpers im beliebig geneigten Schneckenförderer:

$$\begin{aligned}
 & \frac{r_a}{\cos \alpha} \cdot \dot{\omega}_G + g \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \vartheta - \sin \alpha \cdot \sin \beta) + \\
 & + \mu_R \cdot (r_a \cdot \omega_G^2 + g \cdot (\cos \vartheta \cdot \cos \beta)) \cdot \cos \left(\alpha + \arctan \left(\left(\frac{\omega_S}{\omega_G} - 1 \right) \cdot \tan \alpha \right) \right) - \\
 & - \mu_W \cdot \mu_R \cdot (r_a \cdot \omega_G^2 + g \cdot (\cos \vartheta \cdot \cos \beta)) \cdot \sin \left(\alpha + \arctan \left(\left(\frac{\omega_S}{\omega_G} - 1 \right) \cdot \tan \alpha \right) \right) - \\
 & - \mu_W \cdot g \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \vartheta + \cos \alpha \cdot \sin \beta) = 0
 \end{aligned} \tag{3-34}$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung beschreibt die Bewegung des Einzelkörpers im beliebig geneigten Schneckenförderer vollständig und ist Grundlage der Einteilung in drei charakteristische Bewegungszustände in Abhängigkeit von Schneckenneigung und Schneckendrehzahl [Böt-1963]. Diese Bereichseinteilung durch *Böttcher* bildet auch die Grundlage der in Abschnitt 3.2 bereits beschriebenen Einteilung für die Förderung von Schüttgut und wird im Folgenden beschrieben.

Im Bereich I wird der Einzelkörper unabhängig von der Schneckendrehzahl translatorisch vorwärts bewegt, wobei er während einer Umdrehung der Schneckenwendel den Weg einer Schneckenganghöhe zurücklegt. Er liegt dabei auf dem Förderrohr und wird von der untersten Mantellinie des Förderrohrs um einen bestimmten Winkel ausgelenkt. Überschreitet die Schneckenneigung bei geringen Schneckendrehzahlen einen kritischen Wert, löst sich der Einzelkörper vom Förderrohr und rutscht auf der Schneckenwendel unkontrolliert nach unten oder verharrt auf der Schneckenwendel. In diesem, dem Bereich II zugeordnetem Zustand, ist für den Einzelkörper weder eine Förderung noch eine analytische Beschreibung möglich. Erst beim Überschreiten einer kritischen Schneckendrehzahl, ab der sich der Einzelkörper gerade nicht mehr vom Förderrohr ablöst, wird die wirkende Zentrifugalkraft so groß, dass der Einzelkörper wieder durch das Förderrohr geführt wird und eine analytische Beschreibung wieder möglich ist. Dieser als Bereich III bezeichnete Zustand zeichnet sich durch eine schraubenlinienförmige Bewegung des Einzelkörpers aus. Die Steigung der Bahnkurve ist dabei variabel aber periodisch pro Umdrehung und abhängig von der Schneckendrehzahl [Böt-1963]. Die wichtigsten Ergebnisse sind für die berechenbaren Bereiche I und III in Tabelle 3-2 aufgeführt.

Tabelle 3-2: Überblick der wichtigsten Ergebnisse der Analyse der Einzelkörperförderung im beliebig geneigten Schneckenförderer (nach [Böt-1963])

	Bereich I	Bereich III
Bereichseinteilung		
Gültigkeitsbereich der Schneckenneigung β	$0^\circ \leq \beta < \beta_k$	$\beta_k \leq \beta < 90^\circ$
Kritische Schneckenneigung β_{krit}	$\beta_{krit} = 90^\circ - (\alpha + \arctan \mu_w)$	
Bewegungsform im Beharrungszustand	Translatorisch	Schraubenlinienförmig
Gültigkeitsbereich der Schneckendrehzahl n	$0 < n < \infty$	$n_k \leq n < \infty$
Kritische Schneckendrehzahl n_{krit}	-	$n_{krit} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g \cdot \sin \beta}{\mu_R \cdot r_a} \cdot \tan(\alpha + \rho)}$
Fördergeschwindigkeit in axialer Richtung v_{ax}	$v_{ax} = r_a \cdot \omega_S \cdot \tan \alpha (= n \cdot S)$	$v_{ax} = r_a \cdot (\omega_S - \omega_G) \cdot \tan \alpha$
Förderwinkel ψ	$\psi = \frac{\pi}{2}$	$\tan \psi = \left(\frac{\omega_S}{\omega_G} - 1 \right) \tan \alpha$

3.5 Analytisches Modell von Schüttgut im stark geneigten Schneckenförderer

Wie der Arbeit von *Böttcher* [Böt-1963] nachfolgende Untersuchungen zeigten, unterscheidet sich die Förderung von Schüttgut im Schneckenförderer unter anderem bedingt durch die Komplexität des Schüttgutverhaltens von der Förderung eines Einzelkörpers. Insbesondere stellte *Gabler* fest, dass sich Schüttgut im geneigten Schneckenförderer stationär auf einer Schraubenlinie konstanter Steigung aufwärts bewegt [Gab-1981]. In mehreren Arbeiten wurden deshalb Modelle entwickelt, mit denen die Erkenntnisse aus der Analyse der Einzelkörperbewegung mit denen der Schüttgutmechanik zusammengeführt und somit eine ausreichend genaue Berechnung ermöglicht werden konnten. Als letzte Arbeit in dieser Reihe werden im Fol-

genden die Ergebnisse von *Günthner* und *Vollmann* [Gün-2000a, Gün-2000c, Vol-2000] vorgestellt. Diese bauen auf den vorangegangenen Arbeiten von *Gabler* [Gab-1981], *Ertl* [Ert-1988], *Stahl* [Sta-1994] und *Greinwald* [Gre-1994] auf und kommen im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch zur Anwendung. Das Modell beschreibt bei beliebiger Schneckenneigung die Schüttgutförderung im Bereich III analytisch.

Betrachtet wird das sich in der Schneckenkammer befindliche Schüttgut einer Schneckenganghöhe. Um auch Relativbewegungen innerhalb des Schüttguts abzubilden zu können, wird dieser in Sektorelemente von endlicher Breite und Bogenlänge aufgeteilt. Relative Gleitbewegungen der einzelnen Sektorelemente entlang deren Grenzflächen können damit ebenso berücksichtigt werden wie die lokale Wendelgeometrie in Form des vom Schneckenradius abhängigen Steigungswinkels der Schneckenwendel. Ebenso ist es möglich, den verteilten Abbau von axialen Wandschubspannungen im Inneren des Schüttguts zu berücksichtigen. Auftretende Kräfte zwischen den einzelnen Sektorelementen gehen über Gleichgewichtsbetrachtungen an den Grenzflächen der Sektorelemente in die Berechnung ein.

Um das Modell handhabbar und berechenbar zu halten, werden einige Randbedingungen festgelegt, die der Berechnung zu Grunde liegen.

- Betrachtet wird eine stationäre Förderung mit konstanter Schüttdichte und konstanter Schüttgutverteilung. Der Schüttgutquerschnitt bleibt dabei über dem gesamten Umfang gleich.
- Die Anzahl und Breite der Sektorelemente ist frei wählbar. Da sich die axialen Wandschubspannungen aber nur im ungescherten Schüttgut abbauen können, wird die Breite des äußersten Elements entsprechend festgelegt.
- Bewegungen innerhalb des Schüttguts sind auf Gleitvorgänge in den Trennfugen zwischen zwei Sektorelementen begrenzt.
- Ein Sektorelement kann relativ zum äußeren benachbarten Element auf der Schneckenwendel abrutschen, wird aber dennoch stets vorwärts gefördert.
- Der Einfluss des Spalts zwischen Schneckenwendel und Rohr wird bei der Berechnung von Schüttgutbewegung und Volumenstrom nicht berücksichtigt.

3.5 Analytisches Modell von Schüttgut im stark geneigten Schneckenförderer

Der für die Berechnung zugrundegelegte Modellkörper würde aufgrund der Geometrie der Schneckenwendel einen schraubenförmigen Schüttgutmkörper darstellen. Da unter der Voraussetzung gleicher Querschnittsflächen in beliebigen Achsschnitten ein schraubenförmiger Körper und ein Ringkörper identische Volumina aufweisen, wird zur Vereinfachung in den weiteren Betrachtungen aber ein rotationssymmetrischer Ringkörper als Ersatzmodell verwendet. Damit ist es im Hinblick auf die Spannungsberechnung auch möglich, Ansätze der Kontinuumsmechanik anzuwenden. Der Achsschnitt des verwendeten Ersatzmodells ist in Abbildung 3-16 neben einem freigeschnittenen differentiellen Volumenelement aus dem Ringkörper dargestellt. Es zeigt die Aufteilung des im Schneckenförderer befindlichen Schüttguts in eine endliche Anzahl an Sektorelementen und den Trennradius r_x zwischen wandschubspannungsbehafteter und wandschubspannungsfreier Zone. Im freigeschnittenen differentiellen Volumenelement sind die angreifenden Spannungen gemäß kontinuumsmechanischen Ansätzen eingetragen. Die Einheitsvektoren des benutzten r, ϑ, z -Koordinatensystems sind dabei in jedem Punkt des Schüttgutmkörpers mit den Hauptspannungsrichtungen des vorliegenden Spannungszustands identisch. Als ersten Schritt des Berechnungsverfahrens wird auf Basis dieses differentiellen Volumenelements zunächst die Kontur der freien Schüttgutoberfläche $k(r)$ berechnet. Die einzelnen Sektorelemente bleiben dabei unberücksichtigt, da die Schüttgutquerschnittsfläche definitionsgemäß konstant über dem gesamten Umfang ist.

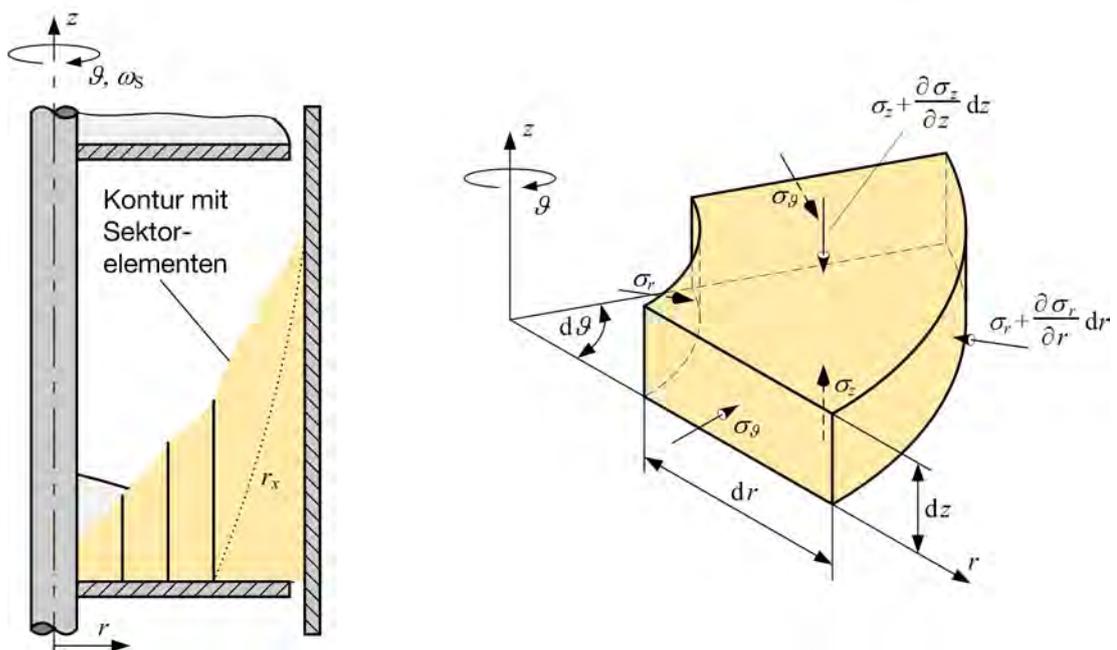


Abbildung 3-16: In Sektorelemente aufgeteiltes Schüttgut im Schneckenförderer sowie freigeschnittenes differentielles Volumenelement (nach [Vol-2000])

Ausgangspunkt für die Bestimmung der Kontur der freien Schüttgutoberfläche $k(r)$ ist die differentielle Gleichgewichtsbedingung am betrachteten Volumenelement in axialer und radialer Richtung. Da die in Abbildung 3-16 eingetragenen Spannungen definitionsgemäß Hauptspannungen sind und in Umfangsrichtung aufgrund der Rotationssymmetrie und der stationären Förderung keine Spannungsänderungen auftreten, ergeben sich mit der Schüttdichte ρ , der Schneckenneigung β , dem vom Radius abhängigen Steigungswinkel der Schneckenwendel $\alpha(r)$ und der Winkelgeschwindigkeit des Schüttguts ω_G :

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho \cdot g \cdot \cos \alpha(r) \cdot \sin \beta = 0 \quad (3-35)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \cdot r + \sigma_r - \sigma_\theta - \rho \cdot r^2 \cdot \omega_G^2 = 0 \quad (3-36)$$

Durch Integration folgt daraus zunächst die Hauptspannung σ_z in axialer Richtung. Die zur eindeutigen Bestimmung notwendige Randbedingung ergibt sich aus der Spannungsfreiheit an der Oberfläche des Schüttguts, also aus $\sigma_z = 0$ für $z = k(r)$:

$$\sigma_z = \rho \cdot g \cdot \cos \alpha(r) \cdot \sin \beta \cdot (k(r) - z) \quad (3-37)$$

Da das betrachtete Modell definitionsgemäß ein Hauptspannungssystem ist, werden in Gleichung (3-37) die für die Förderung elementaren Wandschubspannungen nicht berücksichtigt. Diese können jedoch durch Superposition zur Hauptspannung σ_z in axialer Richtung addiert werden. Die Wandschubspannung $\tau_{W,i}$ an der Schneckenwelle wird dabei konstant über die Bodenfläche verteilt, die Wandschubspannung $\tau_{W,a}$ am Förderrohr wird nach innen linear abgebaut. Als Maß für den radialen Abbau der Wandschubspannung gilt der Verteilfaktor Z . Der Einfluss der Wandschubspannung reicht von der freien Schüttgutoberfläche aus mit zunehmender Tiefe immer weiter in das Schüttgut hinein. Die Abgrenzung der unter dem Einfluss der Wandschubspannung stehenden Zone zur wandschubspannungsfreien Zone erfolgt durch den Trennradius $r_x(z)$, wie in Abbildung 3-16 dargestellt. Damit kann die Spannung σ_z in axialer Richtung bereichsweise und unter Berücksichtigung der Wandschubspannungen angegeben werden:

$$\sigma_z(r, z) = \begin{cases} \rho \cdot g \cdot \cos \alpha(r) \cdot \sin \beta \cdot (k(r) - z) & \text{für } r_i \leq r < r_x(z) \\ \rho \cdot g \cdot \cos \alpha(r) \cdot \sin \beta \cdot (k(r) - z) + Z \cdot (r - r_x(z)) & \text{für } r_x(z) \leq r \leq r_a \end{cases} \quad (3-38)$$

3.5 Analytisches Modell von Schüttgut im stark geneigten Schneckenförderer

Die Kontur der Schüttgutoberfläche $k(r)$ kann nun mit Hilfe des Hauptspannungsverhältnisses K_0 an der Schüttgutoberfläche bestimmt werden. Da aufgrund der Spannungsfreiheit an der Schüttgutoberfläche beide Hauptspannungen verschwinden, ist eine Grenzwertbetrachtung unter Anwendung der Regel von L'Hospital erforderlich. Die nötigen totalen Differentiale der Hauptspannungen können aus den differentiellen Gleichgewichtsbedingungen der Gleichungen (3-35) und (3-36) berechnet werden. Für das Hauptspannungsverhältnis an der Schüttgutoberfläche $K_0(r, z=k(r))$ folgt

$$K_0(r, z=k(r)) = \lim_{z \rightarrow k(r)} K_0(r, z) = \lim_{z \rightarrow k(r)} \frac{d\sigma_r}{d\sigma_z} = \frac{r \cdot \omega_G^2(r)}{g \cdot \cos \alpha(r) \cdot \sin \beta \cdot k'(r)} . \quad (3-39)$$

Durch Umstellen nach der Ableitung $k'(r)$ und Integration der Gleichung folgt die Kontur der freien Schüttgutoberfläche $k(r)$ zu

$$k(r) = \int_0^r k'(u) du + C = \int_0^r \frac{u \cdot \omega_G^2(u)}{g \cdot \cos \alpha(u) \cdot \sin \beta \cdot K_0(u, z=k(u))} du + C . \quad (3-40)$$

Die unbekannte Integrationskonstante C legt die Höhenlage der Kontur der Schüttgutoberfläche in der Schneckenkammer und damit auch die Form der Schüttgutfüllung fest. Diese kann in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit des Schüttguts und des Füllungsgrads prinzipiell in vier verschiedene sogenannte Füllungskonfigurationen eingeteilt werden, die sich, wie in Abbildung 3-17 dargestellt ist, durch die Berührungspunkte von Schüttgutoberfläche und Schneckenkammer unterscheiden.

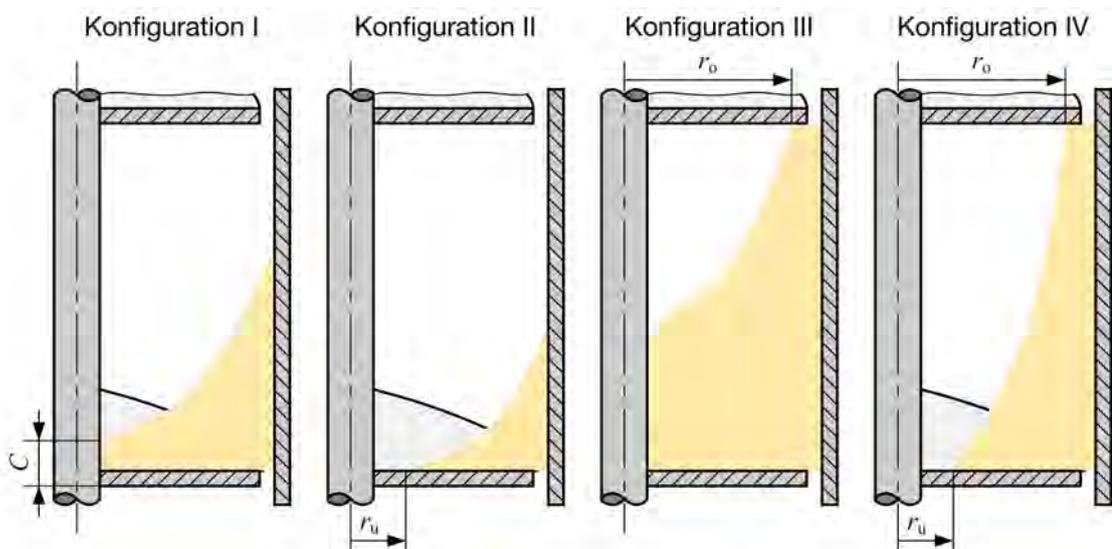


Abbildung 3-17: Darstellung der möglichen Füllungskonfigurationen (nach [Vol-2000])

Die Integrationskonstante C und damit der Schüttgutquerschnitt können in Abhängigkeit der Füllungskonfiguration mit Hilfe des Füllungsgrades φ berechnet werden. Dieser berechnet sich als Verhältnis von tatsächlich eingenommenem zu theoretisch nutzbarem Volumen der Schneckenkammer. Das tatsächlich eingenommene Volumen wird dabei abhängig von der Füllungskonfiguration berechnet und beinhaltet ebenfalls die Integrationskonstante C . Auflösen nach dieser und Einsetzen in Gleichung (3-40) liefert schließlich die Kontur der Schüttgutoberfläche:

- Konfiguration I:

$$k_{\text{I}}(r) = \int_0^r k'(u) du + \varphi \cdot (S - s) - \frac{2}{(r_a^2 - r_i^2)} \cdot \int_{r_i}^{r_a} r \cdot \int_0^r k'(u) du dr \quad (3-41)$$

- Konfiguration II:

$$k_{\text{II}}(r) = \int_0^r k'(u) du + \varphi \cdot (S - s) \cdot \frac{(r_a^2 - r_i^2)}{(r_a^2 - r_u^2)} - \frac{2}{(r_a^2 - r_u^2)} \cdot \int_{r_u}^{r_a} r \cdot \int_0^r k'(u) du dr \quad (3-42)$$

- Konfiguration III:

$$k_{\text{III}}(r) = \int_0^r k'(u) du + \frac{(S - s)}{(r_o^2 - r_i^2)} \cdot [\varphi \cdot (r_a^2 - r_i^2) - (r_a^2 - r_o^2)] - \frac{2}{(r_o^2 - r_i^2)} \cdot \int_{r_i}^{r_o} r \cdot \int_0^r k'(u) du dr \quad (3-43)$$

- Konfiguration IV:

$$k_{\text{IV}}(r) = \int_0^r k'(u) du + \frac{(S - s)}{(r_o^2 - r_u^2)} \cdot [\varphi \cdot (r_a^2 - r_i^2) - (r_a^2 - r_o^2)] - \frac{2}{(r_o^2 - r_u^2)} \cdot \int_{r_u}^{r_o} r \cdot \int_0^r k'(u) du dr \quad (3-44)$$

Da bei Konfiguration IV die Oberseite und die Unterseite der Schneckenwendel geschnitten werden, muss die folgende Bedingung stets erfüllt sein:

$$\int_0^{r_o} k'(u) du - \int_0^{r_u} k'(u) du = S - s \quad (3-45)$$

3.5 Analytisches Modell von Schüttgut im stark geneigten Schneckenförderer

Im zweiten Schritt des Berechnungsverfahrens wird der Schüttgutkörper zur Berechnung der Winkelgeschwindigkeiten im Schüttgut in die beschriebenen Sektorelemente aufgeteilt. Die Anzahl und Breite der Sektorelemente kann dabei prinzipiell frei gewählt werden. Da die Wandschubspannungen aber nur im ungescherten Schüttgut abgebaut werden können, ist die Breite des ersten Sektorelements, wie oben bereits erwähnt, so anzupassen, dass die Wandschubspannungen am Ende des ersten Sektorelements abgebaut sind. Dies bedeutet, dass die Breite durch den Trennradius $r_x(z)$ für $z = 0$ festgelegt wird. Um diesen zu bestimmen, werden zunächst die Hauptspannungen in radialer Richtung betrachtet, die allgemein über das Spannungsverhältnis K aus der Spannung in axialer Richtung berechnet werden können:

$$\sigma_r(r) = K \cdot \sigma_z(r) \quad (3-46)$$

Mit dem Spannungsverhältnis an der Schneckenwelle K_i folgt die radiale Spannung an der Schneckenwelle $\sigma_r(r_i)$ mit Gleichung (3-38) zu

$$\sigma_r(r_i) = K_i \cdot \rho \cdot g \cdot \cos \alpha(r_i) \cdot \sin \beta \cdot (k(r_i) - z) . \quad (3-47)$$

Für die radiale Spannung am Förderrohr muss eine Fallunterscheidung nach der Füllungskonfiguration getroffen werden, da bei den Füllungskonfigurationen I und III im Gegensatz zur den Füllungskonfigurationen II und IV das Schüttgut bis zur Schneckenwelle reicht. Bei den Füllungskonfigurationen I und III kann sich das Schüttgut deshalb an der Schneckenwelle abstützen und die wirkende Normalkraft so um eine Komponente aus der Wandreibung erhöhen. Mit dem Spannungsverhältnis am Förderrohr K_a kann damit die radiale Spannung am Förderrohr $\sigma_r(r_a)$ für die Füllungskonfigurationen I und III aus Gleichung (3-38) zu

$$\sigma_r(r_a)_{I,III} = K_a \cdot [\rho \cdot g \cdot \cos \alpha(r_a) \cdot \sin \beta \cdot (k(r_a) - z) + Z \cdot (r_a - r_x(z))] \quad (3-48)$$

berechnet werden. Bei den Füllungskonfigurationen II und IV kann sich die durch die Wandreibung erhöhte Normalkraft nicht abstützen und wird deshalb nicht berücksichtigt. Die radiale Spannung am Förderrohr $\sigma_r(r_a)$ folgt für die Füllungskonfigurationen II und IV daher aus

$$\sigma_r(r_a)_{II,IV} = K_a \cdot \rho \cdot g \cdot \cos \alpha(r_a) \cdot \sin \beta \cdot (k(r_a) - z) . \quad (3-49)$$

Mit den Reibwerten gegen Schneckenwelle μ_i und Förderrohr μ_a sowie den jeweiligen Förderwinkeln ψ kann über ein Kräftegleichgewicht an einer infinitesimalen Gutscheibe in axialer Richtung daraus die Bestimmungsgleichung für den Trennradius $r_x(z)$ in Abhängigkeit der Füllungskonfiguration bestimmt werden:

$$\frac{dr_x(z)_{I,II,III,IV}}{dz} = \frac{2 \cdot (\mu_i \cdot \sin \psi_i \cdot \sigma_r(r_i) \cdot r_i + \mu_a \cdot \sin \psi_a \cdot \sigma_r(r_a)_{I,II,III,IV} \cdot r_a)}{Z \cdot (r_a^2 - r_x^2)} \quad (3-50)$$

Die Winkelgeschwindigkeiten der einzelnen Sektorelemente werden durch Lösen der Bewegungsgleichungen für die einzelnen Sektorelemente bestimmt. Die dazu nötigen am Sektorelement angreifenden Kräfte können mit den bisherigen Ergebnissen berechnet werden. Als Koppelbedingung für benachbarte Sektorelemente gilt, dass die zwischen zwei Sektorelementen wirkenden Kräfte betragsmäßig gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet sind. Die Kräfte an der Innenfläche des j -ten Sektorelements erhalten dabei den Index j , die Kräfte an den Außenflächen den Index $j + 1$. Neben der Gewichtskraft, die aus der Masse des Sektorelements folgt, treten Normalkräfte auf die Begrenzungsflächen sowie diesen zugeordnete Reibkräfte auf und müssen berücksichtigt werden. Die Normalkräfte folgen allgemein durch Integration der jeweiligen Normalspannungen über den zugeordneten Flächen nach

$$N = \int_A \sigma \, dA \quad (3-51)$$

Die Reibkräfte können aus den Schubspannungen an den Begrenzungsflächen eines Sektorelements nach

$$R = \int_A \tau \, dA \quad (3-52)$$

allgemein berechnet werden. Dabei sind aufgrund der schnellen Scherbewegungen zwischen den Sektorelementen prinzipiell auch die Impulsaustauschanteile durch Partikelstöße gemäß Gleichung (3-20) mit zu berücksichtigen. Für die Anteile aus Coulombscher Reibung kann die Schubspannung zwischen Sektorelementen nach Gleichung (3-8) und zwischen Schüttgut und Schneckenförderer nach Gleichung (3-21) aus den Normalspannungen berechnet werden. Für die Kräfte in den radialen Begrenzungsflächen der Sektorelemente sind hierzu die Spannungen gemäß der Gleichungen (3-47) bis (3-49) zu verwenden. Die Kräfte in axialer Richtung also an

3.5 Analytisches Modell von Schüttgut im stark geneigten Schneckenförderer

der Oberseite und gegebenenfalls an der Unterseite der Schneckenwendel folgen aus den Bewegungsgleichungen. Kräfte in den azimutalen Begrenzungsflächen müssen nicht berücksichtigt werden, da sich diese aufgrund der geforderten stationären Förderung mit konstanter Querschnittsfläche gegenseitig aufheben.

Damit sind die Kräfte im bisher verwendeten r, ϑ, z -KOS festgelegt. Die Bewegungsgleichung folgt nun aus dem 2. Newtonschen Gesetz, dass das Produkt aus Masse und Beschleunigung eines Körpers gleich der wirkenden Kräfte ist. Dieser eigentlich nur für einen Massenpunkt gültige Zusammenhang kann auf die Sektorelemente übertragen werden, wenn alle angreifenden Kräfte auf den Schwerpunkt des betrachteten Sektorelements reduziert werden. Da, analog zum Vorgehen bei der Betrachtung eines Einzelkörpers, die Bewegungsgleichung im t, n, b -KOS betrachtet wird, werden die Normal- und Reibkräfte in das t, n, b -KOS transformiert und gehen über in die auf den Schwerpunkt reduzierten Ersatzkräfte

$$\bar{N} = N \cdot \sqrt{\left(\frac{r}{r_m}\right)^2 \cdot \sin^2 \alpha_m + \cos^2 \alpha_m} \quad (3-53)$$

und

$$\bar{R} = R \cdot \sqrt{\left(\frac{r}{r_m}\right)^2 \cdot \cos^2 \alpha_m + \sin^2 \alpha_m} \quad (3-54)$$

Mit den neuen Wirkrichtungswinkeln γ der reduzierten Ersatzkräfte und einem Reduktionsfaktor L_R , der in der Arbeit von *Vollmann* [Vol-2000] ausführlich beschrieben ist, folgt die Bewegungsgleichung als Kräftegleichgewicht

$$\begin{aligned} & \bar{N}_{w,o} \cdot \left[(Q - \mu_w \cdot L_R) \cdot \cos(\alpha_m - \gamma_{w,o}) - (1 + Q \cdot \mu_w \cdot L_R) \cdot \sin(\alpha_m - \gamma_{w,o}) \right] - \\ & - \bar{R}_j \cdot \left[Q \cdot \sin(\alpha_m - \gamma_j) + \cos(\alpha_m - \gamma_j) \right] + \\ & + \bar{R}_{j+1} \cdot \left[Q \cdot \sin(\alpha_m \mp \gamma_{j+1}) + \cos(\alpha_m \mp \gamma_{j+1}) \right] - \\ & - G \cdot \sin \beta \cdot (\sin \alpha_m - Q \cdot \cos \alpha_m) = 0 \end{aligned} \quad (3-55)$$

mit

$$Q = \frac{\left[\sin(\alpha_m - \gamma_{w,u}) - \mu_w \cdot L_R \cdot \cos(\alpha_m - \gamma_{w,u}) \right]}{\left[\cos(\alpha_m - \gamma_{w,u}) + \mu_w \cdot L_R \cdot \sin(\alpha_m - \gamma_{w,u}) \right]}$$

Gleichung (3-55) ist für alle Sektorelemente gültig, wobei die doppelten Vorzeichen in Abhängigkeit des betrachteten Sektorelements zu wählen sind. Die unteren, positiven Vorzeichen gelten für die äußeren Sektorelemente, die Kontakt zum Förderrohr haben und unter Einfluss der Wandschubspannung stehen. Die oberen, negativen Vorzeichen für alle übrigen, innenliegenden Sektorelemente. Über die enthaltenen Reibkräfte in den radialen Begrenzungsflächen sind die einzelnen Sektorelemente jeweils paarweise miteinander gekoppelt. Für eine Schüttgutfüllung im Schneckenförderer, die in eine Anzahl J Sektorelemente aufgeteilt ist, entsteht so ein System von J nichtlinearen Gleichungen, die numerisch gelöst werden können, indem die in den Reibkräften enthaltenen Winkelgeschwindigkeiten des Schüttguts ω_G für jedes Sektorelement variiert werden. Ist Gleichung (3-55) für jedes Sektorelement erfüllt sind somit auch die absoluten Winkelgeschwindigkeiten sowie die partiellen Füllungsgrade eines jeden Sektorelements bekannt.

Mit diesen Berechnungsergebnissen kann nun der geförderte Volumenstrom I_V aus den partiellen Füllungsgraden φ_j , den Winkelgeschwindigkeiten $\omega_{G,j}$ sowie den Begrenzungsradien r_j und r_{j+1} der einzelnen Sektorelemente gemäß

$$I_V = \frac{(S-s)}{2} \cdot \sum_{j=1}^J \varphi_j \cdot (r_{j+1}^2 - r_j^2) \cdot (\omega_s - \omega_{G,j}) \quad (3-56)$$

mit der Schneckenganghöhe S , der Dicke der Schneckenwendel s sowie der Schneckenwinkelgeschwindigkeit ω_s berechnet werden. Weiter ist es möglich, eine Abschätzung des benötigten Leistungsbedarfs P_F , der zur Erfüllung der Förderaufgabe erforderlich ist, zu treffen. Obwohl einige Verlustleistungsanteile mit den vorliegenden Ergebnissen nun analytisch berechenbar sind, greift *Vollmann* hierzu auf den Ansatz von Gabler zurück und führt den Förderfaktor ϕ als fiktiven Reibwert ein, um auch Verlustleistungsanteile integrieren zu können, die sich einer genauen Berechnung entziehen. Für den Leistungsbedarf zur Förderung ergibt sich somit als Abschätzung

$$P_F = I_V \cdot \rho \cdot g \cdot H + \phi \cdot N_{r,a} \cdot \frac{r_a \cdot \omega_{G,a}}{\cos \psi_a} \quad (3-57)$$

Neben dem nun bekanntem Volumenstrom I_V , der Schüttdichte ρ , der Förderhöhe H und dem Radius am Förderrohr r_a werden die mit dem Berechnungsverfahren bestimmbaren Größen radiale Normalkraft auf das Förderrohr $N_{r,a}$, Winkelgeschwindig-

keit des äußersten Sektorelements $\omega_{G,a}$ sowie Förderwinkel am Förderrohr ψ_a berücksichtigt. Der Förderfaktor ϕ wird von *Vollmann* als für den jeweiligen Anwendungsfall experimentell zu bestimmende, stoffspezifische Kenngröße definiert.

Das beschriebene von *Vollmann* [Vol-2000] entwickelte Berechnungsverfahren erlaubt damit sowohl die Berechnung des geförderten Volumenstroms als auch eine Abschätzung für den dazu nötigen Leistungsbedarf. Aufgrund des zugrundeliegenden numerischen Berechnungsverfahrens zur Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems ist hierzu aber ein hoher Rechenaufwand nötig, der rechnerbasierte Unterstützung erfordert. Eine Berechnung „per Hand“ ist in keinem Fall möglich.

3.6 Semi-analytische Berechnungsansätze für Schneckenförderer

Weit verbreitet und in der Fachwelt anerkannt sind die semi-analytischen Berechnungsansätze der Norm *DIN 15262* [DIN 15262], die sich durch die einfache Anwendung auszeichnen. Da im Rahmen dieser Arbeit aufgrund dieser großen Akzeptanz ein Berechnungsverfahren erarbeitet werden soll, das sich am Vorgehen der Norm *DIN 15262* orientiert, werden deren Berechnungsansätze im Folgenden beschrieben.

Um die Berechnung möglichst einfach gestalten zu können, gilt sie nur für eine rein translatorische Bewegung des Schüttguts in gleichmäßig und kontinuierlich beschickten Schneckenförderern, die horizontal oder bis zu einer maximalen Schneckenneigung von ca. 20° betrieben werden. Folglich werden enge Grenzen für die Gültigkeitsbereiche der Geometrie- und Betriebsparameter gesetzt. So sind in Abhängigkeit des zu fördernden Schüttguts maximale Füllungsgrade des Schneckenförderers angegeben. Diese betragen

- | | |
|---------------|---|
| $\phi = 0,45$ | für leicht fließende , kaum schleißende Schüttgüter, wie Mehl oder Getreide, |
| $\phi = 0,30$ | für mäßig schleißende , körnige bis kleinstückige Schüttgüter, wie Salz, Sand oder Kohle, |
| $\phi = 0,15$ | für schwere, stark schleißende, aggressive Schüttgüter, wie Asche, Kies oder Erz. |

Um die zum Teil starken Einflüsse von Schneckenganghöhe S , Schneckenneigung β und eventuell vorhandener Zwischenlager auf das Bewegungsverhalten des Schüttguts zu berücksichtigen, sind die vorgegebenen Füllungsgrade weiter zu verringern

- um bis zu 10 %, wenn die Schneckenganghöhe ungewöhnlich groß ist (üblich sind Werte $0,6 \cdot D \leq S \leq 1,0 \cdot D$),
- um ungefähr zwei Prozentpunkte je Grad Schneckenneigung (also um bis zu 40 % bei einer Schneckenneigung von $\beta = 20^\circ$),
- um bis zu 10 %, wenn Stauungen an Zwischenlagern zu erwarten sind.

Zudem werden vom Schneckendurchmesser D abhängige maximale Schnecken-drehzahlen n empfohlen, um ein Hochschleudern des Schüttguts und eine daraus folgende Beeinträchtigung des Fördervorgangs zu verhindern. Die maximale axiale Fördergeschwindigkeit wird so auf $v_{ax} = 0,57 \text{ m/s}$ beschränkt. Dabei wird auf die in der Norm *DIN 15261 Teil 2* [DIN 15261-2] empfohlenen Schneckendurchmesser und Schneckenganghöhen zurückgegriffen, wie sie in Tabelle 3-3 zusammen mit den empfohlenen maximalen Schneckendrehzahlen dargestellt sind.

Tabelle 3-3: Geometrieparameter und zugeordnete empfohlene maximale Schneckendrehzahlen nach *DIN 15261 Teil 2* [DIN 15261-2]

Schnecken- durchmesser [m]	Schnecken- ganghöhe [m]	Max. Schnecken- drehzahl [1/s]	Max. axiale Förder- geschwindigkeit [m/s]
0,100	0,100	3,15	0,32
0,125	0,125	2,80	0,35
0,160	0,160	2,50	0,40
0,200	0,200	2,25	0,45
0,250	0,250	2,00	0,50
0,315	0,315	1,80	0,57
0,400	0,355	1,60	0,57
0,500	0,400	1,40	0,56
0,630	0,450	1,25	0,56
0,800	0,500	1,12	0,56
1,000	0,560	1,00	0,56
1,250	0,630	0,90	0,57

Unter Berücksichtigung der genannten Restriktionen lässt sich der größte im vorliegenden Betriebszustand erzielbare Volumenstrom I_V im Schneckenförderer aus der vom Schüttgut eingenommenen Querschnittsfläche A und der axialen Fördergeschwindigkeit v_{ax} gemäß

$$I_V = A \cdot v_{ax} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \varphi \cdot S \cdot n \quad (3-58)$$

mit dem Schneckendurchmesser D , dem Füllungsgrad φ , der Schneckenganghöhe S sowie der Schneckendrehzahl n berechnen.

Zur Berechnung der Leistungsaufnahme, die zur Lösung der Förderaufgabe am Antrieb erforderlich ist, werden gemäß dem im Kapitel 3.3 beschriebenen Vorgehen für semi-analytische Berechnungsverfahren die Bewegungswiderstände, gemäß der Norm *DIN 15262* sind ausschließlich Steigungs- und Reibungswiderstände zu berücksichtigen, in analytisch leicht berechenbare Teile und analytisch nicht oder nur schwer erfassbare Anteile aufgeteilt. Letztere werden stattdessen durch empirische Kennwerte integriert. Analytisch berechenbar ist gemäß dem Berechnungsverfahren der Norm *DIN 15262* nur die Hubleistung, die zur Überwindung der Förderhöhe im Fall einer leicht geneigten Förderung nötig ist. Alle anfallenden Reibungsverluste werden zusammengefasst und über einen einzigen fiktiven Reibungsbeiwert analog zum Ansatz der Coulombschen Reibung mit der Normalkraft des Schüttguts auf das Förderrohr berechnet. Mit der Förderhöhe H , der Förderlänge L und der Schüttdichte ρ ergibt sich für den zur Förderung erforderlichen Leistungsbedarf P_F damit

$$P_F = I_V \cdot \rho \cdot g \cdot (\lambda_{DIN} \cdot L + H) . \quad (3-59)$$

Der enthaltene fiktive Reibungsbeiwert λ_{DIN} wird als Verschiebewiderstandsbeiwert bezeichnet und stellt eine rein schüttgutspezifische Größe dar und muss für jedes Schüttgut experimentell bestimmt werden. Er berücksichtigt neben den Reibungsverlusten des Schüttguts am Förderrohr, der Schneckenwendel und der Schneckenwelle sowie der inneren Reibung des Schüttguts auch alle weiteren während der Förderung auftretenden Verlustleistungen, wie zum Beispiel Verluste im Spalt zwischen Schneckenwendel und Förderrohr oder an Zwischenlagern. In der Norm *DIN 15262* werden für gebräuchliche Schüttgüter Werte für den Verschiebewiderstandsbeiwert angegeben. Werte für weitere Schüttgüter wurden unter anderem von *Brandtner* [Bra-1969] angegeben.

Das in der Norm *DIN 15262* [DIN 15262] angebotene Berechnungsverfahren lässt damit durch die Anwendung von nur zwei einfachen Gleichungen eine sehr einfache und praxistaugliche Berechnung des erzielbaren Volumenstroms und des dazu notwendigen Leistungsbedarfs zu, ist aber bezüglich der zulässigen Geometrie- und Betriebsparameter stark eingeschränkt. Dennoch findet es, teilweise in leicht modifizierter Form, auch in weiteren Normen und Richtlinien Anwendung und damit eine große Verbreitung in der Fachwelt [ISO 7119, VDI 2330, FEM 2.121].

3.7 Semi-empirische Berechnungsansätze für Schneckenförderer

Um den Nachteilen des semi-analytischen Berechnungsverfahrens – stark eingeschränkter Gültigkeitsbereich bezüglich der Geometrie- und Betriebsparameter sowie fehlender Einfluss von Geometrie- und Betriebsparameter auf den Verschiebewiderstandsbeiwert – zu begegnen, wurde das oben vorgestellte Berechnungsverfahren der Norm *DIN 15262* von *Günthner, Fottner, Rong* und *Blomeyer* erweitert und so in ein semi-empirisches Berechnungsverfahren überführt. Der Verschiebewiderstandsbeiwert stellt nun keine rein schüttgutspezifische Größe mehr dar, sondern trägt durch den integrierten Einfluss von Schüttgut-, Betriebs- und Geometrieparametern zu einer höheren Genauigkeit und einem erweiterten Gültigkeitsbereich bei. Dieses neue Berechnungsverfahren gilt weiterhin für horizontale bis leicht geneigte Schneckenförderer und wird im Folgenden beschrieben [Fot-2002, Gün-2002a, Ron-2004a, Gün-2006a, Blo-2008].

Das Berechnungsverfahren soll in erster Linie den heute gebräuchlichen, deutlich höheren Schneckendrehzahlen Rechnung tragen, aber dennoch ähnlich einfach anzuwenden sein, wie das Berechnungsverfahren der Norm *DIN 15262*. Der Berechnung wird deshalb eine reine translatorische Bewegung des Schüttguts zugrunde gelegt, obwohl bei diesen höheren Schneckendrehzahlen nicht mehr ausschließlich von einer Solchen ausgegangen werden kann, sondern bereits schraubenlinienförmige Bewegungskomponenten vorliegen können. Dass diese vereinfachte Betrachtung innerhalb bestimmter Gültigkeitsbereiche dennoch zulässig ist, konnte in den oben genannten Arbeiten experimentell nachgewiesen werden. Die zulässige Schneckendrehzahl kann so gegenüber den Vorgaben der Norm *DIN 15262* auf einen maximalen Wert von $n = 4 \text{ s}^{-1}$ erweitert werden. Die bestehenden Beschränkungen bezüglich des Füllungsgrads im Schneckenförderer bleiben weiter bestehen.

Durch die Annahme einer translatorischen Schüttgutbewegung ergibt sich der erzielbare Volumenstrom I_V in Analogie zur Norm *DIN 15262* aus dem Schnecken-durchmesser D , dem Füllungsgrad φ , der Schneckenganghöhe S und der Schneckendrehzahl n zu

$$I_V = A \cdot v_{ax} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \varphi \cdot S \cdot n \quad (3-60)$$

Auch für die Berechnung des zur Förderung nötigen Leistungsbedarfs P_F für horizontale bis leicht geneigte Schneckenförderer kann weitestgehend auf die Ansätze der Norm *DIN 15262* und die dort eingeführten Bestandteile fiktiver Gesamtreibleistungsbedarf P_{Reib} und Hubleistung P_{Hub} zurückgegriffen werden:

$$P_F = P_{Reib} + P_{Hub} = I_V \cdot \rho \cdot g \cdot (\lambda_h \cdot L + H) \quad (3-61)$$

Neben dem erweiterten Gültigkeitsbereich des Berechnungsverfahrens für höhere Schneckendrehzahlen, stellt der eingeführte horizontale Verschiebewiderstandsbeiwert λ_h die wesentliche Neuerung des Berechnungsverfahrens dar. Dieser ist nun keine Gutkonstante mehr, sondern integriert Schüttgut-, Betriebs- und Geometrie-parameter in die Berechnung. Entsprechend den in experimentellen Untersuchungen gefundenen Einflussfaktoren berechnet sich der horizontale Verschiebewiderstandsbeiwert λ_h gemäß

$$\lambda_h = \lambda_{S,h} \cdot \lambda_n \cdot \lambda_\beta \quad (3-62)$$

Damit der Abhängigkeit des Leistungsbedarfs von den zugrunde liegenden Einfluss-faktoren gerade in den Bereichen der erweiterten Gültigkeit Rechnung getragen werden kann, setzt sich der horizontale Verschiebewiderstandsbeiwert aus den drei Bestandteilen

- horizontaler Schüttgutbeiwert $\lambda_{S,h}$, der den Einfluss des Schüttguts in Abhängigkeit von Geometrieparametern berücksichtigt,
- Geschwindigkeitsbeiwert für Leistungsbedarf λ_n , der den Einfluss der Schneckendrehzahl in Abhängigkeit von Geometrieparametern berücksichtigt, und
- Neigungsbeiwert λ_β , der den Einfluss der Schneckenneigung integriert,

zusammen. Der horizontale Schüttgutbeiwert $\lambda_{s,h}$ ist abhängig vom Verschiebewiderstandsbeiwert λ_{DIN} der Norm *DIN 15262* sowie dem Verhältnis von Schnecken-ganghöhe S zu Schneckendurchmesser D und kann mit Hilfe von Tabelle 3-4 bestimmt werden.

Der Geschwindigkeitsbeiwert für den Leistungsbedarf λ_n berücksichtigt die Änderungen des Förderverhaltens durch eine steigende Schneckendrehzahl. Er wird in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl und des Verhältnisses von Schnecken-ganghöhe zu Schneckendurchmesser mit

$$\begin{aligned} \lambda_n &= A \cdot n^2 + B \cdot n + C && \text{für } n \geq 2,5 \text{ s}^{-1} \\ \lambda_n &= 1 && \text{für } n < 2,5 \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (3-63)$$

ermittelt. Die benötigten Multiplikatoren A, B und C sind für verschiedene Verhältnisse von Schnecken-ganghöhe S zu Schneckendurchmesser D aus Tabelle 3-4 zu entnehmen.

Tabelle 3-4: Bestimmung von horizontalem Schüttgutbeiwert und der Multiplikatoren zur Bestimmung des Geschwindigkeitsbeiwerts für den Leistungsbedarf [Blo-2008]

	$\lambda_{s,h}$ [-]	A [s ²]	B [s]	C [-]
$S/D = 1,2$	$0,70 \cdot \lambda_{DIN}$	0,108	-0,366	1,32
$S/D = 1,1$	$0,73 \cdot \lambda_{DIN}$	0,072	-0,240	1,12
$S/D = 1,0$	$0,75 \cdot \lambda_{DIN}$	0,072	-0,234	1,13
$S/D = 0,9$	$0,80 \cdot \lambda_{DIN}$	0,072	-0,336	1,39
$S/D = 0,8$	$0,85 \cdot \lambda_{DIN}$	0,072	-0,324	1,45
$S/D = 0,7$	$0,90 \cdot \lambda_{DIN}$	0,036	-0,252	1,34
$S/D = 0,6$	$0,95 \cdot \lambda_{DIN}$	0,036	-0,192	1,24

Der Neigungsbeiwert λ_β berücksichtigt im Fall eines leicht geneigten Schneckenförderers den erhöhten Leistungsbedarf in Folge der Schneckenneigung gegenüber der Horizontalen. Er ist nur von der Schneckenneigung β abhängig und errechnet sich gemäß

$$\lambda_\beta = 0,045 \cdot \beta + 1 . \quad (3-64)$$

Im Rahmen der genannten Arbeiten, in denen das vorgestellte semi-empirische Berechnungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte Schneckenförderer erarbeitet wurde, konnte zusätzlich auch ein Berechnungsverfahren für vertikale Schneckenförderer entwickelt werden, das unter anderem grafische Verfahren zur Vereinfachung der komplexen analytischen Zusammenhänge verwendet. Zur Bestimmung des erzielbaren Volumenstroms muss zunächst der angestrebte Füllungsgrad gewählt werden. Dazu werden, um Verstopfungen zu vermeiden, in Abhängigkeit vom Fließverhalten und der Abrasivität des Schüttguts als maximale Füllungsgrade

$\varphi = 0,70$ für gut fließende Schüttgüter und

$\varphi = 0,50$ für mäßig fließende, schwere und stückige Schüttgüter

empfohlen. Anschließend kann aus Diagrammen, die für verschiedene Füllungsgrade angeboten werden, eine mögliche Kombination aus Schneckendurchmesser, gemäß der Norm *DIN 15261 Teil 2* [DIN 15261-2] und Schneckendrehzahl ausgewählt werden, so dass der erforderliche Volumenstrom erreicht wird. Ein Beispiel für ein solches Diagramm ist für den Füllungsgrad $\varphi = 0,4$ in Abbildung 3-18 dargestellt.

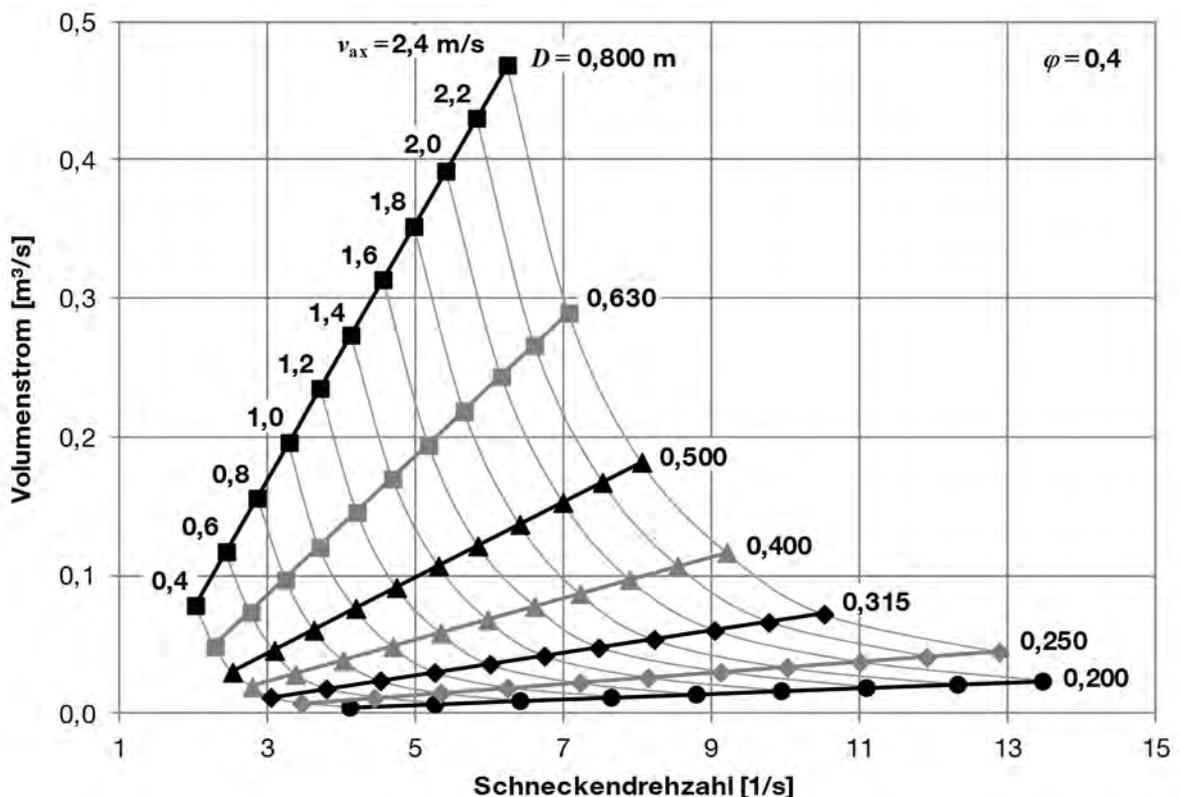


Abbildung 3-18: Diagramm zur Dimensionierung vertikaler Schneckenförderer [Ron-2004a]

Die den Diagrammen zugrunde liegenden Daten basieren auf der Berechnung der axialen Fördergeschwindigkeit des Schüttguts durch Lösung der Bewegungsgleichung des analytischen Berechnungsverfahrens der Förderung von Schüttgut im vertikalen Schneckenförderer nach *Greinwald* [Gre-1994]. Dieses stellt für den Sonderfall vertikaler Schneckenförderer eine Vorstufe des in Kapitel 3.5 vorgestellten Verfahrens nach *Vollmann* dar und zeigt die Anwendbarkeit der analytischen Berechnungsverfahren als Datengrundlage für praxistauglichere semi-empirische Verfahren. Die berechneten axialen Fördergeschwindigkeiten sind in den Diagrammen jeweils angegeben.

Die Berechnung des erforderlichen Leistungsbedarfs folgt prinzipiell einem ähnlichen Vorgehen wie im semi-empirischen Berechnungsverfahren für die horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderer, benötigt aber mehrere spezifische Verlustleistungsanteile, die wiederum ausschließlich grafisch ermittelt werden. Da ein solches grafisches Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit aber nicht vorgesehen ist, wird auf das weitere Vorgehen zur Berechnung im Folgenden nicht mehr eingegangen.

Die beiden Berechnungsmethoden stellen den aktuellen Stand der Wissenschaft für die praxistaugliche Dimensionierung und Auslegung von horizontalen bis leicht geneigten und vertikalen Schneckenförderer dar und werden derzeit in neue Richtlinien des Vereins deutscher Ingenieure e.V. übergeführt [VDI 2330-2, VDI 2330-3].

4 Berechnungsmodelle zur Dimensionierung und Auslegung

Wie bereits beschrieben, ist es Ziel dieser Arbeit, ein einfaches und praxistaugliches Verfahren zur Berechnung des Volumenstroms und des dazu erforderlichen Leistungsbedarfs zur Förderung in stark geneigten Schneckenförderern zu ermitteln. Im folgenden Kapitel werden daher für beide Bereiche, Volumenstrom- und Leistungsberechnung, Modelle erarbeitet, auf denen diese Berechnungsverfahren basieren.

Wie von *Fottner* [Fot-2002] empfohlen und für horizontale bis leicht geneigte und vertikale Schneckenförderer, wie im Abschnitt 3.7 beschrieben, schon erfolgreich umgesetzt, wird in dieser Arbeit ebenfalls ein semi-empirisches Berechnungsverfahren, gemäß Abschnitt 3.3, entwickelt. Dementsprechend werden im Folgenden analytische Basisansätze für die Berechnung des geförderten Volumenstroms und des erforderlichen Leistungsbedarfs erarbeitet und die zugehörigen empirischen Beiwerte eingeführt. Zuvor wird noch auf die dabei betrachteten Einflussgrößen eingegangen.

4.1 Beschreibung der betrachteten Einflussgrößen

Im Folgenden werden alle Einflussgrößen, die bei der Entwicklung der Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren betrachtet werden, beschrieben und ihre Anwendung im Rahmen dieser Arbeit erläutert. Die Auswahl erfolgt unter Beachtung der in Abschnitt 2 vorgestellten Arbeiten, in denen die Einflüsse der verschiedenen Eingangsgrößen untersucht wurden und folgt den verwendeten Einflussparameter der im Abschnitt 3 vorgestellten Berechnungsverfahren.

Geometrieparameter

Die folgenden Geometrieparameter werden zur Beschreibung eines Schneckenförderers verwendet. Sie sind in Abbildung 4-1 zusätzlich grafisch dargestellt:

- Förderhöhe H
Höhe, die das Schüttgut während der Förderung überwindet.

- Förderlänge L
Strecke zwischen der Gutaufgabe und der Gutabgabe, auf der das Schüttgut gefördert wird.
- Schneckenneigung β
Neigungswinkel der Schneckenachse gegenüber der Horizontalen. Dieser berechnet sich aus der Förderlänge L und der Förderhöhe H gemäß

$$\sin \beta = \frac{H}{L} . \quad (4-1)$$

- Schneckendurchmesser D
Außendurchmesser der Schneckenwendel. Dieser wird, da der Spalt zwischen Schneckenwendel und Förderrohr im Rahmen der Berechnung vernachlässigt wird, auch als Innendurchmesser des Förderrohrs verwendet.
- Schneckenwellendurchmesser d
Außendurchmesser der Schneckenwelle.
- Schneckenganghöhe s
Abstand in axialer Richtung zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten der Schneckenwendel, die in radialer Projektion auf derselben Mantellinie der Schneckenwelle liegen.

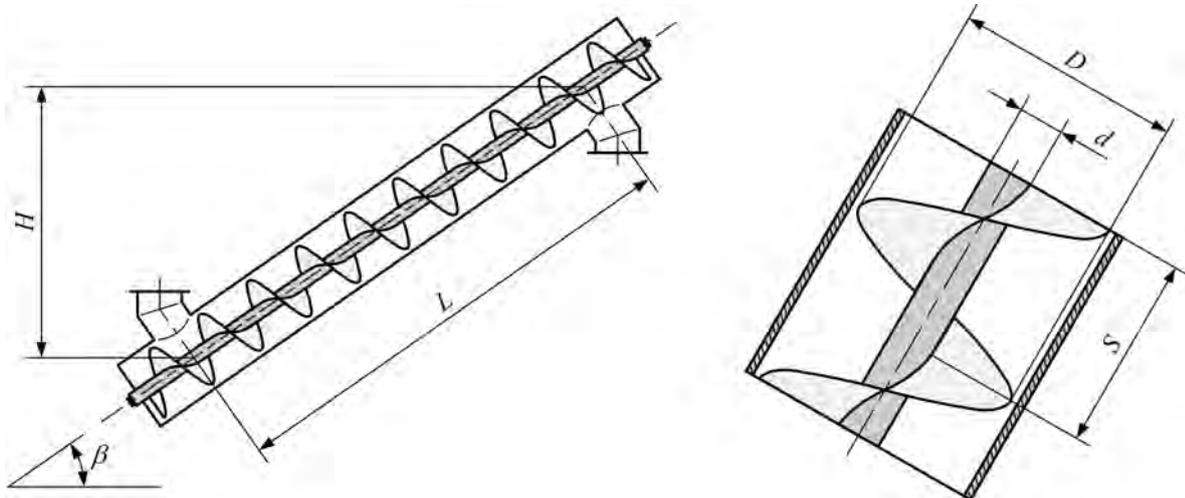


Abbildung 4-1: Verwendete Geometrieparameter des Schneckenförderers

Betriebsparameter

Als Betriebsparameter werden berücksichtigt:

- Schneckendrehzahl n
Betriebsdrehzahl von Schneckenwelle und fest damit verbundener Schneckenwendel.
- Füllungsgrad φ
Durchschnittlicher, sich während der Förderung einstellender Anteil des vom Schüttgut ausgefüllten Volumens in einer Schneckenkammer bezogen auf das, unter Vernachlässigung des Volumens der Schneckenwendel, gesamte mögliche Volumen der Schneckenkammer.

Schüttgutparameter

Von den Schüttgutparametern finden Verwendung:

- Schüttdichte ρ ,
im lockeren, unverdichteten Zustand.
- Innerer Reibwert des Schüttguts μ_S .
- Äußerer Reibwert gegen Schneckenwendel und Rohr μ_F ,
wobei vorausgesetzt wird, dass für den gesamten Schneckenförderer der gleiche Werkstoff verwendet wird.

4.2 Berechnung des erzielbaren Volumenstroms

Die Berechnung des geförderten Volumenstroms folgt dem prinzipiellen Vorgehen zur Berechnung des Volumenstroms bei Stetigförderern für Schüttgut und wurde so auch schon in früheren, teilweise bereits vorgestellten Arbeiten [Gre-1994, Vol-2000, Fot-2002, Ron-2004a, Blo-2008], sowie in einschlägigen Normen und Richtlinien [DIN 15262, VDI 2330, FEM 2.121] für Schneckenförderer angewendet.

Demnach berechnet sich der erzielbare Volumenstrom eines Schneckenförderers gemäß der aus der Strömungsmechanik bekannten Kontinuitätsgleichung als Produkt von durchschnittlicher Geschwindigkeitskomponente in Förderrichtung und der orthogonal dazu stehenden durchflossenen Querschnittsfläche gemäß

$$I_V = A \cdot v_{ax} \quad . \quad (4-2)$$

Als durchflossene Querschnittsfläche A wird der Kreisring, den der Schnecken-durchmesser D und der Schneckenwellendurchmesser d beschreiben, angesetzt. Da der Schneckenförderer nicht komplett gefüllt ist, reduziert sich diese Fläche gemäß dem Füllungsgrad φ und berechnet sich nach

$$A = \pi \cdot \frac{1}{4} (D^2 - d^2) \cdot \varphi \quad . \quad (4-3)$$

Zur Bestimmung der durchschnittlichen axialen Fördergeschwindigkeit v_{ax} im stark geneigten Schneckenförderer wird auf die Ergebnisse der Analyse der Förderung eines Einzelkörpers im Schneckenförderer von *Böttcher* [Böt-1963] zurückgegriffen, deren Anwendbarkeit auf Schüttgut von *Vollmann* [Vol-2000] bestätigt wurde. Gemäß den in Abbildung 4-2 dargestellten Geschwindigkeitsverhältnissen berechnet sich die durchschnittliche axialen Fördergeschwindigkeit v_{ax} demnach durch

$$v_{ax} = \frac{S}{2\pi} \cdot (\omega_S - \omega_G) \quad (4-4)$$

mit den Winkelgeschwindigkeiten der Schneckenwendel ω_S und des Förderguts ω_G sowie der Schneckenganghöhe S .

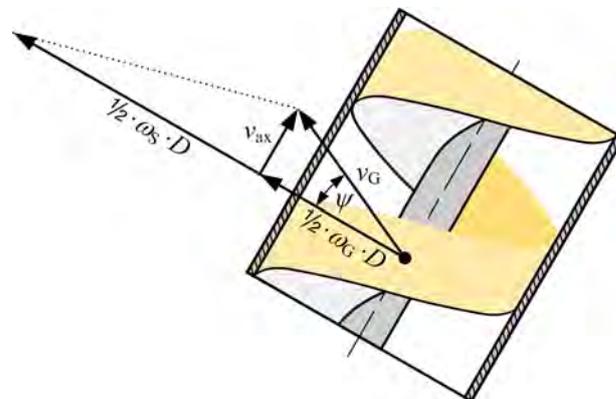


Abbildung 4-2: Geschwindigkeitskomponenten des Schüttguts im stark geneigten Schneckenförderer

Gleichung (4-4) belegt zudem die Existenz einer kritischen Schneckendrehzahl n_{krit} , die mindestens überschritten werden muss, damit im stark geneigten Schneckenförderer mit zumindest teilweise schraubenlinienförmiger Bewegung des Schüttguts eine Förderung überhaupt eintritt. Nur wenn die Schneckenwinkelgeschwindigkeit ω_S größer als die Winkelgeschwindigkeit des Förderguts ω_G ist, liegt die Relativwinkelgeschwindigkeit zwischen Fördergut und Schneckenwendel vor, die zum Bewegungsfortschritt in Förderrichtung nötig ist und eine Förderung so erst ermöglicht.

Um dem angestrebten Ansatz eines einfachen und praxistauglichen Dimensionierungsverfahrens gerecht zu werden, wird diese Differenz zwischen Schneckenwinkelgeschwindigkeit ω_S und Winkelgeschwindigkeit des Förderguts ω_G als Anteil der Schneckenwinkelgeschwindigkeit ω_S dargestellt und gemäß

$$\omega_S - \omega_G = \omega_S \cdot \zeta \tag{4-5}$$

berechnet, wobei ζ als empirischer Geschwindigkeitsbeiwert definiert wird, der im Intervall $0 \leq \zeta \leq 1$ liegt. Die Grenzen dieses Beiwerts sind anschaulich zu erklären: Einerseits verschwindet für $\zeta = 0$ die Relativwinkelgeschwindigkeit zwischen Schüttgut und Schneckenwendel und es findet keine Förderung mehr statt. Dieser Fall kann auch für Schneckendrehzahlen größer Null auftreten und stellt das Unterschreiten der Mindestdrehzahl dar. Andererseits wird für $\zeta = 1$ die Relativwinkelgeschwindigkeit gleich der Schneckenwinkelgeschwindigkeit und nimmt damit einen zwar grundsätzlich möglichen, bei zumindest teilweise schraubenlinienförmiger Bewegung des Schüttguts aber nicht erreichbaren maximalen Wert an. Gleichung (4-4) vereinfacht sich damit zu

$$v_{\text{ax}} = \frac{S}{2\pi} \cdot \omega_S \cdot \zeta = S \cdot n \cdot \zeta \tag{4-6}$$

Die Berechnung der axialen Fördergeschwindigkeit im stark geneigten Schneckenförderer wird somit stark vereinfacht. Die sehr komplexen Einflüsse des Schüttguts und das Vorliegen sich ändernder Bewegungszustände – der Anteil azimuthaler Geschwindigkeitskomponenten ändert sich, wie in Abschnitt 3 dargelegt, in Abhängigkeit vom Betriebszustand – während der Förderung, die eine analytische Betrachtung nur teilweise erlauben, werden durch einen empirischen Beiwert berücksichtigt. Dadurch ist auch die Verwendung von Gleichung (4-4), die eigentlich nur für die Förderung im Bereich III gilt, als zugrunde liegender Berechnungsansatz zulässig.

Damit sind nun sowohl die durchflossene Querschnittsfläche als auch die durchschnittliche Fördergeschwindigkeit in axialer Richtung bekannt und der erzielbare Volumenstrom I_V im stark geneigten Schneckenförderer berechnet sich durch Einsetzen der Gleichungen (4-3) und (4-6) in Gleichung (4-2) mit

$$I_V = A \cdot v_{ax} = \pi \cdot \frac{1}{4} (D^2 - d^2) \cdot \varphi \cdot S \cdot n \cdot \zeta \quad (4-7)$$

Bei der Dimensionierung der Baugröße eines stark geneigten Schneckenförderers ist anstatt des Volumenstroms meist der Massenstrom I_m , welcher gefördert werden soll, die maßgebliche zu erfüllende Forderung. Dieser folgt aus dem erzielbaren Volumenstrom I_V mit der Schüttdichte ρ des Förderguts gemäß

$$I_m = \rho \cdot I_V \quad (4-8)$$

Bis auf den Geschwindigkeitsbeiwert ζ stehen alle Einflussparameter als Eingangsgrößen bereits fest. Der Geschwindigkeitsbeiwert muss somit als letzter noch fehlender Parameter bestimmt werden, um den erzielbaren Volumenstrom eines stark geneigten Schneckenförderers einfach handhabbar berechnen zu können. Die Bestimmung des Geschwindigkeitsbeiwerts als empirische Kenngröße ist Gegenstand der weiteren Kapitel.

4.3 Berechnung des erforderlichen Leistungsbedarfs

Der erforderliche Leistungsbedarf zur Lösung einer Förderaufgabe im stark geneigten Schneckenförderer setzt sich aus einer Reihe verschiedener Verlustanteile zusammen. Neben dem Hubwiderstand zur Überwindung der Höhendifferenz, sind dies vor allem Reibungsverluste zwischen dem Fördergut und der angrenzenden Geometrie des Schneckenförderers sowie im Inneren des Schüttguts selbst. Nach *Vollmann* [Vol-2000] sind folgende Bewegungswiderstände zu berücksichtigen:

- Hubwiderstand
- Reibung zwischen Schüttgut und Rohrrinnenwand
- Reibung zwischen Schüttgut und Schneckenwendel
- Reibung zwischen Schüttgut und Schneckenwelle

- Bewegungswiderstand an Zwischenlagern
- Bewegungswiderstand im Spalt zwischen Schneckenwendel und Förderrohr
- Bewegungswiderstand aus Gutbeschleunigung
- Innere Reibung des Schüttguts

Von diesen kann einzig der erstgenannte Hubwiderstand auf einfache Weise analytisch genau bestimmt werden. Er berechnet sich aus der zu überwindenden Förderhöhe H und der zu hebenden Masse, genauer der Komponente der Streckenlast des Schüttguts m' im Schneckenförderer, die in Richtung der Fallbeschleunigung wirkt, gemäß

$$F_{\text{Hub}} = \frac{m'}{\sin \beta} \cdot g \cdot H \quad . \quad (4-9)$$

Die Streckenlast m' im Schneckenförderer wiederum berechnet sich aus dem geförderten Volumenstrom I_V , der Schüttdichte ρ des Förderguts und der axialen Fördergeschwindigkeit v_{ax} nach

$$m' = \frac{I_V \cdot \rho}{v_{\text{ax}}} \quad , \quad (4-10)$$

so dass für den Hubwiderstand F_{Hub} gilt

$$F_{\text{Hub}} = \frac{I_V \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\sin \beta \cdot v_{\text{ax}}} \quad . \quad (4-11)$$

Der Leistungsbedarf P_{Hub} , der im stark geneigten Schneckenförderer zum Heben des Schüttguts um die geforderte Höhendifferenz aufzubringen ist, berechnet sich schließlich mit Gleichung (4-11) und der Geschwindigkeitskomponente des Schüttguts entgegen der Fallbeschleunigung, die mit der Schneckenneigung β aus der axialen Fördergeschwindigkeit v_{ax} folgt, gemäß

$$P_{\text{Hub}} = F_{\text{Hub}} \cdot \sin \beta \cdot v_{\text{ax}} = I_V \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad . \quad (4-12)$$

Alle übrigen Bewegungswiderstände können auf eine einfach handhabbare Art nicht berechnet werden, obwohl teilweise analytische Möglichkeiten zur Beschreibung vorliegen [Gab-1981, Gre-1994, Vol-2000, Ron-2004a]. Für sie wird gemäß dem semi-empirischen Ansatz ein fiktiver Gesamtreibungswiderstand F_{Reib} angesetzt, der alle durch Reibung verursachten Bewegungswiderstände in sich zusammenfasst und unter Zuhilfenahme eines empirischen Kennwerts einfach zu berechnen ist.

Wie von *Vollmann* [Vol-2000], als Erweiterung des Modells von *Gabler* [Gab-1981], vorgeschlagen, wird der fiktive Gesamtreibungswiderstand analog zur Norm *DIN 15262* [DIN 15262] durch Multiplikation eines fiktiven Förderfaktors ϕ mit der Normalkraft F_N des Schüttguts auf das Förderrohr berechnet und damit wie eine Reibkraft zwischen Schüttgut und Förderrohr behandelt. Dieses Vorgehen basiert damit, wie bei vielen anderen Stetigförderern auch, auf dem Ansatz der Coulombschen Reibung zwischen Festkörpern aus der klassischen Mechanik [Mag-2005]. Für den fiktiven Gesamtreibungswiderstand F_{Reib} folgt damit

$$F_{\text{Reib}} = \phi \cdot F_N . \quad (4-13)$$

Die in Gleichung (4-13) enthaltene Normalkraft F_N ist, abhängig von der Neigung des Schneckenförderers gegenüber der Horizontalen, entweder die Gewichtskraft, die Zentripetalkraft oder eine Kombination aus Beidem und ergibt sich durch die Masse des Schüttguts im Schneckenförderer und der darauf wirkenden Beschleunigung. Unabhängig davon, was der Normalkraft zu Grunde liegt, folgt die Masse des Schüttguts im Schneckenförderer wieder aus der Förderlänge L sowie der Streckenlast des Schüttguts mit dem geförderten Volumenstrom I_V , der Schüttdichte ρ und der axialen Fördergeschwindigkeit v_{ax} gemäß Gleichung (4-10). Die Beschleunigung a dieser Masse ist je nach Bewegungsverhalten des Schüttguts, Übergang hin zur schraubenlinienförmigen Bewegung im stark geneigten Schneckenförderer, und der Schneckenneigung die Fallbeschleunigung, die Zentripetalbeschleunigung oder eine Kombination aus Beiden. Wie groß die Beschleunigung im konkreten Fall ist, beziehungsweise was ihr genau zugrunde liegt, ist hier zunächst nicht relevant. Mit Gleichung (4-13) folgt demnach der fiktive Gesamtreibungswiderstand F_{Reib} bei der Förderung zu

$$F_{\text{Reib}} = \phi \cdot \frac{I_V \cdot \rho}{v_{\text{ax}}} \cdot L \cdot a . \quad (4-14)$$

Mit der absoluten Gutgeschwindigkeit v_G , mit der sich das Schüttgut relativ zum stillstehenden Förderrohr bewegt und die damit maßgeblich ist für die Berechnung des auf der fiktiven Reibung am Förderrohr basierenden Leistungsbedarfs, folgt aus Gleichung (4-14) der allgemeine Ansatz zur Berechnung des fiktiven Gesamtreibungsbedarfs P_{Reib} gemäß

$$P_{\text{Reib}} = F_{\text{Reib}} \cdot v_G \quad (4-15)$$

Die darin enthaltene absolute Gutgeschwindigkeit v_G lässt sich, analog zum Vorgehen bei der Einzelkörperbetrachtung, aus dem in Abbildung 4-2 dargestellten Geschwindigkeitsverhältnissen für das Schüttgut bestimmen. Ersetzt man die dort auftretende Winkelgeschwindigkeit des Förderguts ω_G mit Hilfe von Gleichung (4-5) durch die Schneckenwinkelgeschwindigkeit ω_S und den Geschwindigkeitsbeiwert ζ , berechnet sich die absolute Gutgeschwindigkeit v_G gemäß

$$v_G = \frac{D \cdot \omega_G}{2 \cdot \cos \psi} = \frac{D \cdot \omega_S}{2 \cdot \cos \psi} \cdot (1 - \zeta) \quad (4-16)$$

Der nun noch unbekannte Förderwinkel ψ kann ebenfalls aus den Geschwindigkeitsverhältnissen in Abbildung 4-2 bestimmt werden. Mit den Gleichungen (4-4) und (4-5) folgt der Förderwinkel ψ in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsbeiwerts ζ , der Schneckenganghöhe S und dem Schneckendurchmesser D aus

$$\psi = \arctan\left(\frac{v_{\text{ax}}}{\frac{1}{2} \cdot \omega_G \cdot D}\right) = \arctan\left(\frac{\zeta}{1 - \zeta} \cdot \frac{S}{\pi \cdot D}\right) \quad (4-17)$$

Nachdem nun die absolute Gutgeschwindigkeit v_G sowie alle zur Bestimmung nötigen Größen beschrieben sind, kann der fiktive Gesamtreibungsbedarf P_{Reib} durch Einsetzen der Gleichungen (4-6), (4-14), (4-16) und (4-17) in Gleichung (4-15) folgendermaßen angegeben werden:

$$P_{\text{Reib}} = \phi \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{1 - \zeta}{\zeta} \cdot \cos^{-1}\left[\arctan\left(\frac{\zeta}{1 - \zeta} \cdot \frac{S}{\pi \cdot D}\right)\right] \cdot \frac{D}{S} \cdot I_V \cdot \rho \cdot L \quad (4-18)$$

Um auch hier dem Ansatz eines einfachen und praxistauglichen, semi-empirischen Berechnungsverfahrens gerecht zu werden, werden die vom Geschwindigkeitsbeiwert ζ abhängigen Anteile sowie der noch unbekannte Förderfaktor ϕ zu einem Leis-

tungsbeiwert λ zusammengefasst. Ebenfalls im Leistungsbeiwert λ enthalten ist die Beschleunigung der Masse im Schneckenförderer als Anteil der Erdbeschleunigung. Der Leistungsbeiwert λ fasst somit gemäß

$$\lambda = \phi \cdot \pi \cdot \frac{a}{g} \cdot \frac{1-\zeta}{\zeta} \cdot \cos^{-1} \left[\arctan \left(\frac{\zeta}{1-\zeta} \cdot \frac{S}{\pi \cdot D} \right) \right] \quad (4-19)$$

alle bisher nicht bestimmbareren Anteile am fiktiven Gesamtreibleistungsbedarf in einem empirischen Beiwert zusammen. Dadurch ist es auch hier gerechtfertigt, für den Berechnungsansatz auf Gleichungen zurückzugreifen, die eigentlich nur für eine rein schraubenlinienförmige Bewegung des Schüttguts gelten, da die in Kauf genommene Ungenauigkeit des Basisansatzes durch den empirischen Beiwert korrigiert werden kann.

Der fiktive Gesamtreibleistungsbedarf P_{Reib} vereinfacht sich somit zu

$$P_{\text{Reib}} = \lambda \cdot \frac{D}{S} \cdot I_V \cdot \rho \cdot g \cdot L \quad (4-20)$$

Schließlich ergibt sich der erforderliche Leistungsbedarf P_F zur Förderung im stark geneigten Schneckenförderer mit den Gleichungen (4-12) und (4-20) aus der Summe aller Bewegungswiderstände zusammengefasst gemäß

$$P_F = P_{\text{Reib}} + P_{\text{Hub}} = I_V \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\lambda \cdot \frac{D}{S} \cdot L + H \right) \quad (4-21)$$

In Gleichung (4-21) ist somit nur noch der Leistungsbeiwert λ unbekannt. Nach dessen Bestimmung kann der zur Förderung notwendige Leistungsbedarf eines stark geneigten Schneckenförderers mit obiger Formel einfach und praxistauglich berechnet werden. Die Entwicklung dieser empirischen Kenngröße wird im Folgenden beschrieben.

5 Vorgehen und Durchführung der Datenermittlung

In Abschnitt 4 wurden die grundlegenden Berechnungsformeln zur Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer beschrieben und die darin enthaltenen notwendigen empirischen Beiwerte Geschwindigkeitsbeiwert ζ und Leistungsbeiwert λ definiert. Um diese empirischen Beiwerte formelbasiert darstellen zu können, ist die Auswertung einer genügend großen Datenmenge, die den geplanten Anwendungsbereich der Beiwerte abdecken, notwendig. Zur Erhebung dieser benötigten Datensätze werden die drei verschiedenen Methoden

- experimentelle Versuche mit einer Versuchsanlage für Schneckenförderer,
- Simulationen nach der Diskrete Elemente Methode sowie
- Berechnung mit dem in Abschnitt 3.5 beschriebenen analytischen Berechnungsverfahren

eingesetzt. Damit ist es möglich, Datensätze für alle in Abschnitt 4.1 aufgeführten und auf die Förderung im stark geneigten Schneckenförderer wirkenden Einflussgrößen, auch in deren Randbereichen, zu gewinnen. Die einzelnen Methoden zur Datenerhebung, deren Anwendung sowie die Aufbereitung der gewonnenen Datensätze für die in Abschnitt 6 dargelegte Auswertung werden im Folgenden beschrieben.

5.1 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentelle Untersuchung der Förderung im Schneckenförderer ist seit Beginn der Forschungen an diesem Fördergerät fester Bestandteil der wissenschaftlichen Arbeiten. Als problematisch hat sich dabei oft die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse weg von den relativ kleinen, modellhaften Versuchsanlagen hin zu deutlich größeren in der Praxis benötigten Fördergeräten erwiesen. Um dem entgegen wirken zu können, wurde am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit der damaligen Krupp Fördertechnik GmbH im Jahr 1998 eine Großversuchsanlage für Schneckenförderer, die konzeptionell einem Schiffsentlader nachempfunden ist, installiert. Diese über-

5 Vorgehen und Durchführung der Datenermittlung

trifft sowohl in ihren geometrischen Abmessungen als auch mit ihren technischen Daten, wie der installierten elektrischen Leistung oder dem erzielbaren Volumenstrom, bisherige Versuchsstände deutlich und entspricht eher einer industriellen Förderanlage als einer modellhaften Versuchsanlage. Die Fördertechnik der Anlage ist für einen maximalen Volumenstrom von ca. $0,0275 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einer Schüttdichte von 1.000 kg/m^3 ausgelegt. Damit kann ein maximaler Massenstrom von ca. 100 t/h gefördert werden. Die konstruktive Gestaltung der Förderorgane erlaubt den Einsatz und die Analyse von feinkörnigen, grobkörnigen bis hin zu stückigen Schüttgütern wie z. B. Getreide, Kohle und Schwefel. Durch diese Konzeption der Versuchsanlage, die in Abbildung 5-1 im heutigen Zustand dargestellt ist, wird die Erzielung realitätsnaher Ergebnisse im Rahmen der Versuchsdurchführung ermöglicht.



Abbildung 5-1: Versuchsanlage zur Untersuchung stark geneigter Schneckenförderer

Um die Durchführung der im Rahmen dieser Arbeit erforderlichen Versuche am stark geneigten Schneckenförderer zu ermöglichen, wurden an der Versuchsanlage umfangreiche Umbauarbeiten durchgeführt. Auf fördertechnischer Seite wurde hierdurch der Betriebsbereich hinsichtlich der zu untersuchenden Schneckenneigung von maximal 20° auf maximal 60° erweitert und ein neuer Schneckenförderer, der für diese Schneckenneigung geeignet ist, integriert. Zudem wurden messtechnische Komponenten ergänzt, um alle im Abschnitt 4 beschriebenen Einfluss- und Zielgrößen erfassen zu können. Zusammen mit weiteren Umbaumaßnahmen, die im Rah-

men früherer Forschungsvorhaben bereits durchgeführt wurden, konnte die Funktionalität der Versuchsanlage gegenüber dem ursprünglichen Zustand somit wesentlich erweitert werden. Die in den folgenden Abschnitten dargelegte Beschreibung von Förder- und Messtechnik stellt die Versuchsanlage in der aktuellen Ausbaustufe mit Möglichkeit zur Untersuchung stark geneigter Schneckenförderer vor.

5.1.1 Beschreibung von Fördertechnik und Materialfluss

Die Fördertechnik der Versuchsanlage ist modular aufgebaut und besteht im Wesentlichen aus den getrennt voneinander zu betrachtenden Förderorganen

- Vertikaler Schneckenförderer und
- Geneigter Schneckenförderer,

die dem Transport des Schüttguts dienen und im Rahmen der experimentellen Versuche ausgewertet werden. Die beiden Schneckenförderer sind über ein Schurrensystem verbunden. Der vertikale Schneckenförderer ist zudem mit einem Zuführorgan ausgestattet, um eine gleichbleibende, hohe Füllung des Schneckenförderers zu gewährleisten. Dieses Zuführorgan ist als symmetrisch angeordneter, horizontaler Schneckenförderer mit langsam laufender Doppelwendel ausgeführt. Die Schneckendrehzahlen der Förderer können unabhängig voneinander über Frequenzumrichter stufenlos geregelt werden. Die technischen Daten der Schneckenförderer sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Technische Daten der Schneckenförderer der Versuchsanlage

		Zuführ- schnecken- förderer	Vertikaler Schnecken- förderer	Geneigter Schnecken- förderer
Förderlänge	[m]	2 × 0,75	7,0	3,0
Schneckendurchmesser	[m]	0,40	0,26	0,26
Schneckenwellendurchmesser	[m]	0,108	0,076	0,076
Schneckenganghöhe	[m]	0,40	0,23	0,23
Schneckenneigung	[°]	0°	90°	0° - 60°
Maximale Schneckendrehzahl	[1/s]	1,7	9,3	9,3
Installierte Antriebsleistung	[kW]	1,5	30,0	15,0

5 Vorgehen und Durchführung der Datenermittlung

Während der Versuchsdurchführung ist das Schüttgut in einem 6 m × 3 m × 1,5 m großen Bunker gelagert. Von dort wird es über den vertikalen und den geneigten Schneckenförderer sowie das Schurrensystem in einen zweiten Bunker gleicher Größe gefördert. Durch Drehen des geneigten Schneckenförderers um 180° um die Hochachse ist auch die Rückförderung in den ersten Bunker möglich. Die Anordnung der einzelnen Förderorgane kann Abbildung 5-2 entnommen werden.

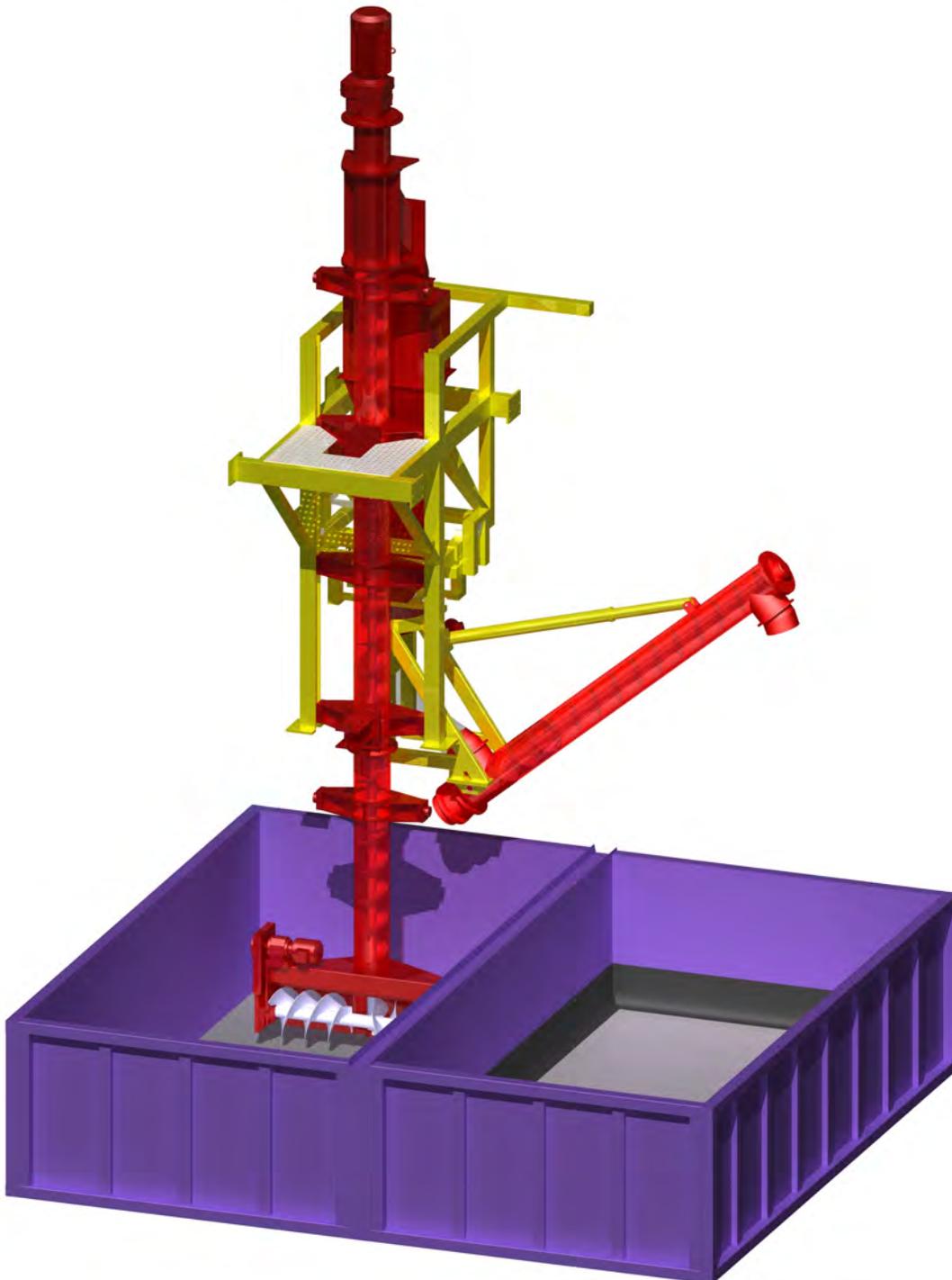


Abbildung 5-2: Anordnung der Fördertechnikkomponenten in der Versuchsanlage

Die gesamte Fördertechnik, wie in Abbildung 5-2 dargestellt, kann in Bunkerlängsrichtung mit stufenlos regelbarer Vorschubgeschwindigkeit auf einem Katzfahrwerkverfahren werden. Der vertikale Schneckenförderer und damit auch der Zuführschneckenförderer sind stufenlos in der Höhe verfahrbar. Das Schüttgut im Bunker kann so mit Hilfe des Zuführschneckenförderers bahnen- und schichtweise abgefräst werden, wobei über die Einstellung von Frästiefe und Vorschubgeschwindigkeit der geförderte Volumenstrom grob voreingestellt werden kann. Durch den Zuführschneckenförderer, der wie eine Stopfschnecke arbeitet, wird dem vertikalen Schneckenförderer so in allen betrachteten Betriebszuständen Schüttgut in ausreichender Menge zwangszugeführt. Der vertikale Schneckenförderer transportiert das Schüttgut zunächst 7 m nach oben. Anschließend fällt das Schüttgut über das teleskopierbare Schurrensystem, das sich der Position des in der Höhe verfahrbaren vertikalen Schneckenförderers anpassen kann, in den geneigten Schneckenförderer. Dieser fördert das Schüttgut schließlich über eine Förderlänge von 3 m in den zweiten Bunker. Die Schneckenneigung gegenüber der Horizontalen ist stufenlos zwischen 0° und 60° einstellbar. Da der vertikale und der geneigte Schneckenförderer jeweils gleiche geometrische Abmessungen bezüglich ihrer Durchmesser und Schneckenganghöhen aufweisen und denselben Volumenstrom fördern, ist zudem ein Vergleich des Förderverhaltens in beiden Schneckenförderern möglich.

5.1.2 Messdatenerfassung

Um die empirischen Beiwerte bestimmen zu können, müssen die Werte aller in Abschnitt 4.1 genannten Einflussparameter sowie der gesuchten Zielgrößen für jeden Versuch bekannt sein. Neben den Schüttgutparametern, die separat bestimmt werden, und den bis auf die Schneckenneigung nicht veränderbaren Geometrieparametern, müssen die nachstehenden Einflussparameter während der Versuchsdurchführung erfasst werden. Das Vorgehen hierzu wird im Folgenden beschrieben.

- Schneckenneigung
- Schneckendrehzahl
- Füllungsgrad
- Leistungsbedarf zur Förderung
- Geförderter Volumenstrom

Schneckenneigung

Der Neigungswinkel der Achse des geneigten Schneckenförderers gegenüber der Horizontalen wird mit einem magnetischen Neigungssensor erfasst, der, wie Abbildung 5-3 zeigt, an der Drehachse des Schneckenförderers angebracht ist. Der Sensor arbeitet induktiv und damit sowohl berührungslos als auch verschleißfrei. Er liefert kontinuierlich ein analoges Spannungssignal, das abgelesen werden kann.



Abbildung 5-3: Magnetischer Neigungssensor am geneigten Schneckenförderer

Schneckendrehzahl

Um die Schneckendrehzahlen zu erfassen, sind an den Antriebsmotoren Drehzahlgeber angebracht, die kontinuierlich Messwerte liefern. Diese Motordrehzahlen werden im internen Speicher der Frequenzumrichter gespeichert, nach der Versuchsdurchführung ausgelesen und mit den Getriebeübersetzungen in die Schneckendrehzahlen umgerechnet. Über die Frequenzumrichter erfolgt zudem eine Regelung, um die Schneckendrehzahlen während der Versuchsdurchführung konstant zu halten. Daneben werden auch die Drehzahlen der Antriebsmotoren von Zuführschneckenförderer sowie Katzfahrwerk geregelt und aufgezeichnet. Dies dient der Sicherstellung eines kontinuierlichen Förderprozesses, da diese Motoren, wie oben beschrieben, der Fördergutzuführung in den vertikalen Schneckenförderer dienen.

Füllungsgrad

Der Füllungsgrad kann im geneigten Schneckenförderer nicht direkt gemessen werden, sondern wird über die Masse des Schüttguts im Förderer indirekt erfasst. Dazu ist der geneigte Schneckenförderer, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, mitsamt seinem Traggerüst auf drei Wägezellen gelagert, die mit Dehnungsmessstreifen (DMS) arbeiten und über Elastomerlager verfügen, um kleine Bewegungen auszugleichen. Der Förderer ist damit flexibel und dennoch statisch bestimmt gelagert. Da sich auch die Neigungsvorrichtung unterhalb der Wägezellen befindet, ist die Messung von der Schneckenneigung unabhängig. Jede der Wägezellen liefert kontinuierlich ein analoges Spannungssignal, das, elektrisch zusammengeschaltet als ein Signal, in einem der Frequenzumrichter aufgezeichnet wird. Störende Einflüsse durch Schwingungen des gesamten Systems oder durch den Impuls des herabfallenden Förderguts können bei der Auswertung durch Korrekturfunktionen eliminiert werden.

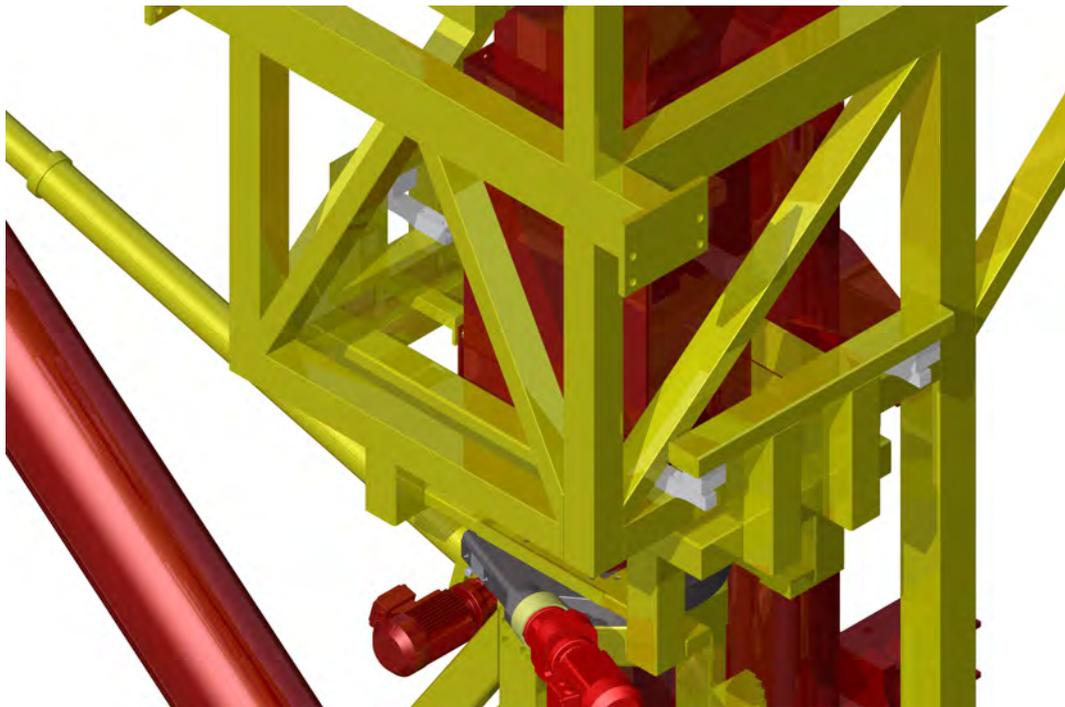


Abbildung 5-4: Anordnung der Wägezellen zur Bestimmung des Füllungsgrades

Leistungsbedarf zur Förderung

Statt des Leistungsbedarfs zur Förderung kann die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors über den Frequenzumrichter direkt gemessen werden. Dieser berechnet während des Betriebs kontinuierlich die Werte von Wirkstrom und Scheinstrom

aus der gemessenen Motordrehzahl, der Stromstärke in den einzelnen Phasen, sowie dem Wirkfaktor des Motors, der über Kennfelder berücksichtigt wird. Damit kann der elektrisch aufgenommene Wirkstrom hochauflösend aufgezeichnet und anschließend zur Berechnung des Leistungsbedarfs zur Förderung herangezogen werden. Vergleichsmessungen an Motoren mit konventionellen Drehmoment-Messwellen durch den Motorhersteller lieferten Abweichungen von nur 1 - 2 % des Nennwerts mit diesem Vorgehen und bestätigten damit deren Anwendbarkeit.

Geförderter Volumenstrom

Der mit dem geneigten Schneckenförderer geförderte Volumenstrom wird durch eine kontinuierliche Differenzwiegung der gesamten Masse an Fördergut im zweiten Bunker und damit direkt an der Gutabgabe des geneigten Schneckenförderers bestimmt. Dazu wurde eine Waage entwickelt und gefertigt [fml-2010c], die den gesamten Inhalt des Bunkers wiegen kann. Sie besteht, wie in Abbildung 5-5 dargestellt, im Wesentlichen aus einem der Größe des Bunkers angepassten, beplankten Tragrahmen, der als Zwischenboden dient und nun das Fördergut trägt, sowie drei DMS-Wägezellen, auf denen der Rahmen statisch bestimmt gelagert ist. Die analogen Spannungssignale der drei Wägezellen werden wiederum zu einem Summensignal verschaltet und gespeichert.

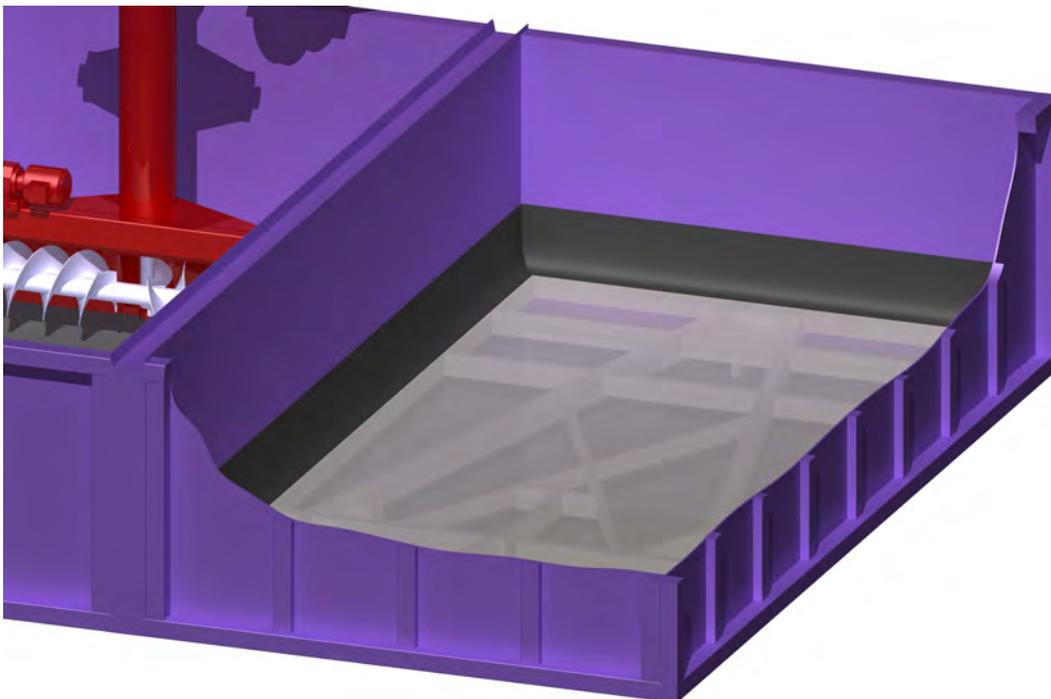


Abbildung 5-5: Wägeeinrichtung zur Bestimmung des geförderten Volumenstroms

Die kontinuierliche, hochfrequente Wiegung des Bunkerinhalts liefert die Zunahme der Masse im Bunker während der Versuchsdurchführung und somit den Massenstrom des geeigneten Schneckenförderers. Mit der Schüttdichte des Förderguts kann daraus der geförderte Volumenstrom berechnet werden. Eine Überprüfung der Genauigkeit der Waage mit Einzelgewichten ergab Messabweichungen unter 2 %, womit eine ausreichende Genauigkeit der Waage gegeben ist.

5.1.3 Analyse der untersuchten Schüttgüter

Neben den konstanten und den während der Versuche messbaren Einflussgrößen werden, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, auch die Kennwerte des geförderten Schüttguts betrachtet, da sie großen Einfluss auf den Leistungsbedarf haben. Von den vielen möglichen Kennwerten, die sich zur Charakterisierung von Schüttgütern eignen [DIN ISO 3435, FEM 2.581], werden entsprechend Abschnitt 3.1 nur

- die Schüttdichte,
- der Innere Reibwert des Schüttguts und
- der Äußere Reibwert des Schüttguts gegenüber Stahl, dem Werkstoff des Schneckenförderers,

herangezogen. Zusätzlich wird die Korngrößenverteilung ermittelt, da diese für die durchzuführenden DEM-Simulationen benötigt wird. Da Schüttgüter im Allgemeinen sehr volatile Eigenschaften besitzen, können die genannten Kennwerte nicht als konstant angenommen und beispielsweise der Literatur entnommen werden, sondern müssen für jedes Schüttgut bestimmt werden.

Die Schüttdichte wird im lockeren, unverdichteten Zustand bestimmt, indem eine abgewogene Schüttgutprobe aus geringer Höhe in einen Messbehälter geschüttet und das eingenommene Volumen abgelesen wird. Aus der Masse und dem eingenommenen Volumen der Probe kann mit Gleichung (3-1) die Schüttdichte berechnet werden.

Der Innere Reibwert kann entweder mit einem Schergerät nach dem Prinzip von *Jenike*, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, oder durch Messung des Böschungswinkels bestimmt werden. Der Böschungswinkel „ist der Winkel, den die Mantellinie des

aus geringer Höhe gleichmäßig, langsam aufgeschütteten, kegelförmigen Haufwerkes mit der Horizontalen bildet“ [FEM 2.582]. Für kohäsionslose und frei rieselfähige Schüttgüter, wie sie hier untersucht werden, entspricht der Böschungswinkel in guter Näherung dem Reibwinkel [Kat-2005b].

Der Äußere Reibwert wird ähnlich der Messung des Inneren Reibwerts mit einer Scherzelle bestimmt, wobei der untere Teil der Schüttgutprobe, siehe dazu Abbildung 3-1, durch eine Probe des Wandmaterials ersetzt wird und die Scherbewegung damit zwischen Schüttgut und Wandprobe stattfindet.

Die Korngrößenverteilung wird zur realistischen Nachbildung des Schüttguts im Rahmen der DEM-Simulationen benötigt und durch eine Trockensiebung bestimmt. Dabei wird die Schüttgutprobe mit Hilfe einer Schwingsiebmaschine in Fraktionen gleicher Partikelgrößenbereiche aufgeteilt und deren Masseanteile durch Wiegung bestimmt.

5.1.4 Aufbereitung der aufgezeichneten Messdaten

Die während der Versuchsdurchführung erfassten Daten werden nach jedem Versuch in Form von Text-Dateien mit mehreren Datenspalten gespeichert und stehen damit der weiteren Auswertung in einem MS Excel-basierten Tool zur Verfügung, das mehrere Funktionen in sich vereinigt. In einem ersten Schritt werden die einzelnen Datensätze, die in verschiedenen Dateien für den Messzeitraum von 10 s in Form von 2048 Einzelwerten vorliegen, in einer Datei vereinigt und um die für die einzelnen Versuche konstanten Einflussgrößen, wie die Schüttgutkennwerte, die Schneckenneigung und die nicht variablen Geometrieparameter, ergänzt. In einem nächsten Schritt wird überprüft, ob während der gesamten Versuchsdauer von ca. 10 s eine konstante, quasi-stationäre Förderung stattfand. Dies ist entscheidend für die weitere Verwendung des Datensatzes, da nur bei Werten, die innerhalb eines bestimmten Bereichs konstant sind, eine Mittelwertbildung sinnvoll ist. Zur Überprüfung werden die Datenpunkte von Wirkstrom des Antriebsmotors und Massenstrom über der Versuchszeit aufgetragen. Ein quasi-stationärer Versuch liegt vor, wenn die Mittellinien, um die die Messpunkte streuen, horizontal verlaufen. Ist dies der Fall wird für jeden Parameter der arithmetische Mittelwert gebildet. Somit liegt nun für jeden durchgeführten Versuch ein Datensatz mit den für den Versuch gültigen Parameterwerten vor, die alle in einer Ergebnisdatei gespeichert werden.

Während die Schneckendrehzahl und die Schneckenneigung, wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, direkt gemessen werden, müssen der Füllungsgrad, der Volumenstrom und die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors aus den aufgezeichneten Rohdaten berechnet werden. Für den Füllungsgrad im geneigten Schneckenförderer erfolgt dies mit der bekannten Masse des leeren Schneckenförderers, der Schüttdichte des Förderguts sowie dem Volumen im Inneren des Schneckenförderers aus der gemessenen Masse des gesamten geneigten Schneckenförderers während des Versuchs. Analog dazu wird der Volumenstrom aus der durchschnittlichen Zunahme der geförderten Masse an Fördergut im Bunker während des Messintervalls und der Schüttdichte des Förderguts berechnet. Die elektrische Leistungsaufnahme des Antriebsmotors $P_{A,el}$ folgt aus dem aufgenommenen Wirkstrom des Antriebsmotors I_{Wirk} und der effektiven Spannung U_{eff} . Mit dem Gesamtwirkungsgrad des Antriebs η folgt die mechanisch an die Schneckenwelle abgegebene Leistung $P_{A,mech}$ gemäß

$$P_{A,mech} = P_{A,el} \cdot \eta = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{Wirk} \cdot \eta \quad (5-1)$$

Um den Leistungsbedarf zur Förderung zu erhalten, muss diese vom Motor abgegebene Leistung noch um die drehzahlabhängige Leerlaufleistung P_{Leer} reduziert werden. Diese berücksichtigt alle Leistungsverluste, die auch im Leerlauf ohne Fördergut auftreten, wie Reibungsverluste in Lagern und Dichtungen. Die Leerlaufleistung P_{Leer} wurde im Vorfeld der Versuche experimentell bestimmt.

Abschließend sind noch die Werte des empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwerts ζ^* und des empirisch ermittelten Leistungsbeiwerts λ^* als Zielgrößen der experimentellen Untersuchungen zu berechnen. Diese folgen aus den Gleichungen (4-7) und (4-21) durch Auflösen nach den entsprechenden Beiwerten zu

$$\zeta^* = \frac{4 \cdot I_V}{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot \varphi \cdot S \cdot n} \quad (5-2)$$

$$\lambda^* = \frac{P_{A,el} - P_{Leer}}{I_V \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{D}{S} \cdot L} - \frac{S \cdot H}{D \cdot L} \quad (5-3)$$

Die schließlich für jeden Versuch vorliegenden Parameter sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst. Unterschieden werden darin die in den Versuchen konstanten Parameter, wie die Abmessungen des Schneckenförderers sowie die Schüttgutpara-

meter, und die variablen Parameter, die pro Versuch eingestellt oder gemessen werden. Deren Einteilung in Eingangs- und Zielgrößen bezieht sich dabei auf die gesuchten Berechnungsverfahren.

Tabelle 5-2: Vorliegende Parameter für jeden durchgeführten Versuch

In den Versuchen konstante Parameter	In den Versuchen variable Parameter
<p>Schüttgutparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schüttdichte ▪ Innerer Reibwert ▪ Äußerer Reibwert <p>Geometrieparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schneckendurchmesser ▪ Schneckenwellendurchmesser ▪ Schneckenganghöhe ▪ Förderlänge 	<p>Eingangsgrößen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schneckenneigung ▪ Schneckendrehzahl ▪ Füllungsgrad <p>Zielgrößen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Volumenstrom ▪ Leistungsbedarf zur Förderung ▪ Geschwindigkeitsbeiwert ▪ Leistungsbeiwert

5.1.5 Versuchsprogramm

Um die gesuchten Berechnungsverfahren für die Vielzahl an denkbaren Einsatzfällen von geeigneten Schneckenförderern anwendbar zu machen, müssen die einstellbaren Parameter in einem möglichst großen Spektrum variiert werden. Von den in Tabelle 5-2 aufgezählten variablen Parametern ist dies nur für die Eingangsgrößen in die Berechnungsverfahren möglich, da die Zielgrößen von allen betrachteten Einflussgrößen, Eingangsgrößen der variablen Parameter sowie konstanten Parametern, abhängig sind. Die mit der Versuchsanlage maximal möglichen Ausprägungen dieser drei Parameter sind in Tabelle 5-3 mit den gewählten Parameterabstufungen aufgeführt.

Tabelle 5-3: Gewählte Parameterstufen bei den experimentellen Untersuchungen

		Parameterstufen				
Schneckendrehzahl	[1/s]	2,0	3,5	5,0	6,5	8,0
Schneckenneigung	[°]	20	30	40	50	60
Füllungsgrad	[-]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

Während von diesen Parametern die Schneckendrehzahl und die Schneckenneigung genau voreingestellt werden können, ist dies beim Füllungsgrad nicht möglich. Dieser kann während der Versuchsdurchführung nur kontinuierlich überwacht werden. Um dennoch verschiedene Füllungsgrade betrachten zu können, werden die geförderten Volumenströme gezielt variiert. Dies führt bei ansonsten gleichen Parametern zu einer direkten Änderung des Füllungsgrades. Die Einstellung des geförderten Volumenstroms ist an der Versuchsanlage unabhängig von den eingestellten Parametern des geneigten Schneckenförderers möglich und erfolgt über die Frästiefe und Vorschubgeschwindigkeit des Zuführschneckenförderers. Da die genauen Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und dem Volumenstrom erst im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, wird zur Bestimmung der einzustellenden Volumenströme auf die vorhandenen Berechnungsverfahren für vertikale Schneckenförderer zurückgegriffen. Die in Tabelle 5-3 angegebenen Parameterstufen des Füllungsgrades können damit zwar nicht exakt angefahren werden, die richtige Größenordnung wird aber erreicht. Dies und die Tatsache, dass einige Parameterkombinationen den maximal förderbaren Volumenstrom der Versuchsanlage überschreiten würden, lässt eine vollfaktorielle Durchführung der experimentellen Untersuchungen nicht zu. Dennoch wird eine größtmögliche Abdeckung des Parameter-raums angestrebt.

Da neben den Geometrie- und Betriebsparametern auch die Schüttgutparameter Einfluss auf das Förderverhalten und den erforderlichen Leistungsbedarf zum Fördern nehmen, werden auch verschiedene Schüttgüter betrachtet. Um hier die Anzahl der Schüttgüter zu vergrößern, wird der Einfluss der Schüttgutparameter auf den Leistungsbedarf als unabhängig vom Einfluss der Betriebs- und Geometrieparametern angesetzt. Es wird also angenommen, dass sich der Einfluss der Betriebs- und Geometrieparameter bei verschiedenen geförderten Schüttgütern nicht ändert. Damit ist es möglich, auch auf experimentelle Daten, die im Rahmen vorhergehender Untersuchungen mit anderen Neigungsbereichen erhoben wurden, zurück zu greifen. Dies bietet zudem den Vorteil, die bezüglich der Schneckenneigung untersuchten Randbereiche durch experimentell ermittelte Daten abzusichern. Insgesamt wurde bei der Auswahl der Schüttgüter darauf geachtet, ein breites Spektrum an verschiedenen Schüttgütern – von feinkörnig bis stückig – abzudecken, um die breite Anwendbarkeit der Berechnungsverfahren sicherstellen zu können. Die insgesamt betrachteten Schüttgüter werden mit ihren Schüttgutparametern zusammen allen weiteren betrachteten und ermittelten Parametern in Abschnitt 6 aufgeführt.

5.1.6 Beschreibung der Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Versuche pro Fördergut wurde das folgende, in Abbildung 5-6 gezeigte, standardisierte Vorgehen festgelegt, um während der einzelnen Versuche möglichst gleiche Bedingungen sicherzustellen:

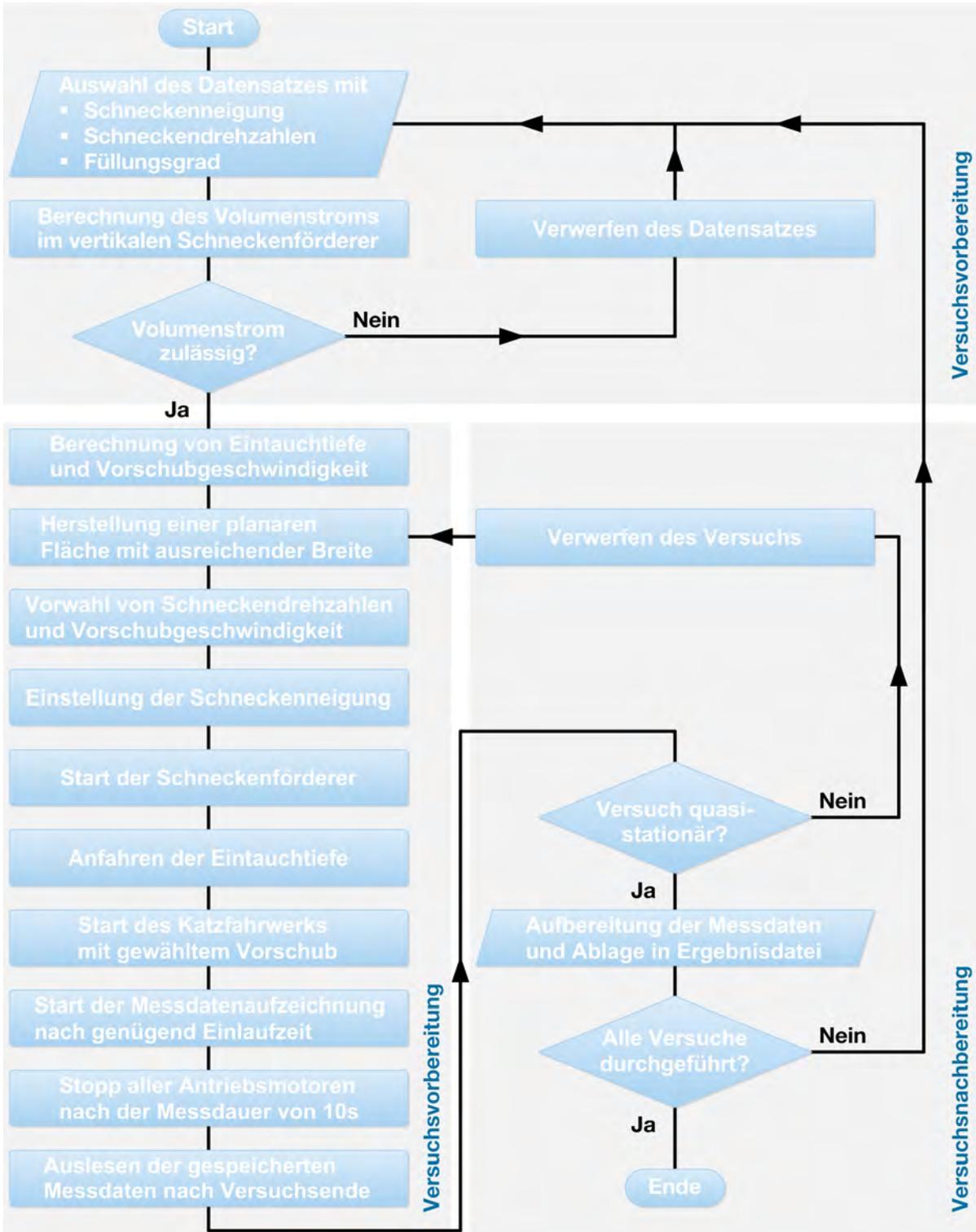


Abbildung 5-6: Vorgehen zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen

5.2 Simulationen nach der Diskrete Elemente Methode

Neben den eben beschriebenen experimentellen Untersuchungen an der realen Versuchsanlage werden auch Simulationsexperimente durchgeführt, um Daten für den geförderten Volumenstrom und den dazu nötigen Leistungsbedarf zu erhalten. Als Werkzeug für Simulationen in der Umgebung der Schüttgut-Fördertechnik hat sich, wie in Abschnitt 2 bereits dargestellt, in letzter Zeit die Diskrete Elemente Methode, kurz DEM genannt, etabliert. Wie von *Katterfeld* beschrieben, erlaubt diese die Berechnung und Simulation von diskreten, diskontinuierlichen aber auch kontinuierlichen Vorgängen an diskreten Elementen, wie sie Schüttgüter als Fördergut von Steigt Förderern aller Art sind, und stellt damit einen Gegensatz zur klassischen kontinuumsmechanischen Betrachtungsweise dar. Die Simulationsmethode ist prinzipiell sehr einfach, stieß aber früher durch den sehr großen Rechenaufwand an ihre Grenzen. Erst durch den Einsatz moderner Computer mit Mehrkerntechnologie und hoher Rechengeschwindigkeit ist es möglich, auch komplexe Simulationen mit hoher Auflösung in der Genauigkeit in akzeptablen Zeiten zu berechnen [Kat-2004]. Simulationsexperimente mit Hilfe der DEM ermöglichen es, die Fließprozesse in fördertechnischen Anlagen an jeder beliebigen Stelle zu beobachten sowie die gesuchten Parameter berührungslos zu messen [Grö-2005]. Neben der Dynamik der untersuchten Fördervorgänge können unter anderem die kinetischen Wechselwirkungen zwischen Schüttgut und Fördergerät analysiert werden [Wei-2009]. Weiterhin können bei der Simulation des Fördervorgangs auch Effekte berücksichtigt werden, die in einem analytischen Modell nicht betrachtet werden können. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit Einflussparameter zu simulieren, die an der realen Versuchsanlage nicht mit vertretbarem Aufwand untersucht werden können. Dazu zählen insbesondere die Geometrieparameter Schneckendurchmesser und Schneckenganghöhe, deren Variation die Beschaffung weiterer Schneckenförderer und damit hohe Investitionskosten bedingen würde. Für Aufgabenstellungen, wie in dieser Arbeit, ist die Diskrete Elemente Methode daher sehr gut geeignet. Die Simulationsmethode und deren Anwendung in dieser Arbeit werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

5.2.1 Die Diskrete Elemente Methode

Simulationen nach der Diskrete Elemente Methode sind im Prinzip numerische Experimente, bei denen neben der Geometrie des Förderers die einzelnen Schüttgutpartikel als diskrete Elemente eines physikalischen Mehrkörpersystems abgebildet werden. Die mikroskopische Betrachtung aller Interaktionen zwischen den Partikeln

und den Geometrieelementen sowie zwischen den Partikeln untereinander führt zur Bestimmung des makroskopischen Verhaltens des Schüttguts als Ganzes. Maßgeblich ist daher die Abbildung der mikromechanischen Einflüsse an den einzelnen Kontaktpunkten [Wei-2009]. Nach einer kurzen Beschreibung der grundlegenden Bestandteile einer Simulation nach der Diskrete Elemente Methode wird im Folgenden der prinzipielle Berechnungsablauf erläutert, der auf die Arbeit von *Cundall* und *Strack* [Cun-1979] zurückgeht und in Abbildung 5-7, wie von *Bićanić* [Bić-2004] und *Gröger et al.* [Grö-2005] beschrieben, schematisch dargestellt ist.

Das Simulationsmodell bei der Diskrete Elemente Methode besteht im Wesentlichen aus den einzelnen Partikeln, die das Schüttgut abbilden, und dem Geometriemodell des Fördergeräts. Ein Partikel wird durch eine oder mehrere starr verbundene Kugeln sowie seine Hüllkontur repräsentiert. Während die Hüllkontur, die als CAD-Modell importiert wird, zur Berechnung von Partikelparametern, wie Volumen, Gewicht, Massenträgheitsmoment etc., dient, wird der aus Kugeln bestehende Grundkörper zur Detektion und Berechnung der Kontakte verwendet. Da dies durch Überprüfung von Mittelpunkt und Radius bei Kugeln sehr einfach und damit numerisch effizient machbar ist, finden als Grundkörper meist Kugeln Verwendung. Das Geometriemodell des Fördergeräts kann wiederum als CAD-Modell in die Simulationsumgebung importiert werden. Dort erfolgt anschließend die Festlegung des Bewegungsverhaltens der einzelnen Bauteile. Die Modellierung der Partikel und des Fördergeräts wird in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 eingehend beschrieben.

Die Simulation startet nach der Initialisierung mit der Detektion aller Kontakte zwischen Partikeln oder zwischen Partikeln und Geometrieelementen innerhalb der Grenzen des simulierten Systems. Dazu wird das Simulationsmodell in gleich große, würfelförmige Zellen unterteilt und in jeder Zelle, die mehr als einen Partikel enthält, überprüft, ob sich Partikeloberflächen berühren oder überschneiden [DEM-2011b]. Anschließend werden in einer ersten Schleife (Schleife 1 in Abbildung 5-7) für jeden gefundenen Kontakt alle Kräfte und Momente berechnet, die aus dem Kontakt resultieren. Grundlage hierfür sind die Verformungen beim Kontakt zwischen Partikeln untereinander oder zwischen Partikel und Geometriemodell. Da die simulierten Partikel als starr angenommen werden, werden die in der Realität auftretenden Verformungen durch die virtuelle Überlappung der Kontaktpartner in der Simulation abgebildet. Mit Hilfe eines geeigneten Kontaktmodells lassen sich aus diesen Überlappungen und den relativen Geschwindigkeiten die auftretenden Kräfte berechnen.

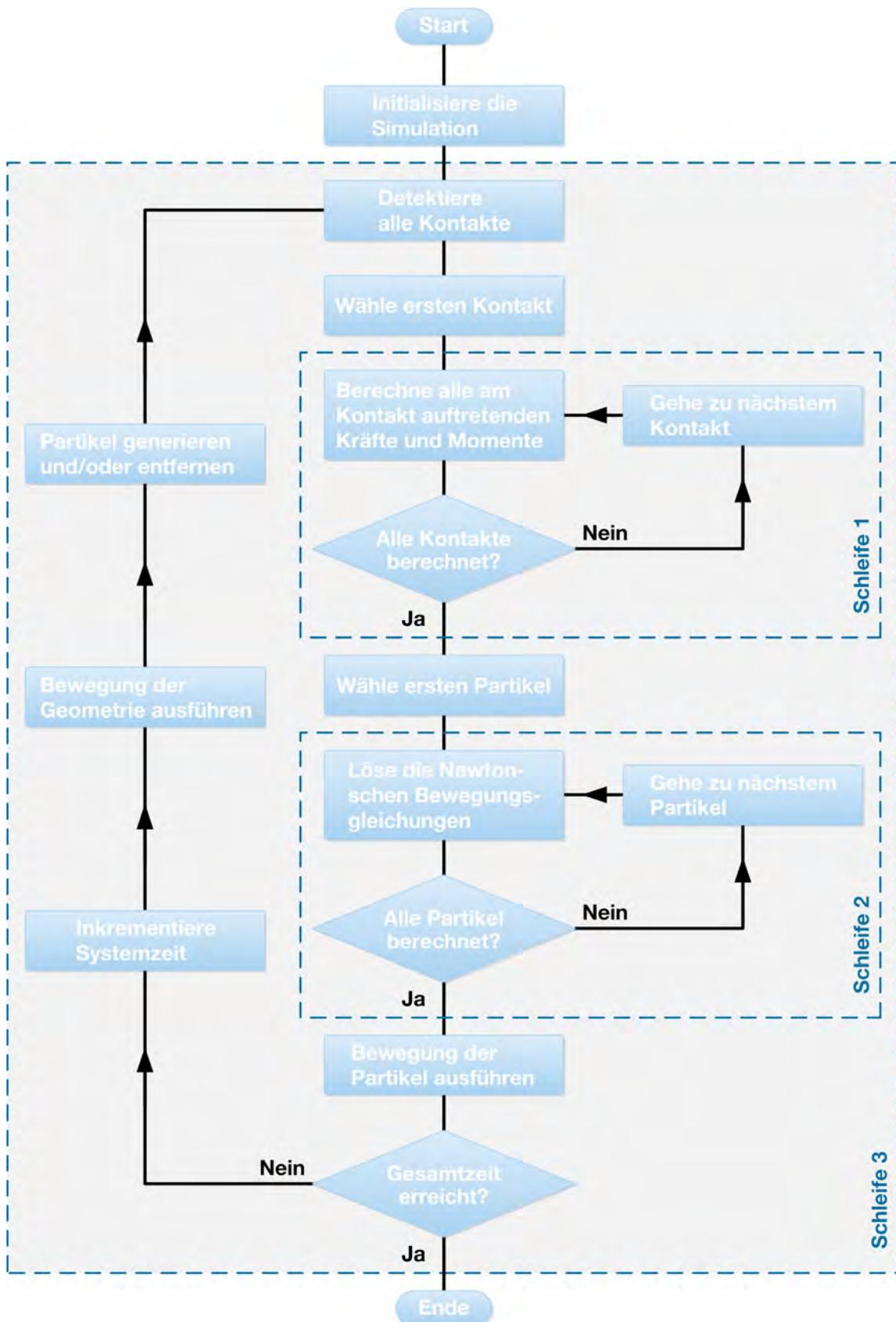


Abbildung 5-7: Ablaufdiagramm einer DEM-Simulation (nach [Wei-2009, DEM-2011a])

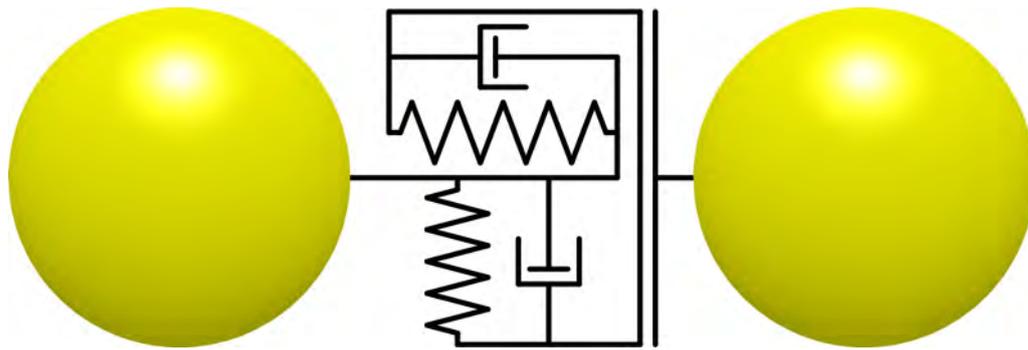


Abbildung 5-8: Kontaktmodell zweier Partikel nach Hertz und Mindlin (nach [Tav-2007])

In den Simulationen dieser Arbeit wird auf das in der Simulationsumgebung integrierte Hertz-Mindlin Kontaktmodell zurückgegriffen, das schematisch in Abbildung 5-8 dargestellt ist und auf die grundlegenden Arbeiten von *Hertz* [Her-1882] und *Mindlin* [Min-1949] zurückgeht. Basierend auf den in Tabelle 5-4 aufgeführten wenigen Material- und Kontaktparametern beschreibt es die an den Kontaktstellen wirkenden Kräfte in normaler und tangentialer Richtung. Für beide Richtungen sind dies eine Kraft aus der Elastizität der Körper, die aus der Überlappung der Partikel resultiert, und eine Dämpfungskraft, die die Energiedissipation durch den Kontakt berücksichtigt. Zusätzlich werden noch Kräfte aus der Reibung zwischen den Partikeln berücksichtigt. Dies sind die Haftreibung zwischen den zwei Kontaktpartnern, unter Berücksichtigung des Coulombschen Gesetzes, und die Rollreibung.

Tabelle 5-4: Material- und Kontaktparameter für das Hertz-Mindlin Kontaktmodell

Materialparameter	Kontaktparameter
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Partikeldichte ▪ Schubmodul ▪ Poissonzahl 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stoßzahl ▪ Haftreibwert ▪ Rollreibwert

Aus all diesen an einem Partikel angreifenden Oberflächenkräften und den wirkenden Volumenkräften, hier im Besonderen die Gravitationskraft, lassen sich die resultierende Kraft und, falls deren Wirklinie nicht durch den Schwerpunkt verläuft, zusätzlich das resultierende Moment berechnen. Damit werden in einer weiteren Schleife (Schleife 2 in Abbildung 5-7) durch Anwendung von Impulssatz und Drallsatz für alle im System enthaltenen Partikel die resultierenden Beschleunigungen für alle sechs Freiheitsgrade bestimmt. Durch zweifache Integration dieser Beschleunigungen über die Zeit werden mittels eines expliziten Finite-Differenzen-Schemas die

Geschwindigkeiten sowie zurückgelegten Strecken und Winkel für einen Zeitschritt berechnet. Ist dies abgeschlossen, werden die sich ergebenden Bewegungen der einzelnen Partikel ausgeführt. Ist die vorgegebene zu simulierende Gesamtzeit noch nicht erreicht, wird die Systemzeit um einen äquidistanten Zeitschritt inkrementiert und die entsprechenden Bewegungen der Geometrielemente werden durchgeführt. Falls nötig werden der Simulation anschließend noch Partikel hinzugefügt oder entnommen. Da infolge der Bewegungen von Partikeln und Geometrielementen bestehende Kontakte verschwinden und neue Kontakte entstehen, beginnt der nächste Berechnungszyklus mit der erneuten Detektion aller existierenden Kontakte. Um jede Bildung und Lösung eines Kontaktes abbilden zu können, muss der verwendete Zeitschritt ausreichend klein gewählt sein. Die wiederholte Ausführung dieses Berechnungsablaufes (Schleife 3 in Abbildung 5-7) endet, wenn das Abbruchkriterium, die zu simulierenden Gesamtzeit, erreicht ist.

Die während der Simulation berechneten Daten, wie Positionen, Geschwindigkeiten oder Kräfte, werden sowohl für alle Partikel als auch für die Geometrielemente in frei einstellbaren Intervallen gespeichert. Dies erlaubt die anschließende, detaillierte Auswertung der Simulation, die in Abschnitt 5.2.4 beschrieben wird. Die große Menge an Daten, die dadurch zu jedem Zeitschritt in den physikalischen Speicher geschrieben werden muss, führt zusammen mit den kleinen Zeitschritten und der großen Anzahl an Iterationen während eines jeden Berechnungszyklusses (Schleifen 1 und 2 in Abbildung 5-7) zu den hohen Rechenzeiten einer DEM-Simulation.

5.2.2 Modellierung und Kalibrierung des Schüttguts

In den Simulationen wird ein PET-Recyclat als Schüttgut abgebildet. Dieses Granulat wird auch am realen Versuchsstand des Lehrstuhls verwendet und ist somit in den Eigenschaften und im tatsächlichen Verhalten bekannt und ermöglicht die Validierung der Simulation durch Vergleich mit experimentell ermittelten Daten. Ein weiterer Vorteil des PET-Recyclats ist die gleichmäßige Form und Größe der Partikel. Eine Korngrößenanalyse, deren Ergebnis in Abbildung 5-9 dargestellt ist, zeigt dass nahezu alle Partikel in der Korngrößenklasse von 2 mm bis 4 mm liegen. Die Partikel haben ein durchschnittliches Volumen von ca. 30 mm^3 und können bezüglich ihrer Form durch einen geraden Zylinder mit elliptischer Grundfläche gut abgebildet werden. Die Modellierung der Partikel in der Simulation ist infolgedessen mit relativ geringem Aufwand möglich.

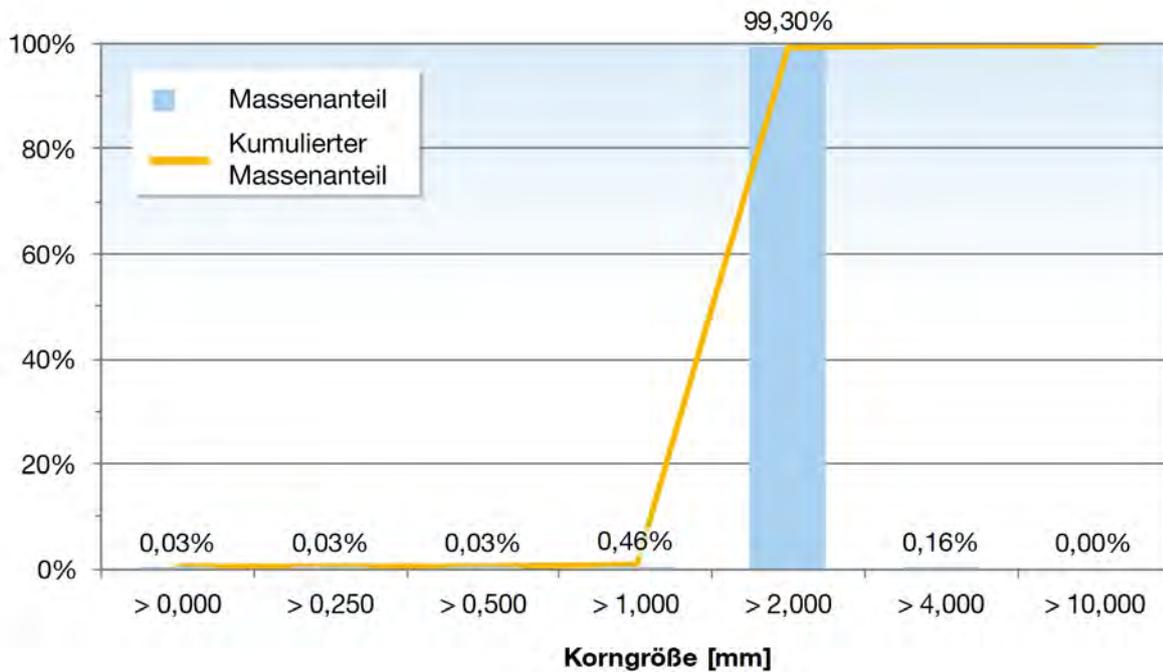


Abbildung 5-9: Ergebnis der Korngrößenanalyse für das PET-Recyclat

Zunächst wird auf Basis der geometrischen Form ein CAD-Modell des Partikels erzeugt. Da alle Partikel die gleiche Grundform haben und in der gleichen Größenklasse liegen, wird nur ein CAD-Modell erstellt, das Grundlage für alle Partikel ist. Über die CAD-Schnittstelle wird dieses Modell direkt in die Simulationsumgebung importiert und stellt die Hüllkontur des Partikels dar. Anschließend erfolgt der Aufbau des Grundkörpers aus neun Kugelsphären. Deren Abmessungen und Anordnung ist so gewählt, dass sie die Hüllkontur bestmöglich ausfüllen. Partikel des realen PET-Recyclats, das abstrahierte CAD-Modell und das daraus abgeleitete Simulationsmodell sind in Abbildung 5-10 dargestellt.

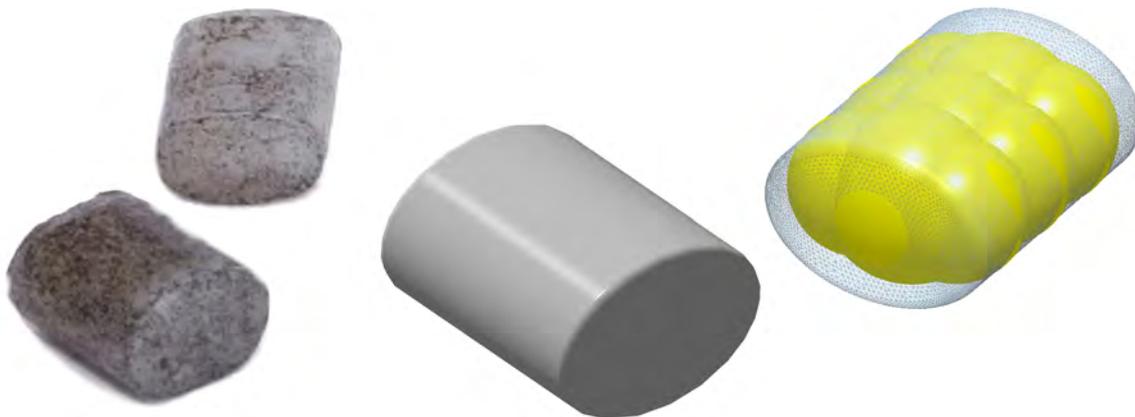


Abbildung 5-10: Partikel des realen PET-Recyclats, CAD-Modell eines Partikels und das für die Simulation verwendete Modell aus Hüllkontur und Kugelsphären

Um ein bestimmtes Volumen eines Schüttguts simulieren zu können, ist eine sehr große Anzahl an Partikeln nötig. Eine komplexe Partikelform mit vielen Kugelsphären als Grundkörper erhöht die zu berücksichtigenden Elemente zusätzlich. Bei der Modellierung der Schüttgutpartikel für die Simulation müssen daher in der Regel immer Vereinfachungen in Bezug auf Form und Anzahl der simulierten Partikel gemacht werden, um die Rechenzeit in einem vertretbaren Rahmen zu halten [Kra-2005]. Grund hierfür ist der direkt proportionale Zusammenhang der erwarteten Rechenzeit zur Anzahl der Partikel und der darin enthaltenen Kugelsphären [Wei-2009]. Während eine weitere Vereinfachung der Form aufgrund des schon vorhandenen, für alle Partikel einheitlichen Modells nicht mehr realisiert wird, erfolgt die Vereinfachung bezüglich der Anzahl der Partikel, die in der Simulation notwendig sind, indem diese vergrößert modelliert werden. Um die, wenn auch in geringem Umfang, vorhandene Verteilung der Partikelgröße abbilden zu können, erfolgt die Vergrößerung des Partikelvolumens zufallsverteilt um einen Faktor 16 bis 22 bei der Generierung der Partikel.

Damit die Simulationen trotz dieser Abstrahierung zu einem realitätsnahen Ergebnis führen, müssen die simulierten Partikel durch Anpassen ihrer Eigenschaften so kalibriert werden, dass das Verhalten des abstrahierten Schüttguts dem des realen Schüttguts entspricht. Da das Verhalten des simulierten Schüttguts durch das Kontaktmodell abgebildet wird, stehen hierzu die in Tabelle 5-4 bereits aufgeführten Eingangsparameter des verwendeten Hertz-Mindlin Kontaktmodells zur Verfügung. Zur Kalibrierung werden einfache Versuche zur Bestimmung von makroskopischen Schüttguteigenschaften real durchgeführt und in der Simulation nachgebildet. Die Simulationsparameter werden dabei iterativ so lange verändert, bis das Verhalten der Partikel im Simulationsmodell dem realen Schüttgutverhalten mit ausreichender Genauigkeit entspricht. Als Versuche werden die Bestimmung der Schüttdichte, des Böschungswinkels und des Gleitwinkels durchgeführt. Der Abbildung von Böschungswinkel und Gleitwinkel kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da sie die Fließeigenschaften des Schüttguts abbilden und zugleich auf mikroskopischer Ebene von vielen Einflussgrößen, wie zum Beispiel der Haftreibung, der Rollreibung, der Partikelform und der Partikelgrößenverteilung, abhängen [Grö-2005]. Der Aufbau sowie die Durchführung der einzelnen Versuche zur Kalibrierung orientieren sich für Realität und Simulation an den Empfehlungen der *FEM 2.481* [FEM 2.481]. Die Simulationsmodelle hierzu sind mit den finalen Ergebnissen in Abbildung 5-11 dargestellt.

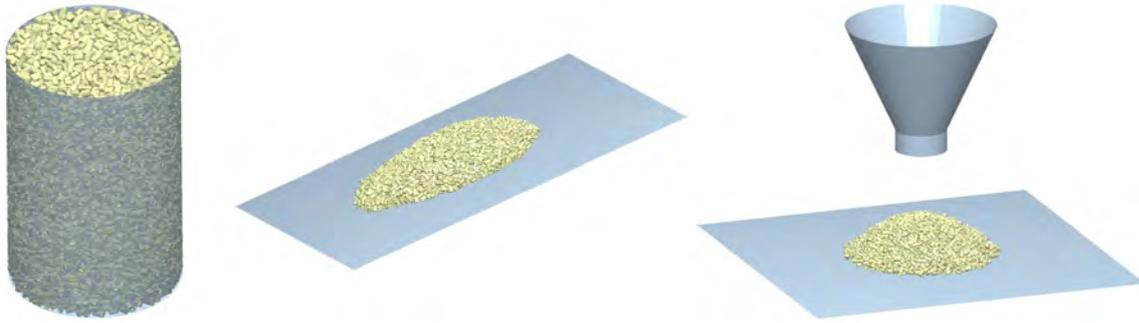


Abbildung 5-11: Simulationsmodelle für die Schüttgutkalibrierung: Schüttdichte, Gleitwinkel, Böschungswinkel

Tabelle 5-5: Materialparameter des simulierten PET-Recyclats nach der Kalibrierung

		PET-Recyclat	Stahl
Partikeldichte	[kg/m ³]	1.200	7.800
Schubmodul	[°]	2,0 E+06	7,0 E+10
Poissonzahl	[N/m ²]	0,4	0,3

Tabelle 5-6: Kontaktparameter des simulierten PET-Recyclats nach der Kalibrierung

		PET - PET	PET - Stahl	Stahl - Stahl
Stoßzahl	[-]	0,50	0,70	0,80
Haftreibwert	[-]	0,40	0,70	0,20
Rollreibwert	[-]	0,30	0,80	0,15

Ergebnis der Modellierung und Kalibrierung des Schüttguts ist ein Simulationsmodell für die Partikel der DEM-Simulation, das einerseits soweit abstrahiert ist, dass die Simulation mit vertretbaren Rechenzeiten durchführbar ist, und andererseits das reale Schüttgut mit ausreichender Genauigkeit abbildet. Die im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Parameter der simulierten Partikel zeigen Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6. Zum Nachweis der ausreichend durchgeführten Kalibrierung sind in Tabelle 5-7 die Ergebnisse der simulierten Kalibrierungsversuche denen der realen Versuche gegenübergestellt.

Tabelle 5-7: Schüttgutparameter des PET-Recyclats und der simulierten Partikel nach der Kalibrierung

	PET-Recyclat	Simulierte Partikel	Relative Abweichung
Schüttdichte [kg/m ³]	790	793	+0,4 %
Böschungswinkel [°]	35,8	35,7	-0,5 %
Gleitwinkel [°]	21,0	20,9	-0,3 %

5.2.3 Modellierung des Schneckenförderers

Neben den simulierten Schüttgutpartikeln ist natürlich der Schneckenförderer an sich von elementarer Bedeutung bei der Durchführung von DEM-Simulationen. Durch eine geeignete Abstrahierung können auch bei dessen Modellierung die Rechenzeiten entscheidend beeinflusst werden. Ein Schritt hierzu ist die Reduktion der Geometrie des Schneckenförderers auf die elementaren Geometrie- und Funktionsbestandteile [Kat-2004]. Da im Fall des hier untersuchten Schneckenförderers vor allem die Interaktion des Schüttguts mit der Schneckenwendel, der Schneckenwelle und der Innenwand des Rohrs von Interesse ist, werden lediglich diese Elemente abgebildet. In der Realität vorhandene Unregelmäßigkeiten, wie beispielsweise Schweißnähte oder Übergänge verbundener Bauteile, werden dabei vernachlässigt. Die zweite Abstrahierung betrifft die Reduktion der zu simulierenden Partikel, deren Anzahl, wie oben bereits beschrieben, erheblichen Einfluss auf die Rechenzeit hat. Dies wird erreicht, indem nur vier Schneckenkammern und damit ein kurzer Abschnitt des Schneckenförderers simuliert wird. Um dennoch einen kontinuierlichen Schüttgutstrom zu erhalten, werden an den Stirnseiten des Simulationsmodells sogenannte periodische Grenzen eingefügt. Diese bewirken, dass ein Schüttgutpartikel, wenn es am Ende des simulierten Schneckenförderers die periodische Grenze erreicht, entnommen und auf der gegenüberliegenden Seite, am Anfang des Simulationsmodells, mit identischen Eigenschaften (Lage im Querschnitt, Geschwindigkeit, Spannungen, ...) wieder hinzugefügt wird. Der Fördervorgang wiederholt sich dadurch, ohne neue Partikel generieren zu müssen. Da die Förderlänge keinen Einfluss auf den Volumenstrom hat und proportional zum Leistungsbedarf ist, hat diese Verkürzung keinen negativen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Die Zulässigkeit dieses Vorgehens wurde bereits in früheren Arbeiten bestätigt [Kra-2005, Blo-2008].

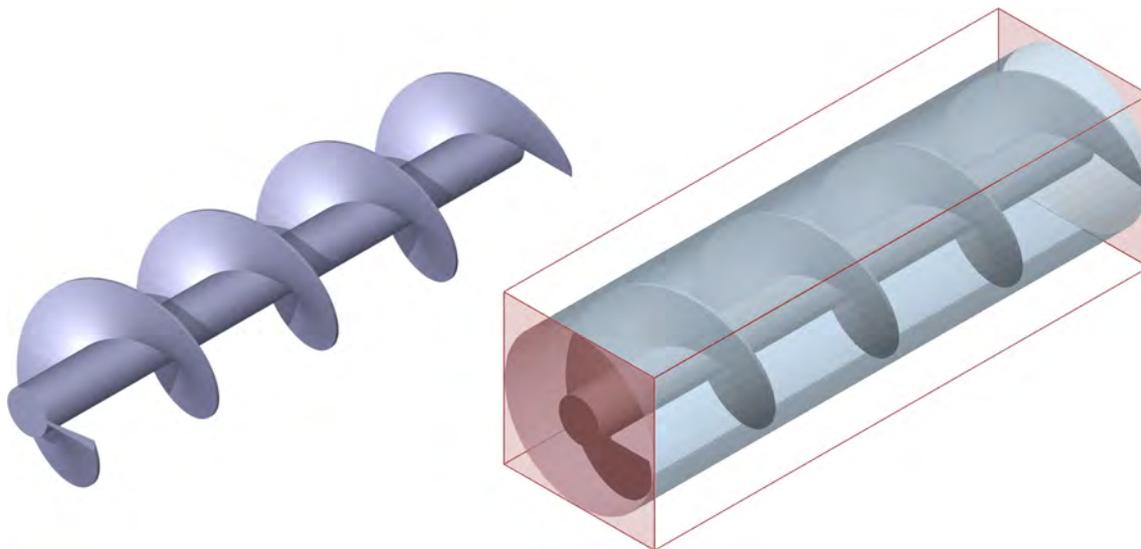


Abbildung 5-12: CAD-Modell der Schneckenwendel und Modell des Schneckenförderers in der DEM-Umgebung

Während das Förderrohr innerhalb der DEM-Simulationsumgebung als zylindrisches Flächenelement modelliert wird, erfolgt die Modellierung der Schneckenwendel in der CAD-Software. Um die Funktion der periodischen Grenzen sinnvoll nutzen zu können, muss die Schneckenwendel so gestaltet sein, dass Anfang und Ende einen nahtlosen Übergang ergeben. Das erzeugte Geometriemodell kann über die CAD-Daten-Schnittstelle der DEM-Umgebung dann direkt in das Simulationsmodell geladen werden. Abschließend wird noch die Systemgrenze mit den periodischen Grenzen an den Stirnseiten des Schneckenförderers festgelegt. Das schließlich resultierende Simulationsmodell des Schneckenförderers ist zusammen mit dem zugrunde liegenden CAD-Modell in Abbildung 5-12 dargestellt. Die periodischen Grenzen sind darin rot hervorgehoben.

Tabelle 5-8: Geometrieparameter der simulierten Schneckenförderer

		Baugröße 1	Baugröße 2	Baugröße 3
Schneckendurchmesser	[m]	0,200	0,260	0,315
Schneckenganghöhe	[m]	0,200	0,230	0,270
Schneckenwellendurchmesser	[m]	0,057	0,076	0,089
Dicke der Schneckenwendel	[m]	0,005	0,005	0,005
Innendurchmesser Förderrohr	[m]	0,209	0,279	0,324
Förderlänge	[m]	0,800	0,920	1,080

Ein wesentlicher Grund für die Durchführung von Simulationen im Rahmen dieser Arbeit ist, wie oben bereits beschrieben, die Möglichkeit, Geometrieparameter des Schneckenförderers mit geringem Aufwand variieren zu können. Es werden deshalb drei verschiedene Baugrößen des Schneckenförderers simuliert, deren Abmessungen in Tabelle 5-8 aufgeführt sind. Bei der Wahl der Baugrößen wurde darauf geachtet, dass die Simulationen mit Partikeln der gleichen Größe durchgeführt werden können, ohne unverhältnismäßig lange Rechenzeiten in Kauf nehmen zu müssen. Dies erspart eine ansonsten erforderliche erneute Kalibrierung der simulierten Partikel. Die Förderlänge entspricht jeweils genau vier Schneckenganghöhen. Die Simulationsmodelle der drei Baugrößen des Schneckenförderers sind in Abbildung 5-13 dargestellt.

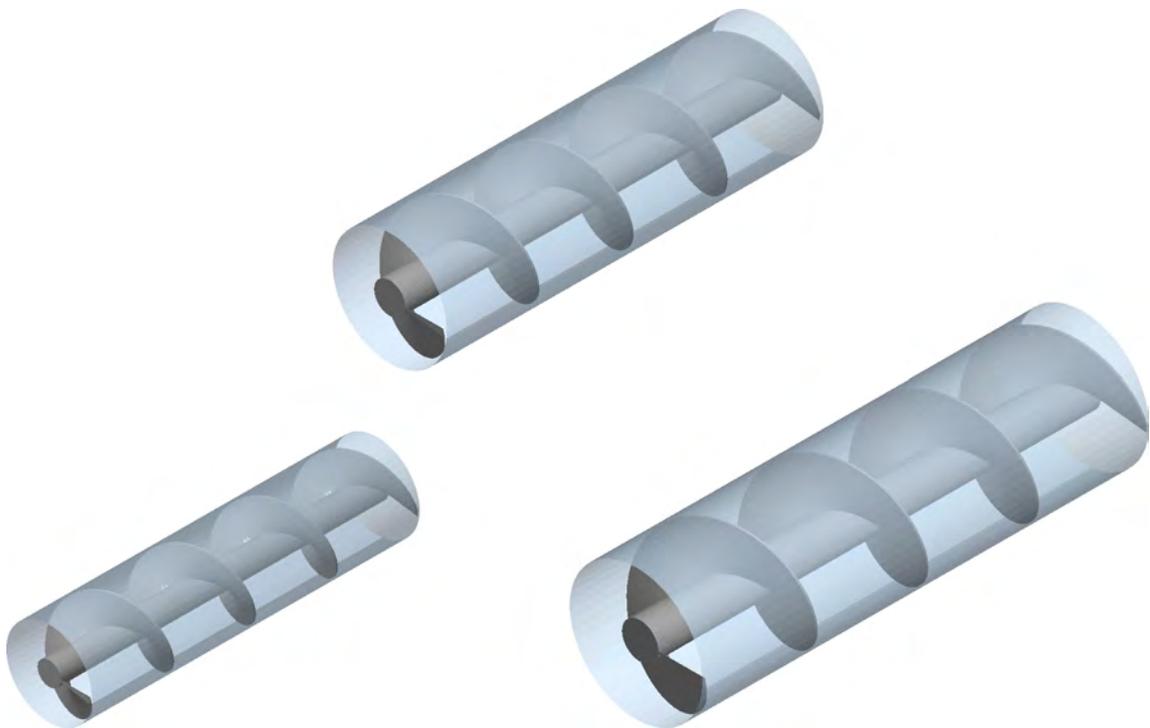


Abbildung 5-13: Baugrößen des simulierten Schneckenförderers

Mit den gewählten Werten für Schneckenwendel und Förderrohr und der Größe der simulierten Partikel würde bei einem realen Schneckenförderer die Gefahr des Einklemmens und Zermahlens von Fördergut bestehen. Diese Effekte treten in der Simulation aber nicht auf und werden daher hier nicht weiter berücksichtigt. Die im Leistungsbedarf der realen Förderung im Schneckenförderer enthaltenen Anteile des Spalteinflusses werden durch die Kalibrierung des Schüttguts implizit erfasst. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bleibt damit gewährleistet.

5.2.4 Aufbereitung der Simulationsergebnisse

Die Simulationssoftware speichert zu vorgegebenen Zeitschritten alle vorhandenen Daten und stellt diese über das Post-Processing für die Auswertung zur Verfügung. Von dieser Vielzahl an möglichen Daten werden als Zielgrößen der Simulation die über alle Partikel gemittelte axiale Gutgeschwindigkeit v_{ax} und das an der Schneckenwelle gemessene Drehmoment M benötigt. Um Daten für einen quasi-stationären Förderzustand ohne verfälschende Einflüsse vom Beginn der Förderung zu erhalten, werden nur die letzten fünf Sekunden der Simulation betrachtet. Für diesen Zeitraum werden die Mittelwerte der Zielgrößen gebildet und exportiert. Die Zielgrößen werden mit den für die einzelnen Simulationen vorgegebenen Einflussgrößen ergänzt und in einer Ergebnisdatei, die für jede berechnete Simulation einen Datensatz mit allen benötigten Parametern enthält, gespeichert.

Aus den Zielgrößen werden abschließend die für die Entwicklung des Berechnungsverfahrens benötigten Beiwerte bestimmt. In Abhängigkeit der bekannten Einflussparameter ergibt sich der empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwerts ζ^* gemäß

$$\zeta^* = \frac{v_{ax}}{S \cdot n} , \quad (5-4)$$

aus der durchschnittlichen axialen Gutgeschwindigkeit v_{ax} , der Schneckenganghöhe S und der Schneckendrehzahl n . Der empirisch ermittelte Leistungsbeiwerts λ^* folgt nach

$$\lambda^* = \frac{8 \cdot n \cdot M}{(D^2 - d^2) \cdot \varphi \cdot v_{ax} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{D}{S} \cdot L} - \frac{S \cdot H}{D \cdot L} . \quad (5-5)$$

aus dem Drehmoment M an der Schneckenwelle, der durchschnittlichen axialen Gutgeschwindigkeit v_{ax} , der Schneckendrehzahl n , dem Schneckendurchmesser D , dem Schneckenwellendurchmesser d , dem Füllungsgrad φ , der Schüttdichte ρ , der Schneckenganghöhe S , der Förderlänge L sowie der Förderhöhe H .

Die für jeden Simulationslauf vorliegenden Parameter sind in Tabelle 5-9 zusammengefasst. Unterschieden werden darin konstante Parameter, die für alle Simulationen gleich sind, variierte Parameter, für die mehrere Parameterstufen simuliert werden, sowie die ermittelten Zielgrößen und daraus abgeleitete Beiwerte.

Tabelle 5-9: Vorliegende Parameter für jeden durchgeführten Simulationslauf

Konstante Parameter	Varierte Parameter	Ermittelte Parameter
Schüttgutparameter: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schüttdichte ▪ Innerer Reibwert ▪ Äußerer Reibwert 	Geometrieparameter: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schneckendurchmesser ▪ Schneckenwellendurchmesser ▪ Schneckenganghöhe ▪ Schneckenneigung Betriebsparameter: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schneckendrehzahl ▪ Füllungsgrad 	Zielgrößen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Axiale Gutgeschwindigkeit ▪ Drehmoment an der Schneckenwelle ▪ Geschwindigkeitsbeiwert ▪ Leistungsbeiwert

5.2.5 Simulierte Parameter und Ablauf der Simulationen

Bei der Durchführung der Simulationen werden neben den unterschiedlichen Bau-Größen noch die Parameter Schneckendrehzahl, Schneckenneigung sowie Füllungsgrad variiert. Deren Einstellung erfolgt an verschiedenen Stellen im Ablauf eines Simulationslaufes, der in Abbildung 5-14 dargestellt ist, und wird im Folgenden beschrieben.

Zu Beginn der Simulationsdurchführung werden einmalig die im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Material- und Kontaktparameter für das verwendete Hertz-Mindlin Kontaktmodell eingetragen. Anschließend wird auf Basis des gewählten Datensatzes die Schneckenneigung gegenüber der Horizontalen als erster Einflussparameter eingestellt. Hierzu wird in der Simulation nur der Vektor der Gravitation angepasst. Dies hat den Vorteil, dass bei beliebiger Wahl der Schneckenneigung das übrige Simulationsmodell unverändert beibehalten werden kann. Bei Neigung des Schneckenförderers um die x -Achse und Förderung entlang der y -Achse folgt der Vektor der Gravitation in Abhängigkeit der Schneckenneigung β gemäß

$$\vec{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin \beta \\ -\cos \beta \end{pmatrix} \cdot g \quad (5-6)$$

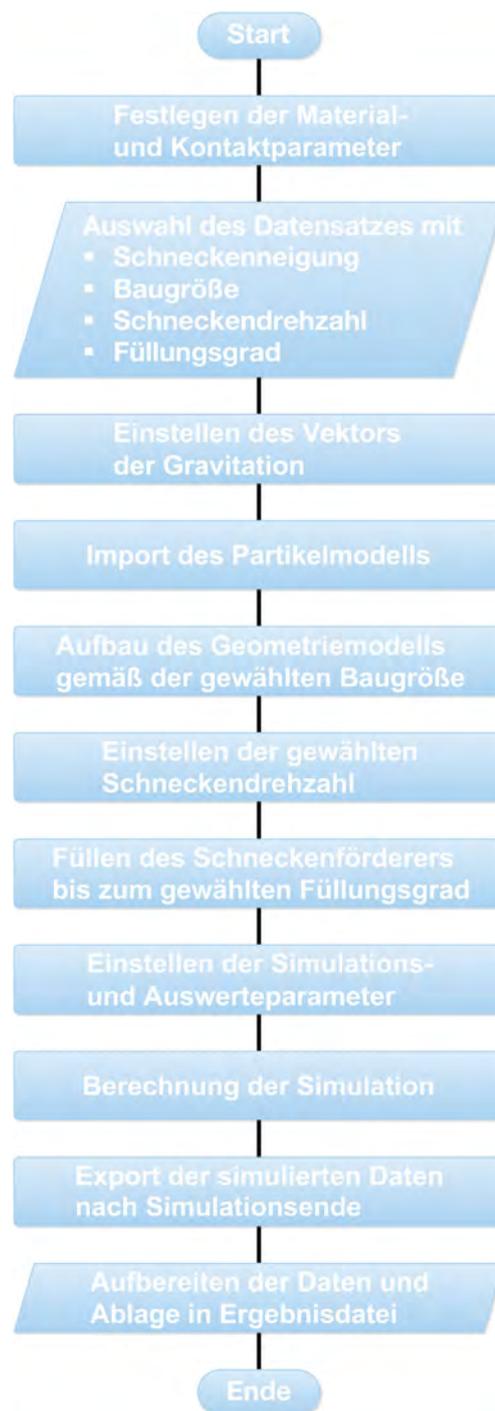


Abbildung 5-14: Ablauf der durchgeführten DEM-Simulationen

Anschließend können das gemäß Abschnitt 5.2.2 erstellte Modell der Partikel des simulierten PET-Recyclats sowie das entsprechend der Baugröße des simulierten Datensatzes gewählte Simulationsmodell des Schneckenförderers in die Simulation geladen werden. Als dritter Einflussparameter kann nun die Schneckendrehzahl in Form einer dynamischen Eigenschaft der importierten Schneckenwendel als Rotation um die y -Achse direkt definiert werden.

Das geometrische Simulationsmodell ist nun komplett und die simulierten Partikel können als nächster Schritt generiert werden. Im Zuge dessen erfolgt auch die Einstellung des Füllungsgrads im Schneckenförderer, dem letzten noch nicht festgelegtem Einflussparameter. Dazu wird ausgenutzt, dass die Anzahl der Partikel während der Simulation konstant bleibt und sich der Füllungsgrad im Schneckenförderer somit ebenfalls nicht ändert. Die Verteilung der Partikel im Schneckenförderer hat bei gemeinsamer Betrachtung der vier simulierten Schneckenkammern somit keinen Einfluss auf den Füllungsgrad. In Vorversuchen wird daher für einen ruhenden, horizontalen Schneckenförderer bestimmt, wie viele Partikel generiert werden müssen, dass, wie im linken Förderer der Abbildung 5-15, der geforderte Füllstand (siehe Tabelle 5-10) im Schneckenförderer erreicht ist. Nach Füllen des horizontalen Schneckenförderers mit deutlich mehr Partikeln, werden dazu die zur Ruhe gekommenen Partikel, die oberhalb des berechneten Füllstandes liegen, entfernt und die Anzahl der verbleibenden Partikel gezählt. Wird im Simulationsmodell nun die gleiche Anzahl an Partikeln generiert, liegt auch bei unbestimmter Verteilung der Partikel in der Schneckenkammer, wie im rechten, geneigten Förderer der Abbildung 5-15, der geforderte Füllungsgrad vor.

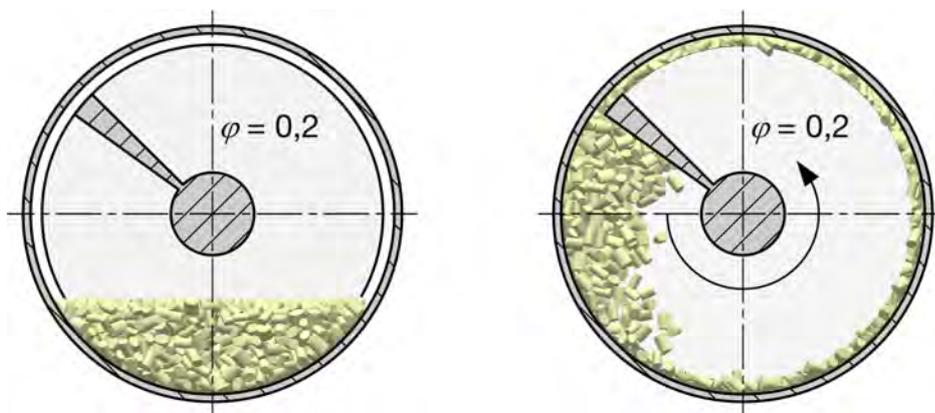


Abbildung 5-15: Verteilung der Partikel im ruhenden Schneckenförderer (links) und bei rotierender, geneigter Schneckenwendel (rechts) bei jeweils gleichem Füllungsgrad

Als letzter Schritt der Vorbereitung müssen noch notwendige Simulationsparameter eingestellt werden. Dazu zählt zunächst die Dauer der einzelnen Iterationsschritte. Dieser wird auf 0,05 ms und damit ca. 28 % vorgeschlagenen Rayleigh-Zeitschritts von 0,18 ms festgelegt. Weiter wird die Größe der Würfelzellen, die für die Kontaktdetektion benötigt werden, auf den zweifachen minimalen Partikelradius, die zu simulierende Gesamtzeit auf 10 s sowie der Zeitschritt, zu dem alle erzeugten Daten gespeichert werden, auf 5 ms und damit analog zu den realen Versuchen festgelegt.

5 Vorgehen und Durchführung der Datenermittlung

Nach dieser Vorbereitung beginnt die Schneckenwendel zu rotieren und die Berechnung der Simulation startet. Nach Erreichen der zu simulierenden Gesamtzeit werden alle für die weitere Verarbeitung benötigten Daten über das Post-Processing der Simulationssoftware exportiert, aufbereitet und in der Ergebnisdatei abgelegt. Dieser Vorgehenszyklus wird so lange wiederholt, bis die Simulationen aller Datensätze abgeschlossen sind.

Die simulierten Parameterstufen der beschriebenen Einflussparameter sind in Tabelle 5-10 aufgeführt. Die Auswahl der Parameterkombinationen für die Simulationen erfolgt teilfaktoriell, da nicht alle möglichen Kombinationen der Parameter zu sinnvollen Förderzuständen führen würden. In Tabelle 5-11 ist zudem die zur Einstellung des jeweiligen Füllungsgrades bei den einzelnen Baugrößen notwendige Partikelanzahl angegeben.

Tabelle 5-10: Gewählte Parameterstufen in der DEM-Simulationen

		Parameterstufen				
Schneckendrehzahl	[1/s]	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Schneckenneigung	[°]	30		45	60	
Füllungsgrad	[-]	0,2		0,4	0,6	

Tabelle 5-11: Anzahl der simulierten Partikel pro Füllungsgrad und Baugröße

	$\varphi = 0,2$	$\varphi = 0,4$	$\varphi = 0,6$
Baugröße 1	6.500	13.500	19.000
Baugröße 2	13.000	27.000	37.500
Baugröße 3	21.000	43.500	60.000

5.2.6 Validierung des Simulationsmodells

Um abschließend zu überprüfen, ob das Simulationsmodell die Förderung von Schüttgut im stark geneigten Schneckenförderer mit ausreichender Genauigkeit abbildet, wird vor Beginn der eigentlichen Simulationsläufe noch eine Validierung des Simulationsmodells durchgeführt. Hierzu werden simulierte Werte der Zielgrößen

Geschwindigkeitsbeiwert und Leistungsbeiwert ihren experimentell bestimmten Pendanten gegenübergestellt, die relativen Abweichungen berechnet und diese bewertet. Da zum Zeitpunkt der Validierung die experimentellen Untersuchungen noch nicht gestartet waren, wurde zunächst auf Versuchsergebnisse der früheren Untersuchungen von *Blomeyer* und *Rong* [Ron-2004a, Blo-2008] zurückgegriffen. Dies bedeutet, dass für die Validierung ein Schneckenförderer der Baugröße 1 mit einer Schneckenneigung von $\beta = 20^\circ$ und ein vertikaler Schneckenförderer der Baugröße 2, jeweils gemäß Tabelle 5-8, zur Verfügung stehen. Für jeden dieser Schneckenförderer wurde je ein Versuch mit niedrigem und hohem Füllungsgrad sowie mit niedriger und hoher Schneckendrehzahl ausgewählt. Insgesamt war es somit möglich, einen bestimmten Wertebereich der simulierten Parameter abzudecken und die Gültigkeit der durch Simulation ermittelten Werte zu belegen.

Die für die Validierung gewählten Parameterstufen sind mit den Ergebnissen für den Geschwindigkeitsbeiwert und den Leistungsbeiwert in Tabelle 5-12 dargestellt. Es zeigt sich, dass die relative Abweichung Δ der simulierten Zielgrößen von experimentell bestimmten Zielgrößen betragsmäßig immer unter 10 % liegt und das Simulationsmodell die Förderung im stark geneigten Schneckenförderer somit mit ausreichender Genauigkeit abbildet. Auch die visuelle Überprüfung der Bewegung des Schüttguts während der Förderung – beispielhafte Momentaufnahmen sind in Abbildung 5-16 dargestellt – zeigt plausibles Verhalten und bestätigt somit ebenfalls das Simulationsmodell.

Tabelle 5-12: Parameterstufen und Ergebnisse der Validierung

β [°]	n [1/s]	φ [-]	ζ_{exp}^* [-]	ζ_{sim}^* [-]	Δ [%]	λ_{exp}^* [-]	λ_{sim}^* [-]	Δ [%]
20	2,5	0,2	1,00	0,98	-2,0	3,21	2,92	-9,2
20	2,5	0,6	1,00	0,97	-3,0	2,35	2,43	+3,4
20	5,3	0,2	1,00	0,93	-7,0	6,42	6,60	+2,8
20	5,3	0,6	1,00	0,92	-8,0	6,88	7,32	+6,4
90	3,9	0,3	0,51	0,48	-5,9	7,62	6,97	-8,5
90	3,9	0,4	0,53	0,54	+1,9	6,48	6,44	-0,5
90	8,1	0,2	0,69	0,71	+2,9	12,41	12,17	-2,0
90	8,1	0,3	0,70	0,67	-4,3	11,16	12,15	+8,9

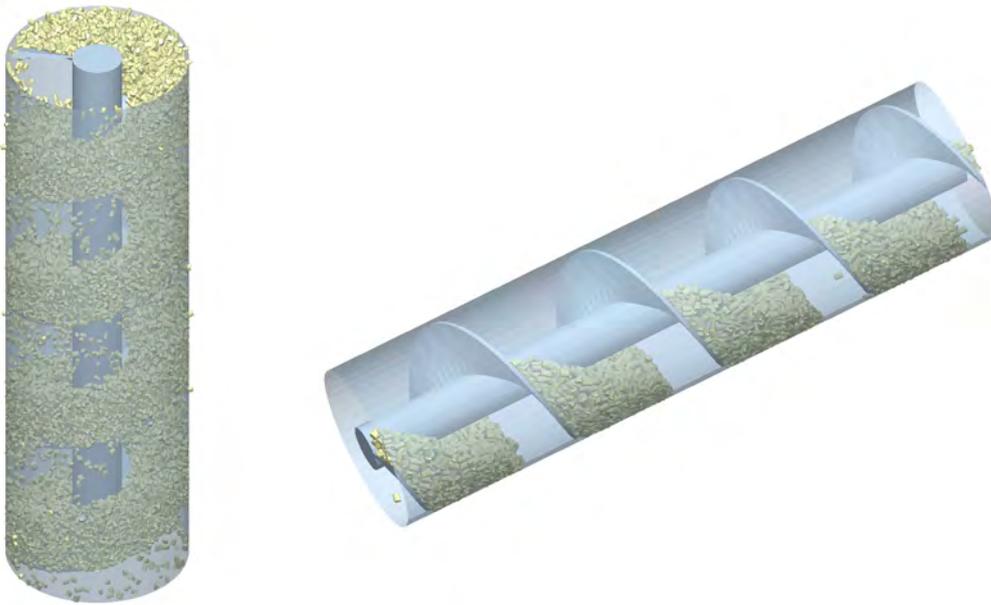


Abbildung 5-16: Simulation der Förderung von Schüttgut im vertikalen und leicht geneigten Schneckenförderer mit DEM

5.3 Analytisches Berechnungsmodell

Die dritte Methode zur Ermittlung der notwendigen Datensätze stellt das analytische Berechnungsverfahren von *Vollmann* [Vol-2000] dar, das in Abschnitt 3.5 bereits ausführlich beschrieben wurde. Auch wenn die Berechnung sehr aufwändig und nur numerisch möglich ist, können hiermit gute Ergebnisse für die Bestimmung des geförderten Volumenstroms eines stark geneigten Schneckenförderers erzielt werden. Auf die Berechnung des erforderlichen Leistungsbedarfs mit Hilfe des analytischen Berechnungsverfahrens wird allerdings verzichtet, da die beiden von *Vollmann* vorgeschlagenen Methoden entweder nicht alle Verlustanteile erfassen oder auf einen für den jeweiligen Anwendungsfall experimentell zu bestimmenden Förderfaktor zurückgreifen.

Um das Berechnungsverfahren trotz des hohen Rechenaufwands für Anwender nutzbar zu machen, wurde es bereits im Rahmen der Arbeit von *Vollmann* in ein rechnerbasiertes Anwendungsprogramm integriert. Da dieses auf die Berechnung einzelner Datensätze durch einen Anwender ausgelegt ist, musste es für die Berechnung der Datensätze in dieser Arbeit leicht modifiziert werden, um die große Menge an Datensätzen automatisiert einlesen und ausgeben zu können. Während in

der ursprünglichen Version alle Eingabeparameter und Ergebnisse über die Benutzeroberfläche ein- und ausgegeben wurden, können diese in der aktuellen Version aus einer Datei automatisch eingelesen und wieder dorthin zurückgespeichert werden. Im Zuge dieser Änderungen wurde die Aufbereitung der Berechnungsergebnisse, wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben, ebenfalls direkt in das Berechnungsprogramm implementiert.

5.3.1 Beschreibung des Berechnungsmodells

Im Folgenden wird der Ablauf zur Berechnung des Volumenstroms im Anwendungsprogramm, wie er in dieser Arbeit verwendet wird und auch in Abbildung 5-17 dargestellt ist, näher erläutert. Dieser entspricht im Wesentlichen dem von *Vollmann* entwickelten und beschriebenen Programmablauf. Als erster Schritt werden alle benötigten Geometrie-, Betriebs- und Schüttgutparameter aus der Datei, die alle zu berechnenden Datensätze enthält, eingelesen. Damit wird auf Basis der bekannten Berechnungsverfahren für vertikale Schneckenförderer die Winkelgeschwindigkeit des Förderguts berechnet. Diese stellt den Startwert für die weiteren iterativen Berechnungen dar.

Ausgehend von den eingelesenen Eingabeparametern und den Startwerten für die Winkelgeschwindigkeiten des Förderguts $\omega_{G,j, \text{Start}}$ erfolgt eine erste Berechnung der Oberflächenkontur des Schüttguts im Schneckenförderer sowie die Einteilung der Schüttgutfüllung in die Sektorelemente. Aufbauend darauf werden für jedes Sektorelement die angreifenden Kräfte mit den zugehörigen auf den jeweiligen Schwerpunkt reduzierten Ersatzkräften bestimmt und in das Kräftegleichgewicht aus Gleichung (3-55) eingesetzt. Durch Variation der Winkelgeschwindigkeit des Förderguts, die über die Oberflächenkontur in das Kräftegleichgewicht eingeht, mittels eines gedämpften Newton-Verfahrens wird die Gleichung gelöst. Die Oberflächenkontur, die zur Verringerung des Rechenaufwands innerhalb eines Sektorelements linearisiert wird, muss dabei nach jeder Variation der Winkelgeschwindigkeit neu berechnet werden. Die einzelnen Sektorelemente und damit auch die zugehörigen Kräftegleichgewichte sind über die Reibkräfte in den radialen Trennfugen gekoppelt, das heißt es wird nur die Reibkraft am äußeren, radialen Schnittufer des j -ten Elementes bestimmt und direkt als entgegengesetzt gerichtete Reibkraft am inneren, radialen Schnittufer an das $j+1$ -te Element übergeben.

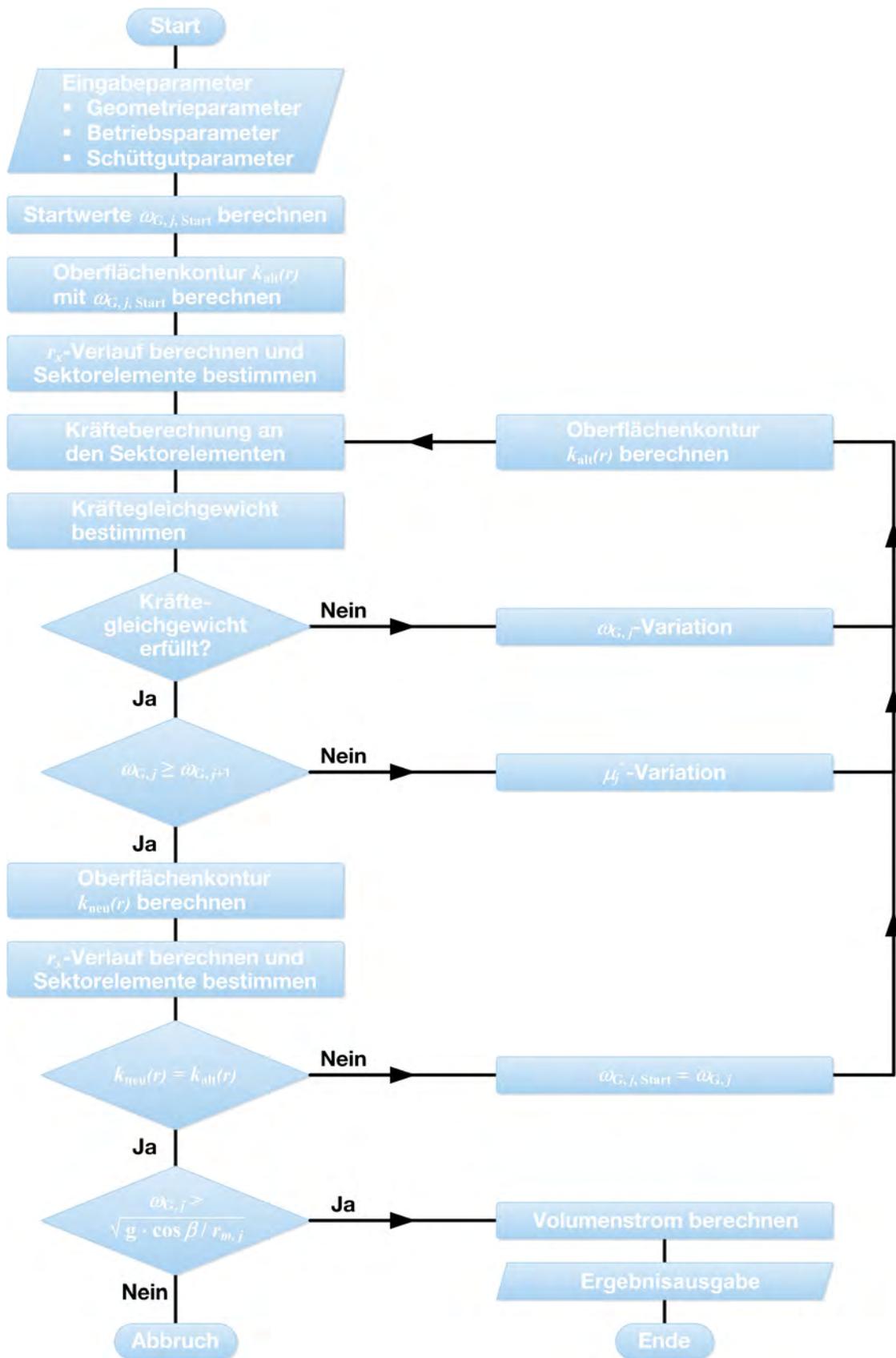


Abbildung 5-17: Ablaufdiagramm des Programms zur Berechnung des Volumenstroms stark geneigter Schneckenförderer (nach [Vol-2000])

Als Ergebnis dieser ersten Iteration stehen die Winkelgeschwindigkeiten des Förderguts für jedes Sektorelement. Die einzelnen Sektorelemente können aneinander abgleiten, so dass

$$\omega_{G,j} \geq \omega_{G,j+1} \quad (5-7)$$

gilt. Sind die Winkelgeschwindigkeiten von zwei benachbarten Sektorelementen gleich groß, haften sie aneinander. Streng physikalisch gesehen kann die Normalkraft dann weiter ansteigen, ohne dass sich die Reibkraft weiter erhöht. Für diesen Fall gilt eigentlich

$$R \leq \mu_s \cdot N \quad (5-8)$$

Da diese Ungleichung im Berechnungsprogramm nicht abgebildet werden kann, würde in der Iteration nach überschreiten des Haftfalls die Winkelgeschwindigkeit des äußeren Sektorelements größer werden, als die des benachbarten inneren Sektorelements. Um dies zu verhindern wird im Berechnungsprogramm sowohl für den Gleitfall als auch für den Haftfall die Gleichung

$$R = \mu^* \cdot N \quad (5-9)$$

verwendet, wobei μ^* ein fiktiver Reibwert ist, der zunächst gleich dem realen inneren Reibwert μ_s ist. Falls die Bedingung aus Gleichung (5-7) nicht erfüllt ist, wird der fiktive Reibwert in weiteren Iterationsläufen so weit reduziert, bis die berechnete Reibkraft der Haftreibung entspricht und die Winkelgeschwindigkeiten von innen nach außen nicht mehr ansteigen.

Auf Basis der berechneten Winkelgeschwindigkeiten wird anschließend die Oberflächenkontur des Schüttguts neu berechnet und überprüft, ob sich mit dem sich ergebenden Volumen des Schüttguts der geforderte Füllungsgrad im Schneckenförderer einstellt. Ist dies nicht der Fall, wird die Anfangshöhe der Oberflächenkontur in einer neuen Iterationsschleife variiert. Als Startwerte für die erneute Iteration dienen die zuletzt berechneten Winkelgeschwindigkeiten. Die iterativen Berechnungen enden, wenn alle genannten Bedingungen mit ausreichender Genauigkeit erfüllt sind, sich die Oberflächenkonturen aus letzter und vorletzter Berechnung also nicht mehr geändert haben.

Da das gesamte Berechnungsverfahren nur für eine schraubenlinienförmige Schüttgutbewegung gilt, wird abschließend kontrolliert, ob dieser Bereich vorliegt oder sich ein Sektorelement vom nächstäußeren Element oder dem Förderrohr in radialer Richtung ablöst. Dazu wird vereinfachend überprüft, ob die Zentrifugalbeschleunigung größer als die Komponente der Fallbeschleunigung in normaler Richtung ist. Trifft dies zu und die Berechnung ist gültig, wird der geförderte Volumenstrom gemäß Gleichung (3-56) berechnet und in die Eingabedatei geschrieben. Andernfalls bricht das Berechnungsverfahren ab [Vol-2000].

5.3.2 Aufbereitung der Berechnungsergebnisse

Das Berechnungsverfahren liefert als Ergebnis die durchschnittliche Winkelgeschwindigkeit des Förderguts ω_G während der Förderung im stark geneigten Schneckenförderer. Daraus kann der durch Berechnung ermittelte Geschwindigkeitsbeiwert ζ^* gemäß

$$\zeta^* = 1 - \frac{\omega_G}{2\pi \cdot n} \quad (5-10)$$

mit Hilfe der vorgegebenen Schneckendrehzahl n für alle berechneten Datensätze bestimmt werden.

Wie oben bereits beschrieben, ist die Aufbereitung der Berechnungsergebnisse direkt in das Berechnungsprogramm integriert. Der nach Gleichung (5-10) berechnete Geschwindigkeitsbeiwert wird demnach zusammen mit allen vorgegebenen Eingangsparametern und der durch das Berechnungsverfahren bestimmten Winkelgeschwindigkeit des Förderguts direkt in einer Ergebnisdatei gespeichert. Diese enthält die Parameter für alle berechneten Datensätze und kann direkt für die weitere Verarbeitung genutzt werden.

Die vorliegenden Parameter für alle berechneten Datensätze sind in Tabelle 5-13 zusammengefasst. Unterschieden werden darin die variierten Geometrie- und Betriebsparameter sowie die ermittelten Zielgrößen Winkelgeschwindigkeit des Förderguts und der daraus abgeleitete Geschwindigkeitsbeiwert.

Tabelle 5-13: Vorliegende Parameter für die berechneten Datensätze

Varierte Parameter	Ermittelte Parameter
Geometrieparameter: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schneckendurchmesser ▪ Schneckenwellendurchmesser ▪ Schneckenganghöhe ▪ Schneckenneigung Betriebsparameter: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schneckendrehzahl ▪ Füllungsgrad 	Zielgrößen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Winkelgeschwindigkeit des Förderguts ▪ Geschwindigkeitsbeiwert

5.3.3 Berechnete Datensätze

Die Nutzung des analytischen Berechnungsverfahrens bietet die Möglichkeit, insbesondere den Schneckendurchmesser in einem großen Wertebereich zu variieren. Dies wird vor dem Hintergrund eines möglichst großen Anwendungsbereichs der gesuchten Berechnungsverfahren ausgenutzt, da gerade große Schneckendurchmesser aufgrund der hohen Kosten für Umbaumaßnahmen oder der zu erwartenden langen Rechenzeiten weder durch die experimentellen Untersuchungen noch durch die DEM-Simulationen betrachtet werden können. Das analytische Berechnungsverfahren stellt hierfür die einzige sinnvolle Möglichkeit dar.

Insgesamt werden die in Tabelle 5-14 dargestellten Parameterstufen berechnet, wobei keine vollfaktorielle Parametervariation durchgeführt werden kann, da das Berechnungsverfahren nur für die schraubenlinienförmige Schüttgutbewegung im Bereich III gültig ist. Die Geometrieparameter Schneckendurchmesser, Schneckenwellendurchmesser und Schneckenganghöhe werden untereinander nicht variiert, sondern bilden, wie bei den DEM-Simulationen, jeweils feste Baugrößen. Die Auswahl der einzelnen Parameter der Baugrößen folgt dabei den Empfehlungen der Norm *DIN 15261* [DIN 15261-2].

Tabelle 5-14: Gewählte Parameterstufen für das analytische Berechnungsmodell

		Parameterstufen						
Schneckendurchmesser	[m]	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800
Schneckenwellen- durchmesser	[m]	0,048	0,057	0,064	0,076	0,089	0,108	0,133
Schneckenganghöhe	[m]	0,200	0,250	0,315	0,355	0,400	0,450	0,500
Schneckenneigung	[°]	30	40	50	60	70	80	90
Schneckendrehzahl	[1/s]	2,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	13,0
Füllungsgrad	[-]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	

6 Entwicklung der Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren

Nach der Ermittlung von ausreichend Datensätzen wird im Folgenden beschrieben, wie daraus die gesuchten Berechnungsvorschriften für den Geschwindigkeitsbeiwert und den Leistungsbeiwert entwickelt werden. Da das Vorgehen für beide Beiwerte prinzipiell identisch ist, wird es zunächst allgemein beschrieben ehe separat auf die Entwicklung der beiden Beiwerte eingegangen wird. Abschließend folgt die Zusammenführung mit den in Abschnitt 4 entwickelten grundsätzlichen Berechnungsmodellen zu den gesuchten Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren.

Für die Ermittlung der Beiwerte wurde, wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, eine ausreichende Anzahl an Datensätzen ermittelt. Um die Grenzen des Anwendungsbereichs auch bezüglich des Parameters Schneckenneigung gut abbilden zu können, werden zusätzliche Datensätze mit Schneckenneigungen von 20° und 90° , die entweder in den Vorgängerprojekten ermittelt wurden oder mit den Berechnungsvorschriften der Vorgängerprojekten berechnet werden, in die Entwicklung der Beiwerte integriert.

6.1 Vorgehen zur Entwicklung der empirischen Beiwerte

Die im Rahmen der Datenerhebung ermittelten Datensätze für Geschwindigkeits- und Leistungsbeiwert werden zunächst bezüglich der Einflüsse der betrachteten Parameter deskriptiv analysiert und somit für die Erstellung der Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren aufbereitet. Da die Darstellung der einzelnen Datenpunkte über einer Einflussgröße oft nicht ausreicht, um verwertbare Rückschlüsse auf den Einfluss des betrachteten Parameters treffen zu können, wird eine lokal gewichtete Regression (LOESS) verwendet, um die Zusammenhänge in Form von Graphen darstellen und deskriptiv bewerten zu können. Bei dieser werden die Zusammenhänge zwischen Parametern und Zielgröße völlig flexibel, unabhängig von Restriktionen und ohne Vorgabe eines theoretischen Modells oder eines globalen funktionalen Zusammenhangs geschätzt. Die Regressionsfunktion setzt sich stattdessen aus vielen kleinen – hier linearen – Segmenten zusammen und kann so auch auf lokale Be-

sonderheiten eingehen. Es liefert daher sehr genaue Ergebnisse, die aber mit einer hohen Komplexität des Modells erkaufte werden müssen: Durch die vollkommen freie Gestaltung der Zusammenhänge ist es meist nicht mehr möglich, den gefundenen Zusammenhang in kompakten Formeln, wie sie im Rahmen dieses Projekts gewünscht sind, darzustellen. Dennoch erlaubt die grafische Darstellung und deskriptive Bewertung des modellierten Zusammenhangs einen Blick auf den eventuell zugrundeliegenden Effekt.

Im Anschluss an die deskriptive Analyse bilden die identifizierten Effekte die Basis der Modellbildung für die Regressionsanalyse. Durch diese werden die Zielgrößen Geschwindigkeitsbeiwert ζ und Leistungsbeiwert λ in Abhängigkeit der untersuchten Einflussparameter in einem formelmäßigen Zusammenhang dargestellt. Neben einer adäquaten Anpassung des Modells an die vorhandenen Datensätze steht dabei die Einfachheit des Modells im Vordergrund, d.h. das berechnete Modell soll in einer einfachen und geschlossenen Form darstellbar sein. Nach Berechnung der Koeffizienten des Regressionsmodells können durch Betrachtung der Standardabweichungen Aussagen über die Signifikanz des geschätzten Parameters getroffen werden. Als Faustregel kann genannt werden, dass von einem signifikanten Einfluss ausgegangen werden kann, wenn der Koeffizient mehr als doppelt so groß wie dessen Standardabweichung ist [Sch-2010].

Ob die gefundenen Formeln das reale Verhalten mit ausreichender Genauigkeit abbilden und damit die Güte der gefundenen Formeln wird abschließend beurteilt. Hierzu werden die mit den neuen Formeln geschätzten Werte der Kenngrößen den empirisch ermittelten Werten gegenübergestellt werden. Dies geschieht einerseits global durch Vergleich aller Werte und andererseits durch Vergleich in den einzelnen Kategorien der Einflussgrößen. Zahlenmäßig kann die Güte des Modells zudem mit Hilfe der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers \sqrt{MQF} bewertet werden. Dieser berechnet sich als Mittelwert über alle B vorliegenden Datensätze gemäß

$$\sqrt{MQF} = \sqrt{\frac{1}{B} \sum_{k=1}^B (X_k^* - X_k)^2} \quad (6-1)$$

und zeigt die durchschnittliche Abweichung des geschätzten Werts X vom empirisch ermittelten Wert X^* . Je kleiner die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers ist, desto besser ist das Regressionsmodell.

6.2 Geschwindigkeitsbeiwert

6.2.1 Analyse der ermittelten Daten des Geschwindigkeitsbeiwerts

Insgesamt liegen für die Entwicklung des Geschwindigkeitsbeiwerts Datensätze vor, die den empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwert ζ^* als abhängige Zielgröße und die im Folgenden aufgeführten Geometrie- und Betriebsparameter als unabhängige Variablen enthalten:

- Schneckendrehzahl im Bereich $2 \text{ s}^{-1} \leq n \leq 13 \text{ s}^{-1}$
- Schneckenneigung im Bereich $20^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$
- Füllungsgrad im Bereich $0,2 \leq \varphi \leq 0,7$
- Schneckendurchmesser im Bereich $0,2 \text{ m} \leq D \leq 0,8 \text{ m}$

Andere Geometrieparameter wie Schneckenganghöhe S oder Schneckenwellendurchmesser d sind, da die Werte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen entsprechend der genormten Vorgaben gewählt wurden, nicht uneingeschränkt unabhängig, liefern damit keine zusätzlichen Erkenntnisse und werden nicht weiter betrachtet. Ebenso werden die Geometrieparameter Förderlänge L und Förderhöhe H nicht in die weitere Betrachtung mit einbezogen, da sie, wie in Abschnitt 2 dargelegt wurde, keinen Einfluss auf den erzielbaren Volumenstrom haben oder über die Schneckenneigung bereits erfasst sind.

Die Baugrößendimensionierung stark geneigter Schneckenförderer erfolgt, wie bereits bei den Berechnungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte sowie vertikale Schneckenförderer, zudem unabhängig vom geförderten Schüttgut. Ein Einfluss des Schüttguts wird in den Berechnungsverfahren also nicht berücksichtigt. Nachdem diese Vereinfachung für den horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderer bereits in allen bekannten Normen und Richtlinien angewendet wird, wurde die Zulässigkeit der Vereinfachung von *Rong* auch für den vertikalen Schneckenförderer gezeigt [Ron-2004a]. Aufgrund des analogen Bewegungsverhaltens des Schüttguts bei der Förderung und um die Konsistenz des neuen Berechnungsverfahrens zu den bekannten Verfahren in Bezug auf die notwendigen Eingangsgrößen sicherzustellen, werden die Schüttgutparameter bei der Entwicklung des Berechnungsverfahrens für den Geschwindigkeitsbeiwert ebenfalls nicht berücksichtigt.

Als erster Schritt zur Bestimmung des Regressionsmodells für den Geschwindigkeitsbeiwert werden also zunächst deskriptiv die Einflüsse der Parameter Schneckendrehzahl, Schneckenneigung, Schneckendurchmesser und Füllungsgrad auf den empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwert untersucht. Wie oben beschrieben wird dazu eine lokal gewichtete Regression berechnet und grafisch in Abhängigkeit der einzelnen Einflussparameter dargestellt. Abbildung 6-1 zeigt zunächst die Einflüsse von Schneckendrehzahl und Schneckenneigung auf den Geschwindigkeitsbeiwert.

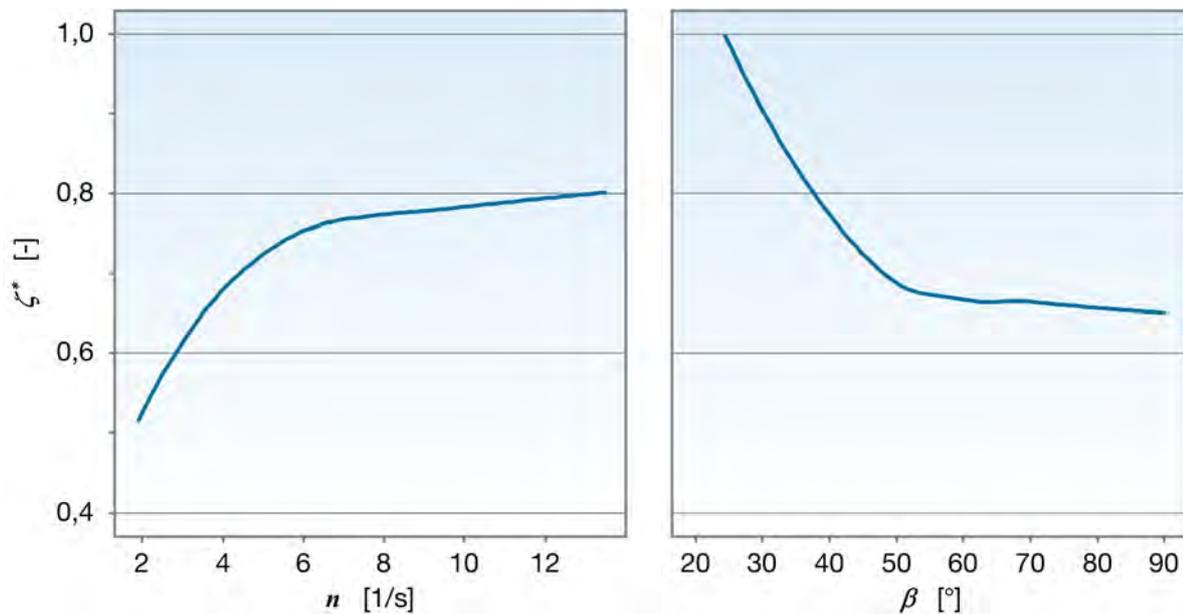


Abbildung 6-1: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Geschwindigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von Schneckendrehzahl und Schneckenneigung

Im linken Diagramm ist der empirisch ermittelte Geschwindigkeitsbeiwert über der Schneckendrehzahl aufgetragen. Zu erkennen ist ein zunächst starker positiver Zusammenhang, die Zielgröße steigt also mit zunehmendem Einflussparameter an. Ab Schneckendrehzahlen von ca. $n = 6 \text{ s}^{-1}$ schwächt sich der Einfluss deutlich ab. Der Verlauf der Kurve kann als Logarithmus- oder Potenzfunktion interpretiert werden, wobei sich in ersten Regressionsrechnungen die Abbildung durch eine Potenzfunktion als bessere Alternative erwiesen hat. Der Einfluss der Schneckenneigung ist rechts dargestellt. Zu erkennen ist ein negativer Zusammenhang – die Zielgröße nimmt mit zunehmender Einflussgröße also ab. Auch hier wird der Einfluss ab einer Schneckenneigung von ca. $\beta = 50^\circ$ deutlich geringer. Identifizieren lässt sich eine reziproke Proportionalität oder allgemeiner ebenfalls eine Potenzfunktion, die wiederum bevorzugt wird, um unnötige Einschränkungen zu vermeiden.

Die Einflüsse von Schneckendurchmesser und Füllungsgrad, dargestellt in Abbildung 6-2, sind augenscheinlich deutlich schwächer. Für den Schneckendurchmesser lässt sich ein leicht negativer, nichtlinearer Einfluss erkennen, der aber mit ausreichender Genauigkeit als linearer Zusammenhang angenommen werden kann, was zur angestrebten Einfachheit des Modells beiträgt. Für den Füllungsgrad kann schließlich ein leicht positiver, linearer Einfluss festgestellt werden.

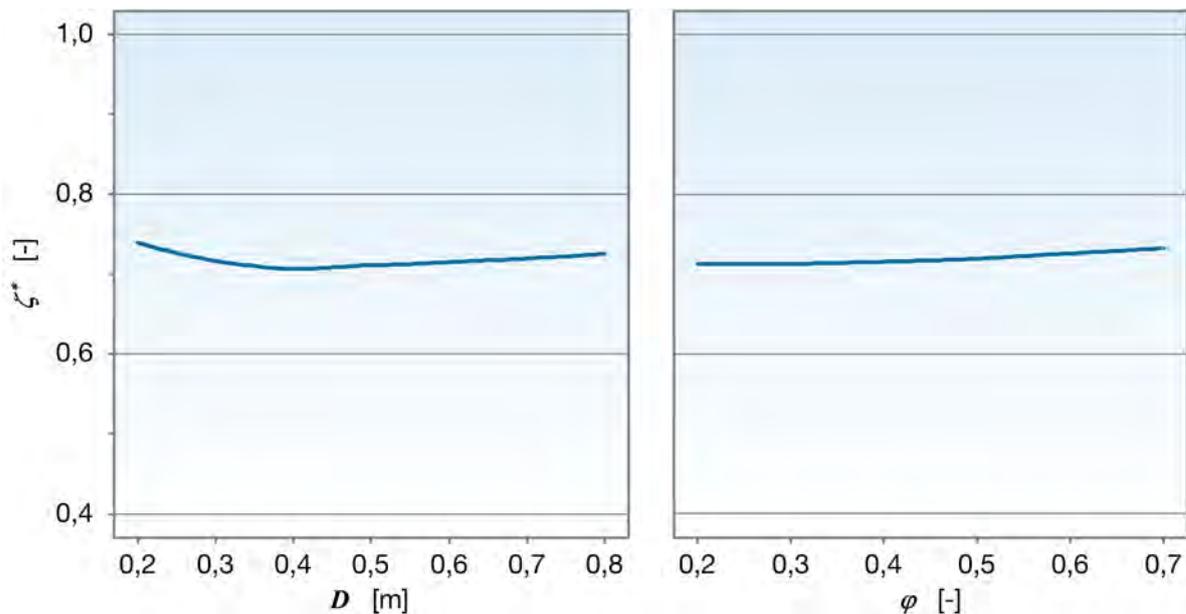


Abbildung 6-2: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Geschwindigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von Schneckendurchmesser und Füllungsgrad

6.2.2 Entwicklung des Berechnungsverfahrens für den Geschwindigkeitsbeiwert

Mit den identifizierten Zusammenhängen sind die Einflüsse der betrachteten Parameter auf den empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwert zunächst ausreichend geklärt und bilden die Grundlage für ein erstes Regressionsmodell. Die Einflüsse von Schneckenneigung β und Schneckendrehzahl n werden darin als Potenzfunktion, die Einflüsse von Schneckendurchmesser D und Füllungsgrad φ als lineare Effekte modelliert. Es liegt damit ein mehrdimensionales, nicht-lineares Modell mit den Regressionskoeffizienten θ_k für $k = 1, \dots, 7$ zur Beschreibung des gesuchten Geschwindigkeitsbeiwerts ζ vor:

$$\zeta = \theta_1 + \theta_2 \cdot \beta^{0,3} + \theta_4 \cdot n^{0,5} + \theta_6 \cdot D + \theta_7 \cdot \varphi . \quad (6-2)$$

Die unbekanntenen Regressionskoeffizienten werden mit Hilfe eines Gauß-Newton-Algorithmus durch die Minimierung der Residuenquadratsumme bestimmt. Bereits die Gegenüberstellung von berechneten und empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwerten in Abbildung 6-3 zeigt allerdings, dass weder das in Gleichung (6-2) genannte Modell (Diagramm links oben) noch die oben beschriebenen Varianten mit quadratischem Einfluss des Schneckendurchmessers (oben rechts), logarithmischem Einfluss der Schneckendrehzahl (unten links) oder beiden alternativen Einflussarten (unten rechts) eine zufriedenstellende Modellanpassung aufweisen.

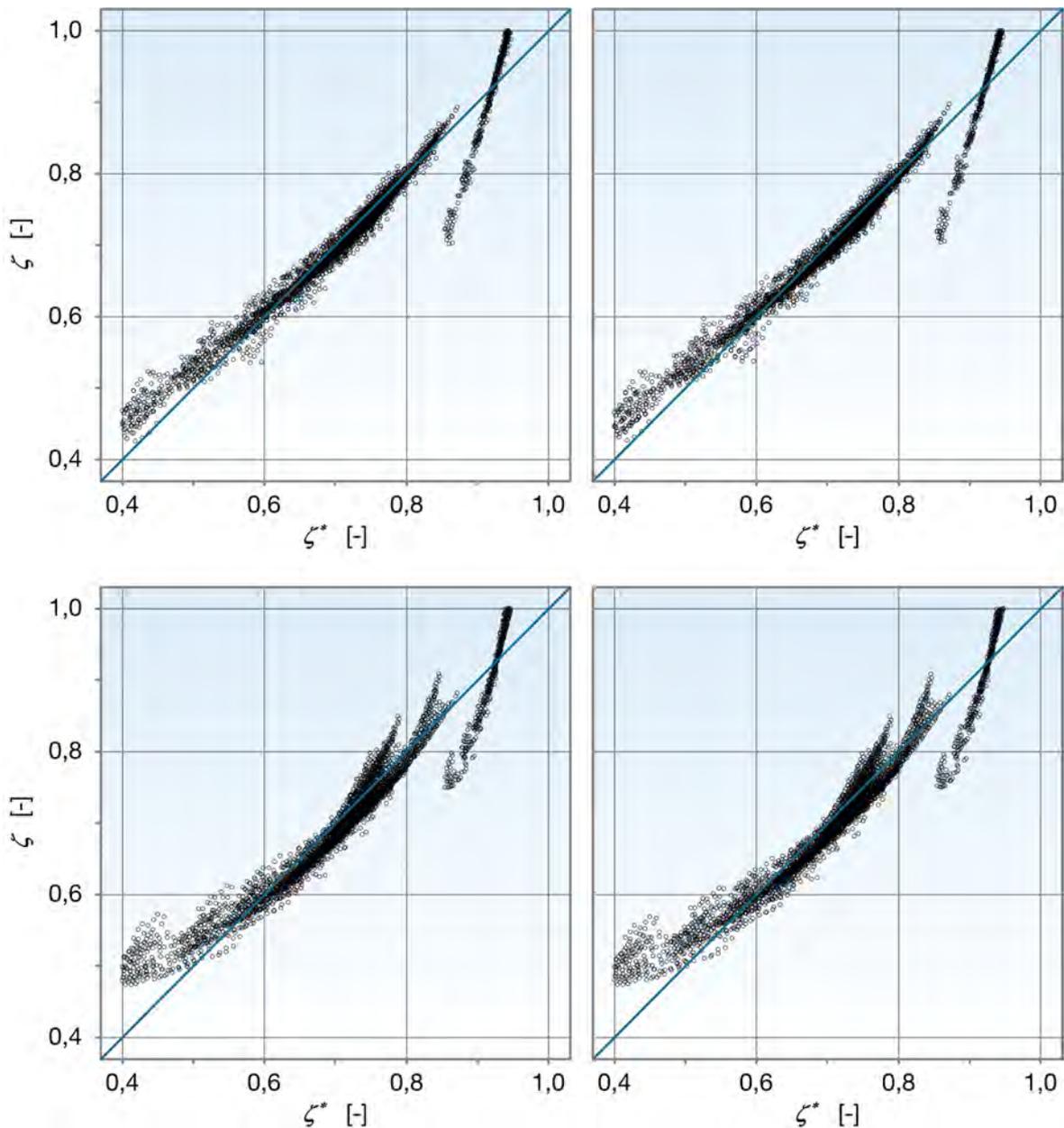


Abbildung 6-3: Modellanpassung für die ausschließlich auf der deskriptiven Analyse entstandenen Regressionsmodelle für den Geschwindigkeitsbeiwert

Das Regressionsmodell muss daher noch geeignet erweitert werden. Da die Schneckeneigung, wie in Abschnitt 3 ausführlich erläutert, einen entscheidenden Einfluss auf die Förderung nimmt, wird deren Einfluss weiter untersucht. Hierzu werden die Regressionskoeffizienten des Modells aus Gleichung (6-2) zunächst für jede Schneckeneigung separat berechnet. Die Koeffizienten θ_2 und θ_3 werden dabei aufgrund der jeweils konstanten Schneckeneigung in den Koeffizienten θ_1 integriert, so dass sich jeweils ein Modell der Form

$$\zeta_{\beta} = \theta_1 + \theta_4 \cdot n^{0,5} + \theta_6 \cdot D + \theta_7 \cdot \varphi \quad (6-3)$$

ergibt. Die einzelnen Koeffizienten dieses Modells sind in Abhängigkeit von der Schneckeneigung in Abbildung 6-4 als Datenpunkte dargestellt.

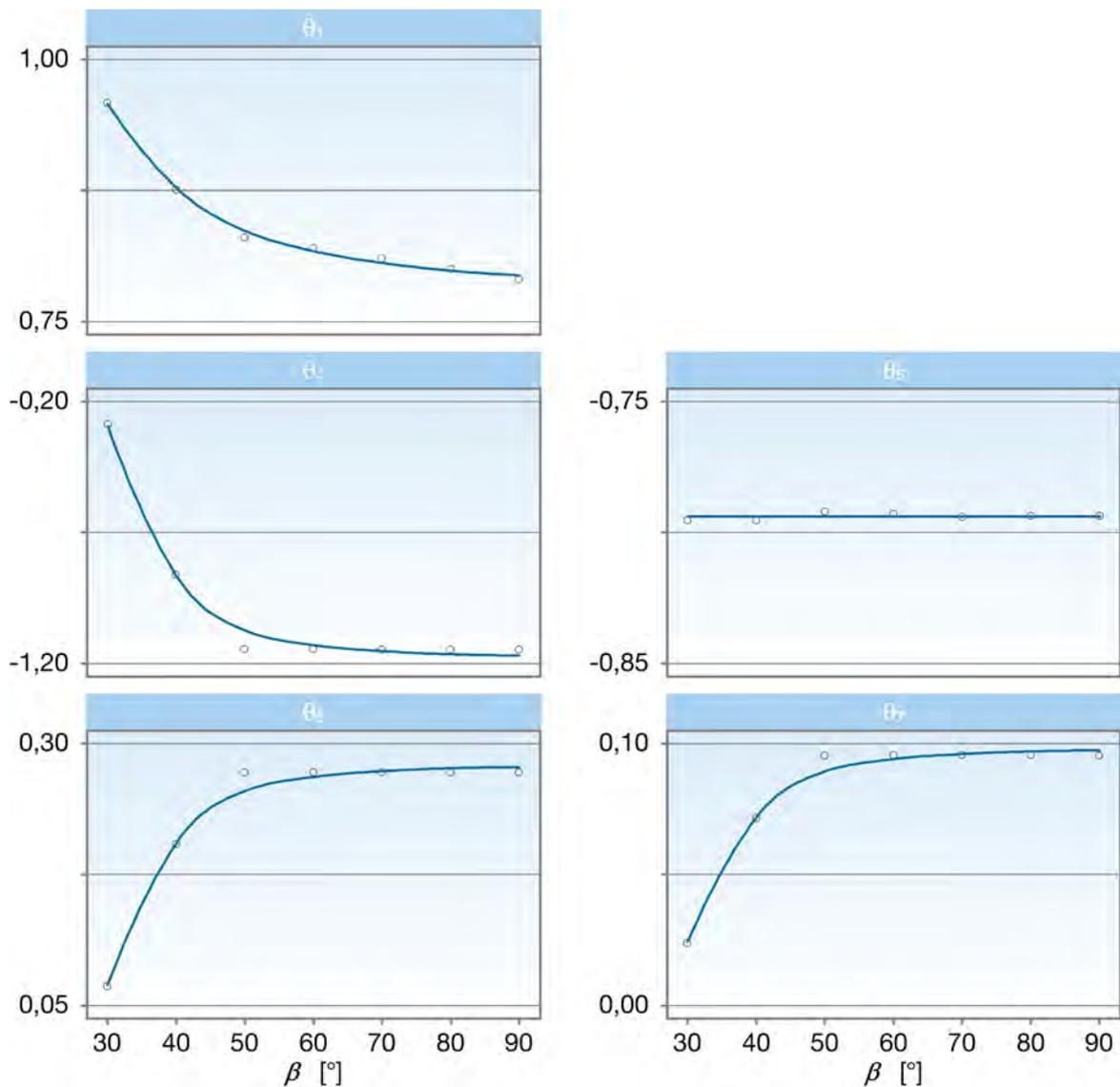


Abbildung 6-4: Einfluss der Schneckeneigung auf die Koeffizienten des Regressionsmodells

Es ist zu erkennen, dass der Koeffizient θ_5 , also der Exponent der Schneckendrehzahl, augenscheinlich nicht von der Schneckenneigung abhängig ist, während dies für die anderen betrachteten Koeffizienten der Fall ist. Ein funktionaler Zusammenhang der Form

$$\theta_k(\beta) = \Xi_1 + \Xi_2 \cdot \beta^{\Xi_3} \quad (6-4)$$

approximiert die Abhängigkeit dieser Koeffizienten von der Schneckenneigung ausreichend genau. Die Funktionen mit den geschätzten Koeffizienten Ξ_1 , Ξ_2 und Ξ_3 sind in Abbildung 6-4 eingezeichnet und zeigen die gute Übereinstimmung. Es zeigt sich, dass Ξ_3 , der Exponent der Schneckenneigung, dabei in allen Fällen als gleich angenommen werden kann.

Mit diesen Erkenntnissen kann das Regressionsmodell für den Geschwindigkeitsbeiwert so erweitert werden, dass die Schwächen des ersten Modells behoben werden. Hierzu werden die Regressionskoeffizienten θ_k , mit $k = 1, 4, \dots, 7$, aus Gleichung (6-3) durch die oben beschriebenen Zusammenhänge ersetzt und dem Einfluss der Schneckenneigung im Modell somit mehr Gewicht verliehen. Das Regressionsmodell für den Geschwindigkeitsbeiwert ζ geht mit dieser Erweiterung in die Form

$$\zeta = \Xi_1 + \Xi_2 \cdot \beta^{\Xi_3} + \Xi_4 \cdot n^{\Xi_5} + \Xi_6 \cdot D + \Xi_7 \cdot \varphi + (\Xi_8 \cdot n^{\Xi_5} + \Xi_9 \cdot D + \Xi_{10} \cdot \varphi) \cdot \beta^{\Xi_{11}} \quad (6-5)$$

über. Als Einflussparameter werden weiterhin die Schneckenneigung β , die Schneckendrehzahl n , der Schneckendurchmesser D sowie der Füllungsgrad φ berücksichtigt. Die im Modell enthaltenen Regressionskoeffizienten Ξ_k für $k = 1, \dots, 11$ werden wiederum durch Minimierung der Residuenquadratsumme mit Hilfe eines Gauß-Newton-Algorithmus geschätzt und sind zusammen mit ihren Standardabweichungen in Tabelle 6-1 aufgeführt. Die Standardabweichungen sind betragsmäßig mindestens um Faktor drei höher als die zugehörigen geschätzten Koeffizienten und sind somit ein Hinweis auf die Signifikanz der zugehörigen Einflussparameter. Das Entfernen eines Parameters würde also zu einer Verschlechterung des Modells führen. Dass das Regressionsmodell in der vorliegenden Form den Geschwindigkeitsbeiwert bereits mit ausreichender Genauigkeit abbildet, wird im folgenden Abschnitt gezeigt.

Tabelle 6-1: Regressionskoeffizienten und Standardabweichungen für den Geschwindigkeitsbeiwert

	Regressionskoeffizienten	Standardabweichungen
Ξ_1	7,82768 E-1	3,83786 E-3
Ξ_2	9,82974 E+2	2,06860 E+2
Ξ_3	-2,53285 E+0	6,04759 E-2
Ξ_4	-1,19198 E+0 s ^{-0,799693}	5,53989 E-3 s ^{-0,799693}
Ξ_5	-7,99693 E-1	8,74331 E-3
Ξ_6	2,82653 E-1 m ⁻¹	1,87272 E-3 m ⁻¹
Ξ_7	9,95944 E-2	1,63402 E-3
Ξ_8	4,72442 E+5 s ^{-0,799693}	1,49263 E+5 s ^{-0,799693}
Ξ_9	-1,12644 E+5 m ⁻¹	3,56442 E+4 m ⁻¹
Ξ_{10}	-4,03559 E+4	1,29335 E+4
Ξ_{11}	-3,87153 E+0	9,35399 E-2

6.2.3 Modellgüte des Berechnungsverfahrens für den Geschwindigkeitsbeiwert

Um abschließend die Güte des Regressionsmodells beurteilen zu können, wird, wie oben beschrieben, zunächst die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers, also die durchschnittliche Abweichung des geschätzten Geschwindigkeitsbeiwerts vom empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwert, gemäß Gleichung (6-1) berechnet. Für das berechnete Regressionsmodell ergibt sich ein Wert von $\sqrt{MQF} = 0,012532$. Dies entspricht einer durchschnittlichen, relativen Abweichung von nur 1,44 %. Auch bei den kleinsten empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwerten beträgt der zu erwartende Fehler des geschätzten Modells nur ca. 3,33 % und zeigt die hohe Genauigkeit des berechneten Regressionsmodells.

Weiteren Aufschluss über die Modellanpassung gibt der deskriptive Vergleich der empirisch ermittelten Werte mit den geschätzten Werten im Rahmen einer globalen Betrachtung. In Abbildung 6-5 sind hierzu die Werte des geschätzten Regressionsmodells über den empirischen ermittelten Werten aufgetragen. Je näher die Punkte deshalb auf der Winkelhalbierenden liegen, desto besser ist das Modell.

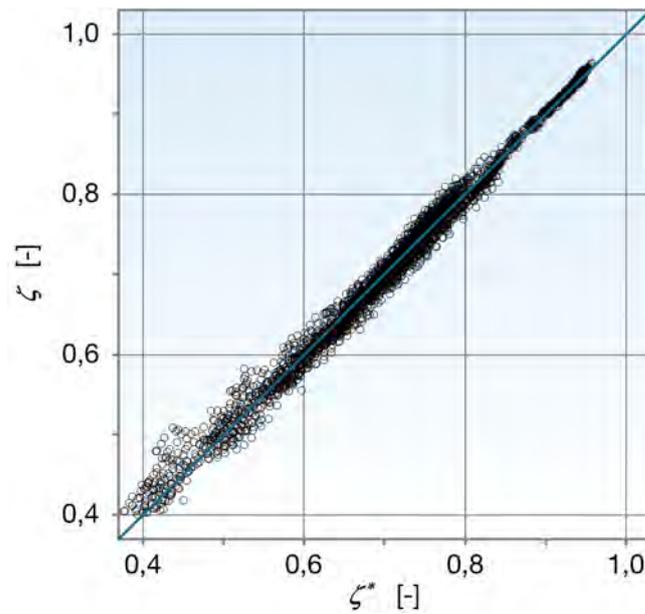


Abbildung 6-5: Globale Modellanpassung für den Geschwindigkeitsbeiwert

Es ist zu erkennen, dass keine größeren Ausreißer vorhanden sind und sich die Datenpunkte der geschätzten Geschwindigkeitsbeiwerte gut an die Winkelhalbierende anschmiegen. Lediglich im linken Bereich kleiner Werte sind deutlichere Abweichungen erkennbar. Die Darstellung der geschätzten Dichtefunktion in Abbildung 6-6 zeigt allerdings, dass nur ein kleiner Anteil der Werte in diesem Bereich liegt und daher die Mehrheit der Werte mit dem Regressionsmodell gut geschätzt wird.

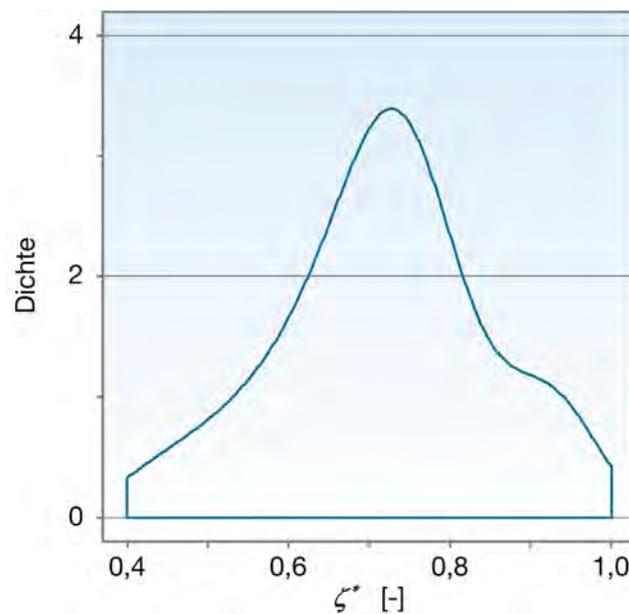


Abbildung 6-6: Geschätzte Dichtefunktion des empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwerts

Um neben dieser globalen Betrachtung aller betrachteten Geschwindigkeitsbeiwerte beurteilen zu können, inwieweit das gefundene Regressionsmodell auch für die einzelnen Kategorien der betrachteten Einflussgrößen eine ausreichende Genauigkeit besitzt, sind in Abbildung 6-7 sowohl die empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwerte als auch das geschätzte Regressionsmodell über den Ausprägungen von Schneckendrehzahl, Füllungsgrad und Schneckenneigung dargestellt.

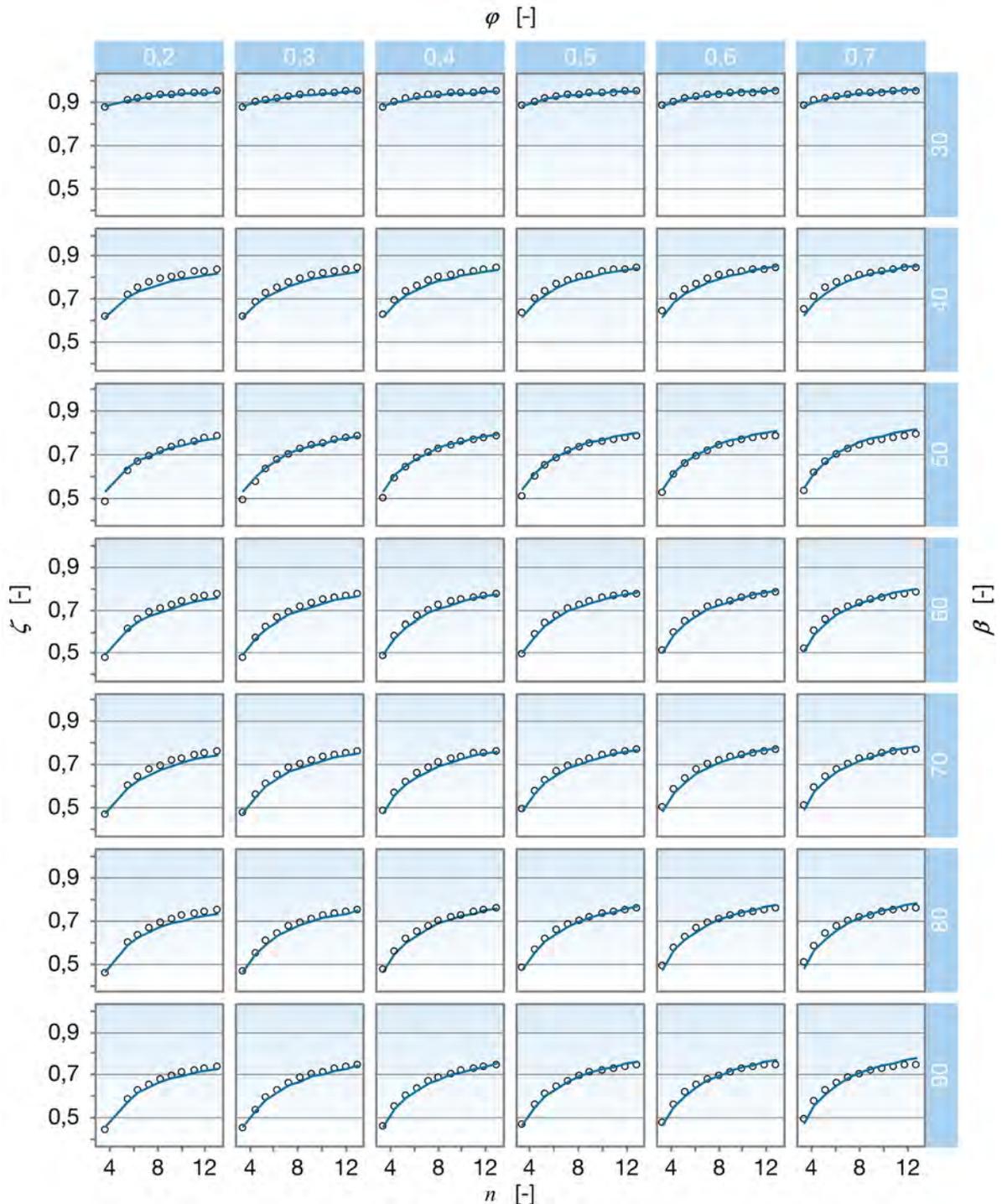


Abbildung 6-7: Modellanpassung nach Kategorien für den Geschwindigkeitsbeiwert

Um die Komplexität auf ein nötiges Maß zu beschränken, wird nur das Diagramm für den Schneckendurchmesser $D = 0,4 \text{ m}$ gezeigt. Für die anderen untersuchten Schneckendurchmesser ergeben sich sehr ähnliche Ergebnisse. Zu erkennen ist, dass in nahezu allen Feldern eine gute Übereinstimmung der empirisch ermittelten Datenpunkte mit dem geschätzten Regressionsmodell (Kurve) vorhanden ist. Einzig in einzelnen Randbereichen gibt es kleinere Abweichungen. Damit zeigt sich abschließend, dass das gefundene Regressionsmodell zur Berechnung des Geschwindigkeitsbeiwerts geeignet ist und diesen mit ausreichender Genauigkeit abbildet.

6.3 Leistungsbeiwert

6.3.1 Analyse der ermittelten Daten des Leistungsbeiwerts

Die für die Bestimmung des Leistungsbeiwerts ermittelten Daten werden wiederum um Daten aus den vorherigen Arbeiten von *Fottner*, *Rong* und *Blomeyer* [Fot-2002, Ron-2004a, Blo-2008] ergänzt, um auch hier die Randbereiche des Berechnungsverfahrens ausreichend abbilden zu können. Insgesamt liegen damit folgende Parameter als unabhängige Einflussgrößen auf die abhängige Zielgröße empirisch ermittelter Leistungsbeiwert λ^* vor:

- Schneckendrehzahl im Bereich $2 \text{ s}^{-1} \leq n \leq 13 \text{ s}^{-1}$
- Schneckenneigung im Bereich $20^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$
- Füllungsgrad im Bereich $0,2 \leq \varphi \leq 0,7$
- Schneckendurchmesser im Bereich $0,2 \text{ m} \leq D \leq 0,315 \text{ m}$
- Art des Schüttguts (Kohle, PET-Granulat, Raps, Sand, Weizen)

Wie bei der Bestimmung des Geschwindigkeitsbeiwerts werden weitere Geometrie- oder Betriebsparameter nicht erfasst, da sie entweder nicht unabhängig sind oder bereits implizit in anderen Parametern enthalten sind. Zusätzlich zu den bereits beim Berechnungsverfahren für den Geschwindigkeitsbeiwert verwendeten Geometrie- und Betriebsparametern werden bei der Bestimmung des Leistungsbeiwerts noch die Eigenschaften des Schüttguts berücksichtigt, da diese entscheidenden Einfluss auf das Reibverhalten haben. Zur Charakterisierung des Schüttguts werden die

Schüttdichte ρ , die innere Reibung μ_S sowie die Reibwerte gegen Schneckenwendel und Rohr μ_F betrachtet. Es wird dabei davon ausgegangen, dass sowohl für die Schneckenwendel als auch für das Rohr Stahl als Werkstoff verwendet wird und der Reibwert des Schüttguts deshalb gleich ist. Die Werte der betrachteten Schüttgüter sind in Tabelle 6-2 aufgeführt. Bei der Betrachtung der Schüttgütereigenschaften ist zu berücksichtigen, dass immer nur bestimmte Kombinationen der drei Parameter möglich sind, die dann ein bestimmtes Schüttgut beschreiben. Daher ist eigentlich immer der Einfluss aller drei Parameter gemeinsam zu bewerten. Dennoch werden im Folgenden die einzelnen Parameter betrachtet, da der Einfluss des Schüttguts vereinfacht durch diese Parameter beschrieben werden soll.

Tabelle 6-2: Betrachtete Parameter der Schüttgüter

	Schüttdichte [kg/m ³]	Innerer Reibwert [-]	Äußerer Reibwert [-]
Kohle	800	0,67	0,53
PET-Recyclat	750	0,75	0,49
Raps	700	0,58	0,40
Sand	1.640	0,87	0,51
Weizen	820	0,55	0,40

Analog zum Vorgehen bei der Entwicklung des Geschwindigkeitsbeiwerts werden zunächst anhand der grafischen Darstellung der lokalen gewichteten Regression die grundlegenden Einflüsse auf den empirisch ermittelten Leistungsbeiwert deskriptiv identifiziert. Betrachtet werden dabei die Schneckendrehzahl, die Schneckenneigung, der Schneckendurchmesser, der Füllungsgrad und das geförderte Schüttgut, das durch die Schüttdichte sowie den inneren und äußeren Reibwert charakterisiert wird. Abbildung 6-8 zeigt hierzu die berechneten Kurven für den Einfluss von Schneckendrehzahl und Schneckenneigung auf den empirisch ermittelten Leistungsbeiwert. Wie schon beim Geschwindigkeitsbeiwert hat auch hier die Schneckendrehzahl großen Einfluss. Zu erkennen ist ein Zusammenhang, der ab einer Schneckendrehzahl von ca. $n = 6 \text{ s}^{-1}$ deutlich positiv wird. Der Verlauf der Kurve kann durch eine Potenzfunktion 2. Grades mit ausreichender Genauigkeit approximiert werden. Auch der Einfluss der Schneckenneigung zeigt einen schwach positiven Zusammenhang, der sich mit steigender Schneckenneigung zwar leicht abschwächt, aber dennoch als linear angenommen werden kann.

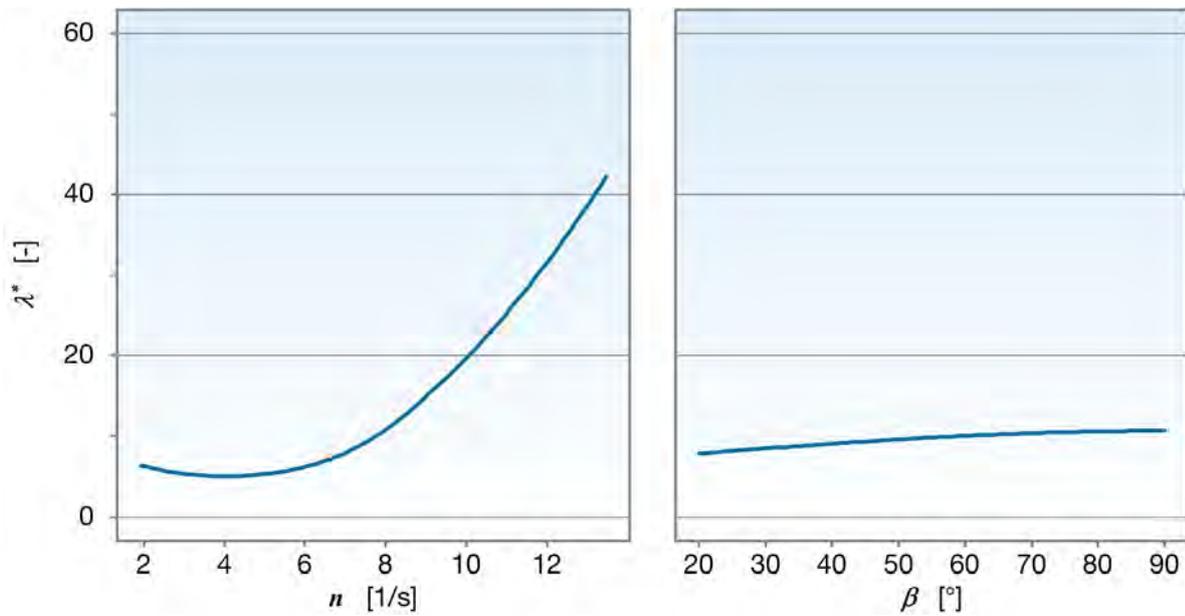


Abbildung 6-8: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Leistungsbeiwert in Abhängigkeit von Schneckendrehzahl und Schneckenneigung

Die mit Hilfe der der lokal gewichteten Regression berechneten Zusammenhänge von empirisch ermitteltem Leistungsbeiwert und den Parametern Füllungsgrad und Schneckendurchmesser sind in Abbildung 6-9 grafisch dargestellt. Für beide Parameter kann ein negativer Zusammenhang identifiziert werden, der augenscheinlich linear ist.

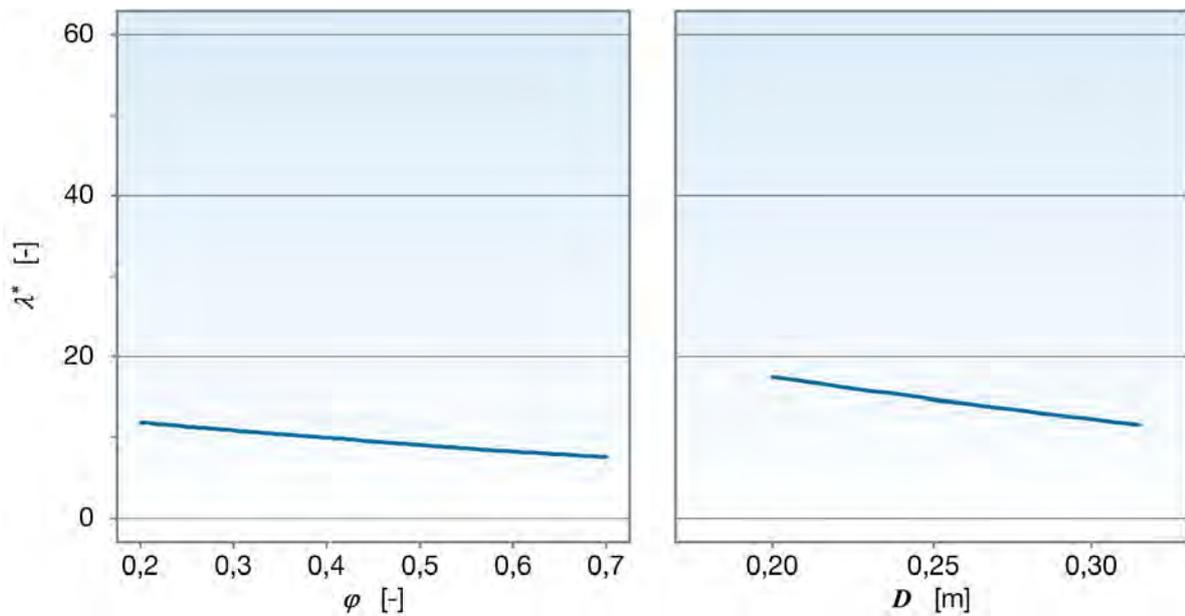


Abbildung 6-9: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Leistungsbeiwert in Abhängigkeit von Schneckendurchmesser und Füllungsgrad

Die separat betrachteten Einflüsse der Schüttgutparameter sind in Abbildung 6-10 aufgezeichnet und können wie folgt beschrieben werden. Sowohl der Einfluss des inneren Reibwerts als auch der des Reibwerts gegen Schneckenwendel und Rohr sind schwach positiv. Obwohl bei beiden Parametern augenscheinlich eine Potenzfunktion höheren Grades vorliegt, wird jeweils ein linearer Ansatz verfolgt, um Komplexität des Regressionsmodells in Grenzen zu halten. Für die Schüttdichte fällt zunächst das deutliche Minimum auf. Dieser Einbruch der Kurve stellt allerdings nicht den tatsächlichen Verlauf dar, sondern ist den dort fehlenden Werten geschuldet, da nur ein ausgewertetes Schüttgut eine Schüttdichte größer $\rho = 820 \text{ kg/m}^3$ aufweist. Dementsprechend wird ebenfalls ein linearer Ansatz verfolgt, der gemäß dem Beginn der Kurve als schwach positiv angenommen wird.

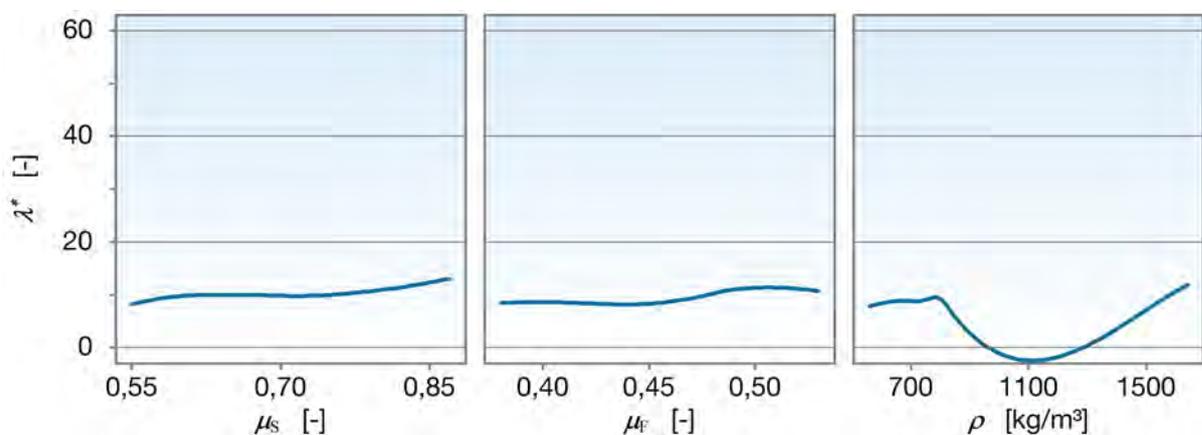


Abbildung 6-10: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Leistungsbeiwert in Abhängigkeit der Schüttgutparameter

6.3.2 Entwicklung des Berechnungsverfahrens für den Leistungsbeiwert

Die identifizierten Zusammenhänge bilden wieder die Grundlage für ein erstes Regressionsmodell für den Leistungsbeiwert. Entsprechend der deskriptiven Analyse wird der Einfluss der Schneckendrehzahl n als quadratische Funktion abgebildet, während die Parameter Schneckenneigung β , Füllungsgrad φ , Schneckendurchmesser D , innerer Reibwert μ_S , äußerer Reibwert μ_F und Schüttdichte ρ als lineare Einflüsse in das Modell integriert werden. Damit ergibt sich das lineare Modell

$$\lambda = \theta_1 + \theta_2 \cdot n + \theta_3 \cdot n^2 + \theta_4 \cdot \beta + \theta_5 \cdot \varphi + \theta_6 \cdot D + \theta_7 \cdot \mu_S + \theta_8 \cdot \mu_F + \theta_9 \cdot \rho \quad (6-6)$$

mit den Regressionskoeffizienten θ_k für $k = 1, \dots, 9$.

Die unbekanntes Regressionskoeffizienten werden mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate aus dem – durch Datensätze und Regressionsmodell gebildeten – überbestimmten linearen Gleichungssystem bestimmt. Wie beim Geschwindigkeitsbeiwert liefert auch beim Leistungsbeiwert dieser erste Versuch nicht die geforderte Anpassung, wie das linke Diagramm in Abbildung 6-11 zeigt. Die mit den geschätzten Koeffizienten und Gleichung (6-6) berechneten Werte des Leistungsbeiwerts sind hier wieder über den empirisch ermittelten Werten aufgetragen.

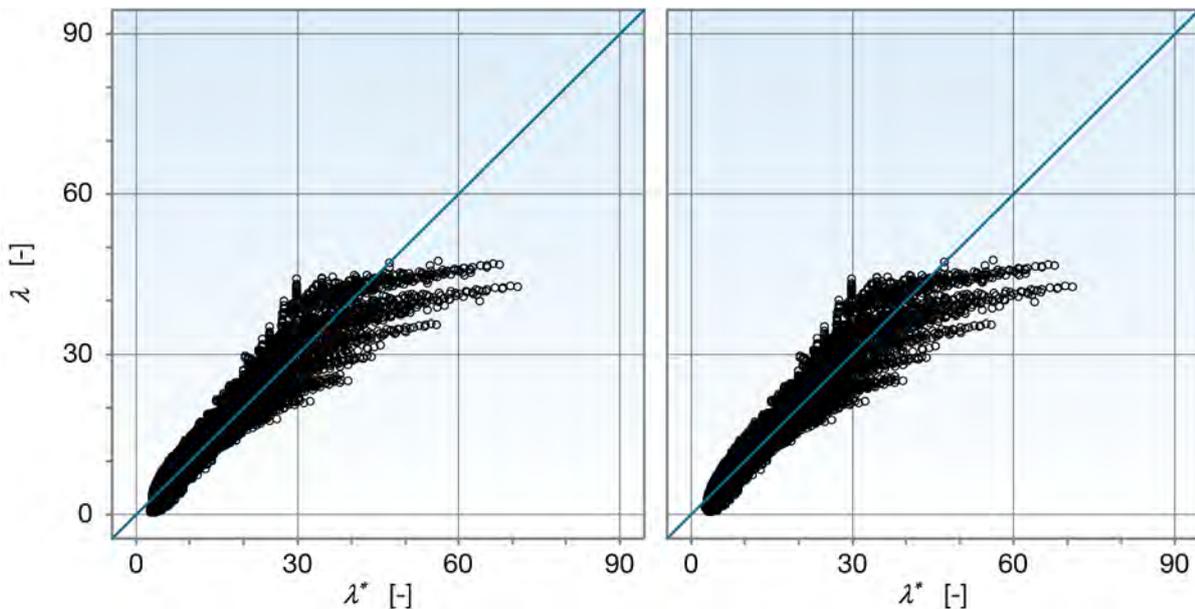


Abbildung 6-11: Modellanpassung für die ausschließlich auf der deskriptiven Analyse entstandenen Regressionsmodelle für den Leistungsbeiwert

Als erste Erkenntnis kann abgeleitet werden, dass der Schneckendurchmesser wohl keinen signifikanten Einfluss auf den Leistungsbeiwert hat. Dies zeigt die Modellanpassung für ein zweites Modell, das bis auf den weggelassenen Einfluss des Schneckendurchmessers analog zu Gleichung (6-6) ist und im rechten Diagramm von Abbildung 6-11 dargestellt ist. Eine Verschlechterung der Anpassung gegenüber dem Modell mit Berücksichtigung des Schneckendurchmessers ist nicht zu erkennen. Dies bestätigt auch die Berechnung der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers. Der Schneckendurchmesser wird daher in den weiteren Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt. Analoge Erkenntnisse haben für die anderen Neigungsbereiche von Schneckenförderer bereits *Blomeyer* [Blo-2008] und *Rong* [Ron-2004a] in ihren Arbeiten ermittelt. Anzumerken ist hier, dass der Schneckendurchmesser gemäß den in Abschnitt 4.3 dargestellten Zusammenhängen sehr wohl Einfluss auf den nötigen Leistungsbedarf, aber eben nicht auf den Leistungsbeiwert hat.

Eine weitere Erkenntnis aus diesen ersten Regressionsmodellen ist die relativ gute Modellanpassung für Leistungsbeiwerte bis ca. $\lambda^* = 25$. Erst für größere empirisch ermittelte Leistungsbeiwerte weichen die Werte stark voneinander ab und sind generell zu klein. Da, wie in Abbildung 6-8 ersichtlich die Schneckendrehzahl einen starken, positiven Einfluss auf den Leistungsbeiwert hat, liegt die Vermutung nahe, die Anpassung des Modells durch eine stärkere Integration der Schneckendrehzahl verbessern zu können. Analog zum Vorgehen beim Geschwindigkeitsbeiwert werden daher die Regressionskoeffizienten aus Gleichung (6-6) auf eine mögliche Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl hin untersucht. Es zeigt sich, dass ein quadratischer Einfluss der Schneckendrehzahl auf die Regressionskoeffizienten von Schneckenneigung und Füllungsgrad vorliegt, die deshalb durch eine entsprechende Funktion ersetzt werden. Es ergibt sich somit ein Regressionsmodell, das den Leistungsbeiwert mit den Regressionskoeffizienten θ_k für $k = 1, \dots, 12$ durch

$$\lambda = \theta_1 + \theta_2 \cdot n + \theta_3 \cdot n^2 + (\theta_4 + \theta_6 \cdot n + \theta_{10} \cdot n^2) \cdot \beta + (\theta_5 + \theta_{11} \cdot n + \theta_{12} \cdot n^2) \cdot \varphi + \theta_7 \cdot \mu_S + \theta_8 \cdot \mu_F + \theta_9 \cdot \rho \quad (6-7)$$

in Abhängigkeit der identifizierten Geometrie-, Betriebs- und Schüttgutparameter beschreibt. Eine Umformung liefert schließlich das Regressionsmodell, das den Leistungsbeiwert λ in Abhängigkeit von Schneckendrehzahl n , Schneckenneigung β , Füllungsgrad φ , Schneckendurchmesser D , inneren Reibwert μ_S , äußeren Reibwert μ_F und Schüttdichte ρ mit ausreichender Genauigkeit abbildet, wie im folgenden Abschnitt noch gezeigt wird. Durch einen Optimierungs-Algorithmus können die Regressionskoeffizienten Θ_k , mit $k = 1, \dots, 12$, des resultierenden Modells

$$\lambda = \Theta_1 + \Theta_2 \cdot \beta + \Theta_3 \cdot \varphi + \Theta_4 \cdot \mu_S + \Theta_5 \cdot \mu_F + \Theta_6 \cdot \rho + (\Theta_7 + \Theta_8 \cdot \beta + \Theta_9 \cdot \varphi) \cdot n + (\Theta_{10} + \Theta_{11} \cdot \beta + \Theta_{12} \cdot \varphi) \cdot n^2 \quad (6-8)$$

das wieder ein lineares Gleichungssystem darstellt, geschätzt werden. Die resultierenden Koeffizienten sind mit ihren Standardabweichungen in Tabelle 6-3 aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Standardabweichungen für alle Koeffizienten groß genug sind, um von einem signifikanten Einfluss der zugehörigen Parameter ausgehen zu können. Die Komplexität des Modells ist also in der dargestellten Form nötig, um den Leistungsbeiwert ausreichend genau zu berechnen. Dass eine Erweiterung des Modells um weitere Parameter – im Verhältnis zur Komplexität des Modells – keinen zusätzlichen Genauigkeitsgewinn liefert, haben weitere Berechnungen gezeigt.

Tabelle 6-3: Regressionskoeffizienten und Standardabweichungen für den Leistungsbeiwert

	Regressionskoeffizienten	Standardabweichungen
Θ_1	9,522014 E+0	9,345528 E-2
Θ_2	9,318635 E-2	1,001678 E-3
Θ_3	-1,138242 E+1	1,347508 E-1
Θ_4	1,915168 E+0	8,459035 E-2
Θ_5	1,109095 E+0	1,328124 E-1
Θ_6	2,807889 E-3 m ³ kg ⁻¹	2,150457 E-5 m ³ kg ⁻¹
Θ_7	-2,637751 E+0 S	2,627418 E-2 s
Θ_8	-4,960379 E-2 S	3,075628 E-4 s
Θ_9	3,338970 E+0 S	4,139547 E-2 s
Θ_{10}	3,465056 E-1 s ²	1,792438 E-3 s ²
Θ_{11}	4,990325 E-3 s ²	2,105486 E-5 s ²
Θ_{12}	-3,832268 E-1 s ²	2,836582 E-3 s ²

6.3.3 Modellgüte des Berechnungsverfahrens für den Leistungsbeiwert

Abschließend wird analog zum Vorgehen beim Geschwindigkeitsbeiwert die Güte der gefundenen Berechnungsvorschrift für den Leistungsbedarf bewertet, indem die globale Modellanpassung, die Anpassung in einzelnen Kategorien und die durchschnittliche Abweichung der berechneten Werte betrachtet werden. Die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers beträgt für das berechnete Modell des Leistungsbeiwerts $\sqrt{MQF} = 3,037137$. Um die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers geeignet interpretieren zu können, wird zunächst deskriptiv die globale Modellanpassung beurteilt. In Abbildung 6-12 sind dazu wieder die mit dem Regressionsmodell aus Gleichung (6-8) geschätzten Werte des Leistungsbeiwerts über den empirisch ermittelten Werten aufgetragen. Während die Datenpunkte im unteren Bereich bis ca. $\lambda^* = 25$ nah an der Winkelhalbierenden anliegen, zeigen sich darüber hinaus Ausreißer und die Werte weichen mit zunehmendem Leistungsbeiwert immer weiter von der Winkelhalbierenden ab.

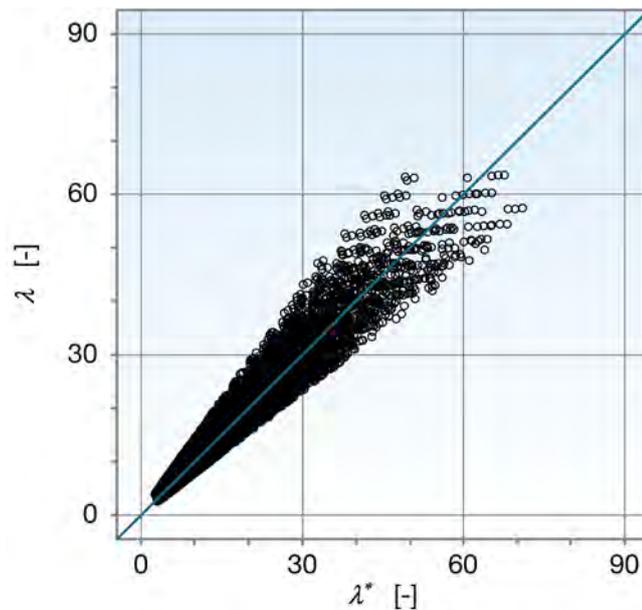


Abbildung 6-12: Globale Modellanpassung für den Leistungsbeiwert

Insgesamt kann aber dennoch eine ausreichend gute Übereinstimmung attestiert werden, da über 90 % der betrachteten Werte im Bereich bis $\lambda^* = 25$ liegen sowie noch ca. 70 % kleiner als $\lambda^* = 10$ sind und gerade in diesem Bereich die Modellanpassung sehr gut ist. Die Verteilung der Werte zeigt die geschätzte Dichtefunktion des empirisch ermittelten Leistungsbeiwerts, deren Verlauf in Abbildung 6-13 dargestellt ist. Vor diesem Hintergrund belegt auch der ermittelte Wert für die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers eine ausreichende Genauigkeit des Verfahrens.

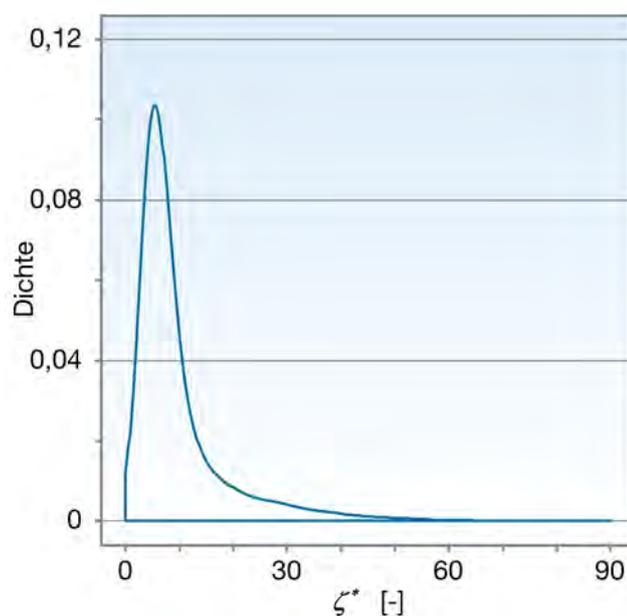


Abbildung 6-13: Geschätzte Dichtefunktion des empirisch ermittelten Leistungsbeiwerts

6 Entwicklung der Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren

Eine abschließende Beurteilung der Modellanpassung erfolgt wiederum anhand der Übereinstimmung des Regressionsmodells mit den empirisch ermittelten Werten in den verschiedenen Kategorien der betrachteten Parameter. Dies ist exemplarisch für das Schüttgut PET-Recyclat und in Abhängigkeit von Schneckendrehzahl, Schneckenneigung und Füllungsgrad in Abbildung 6-14 dargestellt.

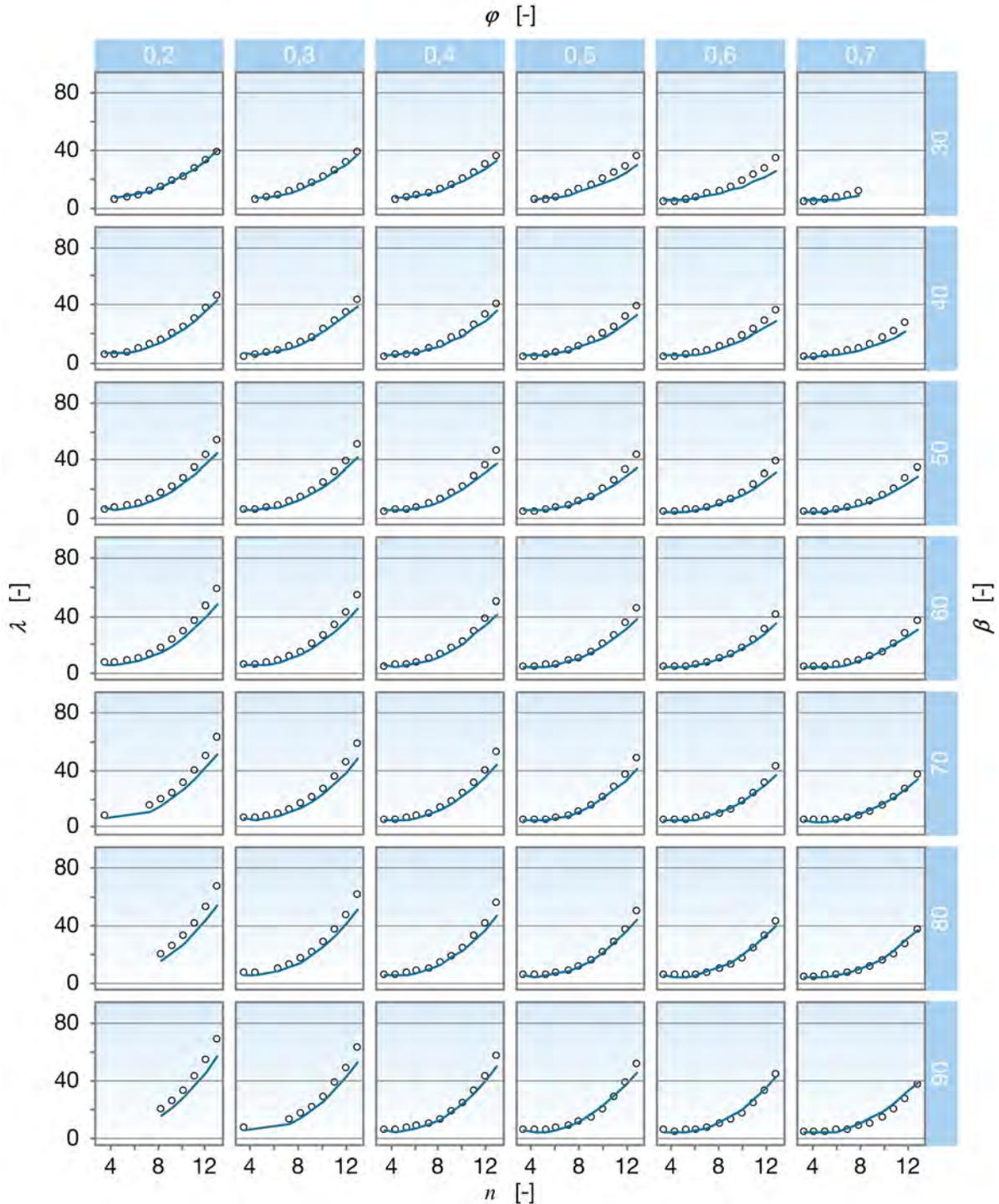


Abbildung 6-14: Modellanpassung nach Kategorien für den Leistungsbeiwert

Wie beim Geschwindigkeitsbeiwert zeigen sich auch beim Leistungsbeiwert keine größeren Abweichungen zwischen dem entwickelten Berechnungsmodell (Kurve) und den Datenpunkten für den empirisch ermittelten Leistungsbeiwert. Kleinere Abweichungen sind nur für sehr hohe Schneckendrehzahlen zu finden, die in der Praxis in dieser Höhe aber nicht gebräuchlich sind. Da sich auch für die anderen Schüttgüter keine abweichenden Erkenntnisse ergeben, kann somit trotz dieser Abweichungen von einer ausreichenden Genauigkeit des Berechnungsverfahrens ausgegangen werden.

6.4 Berechnungsverfahren für stark geneigte Schneckenförderer

Die gefundenen Regressionsmodelle sind damit zur Berechnung des Geschwindigkeitsbeiwerts und Leistungsbeiwerts prinzipiell geeignet. Durch den Aufbau der Berechnungsformeln und die hohe Anzahl an gültigen Ziffern der in Tabelle 6-1 und Tabelle 6-3 aufgeführten Koeffizienten ist eine Berechnung der Beiwerte aber noch umständlich. Da eine Vereinfachung der Formeln, wie oben beschrieben, nicht ohne Genauigkeitsverlust zu erreichen ist, werden die Koeffizienten auf eine möglichst geringe Anzahl gültiger Ziffern gekürzt, um das Berechnungsverfahren dennoch möglichst einfach Handhabbar zu machen. Unter der Maxime, dass sich die erreichte Genauigkeit und Güte des Berechnungsverfahrens bei der Vereinfachung der Koeffizienten nicht verschlechtert, ergeben sich für den Geschwindigkeitsbeiwert

$$\zeta = 0,7828 + 983 \cdot \beta^{-2,533} - 1,192 \cdot n^{-0,7997} + 0,2827 \cdot D + 0,0996 \cdot \varphi + (472400 \cdot n^{-0,7997} - 112600 \cdot D - 40400 \cdot \varphi) \cdot \beta^{-3,872} \quad (6-9)$$

und für den Leistungsbeiwert

$$\lambda = 9,522 + 0,09319 \cdot \beta - 11,38 \cdot \varphi + 1,915 \cdot \mu_s + 1,109 \cdot \mu_F + 0,002808 \cdot \rho - (2,638 + 0,0496 \cdot \beta - 3,339 \cdot \varphi) \cdot n + (0,3465 + 0,00499 \cdot \beta - 0,3832 \cdot \varphi) \cdot n^2 \quad (6-10)$$

als Berechnungsformeln. Diese gelten gemäß den Vorgaben in Abschnitt 1 für die quasi-stationäre Förderung von kohäsionslosen, gut fließenden Schüttgütern mittlerer Korngröße und ohne Berücksichtigung sonstiger Effekte wie den Spalteinfluss.

Der erzielbare Volumenstrom sowie der erforderliche Leistungsbedarf eines stark geneigten Schneckenförderers können damit durch die Gleichungen (6-9) und (6-10) in Verbindung mit den jeweiligen analytischen Basisansätzen aus Abschnitt 4 – Gleichung (4-7) für den erzielbaren Volumenstrom und Gleichung (4-21) für den erforderlichen Leistungsbedarf – einfach und zuverlässig berechnet werden. Hinweise zur Anwendung der entwickelten Berechnungsverfahren werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

7 Anwendung des Dimensionierungs- und Auslegungsverfahrens

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die Entwicklung der Berechnungsverfahren erläutert wurde, steht im Folgenden deren Anwendung im Fokus. Um den Nutzer in der betrieblichen Praxis zu unterstützen, wird zunächst ein Vorgehen zur manuellen Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer vorgestellt. Anschließend wird auf das rechnergestützte Vorgehen mit dem am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München entwickelten Berechnungsprogramm „ScrewTech“ eingegangen.

7.1 Manuelle Berechnung

Das hier vorgestellte manuelle Berechnungsverfahren ist so konzipiert, dass das übliche Vorgehen bei der Projektierung von Fördergeräten abgebildet wird. Zusätzlich werden an dieser Stelle sinnvolle Grenzwerte angegeben, die den Nutzer bei der Anwendung des Berechnungsverfahrens unterstützen. Diese Grenzwerte basieren auf Erfahrungswerten und stellen lediglich Empfehlungen dar, die keinen Anspruch auf Ausschließlichkeit erheben.

Der Ablauf der Berechnung lässt sich, wie die Entwicklung des Berechnungsverfahrens selbst, in zwei konsekutive Teile gliedern: Die Bestimmung der Geometrie- und Betriebsparameter, um die geforderte Förderaufgabe zu lösen, und die Berechnung des dazu nötigen Leistungsbedarfs. Nach der Bestimmung des geforderten Volumenstroms wird zunächst eine mögliche Fördererbaugröße mit Schneckendurchmesser, Schneckenwellendurchmesser und Schneckenganghöhe ausgewählt. Anschließend ist eine sinnvolle Schneckendrehzahl für die Förderung vorauszuwählen. Aufbauend auf diese nun feststehenden Parameter werden der Füllungsgrad des Förderers und die axiale Fördergeschwindigkeit berechnet. Liegen diese nicht in einem sinnvollen Betriebsbereich, müssen in einem iterativen Prozess die Fördererbaugröße und die Schneckendrehzahl angepasst werden. Nach dieser Bestimmung der Geometrie- und Betriebsparameter folgt die Berechnung des zur Lösung der reinen Förderaufgabe benötigten Leistungsbedarfs. Dazu wird zunächst der Leis-

tungsbeiwert, der als fiktiver Reibungsbeiwert den Betriebszustand des Förderers abbildet, bestimmt. Abschließend kann der benötigte Leistungsbedarf aus den vorhandenen Parametern berechnet werden. Der Ablauf ist in Abbildung 7-1 schematisch dargestellt.

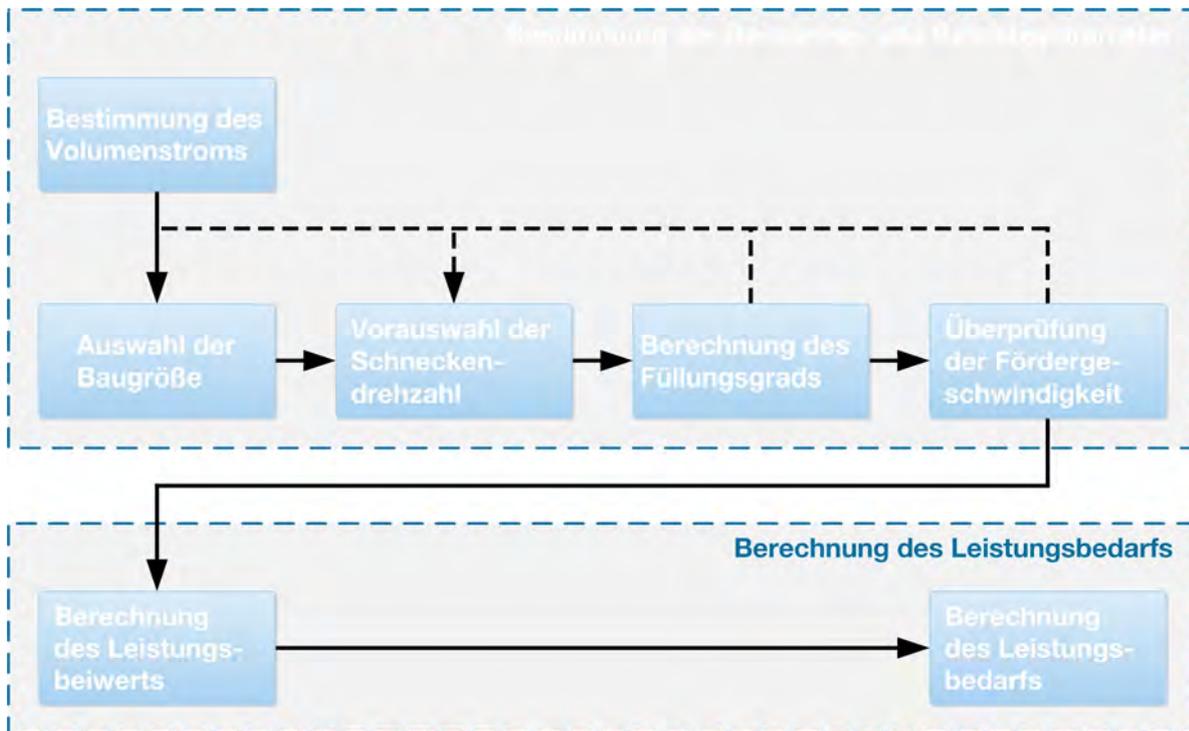


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufs

Bestimmung des Volumenstroms

Da im Zuge der Projektierung von Förderanlagen in der Regel der geförderte Volumenstrom die maßgebliche zu erfüllende Forderung ist, stellt dieser die Ausgangsgröße für die Baugrößendimensionierung dar. Falls statt des Volumenstroms, wie in der betrieblichen Praxis häufig der Fall, ein gewisser Massenstrom I_m gefordert wird, kann dieser mit Hilfe von Gleichung (7-1) in den zu fördernden Volumenstrom I_V umgerechnet werden:

$$I_V = \frac{I_m}{\rho} . \quad (7-1)$$

Die dazu benötigte Schüttdichte ρ ist im lockeren, unverdichteten Zustand zu bestimmen.

Auswahl der Baugröße

Die Baugröße des Schneckenförderers umfasst den Schneckendurchmesser, den Schneckenwellendurchmesser sowie die Schneckenganghöhe. Bei der Wahl von Schneckendurchmessers D und Schneckenwellendurchmessers d kann auf die in Teil 2 der Norm *DIN 15261* [DIN 15261-2] festgelegten Größen zurückgegriffen werden. Von der empfohlenen Schneckenganghöhe kann abgewichen werden. Sie sollte aber so gewählt werden, dass ein Verhältnis von Schneckenganghöhe S zu Schneckendurchmesser D von

$$\frac{S}{D} = 0,5 \dots 1,0 \quad (7-2)$$

folgt. Dabei ist zu beachten, dass Förderer mit größeren Schneckenganghöhe-Schneckendurchmesser-Verhältnissen tendenziell einen geringeren spezifischen Leistungsbedarf aufweisen, während Förderer mit kleineren Schneckenganghöhe-Schneckendurchmesser-Verhältnissen den Förderprozess unterstützen. Des Weiteren ist bei der Wahl des Schneckendurchmessers die Korngröße des Schüttgutes zu beachten. Bei stückigen Schüttgütern sollte dieser ca. 10-mal so groß wie die größte Kantenlänge des Partikels sein. Ist der Grobpartikelanteil gering, können auch kleinere Schneckendurchmesser gewählt werden.

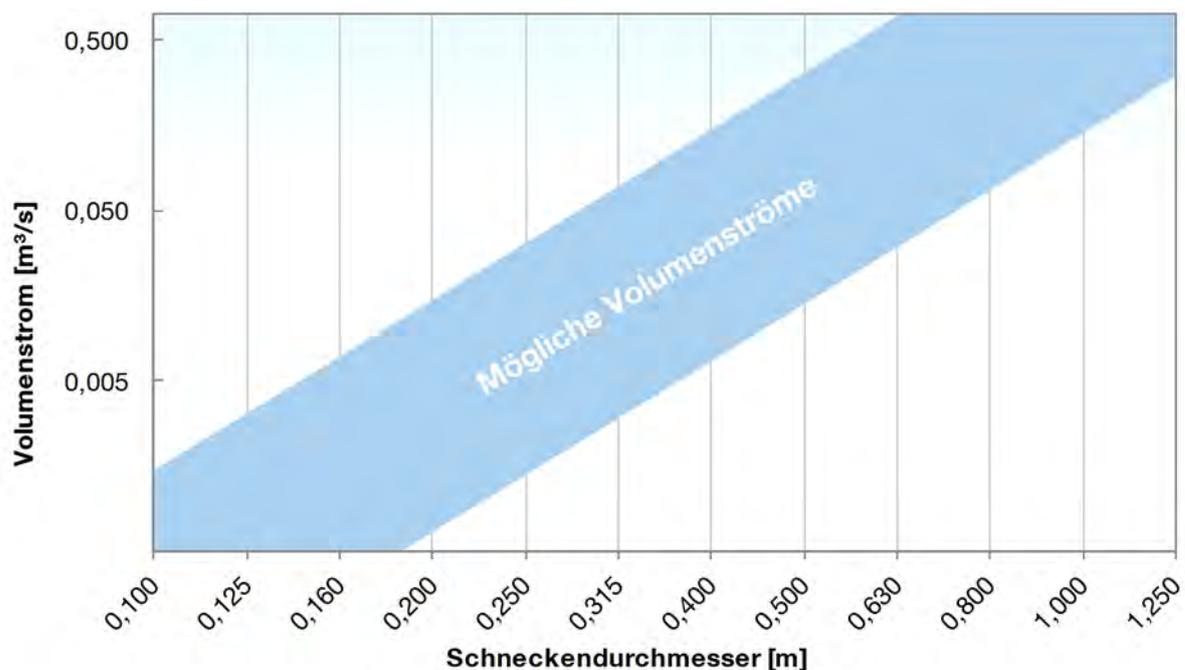


Abbildung 7-2: Empfohlene Schneckendurchmesser für mögliche Volumenströme

Zur Unterstützung bei der Auswahl des Schneckendurchmessers sind in Abbildung 7-2 die in Teil 2 der Norm *DIN 15261* festgelegten Schneckendurchmesser den möglichen erzielbaren Volumenströmen gegenübergestellt. Es ist zu beachten, dass dies lediglich einen Vorschlag zur Wahl eines Schneckendurchmessers darstellt. Es können auch Schneckendurchmesser außerhalb des markierten Bereichs für die Erreichung des geforderten Volumenstroms möglich sein und/oder insgesamt sogar eine bessere Wahl darstellen.

Vorauswahl der Schneckendrehzahl

Als nächster Schritt ist eine sinnvolle Schneckendrehzahl zu wählen. Da die Förderung im stark geneigten Schneckenförderer auf der Fliehkraft, die durch den Kontakt des Förderguts mit der rotierenden Schneckenwendel entsteht, und den daraus resultierenden Reibkräften zwischen Fördergut und den Bauteilen des Schneckenförderers basiert, ist eine Mindestdrehzahl erforderlich, damit eine Förderung eintritt. Diese ist bei der Wahl der Schneckendrehzahl zu berücksichtigen. Weiter sind die mechanischen Belastungen, welche durch die gewählte Schneckendrehzahl entstehen, zu berücksichtigen und gesondert zu berechnen.

Die endgültige Auswahl der Schneckendrehzahl erfolgt durch iterative Anpassung so, dass die in den folgenden Punkten genannten Empfehlungen bezüglich des Füllungsgrads und der axialen Fördergeschwindigkeit erfüllt werden.

Berechnung des Füllungsgrads

Der sich einstellende Füllungsgrad im Schneckenförderer berechnet sich in Abhängigkeit des zu fördernden Volumenstroms I_V sowie der feststehenden Schneckenneigung β mit den zuvor festgelegten Geometrie- und Betriebsparametern gemäß

$$\varphi = \frac{-\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \frac{16 \cdot (\Xi_7 + \Xi_{10} \cdot \beta^{\Xi_{11}}) \cdot I_V}{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot S \cdot n}}}{2 \cdot (\Xi_7 + \Xi_{10} \cdot \beta^{\Xi_{11}})} \quad (7-3)$$

mit

$$\Phi = \Xi_1 + \Xi_2 \cdot \beta^{\Xi_3} + \Xi_4 \cdot n^{\Xi_5} + \Xi_6 \cdot D + \Xi_8 \cdot n^{\Xi_5} \cdot \beta^{\Xi_{11}} + \Xi_9 \cdot D \cdot \beta^{\Xi_{11}} \quad (7-4)$$

Die darin enthaltenen Koeffizienten Ξ_k mit $k = 1, \dots, 11$ entsprechen den in Abschnitt 6.2 bestimmten Regressionskoeffizienten, die auf empirisch ermittelten Daten basieren und für gut fließende, klassierte Schüttgüter mittlerer Korngröße ermittelt wurden. Sie sind der Vollständigkeit halber in Tabelle 7-1 nochmals angegeben.

Tabelle 7-1: Koeffizienten zur Berechnung des Füllungsgrads

	Koeffizienten
Ξ_1	0,7828
Ξ_2	983
Ξ_3	-2,533
Ξ_4	-1,192 s ^{-0,7997}
Ξ_5	-0,7997
Ξ_6	0,2827 m ⁻¹
Ξ_7	0,0996
Ξ_8	472.400 s ^{-0,7997}
Ξ_9	-112.600 m ⁻¹
Ξ_{10}	40.400
Ξ_{11}	-3,872

Der mögliche Füllungsgrad im Schneckenförderer ist von den Fließ- und Reibungseigenschaften des Schüttgutes sowie weiteren Faktoren abhängig. Da mit steigendem Füllungsgrad der spezifische Leistungsbedarf sinkt, ist ein hoher Füllungsgrad anzustreben. Um jedoch Verstopfungen zu vermeiden, sollte der tatsächliche Füllungsgrad für

- gut fließende Schüttgüter nicht größer als $\varphi_{\max} = 0,70$,
- mäßig fließende, schwere und stückige Schüttgüter nicht größer als $\varphi_{\max} = 0,50$

sein. Für Schneckenneigungen kleiner 60° sind diese Werte um einen Prozentpunkt je Grad weiter abnehmender Schneckenneigung zu reduzieren. Falls sich ein höherer Wert ergibt, sollten eine größere Baugröße und/oder eine höhere Schnecken-drehzahl gewählt werden.

Überprüfung der Fördergeschwindigkeit

Als nächster Schritt wird noch überprüft, ob die aus den bisherigen Festlegungen resultierende axiale Fördergeschwindigkeit v_{ax} in einem zulässigen Rahmen liegt. Diese berechnet sich mit der Schneckenganghöhe S , der Schneckendrehzahl n , den Koeffizienten Ξ_7 , Ξ_{10} und Ξ_{11} aus Tabelle 7-1 sowie dem in Gleichung (7-4) bestimmten Beiwert Φ gemäß

$$v_{ax} = S \cdot n \cdot [\Phi + (\Xi_7 + \Xi_{10} \cdot \beta^{\Xi_{11}}) \cdot \varphi] , \quad (7-5)$$

Die axiale Fördergeschwindigkeit sollte aufgrund von Erfahrungswerten einen Betrag von $v_{ax} = 2,4$ m/s nicht überschreiten. Übersteigt die berechnete axiale Fördergeschwindigkeit diesen Wert, sollte die Schneckendrehzahl reduziert und eine größere Baugröße gewählt werden. Die Empfehlungen bezüglich des Füllungsgrads sind weiterhin zu beachten.

Berechnung des Leistungsbeiwerts

Nach abgeschlossener Festlegung der Geometrie- und Betriebsparameter, die bezüglich des geförderten Volumenstroms zur Erfüllung der Förderaufgabe notwendig sind, folgt die Berechnung des benötigten Leistungsbedarfs für die Förderung. Hierzu wird zunächst der dimensionslose Leistungsbeiwert λ , der als fiktiver Reibungsbeiwert alle durch Reibung verursachten Verlustleistungsanteile integriert, bestimmt. Er berechnet sich gemäß der in Abschnitt 6.3 entwickelten Gleichung

$$\lambda = \Theta_1 + \Theta_2 \cdot \beta + \Theta_3 \cdot \varphi + \Theta_4 \cdot \mu_S + \Theta_5 \cdot \mu_F + \Theta_6 \cdot \rho + (\Theta_7 + \Theta_8 \cdot \beta + \Theta_9 \cdot \varphi) \cdot n + (\Theta_{10} + \Theta_{11} \cdot \beta + \Theta_{12} \cdot \varphi) \cdot n^2 \quad (7-6)$$

aus den vorgegebenen oder bereits bestimmten Parametern Schneckenneigung β , Füllungsgrad φ , Schneckendrehzahl n , Schüttdichte ρ , sowie den Inneren und Äußeren Reibwerten μ_S und μ_F . Dabei wird davon ausgegangen, dass der Reibwert des Schüttguts gegen die Schneckenwendel und das Förderrohr gleich ist. Die auf empirisch ermittelten Daten basierenden und für gut fließende, klassierte Schüttgüter mittlerer Korngröße ermittelten Koeffizienten Θ_k , $k = 1, \dots, 12$, entsprechen den in Abschnitt 6.3 bestimmten Regressionskoeffizienten und sind in Tabelle 7-2 nochmals aufgeführt.

Tabelle 7-2: Koeffizienten zur Berechnung des Leistungsbeiwerts

	Koeffizienten
Θ_1	9,522
Θ_2	0,09319
Θ_3	-11,38
Θ_4	1,915
Θ_5	1,109
Θ_6	0,002808 m ³ kg ⁻¹
Θ_7	-2,638 s
Θ_8	-0,0496 s
Θ_9	3,339 s
Θ_{10}	0,3465 s ²
Θ_{11}	0,00499 s ²
Θ_{12}	-0,3832 s ²

Berechnung des Leistungsbedarfs

Abschließend kann der an der Schneckenwelle erforderliche Leistungsbedarf P_F zur Erfüllung der Förderaufgabe berechnet werden. Dieser folgt gemäß der in Abschnitt 4.3 entwickelten Gleichung

$$P_F = I_V \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\lambda \cdot \frac{D}{S} \cdot L + H \right) \quad (7-7)$$

aus dem oben bestimmten Leistungsbeiwert λ , dem geförderten Volumenstrom I_V , der Schüttdichte ρ sowie den Geometrieparametern Schneckendurchmesser D , Schneckenganghöhe S , Förderlänge L und Förderhöhe H . Der bestimmte Leistungsbedarf gilt nur für den Beharrungszustand und nur zur Lösung der reinen Förderaufgabe. Zusätzlicher Leistungsbedarf für den Betrieb des leeren Schneckenförderers oder beim Anfahren wird dabei nicht berücksichtigt und muss gegebenenfalls separat bestimmt werden.

Die hier beschriebene Vorgehensweise zur Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer bildet die Grundlage für ein neues viertes Blatt der Richtlinienreihe VDI 2330 „Schneckenförderer für Schüttgut“ des Vereins Deutscher Ingenieure e.V., das derzeit (Stand: Ende 2012) im zuständigen Fachausschuss „Schüttgut-Fördertechnik“ erarbeitet wird.

7.2 Rechnergestützte Berechnung – „ScrewTech“

Das Berechnungsprogramm „ScrewTech“ wurde bereits im Rahmen früherer Arbeiten am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (**fml**) der Technischen Universität München entwickelt und wird nun entsprechend der in dieser Arbeit entwickelten Ergebnisse um die Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer erweitert. Es erlaubt in der neuen Version somit die Berechnung von Schneckenförderern beliebiger Neigung gemäß den entwickelten anwendungsnahen, semi-empirischen Berechnungsverfahren. Zusätzlich ist die Anwendung des genormten und in der Praxis verbreiteten Berechnungsverfahrens für horizontale Schneckenförderer [DIN 15262] möglich.

Bei der Erstellung des Programms wurde von Anfang an auf eine einfache Handhabung, beispielsweise durch die Verwendung intuitiv zu bedienender, graphischer Benutzeroberflächen (GUI) geachtet. Zur Realisierung einer anwenderfreundlichen und praxisorientierten Gestaltung werden desweiteren neben der reinen Berechnung weitere Funktionalitäten angeboten [Ron-2004a]. Hier sind im Wesentlichen der Ausdruck oder Export der Berechnungsergebnisse zur Dokumentation oder Weiterverarbeitung in anderen Anwendungen sowie die Verwaltung von Geometrie- und Schüttgutparametern zu nennen. Durch die datenbankgestützte Verwaltung von Geometriedatensätzen, die jeweils einen Schneckendurchmesser, einen Schneckenwellendurchmesser und eine Schneckenganghöhe enthalten, kann der Anwender einfach auf eigene, häufig verwendete Geometrieparameter zurückgreifen. Zudem stehen die in Teil 2 der Norm *DIN 15261* festgelegten Werte schreibgeschützt zur Verwendung. In der Schüttgutverwaltung ist standardmäßig bereits eine Vielzahl an Schüttgütern mit den für die Berechnung relevanten Parametern angelegt. Über eine Eingabemaske kann der Anwender die Schüttgüter editieren, löschen oder neue Schüttgüter hinzufügen. Neben den für die Berechnung benötigten Parametern, wie Schüttdichte, Reibwerte oder anderen Leistungskenngrößen, können qualitativ auch weitere Eigenschaften zur eindeutigen Beschreibung angegeben werden.

Die eigentliche Berechnung der vorliegenden Förderaufgabe erfolgt getrennt nach den verschiedenen Neigungsbereichen, die sich an den einzelnen Berechnungsverfahren orientieren, in je einer Registerkarte. Angeboten werden die vier ähnlich aufgebauten Registerkarten

- DIN 15262,
- Horizontale und leicht geneigte Schneckenförderer ($0^\circ - 20^\circ$),
- Stark geneigte Schneckenförderer ($20^\circ - 90^\circ$),
- Vertikale Schneckenförderer (90°).

In diesen erfolgen die Eingabe der Parameter, die Baugrößendimensionierung sowie die Berechnung des erforderlichen Leistungsbedarfs. Zudem werden das aktuelle Design der Schneckenwendel und relevante, zur Charakterisierung des Förderzustands nötige Zwischenergebnisse angegeben. Die GUI für die Berechnung stark geneigter Schneckenförderer ist in Abbildung 7-3 als Entwurf dargestellt.

The screenshot shows the 'ScrewTech' software interface for calculating the power requirements of a steeply inclined screw conveyor. The interface is divided into several sections:

- Schüttgut (Material):** Includes a dropdown for 'Schüttgut' (set to '- Freie Parametereingabe -'), input fields for 'Schüttdichte' (0 kg/m³), 'Äußerer Reibwert' (0), 'Innerer Reibwert' (0), and 'Verschiebewiderstandsbeiwert (nach DIN)' (0). A 'Fließverhalten' section has radio buttons for 'Gut fließend' (selected) and 'Mäßig fließend'.
- Baugrößendimensionierung (Geometric parameters):** Features sliders for 'Schneckendurchmesser' (0 to 1,5 m), 'Schneckenwellendurchmesser' (0 to 1,0 m), 'Schneckenganghöhe' (0 to 1,5 m), 'Förderlänge' (0 to 100 m), and 'Förderhöhe' (0 to 100 m). It also includes input fields for 'Schneckenganghöhe zu Schneckendurchmesser' (0) and 'Schneckenneigung' (0°). Buttons for 'Geometrieparameter aus DIN 15261-2' and 'Eigene Geometrieparameter' are present.
- Betriebsparameter (Operating parameters):** Includes sliders for 'Schneckenrehzahl' (0 to 30 1/s), 'Füllungsgrad' (0 to 1), and 'Volumenstrom' (0 to 1 m³/s). It also has input fields for 'Umfangsgeschwindigkeit' (0 m/s), 'Fördergeschwindigkeit' (0 m/s), and 'Massenstrom' (0 kg/s).
- Leistungsbedarf (Power requirements):** Shows calculation fields for 'Leistungsbedarf' (0 W), 'Reibleistung' (0 W), 'Hubleistung' (0 W), and 'Spezifischer Leistungsbedarf' (0 Ws/kgm). It includes checkboxes for 'Gültigkeitsbereiche anzeigen' and 'Ständige Aktualisierung', and a 'Berechnung' button.

A logo in the top right corner indicates '20-90° STARK GENEIGT'.

Abbildung 7-3: Graphische Benutzeroberfläche zur Berechnung stark geneigter Schneckenförderer im Berechnungsprogramm „ScrewTech“

Als erster Schritt der Berechnung müssen das Schüttgut, für das die Berechnung durchgeführt wird, ausgewählt oder die nötigen Parameter, Schüttdichte sowie Innerer und Äußerer Reibwert, eingegeben werden. Nach Auswahl der Zielgröße in der Baugrößendimensionierung, also des Parameters, der in Abhängigkeit der anderen Eingabeparameter berechnet wird, mittels eines Optionsfelds, müssen alle übrigen Geometrie- und Betriebsparameter eingegeben werden. Aus diesen Parametern resultierende Werte, wie die Schneckenneigung oder das Verhältnis von Schnecken-ganghöhe zu Schneckendurchmesser, werden direkt berechnet und angezeigt. Die Geometrieparameter der Schneckenwendel können dabei aus der Geometrieverwaltung entnommen werden. Durch Betätigung des Buttons „Berechnung“ werden anschließend die gesuchte Zielgröße, der erforderliche Leistungsbedarf sowie zusätzlich die Größen Umfangsgeschwindigkeit der Schneckenwendel, axiale Fördergeschwindigkeit des Schüttguts und spezifischer Leistungsbedarf auf Basis der in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren bestimmt.

Nach dieser ersten Berechnung ist anhand von Schieberegler eine einfache und flexible Variation aller relevanten Geometrie- und Betriebsparameter möglich, wobei die Berechnungsergebnisse dabei ständig aktualisiert werden. Im Bereich der Schieberegler werden zudem die maximal möglichen Bereiche angezeigt, die noch zu einer gültigen Berechnung führen. So wird ausgeschlossen, dass beispielsweise bei einem geforderten Volumenstrom und gegebener Schneckendrehzahl ein Schneckendurchmesser gewählt werden kann, der einen nicht möglichen Füllungsgrad größer 100 % bedingen würde. Durch diese schnelle und unterstützte Berechnung von Förderzustand und Leistungsbedarf ist eine sehr gute Optimierung der Ergebnisse bezüglich der Geometrie- und Betriebsparameter möglich.

8 Zusammenfassung

Der einfache und robuste Aufbau, die niedrigen Anlagen- und Wartungskosten, die geringe Störanfälligkeit und im Besonderen die staubdichte Ausführung sind Vorteile, die für den stetigen Schüttguttransport häufig zum Einsatz von Schneckenförderern führen. Die Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit, aber auch bezüglich der Energieeffizienz und des Umweltschutzes sind für Schneckenförderer in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Um eine Überdimensionierung oder Ausfälle zu vermeiden, ist es deshalb wichtig, Schneckenförderer auf die geforderte Förderaufgabe hin passend zu dimensionieren und auszulegen. In der Praxis anerkannte und verbreitete Berechnungsverfahren, die über Normen oder Richtlinien einem breiten Anwenderkreis offen stehen, existieren hierzu aber bis heute nicht.

Entscheidende Größen bei der Projektierung von Schneckenförderern sind der erreichbare Volumenstrom bzw. die Geometrie- und Betriebsparameter, um einen geforderten Volumenstrom zu erreichen, und der dazu nötige Leistungsbedarf. Um diese Zielgrößen für den Nutzer einfach und praxistauglich aber dennoch sicher und zuverlässig vorhersagbar zu machen, werden in der vorliegenden Arbeit Berechnungsverfahren zur Bestimmung des erzielbaren Volumenstroms und des dazu notwendigen Leistungsbedarfs bei der quasi-stationären Förderung in stark geneigten Schneckenförderern entwickelt. Untersucht wird hierzu die Förderung von kohäsionslosem, gut fließendem Schüttgut in Schneckenförderern, die mit hohen Drehzahlen und Füllungsgraden im Neigungsbereich von 20° bis kleiner 90° betrieben werden.

Während für die Vorherbestimmung des Bewegungsverhaltens und damit des möglichen Volumenstroms aufwendige analytische Berechnungsverfahren zwar möglich und verfügbar sind, entzieht sich die Berechnung des gesamten dafür notwendigen Leistungsbedarfs einer analytischen Betrachtung. Zu vielfältig sind die Effekte, die zum Leistungsbedarf bei der Förderung im stark geneigten Schneckenförderer beitragen, als dass sie durch rein analytische Betrachtungen erfasst werden könnten. Wie für andere Betriebsbereiche von Schneckenförderern – horizontal bis leicht geneigt und vertikal – in früheren Untersuchungen bereits erfolgreich durchgeführt,

wird bei der Bestimmung der Berechnungsvorschriften deshalb ein semi-empirisches Verfahren eingesetzt, um die schwer erfassbaren Vorgänge innerhalb des Schneckenförderers in den Berechnungsverfahren mit der notwendigen Genauigkeit abzubilden.

Grundlage für ein semi-empirisches Verfahren ist ein analytischer Grundansatz, der um eine oder mehrere empirisch ermittelte, mehrdimensionale Kenngrößen erweitert wird. Die empirischen Kenngrößen bilden darin die analytisch nicht erfassbaren Einflüsse in Abhängigkeit von bekannten Parametern ab. Als Grundansatz für die beiden im Rahmen dieses Projekts betrachteten Zielgrößen Volumenstrom und Leistungsbedarf werden die aus der Norm *DIN 15262* bekannten und in der Praxis anerkannten Formeln verwendet und entsprechend den Erkenntnissen theoretischer Untersuchungen, die in früheren Projekten erarbeitet wurden, für die geänderten Anforderungen adaptiert. Zur Berechnung des erzielbaren Volumenstroms I_V ergibt sich so die Basisformel

$$I_V = A \cdot v_{ax} = \pi \cdot \frac{1}{4} (D^2 - d^2) \cdot \varphi \cdot S \cdot n \cdot \zeta \quad .$$

Der erforderliche Leistungsbedarf P_F kann gemäß

$$P_F = P_{Reib} + P_{Hub} = I_V \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\lambda \cdot \frac{D}{S} \cdot L + H \right)$$

berechnet werden. Neben den bekannten Geometrie-, Betriebs- und Schüttgutparametern sind in den Gleichungen somit nur die neu definierten empirischen Kennwerte Geschwindigkeitsbeiwert ζ und Leistungsbeiwert λ enthalten.

Um diese empirischen Kenngrößen zuverlässig für den gesamten Anwendungsbereich der Berechnungsverfahren bestimmen zu können, ist eine ausreichende Menge an Datensätzen für die Kenngrößen nötig. Diese notwendigen Datensätze werden mit drei verschiedenen Möglichkeiten erzeugt: Experimentelle Untersuchungen an einer Großversuchsanlage, Simulationen nach der Diskrete Elemente Methode und Berechnung mit numerischen Verfahren, die in Vorgängerprojekten erarbeitet wurden. Durch diese Aufspaltung der Datengewinnung auf verschiedene Methoden ist es möglich, alle Bereiche des Anwendungsbereichs mit ausreichend Datensätzen zu belegen.

Die gewonnenen Datensätze werden anschließend mit geeigneten Methoden eingehend untersucht. In einem ersten Schritt werden dazu die Einflüsse der einzelnen Parameter deskriptiv auf die Art des Einflusses hin ausgewertet. Aufbauend darauf können dann in einem zweiten Schritt diese Erkenntnisse in die Modelle für die empirischen Kenngrößen, die durch Regressionsrechnungen bestimmt werden, einfließen. Ergebnis sind einfache Formeln, die die Zusammenhänge der Einflussparameter auf die Kenngrößen beschreiben und damit eine zuverlässige Vorhersage der Werte ermöglichen. Auf diese Weise lassen sich für den Geschwindigkeitsbeiwert ζ die Gleichung

$$\zeta = 0,7828 + 983 \cdot \beta^{-2,533} - 1,192 \cdot n^{-0,7997} + 0,2827 \cdot D + 0,0996 \cdot \varphi \\ + (472400 \cdot n^{-0,7997} - 112600 \cdot D - 40400 \cdot \varphi) \cdot \beta^{-3,872}$$

und für den Leistungsbeiwert λ die Gleichung

$$\lambda = 9,522 + 0,09319 \cdot \beta - 11,38 \cdot \varphi + 1,915 \cdot \mu_s + 1,109 \cdot \mu_F + 0,002808 \cdot \rho \\ - (2,638 + 0,0496 \cdot \beta - 3,339 \cdot \varphi) \cdot n + (0,3465 + 0,00499 \cdot \beta - 0,3832 \cdot \varphi) \cdot n^2$$

ermitteln. Beide sind ausschließlich von den bereits bekannten Geometrie-, Betriebs- und Schüttgutparametern abhängig. Die ermittelten Berechnungsvorschriften wurden durch geeignete Methoden auf ihre Güte überprüft. Zusammen mit dem analytischen Grundansatz kann damit der erzielbare Volumenstrom und der dazu nötige Leistungsbedarf im stark geneigten Schneckenförderer einfach und dennoch mit der erforderlichen Genauigkeit berechnet werden.

Um die einfache Anwendung der Berechnungsverfahren darzulegen, wird das Vorgehen zur Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer abschließend detailliert erläutert. Dabei wird auch auf in der betrieblichen Praxis entstandene, sinnvolle Grenzen der einzelnen Parameter eingegangen, um Nutzer bei der Anwendung der Berechnungsverfahren in der Praxis zu unterstützen. Vorgestellt wird einerseits ein mögliches Vorgehen zur Berechnung per Hand, wie es in Normen und Richtlinien angewendet werden kann, und andererseits das rechnergestützte Vorgehen mit dem am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (**fml**) der Technischen Universität München entwickelten und mit den Ergebnissen dieser Arbeit erweiterten Berechnungstool „*ScrewTech*“.

Im Rahmen dieser Arbeit ist damit ein Berechnungsverfahren entstanden, das die einfache und praxistaugliche Dimensionierung und Auslegung von stark geneigten Schneckenförderern erlaubt. Zur Sicherstellung einer einfachen Zugänglichkeit für Anwender aus der Praxis, wird das Berechnungsverfahren derzeit (Stand: Ende 2012) in ein neues Blatt der Richtlinienreihe VDI 2330 „Schneckenförderer für Schüttgut“ des Vereins Deutscher Ingenieure e.V. umgesetzt.

Literaturverzeichnis

- [Abd-1989] Abd El Rahim, H.: Effect of Constructional Imperfections on the Internal Forces in Silo Walls. In: Bulk Solids Handling, Jg. 9 (1989), Nr. 2, S. 205–206.
- [Als-2002] Alspaugh, M.; Dewicki, G.; Quesenberry, E.: Computer Simulation Solves Conveyor Problems. In: Coal Age, Jg. 107 (2002), Nr. 1, S. 28–31.
- [Bah-1981] Bahke, E.: Größere Rohstoffströme fordern angepaßte Transport- und Umschlageinrichtungen. In: Fördern und Heben, Jg. 31 (1981), Nr. 10, S. 779–785.
- [Bar-1975] Bartosch, G.: Untersuchung zur Gutzuführung bei der Schrägförderung mittels Schneckenförderer. Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden, 1975.
- [Bić-2004] Bićanić, N.: Discrete Element Methods. In: Stein, E.; Borst, R. de; Hughes, T. J. R. (Hrsg): Encyclopedia of Computational Mechanics. Chichester: John Wiley & Sons, 2004, S. 311–337.
- [Blo-2008] Blomeyer, N.: Erweiterung und Verifikation von Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer für Schüttgut. Dissertation. München: Technische Universität München, 2008.
- [Böt-1963] Böttcher, S.: Eine allgemeine Analyse der Aufwärtsförderung eines Einzelkörpers in Schneckenförderern beliebiger Neigung. Tl. 1 - 3. In: VDI-Zeitschrift, Jg. 105 (1963), Nr. 14, S. 581-593; Nr. 16, S. 663-671; Nr. 18, S. 743-754.
- [Böt-1982] Böttcher, S.; Gabler, H.: Untersuchungen zur Antriebsleistungsbe-
rechnung senkrechter Schneckenförderer. In: Fördern und Heben, Jg. 32 (1982), Nr. 6, S. 447–452.
- [Böt-1987a] Böttcher, S.; Ertl, W.: Bewegungsanalyse eines Einzelkörpers im konischen Abschnitt steiler Schneckenförderer. In: Fördern und Heben, Jg. 37 (1987), Nr. 2, S. 84–91.
- [Böt-1987b] Böttcher, S.; Ertl, W.: Zur optimalen Auslegung des konischen Förderabschnitts bei senkrechten Schneckenförderern. In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik, Jg. 33 (1987), Nr. 7/8, S. 25–32.
- [Bou-1964] Bouse, L. F.; Schoenleber, L. G.; Porterfield, J. G.: Screw Conveyor Capacity and Castor Seed Damage. In: Transactions of the ASAE, Jg. 9 (1964), Nr. 2, S. 152-156, 158.

- [Bra-1969] Brandtner, F.: Die Förderschnecke in ihrer vielseitigen Anwendung. In: Aufbereitungstechnik, Jg. 10 (1969), Nr. 8, S. 424–437.
- [Bru-1969] Brusewitz, G. H.; Persson, S. P. E.: Parametric Study of Factors Influencing Screw-Conveyor Throughput and Power Requirement. In: Transactions of the ASAE, Jg. 12 (1969), Nr. 1, S. 51-54, 59-62.
- [Bru-1998] Bruck, K.: Parameter und Einsatzbereiche von Spiralförderern. In: Krause, F. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 1998. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1998.
- [Bur-1967] Burkhardt, G. J.: Effect of Pitch, Radial Clearance, Hopper Exposure and Head on Performance of Screw Conveyors. In: Transactions of the ASAE, Jg. 10 (1967), Nr. 5, S. 685–690.
- [Car-2010] Cargotec Sweden AB: Siwertell - High Capacity Ship Unloader, 2010. URL: <https://cargotec.picturepark.com/Website/?Action=downloadAsset&AssetId=33001> (Aufruf am 16.02.2011).
- [Cle-2000] Cleary, P. W.: DEM Simulation of Industrial Particle Flows: Case Studies of Dragline Excavators, Mixing in Tumblers and Centrifugal Mills. In: Powder Technology, Jg. 109 (2000), Nr. 1-3, S. 83–104.
- [Cun-1979] Cundall, P. A.; Strack, O. D. L.: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. In: Géotechnique, Jg. 29 (1979), Nr. 1, S. 47–65.
- [DEM-2011a] DEM Solutions Ltd.: EDEM 2.4 Programming Guide. Herausgegeben von: DEM Solutions Ltd. Edinburgh, 2011.
- [DEM-2011b] DEM Solutions Ltd.: EDEM 2.4 User Guide. Herausgegeben von: DEM Solutions Ltd. Edinburgh, 2011.
- [Dew-2003] Dewicki, G.: Bulk Material Handling and Processing - Numerical Techniques and Simulation of Granular Material. In: Bulk Solids Handling, Jg. 23 (2003), Nr. 2, S. 110–113.
- [DIN 15201-1] DIN 15201-1:1994-04: Stetigförderer - Teil 1: Benennungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 15261-1] DIN 15261-1:1986-02: Stetigförderer - Schneckenförderer - Teil 1: Anschlußmaße. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 15261-2] DIN 15261-2:1986-02: Stetigförderer - Schneckenförderer - Teil 2: Schneckenblatt. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 15262] DIN 15262:1983-01: Stetigförderer - Schneckenförderer für Schüttgut - Berechnungsgrundsätze. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.

- [DIN 66165-1] DIN 66165-1:1987-04: Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Teil 1: Grundlagen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 66165-2] DIN 66165-2:1987-04: Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Teil 2: Durchführung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN ISO 3435] DIN ISO 3435:1979-02: Klassifizierung und Symbolisierung von Schüttgütern. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [Dod-2009] Dodds-Ely, L.: Unloading Mechanically - Ship Unloaders Come into their Own. In: Dry Cargo International, o. Jg. (2009), Nr. 117, S. 55–74.
- [Dol-1968] Doll, H. K.: Schneckenförderer. In: Krausskopf, O. K. (Hrsg): Schüttgutförderer. Mainz: Krausskopf-Verlag, 1968, S. 165–187.
- [Eph-1957] Ephremidis, C. J.: Untersuchungen zum Fördervorgang beim waagrecht Schneckenförderer. Dissertation. Hannover: Technische Hochschule Hannover, 1957.
- [Ert-1988] Ertl, W.: Beitrag zur Berechnung der Förderung leicht fließender Schüttgüter in senkrechten Schneckenförderern. Dissertation. München: Technische Universität München, 1988.
- [Eur-2012] Eurostat - Statistisches Amt der Europäischen Union: Produktionsstatistiken - Prodcom Annual Sold (NACE Rev. 2.), 2012. URL: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/prodcom/data/database> (Aufruf am 15.12.2012).
- [Feh-1977] Fehlauer, M.; Gläser, M.; Hartung, L.: Messungen von Fördergeschwindigkeit und Förderquerschnitt an einem senkrechten Schneckenförderer mit großem Durchmesser. In: Agrartechnik, Jg. 27 (1977), Nr. 4, S. 171–174.
- [Feh-1978] Fehlauer, M.: Untersuchungen zur Senkrechtförderung landwirtschaftlicher Schütt- und Halmgüter mittels Schneckenförderer. Dissertation. Rostock: Universität Rostock, 1978.
- [Feh-1980a] Fehlauer, M.: Berechnungsvorschrift für Schneckenförderer zur Senkrechtförderung landwirtschaftlicher Schütt- und Halmgüter. In: Agrartechnik, Jg. 30 (1980), Nr. 1, S. 14–18.
- [Feh-1980b] Fehlauer, M.; Baganz, K.: EDV-gestützte Optimierung des Fördervorgangs in der senkrechten Förderschnecke. In: Agrartechnik, Jg. 30 (1980), Nr. 4, S. 167–168.
- [FEM 2.121] FEM 2.121:1999: Schneckenförderer für Schüttgut - Empfehlungen für die Berechnung. Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt: VDMA.

- [FEM 2.125] FEM 2.125:1989: Einfluss der Schüttguteigenschaften auf Gestaltung und Bemessung der horizontalen und leicht geneigten Schneckenförderer (bis etwa 20°). Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt: VDMA.
- [FEM 2.181] FEM 2.181:1989: Spezifische Schüttguteigenschaften bei der mechanischen Förderung. Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt: VDMA.
- [FEM 2.481] FEM 2.481:1997-07: Spezifische Schüttguteigenschaften bei der pneumatischen Förderung. Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt: VDMA.
- [FEM 2.581] FEM 2.581:1991-11: Schüttguteigenschaften. Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt: VDMA.
- [FEM 2.582] FEM 2.582:1991-11: Allgemeine Schüttguteigenschaften und ihre Darstellung in Kurzform. Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt: VDMA.
- [Fot-2002] Fottner, J.: Auslegung und wirtschaftlicher Einsatz von Hochleistungs-Schneckenförderern. Dissertation. München: Technische Universität München, 2002.
- [Gab-1981] Gabler, H.: Theoretische und experimentelle Untersuchung der Förderung in steilen und senkrechten Schneckenförderern. Dissertation. München: Technische Universität München, 1981.
- [Gho-1967] Ghosh, B. N.: Conveyance of Wet Parchment Coffee Beans by an Auger. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 12 (1967), Nr. 4, S. 274–280.
- [Gie-1987] Giering, O.; Seybold, H.: Konstruktive Ingenieurgeometrie. 3., wesentl. erw. Auflage. München, Wien: Carl Hanser, 1987.
- [Gre-1994] Greinwald, K.: Untersuchung der Förderung leicht fließender Schüttgüter im senkrechten Schneckenförderer unter Berücksichtigung der Zwischenlager. Dissertation. München: Technische Universität München, 1994.
- [Gri-1995] Grimmer, K.-J.; Weninger, J.: Einflüsse auf den Fördervorgang in Senkrecht-Schneckenförderern. In: Fördern und Heben, Jg. 45 (1995), Nr. 7, S. 506–510.
- [Grö-1999] Gröger, T.: Partikelmechanische Untersuchung zur senkrechten Schlauchgurtförderung. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1999.

- [Grö-2003] Gröger, T.: Grundlagen der Diskrete Elemente Methode (DEM) in der Schüttgutfördertechnik. In: Krause, F.; Günthner, W. A. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2003. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2003, S. 198–211.
- [Grö-2005] Gröger, T.; Katterfeld, A.: Kalibrierung von DEM-Simulationsmodellen für die Schüttgutfördertechnik. In: Krause, F.; Günthner, W. A. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2005. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2005, S. 134–145.
- [Gün-1997] Günthner, W. A.; Vollmann, A.: Hochleistungs-Schneckenförderer: Forschung, Entwicklung, Trends. In: Krause, F. (Hrsg): Tagungsband Kolloquium Stetigförderung von Schüttgütern. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1997, S. VII-1 - VII-10.
- [Gün-1998] Günthner, W. A.; Vollmann, A.: Schüttgutförderung in geneigten Schnecken: Experimentelle Untersuchungen. In: Krause, F. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 1998. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1998.
- [Gün-1999a] Günthner, W. A.; Fottner, J.: Hochleistungs-Schneckenförderer. In: Schüttgut, Jg. 5 (1999), Nr. 1, S. 36–37.
- [Gün-1999b] Günthner, W. A.; Vollmann, A.: Untersuchungsergebnisse zur Schüttgutförderung in geneigten Schnecken. In: Krause, F. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 1999. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1999.
- [Gün-2000a] Günthner, W. A.; Vollmann, A.: Auslegung von geneigten Schneckenförderern. In: Schüttgut, Jg. 6 (2000), Nr. 3, S. 259–263.
- [Gün-2000b] Günthner, W. A.; Vollmann, A.: Experimentelle Untersuchungen an schrägen Schneckenförderern. In: Schüttgut, Jg. 6 (2000), Nr. 2, S. 147–152.
- [Gün-2000c] Günthner, W. A.; Vollmann, A.: Untersuchung der Schüttgutförderung in geneigten Schneckenförderern. Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben GU 427/2-1; Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. Garching b. München, 2000.
- [Gün-2002a] Günthner, W. A.; Fottner, J.; Rong, O.: Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern für Schüttgut. München: Herbert Utz Verlag, 2002.

- [Gün-2002b] Günthner, W. A.; Fottner, J.; Rong, O.: Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern für Schüttgut. In: Günthner, W. A.; Krause, F. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2002. Garching b. München: Technische Universität München, 2002.
- [Gün-2002c] Günthner, W. A.; Fottner, J.; Rong, O.: Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern für Schüttgut. In: Schüttgut, Jg. 8 (2002), Nr. 5, S. 486–493.
- [Gün-2003] Günthner, W. A.; Rong, O.: Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern für Schüttgut. In: Aufbereitungstechnik, Jg. 44 (2003), Nr. 3, S. 40–56.
- [Gün-2004] Günthner, W. A.; Rong, O.; Blomeyer, N.: Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer. In: Günthner, W. A.; Krause, F. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2004. Garching b. München: Technische Universität München, 2004.
- [Gün-2006a] Günthner, W. A.; Blomeyer, N.; Rong, O.: Entwicklung von praxistauglichen Auslegungsverfahren für Schüttgut-Hochleistungs-Schneckenförderer. Forschungsbericht zum IGF-Projekt 14149 N/1 der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.; Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. Garching b. München, 2006.
- [Gün-2006b] Günthner, W. A.; Blomeyer, N.: Verifikation von Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer. In: Günthner, W. A.; Krause, F. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2006. Garching b. München: Technische Universität München, 2006.
- [Gün-2008] Günthner, W. A.; Blomeyer, N.: Dimensioning of Vertical Screw Conveyors. In: Bulk Solids Handling, Jg. 28 (2008), Nr. 1, S. 20–25.
- [Gün-2010] Günthner, W. A.; Rakitsch, S.: Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Hochleistungs-Schneckenförderer für Schüttgut. Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben GU 427/9-1; Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. Garching b. München, 2010.
- [Har-1962] Harries, G. O.: Application of a Radio-Isotope to the Determination of the Annular Thickness of Grain in an Auger Conveyor. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 7 (1962), Nr. 2, S. 65–67.
- [Häu-1984] Häußler, U.: Geschwindigkeits- und Spannungsfelder beim Entleeren von Silozellen. Dissertation. Karlsruhe: Technische Hochschule Karlsruhe, 1984.

- [Her-1882] Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. In: Journal für die reine und angewandte Mathematik, o.J. (1882), Nr. 92, S. 156–171.
- [Hin-1986] Hinkelmann, R.: Zur Auslegung schnelllaufender Vertikalförderanlagen für stetige Massengutförderung. Dissertation. Hannover: Universität Hannover, 1986.
- [Hof-2004] Hoffmann, K.; Krenn, E.; Stanker, G.: Fördertechnik 2 - Maschinensätze, Fördermittel, Tragkonstruktionen, Logistik. 5. Auflage. Wien, München: R. Oldenburg, 2004.
- [Hun-1987] Hunaeus, B.: Continuous Bulk Unloading of Barges. In: Bulk Solids Handling, Jg. 7 (1987), Nr. 5, S. 627–630.
- [ISO 7119] ISO 7119:1981-10: Continuous mechanical handling equipment for loose bulk materials - Screw conveyors - Design rules for drive power. International Organisation for Standardization. Berlin: Beuth.
- [Jen-1961] Jenike, A. W.: Gravity Flow of Bulk Solids; Utah Engineering Experiment Station, University of Utah. Salt Lake City, 1961.
- [Jen-1964] Jenike, A. W.: Storage and Flow of Solids; Utah Engineering Experiment Station, University of Utah. Salt Lake City, 1964.
- [Kat-2004] Katterfeld, A.; Krause, F.: Funktionsanalyse eines Rohrkettenförderers mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode (DEM). In: Günthner, W. A.; Krause, F. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2004. Garching b. München: Technische Universität München, 2004.
- [Kat-2005a] Katterfeld, A.; Franz, M.: Beitrag zur Simulation von Gutübergabestellen mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode. In: Krause, F.; Günthner, W. A. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2005. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2005, S. 230–248.
- [Kat-2005b] Katterfeld, A.: Funktionsanalyse von Rohrkettenförderern. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2005.
- [Kat-2006] Katterfeld, A.; Gröger, T.: Diskrete Elemente Simulationen und deren Verifizierung in der Schüttgut-Fördertechnik. In: Günthner, W. A.; Krause, F. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2006. Garching b. München: Technische Universität München, 2006.
- [Kön-1960] König, A.; Riemann, U.: Untersuchungen am senkrechten Schneckenförderer. In: Landtechnische Forschung, Jg. 10 (1960), Nr. 2, S. 45–52.

- [Kra-2003] Krause, F.; Katterfeld, A.: Anwendung der DEM in der Schüttgutförderertechnik. In: Krause, F.; Günthner, W. A. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutförderertechnik 2003. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2003, S. 214–234.
- [Kra-2005] Krause, F.; Minkin, A.: Funktionsanalyse von Wendelförderern mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode (DEM). In: Krause, F.; Günthner, W. A. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutförderertechnik 2005. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2005, S. 148–166.
- [Kuh-1992] Kuhn, M. R.; Mitchell, J. K.: Modelling of Soil Creep with the Discrete Element Method. In: Engineering Computations, Jg. 9 (1992), Nr. 2, S. 277–287.
- [Kun-1983] Kunstmann, U.: Stetige Fördermittel zum steilen Aufwärtstransport von Schüttgütern. In: Maschinenmarkt, Jg. 89 (1983), Nr. 37, S. 794–797.
- [Lan-1983] Landahl, H.: Berechnung der Druckverhältnisse in zylindrischen Silozellen mit nichtlinearem Stoffgesetz für den Füllzustand und beim Entleerungsbeginn. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983.
- [Lei-1999a] Leitner, J.: Untersuchungen zum Spalteinfluß und Einlauf des Förderguts in senkrechten und steil geneigten Schneckenförderern. Dissertation. Leoben: Montanuniversität Leoben, 1999.
- [Lei-1999b] Leitner, J.; Kessler, F.: Zur Berechnung des Füllgrads und des Massenstroms von Senkrecht-Schneckenförderern. In: Schüttgut, Jg. 5 (1999), Nr. 4, S. 537–543.
- [Lun-2002] Lungfiel, A.: Ermittlung von Belastungsgrößen mittels der Diskrete-Elemente-Methode für die Auslegung von Sturzmühlen. Dissertation. Freiberg: Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2002.
- [Mag-2005] Magnus, K.; Müller-Slany, H. H.: Grundlagen der Technischen Mechanik. 7., durchges. und erg. Auflage. Wiesbaden: B. G. Teubner, 2005.
- [Min-1949] Mindlin, R. D.: Compliance of Elastic Bodies in Contact. In: Journal of Applied Mechanics, Jg. 16 (1949), Nr. 3, S. 259–268.
- [Min-2005] Minkin, A.: Funktionsanalyse von Wendelförderern. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2005.
- [Mol-1985] Molerus, O.: Schüttgutmechanik - Grundlagen und Anwendungen in der Verfahrenstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer, 1985.

- [Mus-2010] Mustoe, G. G. W.; Hudson, C.; Reicks, A.: Simulation of Mixing and Segregation Phenomena in Industrial Material Flows with Discrete Element Methods. In: Proceedings of the BulkSolids Europe 2010. Glasgow: Vogel Business Media, 2010.
- [Nie-1964] Nier, R.: Experimentelle Untersuchungen der Fördervorgänge und Leistungen am senkrechten und schrägen Schneckenförderer. Dissertation. Kiel: Universität Kiel, 1964.
- [Nil-1971] Nilsson, L.-G.: On the Vertical Screw Conveyor for Non-Cohesive Bulk Materials. Herausgegeben von: Acta polytechnica scandinavica. Mechanical Engineering Series No. 64. Stockholm, 1971.
- [O'C-1961] O'Callaghan, J. R.; Fallon, T. A.: Performance of Vertical Screw Conveyors. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 6 (1961), Nr. 2, S. 87–97.
- [O'C-1962] O'Callaghan, J. R.: Some Experiments on the Intake Process in a Vertical Screw Conveyor. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 7 (1962), Nr. 4, S. 282–287.
- [Pah-1993] Pahl, M. H.; Ernst, R.; Wilms, H.: Lagern, Fördern und Dosieren von Schüttgütern. 2., überarb. Auflage. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1993.
- [Pea-1967] Peart, R. M.; McKenzie, B. A.; Herum, F. L.: Dimensional Standards and Performance-Test Procedures for Screw Conveyors. In: Transactions of the ASAE, Jg. 10 (1967), Nr. 5, S. 667–669.
- [Rad-1972] Rademacher, F. J. C.: De vertikale Schroeftransporteur. Dissertation. Enschede: Technische Hogeschool Twente, 1972.
- [Rad-1973] Rademacher, F. J. C.: Charakteristische Eigenschaften von Senkrecht-Schneckenförderern. In: Fördern und Heben, Jg. 23 (1973), Nr. 15, S. 825–831.
- [Rad-1974] Rademacher, F. J. C.: Some Aspects of the Characteristics of Vertical Screw Conveyors for Granular Materials. In: Powder Technology, Jg. 15 (1974), Nr. 9, S. 71–89.
- [Rad-1977] Rademacher, F. J. C.: Are Inclined Screw-Blades for Vertical Auger advantageous? In: Transactions of the ASAE, Jg. 20 (1977), Nr. 6, S. 1142–1150.
- [Rad-1978] Rademacher, F. J. C.: Accurate Measurement of the Kinetic Coefficient of Friction between a Surface and Granular Mass. In: Powder Technology, Jg. 19 (1978), Nr. 1, S. 65–77.

- [Rad-1979] Rademacher, F. J. C.: On the Characteristics of Vertical Screw Conveyors for Free Flowing Bulk Material. Herausgegeben von: Verein deutscher Ingenieure e.V. VDI-Forschungsheft 592. Düsseldorf, 1979.
- [Rad-1981a] Rademacher, F. J. C.: On Possible Flow Back in Vertical Screw Conveyors for Cohesionless Granular Materials. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 26 (1981), Nr. 3, S. 225–250.
- [Rad-1981b] Rademacher, F. J. C.: On Seed Damage in Grain Augers. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 26 (1981), Nr. 1, S. 87–96.
- [Ran-1857] Rankine, W. J. M.: On the Stability of Loose Earth. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Jg. 147 (1857), S. 9–27.
- [Reg-1959] Regan, W. M.; Henderson, S. M.: Performance Characteristics of Inclined Screw Conveyors. In: Agricultural Engineering, Jg. 40 (1959), Nr. 1, S. 450–452.
- [Reh-1962] Rehkugler, G. E.; Boyd, L. L.: Dimensional Analysis of Auger Conveyor Operation. In: Transactions of the ASAE, Jg. 5 (1962), S. 98–102.
- [Reh-1967] Rehkugler, G. E.: Screw Conveyors - State of the Art. In: Transactions of the ASAE, Jg. 10 (1967), Nr. 5, S. 615-618 und 621.
- [Rei-2010] Reisener, R.: Senkrechte Schneckenförderer. In: Mühle + Mischfutter, Jg. 147 (2010), Nr. 8, S. 245–249.
- [Rei-2011] Reisener, R.: Praktische Berechnung von ansteigenden Förder-schnecken. In: Mühle + Mischfutter, Jg. 148 (2011), Nr. 24, S. 815–817.
- [Rie-1959] Riemann, U.: Untersuchungen am senkrechten Schneckenförderer. Dissertation. Kiel: Universität Kiel, 1959.
- [Rob-1994] Roberts, A. W.: Advances in the Design of Mechanical Conveyors. In: Bulk Solids Handling, Jg. 14 (1994), Nr. 2, S. 255–281.
- [Rob-2001] Roberts, A. W.: Design Considerations and Performance Evaluation of Screw Conveyors. In: Proceedings of the BELTCON 11. Johannesburg: Conveyor manufacturers Association of SA, 2001.
- [Rob-2002] Roberts, A. W.: Design and Performance Criteria for Screw Conveyors in Bulk Solids Operation. In: Bulk Solids Handling, Jg. 22 (2002), Nr. 6, S. 436–444.

- [Ron-2004a] Rong, O.: Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer. Dissertation. München: Technische Universität München, 2004.
- [Ron-2004b] Rong, O.; Günthner, W. A.: Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer. Tl. 1 & 2. In: Schüttgut, Jg. 10 (2004), Nr. 4, S. 278-286; Nr. 5, S. 360-368.
- [Ros-1958] Roscoe, K. H.; Schofield, A. N.; Wroth, C. P.: On the Yielding of Soils. In: Géotechnique, Jg. 8 (1958), Nr. 1, S. 22–53.
- [Run-1986] Runesson, K.; Nilsson, L.-G.: Finite Element Modelling of the Gravitational Flow of a Granular Material. In: Bulk Solids Handling, Jg. 6 (1986), Nr. 5, S. 877–884.
- [San-1971] Sands, L. D.; Hall, G. E.: Damage to Shelled Corn During Transport in a Screw Conveyor. In: Transactions of the ASAE, Jg. 14 (1971), Nr. 3, S. 584–585, 589.
- [Sch-1968] Schwedes, J.: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern. Weinheim: Verlag Chemie, 1968.
- [Sch-1982] Schwedes, J.: Entwicklung der Schüttguttechnik seit 1974. In: Aufbereitungstechnik, Jg. 23 (1982), Nr. 8, S. 403–410.
- [Sch-1987] Schumacher, W.: Zum Förderverhalten von Bunkerabzugsschnecken mit Vollblattwendeln. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1987.
- [Sch-1989a] Schulze, D.; Schwedes, J.: Der Fördervorgang in biegsamen Schneckenförderern. In: Fördern und Heben, Jg. 39 (1989), Nr. 3, S. 231–235.
- [Sch-1989b] Schmidt, L. C.; Wu, Y. H.: Prediction of Dynamic Wall Pressures on Silos. In: Bulk Solids Handling, Jg. 9 (1989), Nr. 3, S. 333–338.
- [Sch-2003a] Schulze, D.: Anwendungen der Schüttguttechnik in der Lebensmittelindustrie. In: Schüttgut, Spezial Lebensmitteltechnik (2003), S. 10–14.
- [Sch-2003b] Schlauri, M.: Silo- und Fördertechnik in der Getreideverarbeitung. In: Schüttgut, Spezial Lebensmitteltechnik (2003), S. 15–16.
- [Sch-2009] Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter - Fließigenschaften und Handhabung. 2., bearb. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [Sch-2010] Schmidt, P.: Steinbeis-Forschungszentrum ancoreStatistics. Email vom 16.09.2010.

- [Shi-2002] Shimizu, Y.: Three-Dimensional DEM Simulation of Conveying Granular Materials by Horizontal Screw. In: Cook, B. K.; Jensen, R. P. (Hrsg): Discrete Element Methods: Numerical Modeling of Discontinua (Proceedings of the Third International Conference on Discrete Element Methods; September 23 - 25, 2002, Santa Fe, New Mexico, USA). Reston: American Society of Civil Engineers, 2002, S. 415–422.
- [Sin-1959] Sinha, G. L.: Untersuchungen zum Fördervorgang beim senkrechten Schneckenförderer. Dissertation. Hannover: Technische Hochschule Hannover, 1959.
- [Spi-1959] Spiwakowski, A. O.; Djatschkow, W. K.: Förderanlagen - Transport- und Verladeeinrichtungen für Massengüter. Berlin: VEB Verlag Technik, 1959.
- [Sta-1986] Stadler, R.: Stationäres, schnelles Fließen von dicht gepackten trockenen und feuchten Schüttgütern. Dissertation. Karlsruhe: Technische Hochschule Karlsruhe, 1986.
- [Sta-1994] Stahl, H.: Beitrag zur Förderung leicht fließender, feinkörniger Schüttgüter im senkrechten Schneckenförderer unter Spalteinfluß. Dissertation. München: Technische Universität München, 1994.
- [Ste-1962] Stevens, G. N.: Performance Tests on Experimental Auger Conveyors. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 7 (1962), Nr. 1, S. 47–60.
- [Ste-1966] Stevens, G. N.: Aspects of the Performance of Small Auger Grain Conveyors. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 11 (1966), Nr. 1, S. 11–18.
- [Ste-1968] Stevens, G. N.: Handling Groundnuts with an Auger Conveyor. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 13 (1968), Nr. 1, S. 44–48.
- [Ste-1971] Stein, D.: Untersuchungen an Steil- und Senkrechtschneckenförderern für den Transport von Futtermitteln. Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden, 1971.
- [Sti-2009] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1. 3., vollst. neu bearb. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [Sto-1987] Stosnach, K.: Schiffsentlader nach dem Screw-Conveyor-Prinzip bieten gute Restentladung. In: Fördern und Heben, Jg. 37 (1987), Nr. 6, S. 395–398.
- [Str-1968] Stroppel, A.: Spannungszustände in lagernden körnigen Haufwerken in der Nähe einer ebenen Wand. Herausgegeben von: Verein deutscher Ingenieure e.V. VDI-Forschungsheft 525. Düsseldorf, 1968.

- [Tav-2007] Tavarez, F. A.; Plesha, M. E.: Discrete element method for modelling solid and particulate materials. In: International Journal for Numerical Methods in Engineering, Jg. 70 (2007), Nr. 4, S. 379–404.
- [Ted-1974] Tedder, W.: Neue Erkenntnisse zur Feststoff-Förderung in senkrechten Schneckenförderern. In: Fördern und Heben, Jg. 24 (1974), Nr. 12, S. 1147–1150.
- [Tho-1992] Thornton, C.: Applications of DEM to Process Engineering Problems. In: Engineering Computations, Jg. 9 (1992), Nr. 2, S. 289–297.
- [Thü-1958] Thüsing, H.: Die Förderschnecke als stetiger Senkrechtförderer für Schütt- und Stückgut. In: Fördern und Heben, Jg. 8 (1958), Nr. 5, S. 302–304.
- [Til-2010] Tilke, C.; Rakitsch, S.; Günthner, W. A.: Specific Energy Consumption of Ship Unloaders - Comparison of Different Types of Equipment. In: Bulk Solids Handling, Jg. 30 (2010), Nr. 5, S. 250–254.
- [Tom-2003] Tomas, J.; Tykhoniuk, R.: DEM Simulation des stationären und beginnenden Fließens von kohäsiven Schüttgütern. In: Krause, F.; Günthner, W. A. (Hrsg): Tagungsband Fachtagung Schüttgutförderertechnik 2003. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2003, S. 235–244.
- [VDI 2330] VDI 2330:1993-02: Schneckenförderer. Verein deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth.
- [VDI 2330-2] VDI 2330-2:2011-12: Schneckenförderer für Schüttgut - Blatt 2: Auslegung von horizontalen und leicht geneigten Schneckenförderern (Entwurf). Verein deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth.
- [VDI 2330-3] VDI 2330-3:2011-12: Schneckenförderer für Schüttgut - Blatt 3: Auslegung von vertikalen Schneckenförderern (Entwurf). Verein deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth.
- [Ven-2010] Venter, J.: Scandinavian Engineering Expertise. In: Dry Cargo International, o. Jg. (2010), Nr. 125, S. 77–80.
- [Vie-1960] Vierling, A.; Sinha, G. L.: Untersuchungen zum Fördervorgang beim senkrechten Schneckenförderer. In: Fördern und Heben, Jg. 10 (1960), Nr. 8, S. 587–592.
- [Vit-1511] Vitruvius Pollio, M.: De architectura. Herausgegeben von: Giocondo, G. Venedig: Giovanni Tacuino, 1511. URL: <http://www.math.nyu.edu/~crosres/Archimedes/Screw/ScrewEngraving.html> (Aufruf am 15.02.2011).

- [Vol-2000] Vollmann, A.: Untersuchung der Schüttgutförderung in geneigten Schneckenförderern. Dissertation. München: Technische Universität München, 2000.
- [Wei-1990] Weidner, J.: Vergleich von Stoffgesetzen granularer Schüttgüter zur Silodruckermittlung. Dissertation. Karlsruhe: Technische Hochschule Karlsruhe, 1990.
- [Wei-2009] Weiler, R.; Ripp, M.; Dau, G.; Ripperger, S.: Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode zur Simulation des Verhaltens von Schüttgütern. In: Chemie Ingenieur Technik, Jg. 81 (2009), Nr. 6, S. 749–757.
- [Wil-1969] Wilkes, R. S.: Developing Augers to Convey Forage: A Progress Report. In: Agricultural Engineering, Jg. 50 (1969), Nr. 2, S. 82 und 95.
- [Zho-2002] Zhou, Y. C.; Xu, B. H.; Yu, A. B.; Zulli, P.: An Experimental and Numerical Study of the Angle of Repose of Coarse Spheres. In: Powder Technology, Jg. 125 (2002), Nr. 1, S. 45–54.

Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Arbeit entstanden in den Jahren 2008 bis 2011 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten Studienarbeiten, deren Inhalte und Ergebnisse in Teilen in die Arbeit eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden, die im Rahmen von Studienarbeiten sowie als studentische oder wissenschaftliche Hilfskräfte die Arbeit vielfältig unterstützt haben, insbesondere Herrn Paul Schmidt, für ihr Engagement.

- [fml-2008] Fandrey, L.: Konstruktion einer Schutzvorrichtung für eine verstellbare Schüttgutförderanlage. Semesterarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch S. Rakitsch. Abgegeben im Oktober 2008.
- [fml-2010a] Lehming, F.: Konstruktion und Dokumentation der CAD-Datenbasis beim Umbau einer Großversuchsanlage für Schüttgut. Semesterarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch S. Rakitsch. Abgegeben im März 2010.
- [fml-2010b] Dan, Y.: Konzeption der Softwarearchitektur für ein Auslegungsprogramm für Schneckenförderer. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch S. Rakitsch. Abgegeben im September 2010.
- [fml-2010c] Barth, A.; Nachtigall, H.: Konstruktion und Auslegung eines Massenströmmessgeräts. Team-Semesterarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch S. Rakitsch. Abgegeben im Oktober 2010.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Wert aller in der Europäischen Union produzierten Hebezeuge und Fördermittel sowie der produzierten Stetigförderer und deren Anteil daran [Eur-2012]	1
Abbildung 1-2:	Schematische Darstellung eines Schneckenförderers für Schüttgut	2
Abbildung 1-3:	Archimedische Wasserschraube nach Beschreibung des Vitruvius [Vit-1511]	5
Abbildung 1-4:	Schiffsentlader mit Schneckenförderern beim Massengutumschlag	6
Abbildung 1-5:	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit zur Entwicklung von Dimensionierungs- und Auslegungsverfahren für stark geneigte Schneckenförderer	11
Abbildung 2-1:	Darstellung der verschiedenen Betrachtungsweisen für Schüttgut im vertikalen Schneckenförderer (Eigene Darstellung in Anlehnung an [Fot-2002])	17
Abbildung 3-1:	Funktionsprinzip eines Translationsschergeräts nach <i>Jenike</i> (Eigene Darstellung in Anlehnung an [Jen-1964])	32
Abbildung 3-2:	Gleitwinkel von Schüttgut auf einer geneigten Ebene	33
Abbildung 3-3:	Spannungen an einem Schüttgutelement und einem daraus herausgeschnittenen dreieckigen Volumenelement	34
Abbildung 3-4:	Mohrscher Spannungskreis für einen ebenen Spannungszustand	35
Abbildung 3-5:	Mohrscher Spannungskreis für einen räumlichen Spannungszustand	36
Abbildung 3-6:	Fließkriterium für kohäsionslose Schüttgüter nach Mohr-Coulomb	37
Abbildung 3-7:	Räumlicher Grenzspannungszustand für kohäsionsloses Schüttgut	38
Abbildung 3-8:	Aktiver und passiver Grenzzustand von Schüttgut	39
Abbildung 3-9:	Aktiver und Passiver Grenzzustand im Mohrschen Spannungskreis	41
Abbildung 3-10:	Geschwindigkeitsprofil von Schüttgut zwischen schnell bewegten Zylindern	42
Abbildung 3-11:	Wandfließort und Mohrscher Spannungskreis	44
Abbildung 3-12:	Geometrische Darstellung der Schneckenwendel als Verschraubung einer Strecke um eine Achse (Eigene Darstellung nach [Vol-2000])	45

Abbildung 3-13: Qualitative Einteilung der Förderung im Schneckenförderer in die Bereiche I, II und III in Abhängigkeit von Schnecken-drehzahl und Schneckenneigung (in Anlehnung an [Vol-2000])	48
Abbildung 3-14: Bei der Betrachtung eines Einzelkörpers benutztes t,n,b -Koordinatensystem eines beliebig geneigten Schneckenförderers	51
Abbildung 3-15: Kräftegleichgewicht (links) und Geschwindigkeitsdreieck (rechts) für einen Einzelkörper in der t,b -Ebene	53
Abbildung 3-16: In Sektorelemente aufgeteiltes Schüttgut im Schneckenförderer sowie freigeschnittenes differentielles Volumenelement (nach [Vol-2000])	57
Abbildung 3-17: Darstellung der möglichen Füllungskonfigurationen (nach [Vol-2000])	59
Abbildung 3-18: Diagramm zur Dimensionierung vertikaler Schneckenförderer [Ron-2004a]	71
Abbildung 4-1: Verwendete Geometrieparameter des Schneckenförderers	74
Abbildung 4-2: Geschwindigkeitskomponenten des Schüttguts im stark geneigten Schneckenförderer	76
Abbildung 5-1: Versuchsanlage zur Untersuchung stark geneigter Schneckenförderer	84
Abbildung 5-2: Anordnung der Fördertechnikkomponenten in der Versuchsanlage	86
Abbildung 5-3: Magnetischer Neigungssensor am geneigten Schneckenförderer	88
Abbildung 5-4: Anordnung der Wägezellen zur Bestimmung des Füllungsgrades	89
Abbildung 5-5: Wägeeinrichtung zur Bestimmung des geförderten Volumenstroms	90
Abbildung 5-6: Vorgehen zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen	96
Abbildung 5-7: Ablaufdiagramm einer DEM-Simulation (nach [Wei-2009, DEM-2011a])	99
Abbildung 5-8: Kontaktmodell zweier Partikel nach <i>Hertz</i> und <i>Mindlin</i> (nach [Tav-2007])	100
Abbildung 5-9: Ergebnis der Korngrößenanalyse für das PET-Recyclat	102
Abbildung 5-10: Partikel des realen PET-Recyclats, CAD-Modell eines Partikels und das für die Simulation verwendete Modell aus Hüllkontur und Kugelsphären	102
Abbildung 5-11: Simulationsmodelle für die Schüttgutkalibrierung: Schüttdichte, Gleitwinkel, Böschungswinkel	104

Abbildung 5-12: CAD-Modell der Schneckenwendel und Modell des Schneckenförderers in der DEM-Umgebung	106
Abbildung 5-13: Baugrößen des simulierten Schneckenförderers	107
Abbildung 5-14: Ablauf der durchgeführten DEM-Simulationen	110
Abbildung 5-15: Verteilung der Partikel im ruhenden Schneckenförderer (links) und bei rotierender, geneigter Schneckenwendel (rechts) bei jeweils gleichem Füllungsgrad	111
Abbildung 5-16: Simulation der Förderung von Schüttgut im vertikalen und leicht geneigten Schneckenförderer mit DEM	114
Abbildung 5-17: Ablaufdiagramm des Programms zur Berechnung des Volumenstroms stark geneigter Schneckenförderer (nach [Vol-2000])	116
Abbildung 6-1: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Geschwindigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von Schneckendrehzahl und Schneckenneigung	124
Abbildung 6-2: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Geschwindigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von Schneckendurchmesser und Füllungsgrad	125
Abbildung 6-3: Modellanpassung für die ausschließlich auf der deskriptiven Analyse entstandenen Regressionsmodelle für den Geschwindigkeitsbeiwert	126
Abbildung 6-4: Einfluss der Schneckenneigung auf die Koeffizienten des Regressionsmodells	127
Abbildung 6-5: Globale Modellanpassung für den Geschwindigkeitsbeiwert	130
Abbildung 6-6: Geschätzte Dichtefunktion des empirisch ermittelten Geschwindigkeitsbeiwerts	130
Abbildung 6-7: Modellanpassung nach Kategorien für den Geschwindigkeitsbeiwert	131
Abbildung 6-8: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Leistungsbeiwert in Abhängigkeit von Schneckendrehzahl und Schneckenneigung	134
Abbildung 6-9: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Leistungsbeiwert in Abhängigkeit von Schneckendurchmesser und Füllungsgrad	134
Abbildung 6-10: Ergebnisse der lokal gewichteten Regression für den Leistungsbeiwert in Abhängigkeit der Schüttgutparameter	135
Abbildung 6-11: Modellanpassung für die ausschließlich auf der deskriptiven Analyse entstandenen Regressionsmodelle für den Leistungsbeiwert	136
Abbildung 6-12: Globale Modellanpassung für den Leistungsbeiwert	139

Abbildung 6-13: Geschätzte Dichtefunktion des empirisch ermittelten Leistungsbeiwerts	139
Abbildung 6-14: Modellanpassung nach Kategorien für den Leistungsbeiwert	140
Abbildung 7-1: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufs	144
Abbildung 7-2: Empfohlene Schneckendurchmesser für mögliche Volumenströme	145
Abbildung 7-3: Graphische Benutzeroberfläche zur Berechnung stark geneigter Schneckenförderer im Berechnungsprogramm „ScrewTech“	151

Bildnachweis

Alle Abbildungen wurden, sofern sie nicht anders gekennzeichnet sind, vom Autor selbst erstellt oder aufgenommen beziehungsweise entstammen dem Archiv des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (**fml**) der Technischen Universität München.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Vergleich der Eigenschaften von Festkörper, Flüssigkeit und Schüttgut	31
Tabelle 3-2:	Überblick der wichtigsten Ergebnisse der Analyse der Einzelkörperförderung im beliebig geneigten Schneckenförderer (nach [Böt-1963])	55
Tabelle 3-3:	Geometrieparameter und zugeordnete empfohlene maximale Schneckendrehzahlen nach <i>DIN 15261 Teil 2</i> [DIN 15261-2]	66
Tabelle 3-4:	Bestimmung von horizontalem Schüttgutbeiwert und der Multiplikatoren zur Bestimmung des Geschwindigkeitsbeiwerts für den Leistungsbedarf [Blo-2008]	70
Tabelle 5-1:	Technische Daten der Schneckenförderer der Versuchsanlage	85
Tabelle 5-2:	Vorliegende Parameter für jeden durchgeführten Versuch	94
Tabelle 5-3:	Gewählte Parameterstufen bei den experimentellen Untersuchungen	94
Tabelle 5-4:	Material- und Kontaktparameter für das Hertz-Mindlin Kontaktmodell	100
Tabelle 5-5:	Materialparameter des simulierten PET-Recyclats nach der Kalibrierung	104
Tabelle 5-6:	Kontaktparameter des simulierten PET-Recyclats nach der Kalibrierung	104
Tabelle 5-7:	Schüttgutparameter des PET-Recyclats und der simulierten Partikel nach der Kalibrierung	105
Tabelle 5-8:	Geometrieparameter der simulierten Schneckenförderer	106
Tabelle 5-9:	Vorliegende Parameter für jeden durchgeführten Simulationslauf	109
Tabelle 5-10:	Gewählte Parameterstufen in der DEM-Simulationen	112
Tabelle 5-11:	Anzahl der simulierten Partikel pro Füllungsgrad und Baugröße	112
Tabelle 5-12:	Parameterstufen und Ergebnisse der Validierung	113
Tabelle 5-13:	Vorliegende Parameter für die berechneten Datensätze	119
Tabelle 5-14:	Gewählte Parameterstufen für das analytische Berechnungsmodell	120
Tabelle 6-1:	Regressionskoeffizienten und Standardabweichungen für den Geschwindigkeitsbeiwert	129
Tabelle 6-2:	Betrachtete Parameter der Schüttgüter	133
		177

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6-3:	Regressionskoeffizienten und Standardabweichungen für den Leistungsbeiwert	138
Tabelle 7-1:	Koeffizienten zur Berechnung des Füllungsgrads	147
Tabelle 7-2:	Koeffizienten zur Berechnung des Leistungsbeiwerts	149