

Forschungsbericht

fml • Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik • Technische Universität München
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. W. A. Günthner (Hrsg.)

Günthner • Blomeyer • Rong

Entwicklung von praxistauglichen Auslegungsverfahren für Schüttgut- Hochleistungs-Schneckenförderer

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
der Technischen Universität München

Abschlussbericht

Entwicklung von praxistauglichen Auslegungsverfahren für Schüttgut- Hochleistungs-Schneckenförderer

Dieses Vorhaben (Projekt-Nr. 14149 N/1) ist aus Mitteln des Bundesministeriums für
Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto
von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert und im Auftrag des Forschungskuratoriums
Maschinenbau e.V., Frankfurt, durchgeführt worden.

Univ. Prof. Dr.-Ing Willibald A. Günthner (Herausgeber)

Dipl.-Ing. Niels Blomeyer (Projektleitung)

Dr.-Ing. Oliver Rong

fml • Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
D-85748 Garching bei München

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Willibald A. Günthner

fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München 2006

Printed in Germany

Druckerei Neubauer, München

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	5
1.3	Vorgehensweise	6
2	Stand der Forschung und Technik im Bereich der Schneckenförderer	7
3	Grundlegende Elemente zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern.....	17
3.1	Das Mehrkörpermodell für vertikale Schneckenförderer.....	17
3.1.1	<i>Spannungsmodell für vertikal bewegte Schüttgüter.....</i>	<i>18</i>
3.1.2	<i>Spannungsmodell für vertikale Schneckenförderer</i>	<i>23</i>
3.1.3	<i>Bestimmung der Gutverteilung in der Schneckenkammer</i>	<i>31</i>
3.1.4	<i>Volumen- und Massenstrom.....</i>	<i>38</i>
3.2	Bestimmung des Schwerpunktsradius r_{SP}	39
3.2.1	<i>Gutverteilung in der Schneckenkammer</i>	<i>39</i>
3.2.2	<i>Der Schwerpunktsradius mit verschiedenen Gutkonturen.....</i>	<i>42</i>
4	Experimentelle Untersuchungen.....	45
4.1	Versuchsanlage und Versuchsdurchführung	45
4.1.1	<i>Aufbau der Versuchsanlage</i>	<i>45</i>
4.1.2	<i>Versuchsdurchführung.....</i>	<i>47</i>
4.1.3	<i>Die Messtechnik der Versuchsanlage</i>	<i>48</i>
4.2	Auswertung der Versuchsdaten.....	50
4.3	Untersuchung der Schüttgüter.....	53
4.4	Ergebnisse aus der Versuchsdurchführung.....	56
4.4.1	<i>Der stationäre Betriebspunkt.....</i>	<i>57</i>
4.4.2	<i>Ergebnisse zum vertikalen Schneckenförderer</i>	<i>58</i>
4.4.3	<i>Ergebnisse zum horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderer.....</i>	<i>62</i>
5	Auslegungsverfahren für vertikal betriebene Hochleistungs-Schneckenförderer	75
5.1	Baugrößendimensionierung.....	75
5.2	Leistungsberechnung	78
5.2.1	<i>Hubleistung.....</i>	<i>80</i>
5.2.2	<i>Rohrreibleistung</i>	<i>80</i>
5.2.3	<i>Wendelreibleistung</i>	<i>82</i>

5.2.4	<i>Förderfaktor</i>	84
5.2.5	<i>Vereinfachte, grafische Lösungsmöglichkeit</i>	90
5.3	Verifikation durch Leistungsmessungen	93
5.3.1	<i>Voraussetzungen für Leistungsmessungen</i>	93
5.3.2	<i>Durchführung der Leistungsmessungen</i>	94
5.3.3	<i>Messung an der Referenzanlage 1</i>	95
5.3.4	<i>Messung an der Referenzanlage 2</i>	97
5.3.5	<i>Zusammenfassende Bewertung der Leistungsmessungen</i>	100
6	Auslegungsverfahren für horizontale und leicht geneigte Hochleistungs-Schneckenförderer	103
6.1	Baugrößendimensionierung	103
6.1.1	<i>Berechnung des Massenstroms</i>	103
6.1.2	<i>Einschränkungen und Richtlinien für den Betrieb</i>	104
6.2	Leistungsberechnung	105
6.2.1	<i>Hubleistung</i>	105
6.2.2	<i>Fiktive Gesamtreibleistung</i>	106
6.2.3	<i>Verschiebewiderstandsbeiwert λ_h</i>	106
6.2.4	<i>Geschwindigkeitsbeiwert</i>	109
6.2.5	<i>Antriebsleistung</i>	112
6.2.6	<i>Einfluss der Förderergeometrie</i>	112
6.3	Verifikation des Auslegungsverfahrens mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode (DEM)	113
6.3.1	<i>Forschung im Bereich der Diskreten Elemente Methode</i>	114
6.3.2	<i>Simulation von Schneckenförderern</i>	115
6.3.3	<i>Ergebnisse aus der Simulation</i>	116
7	Zusammenfassung und Ausblick	119
8	Literaturverzeichnis	123
	Anhang A – Weitere Abbildungen – Vertikalförderer	135
	Datenblätter zur Baugrößendimensionierung	135
	Anhang B – Weitere Abbildungen – horizontal bis leicht geneigter Förderer ..	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Technische Daten der Großversuchsanlage am Lehrstuhl fml	47
Tabelle 4-2: Schüttgutmechanische Eigenschaften der Versuchsgüter.....	56
Tabelle 5-1: Schüttgutbeiwerte $\lambda_{S,v}$ für die vertikale Förderung für verschiedene Fördergüter inkl. zugehöriger Reibwerte zwischen Gut und Förderer	90
Tabelle 5-2: Technische Daten der Referenzanlage 1	95
Tabelle 5-3: Technische Daten des vertikalen Schneckenförderers der Referenzan- lage 2.....	98
Tabelle 6-1: Horizontale Schüttgutbeiwerte für verschiedene Versuchsgüter.....	108
Tabelle 6-2: Lagerbeiwert λ_{ZWL} für die horizontale und leicht geneigte Förderung..	112

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Archimedische Wasserschraube	1
Abbildung 1-2: Schneckenschiffsentlader.....	3
Abbildung 2-1: Schnitt durch die Schneckenkammer bei der Förderung a) eines starren Einzelkörpers und b) von Schüttgut.....	10
Abbildung 2-2: Vier mögliche Füllungskonfigurationen in der Schneckenkammer ...	13
Abbildung 3-1: Darstellung der Vertikalspannung σ_z ($r, z = 0$) und der Radialspannung $\sigma_r(z)$ in Abhängigkeit von der Wandschubspannungsrichtung in einem mit Schüttgut gefüllten Rohr	18
Abbildung 3-2: Spannungen an einer Scheibe der Dicke dz unter Berücksichtigung der Bewegungsrichtung (Wirkrichtung der Wandschubspannung τ_w)	20
Abbildung 3-3: Spannungen an einer Scheibe der Dicke dz unter Berücksichtigung des Wandschubspannungsabbaus nach Walker [Wal-66] und der Bewegungsrichtung (Wirkrichtung der Wandschubspannung τ_w);	21
Abbildung 3-4: Schub- und Normalspannungen an einem differentiellen Volumenelement in einem Schüttgutbehälter	22
Abbildung 3-5: Darstellung eines schraubenförmigen Schüttgutkörpers und eines Ringkörpers gleicher Fläche und gleicher Oberflächenkontur im Achsschnitt [Voll-00]	24
Abbildung 3-6: Darstellung der Zonen I und II nach Greinwald [Grei-94] im Schneckenförderer; $r_x(z)$ bezeichnet den Trennradius zwischen der wandschubspannungsfreien Zone I und der wandschubspannungsbehafteten Zone II	27
Abbildung 3-7: Spannungen an einer Scheibe der Dicke dz unter Berücksichtigung des Wandschubspannungsabbaus.....	28
Abbildung 3-8: Darstellung eines Sektorelementes mit der Breite $d\phi$, der Dicke dr und der Höhe $k(r)$ in einem drehbewegten Topf sowie der am Sektorelement angreifenden Kräfte F_r in radialer und F_z in vertikaler Richtung.....	32
Abbildung 3-9: Vier mögliche Füllungskonfigurationen in der Schneckenkammer ...	34

Abbildung 3-10: Betrachtung der Gutfüllung a) als kompakten Block analog zur Einzelkörpertheorie und b) bestehend aus Sektorelementen	37
Abbildung 3-11: Schüttgutfüllung, aufgeteilt in eine endliche Anzahl von Sektorelementen, bei vollständigem Abbau der axialen Wandschubspannungen im äußersten Element: Zone 1 (wandschubspannungsbehaftet), Zone 2 (wandschubspannungsfrei) [Grei-94].....	38
Abbildung 3-12: Radialer Abstand des Gutschwerpunkts r_{SP} von der Schneckenachse	40
Abbildung 3-13: Vier mögliche Füllungskonfigurationen in der Schneckenkammer mit zugehörigem Konturverlauf $k(r)$	41
Abbildung 4-1: Großversuchsanlage des Lehrstuhls fml	46
Abbildung 4-2: Einbausituation des neuen, horizontalen bis leicht neigbaren Förderers inkl. der messtechnischen Komponenten (drei Wägezellen) zur kontinuierlichen Füllungsgradmessung	50
Abbildung 4-3: Erfassung und Verarbeitung der Messdaten	52
Abbildung 4-4: Korngrößenanalyse für das Schüttgut Mais.....	54
Abbildung 4-5: Versuchsaufbau zur Reibwertbestimmung	55
Abbildung 4-6: Verlauf des Drehmoments über der Versuchszeit für den vertikalen (oben) und den neigbaren Förderer (unten)	58
Abbildung 4-7: Betriebspunkte der Förderversuche des vertikalen Schneckenförderers mit dem Versuchsgut Kohle.....	59
Abbildung 4-8: Antriebsleistung über Füllungsgrad für vertikale Förderung mit Versuchsgut Kohle	60
Abbildung 4-9: Spezifische Leistung über Füllungsgrad für vertikale Förderung mit Versuchsgut Kohle	61
Abbildung 4-10: Betriebspunkte (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Fördergut: Weizen)	63
Abbildung 4-11: Verlauf der Leistung über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Versuchsgut: Weizen) 64	

Abbildung 4-12: Verlauf der spezifischen Leistung über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Fördergut: Weizen).....	66
Abbildung 4-13: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Fördergut: Weizen).....	67
Abbildung 4-14: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts über der Förderneigung für den Füllungsgrad $\varphi = 40\%$	68
Abbildung 4-15: Verlauf der Füllungsgradabweichung über dem theoretischen Füllungsgrad für Drehzahlen von $n_s = 150$ 1/min bis 370 1/min (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Fördergut: Weizen)	69
Abbildung 4-16: Gemessener Füllungsgrad (oben) und Fördermoment (unten) über Zeit (30s) bei Drehzahl $n = 270$ 1/min, eingestellter Füllungsgrad 0,7, Schüttgut PET-Recyclat, Schneckendurchmesser 200 mm, ohne Zwischenlager	70
Abbildung 4-17: Verlauf der Füllungsgradabweichung über dem theoretischen Füllungsgrad für Förderneigungen von 0° bis 20° (gemittelt über der Drehzahl, ohne Zwischenlager, Fördergut: Weizen, Schneckendurchmesser 200 mm)....	71
Abbildung 4-18: Verschiebewiderstandsbeiwerts λ über dem Füllungsgrad mit und ohne Zwischenlager für die Drehzahl $n = 150$ 1/min (Fördergut: Weizen).....	72
Abbildung 4-19: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung, mit Zwischenlager, Fördergut: Weizen, Schneckendurchmesser 200 mm).....	73
Abbildung 4-20: Verschiebewiderstandsbeiwert über Förderneigung (Förderung mit Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm).....	74
Abbildung 5-1: Baugrößendimensionierung in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl und der axialen Gutgeschwindigkeit für Fördergeometrien nach DIN 15261 [DIN 15261] für 40 % Füllungsgrad (vertikale Förderung)	77
Abbildung 5-2: Verlauf unterschiedlicher Leistungsanteile über der Drehzahl für den Versuchsförderer (vertikale Förderung).....	79

Abbildung 5-3: Gemessene Gesamtreibleistung und Summe der analytisch berechenbaren Reibleistungen, aufgetragen über der Drehzahl bei 30 % Füllungsgrad für den Versuchsförderer; (vertikale Förderung, Fördergut: Weizen)	85
Abbildung 5-4: Verlauf des Förderfaktors λ_v über der Gutwinkelgeschwindigkeit für den Versuchsförderer (vertikale Förderung, Fördergut: Raps)	86
Abbildung 5-5: Verlauf des Förderfaktors λ_v über dem Füllungsgrad (vertikale Förderung, Fördergut: Raps)	87
Abbildung 5-6: Verlauf des Rotationsbeiwerts über der Gutwinkelgeschwindigkeit für den Versuchsförderer (vertikale Förderung)	89
Abbildung 5-7: Verlauf der spezifischen Rohrreibleistung über der Drehzahl bei 40 % Füllungsgrad, Reibwerten zwischen Fördergut und Förderer von 0,3 und Fördergeometrien nach DIN 15261 (vertikale Förderung)	91
Abbildung 5-8: Verlauf der spezifischen Wendelreibleistungen über der Drehzahl bei 40 % Füllungsgrad, Reibwerten zwischen Fördergut und Förderer von 0,3 und Fördergeometrien nach DIN 15261 (vertikale Förderung)	91
Abbildung 5-9: Verlauf des Rohr- und Wendelreibungsfaktors über dem Reibwert zwischen Fördergut und Innenrohr bzw. Schneckenwendel ($\mu_R = \mu_S$)	92
Abbildung 5-10: Ergebnis der Reibwertanalyse des Schüttgutes Steinkohle für die Referenzanlage 1	96
Abbildung 5-11: Ergebnis der Bestimmung der Korngrößenverteilung des Schüttgutes Steinkohle für die Referenzanlage 1	96
Abbildung 5-12: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Antriebsleistung am Referenzförderer 1	97
Abbildung 5-13: Ergebnis der Bestimmung des Reibwertes des Schüttgutes Steinkohle für die Förderversuche am Lehrstuhl fml	99
Abbildung 5-14: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Antriebsleistung am Referenzförderer 2	100
Abbildung 6-1: Verlauf des Neigungsbeiwerts λ_β über der Förderneigung (ohne Zwischenlager, Fördergüter: Raps, Weizen, PET-Recyclat, Kohle)	108
Abbildung 6-2: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ_h über der Drehzahl (ohne Zwischenlager, Fördergut: Weizen, Fördererbaugröße 200 mm)	109

Abbildung 6-3: Verlauf des Geschwindigkeitsbeiwerts λ_n über der Drehzahl (gemittelt über Messwerte mit den Schüttgütern PET-Recyclat, Weizen, Raps, Kohle; ohne Zwischenlager; Schnecken-Ø: 200 mm, 250 mm, 315 mm).....	110
Abbildung 6-4: Verlauf des Lagerbeiwerts λ_{ZWL} über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung).....	111
Abbildung 6-5: Gefüllter horizontaler Schneckenförderer Ø 250 mm im Ausgangszustand der Simulation (Ruhezustand des Schüttguts).....	115
Abbildung 6-6: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts über der Drehzahl für konstanten Füllungsgrad von 30%	117
Abbildung 6-7: Verlauf des Geschwindigkeitsbeiwertes λ_n über der Drehzahl.....	118

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Das Prinzip des kontinuierlich arbeitenden Schneckenförderers wurde bereits vor über 2000 Jahren von dem 287 v. Chr. in Syrakus (Sizilien) geborenen Archimedes erfunden. Dieser zählt bis heute zu den bedeutendsten Pionieren der modernen Naturwissenschaften. Eine seiner Erfindungen ist die nach ihm benannte *Archimedische Wasserschraube* (Abbildung 1-1). Sie stellt eine Wasserschnecke bestehend aus einem Hohlzylinder und einer eingepassten Schneckenwendel dar, die schon zur damaligen Zeit zur Be- und Entwässerung eingesetzt und durch Kurbeln oder Treträder angetrieben wurde [Mey-93].

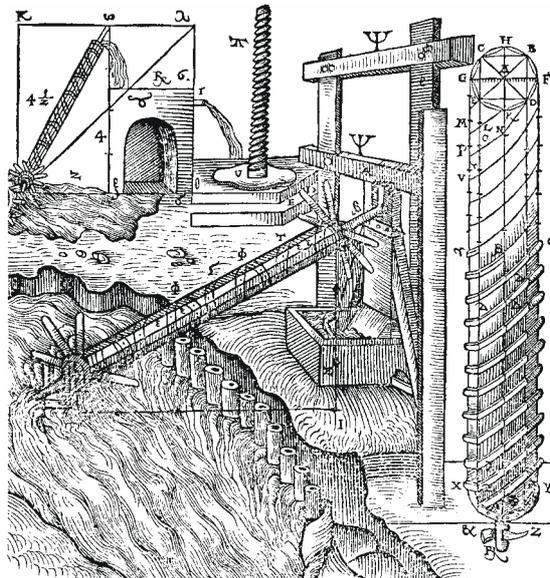


Abbildung 1-1: Archimedische Wasserschraube

Die *Archimedische Wasserschraube* ist zwar eine antike aber dennoch hochaktuelle Konstruktion, deren moderne Ableger vielseitig einsetzbar, von hoher Wirkung und wenig störungsanfällig sind. Noch heute wird sie im Nahen Osten und Ägypten zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen eingesetzt. Sie zählt zu den mechanischen Stetigförderern ohne Zugmittel.

Heutzutage unterscheidet man Schneckenförderer nach der Betriebsweise in horizontale und leicht geneigte, steile und senkrechte. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Fördertrog oder -rohr, der Förderschnecke bestehend aus Schneckenwelle und -wendel und der Antriebseinheit.

Bei der horizontalen und leicht geneigten Förderung kann die Gutbewegung unter bestimmten Voraussetzungen als rein translatorisch betrachtet werden. Nach der genormten Auslegungsvorschrift *DIN 15262* [DIN 15262] für derartige Förderer wird die zulässige axiale Gutgeschwindigkeit auf ca. 0,6 m/s begrenzt.

Bei der vertikalen Förderung tritt neben der translatorischen auch eine rotatorische Gutbewegung auf, deren Größe von verschiedenen Einflussparametern abhängt. Steil geneigte Schneckenförderer nehmen eine Zwischenstellung ein.

Während das Förderprinzip immer gleich ist, unterscheidet sich die Ursache der Förderung in der Erzeugung der zum Fördervorgang erforderlichen Rohrreibungskraft. Bei der horizontalen und leicht geneigten Förderung ist die Eigengewichtskraft des Guts zur Förderung ausreichend groß. Ein Mitdrehen des Guts mit der Schnecke tritt hier lediglich bei sehr hohen Füllungsgraden und geringer Reibung zwischen Fördergut und Rohr auf. Bei der vertikalen Förderung wird die Rohrreibungskraft durch die Fliehkraft des Guts auf das Rohr bewirkt. Hierbei ist eine Mindestdrehzahl der Schnecke erforderlich um ein Mitdrehen des Förderguts mit der Schnecke zu verhindern.

Schneckenförderer können für zahlreiche verfahrenstechnische Prozesse wie zum Kühlen/Heizen, Mischen, Trennen, Verteilen und Dosieren eingesetzt werden. Mit Hilfe von Austragsschneckenförderern oder Austragsböden, bei denen mehrere Förderer parallel angeordnet sind, können Bunker und Silos entleert werden (z. B. Entleerung von Spänesilos im Bereich der Spanplattenherstellung).

Grundsätzlich werden Schneckenförderer oft aufgrund ihrer gekapselten, einfachen und robusten Bauweise, ihres geringen Platzbedarfs, der geringen Störanfälligkeit und der daraus resultierenden geringen Anlagen- und Wartungskosten eingesetzt.

Im Bereich des Massengutumschlags von Schüttgütern werden aufgrund steigender Anforderungen an stetige Fördermittel hinsichtlich der Zuverlässigkeit, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Förderanlage sowie im Bereich des Umweltschutzes immer häufiger auch hochleistungsfähige, also Schneckenförderer mit hohem Füllungsgrad und hoher Drehzahl, die sogenannten Hochleistungs-Schneckenförderer, eingesetzt. Diese erfüllen die genannten Anforderung sehr gut (s. Abbildung 1-2). Sie eignen sich besonders zur Förderung von pulverförmigen und feinkörnigen bis kleinstückigen Gütern.



Abbildung 1-2: Schneckenachtsentlader

Vergleicht man beispielsweise die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher, kontinuierlich arbeitender Fördergeräte, so zeigt sich, dass der spezifische Leistungsbedarf vertikaler Schneckenförderer zwischen dem von Becherwerken (am geringsten) und dem von pneumatischen Fördermitteln liegt.

Die Nachfrage nach bestmöglicher Technik im Bereich des Umschlags von Massenschüttgütern nimmt aufgrund zunehmender weltweiter Privatisierungen von Häfen und anderen öffentlichen Einrichtungen, sowie einem erhöhten Handelsvolumen zwischen den Staaten und einer gestiegenen Sensibilisierung der Bevölkerung hinsichtlich der Umweltauswirkungen deutlich zu.

Für bestimmte Massenschüttgüter wie z. B. Kohle, Getreide und Zement kann dabei eine weltweite Tendenz hin zu kontinuierlich arbeitenden Fördersystemen festgestellt werden. Dies gilt insbesondere für den Schiffsverkehr.

Grund für die steigende Bedeutung ist die Notwendigkeit, die Schiffe relativ schnell und effizient zu entladen, um die Liegezeiten zu verkürzen und die Auslastung der Schiffe zu verbessern.

Die aktuellen maximalen Entladeleistungen reichen bei pneumatischen Schiffsentladern bis zu ca. 600 t/h (Schiffsgröße 100.000 dwt) und bei mechanischen bis zu ca. 2500 t/h (Schiffsgröße 100.000 dwt).

Zur Auslegung von Schneckenförderern sind folgende Verfahren zu nennen:

Horizontale und leicht geneigte Förderung (bis 20°):

Im Bereich horizontaler und leicht geneigter Förderer existiert mit der *DIN 15262* [DIN 15262] eine genormte Auslegungsvorschrift, die jedoch nur für bestimmte Betriebsbereiche von Schneckendrehzahl und Füllungsgrad (bezogen auf bestimmte Fördererbaugrößen) Gültigkeit besitzt. Folglich sind anhand der *DIN 15262* [DIN 15262] nur sehr begrenzte Massenströme realisierbar. Für die Auslegung innerhalb dieser Betriebsbereiche wird ein rein schüttgutspezifischer, konstanter Leistungsbeiwert, der Verschiebewiderstandsbeiwert λ , verwendet. Grundlage dieses Auslegungsverfahrens ist die in diesem Neigungs-, Drehzahl-, und Füllungsgradbereich rein translatorische Bewegung des Förderguts.

Vertikale Förderung:

Im Bereich der vertikalen Förderung wurde von *Gabler* [Gab-81] in Anlehnung an die *DIN 15262* [DIN 15262] ein Auslegungsverfahren entwickelt, welches auf dem rein schüttgutspezifischen, konstanten Verschiebewiderstandsbeiwert λ der Norm basiert. Als Bezugsgröße für diesen dient die Reibung am Schneckenrohr. Ein genormtes Verfahren zur Auslegung vertikaler Förderer existiert bislang nicht.

Da sich die veränderten Betriebsbedingungen von Hochleistungs-Schneckenförderern stark auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf auswirken [Gün-02a], [Fo-02], ist keine effiziente Auslegung derartiger Förderer mit den bisherigen Berechnungsmethoden und dem aus der *DIN 15262* [DIN 15262] bekannten, konstanten und rein schüttgutspezifischen Verschiebewiderstandsbeiwert λ möglich.

Um betriebsbedingte und schüttgutspezifische Einflüsse auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf bei der Auslegung derartiger Förderer besser berücksichtigen zu können, wurden in den letzten Jahren von *Günthner* [Gün-02a] und *Fottner* [Fo-02] experimentelle Untersuchungen an einer Großversuchsanlage am Lehrstuhl fml mit horizontalen und vertikalen Hochleistungs-Schneckenförderern durchgeführt. In Abhängigkeit der geometrischen Daten der Versuchsanlage konnten dabei wesentliche Einflussgrößen auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf (z. B. Drehzahl und Füllungsgrad) ermittelt und daraus empirische Leistungskenngrößen entwickelt werden. Eine Übertragung der empirischen Kenngrößen (z. B. spezifischer

Leistungsbedarf) auf andere Fördergeometrien (z. B. Variation des Schneckendurchmessers oder der Ganghöhe) ist jedoch nicht möglich [Grei-90]. Diese gelten lediglich für die untersuchten Fördergeometrien.

Um eine Übertragung experimenteller Ergebnisse und empirischer Kenngrößen auf beliebige Fördergeometrien zu gewährleisten sind deshalb sowohl für die horizontale und leicht geneigte als auch die vertikale Förderung Koppelbedingungen und geeignete analytisch berechenbare Bezugsgrößen in die Auslegungsverfahren zu integrieren, die die Auswirkungen unterschiedlicher Fördergeometrien auf den Förderzustand und den Leistungsbedarf berücksichtigen. Vorarbeiten zu diesem Thema leistete *Rong* [Ro-04].

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von einfachen und gut handhabbaren Auslegungsverfahren sowohl für horizontale und leicht geneigte als auch für vertikale Hochleistungs-Schneckenförderer für Schüttgut, die eine praxisorientierte Baugrößendimensionierung und effiziente Leistungsauslegung derartiger Förderer ermöglichen.

Diese Verfahren stellen für den Konstrukteur und Projektteur ein Hilfsmittel zur Festlegung der Fördererbaugröße hinsichtlich eines definierten Betriebspunktes (z. B. Massenstrom) und darüber hinaus eine einfache und für den Praxiseinsatz ausgerichtete Möglichkeit zur Leistungsberechnung in Abhängigkeit des Betriebszustandes und der Fördergeometrie des Förderers dar. Zur Konkretisierung werden getrennt nach unterschiedlichen Neigungsbereichen folgende Forschungsziele genannt:

- Ermittlung von Leistungskenngrößen (z. B. des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ)
- Untersuchung der Auswirkung von Fördergeometrie, Zwischenlager und Schneckenneigung für die **horizontale und leicht geneigte** Förderung
- Dimensionierung einer Fördererbaugröße hinsichtlich eines definierten Betriebspunktes von Drehzahl und Massenstrom, etc

- Entwicklung einer Berechnungsvorschrift zur Leistungsberechnung von horizontalen und leicht geneigten Hochleistungs-Schneckenförderern
- Entwicklung einer Berechnungsvorschrift zur Leistungsberechnung von vertikalen Hochleistungs-Schneckenförderern

1.3 Vorgehensweise

In den Kapiteln 1.1 wurde die Ausgangssituation und die Einsatzbereiche der in dieser Arbeit betrachteten Schneckenförderer kurz vorgestellt und auf die Probleme, die mit der Fördererauswahl und der Leistungsberechnung verbunden sind, hingewiesen. Kap. 1.2 erläuterte die Ziele, die sich aus der Problemstellung für die Dimensionierung und Auslegung dieser Schneckenförderer ergeben.

Kap. 2 stellt den aktuellen Stand der Forschung auf dem in dieser Arbeit betrachteten Forschungsgebiet dar und geht hier u. a. auf die unterschiedlichen Vorstellungen hinsichtlich der Förderbewegung für einen Einzelkörper und für Schüttgut ein.

Grundlage für praxistaugliche Auslegungsverfahren ist die Festlegung eines Bewegungsmodells für Schüttgüter. Kapitel 3 stellt das ausgewählte Modelle vor und erklärt grundlegende Ansätze zur Leistungsberechnung.

Für die Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern sind wesentliche Einflüsse auf das Förderverhalten und den Leistungsbedarf anhand empirischer Kenngrößen in das Berechnungsverfahren zu integrieren. Kapitel 4 beschreibt die für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung stehende Versuchsanlage sowie die Versuchsdurchführung und -auswertung und analysiert die Ergebnisse für die jeweiligen Neigungsbereiche (0° - 20° , 90°).

Auf Basis der experimentellen Ergebnisse werden in den Kapiteln 5 und 6 praxisorientierte Auslegungsverfahren auf Basis empirischer Kenngrößen und analytischer Berechnungsvorschriften entwickelt. Darüber hinaus wird eine vereinfachte Möglichkeit der Auslegung vertikaler Förderer vorgestellt.

Kapitel 7 fasst die experimentellen und theoretischen Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und zeigt Ausblicke für zukünftige Forschungsmöglichkeiten im Bereich der Dimensionierung und Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern auf.

2 Stand der Forschung und Technik im Bereich der Schneckenförderer

In diesem Kapitel wird der aktuelle Forschungsstand hinsichtlich der Betriebsweise und der Auslegung von Schneckenförderern dargestellt. Für eine weitergehende Vertiefung sei auf die Literaturangaben am Ende dieser Arbeit verwiesen.

Die Betriebsweise und die Auslegung von Schneckenförderern wird von zahlreichen Parametern beeinflusst. Diese wirken sich auf unterschiedliche Weise auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf aus.

Um die Auswirkungen dieser Einflussgrößen zu untersuchen, sind in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl von theoretischen und experimentellen Arbeiten durchgeführt worden. Hierbei zeigte sich, dass sich diese Parameter auch gegenseitig beeinflussen [Grei-94].

In den experimentellen Arbeiten versuchte man für bestimmte Förderprobleme durch Variation der Einflussgrößen die Auswirkungen auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf zu analysieren und diese in Form von Kennfeldern darzustellen.

Im Rahmen von theoretisch-experimentellen Forschungsarbeiten wurden allgemeingültige Ansätze zur Auslegung von Schneckenförderern aufgestellt und anschließend versucht, diese anhand von experimentellen Untersuchungen zu belegen.

Forschungsarbeiten mit experimentellem Schwerpunkt

Innerhalb rein experimenteller Arbeiten wurden zahlreiche konstruktive Einflussgrößen und Betriebsparameter variiert und deren Einflüsse auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf untersucht [San-71], [Pet-75] [Feh-77], [Rad-81a], [Joh-85], [N.N-85], [Joh-86], [Per-86], [Hun-87], [Sto-87], [G]. Bei den konstruktiven Einflussgrößen wurde dabei besonders Augenmerk auf das Verhältnis der Ganghöhe zum Schneckendurchmesser gelegt. Unter den Betriebsparametern stellte sich die Schneckendrehzahl als maßgebliche Einflussgröße heraus. Die experimentellen Ergebnisse wurden in Kennfeldern in Abhängigkeit mehrerer Einflussgrößen dargestellt oder gingen in Kennwerte ein [Gri-94].

Um die Leistungsfähigkeit der Anlagen zu verbessern, analysierte man weiterhin den Einfluss von Einlaufhilfen auf den erzielbaren Massenstrom [Nil-71], [Pea-67].

Darüber hinaus versuchte man mit konischen Einläufen höhere Füllungsgrade zu erzielen [Böt-87a], [Böt-87b].

Die Arbeiten von *Fehlauer* [Feh-77] und *Ertl* [Ert-88] zeigen einen Überblick, welche Einflussgrößen variiert wurden und wer diese untersuchte.

Obwohl bei den experimentellen Untersuchungen an Versuchsanlagen bisher wichtige Kennwerte ermittelt werden konnten und maßgebliche Einflussgrößen auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf erkannt wurden, lag stets die Schwierigkeit darin, die empirischen Erkenntnisse auf geometrisch andere Förderer und andere Schüttgüter zu übertragen [Grei-94], [Voll-00].

Forschungsarbeiten mit theoretischem Schwerpunkt

Mit dem Ziel, die Förderbewegung und den Leistungsbedarf analytisch anhand von Auslegungsverfahren berechnen zu können, wurden daher auch zahlreiche theoretische Untersuchungen auf dem Gebiet der Schneckenförderer durchgeführt, [Nil-71], [Rad-72], [Ted-74], [Stein-76], [Rad-77], [Feh-78], [Rad-79], [Feh-80], [Feh-80b], [Gab-81], [Rad-81b], [Böt-87a], [Böt-87b], [Schum-87], [Ertl-88], [Grei-94], [Stahl-94].

Aufgrund der im Allgemeinen sehr komplexen Bewegungsvorgänge standen hier vor allem die horizontale und die vertikale Förderung im Vordergrund. Die Bewegungsvorgänge in diesen Betriebsbereichen wurde bereits in Kap. 1 angesprochen. *Vollmann* [Voll-00] untersuchte die Bewegung in geneigten Schneckenförderern sowohl experimentell als auch theoretisch.

Daneben beschäftigten sich einige Arbeiten mit speziellen Problemen, wie konischen Förderabschnitten [Gab-81], [Ertl-88], [Stahl-94] und Schneckenwendeln mit nicht-achsorthogonalen Erzeugenden [Rad-77], [Rad-79], [Gab-81].

Da bis heute kein allgemeingültiges und umfassendes Gesetz für das Stoffverhalten von Schüttgütern vorhanden ist, gestaltet sich eine analytische Beschreibung der Stoffeigenschaften und damit auch die Charakterisierung des Fördervorgangs sehr schwierig [Wei-90].

Eine erste allgemeine Beschreibung der Förderung eines starren Einzelkörpers in einem Schneckenförderer beliebiger Förderneigung lieferte *Böttcher* [Böt-63]. Als Stoffparameter berücksichtigte er die Reibwerte zwischen Gut und Förderer sowie die Schüttdichte. In seinen experimentellen und theoretischen Untersuchungen variierte er den Neigungswinkel β des Förderers zwischen 0° und 90° . Dabei stellte

er fest, dass sich in Abhängigkeit der Förderneigung drei unterschiedliche Förderzustände des Guts einstellen.

Nach *Böttcher* [Böt-63] bewegt sich der Einzelkörper für die horizontale und bis zu einem bestimmten Grenzwinkel β_k geneigte Förderung (Bereich I) unabhängig von der Schneckendrehzahl n_S auf einer geradlinigen Bahn entlang einer Mantellinie des Förderrohrs. Dabei wird der Einzelkörper gegenüber der untersten Mantellinie des Förderrohrs um den Winkel φ_a ausgelenkt. Dieser ist lediglich von der Förderneigung und den Reibungswerten zwischen dem Einzelkörper und dem Förderrohr bzw. der Schneckenwendel abhängig. Im Bereich I nimmt dabei der Winkel φ_a einen maximalen Wert von $\varphi_a = 90^\circ$ an.

Ab dem kritischen Neigungswinkel β_k steigt der Winkel der Gutauslenkung φ_a über 90° an (Bereich II). Infolge der hier erstmals auftretenden Schwerkraftkomponente, die den Einzelkörper von der Rohrwand wegzieht, löst sich der Körper von der Wandung und fällt in die Schneckenkammer hinein. *Böttcher* [Böt-63] folgert daraus, dass durch diese Ablösungsvorgänge im Bereich II keine zuverlässige Aussage über die Förderbewegung und damit die erzielbare Axial- bzw. Fördergeschwindigkeit des Einzelkörpers getroffen werden kann.

Nach *Böttcher* [Böt-63] bleibt der Einzelkörper erst ab einer kritischen Schneckendrehzahl n_k ständig im Kontakt mit dem Förderrohr und bewegt sich dabei auf einer schraubenförmigen Bahn stetig in Richtung der Gutabgabe (Bereich III). Grund hierfür sind die bei dieser Drehzahl ausreichend hohen Fliehkräfte auf den Einzelkörper, die den Körper in Richtung der Rohrwand bewegen. Dabei ändert sich allerdings in Abhängigkeit der Winkellage $\varphi_a(t)$ die Winkelgeschwindigkeit des Einzelkörpers und damit auch dessen Bahnkurve periodisch. Diese periodische Änderung der Winkelgeschwindigkeit des Einzelkörpers wird mit zunehmender Förderneigung geringer und verschwindet bei der vertikalen Förderung. Hier stellt sich eine Bahnkurve mit konstantem Steigungswinkel (= Förderwinkel) ein. Dies wurde in der Arbeit von *Gabler* [Gab-81] bestätigt.

Darüber hinaus weitete *Gabler* [Gab-81] die Untersuchungen auf Schneckenwendeln mit nicht-achsorthogonalen Erzeugenden aus und untersuchte anhand der Versuchsgüter Raps und Weizen den Fördervorgang und den Leistungsbedarf von steilen und senkrechten Schneckenförderern. Im Rahmen dieser Arbeit wurden ebenso der Füllungsgrad, die Fördergeschwindigkeit und der erzielbare Volumenstrom in Abhängigkeit von der Förderneigung und der Schneckendrehzahl

untersucht. Dabei nahm *Gabler*, ebenso wie *Nilsson* [Nil-71], *Fehlauer* [Feh-78] und *Rademacher* [Rad-79] an, dass sich das Fördergut ähnlich einem Fluid unter dem Einfluss der Rotationsbewegung aufgrund seiner Fließfähigkeit in Richtung des Förderrohrs aufböschet.

Das Gut kann daher nicht als Block angesehen werden, sondern verteilt sich in Abhängigkeit zahlreicher Einflussparameter in der Schneckenkammer, wie Abbildung 2-1 verdeutlicht. Dadurch verändern sich die Wirkradien gegenüber der Einzelkörperförderung [Nil-71], [Rad-72], [Ertl-88], [Grei-94], [Stahl-94], die Gutteilchen im Inneren können aneinander abgleiten und ein Teil des Förderguts fließt durch den Spalt zwischen Schneckenwendel und Förderrohr zurück. Dies führt zu einer zusätzlichen Aufböschung des Guts am Förderrohr. Darüber hinaus treten durch das Klemmen des Förderguts im Spalt zusätzliche Leistungsverluste auf [Kön-60], [Stahl-94].

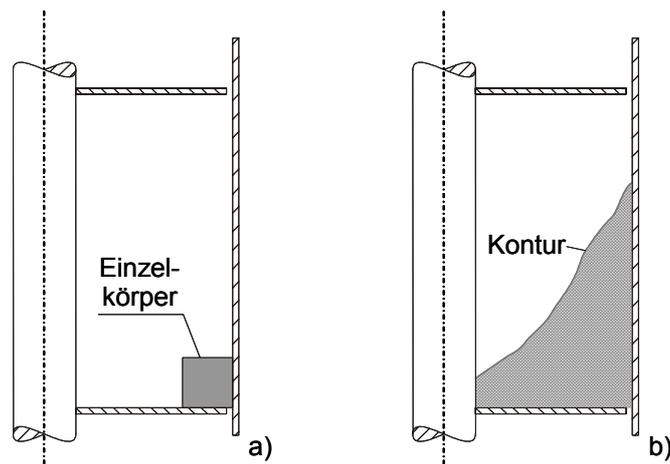


Abbildung 2-1: Schnitt durch die Schneckenkammer bei der Förderung a) eines starren Einzelkörpers und b) von Schüttgut

Die Einzelkörpertheorie kann daher nur den prinzipiellen Fördervorgang im vertikalen Bereich erklären.

Im Bereich steil geneigter Schnecken zeigt *Gabler* [Gab-81], dass die Winkelgeschwindigkeiten entgegen der Einzelkörpertheorie auch bei schräger Förderung entlang dem Umfang konstant bleiben und sich über dem Schneckenumfang ein konstanter Förderwinkel einstellt.

Die wichtigsten Ergebnisse zu stark geneigten Schneckenförderern fasst *Vollmann* [Voll-00] zusammen

Bisherige Auslegungsverfahren

Aufgrund der im Bereich horizontaler und leicht geneigter Förderer einfach zu beschreibenden Gutbewegung konnte die *DIN 15262* [DIN 15262] für bis zu ca. 20° geneigte Schneckenförderer entwickelt werden. Diese ermöglicht die Berechnung des Massenstroms für eine definierte Fördergeometrie (= Baugrößendimensionierung) und zusätzlich eine Berechnung der hierfür erforderlichen Antriebsleistung.

Darüber hinaus werden in der *DIN 15261* [DIN 15261] und *DIN 15262* [DIN 15262] zahlreiche Restriktionen hinsichtlich des Betriebsbereichs, der Konstruktion und der Leistungsauslegung für derartige Förderer genannt. So sind im Bezug auf die Fördererbaugröße Einschränkungen hinsichtlich der Schneckendrehzahlen angegeben. Weiterhin wird in Abhängigkeit des Förderguts eine Begrenzung des Füllungsgrads vorgenommen und in der *DIN 15261* Vorschläge zur Wahl des Schneckendurchmessers und der Ganghöhe angegeben.

Außerhalb des Gültigkeitsbereichs der *DIN 15262* ist zwar eine Förderung möglich, die Bewegung des Förderguts ändert sich hier jedoch. So kann eine Erhöhung des Füllungsgrads rotatorische Geschwindigkeitskomponenten im Gut hervorrufen (= Nebenströme), die nicht mehr in axiale Förderrichtung weisen. Eine Vorhersage über den erzielbaren Massenstrom und den benötigten Leistungsbedarf ist in diesem Fall nicht mehr möglich [Voll-00]. Des Weiteren wurde in jüngster Zeit eine deutliche Zunahme des spezifischen Leistungsbedarfs in Abhängigkeit der Drehzahl außerhalb des genormten Bereiches festgestellt [Gün-02a], [Fo-02], [Ro-03a]. Hierauf wird in diesem Kapitel noch näher eingegangen.

Ein Auslegungsverfahren für Schneckenförderer, die außerhalb des Betriebsbereiches der *DIN 15262* [DIN 15262] betrieben werden, existiert bislang nicht.

Aus den theoretischen Untersuchungen im Bereich der vertikalen Förderung entstanden unterschiedliche Berechnungsmodelle [Gab-81], [Grei-94]. Diese beruhen grundsätzlich auf dem Einzelkörpermodell von *Böttcher* [Böt-63]. Hierbei bewegt sich das Gut, wie bereits erläutert, auf einer schraubenlinienförmigen Bahn mit konstanter Winkelgeschwindigkeit.

Der Unterschied zwischen den einzelnen Modellen liegt in der verschiedenartigen Berücksichtigung schüttgutspezifischer Eigenschaften. In manchen Arbeiten wurde zusätzlich (auf teilweise unterschiedliche Weise) die Verteilung und Bewegung des

Förderguts in der Schneckenkammer und des Spannungszustandes des Schüttguts berücksichtigt [Gab-81], [Ertl-88], [Grei-94], [Stahl-94].

Gabler [Gab-81] hat ein Auslegungsverfahren entwickelt, bei dem der Leistungsbedarf ähnlich wie bei der *DIN 15262* [DIN 15262] für die horizontale und leicht geneigte Förderung berechnet wird. Der Leistungsbedarf setzt sich dabei aus einem Hub- und einem Reibanteil zusammen. Die Berechnung dieser Anteile basiert auf der Einzelkörperbewegung. Die Hubleistung errechnet sich aus dem geförderten Massenstrom und der Förderhöhe.

Zur Berechnung der Reibleistung ersetzt man in Analogie zur *DIN 15262* [DIN 15262] die Eigengewichtskraft des Schüttguts durch die zwischen Fördergut und Gehäusewand wirkende Normalkraft, die in Abhängigkeit der Oberflächenkontur des Schüttguts berechnet wird. In Kombination mit dem aus der *DIN 15262* [DIN 15262] bekannten, rein schüttgutspezifischen Verschiebewiderstandsbeiwert λ werden dabei alle Reib- und Verlustanteile (Reibung an Schneckenblech und Rohr, Leistungsverluste im Spalt und an den Zwischenlagern, etc...) berücksichtigt.

Wichtige Einflussgrößen auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf wie der Füllungsgrad und die Schneckendrehzahl werden hierbei jedoch nicht in ausreichender Weise erfasst. Dies zeigten experimentelle Untersuchungen am Lehrstuhl fml [Gün-02a], [Fo-02], [Ro-03a].

In dem Modell von *Gabler* [Gab-81] wird die Gutverteilung in der Schneckenkammer gemäß den Konfigurationstypen I bis IV nach Abbildung 2-2 berücksichtigt.

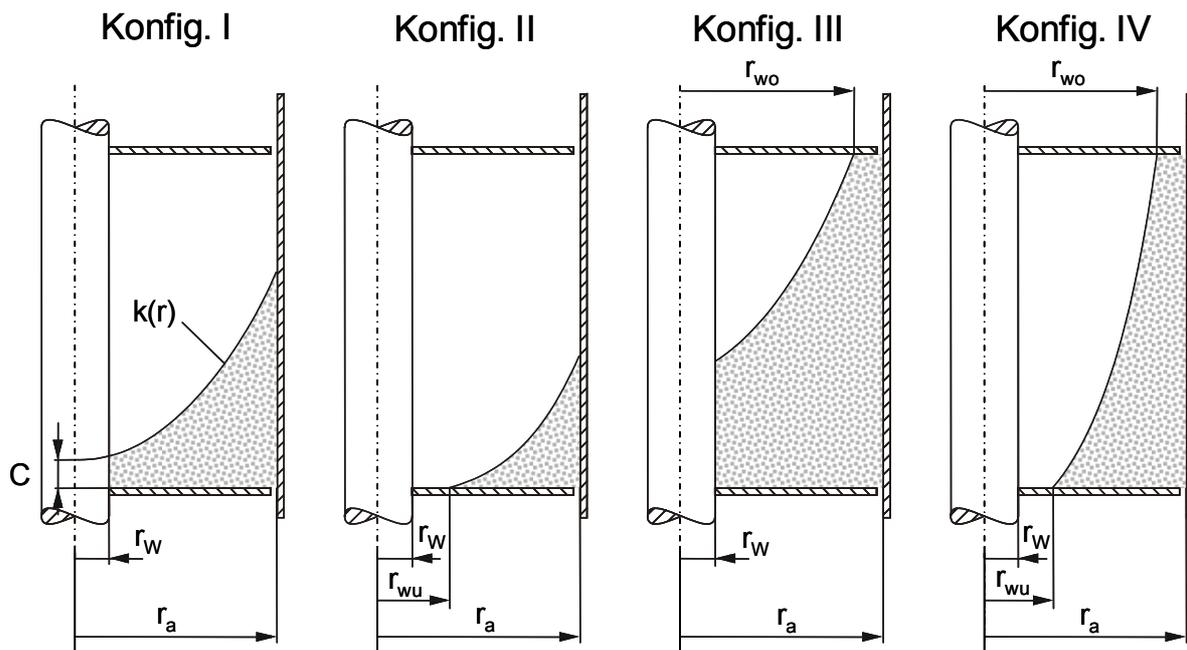


Abbildung 2-2: Vier mögliche Füllungskonfigurationen in der Schneckenkammer

Genauere Erkenntnisse über die Gutverteilung konnten erst gewonnen werden, als es gelang, die Kontur direkt während der Förderung zu messen. Als einzige sind hier bisher *Fehlauer* [Feh-78] und *Ertl* [Ertl-88] zu nennen, die die Kontur des im senkrechten Schneckenförderer transportierten Guts auch experimentell ermittelten.

Ihre Ergebnisse zeigen von der parabolischen Idealform nach Abbildung 2-2 mehr oder weniger abweichende Gutkonturen. Während *Fehlauer* Geraden ermittelte, konnte *Ertl* in seinen experimentellen Untersuchungen teilweise einen degressiven Verlauf der Gutkontur mit einer Knickstelle bzw. Einsenkung feststellen. Nach *Ertl* ist die Ursache dieser Einsenkung das Durchrieseln der Gutpartikel durch den Schneckenpalt (Abfließen des Guts durch den Schneckenpalt). Dies wird durch das theoretische Modell zur Berechnung der Gutkontur laut *Ertl* nicht erfasst [Ertl-88].

Durch Ansätze aus der Kontinuumsmechanik konnte das Berechnungsverfahren erweitert werden. Dadurch wurde eine Beschreibung des Spannungszustandes in jedem Teilchen der Schüttung möglich. Die Oberflächenkontur des Schüttguts und folglich die Gutverteilung in der Schneckenkammer kann in Abhängigkeit der Einflussgrößen aus den Ansätzen nach *Ertl* [Ertl-88] berechnet werden. Außerdem wird der Spannungszustand im Inneren des Schüttguts in den Modellen von *Greinwald* [Grei-94] und *Stahl* [Stahl-94] berücksichtigt.

Weiterhin beschäftigte sich *Greinwald* [Grei-94] mit einem Modell, das die Einflüsse des Zwischenlagers auf den Leistungsbedarf erfasst. Grund für die Berücksichtigung von Zwischenlagern ist, dass im Lagerbereich die Schneckenwendel unterbrochen ist und folglich dort nicht von einem normalen, ungestörten Fördervorgang ausgegangen werden kann. Vielmehr liegt eine Pfropfenförderung des Schüttguts vor. Die axiale Verschiebung des Schüttguts im Lagerbereich erfolgt durch den Druck, den das nachfolgende Fördergut auf dieses ausübt. Da die Lagerung meist aus drei über dem Umfang verteilte Streben besteht, die im Gutstrom liegen, kommt es im Lagerbereich des Weiteren zu einer Querschnittsverengung.

Beide Effekte (Pfropfenförderung, Querschnittsverengung) können zu einem Leistungsmehrbedarf im Bereich des Zwischenlagers führen.

Zudem wurde festgestellt, dass der fertigungsbedingte Spalt zwischen Schneckenwendel und Rohrrinnenwand von großer Bedeutung für den Fördervorgang und den erforderlichen Leistungsbedarf ist [Gün-97], [Gün-98], [Gün-99a]. Hier fließt das Schüttgut zwischen der Schneckenwendel und der Rohrrinnenseite zurück. Der Rückstrom des Schüttguts und das Einklemmen des Förderguts im Spalt erfordert einen Mehrbedarf an Leistung [Kön-60], [Sin-59], [Stahl-94] und reduziert den Massenstrom. Die Folge ist ein Ansteigen des spezifischen Leistungsbedarfs [Cal-61], [Rad-81a], [Mat-94]. *Leitner* [Lei-99] ermittelt einen spezifischen Spaltwiderstand, der die Mahl- und Quetschvorgänge im Spalt in Abhängigkeit mehrerer Parameter charakterisiert. Nach *Wildgruber* [Wild-98] und *Leitner* [Lei-99] nimmt der Leistungsbedarf für Mahl- und Quetschvorgänge für eine kritische Spaltweite ein Maximum an. Neben der Exzentrizität und der Drehzahl beeinflusst demnach auch die Wendeldicke an der Stirnseite den Leistungsbedarf.

Stahl [Stahl-94] hat ebenso Spaltuntersuchungen anhand feinkörniger, leicht fließender Schüttgüter in vertikalen Schneckenförderern durchgeführt. Auch er stellte fest, dass der Spalt zwischen Schneckenwendel und Förderrohr wesentlichen Einfluss auf den Leistungsbedarf derartiger Förderer haben kann. So kann bereits eine geringe Vergrößerung des Spalts zu einer Reduzierung des Massenstroms und einer Erhöhung der spezifischen Leistung führen. Als Ergebnis konnte *Stahl* Anhaltswerte für die Berücksichtigung des Spalteinflusses im Leistungsbedarf aufstellen [Stahl-94].

Aktuelle Forschungsergebnisse bzgl. Hochleistungs-Schneckenförderer

Für den Bereich der horizontalen und leicht geneigten Förderung existiert mit der *DIN 15262* [DIN 15262] eine Auslegungsvorschrift im Sinne einer Norm, die jedoch nur für sehr eingeschränkte Betriebs- bzw. Förderbedingungen Gültigkeit besitzt. Sie ermöglicht lediglich eine Auslegung von langsamlaufenden Schneckenförderern in bestimmten Betriebsbereichen von Drehzahl, Füllungsgrad und Massenstrom. Die Auslegung nach *DIN 15262* [DIN 15262] beruht dabei auf rein schüttgutspezifischen Kenngrößen, die keine Abhängigkeit von Betriebsparametern wie z. B. Schneckendrehzahl, Füllungsgrad und Massenstrom aufweisen.

Im höheren Drehzahlbereich (Hochleistungs-Schneckenförderer) beeinflussen die Betriebsparameter jedoch zunehmend den erforderlichen Leistungsbedarf des Förderers. So konnte in experimentellen Untersuchungen für rein horizontale schnell drehende Schneckenförderer eine starke Abhängigkeit des spezifischen Leistungsbedarfs und des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ von der Drehzahl festgestellt werden [Gün-02a], [Gün-02b], [Gün-02c], [Fo-02], [Ro-04].

Dies lässt den Schluss zu, dass mit den in der *DIN 15262* [DIN 15262] eingesetzten, rein schüttgutspezifischen Kenngrößen also folglich mit dieser Norm keine exakte Auslegung von horizontalen und leicht geneigten Hochleistungs-Schneckenförderern möglich ist [Gün-02a], [Fo-02].

Ein praxisorientiertes, einfaches Auslegungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte Hochleistungs-Schneckenförderer existiert daher bislang nicht.

Für den vertikalen Förderbereich existiert mit dem von *Gabler* [Gab-81] entwickelten Modell ein Auslegungsverfahren, welches allerdings in Analogie zur *DIN 15262* [DIN 15262] auf dem rein schüttgutspezifischen, konstanten Verschiebewiderstandsbeiwert λ und der Normalkraft auf das Förderrohr (hier: Zentrifugalkraft) basiert. Auch im vertikalen Förderbereich konnte im Rahmen von experimentellen Untersuchungen eine starke Abhängigkeit des Fördervorganges und des spezifischen Leistungsbedarfs von Betriebsparametern wie dem Füllungsgrad und der Schneckendrehzahl festgestellt werden [Gün-02a], [Fo-02].

Vor diesem Hintergrund ist für den vertikalen Förderbereich festzuhalten, dass anhand des nach *Gabler* [Gab-81] entwickelten Verfahrens in Verbindung mit dem rein schüttgutspezifischen, konstanten Verschiebewiderstandsbeiwert λ keine ausreichend genaue Leistungsberechnung derartiger Förderer möglich ist.

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnten weiterhin spezifische Leistungskenngrößen wie z. B. der spezifische Leistungsbedarf und der nach *Vollmann* [Voll-00] benannte Förderfaktor in Abhängigkeit der Einflussgrößen ermittelt werden.

Als wichtige Bezugsgröße für den Förderfaktor wurde bei *Gabler* [Gab-81] und *Fottner* [Fo-02] die Reibleistung am Schneckenrohr verwendet. Eine einfache analytische Berechnungsvorschrift der Rohrreibleistung wurde aufgrund der zahlreichen sich gegenseitig beeinflussenden Einflussgrößen bisher nicht angegeben.

Ein in der Praxis einfach handhabbares Auslegungsverfahren zur Baugrößendimensionierung und Leistungsauslegung vertikaler Schneckenförderer existiert daher bislang nicht.

Zur Entwicklung von Auslegungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte und vertikale Hochleistungs-Schneckenförderer sind daher u. a. weitere experimentelle Untersuchungen erforderlich. Dabei ist vor allem die Bewegung des Förderguts im leicht geneigten Förderbereich unter dem Einfluss hoher Drehzahlen und Füllungsgrade und deren Auswirkungen auf den Leistungsbedarf zu analysieren.

3 Grundlegende Elemente zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern

Zur Auslegung und Berechnung von Schneckenförderern ist die Bewegung des Förderguts entscheidend. Die Kenntnis über den genauen Zustand der maßgeblichen Stoffparameter, hauptsächlich Füllungsgrad und Drehzahl, des Fördergutes im Schneckenförderer beeinflusst sehr stark die Genauigkeit, mit der die tatsächlich im Förderer auftretenden Bewegungsvorgänge erfasst werden können. Die Bewegungsvorgänge im Förderer können grundsätzlich auf Basis folgender zwei Modelle abgebildet werden:

- Einzelkörpermodell
- Mehrkörpermodell

Da das Einzelkörpermodell nur das grundsätzliche Verhalten des Fördergutes abbilden kann (s. dazu Kapitel 2) und daher für die Entwicklung eines Auslegungsverfahrens für vertikale Hochleistungs-Schneckenförderer zu ungenau ist, wird in Kapitel 3.1 nur das Mehrkörpermodell näher betrachtet. Des Weiteren werden für die in dieser Arbeit entwickelten Auslegungsverfahren wichtige Berechnungsgrundlagen erläutert.

Im Fall der horizontalen und leicht geneigten Förderung wird der Aufbau des genormten Auslegungsverfahrens nach *DIN 15262* [DIN 15262] vorgestellt und die Grenzen des Anwendungsbereichs der Norm aufgezeigt.

3.1 Das Mehrkörpermodell für vertikale Schneckenförderer

Im Rahmen des Einzelkörpermodells wurden lediglich die Vorgänge an der Berandung des Einzelkörpers, also zwischen Einzelkörper und Schneckenwendel bzw. Rohrrinnenwand berücksichtigt. Da die Bewegung von Schüttgütern unter von außen aufgeprägten Belastungen jedoch auch von den Vorgängen im Inneren des Schüttguts geprägt ist, sind diese ebenfalls zu erfassen. Entscheidend ist hierbei der lokale Spannungszustand im Schüttgut.

Im folgenden Kapitel wird zunächst ein Spannungsmodell für vertikal bewegte Schüttgüter vorgestellt. Dieses wird durch zusätzliche Bedingungen auf ein Spannungsmodell für die Förderung von Schüttgütern in vertikalen Schneckenförderern erweitert. Hierbei werden die wesentlichen, dem Modell zu Grunde liegenden Berechnungsansätze, erläutert. Die Randbedingungen und Voraussetzungen werden hier nicht detailliert dargestellt. Diese sind den Literaturstellen zu entnehmen.

3.1.1 Spannungsmodell für vertikal bewegte Schüttgüter

Die im Schüttgut herrschenden Horizontal- und Vertikalspannungen (\rightarrow Spannungszustand im Schüttgut) werden sowohl von der Größe als auch von der Wirkrichtung der Wandschubspannungen beeinflusst (die Wandschubspannung τ_w zwischen der Schüttgutfüllung und der Zylinderwand kann sowohl in Richtung der Schwerkraft als auch entgegengesetzt zu dieser wirken).

Zur Verdeutlichung werden die Wechselwirkungen zwischen den Spannungen an der Berandung und den Spannungen im Inneren eines Schüttguthaufwerks am Beispiel eines mit Schüttgut gefüllten Zylinders erläutert (s. Abbildung 3-1).

In Abhängigkeit von der Wirkrichtung der Wandschubspannung τ_w ergeben sich die in Abbildung 3-1 dargestellten Spannungsverläufe für die Vertikalspannung σ_z und die radiale Spannung σ_r .

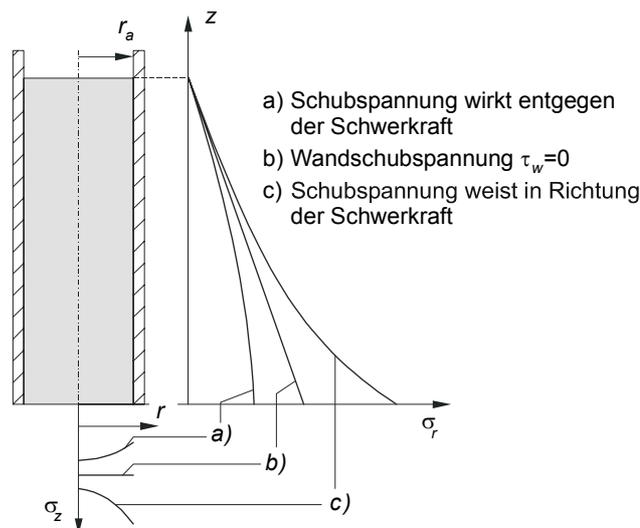


Abbildung 3-1: Darstellung der Vertikalspannung σ_z ($r, z = 0$) und der Radialspannung $\sigma_r(z)$ in Abhängigkeit von der Wandschubspannungsrichtung in einem mit Schüttgut gefüllten Rohr

Diese können folgendermaßen beschrieben werden:

- Der Fall a) bezeichnet die Gutbewegung in Richtung der Erdbeschleunigung. Beide Spannungen streben dabei einem Grenzwert zu, da sich das Schüttgut an der Zylinderwand abstützen kann. Die Vertikalspannung $\sigma_z(r, z = 0)$ erreicht ihr Maximum bei $r = 0$. Diese charakteristischen Spannungsverläufe sind beispielsweise bei der Silolagerung zu beobachten.
- Der Fall b) entspricht einer Flüssigkeitssäule mit einem idealen, reibungsfreien Fluid. Der hydrostatische Druck nimmt mit zunehmender Tiefe linear zu. Die Vertikalspannung $\sigma_z(r, z = 0)$ ist entlang dem Radius r konstant. Es gilt $\tau_W = 0$.
- Der Fall c) bezeichnet die Gutbewegung entgegen der Schwerkraft, was auch für die Gutbewegung im Schneckenförderer zutrifft. Die Vertikal- und Radialspannung steigen ausgehend von der freien Schüttgutoberfläche exponentiell an. Die Vertikalspannung $\sigma_z(r, z = 0)$ erreicht ihr Maximum bei $r = r_a$.

Diese Spannungszustände wurden erstmals von *Janssen* [Jan-95] im Rahmen von Untersuchungen an Silos theoretisch wie experimentell erforscht und beschrieben. Seine und weitere Arbeiten stellen die Grundlage für das von *Greinwald* [Grei-94] entwickelte Bewegungsmodell von Schüttgütern in Schneckenförderern dar. Dieses wird im Folgenden im Überblick dargestellt.

Ausgangspunkt ist dabei die Betrachtung einer infinitesimal dünnen Schüttgutscheibe des Siloquerschnitts mit der Dicke dz , wie sie in Abbildung 3-2 abgebildet ist. Unter der Annahme einer entlang dem Scheibenumfang konstanten Wandschubspannung τ_W besteht so die Möglichkeit, die Vertikalspannung σ_z und die Radialspannung σ_r in Abhängigkeit der Wandschubspannung τ_W zu berechnen. Entgegen der Darstellung in Abbildung 3-1 wird die Vertikalspannung dabei als konstant über dem Querschnitt angesehen:

$$\sigma_z(r) = \text{const.} \quad (3.1)$$

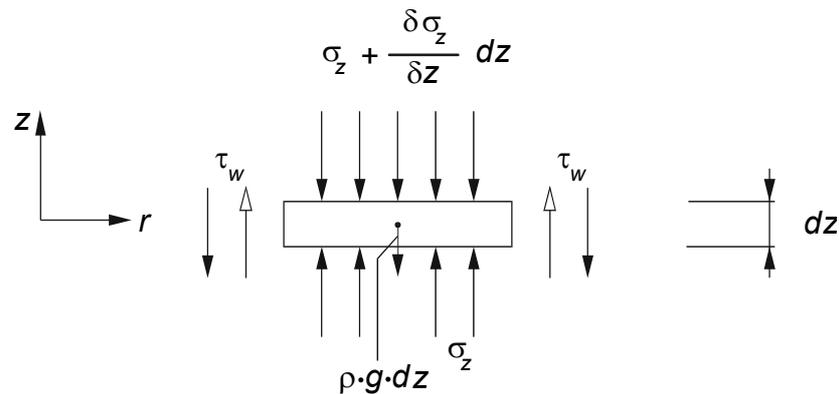


Abbildung 3-2: Spannungen an einer Scheibe der Dicke dz unter Berücksichtigung der Bewegungsrichtung (Wirkrichtung der Wandschubspannung τ_w)

Das Kräftegleichgewicht an der Schüttgutscheibe in vertikaler Richtung lautet:

$$\sum F_z = 0 = \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz \cdot (r_a^2 \cdot \pi) \pm \tau_w \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_a \cdot dz + (r_a^2 \cdot \pi) \cdot dz \cdot \rho \cdot g \quad (3.2)$$

Die Wandschubspannung τ_w ergibt sich zu:

$$\tau_w = \sigma_z(z) \cdot \lambda \cdot \tan \varphi_w \quad (3.3)$$

Die Lösung der Gl. (3.2), unter Verwendung von Gl. (3.3) lautet:

$$\sigma_z(z) = \mp \frac{\rho \cdot g \cdot r_a}{2 \cdot \tan \varphi_w} + C \cdot \exp\left(\pm \frac{2 \cdot \lambda \cdot \tan \varphi_w \cdot z}{r_a}\right) \quad (3.4)$$

Die negativen Vorzeichen bezeichnen den Fall, dass die Wandschubspannung τ_w , wie im oben beschriebenen Fall c), in Richtung der Erdbeschleunigung weist. Die positiven Vorzeichen kennzeichnen den umgekehrten Fall (\rightarrow entgegen der Erdbeschleunigung, s. Abbildung 3-2). Die Integrationskonstante C kann aus der Spannungsrandbedingung an einer Stelle z bestimmt werden.

Da der radiale Abbau der Wandschubspannungen τ_w in Gl. (3.4) nicht berücksichtigt wird, stellt der Ansatz von *Janssen* lediglich eine erste Näherung dar. *Walker* [Wal-66] erweiterte deshalb das Modell (s. Abbildung 3-3) und geht dabei von einer

konstanten Radialspannung aus, mittelt jedoch die Vertikalspannungen über den Querschnitt. Der Abbau der Wandschubspannung erfolgt im Gutinneren linear mit der Randbedingung $\tau_{zr}(r=0) = 0$ an der Symmetrieachse. Über einen Verteilfaktor D schätzt Walker die Abweichung der Vertikalspannung $\sigma_z(r=r_a, z)$ an der Wand von der gemittelten Vertikalspannung $\bar{\sigma}_z(z)$ ab:

$$D = \frac{\sigma_z(r=r_a, z)}{\bar{\sigma}_z(z)} \quad (3.5)$$

Für vertikale Röhren ergeben sich bei Schwerkräfteinfluss Verteilfaktoren von $D \leq 1$ [Wal-66]. Walker gelangt schließlich zu einer Gleichung der Form

$$\bar{\sigma}_z(z) = \mp \frac{\rho \cdot g \cdot r_a}{2 \cdot B \cdot D} + C \cdot \exp\left(\pm \frac{2 \cdot B \cdot D \cdot z}{r_a}\right). \quad (3.6)$$

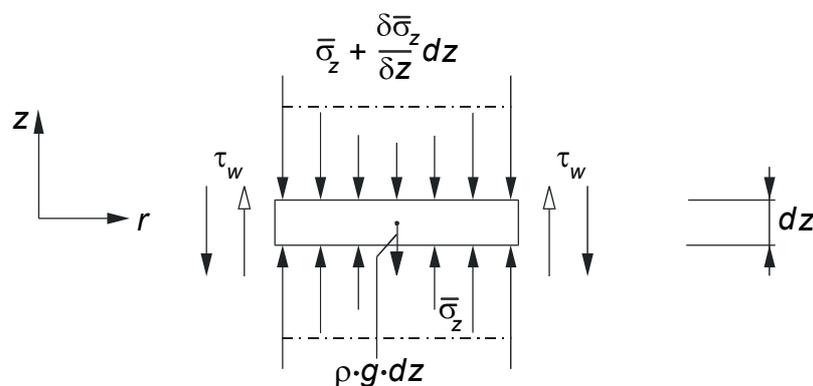


Abbildung 3-3: Spannungen an einer Scheibe der Dicke dz unter Berücksichtigung des Wandschubspannungsabbaus nach Walker [Wal-66] und der Bewegungsrichtung (Wirkrichtung der Wandschubspannung τ_w);

Diese Gleichung unterscheidet sich von der Janssengleichung durch die andersartigen Koeffizienten D und B . Der Koeffizient B resultiert aus der Betrachtung des Wandfließortes WFO im Mohrschen Spannungskreis und entspricht dem Verhältnis von Wandschubspannung τ_w zu Vertikalspannung $\sigma_z(r=r_a, z)$:

$$B = \frac{\tau_w}{\sigma_z(r=r_a, z)} = \frac{\tau_w}{D \cdot \bar{\sigma}_z(z)} \quad (3.7)$$

Für den unbestimmten Verteilfaktor D liefert *Walters* in [Wal-73] eine Lösung. *Korzen* [Kor-83] konnte zeigen, dass diese Betrachtungsweise auch für frei fallendes Gut in Schurren gültig ist. Diese Modelle setzen eine entlang dem Radius konstante Horizontalspannung σ_r und eine lineare Schubspannungsverteilung voraus [Jen-61].

Für eine kontinuumsmechanische Betrachtung an einem differentiellen Volumenelement wird in einem weiteren Verfahren die bisher betrachtete Gutscheibe zusätzlich in infinitesimal dünne Ringe [Lvin-71] unterteilt. In Abbildung 3-4 ist ein derartiges Ringsegment mit den für das vertikale Kräftegleichgewicht relevanten Spannungen dargestellt.

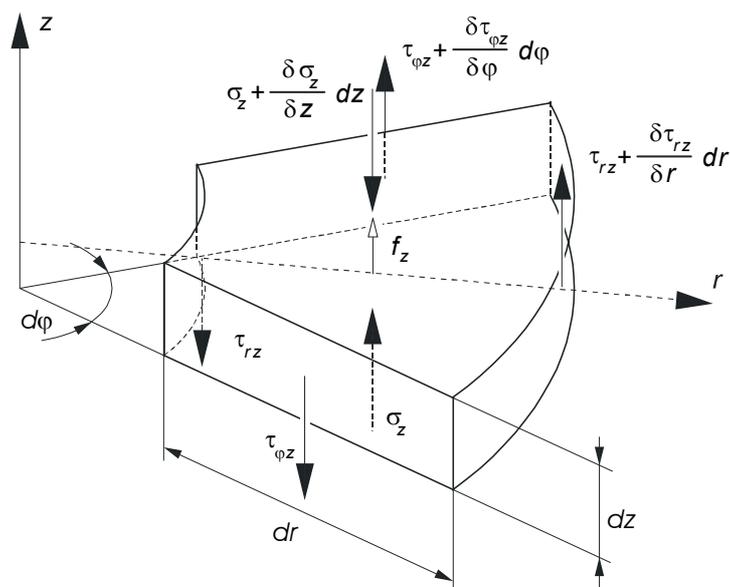


Abbildung 3-4: Schub- und Normalspannungen an einem differentiellen Volumenelement in einem Schüttgutbehälter

Aus dem Kräftegleichgewicht am differentiellen Element ergibt sich ein System partieller Gleichungen, das durch die Wahl geeigneter Randbedingungen lösbar ist.

3.1.2 Spannungsmodell für vertikale Schneckenförderer

Bei den bisherigen Überlegungen wurde lediglich ein zweiachsiger Spannungszustand betrachtet. Da der Fördervorgang im vertikalen Schneckenförderer jedoch durch einen dreiachsigen Spannungszustand bestimmt wird, sind hier neben den Vertikal- und Horizontalspannungen auch die Spannungen in azimuthaler (Umfangs-) Richtung zu berücksichtigen.

Unter der Einwirkung der äußeren Kräfte und der Volumenkräfte auf das Schüttgut stellt sich innerhalb der Schneckenkammer eine charakteristische Gutverteilung ein [Stahl-94, Ertl-88, Grei-94]. Analog zur Einzelkörperbewegung ist die Schneckendrehzahl hinsichtlich der Gutbewegung der bedeutendste Einflussparameter.

Die Gutverteilung in der Schneckenkammer wird dagegen im Wesentlichen von den Stoffparametern und der Spannungsverteilung im Schüttguthaufwerk beeinflusst. Wie aus den Untersuchungen von *Ertl* [Ertl-88], *Stahl* [Stahl-94] und *Greinwald* [Grei-94] bekannt ist, bildet sich dabei im stationären Förderzustand eine gleichförmige Kontur entlang dem Umfang aus.

Für die Betrachtung des dreiachsigen Spannungszustandes eines vertikalen Schneckenförderers muss zunächst ein geeignetes Koordinatensystem zur Darstellung der Spannungen ausgewählt werden. Für den vorliegenden Fall bietet sich aufgrund der einfachen Darstellung von konstantem Gutquerschnitt und konstanten Geschwindigkeitskomponenten (unabhängig von der Winkelposition entlang dem Umfang) ein rotationssymmetrisches, zylindrisches r, z, φ -System an (Abbildung 3-5).

Da unter der Voraussetzung gleicher Querschnittsflächen ein schraubenförmiger Schüttgutkörper und ein rotationssymmetrischer Ringkörper identische Volumina in beliebigen Achsschnitten aufweisen, wird in Abbildung 3-5 als Modellkörper ein Ringkörper verwendet. Darüber hinaus können dabei kontinuumsmechanische Ansätze im Hinblick auf die Spannungsberechnung an einem rotationssymmetrischen Ringkörper angewendet werden. Zum Vergleich ist ein rotationssymmetrischer Ringkörper mit abgebildet.

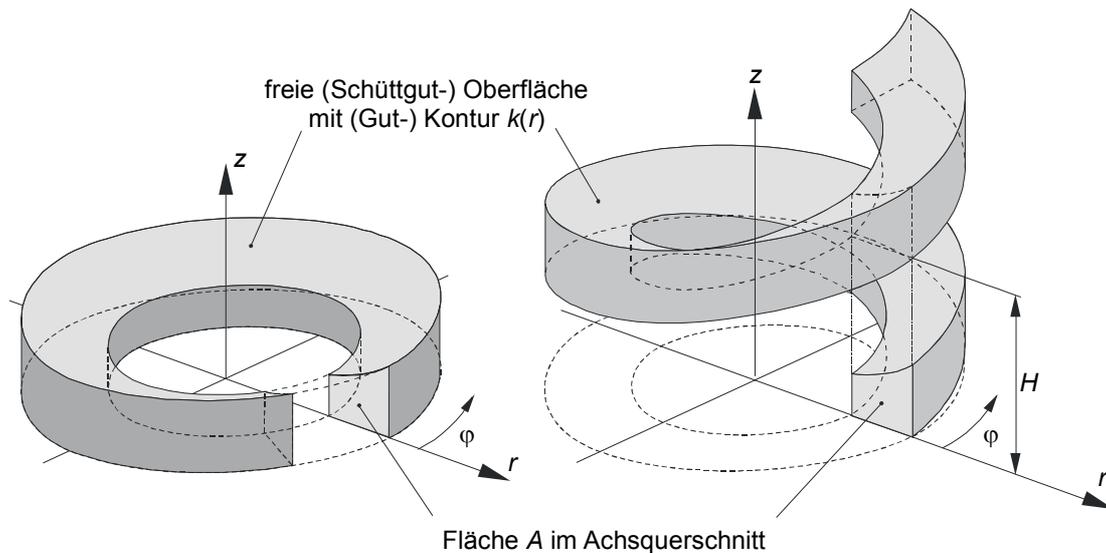


Abbildung 3-5: Darstellung eines schraubenförmigen Schüttgutkörpers und eines Ringkörpers gleicher Fläche und gleicher Oberflächenkontur im Achsschnitt [Voll-00]

Die differentiellen Gleichgewichtsbeziehungen an einem Volumenelement lauten nach Ertl [Ertl-88] wie folgt:

- in radialer Richtung

$$\frac{\partial}{\partial r}(r \cdot \sigma_r) + \frac{\partial \sigma_{\varphi r}}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z}(r \cdot \sigma_{zr}) - \sigma_{\varphi} + r \cdot f_r = 0 \quad (3.8)$$

- in azimutaler Richtung

$$\frac{\partial}{\partial r}(r \cdot \sigma_{\varphi r}) + \frac{\partial \sigma_{\varphi}}{\partial \varphi} + r \cdot \frac{\partial \sigma_{z\varphi}}{\partial z} + \sigma_{\varphi r} + r \cdot f_{\varphi} = 0 \quad (3.9)$$

- in axialer Richtung

$$\frac{\partial}{\partial z}(r \cdot \sigma_{zr}) + \frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial \varphi} + r \cdot \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + r \cdot f_z = 0 \quad (3.10)$$

Zur Lösung dieses Systems von partiellen Differentialgleichungen sind einige vereinfachende Annahmen hinsichtlich der Geschwindigkeitsverteilung und des Spannungszustandes [Ertl-88] zu treffen. Die Gleichungen (3.8) bis (3.10) beinhalten

die Volumenkräfte f_z , f_φ und f_r . Von diesen drei Kräften können f_z und f_r bereits formuliert werden:

$$f_z = -\rho \cdot g \quad (3.11)$$

und

$$f_r = -\rho \cdot r \cdot \omega_a^2 \quad (3.12)$$

Gemäß Gl. (3.8) und Gl. (3.11) muss die absolute Winkelgeschwindigkeit bekannt sein. Weiterhin werden zunächst Relativbewegungen im Schüttgutinneren ausgeschlossen, was in der Regel auch zutrifft. Damit gilt für die Gutwinkelgeschwindigkeit:

$$\omega_a(r, z) = \omega_a = \text{const.} \quad (3.13)$$

Unter dieser Vorgabe einer konstanten Gutwinkelgeschwindigkeit mit demnach konstanten Geschwindigkeitsanteilen in r -, φ - und z -Richtung entlang dem Umfang, folgt die Forderung, dass das Fördergut zumindest im Inneren in einem elastischen Zustand vorliegen muss. Dies bedeutet, dass die Gutquerschnittsfläche und -kontur entlang dem Umfang unverändert bleiben. Aus Gl. (3.13) geht zudem hervor, dass die Volumenkraft f_φ entlang dem Umfang konstant ist. Somit gilt:

$$\frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \quad (3.14)$$

Legt man dem System einen bestimmten Spannungszustand zu Grunde, kann die Spannungsverteilung im Gutinneren ermittelt werden. Zusätzlich sind noch weitere Vereinfachungen bezüglich der Hauptspannungsrichtungen und der Schubspannungen vorzunehmen. So geht *Ertl* davon aus, dass die Hauptspannungsrichtungen mit den Einheitsvektoren e_r , e_φ und e_z des oben eingeführten Koordinatensystems identisch sind. Für die Schubspannungen in einem Hauptspannungssystem gilt:

$$\sigma_{ij} = 0 \quad (3.15)$$

Bei bekannter Spannungsverteilung lässt sich mit Hilfe des Fließkriteriums überprüfen, ob ein elastischer Zustand im Gutinneren vorliegt.

Nun kann das Differentialgleichungssystem gelöst werden. Da jedoch die für den Fördervorgang im vertikalen Schneckenförderer maßgeblichen Schubspannungen an den Berandungen der Schüttgutfüllung hier keine Berücksichtigung mehr finden, vereinfacht sich Gl. (3.10) unter Verwendung von Gl. (3.11) und Gl. (3.15) zu:

$$r \cdot \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + r \cdot \rho \cdot g = 0 \quad (3.16)$$

Eine Integration dieser Gleichung führt zur Vertikalspannung σ_z im wandreibungsfreien Zustand. Unter Vorgabe einer spannungsfreien Oberfläche lautet die Lösung:

$$\sigma_z = \rho \cdot g(k(r) - z) \quad (3.17)$$

Die Wandreibung, also die ortsabhängige Vertikalkomponente der Wandschubspannung τ_w , kann laut *Greinwald* [Grei-94] durch Superposition zur Vertikalspannung σ_z addiert werden.

Da im Schüttgutkörper Zonen mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen existieren, definiert *Greinwald* [Grei-94] für die Schneckenkammer zwei Zonen (s. Abbildung 3-6):

- Zone I: wandschubspannungsfreie Zone
- Zone II: wandschubspannungsbehaftete Zone

Diese Zonen grenzen sich durch den in Abbildung 3-6 dargestellten Trennradius $r_x(z)$ voneinander ab. Der Trennradius r_x bezeichnet den Grenzradius, bis zu dem die Wandschubspannungen in Abhängigkeit von der Tiefe im Gutinneren wirken.

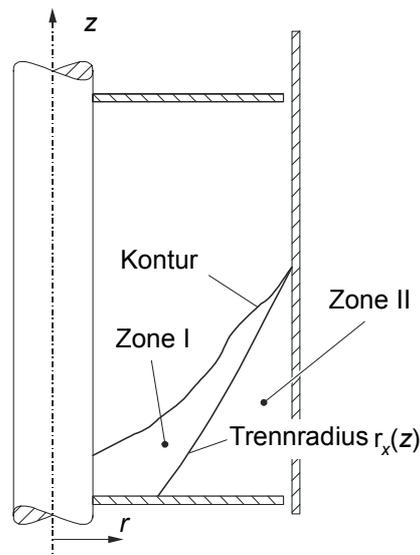


Abbildung 3-6: Darstellung der Zonen I und II nach Greinwald [Grei-94] im Schneckenförderer; $r_x(z)$ bezeichnet den Trennradius zwischen der wandschubspannungsfreien Zone I und der wandschubspannungsbehafteten Zone II

Wie bereits aus den Ausführungen zur Siloauslegung hervorgeht, wird die Wandschubspannung über einen Verteilfaktor D ins Gutinnere abgebaut. Der Abbau der Wandschubspannung erfolgt dabei linear. Diese Annahme wird für den vertikalen Schneckenförderer übernommen.

Damit geht die Vertikalspannung σ_z über in eine vertikale Ersatzspannung $\sigma_z(r, z)$ für $r_x(z) \leq r \leq r_a$ und $0 \leq z \leq k(r)$. Im Bereich $r_i \leq r < r_x(z)$ gilt hingegen Gl. (3.17). Die Radien r_i und r_a bezeichnen den Wellen- und den Rohrrinnenradius.

Als Maß für den radialen Schubspannungsabbau führt Greinwald [Grei-94] die Größe Z analog zum Verteilfaktor D ein. Damit lässt sich die Vertikalspannung nun bereichsweise wie folgt definieren (mit Ordinatenabschnitt θ):

$$\sigma_z(r, z) = \begin{cases} \rho \cdot g \cdot (k(r) - z), & \text{für Zone I mit } r_i \leq r < r_x(z) \\ \rho \cdot g \cdot (k(r) - z) + Z \cdot r + \theta, & \text{für Zone II mit } r_x(z) \leq r \leq r_a \end{cases} \quad (3.18)$$

Für das Kräftegleichgewicht an einer Scheibe ergibt sich gegenüber Abbildung 3-3 bzw. Abbildung 3-4 die in Abbildung 3-7 gezeigte Veränderung:

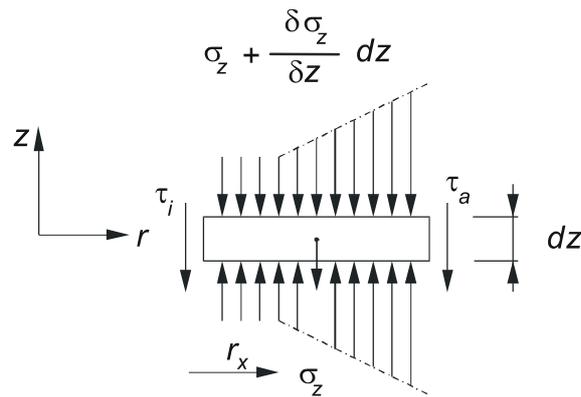


Abbildung 3-7: Spannungen an einer Scheibe der Dicke dz unter Berücksichtigung des Wandschubspannungsabbaus

Das Kräftegleichgewicht in z -Richtung folgt zu:

$$\sum F_z = 0 = \int_{A_z} \sigma_z \cdot dA_z - \int_{A_z} \left(\sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \cdot dz \right) \cdot dA_z - \int_{A_r} \tau_i \cdot dA_r - \int_{A_r} \tau_a \cdot dA_r - \int_V \rho \cdot g \cdot dV \quad (3.19)$$

Mit

$$A_z = r \cdot dr \cdot d\varphi \quad (3.20)$$

bzw.

$$A_r = r \cdot dz \cdot d\varphi \quad (3.21)$$

und

$$V = r \cdot dr \cdot dz \cdot d\varphi \quad (3.22)$$

geht Gl. (3.19) über in

$$0 = \int_{A_z} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz - \int_{A_r} \tau_i \cdot r \cdot dz \cdot d\varphi - \int_{A_r} \tau_a \cdot r \cdot dz \cdot d\varphi - \int_V \rho \cdot g \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz \quad (3.23)$$

und für ein Segment der Bogenlänge Φ in

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left(\int_0^\Phi \int_{r_i}^{r_a} \sigma_z \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi \right) dz + \int_0^\Phi \tau_i \cdot r_i \cdot d\varphi \cdot dz + \\ + \int_0^\Phi \tau_a \cdot r_a \cdot d\varphi \cdot dz + \int_0^\Phi \int_{r_i}^{r_a} \rho \cdot g \cdot r \cdot dr \cdot dz \cdot d\varphi = 0 \quad . \end{aligned} \quad (3.24)$$

Die Berechnung der Wandschubspannungen τ_i und τ_a erfolgt unter Verwendung des Spannungsverhältnisses zwischen Vertikal- und Radialspannung. Aus den radialen Normalspannungen auf die Innen- und Außenberandung

$$\sigma_{ri} = \lambda_i \cdot \sigma_{zi} = \lambda_i \cdot \rho \cdot g \cdot (k(r_i) - z) \quad (3.25)$$

und

$$\sigma_{ra} = \lambda_a \cdot \sigma_{za} = \lambda_a \cdot [\rho \cdot g \cdot (k(r_a) - z) + Z \cdot r_a + \theta] \quad (3.26)$$

ergeben sich bei bekannten Reibungsbeiwerten μ_i und μ_a folgende Schubspannungen:

$$\tau_i = \lambda_i \cdot \mu_i \cdot \sigma_{zi} = \lambda_i \cdot \mu_i \cdot \rho \cdot g \cdot (k(r_i) - z) \quad (3.27)$$

$$\tau_a = \lambda_a \cdot \mu_a \cdot \sigma_{za} = \lambda_a \cdot \mu_a \cdot [\rho \cdot g \cdot (k(r_a) - z) + Z \cdot r_a + \theta] \quad (3.28)$$

In Gl. (3.24) kann Gl. (3.18) eingesetzt werden. Die Kraftkomponente aus der Vertikalspannung σ_z geht über in:

$$\begin{aligned} \int_0^\Phi \int_{r_i}^{r_a} \sigma_z \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi &= \Phi \cdot \int_{r_i}^{r_x} \rho \cdot g \cdot (k(r) - z) \cdot r \cdot dr + \\ &+ \Phi \cdot \int_{r_x}^{r_a} (\rho \cdot g \cdot (k(r) - z) + Z \cdot r + \theta) \cdot r \cdot dr \\ &= \Phi \cdot \int_{r_i}^{r_a} \rho \cdot g \cdot (k(r) - z) \cdot r \cdot dr + \Phi \cdot \int_{r_x}^{r_a} (Z \cdot r + \theta) \cdot r \cdot dr \end{aligned} \quad (3.29)$$

Am Radius r_x geht der Bereich II in den Bereich I über, wobei der Einfluss der Wandschubspannung verschwindet.

Damit ist die Randbedingung zur Bestimmung des Ordinatenabschnitts θ mit $Z \cdot r_x + \theta = 0$ gegeben. Eingesetzt in Gl. (3.28) und Gl. (3.29) resultieren daraus:

$$\tau_a = \lambda_a \cdot \mu_a \cdot [\rho \cdot g \cdot (k(r_a) - z) + Z \cdot (r_a - r_x)] \quad (3.30)$$

$$\int_{r_i}^{r_a} \sigma_z \cdot r \cdot dr = \int_{r_i}^{r_a} \rho \cdot g \cdot (k(r) - z) \cdot r \cdot dr + \int_{r_x}^{r_a} Z \cdot (r - r_x) \cdot r \cdot dr \quad (3.31)$$

Gemäß Gl. (3.24) ist Gl. (3.30) nach der Koordinate z abzuleiten:

$$\frac{d}{dz} \left(\int_{r_i}^{r_a} \sigma_z \cdot r \cdot dr \right) = -\frac{\rho \cdot g}{2} \cdot (r_a^2 - r_i^2) - \frac{Z}{2} \cdot (r_a^2 - r_x^2) \cdot \frac{dr_x}{dz} \quad (3.32)$$

Durch Einsetzen von Gl. (3.27), (3.30) und Gl. (3.32) gewinnt man die Bestimmungsgleichung für den Verlauf von $r_x(z)$:

$$\frac{dr_x}{dz} = \frac{2}{Z \cdot (r_a^2 - r_x^2)} \cdot \left\{ \lambda_i \cdot \mu_i \cdot \rho \cdot g \cdot (k(r_i) - z) \cdot r_i + \lambda_a \cdot \mu_a \cdot [\rho \cdot g \cdot (k(r_a) - z) + Z \cdot (r_a - r_x)] \cdot r_a \right\} \quad (3.33)$$

Diese inhomogene Differentialgleichung ist mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens auch für unterschiedliche Oberflächenkonturen $k(r)$ numerisch lösbar.

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Wandschubspannung nur im Bereich von $r_x(z) \leq r \leq r_a$ abgebaut werden kann.

Im Bereich des Schubspannungsabbaus wird ein ungescherter Schüttgutblock vorausgesetzt, da nur im elastischen Zustand die vertikalen Anteile der Wandschubspannung weitergeleitet werden können. Abscheren bedeutet, dass die Schubspannung bis zu dieser Scherzone vollständig abzubauen ist. Hierzu sind die Faktoren entsprechend anzupassen. Ausgangspunkt für die Bestimmung der beiden Faktoren ist die Konstanz der Radialspannung $\sigma_r(r_a)$, die vom radialen Verlauf der Wandschubspannung unabhängig sein muss. Ein rascher Abbau der Wandschubspannung bedingt folglich ein größeres Z und ein verkleinertes λ_a . Der Maximalwert von Z geht aus dem kleinstmöglichen Spannungsverhältnis λ_a hervor.

Weiterhin gilt $r_i \leq r_x(z) \leq r_a$ für den Radius r_x . Der Radius r_x kann folglich als Mindestwert nur den Wellenradius annehmen.

Für die Abbildung der Förderbewegung in einem vertikalen Schneckenförderer muss das Spannungsmodell hinsichtlich der Wendelsteigung angepasst werden. Im vertikalen Förderer bewegt sich das Fördergut, wie aus Kap. 2 bereits bekannt ist, auf einer Schraubenlinie. Dabei wirkt auf das Gut neben einer Drehbewegung auch eine translatorische Bewegung entgegen der Schwerkraft ein. Dies entspricht dem in Kap. 3.1.1 eingeführten Fall c).

Das bisher hergeleitete Spannungsmodell gilt allerdings nur für einen ebenen Spannungszustand. Die Wirkung der Schneckenwendelsteigung ist daher mit einer Korrektur der Erdbeschleunigung zu erweitern [Ertl-88].

Die Erdbeschleunigung g wird hierzu durch die Ersatzgröße \bar{g}_b , also die auf die Schneckenwendel wirkende Komponente von g ersetzt:

$$\bar{g}_b = g \cdot \cos \alpha(r) \quad (3.34)$$

Der Bestimmungsgleichung für den Verlauf von $r_x(z)$ folgt damit aus Gl. (3.33) nach [Ertl-88]:

$$\begin{aligned} \frac{dr_x}{dz} = \frac{2}{Z \cdot (r_a^2 - r_x^2)} \cdot \{ & \lambda_i \cdot \mu_i \cdot \sin \psi_i \cdot \rho \cdot g \cdot \cos \alpha(r_i) \cdot (k(r_i) - z) \cdot r_i + \\ & + \lambda_a \cdot \mu_a \cdot \sin \psi_a \cdot [\rho \cdot g \cdot \cos \alpha(r_a) \cdot (k(r_a) - z) + Z \cdot (r_a - r_x)] \cdot r_a \} \end{aligned} \quad (3.35)$$

3.1.3 Bestimmung der Gutverteilung in der Schneckenkammer

Mit Hilfe der Spannungsverhältnisse von Horizontal- und Vertikalspannungen, die hier zugleich als Hauptspannungen definiert sind, ist nun die Bestimmung der Oberflächenkontur $k(r)$ (s. Abbildung 3-8) möglich.

Aufgrund der Spannungsfreiheit an der Schüttgutoberfläche [Ertl-88] betrachtet man den Grenzwert

$$\lim_{z \rightarrow k(r)} \lambda(r, z) = \lim_{z \rightarrow k(r)} \frac{d\sigma_r}{d\sigma_z}. \quad (3.36)$$

Die totalen Differentialquotienten $d\sigma_r$ und $d\sigma_z$, abgeleitet aus Gl. (3.8) und Gl. (3.10) lauten

$$d\sigma_r = \rho \cdot r \cdot \omega_a^2(r) \cdot dr - \rho \cdot r \cdot \omega_a^2(r) \cdot \frac{1}{k'(r)} dz \quad \text{und} \quad (3.37)$$

$$d\sigma_z = \rho \cdot g \cdot k'(r) \cdot dr - \rho \cdot g \cdot dz. \quad (3.38)$$

Eingesetzt in Gl. (3.36) folgt das Spannungsverhältnis λ an der Oberfläche zu:

$$\lim_{z \rightarrow k(r)} \lambda = \frac{r \cdot \omega_a^2(r)}{g \cdot k'(r)} \quad (3.39)$$

Durch Umstellung von Gl. (3.39) gelangt man zur Steigung der Oberflächenkontur in radialer Richtung:

$$k'(r) = \frac{r \cdot \omega_a^2(r)}{g \cdot \lambda(r, z = k(r))} \quad (3.40)$$

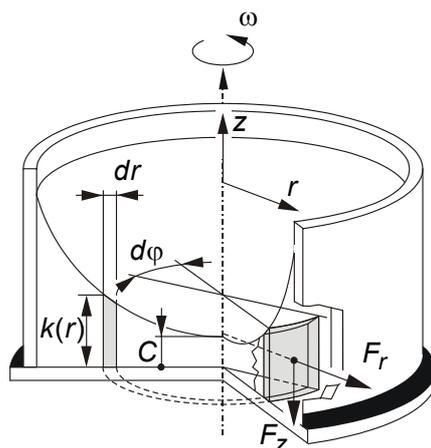


Abbildung 3-8: Darstellung eines Sektorelementes mit der Breite $d\varphi$, der Dicke dr und der Höhe $k(r)$ in einem drehbewegten Topf sowie der am Sektorelement angreifenden Kräfte F_r in radialer und F_z in vertikaler Richtung

Parallel zum Spannungsmodell ist auch bei der Bestimmung der Gutkontur die Erdbeschleunigung g unter Berücksichtigung der Wendelsteigung $\alpha(r)$ zu korrigieren.

Gl. (3.40) erhält dann folgende Form:

$$k'(r) = \frac{r \cdot \omega_a^2(r)}{g \cdot \cos \alpha(r) \cdot \lambda(r, z = k(r))} \quad (3.41)$$

Die Integration der Gl. (3.41) führt zur Stammfunktion der Oberflächenkontur $k(r)$:

$$k(r) = \int_0^r k'(t) dt + C = \int_0^r \frac{t \cdot \omega_a^2(t)}{g \cdot \cos \alpha(t) \cdot \lambda(t, z = k(t))} dt + C \quad (3.42)$$

Die Integrationskonstante C legt die Höhenlage der Schüttgutkontur in der Schneckenkammer fest. Mit dieser kann die Gutbeladung des Förderers berechnet werden.

Das Fördergut nimmt nicht das gesamte, in der Schneckenkammer zur Verfügung stehende Volumen in Anspruch, sondern lediglich einen bestimmten Anteil. Dabei kann sich das Gut in Abhängigkeit von der Gutwinkelgeschwindigkeit $\omega_a(r)$ und der Füllmenge in grundsätzlich vier unterschiedlichen Konfigurationen in der Schneckenkammer ausbreiten [Ertl-88; Rad-72; Gab-81]. Diese Füllkonfigurationen (s. Abbildung 3-9) unterscheiden sich in der Lage der Berührungsorte von Gutoberfläche und Berandung der Schneckenkammer. Bei Typ I grenzt das Fördergut beispielsweise sowohl an der Schneckenwelle, als auch an der Schneckenwendel und an dem Förderrohr an, währenddessen bei Typ IV Schneckenwendel Unter- und Oberseite sowie das Förderrohr vom Gut berührt werden.

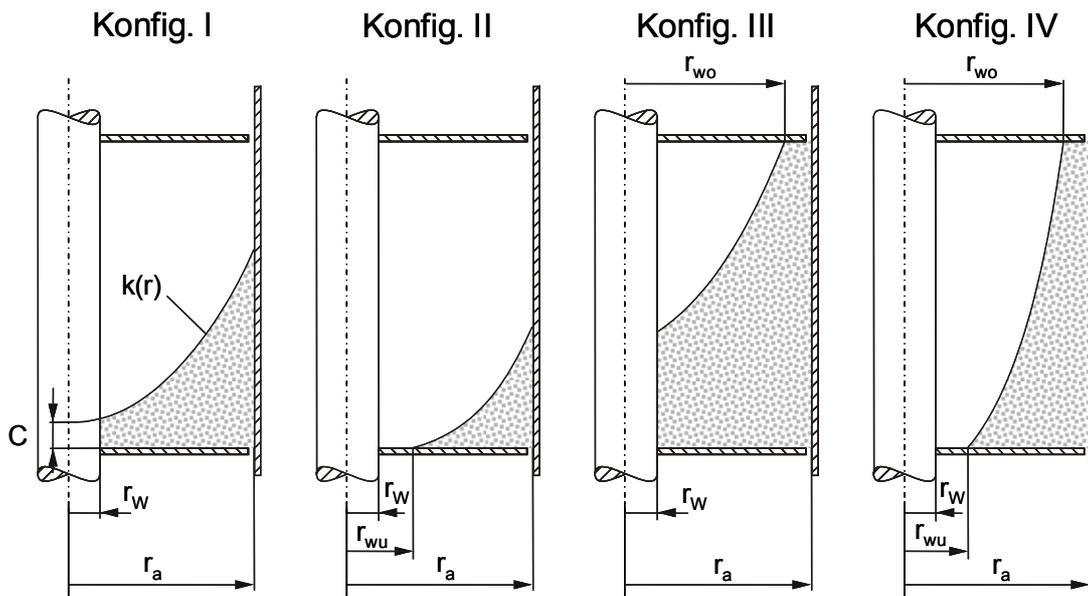


Abbildung 3-9: Vier mögliche Füllungskonfigurationen in der Schneckenkammer

Die Gutbeladung wird durch den Füllungsgrad φ charakterisiert. Dieser ist analog zum horizontalen Schneckenförderer als das Verhältnis von Schüttgutvolumen zu Kammervolumen und damit als Verhältnis des tatsächlichen zum theoretisch möglichen Volumen definiert.

$$\varphi = \frac{V_{\text{tatsächlich}}}{V_{\text{theoretisch}}} \quad (3.43)$$

Das theoretische Volumen des Schneckenförderers legen die Konstruktionsparameter Ganghöhe H , Wendeldicke s , Wellenaußenradius r_i und Rohrrinnenradius r_a fest, wodurch sich je Gang ein Kammervolumen von

$$V_{\text{theoretisch}} = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_a} (H - s) \cdot r \, dr \, d\varphi \quad (3.44)$$

gegenüber dem tatsächlichen, vom Schüttgut eingenommenen Volumen $V_{\text{tatsächlich}}$ ergibt.

Mit Gl. (3.42) und der Guldinschen Regel zur Volumenberechnung von Rotationskörpern ergibt sich allgemein für $V_{\text{tatsächlich}}$:

$$V_{\text{tatsächlich}} = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_a} r \left[\int_0^r \frac{t \cdot \omega_a^2(t)}{g \cdot \cos \alpha(t) \cdot \lambda(t, z = k(r))} dt + C \right] dr d\varphi \quad (3.45)$$

Damit ergibt sich mit Gl. (3.44), (3.45) und Gl. (3.43) der Füllungsgrad zu:

$$\varphi = \frac{2}{(H-s) \cdot (r_a^2 - r_i^2)} \cdot \int_{r_i}^{r_a} r \int_0^r \left[\frac{t \cdot \omega_a^2(t)}{g \cdot \cos \alpha(t) \cdot \lambda(t, z = k(r))} dt + C \right] dr \quad (3.46)$$

Durch Auflösen nach der Integrationskonstante C kann die Oberflächenkontur $k(r)$ in Gl. (3.42) in Abhängigkeit des Füllungsgrads φ beschrieben werden. Eine geschlossene Lösung ist jedoch nur für die Füllungskonfiguration I möglich. Bestimmungsgleichungen für die Durchstoßradien der Gutkontur an Wendeloberseite bzw. Wendelunterseite, r_{wo} und r_{wu} , existieren nicht, wodurch eine Lösung für die Konfigurationen II bis IV nur iterativ erzielt werden kann. Unter Vorgabe von λ und ω_a ist die Höhenlage der Gutkontur so lange zu verändern, bis das gewünschte Volumenverhältnis φ erreicht ist. Hieraus ergeben sich dann auch die Werte für r_{wo} und r_{wu} . Die Schüttgutvolumina lassen sich in Abhängigkeit vom Füllungstyp darstellen.

Die Bestimmungsgleichungen für den jeweiligen Konturverlauf ergeben sich hieraus und lauten wie folgt:

$$K_t = \frac{t \cdot \omega_a^2(t)}{g \cdot \cos \alpha(t) \cdot \lambda(t, z)} \quad (3.47)$$

$$k_I(r) = \int_0^r K_t dt + \varphi \cdot (H-s) - \frac{2}{(r_a^2 - r_i^2)} \cdot \int_{r_i}^{r_a} r \int_0^r K_t dt dr \quad (3.48)$$

$$k_{II}(r) = \int_0^r K_t dt + \varphi \cdot (H-s) \cdot \frac{(r_a^2 - r_i^2)}{(r_a^2 - r_{wu}^2)} - \frac{2}{(r_a^2 - r_{wu}^2)} \cdot \int_{r_{wu}}^{r_a} r \int_0^r K_t dt dr \quad (3.49)$$

$$k_{III}(r) = \int_0^r K_t dt + \frac{(H-s)}{(r_{wo}^2 - r_i^2)} \cdot [\varphi \cdot (r_{wo}^2 - r_i^2) - (r_a^2 - r_{wo}^2)] - \frac{2}{(r_{wo}^2 - r_i^2)} \cdot \int_{r_i}^{r_{wo}} r \int_0^r K_t dt dr \quad (3.50)$$

$$k_{IV}(r) = \int_0^r K_t dt + \frac{(H-s)}{(r_{wo}^2 - r_{wu}^2)} \cdot [\varphi \cdot (r_a^2 - r_i^2) - (r_a^2 - r_{wo}^2)] - \frac{2}{(r_{wo}^2 - r_{wu}^2)} \cdot \int_{r_{wu}}^{r_{wo}} r \int_0^r K_t dt dr \quad (3.51)$$

Bei dem Konfigurationstyp IV berührt die Oberflächenkontur die Kammerberandung an der Wendelober- wie auch an der Wendelunterseite (s. Abbildung 3-9). Daher muss stets folgende Randbedingung erfüllt sein:

$$H = \left(\int_0^{r_{wo}} K_t dt - \int_0^{r_{wu}} K_t dt \right) + s \quad (3.52)$$

Um die Bewegungsvorgänge im Förderer noch realitätsnaher abzubilden, werden in dem Modell von *Greinwald* auch Relativbewegungen zwischen einzelnen definierten Schüttgutschichten erfasst. Hierzu wird nach *Greinwald* [Grei-94], im Gegensatz zur Einzelförderung, bei der ein Einzelkörper bzw. ein kompakter Gutblock betrachtet wird, das Schüttguthaufwerk in eine Anzahl M unabhängiger, sogenannter Sektorelemente endlicher Breite und Bogenlänge unterteilt. Die auf diese und zwischen den Elementen wirkenden Kräfte werden entsprechend den vorher beschriebenen Zusammenhängen analytisch hergeleitet und einer Gleichgewichtsbetrachtung unterzogen. Dies wird bei *Greinwald* [Grei-94], *Vollmann* [Voll-00] und *Fottner* [Fo-02] detailliert beschrieben.

Nach *Vollmann* [Voll-00] wird das Modell folgendermaßen charakterisiert:

- In die Berechnung der Gutbewegung gehen die Gleichgewichtsbetrachtungen in der Schüttgutfüllung, also an den Grenzflächen der Sektorelemente, mit ein.
- Der verteilte Abbau von axialen Wandschubspannungen im Schüttgutinneren wird berücksichtigt.
- Die Förderergeometrie, speziell die lokale Wendelgeometrie in Gestalt der Wendelsteigung $\square(r)$, kann stärker in die Gleichgewichtsbetrachtungen eingearbeitet werden.
- Sie erlaubt eine Berücksichtigung von Verschiebungen bzw. relativen Gleitbewegungen entlang der Grenzflächen zwischen den Sektorelementen.

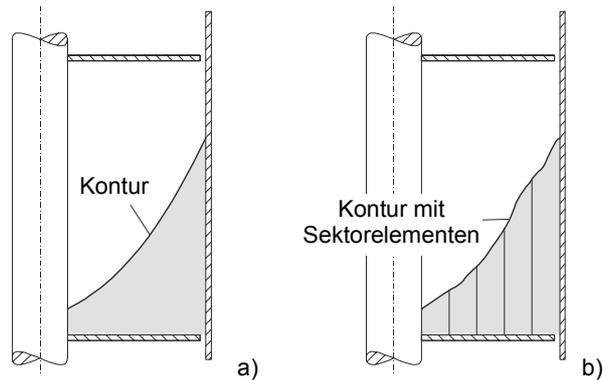


Abbildung 3-10: Betrachtung der Gutfüllung a) als kompakten Block analog zur Einzelkörpertheorie und b) bestehend aus Sektorelementen

Im Modell werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Es findet ein über der Förderstrecke stationärer Fördervorgang mit einer für einen Betriebszustand konstanten Fördergutedichte und konstanter Füllungskonfiguration statt.
- Ein Sektorelement kann relativ zum äußeren, benachbarten Element auf der Wendel abrutschen, wird aber stets nach oben gefördert.
- Die sich bei relativem Abgleiten zweier Sektorelemente einstellende Scherung wird auf eine Gleitebene zwischen den Elementen reduziert.
- Nicht berücksichtigt wird der Einfluss des Schneckenpaltens hinsichtlich der Rieserverluste für die Berechnung der Gutbewegung und für den Massenstrom \dot{m} .
- Es wird keine einheitliche Sektorelementbreite vorausgesetzt. Vorgegeben wird lediglich eine frei wählbare, endliche Anzahl M von Sektorelementen, in welche die Gutfüllung eingeteilt wird. Hierbei wird das äußerste Element, das an die Rohrwand grenzt, dem axialen Schubspannungsabbau angepasst, wie in Abbildung 3-11 dargestellt ist.
- Gleitvorgänge können lediglich in den Trennfugen auftreten.

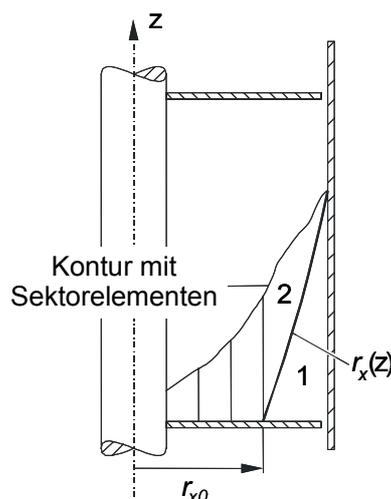


Abbildung 3-11: Schüttgutfüllung, aufgeteilt in eine endliche Anzahl von Sektorelementen, bei vollständigem Abbau der axialen Wandschubspannungen im äußersten Element: Zone 1 (wandschubspannungsbehaftet), Zone 2 (wandschubspannungsfrei) [Grei-94]

3.1.4 Volumen- und Massenstrom

Die Fördergutbewegung und die Füllungskonfiguration sind damit eindeutig beschrieben und berechenbar. Folglich kann nun der Volumenstrom des vertikalen Schneckenförderers berechnet werden. Allgemein kann dieser aus dem Produkt einer durchströmten Fläche und einer hierzu senkrechten Geschwindigkeitskomponente v_z des Förderguts angegeben werden. In Verbindung mit dem Füllungsgrad φ des Förderers lautet dieser:

$$I_V = \left(1 - \frac{S}{H}\right) \cdot A_0 \cdot \varphi \cdot v_z = \left(1 - \frac{S}{H}\right) \cdot \pi \cdot (r_a^2 - r_i^2) \cdot \varphi \cdot v_z \quad (3.53)$$

Diese Gleichung ist aber nur gültig, wenn keine Relativbewegungen im Schüttgut auftreten. Gleiten hingegen die in Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 gezeigten Sektorelemente aneinander ab, berechnet sich der gesamte Volumenstrom aus der Summe der Teilvolumenströme der einzelnen Sektorelemente. Die Teilfüllungsgrade φ_n liefert ebenfalls das Berechnungsverfahren:

$$I_V = \sum_{n=1}^M \left(1 - \frac{s}{H}\right) \cdot \pi \cdot (r_{n+1}^2 - r_n^2) \cdot \varphi_n \cdot V_{z,n} \quad (3.54)$$

In Verbindung mit der Schüttdichte ρ kann aus dem Volumenstrom der Massenstrom berechnet werden:

$$I_m = \sum_{n=1}^M \left(1 - \frac{s}{H}\right) \cdot \pi \cdot (r_{n+1}^2 - r_n^2) \cdot \rho \cdot \varphi_n \cdot v_{z,n} = \rho \cdot I_V \quad (3.55)$$

3.2 Bestimmung des Schwerpunktsradius r_{SP}

3.2.1 Gutverteilung in der Schneckenkammer

Aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten und des vertikalen Förderprinzips (basierend auf der Fliehkraft des Förderguts) stellt der radiale Abstand des Kammervolumens von der Schneckenachse eine wichtige Größe auf dem Weg zu neuartigen Auslegungsverfahren für vertikale Schneckenförderer dar.

Die Fliehkraft ermittelt sich aus der Masse m im Förderer, der Gutwinkelgeschwindigkeit ω_a und dem Schwerpunktsradius r_{SP} :

$$F_z = m \cdot r_{SP} \cdot \omega_a^2 \quad (3.56)$$

Für die Berechnung des Schwerpunktsradiuses r_{SP} ist eine Integration über die Gutkontur der Kammerfüllung erforderlich. Abbildung 3-12 veranschaulicht dies.

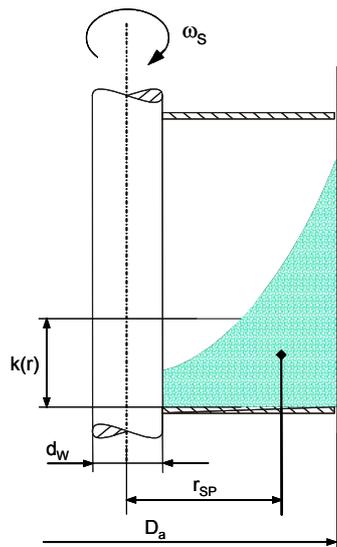


Abbildung 3-12: Radialer Abstand des Gutschwerpunkts r_{SP} von der Schneckenachse

Der Berechnung wird dabei der Ansatz von *Rademacher* [Rad-72] und *Gabler* [Gab-81], die von einer parabolischen Verteilung des Förderguts in der Schneckenkammer ausgehen, zugrunde gelegt. Effekte, die in Abhängigkeit schüttgutspezifischer Eigenschaften und Betriebsbedingungen zu einer Veränderung der Gutkontur führen, wie z. B. das Durchrieseln durch den Schneckenpalt, werden hierbei vernachlässigt. Dies ist jedoch ohne Einschränkungen möglich, da die Auswirkungen dieser Effekte auf den Leistungsbedarf durch die in Kapitel 5.2 entwickelten schüttgut- und betriebsparameterspezifischen empirischen Leistungskenngrößen erfasst werden.

Die Form der Parabel, die durch die Konturgleichung $k(r)$ beschrieben wird, hängt von folgenden Betriebs-, Konstruktions- und Stoffparametern ab:

- Schneckendrehzahl
- Füllungsgrad
- Gutwinkelgeschwindigkeit
- Reibwert zwischen Gut/Rohr und Gut/Wendel
- Schneckendurchmesser
- Wellendurchmesser
- Ganghöhe

Nach Abbildung 3-13 kann der Konturverlauf des Guts in vier charakteristische Bereiche, die sogenannten Füllungskonfigurationen, eingeteilt werden. Diese stellen sich nach Gabler [Gab-81] in Abhängigkeit von Betriebs- und Konstruktionsparametern ein.

Die Füllungskonfiguration I ist dadurch gekennzeichnet, dass das Schüttgut sowohl die Welle als auch den Außenzylinder berührt. Aus einer relativ geringen Winkelgeschwindigkeit des Förderguts resultiert ein flacher Oberflächenverlauf.

Bei der Füllungskonfiguration II herrscht eine im Gegensatz zu Konfiguration I deutlich höhere Winkelgeschwindigkeit des Guts. Das Gut ist hier nicht mehr im Kontakt mit der Welle. Der Grenzzustand, an dem das Gut gerade nicht mehr im Kontakt mit der Welle ist, wird durch die Grenzwinkelgeschwindigkeit $\omega_{grenz I}$, die eine Funktion des Füllungsgrads ist, beschrieben.

Füllungskonfiguration III wird erreicht, wenn sich der Füllungsgrad vergrößert und die Gutwinkelgeschwindigkeit weiter zunimmt. An dieser Stelle erreicht das Gut die Unterseite des nächsten Schneckenflügels.

Unabhängig von der Höhe des Füllungsgrads stellt sich bei sehr hohen Winkelgeschwindigkeiten die Füllungskonfiguration IV ein. Diese wird dadurch charakterisiert, dass das Gut nicht die Welle aber die Unterseite des folgenden Schneckenflügels berührt.

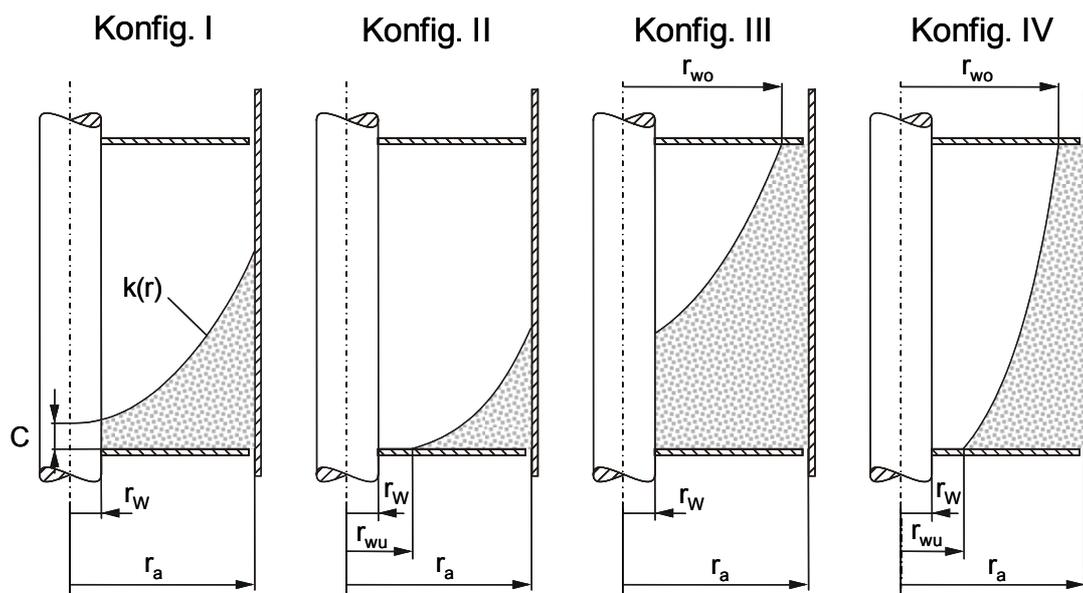


Abbildung 3-13: Vier mögliche Füllungskonfigurationen in der Schneckenkammer mit zugehörigem Konturverlauf $k(r)$

Im Folgenden werden die einzelnen Füllungskonfigurationen in Abhängigkeit der genannten Einflussparameter von einander abgegrenzt und darauf aufbauend der Schwerpunktsradius ermittelt.

3.2.2 Der Schwerpunktsradius mit verschiedenen Gutkonturen

Wie bereits erläutert, beeinflusst sowohl die Gutwinkelgeschwindigkeit als auch der Füllungsgrad die Verteilung des Guts in der Schneckenkammer. Die Darstellung und Ermittlung der Konturfunktion $k(r)$ des Schüttguts in der Kammer erfolgt daher in Abhängigkeit dieser Betriebsparameter, wobei grundsätzlich die zuvor aufgezeigten vier Konfigurationen zu unterscheiden sind.

Als Ausgangsgleichung dient wie bei *Gabler* [Gab-81] die Parabelgleichung für rotierende Flüssigkeiten. Diese lautet wie folgt:

$$k(r) = k^* + \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \cdot r^2 \quad (3.57)$$

Der Ordinatenwert k^* wird dabei durch Gleichsetzen der *Guldinschen Regel* und in Verbindung mit dem allgemeinen Ansatz zur Volumenbestimmung bestimmt. Die *Guldinsche Regel* zur Volumenbestimmung lautet:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot \int_{r_i}^{r_a} r \cdot k(r) \cdot dr \quad (3.58)$$

Das Schüttgutvolumen V in der Kammer ergibt sich mit dem Füllungsgrad φ :

$$V = \varphi \cdot (r_a^2 - r_i^2) \cdot \pi \cdot H \quad (3.59)$$

Einsetzen von Gl. (3.57) in Gl. (3.58) und Gleichsetzen mit Gl. (3.59) ergibt:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot \int_{r_i}^{r_a} r \cdot \left(k^* + \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \cdot r^2 \right) \cdot dr = \varphi \cdot (r_a^2 - r_i^2) \cdot \pi \cdot H \quad (3.60)$$

Die Integration von Gl. (3.60) liefert die Bestimmungsgleichung für den Ordinatenwert k^* des Parabelscheitels.

Unter den jeweiligen Randbedingungen ergeben sich für die vier Füllungskonfigurationen nach Abbildung 3-13 folgende Konturfunktionen:

Füllungskonfiguration I:

$$k(r)_I = \varphi \cdot H - \frac{\omega_a^2}{4 \cdot g} \cdot (r_a^2 + r_i^2) + \frac{\omega_a^2}{2 \cdot g} \cdot r^2 \quad (3.61)$$

Füllungskonfiguration II:

$$k(r)_{II} = \omega_a \cdot r_a \cdot \sqrt{\frac{H \cdot \varphi \cdot (r_a^2 - r_i^2)}{g \cdot r_a^2}} - \frac{\omega_a^2}{2 \cdot g} \cdot (r_a^2 - r^2) \quad (3.62)$$

Füllungskonfiguration III:

$$k(r)_{III} = H - \omega_a \cdot \sqrt{\frac{H}{g} \cdot \left[r_a^2 \cdot \left(1 - \varphi \cdot \frac{r_a^2 - r_i^2}{r_a^2} \right) - r_i^2 \right]} + \frac{\omega_a^2}{2 \cdot g} \cdot (r^2 - r_W^2) \quad (3.63)$$

Füllungskonfiguration IV:

$$k(r)_{IV} = H + \frac{\omega_a^2}{2 \cdot g} \cdot \left[r^2 - \frac{H \cdot g}{\omega_a^2} - r_a^2 \cdot \left(1 - \varphi \cdot \frac{r_a^2 - r_i^2}{r_a^2} \right) \right] \quad (3.64)$$

Durch Integration über die Konturfunktionen $k(r)_I$ bis $k(r)_{IV}$ kann der Flächeninhalt, den das Schüttgut in der Schneckenkammer einnimmt, bestimmt werden:

$$A = \int_{r_i}^{r_a} k(r) \cdot dr \quad (3.65)$$

Daraus ergibt sich der radiale Abstand des Schüttgutschwerpunkts von der Schneckenachse r_{SP} in Abhängigkeit der jeweiligen Konturfunktion:

$$r_{SP} = \frac{1}{A} \cdot \int_{r_i}^{r_a} r \cdot k(r) \cdot dr \quad (3.66)$$

4 Experimentelle Untersuchungen

Um Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer entwickeln zu können, müssen zuerst die Abhängigkeiten der einzelnen Einflussparameter voneinander dargestellt werden. Vorangegangene Untersuchungen am Lehrstuhl fml zeigten, dass Betriebs- und Schüttgutparameter Einfluss auf das Förderverhalten und den Leistungsbedarf im Schneckenförderer haben [Fo-02], [Gün-02a], [Gün-02b], [Gün-02c] [Ro-04].

Um eine geeignete Basis für die Entwicklung der Auslegungsverfahren zu schaffen, wurden zahlreiche Versuche, unter Variation von Betriebsparametern (Drehzahl, Füllungsgrad, Neigung der Schnecke), der Baugröße (verschiedene Förderergrößen für den horizontalen bis leicht geneigten Förderbereich) und unter Verwendung verschiedener Schüttgüter gemacht.

In Kapitel 4 sind der Aufbau der Versuche sowie die Ergebnisse aus den Versuchen beschrieben.

4.1 Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

Für die nötigen Versuche steht der Großversuchsstand des Lehrstuhls fml zur Verfügung. Dieser wurde im Rahmen einer Forschungskooperation zusammen mit der Firma Krupp Fördertechnik aufgebaut und 1998 in Betrieb genommen. Sie entspricht in ihrer Größe und den technischen Daten (Förderleistung max. 100 t/h bei Schüttdichte 1 t/m³) mehr einer industriellen Anlage als einer Versuchsanlage.

Der modulare Aufbau ermöglicht einen einfachen Umbau und Austausch einzelner Komponenten und sichert damit die, für umfangreiche Versuche, nötige Flexibilität.

4.1.1 Aufbau der Versuchsanlage

Die konstruktive Gestaltung der Förderorgane ermöglicht den Einsatz und die Analyse von im Massengutumschlag üblichen, feinkörnigen, grobkörnigen bis stückigen Schüttgütern wie z. B. Getreide, Kohle und Schwefel.

Nach der Erweiterung der Versuchsanlage durch einen leicht zu neigenden Förderer besteht diese aus folgenden, getrennt von einander zu betrachtenden Funktionsbauteilen bzw. Förderorganen:

4 Experimentelle Untersuchungen

- Zuführorgan (horizontaler Schneckenförderer mit geteilter, gegenläufiger Wendel)
- Vertikalschneckenförderer
- Horizontaler bis leicht geneigter Schneckenförderer (0° bis 20° ; wahlweise mit Durchmesser $D = 200$ mm oder $D = 250$ mm)

Alle Antriebe der Schneckenförderer, sowie die Antriebe des Portal- und Katzfahrwerkes sind mittels Frequenzumrichter stufenlos regelbar.

Die genauen technischen Daten der Versuchsanlage können Tabelle 4-1 entnommen werden.



Abbildung 4-1: Großversuchsanlage des Lehrstuhls fml

Neben den konstruktiven Anforderungen konnten ebenso zahlreiche weitere Anforderungen realisiert werden. Hierzu zählt die Möglichkeit im Rahmen der Versuchsdurchführung stationäre Betriebspunkte einstellen zu können. Durch geeignete Wahl der Bunkerlänge ist die Einstellung eines stationären Betriebspunktes selbst bei problematischen Gütern und Betriebsbedingungen gewährleistet (stationäre Betriebspunkte s. Kap. 4.4.1). Außerdem ist ein einfaches Austauschen des Versuchsguts möglich.

Tabelle 4-1: Technische Daten der Großversuchsanlage am Lehrstuhl fml

	Zuführschnecke	Vertikalförderer	Horizontalförderer
Schneckendurchmesser	400 mm	260 mm	200 bzw 250 mm
Ganghöhe	400 mm	230 mm	200 bzw 250 mm
max. Drehzahl	100 1/min	560 1/min	400 1/min
Förderlänge	1,5 m	7 m	2 • 3 m
Antriebsleistung	1,5 kW	30 kW	5,5 kW

4.1.2 Versuchsdurchführung

Während der Versuchsdurchführung ist das Schüttgut in einem 6 m x 3 m x 1,5 m großen Bunker gelagert. Von dort wird es bahnen- und schichtweise mit Hilfe der Zuführschnecke abgefräst und über die Vertikal- und Horizontalschnecke in einen zweiten Bunker gefördert. Um das Abgleiten einzelner Gutschichten im Zuführbereich zu verhindern und damit einen gerichteten Transport des Materials in Richtung der Vertikalschnecke zu ermöglichen, ist die Zuführschnecke mit einer Doppelwendel versehen.

Durch den Druckaufbau beim Abfahren der Gutschichten wird damit eine Wirkung ähnlich einer Stopfschnecke erzeugt. Unter dem axialen Förderdruck der Zuführschnecke und dem in Fahrtrichtung der Zuführschnecke entstehenden Druck, der durch das Zusammenschieben des Schüttguthaufwerks entsteht, wird das Schüttgut in den Vertikalförderer geschoben. Dieser fördert das Gut sieben Meter vertikal nach oben. Die Vertikalschnecke besteht aus drei miteinander verflanschten Schneckenabschnitten und ist über ein Fußlager, ein oder zwei Zwischenlager sowie ein Kopflager abgestützt. Für gezielte Zwischenlagerversuche kann die Anzahl der Zwischenlager, wie bereits erwähnt, im vertikalen Bereich auf nur mehr eines reduziert werden.

Im weiteren Verlauf wird das Schüttgut über eine Schurre und ein Fallrohr in die Prallplattenwaage gelenkt. Durch den Einbau der Waage direkt in den Schüttgutstrom, kann der geförderte Systemmassenstrom der Versuchsanlage kontinuierlich ohne Unterbrechung des Förderstromes gemessen werden. Über teleskopierbare Schurren, die erforderlich sind, um die Eintauchtiefe der

Vertikalschnecke und damit den Volumen- bzw. Massenstrom zu variieren, fällt das Schüttgut in die Mitte des darunter liegenden und insgesamt sechs Meter langen Horizontalförderers (effektive Förderlänge jeweils 3 m). Somit kann mit Hilfe der Drehrichtung des Förderers die Förderrichtung des Schüttgutes bestimmt werden.

4.1.3 Die Messtechnik der Versuchsanlage

Um die nötigen Daten während der Versuchsdurchführung aufnehmen zu können, ist die Versuchsanlage mit einer Reihe von messtechnischen Komponenten ausgerüstet.

4.1.3.1 Messung des Massenstroms

Der gefahrene Massenstrom wird, wie erwähnt, ohne Unterbrechung des Förderstromes in einer Prallplattenwaage gemessen. Diese ist in einer Schurre zwischen vertikalem und horizontalem Schneckenförderer installiert. Das Fördergut wird nach dem Verlassen des Vertikalförderers über eine schräge Schurre einem Fallrohr zugeführt. Damit wird erreicht, dass eine mögliche Differenz in der Vertikalkomponente der Gutgeschwindigkeit ausgeglichen wird. Das Gut hat somit, unabhängig von den Betriebsparametern des Vertikalförderers, gleichbleibende Eintrittsbedingungen am Einlass der Prallplattenwaage. Beim Auftreffen auf die schräge Platte des Massenstrommesssystems wird das Gut umgelenkt. Von der auftretenden Kraft wird lediglich die horizontale Komponente gemessen und als Messgröße für den jeweiligen Massenstrom ausgewertet. Durch dieses Vorgehen wird sichergestellt, dass auch bei Ablagerungen auf der Prallplatte, wie sie bei anbackenden Schüttgütern zu erwarten sind, keine Verfälschungen des Messergebnisses auftreten.

4.1.3.2 Messung der Drehmomente und Drehzahlen

Um eine einfache, genaue und zugleich zuverlässige Messung der Motordrehmomente durchführen zu können, werden diese bei den Messreihen mit Hilfe der Frequenzumrichter direkt, d. h. über den elektrisch aufgenommenen Wirkstrom gemessen. Bei den installierten Antriebsumrichtern handelt es sich um Geräte, die nach dem Prinzip des feldorientierten Umrichters arbeiten. Diese berechnen für jeden Betriebszustand aus den online gemessenen Größen Drehzahl und Stromstärke der einzelnen Phasen sowie aus dem über Kennfeldern berücksichtigten Leistungsfaktor $\cos \varphi$ des Motors die aktuellen Werte des Wirk- und

Scheinstroms. Damit kann intern hochauflösend der aktuelle Wert des vom Motor verarbeiteten Wirkstroms aufgezeichnet werden. Dieser Wert wird im Anschluss an die Messung software-technisch ausgelesen, in Antriebsdrehmomente umgerechnet und von der Messdatenauswertung weiterverarbeitet.

Durch die hochauflösende Aufzeichnung können dynamische und kurzzeitig auftretende Effekte, die zu einer Drehmomenterhöhung führen, wie z. B. bei Kornzermahlung im Spalt, nachvollzogen werden. Auch sind periodisch auftretende Effekte, wie sie bei der Gutaufnahme und -abgabe sowie an den Zwischenlagern entstehen, zu erkennen. Mit Hilfe des gemeinsam ermittelten Verlaufs von Drehzahl und Drehmoment können diese zugeordnet werden. Eine anschließende Filterung des aufgezeichneten Messsignals, um derartige Einflüsse zu eliminieren, ist problemlos durchführbar.

Neben der Erfassung der Schneckendrehzahlen werden auch die Drehzahlen des Portalfahrwerks und des Katzfahrwerks gemessen und geregelt. Die Regelung der Katzfahrwerk Drehzahl ist zur Einstellung des Massenstroms erforderlich, da dieser über der Versuchszeit konstant gehalten werden muss (stationäre Betriebspunkte).

4.1.3.3 Messung des Füllungsgrades

Der Füllungsgrad als Einflussparameter stellt sich unter Berücksichtigung des Fördererbaugröße durch den gewählten Massenstrom und die gewählte Schneckendrehzahl ein. Streng genommen ist daher eine Messung des Füllungsgrades nicht zwingend erforderlich.

Um jedoch bestimmte Effekte, wie zum Beispiel eine Füllungsgraderhöhung durch bestimmte Betriebszustände feststellen zu können, ist es von Vorteil den Füllungsgrad zusätzlich zu messen. Daher wurde eine zusätzliche Messeinrichtung installiert.

Im Bereich der horizontalen und leicht geneigten Förderung wird der tatsächliche Füllungsgrad kontinuierlich während der Versuchsdurchführung mit Hilfe von Wägezellen bestimmt. Dies ermöglicht darüber hinaus eine Untersuchung des Fördervorganges im Förderer. Die Anordnung der messtechnischen Komponenten kann Abbildung 4-2 entnommen werden.

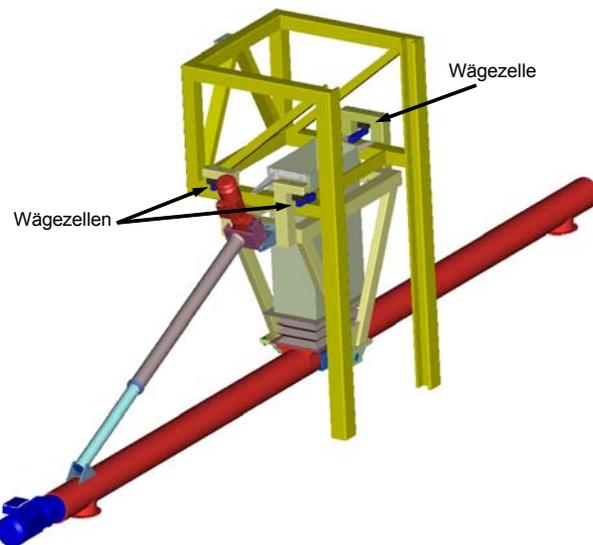


Abbildung 4-2: Einbausituation des neuen, horizontalen bis leicht neigbaren Förderers inkl. der messtechnischen Komponenten (drei Wägezellen) zur kontinuierlichen Füllungsgradmessung

Bei der Auswertung der Messdaten sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen:

- Schwingung des Förderers durch die Lagerung über die Wägezellen
- Einfluss der Förderneigung auf das Messsignal der Wägezellen
- Massenstromimpuls auf den Förderer durch das herabfallende Fördergut

Die genannten Einflüsse konnten mit speziellen Filtern am Messverstärker und Korrekturfunktionen in der Datenauswertung sehr gut eliminiert werden und beeinflussten daher die Qualität der Messdaten nicht.

4.2 Auswertung der Versuchsdaten

Während der Durchführung der Versuche werden folgende Daten aller Antriebsmotoren mittels deren Frequenzumrichter aufgezeichnet und gespeichert:

- Wirkströme der Antriebsmotoren
- Soll-Drehzahl der Antriebsmotoren
- Ist-Drehzahlen der Antriebsmotoren
- Motormomente

Zusätzlich zu den Motordaten aus den Frequenzumrichtern werden die Messdaten aus der Prallplattenwaage, der Höhenmessung sowie den Wägezellen des horizontalen bis leicht geneigten Förderers in den Frequenzumrichtern aufgenommen und gespeichert.

Die erforderlichen Antriebsmomente der Motoren $M_{M,Antr}$ werden dabei intern direkt aus der elektrisch aufgenommenen Wirkleistung $P_{el,Wirk}$ des Antriebsmotors und der mechanisch abgegebenen Leistung berechnet. Die elektrisch aufgenommene Wirkleistung $P_{el,Wirk}$ berechnet sich aus der effektiven Spannung U_{eff} , dem Scheinstrom des Motors $I_{M,Schein}$ und dem über Motorkennfelder und damit lastabhängig berücksichtigten Leistungsfaktor $\cos\varphi$ und folglich über den Wirkstrom $I_{M,Wirk}$ zu:

$$P_{el,Wirk} = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{M,Schein} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{M,Wirk} \quad (4.1)$$

Die mechanisch abgegebene Leistung P_{mech} berechnet sich aus:

$$P_{mech} = M_{M,Antr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_M = P_{el,Wirk} \cdot \eta_M \cdot \eta_G \quad (4.2)$$

In Verbindung mit dem Wirkungsgrad des Motors η_M (wird lastabhängig über Motorkennlinie berücksichtigt) und des Getriebes η_G berechnen sich die erforderlichen Motormomente nach Gl. (4.1) und Gl. (4.2):

$$M_{M,Antr} = \frac{P_{el,Wirk} \cdot \eta_M \cdot \eta_G}{2 \cdot \pi \cdot n_M} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{M,Wirk} \cdot \eta_M \cdot \eta_G}{2 \cdot \pi \cdot n_M} \quad (4.3)$$

Die Drehzahlen der Antriebsmotoren werden als nunmehr einzig unbekannte Größen über Drehzahlgeber erfasst und an die Frequenzumrichter weitergeleitet. Durch die lastabhängige Erfassung des Leistungsfaktors wird eine hohe Genauigkeit der Messtechnik erzielt.

Im Anschluss werden die Daten mit Hilfe eines Datenverarbeitungsprogramms der Fa. SEW auf einen Messrechner geladen und in Form von Text-Dateien gespeichert.

4 Experimentelle Untersuchungen

Aufgrund der umfangreichen Versuchsreihen, in Verbindung mit dem bis zu 20°-neigbaren Förderer, wurde für die Weiterverarbeitung und die strukturierte Datenablage und -auswertung der Messdaten ein vollständig neues, datenbankbasiertes Auswertungsprogramm entwickelt (Programmiersprache C++).

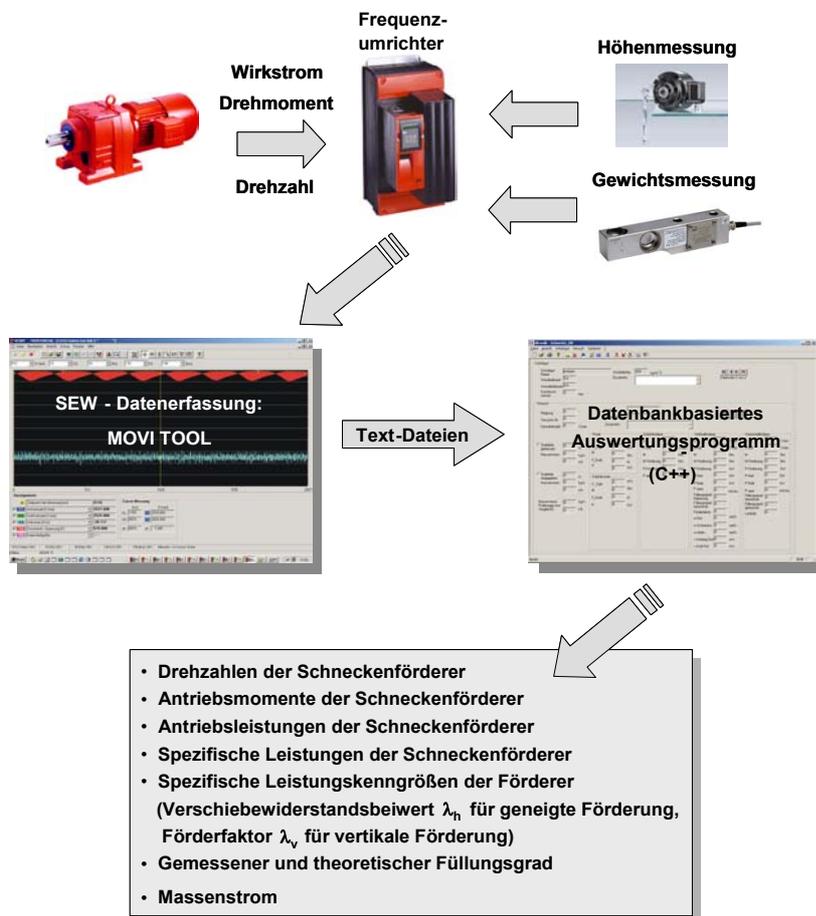


Abbildung 4-3: Erfassung und Verarbeitung der Messdaten

Auf Basis der aufgenommenen Messdaten werden folgende Größen errechnet:

- Antriebsmomente der Schneckenförderer
- Antriebsleistungen der Schneckenförderer
- Spezifische Leistungen der Schneckenförderer
- Leistungskenngrößen der Schneckenförderer
- Berechneter und gemessener Füllungsgrad im horizontalen bis leicht geneigten Förderer
- Massenstrom an der gesamten Versuchsanlage

Bei den Berechnungen wird jeweils die drehzahlabhängige Leerlaufleistung von der Leistung der Antriebsmotoren subtrahiert.

4.3 Untersuchung der Schüttgüter

Zusätzlich zu den Betriebsparametern wie Drehzahl und Füllungsgrad haben auch die Eigenschaften des Schüttguts Einfluss auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf des Förderers. Bereits in der *DIN 15262* [DIN 15262] werden daher für eine Reihe von Fördergütern wichtige schüttgutspezifische Kenngrößen festgelegt. Es handelt sich dabei um den konstanten und rein schüttgutspezifischen Verschiebewiderstandsbeiwert λ , der als fiktiver Reibwert den Einfluss des Förderguts in der Leistungsberechnung berücksichtigt.

Um sicher stellen zu können, dass sich das entwickelte Auslegungsverfahren mit seinen Leistungskenngrößen auf verschiedene Schüttgüter übertragen lässt, werden umfangreiche Versuchsreihen mit einer Vielzahl unterschiedlicher Schüttgüter mit unterschiedlichen Eigenschaften durchgeführt.

Es wurden sowohl sehr gut fließende Güter mit relativ geringer Korngröße (Weizen, Mais und Raps), als auch grobkörnige bis stückige Güter wie z. B. Kohle analysiert. Zudem wurde auf die Ergebnisse eines vorangegangenen Forschungsprojektes zurückgegriffen [Gün-02a].

Die Versuchsgüter wurden nach folgenden Kenngrößen ausgewählt:

- Schüttdichte
- Böschungswinkel
- Wandreibung und Adhäsion
- Korngröße und Korngrößenverteilung

Da die Schüttdichte keine Gutkonstante ist, wird diese für jedes Schüttgut in Abhängigkeit der übrigen Guteigenschaften bestimmt. Als Einflussparameter auf die Schüttdichte ist in diesem Zusammenhang vor allem die Korngröße und -verteilung zu nennen. Die Korngrößenverteilung wurde daher für jedes Gut vor und nach den Versuchsreihen mit Hilfe eines Korngrößenanalysegerätes [DIN 18123] untersucht.

Damit kann zusätzlich auf die Kornzerstörung während der Förderung geschlossen werden. Die Kornzerstörung wird durch die Größe des Kornes und die Breite des Schneckenpaltes (Spalt zwischen Schnecke und Förderrohr) beeinflusst, da es hier zu Guttermahlung und -quetschung kommt.

In Abbildung 4-4 ist eine Korngrößenanalyse für das Schüttgut Mais vor und nach einer Förderung dargestellt. Zu erkennen ist, dass durch die Guttermahlung eine Verkleinerung der Korngröße auftritt. Der Anteil der Partikelgröße im Bereich zwischen 4 und 10 mm nimmt nach einer Förderung um ca. 8 % ab. Gleichzeitig nimmt der Anteil der Partikelgrößen zwischen 2 bis 4 mm zu. Zusätzlich konnten nach einer Förderung Feianteile im Bereich zwischen 0.125 und 2 mm festgestellt werden.

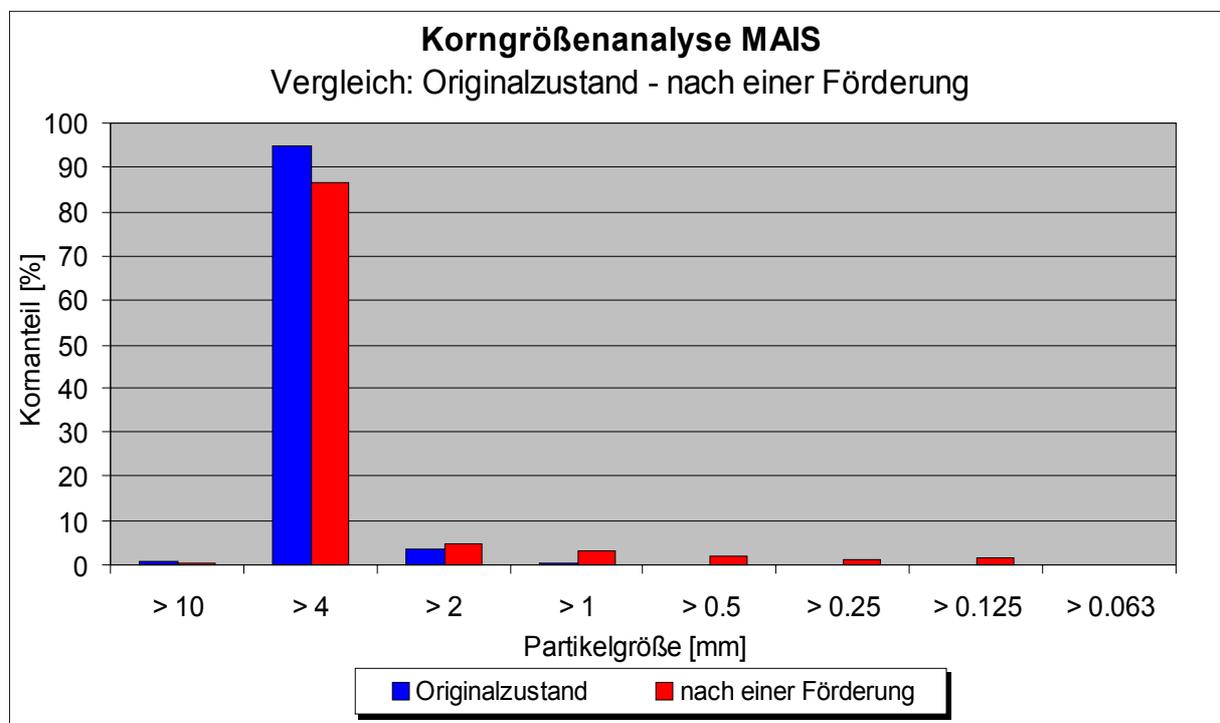


Abbildung 4-4: Korngrößenanalyse für das Schüttgut Mais

Der Böschungswinkel α charakterisiert in großem Maße den inneren Zusammenhalt des Schüttguts (Fließeigenschaften, Kohäsion). Um reproduzierbare Messungen des Böschungswinkels zu ermöglichen, wurden diese an einer speziellen Messvorrichtung durchgeführt.

Einen weiteren Einflussparameter stellt die Wandreibung dar. Sie stellt den Widerstand des Schüttgutteilchens bei seiner Bewegung an einer Stützfläche (Rohrinnenwand; Schneckenwendel) dar.

Der Wandreibwert gegen Stahl ergibt sich dabei durch den Ansatz der Coulombschen Reibung. Also durch das Verhältnis von Reibkraft zu Normalkraft.

Zur Bestimmung der Normalkraft F_n wurde die Masse einer Schüttgutpartie mittels einer Waage bestimmt und mit dem Ortsfaktor g auf die Normalkraft umgerechnet. Die Reibkraft F_{reib} wurde bei der Bewegung der Schüttgutpartie über eine Stahlplatte mit einem Federkraftmesser ermittelt. Der Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wandreibwertes zu Stahl ist in Abbildung 4-5 dargestellt.

$$\mu_{Stahl} = \frac{F_{reib}}{F_n} \quad (4.4)$$

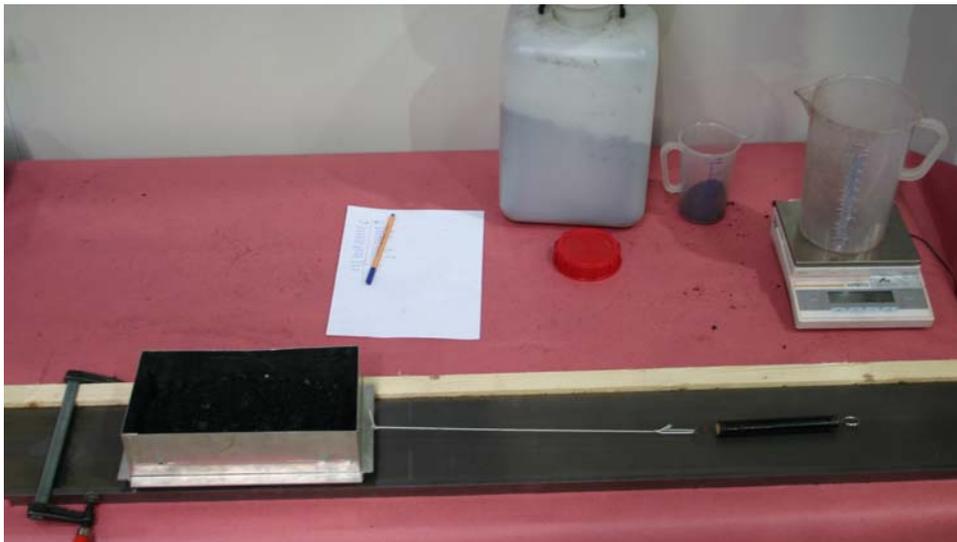


Abbildung 4-5: Versuchsaufbau zur Reibwertbestimmung

Für die Entwicklung des Auslegungsverfahrens für vertikal betriebene Hochleistungs-Schneckenförderer werden u.a. die experimentellen Ergebnisse der in Tabelle 4-2 aufgeführten Versuchsgüter herangezogen [Gün-02a]:

Tabelle 4-2: Schüttgutmechanische Eigenschaften der Versuchsgüter

Schüttgut	Schüttdichte ρ [kg/m ³]	max. Korngröße d [mm]	Böschungswinkel α [°]	Reibwert Gut / Rohr und Gut / Wendel μ [-]
Getreide				
Gerste	720	10	36	0,47
Hafer ⁵	560	14	29	0,45
Mais	730	13	29	0,38
Weizen	820	8	29	0,40
Ölsaaten				
Raps ¹	700	4	30	0,40
Derivate				
Soja-Schrot	640	7	42	0,51
Futterkalk ³	1530	1	38	0,58
Düngemittel				
Kunstdünger (Kalkamonsalpeter) 1	1000	8	30	0,42
Non-Foodprodukte				
Steinkohle ^{3,4}	800	60	34	0,35 - 0,53
PET-Recyclat ²	750	5	37	0,49
Sand, leicht feucht 1, 3, 4	1640	5	41	0,51
1 kugelförmig, 2 zylindrisch, 3 pulvrig, 4 stückig, 5 schmal und länglich				

4.4 Ergebnisse aus der Versuchsdurchführung

Dieses Kapitel behandelt die Ergebnisse aus den Versuchsreihen am Großversuchsstand. Die Ergebnisse werden für die Förderbereiche horizontal bis leicht geneigt sowie vertikal getrennt vorgestellt und erläutert.

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist es, die maßgeblichen Einflussfaktoren auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf derartiger Hochleistungs-Schneckenförderer zu ermitteln und diese in Form von Kenngrößen in Abhängigkeit der Einflussgrößen darzustellen. Somit können theoretisch nicht erfassbare Leistungsanteile (z.B. Gutzerstörung während der Förderung) über empirische Zusammenhänge in die neu zu entwickelnden Auslegungsverfahren integriert werden.

4.4.1 Der stationäre Betriebspunkt

Für reproduzierbare Ergebnisse ist es, wie bereits erläutert, unabdingbar, dass die einzelnen Versuche in einem stationären Zustand gefahren werden. Das heißt, dass sich die eingestellten Betriebsparameter (Drehzahl und Massenstrom) nicht ändern.

Durch die Einstellung der Frästiefe ins Schüttgut sowie die Regelung der Katzfahrgeschwindigkeit durch den Frequenzumrichter(FU) des Katzantriebes wird der Massenstrom konstant gehalten.

Mithilfe der Drehzahlgeber und der an den FU eingestellten Solldrehzahlen werden auch die Drehzahlen der Schneckenförderer automatisch geregelt und konstant gehalten.

Dennoch kann es gerade durch Einlaufvorgänge zu einem instationären Betrieb kommen.

Daher müssen die einzelnen Versuche nochmals auf den stationären Betriebspunkt geprüft werden. Dazu kann der Momentenverlauf während des Versuchs herangezogen werden.

Ist ein Versuch instationär, so ergibt sich für den Mittelwert des Momentenverlaufs eine ascendente Gerade. Für einen stationären Versuch liegt die Gerade horizontal.

In Abbildung 4-6 ist ein Beispiel für einen instationären Versuch dargestellt. Es ist sowohl im Verlauf des Fördermoments des vertikalen als auch des neigbaren Förderers ein deutlicher Anstieg des Mittelwertes (Gerade) zu erkennen.

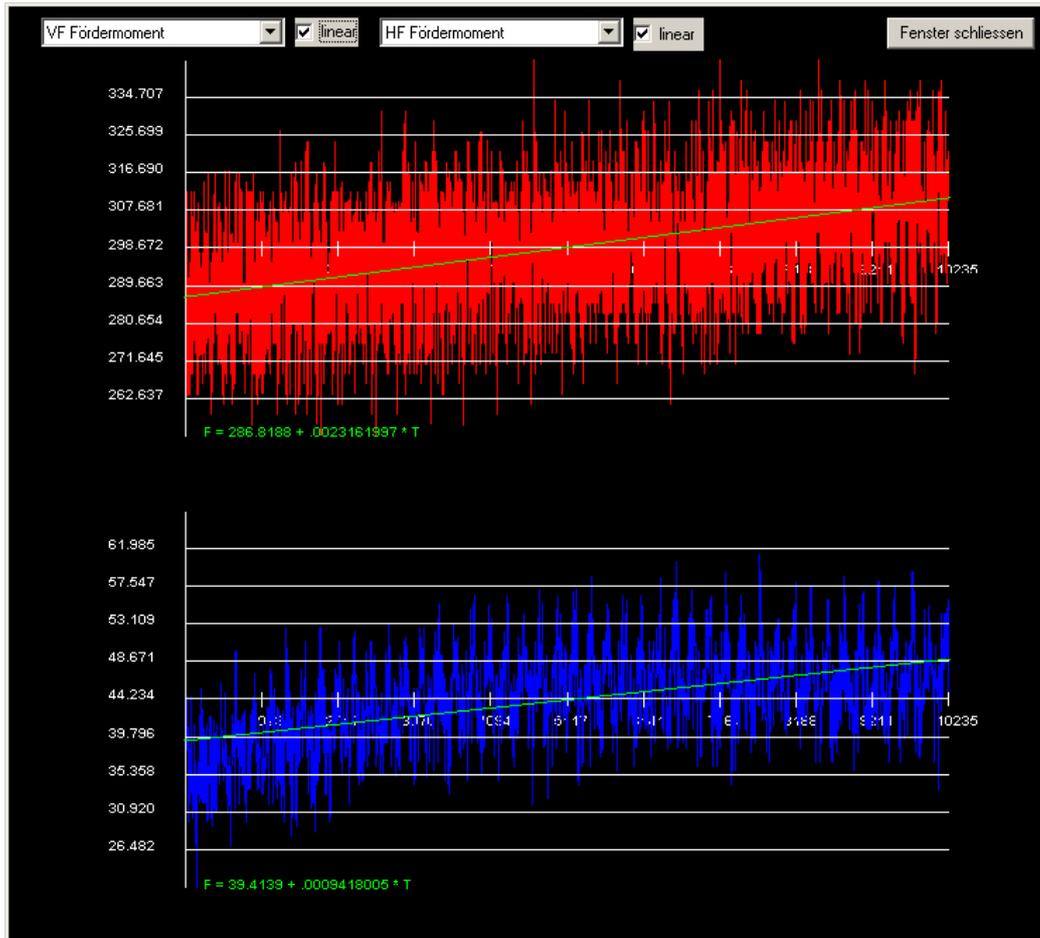


Abbildung 4-6: Verlauf des Drehmoments über der Versuchszeit für den vertikalen (oben) und den neigbaren Förderer (unten)

Der Verlauf sowie die Neigung der Mittelwertsgeraden des Momentenverlaufs sind als ein Qualitätskriterium für den jeweiligen Versuch anzusehen. Durch das neu entwickelte, datenbankbasierte Auswertungsprogramm wird die Neigung der Mittelwertsgeraden automatisch überprüft um instationäre Versuche auszufiltern.

4.4.2 Ergebnisse zum vertikalen Schneckenförderer

Die Einflüsse bestimmter Betriebsparameter wie des Füllungsgrads oder der Drehzahl auf den Drehmomenten- und Leistungsbedarf des vertikalen Förderers für das Versuchsgut Weizen wurden in der Arbeit von *Fottner* [Fo-02] untersucht und analysiert. Weiterhin wurde in einem vorangegangenen Projekt eine erste Basis für die Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse von Weizen auf andere Güter geschaffen [Gün-02a].

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen, wurden an der Versuchsanlage nochmals mehrere Schüttgüter hinsichtlich der zu entwickelnden Auslegungsverfahren experimentell untersucht und analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass die Ergebnisse von *Günthner* [Gün-02a] qualitativ sehr gut auch auf andere Schüttgüter bzw. auf Schüttgüter mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften übertragbar sind. Hier zu nennen sind u. a. die Schüttgüter Gerste, Kohle, Mais, Kunstdünger, Raps und Sojaschrot.

Im Folgenden werden wichtige Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen beispielhaft für das Fördergut Kohle dargestellt.

4.4.2.1 Betriebspunkte

In Abbildung 4-7 sind die Betriebspunkte der Förderversuche mit dem vertikalen Schneckenförderer mit dem Versuchsgut Kohle dargestellt.

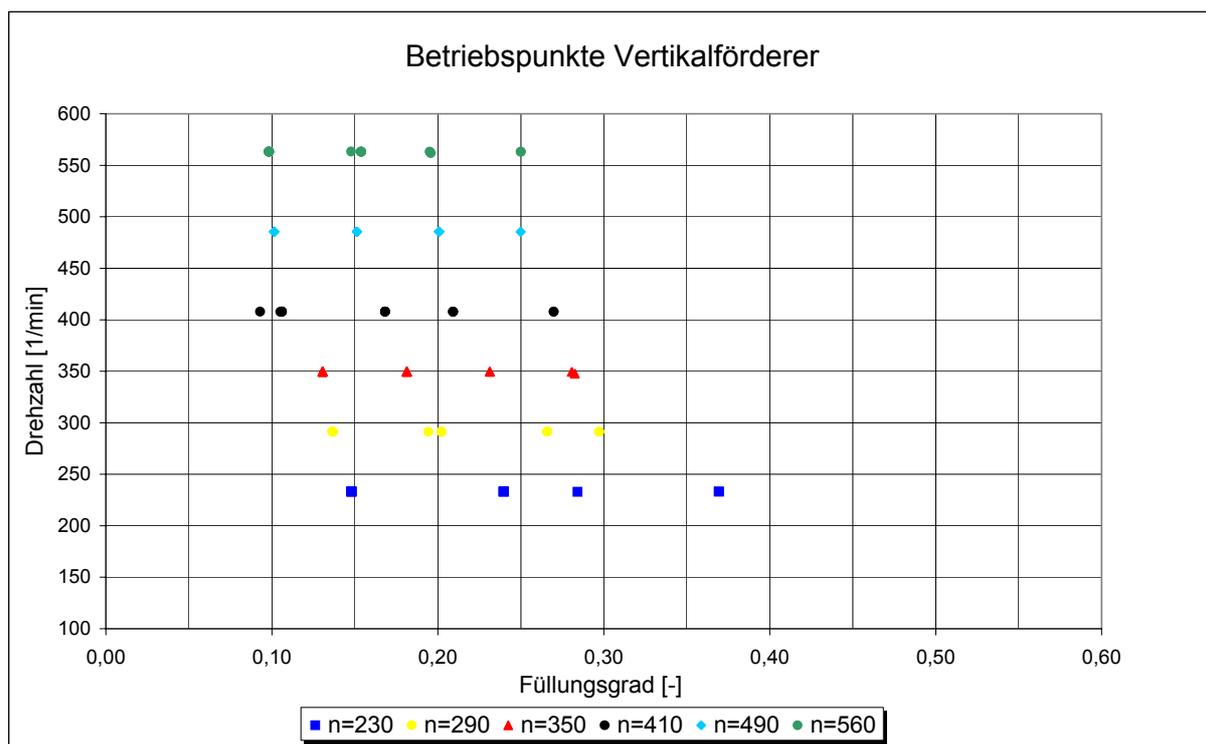


Abbildung 4-7: Betriebspunkte der Förderversuche des vertikalen Schneckenförderers mit dem Versuchsgut Kohle

4.4.2.2 Einfluss von Füllungsgrad und Drehzahl

Hier wird der Einfluss des Füllungsgrades und der Drehzahl auf die Förderung dargestellt.

4 Experimentelle Untersuchungen

In Abbildung 4-8 ist die Antriebsleistung über dem Füllungsgrad aufgetragen. Folgende Zusammenhänge sind erkennbar:

- Linearer Anstieg der Antriebsleistung mit steigendem Füllungsgrad für konstante Drehzahl
- Deutliche Zunahme der Antriebsleistung mit steigender Drehzahl für konstanten Füllungsgrad

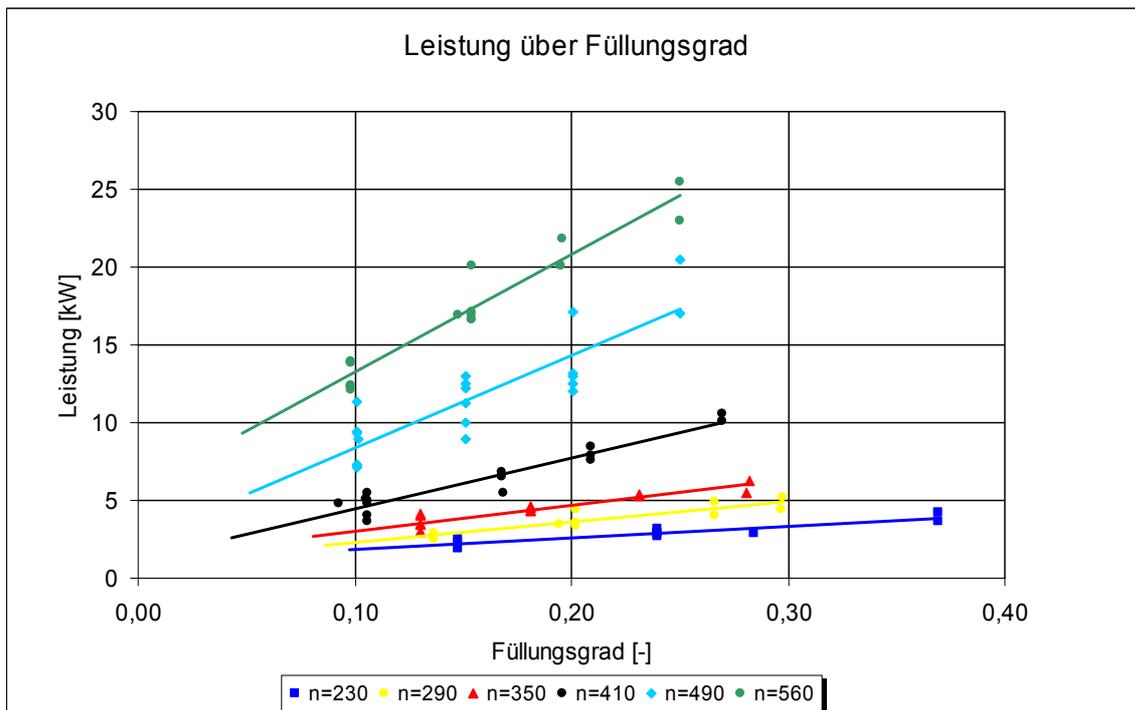


Abbildung 4-8: Antriebsleistung über Füllungsgrad für vertikale Förderung mit Versuchsgut Kohle

In Abbildung 4-9 ist die spezifische Leistung über dem Füllungsgrad für die vertikale Förderung von Kohle aufgetragen.

Die spezifische Leistung errechnet sich dabei nach Formel (4.5).

$$P_{\text{spez}} = \frac{P_A}{l_m \cdot h} \quad (4.5)$$

Es lassen sich die folgenden charakteristischen Bereiche unterscheiden:

Bereich 1: Drehzahl $n_S < 400$ 1/min

- Abnahme der spezifischen Leistung mit zunehmendem Füllungsgrad für konstante Drehzahl
- Spezifischer Leistungsbedarf ist für Drehzahlen $n_S < 400$ 1/min für jeweils konstanten Füllungsgrad annähernd gleich groß

Bereich 2: Drehzahl $n_S > 400$ 1/min

- Abnahme der spezifischen Leistung mit zunehmendem Füllungsgrad für konstante Drehzahl
- Deutliche Zunahme des spezifischen Leistungsbedarfs mit der Drehzahl für konstante Füllungsgrade

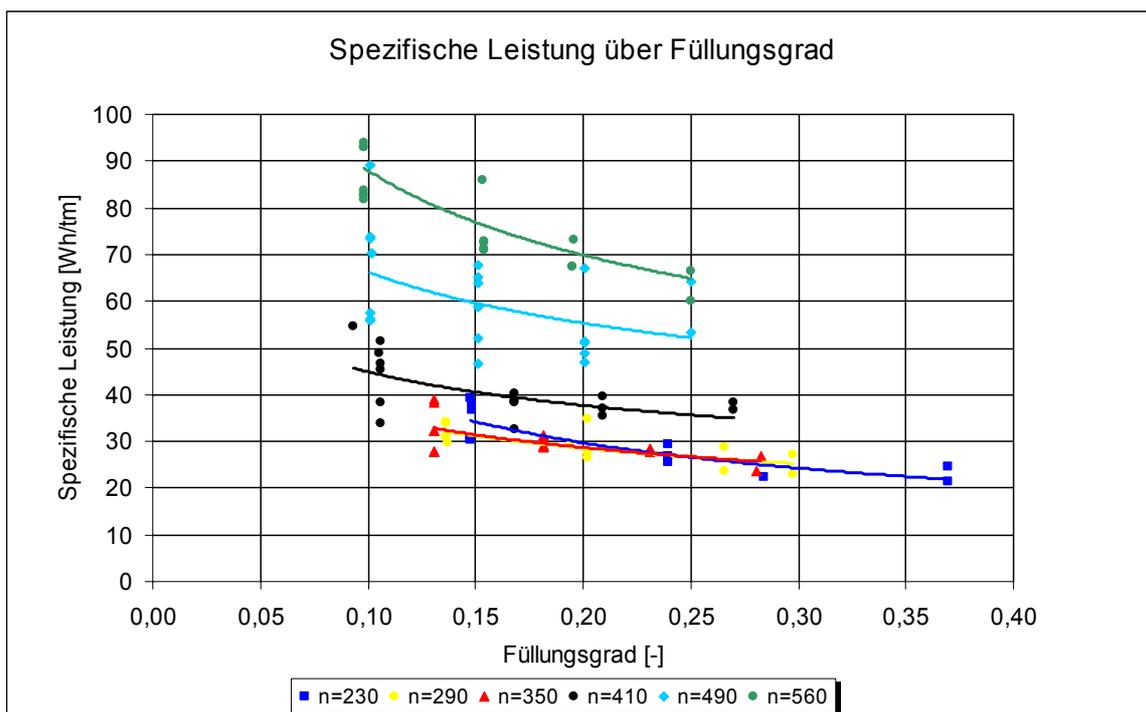


Abbildung 4-9: Spezifische Leistung über Füllungsgrad für vertikale Förderung mit Versuchsgut Kohle

4.4.3 Ergebnisse zum horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderer

Mit dem vorangegangenen Forschungsprojekt konnte durch die Untersuchung vieler Schüttgüter im horizontalen Förderbereich eine breite Basis zur Entwicklung eines praxistauglichen Auslegungsverfahrens geschaffen werden [Gün-02a].

Für ein Auslegungsverfahren für horizontale bis leicht geneigte Hochleistungs-Schneckenförderer fehlte bisher jedoch der Neigungsbereich bis 20° . Daher wurde im Rahmen dieses Projekts durch einen großen Umbau der Versuchsanlage die Möglichkeit geschaffen, auch den Förderbereich bis 20° Neigung zu untersuchen. Zusätzlich wurde die Baugröße des Förderers von zunächst 315 mm Durchmesser auf jetzt 200 mm bzw. 250 mm verändert, um den Einfluss der Fördergeometrie auf den Leistungsbedarf analysieren zu können. Zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens des Förderguts in Abhängigkeit bestimmter Einflussgrößen wurde innerhalb dieser Arbeit eine Messeinrichtung zur kontinuierlichen Erfassung des tatsächlichen Fördererfüllungsgrads installiert.

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit den Schüttgütern Weizen, Raps, Kohle, Mais und PET-Recyclat durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden in Form von Diagrammen grafisch dargestellt, die Verläufe strukturiert analysiert und für die theoretische Modellbildungen aufbereitet. Da sich die Kurvenverläufe in den einzelnen Diagrammen für verschiedene Schüttgüter immer sehr ähneln, werden Erkenntnisse meist nur anhand jeweils eines Schüttgutes erklärt.

4.4.3.1 Betriebspunkte

In Abbildung 4-10 sind die Betriebspunkte für die rein horizontale Förderung des Schüttgutes Weizen dargestellt. Der Neigungsbereich $0 - 20^\circ$ wurde in 5° -Schritten untersucht. In jedem der weiteren 4 Neigungsbereiche wurde Betriebspunkte, ähnlich denen aus Abbildung 4-10, gefahren.

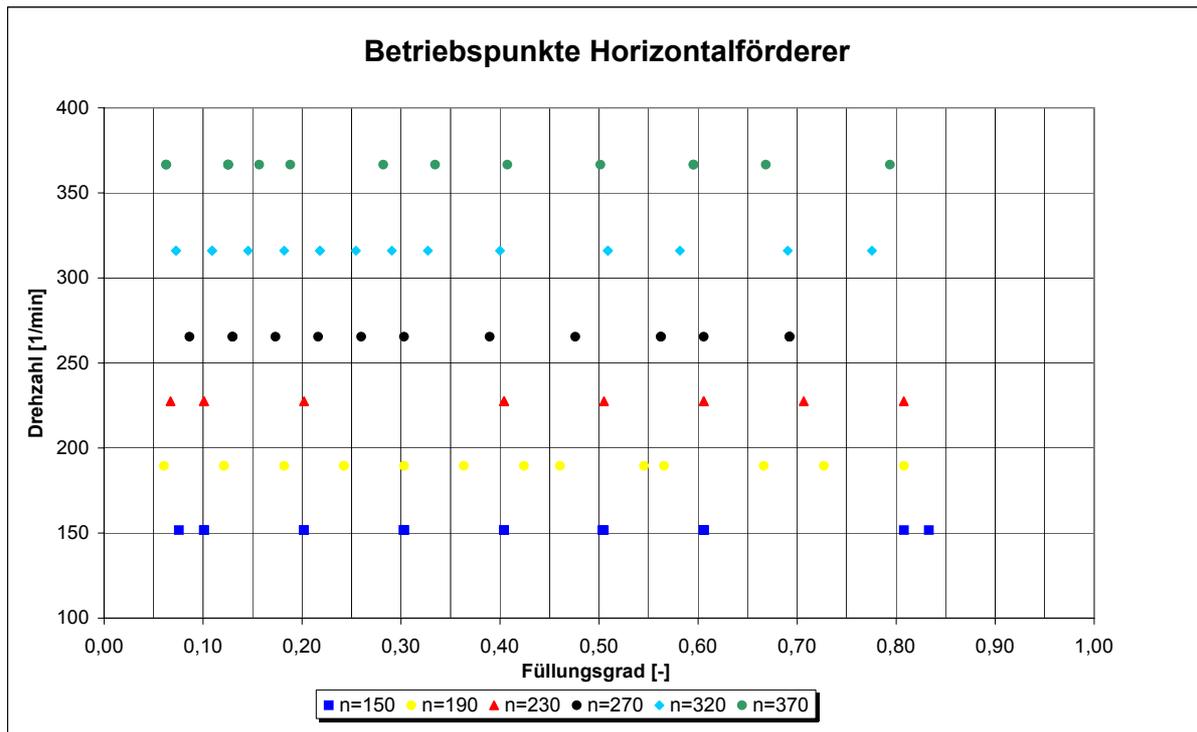


Abbildung 4-10: Betriebspunkte (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Fördergut: Weizen)

4.4.3.2 Einfluss von Drehzahl und Füllungsgrad

In Abbildung 4-11 ist die Antriebsleistung über dem Füllungsgrad für die rein horizontale Förderung von Weizen aufgetragen. Es lassen sich die folgenden charakteristischen Bereiche unterscheiden:

Bereich 1: Füllungsgrad $\varphi \leq 50\%$

- Linearer Anstieg der Leistung mit steigendem Füllungsgrad für konstante Drehzahl
- Zunahme der Leistung mit steigender Drehzahl für konstanten Füllungsgrad

Bereich 2: Füllungsgrad $\varphi > 50\%$

- Sehr steiler linearer Anstieg der Leistung mit zunehmendem Füllungsgrad für konstante Drehzahl

- Deutliche Zunahme der Leistung mit steigender Drehzahl für konstanten Füllungsgrad

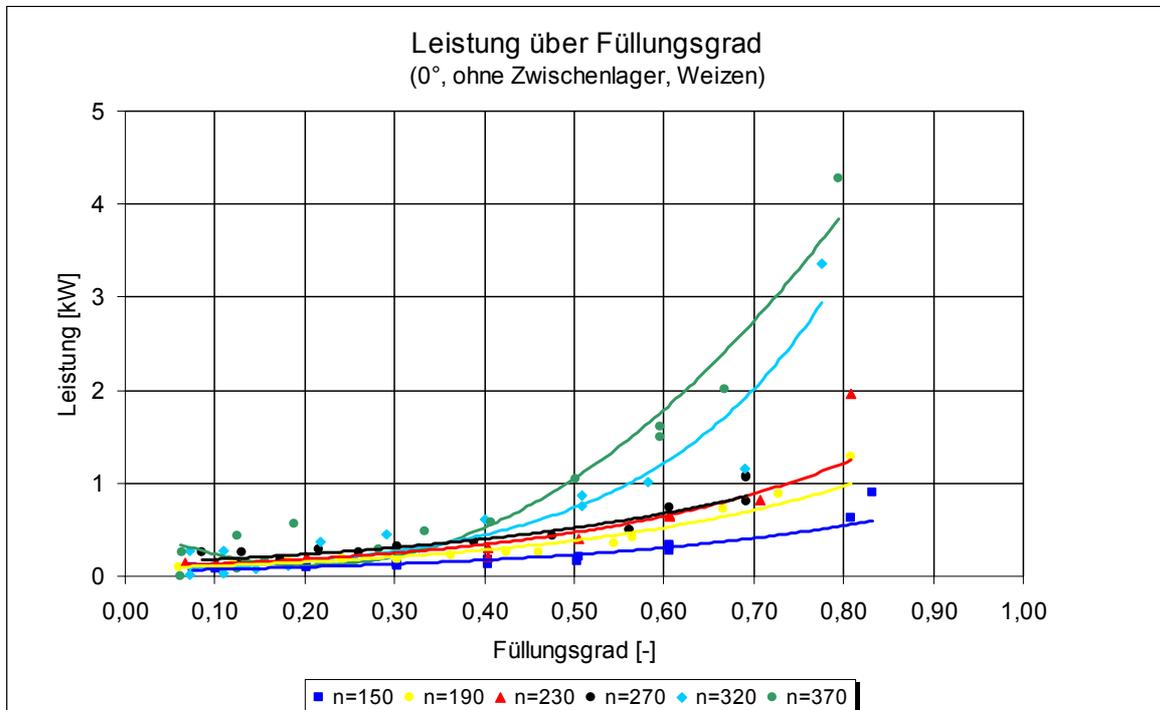


Abbildung 4-11: Verlauf der Leistung über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Versuchsgut: Weizen)

Der Leistungsbedarf zur Förderung eines konstanten Füllungsgrads ist beim Versuchsförderer daher nicht konstant. Dieser ist u. a. wesentlich von der Drehzahl abhängig. Weiterhin führt eine Überschreitung des Füllungsgrads von 50 % für alle Drehzahlen zu einer deutlichen Zunahme der erforderlichen Antriebsleistung.

Als spezifische Leistung wird die Antriebsleistung bezogen auf Förderlänge und Massenstrom bezeichnet. Sie errechnet sich nach Formel (4.6).

$$P_{spez} = \frac{P_A}{l_m \cdot l} \quad (4.6)$$

Da die spezifische Leistung eine wichtige Kenngröße bei der Auslegung von Schneckenförderern ist, wird sie hier auch untersucht.

In Abbildung 4-12 ist die spezifische Leistung über dem Füllungsgrad für rein horizontale Förderung ohne Zwischenlager mit der Versuchsgut Weizen aufgetragen. Es lassen sich die folgenden charakteristischen Bereiche unterteilen:

Bereich 1: Füllungsgrad $\varphi < 25 \%$

- Anstieg der spezifischen Leistung mit abnehmendem Füllungsgrad für konstante Drehzahl
- Zunahme der spezifischen Leistung mit steigender Drehzahl für konstanten Füllungsgrad

Bereich 2: Füllungsgrad $25 \% \leq \varphi \leq 50 \%$

- In etwa konstanter Verlauf der spezifischen Leistung für konstante Drehzahl
- Zunahme der spezifischen Leistung mit steigender Drehzahl für konstanten Füllungsgrad

Bereich 3: Füllungsgrad $\varphi > 50 \%$

- Annähernd linearer Anstieg der spezifischen Leistung mit zunehmendem Füllungsgrad für konstante Drehzahl
- Deutliche Zunahme der spezifischen Leistung mit steigender Drehzahl für konstanten Füllungsgrad

Als Grund für den Anstieg der spezifischen Leistung bei Füllungsgraden $\varphi < 25 \%$ können Spaltverluste genannt werden, da deren Gewichtung im Gesamtleistungsbedarf mit sinkendem Füllungsgrad zunimmt.

Um Quetsch- und Mahlvorgänge und damit die dissipierte Leistung im Spalt zu reduzieren, sollte deshalb bei Schneckenförderern und auch anderen Fördergeräten, wie z. B. bei Rohrkettenförderern, das Spaltmaß größer als die maximale Korngröße des Förderguts gewählt werden. Dies bestätigen umfangreiche experimentelle Untersuchungen an Rohrkettenförderern [Kat-05c].

Zur weiteren Charakterisierung der Kurvenverläufe wird der Bereich zwischen 25 % und 50 % Füllungsgrad betrachtet. Hier kann für alle Drehzahlen jeweils ein konstanter Verlauf der spezifischen Leistung über dem Füllungsgrad festgestellt

werden. Für Füllungsgrade über 50 % steigt der spezifische Leistungsbedarf für alle Drehzahlen stark an.

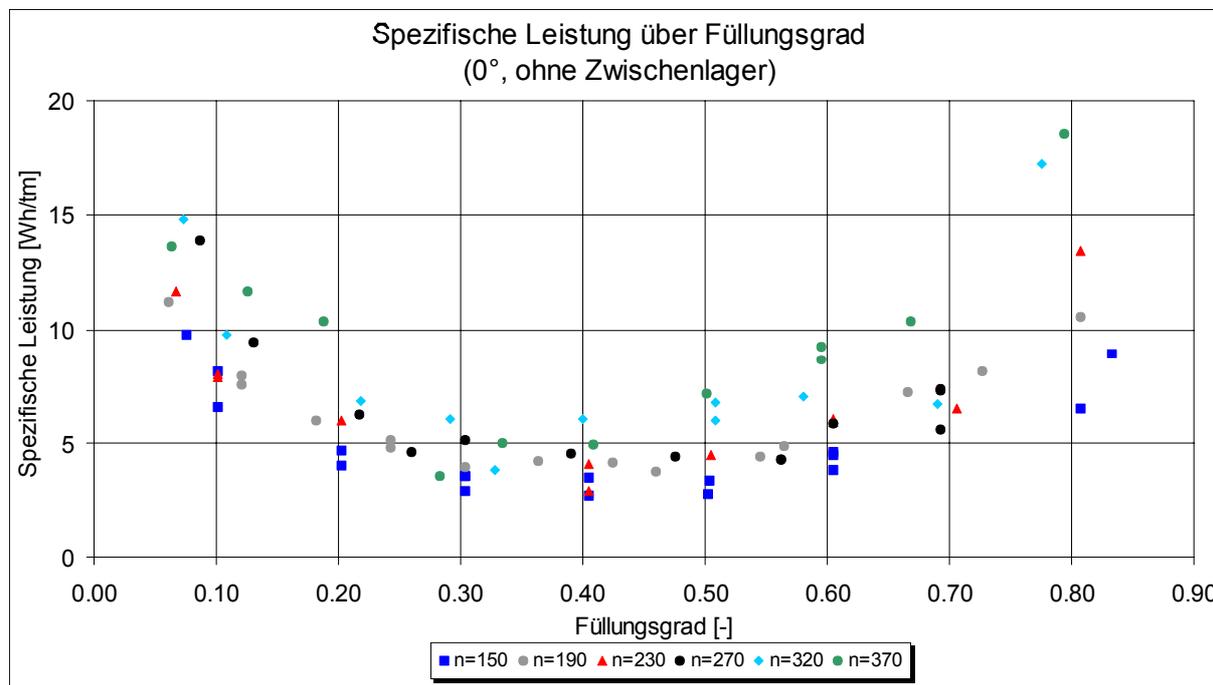


Abbildung 4-12: Verlauf der spezifischen Leistung über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Fördergut: Weizen)

Der Verschiebewiderstandsbeiwert λ ist der aus der DIN 15262 [DIN 15262] bekannte, rein schüttgutspezifische, fiktive Reibungsbeiwert. Dieser stellt, ebenso wie der spezifische Leistungsbedarf, eine wesentliche Leistungskenngröße zur Auslegung von horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderern dar.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen kann dieser nach Gl. (4.7) aus der Antriebsleistung des Versuchsförderers, der Hubleistung, dem Massenstrom, der Förderlänge und dem Ortsfaktor berechnet werden zu:

$$\lambda = \frac{P_A - P_{Hub}}{I_m \cdot g \cdot l} \quad (4.7)$$

Für den rein horizontalen Förderbereich ($P_{Hub} = 0$) lässt sich durch den Vergleich der Formeln (4.6) und (4.7) leicht erkennen, dass sich der Verschiebewiderstandsbeiwert

lediglich durch die Division des Ortsfaktors g von der spezifischen Leistung unterscheidet. Somit ergeben sich bei der Darstellung der beiden Kennwerte gleiche Kurvencharakteristika.

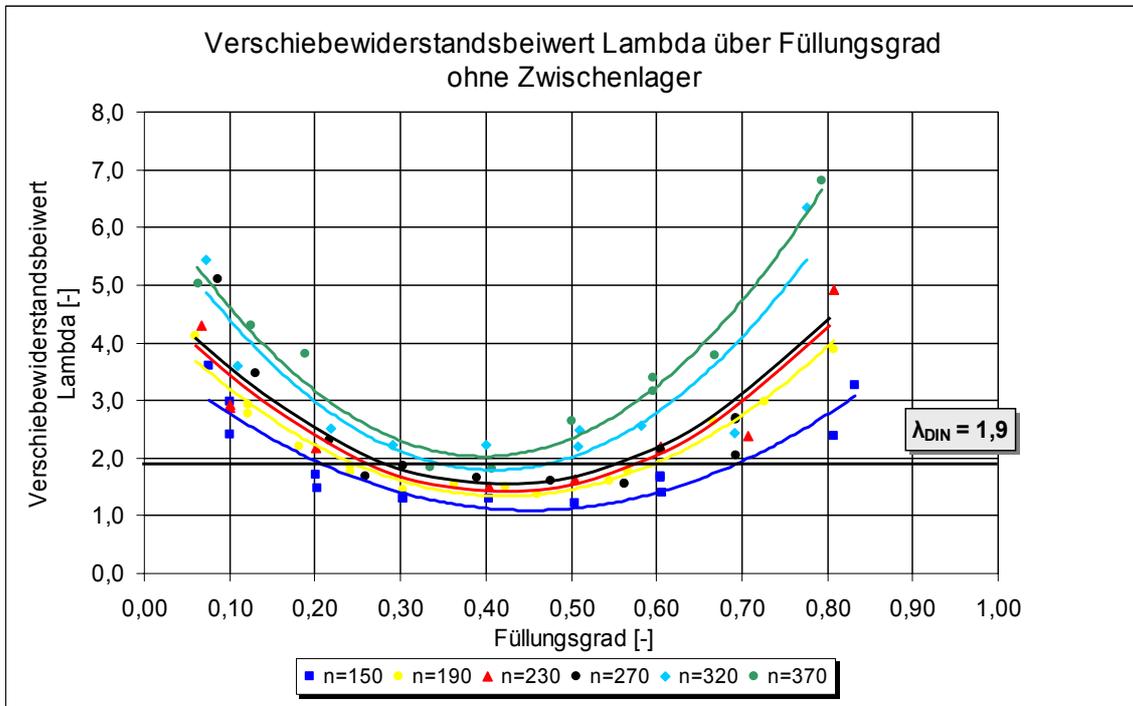


Abbildung 4-13: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Fördergut: Weizen)

In Abbildung 4-13 ist der Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Fördergut: Weizen) dargestellt. Dazu ist als Vergleich der Wert des Verschiebewiderstandsbeiwerts von Weizen aus der DIN 15262 [DIN 15262] eingetragen.

4.4.3.3 Einfluss der Neigung

Abbildung 4-14 zeigt den Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts über der Förderneigung für den Füllungsgrad $\varphi = 40\%$. Für alle Drehzahlen lässt sich ein deutlicher, linearer Anstieg über der Förderneigung erkennen.

Für die Drehzahl $n_S = 270$ 1/min beispielsweise ist dabei ein Anstieg des λ -Werts von 1,7 auf 3 zuerkennen. Dies entspricht einem Zuwachs von über 76 %. Zum Vergleich sei hier erwähnt, dass die DIN 15262 [DIN 15262] im selben Neigungsbereich,

allerdings bei deutlich niedrigeren Drehzahlen, einen λ -Anstieg von lediglich 40 % vorsieht.

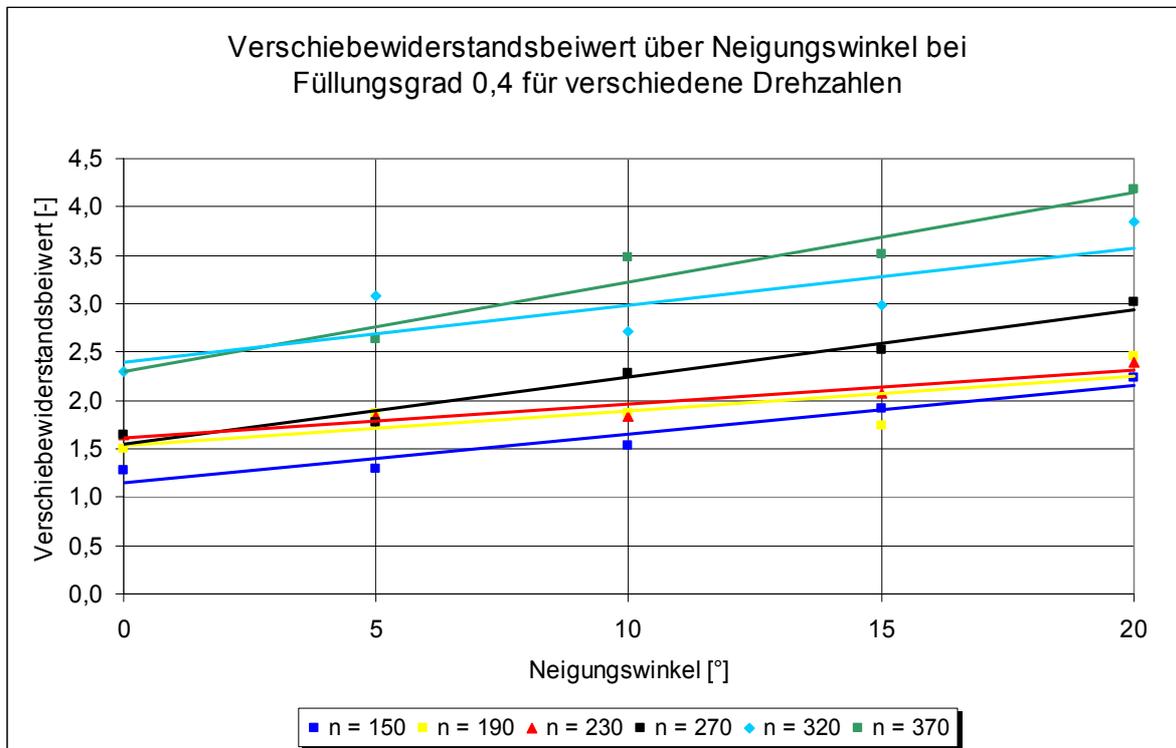


Abbildung 4-14: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts über der Förderneigung für den Füllungsgrad $\varphi = 40\%$

4.4.3.4 Auswertung der Füllungsgrad Messeinrichtung

Die Größe des tatsächlichen Füllungsgrads im Förderer ist ein wichtiges Beurteilungskriterium für das Bewegungs- bzw. Förderverhalten des Guts. Aus deren Kenntnis können Rückschlüsse auf die Bewegungsanteile im Gut (translatorisch / rotatorisch) gezogen werden.

Um den tatsächlichen Füllungsgrad des Förderers kontinuierlich während der Versuchsdurchführung messen und analysieren zu können, wurde daher vor den experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit eine Füllungsgradmesseinrichtung für den horizontalen bis leicht geneigten Förderer installiert.

Die Ergebnisse der Auswertung dieser Messeinrichtung werden hier diskutiert.

In Abbildung 4-15 ist die Füllungsgradabweichung über dem theoretischen Füllungsgrad für die rein horizontale Förderung von Weizen aufgetragen (bei 100% entspricht der theoretische Füllungsgrad dem berechneten Füllungsgrad).

Es lassen sich zwei Bereiche charakterisieren:

Bereich 1: Füllungsgrad $\varphi < 50\%$

- Gute Übereinstimmung der Werte für den berechneten und gemessenen Füllungsgrad

Bereich 2: Füllungsgrad $\varphi > 50\%$

- Deutlicher Unterschied zwischen berechnetem und gemessenem Füllungsgrad erkennbar
- Zunahme der Füllungsgradabweichung mit zunehmendem Füllungsgrad

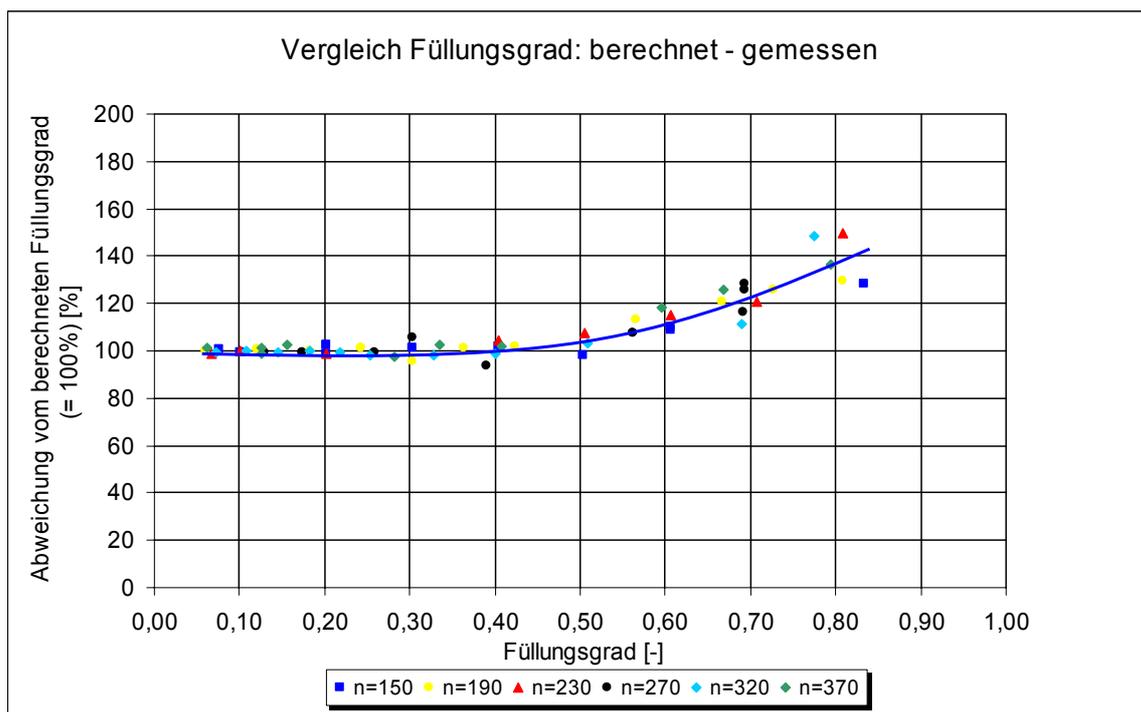


Abbildung 4-15: Verlauf der Füllungsgradabweichung über dem theoretischen Füllungsgrad für Drehzahlen von $n_s = 150$ 1/min bis 370 1/min (horizontale Förderung, ohne Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm, Fördergut: Weizen)

4 Experimentelle Untersuchungen

Der Verlauf der Füllungsgradabweichung kann mit einem rotatorischen Bewegungsanteil durch die hohen Drehzahlen und einer gleichzeitigen Abnahme der Relativgeschwindigkeit zwischen Schneckenwendel und Schüttgut erklärt werden. Damit verbunden ist eine Reduzierung der Axialgeschwindigkeit des Schüttgutes. Diese entstehende Füllungsgraderhöhung trägt damit nicht zur Erhöhung des Massenstroms bei, sondern führt lediglich zu einem ungünstigeren Förderzustand.

Wie sich aus Abbildung 4-16 erkennen lässt, führt die Füllungsgraderhöhung zu keinem stationären Betrieb. Der eingestellte Füllungsgrad von $\phi = 0,7$ wird während des Betriebs nicht gehalten. Der Förderer füllt sich bis zum Füllungsgrad $\phi = 1$ voll und erzeugt im Zulauf zusätzlich einen Rückstau ($\phi > 1$). Einlaufvorgänge konnten bei diesem Versuch durch ausreichenden Vorlauf ausgeschlossen werden.

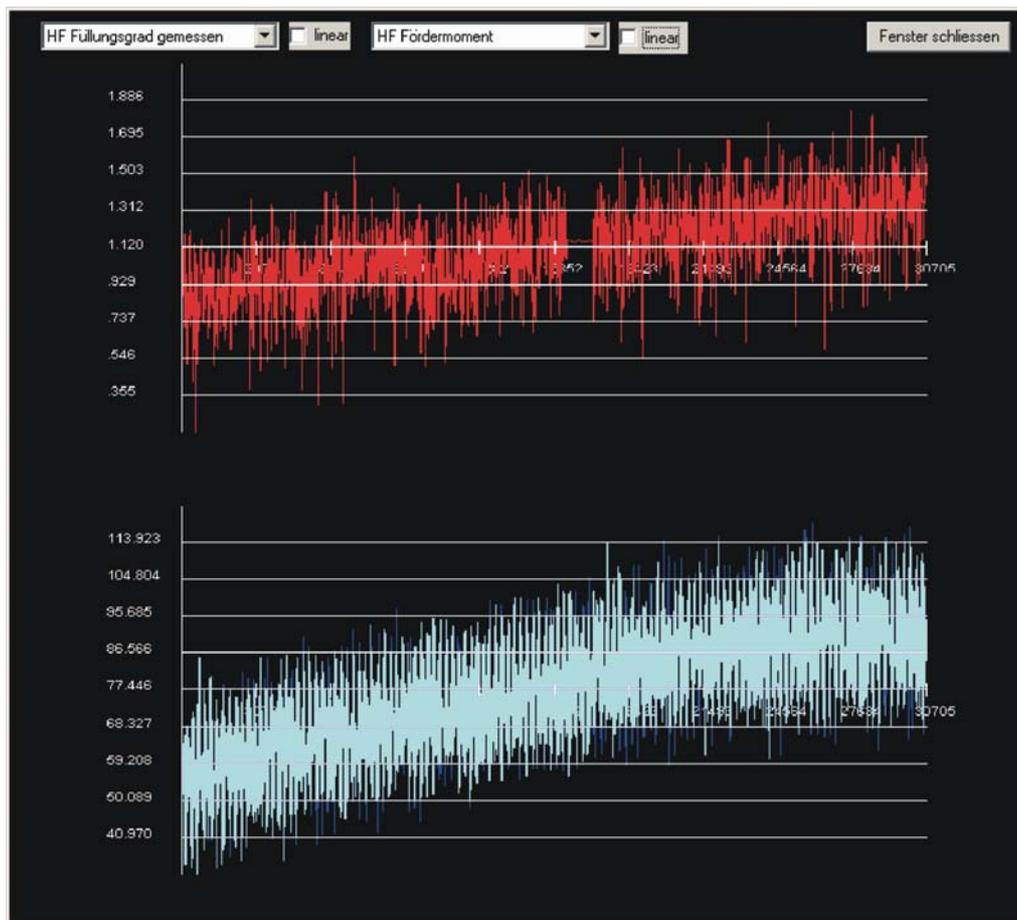


Abbildung 4-16: Gemessener Füllungsgrad (oben) und Fördermoment (unten) über Zeit (30s) bei Drehzahl $n = 270$ 1/min, eingestellter Füllungsgrad 0,7, Schüttgut PET-Recyclat, Schneckendurchmesser 200 mm, ohne Zwischenlager

Dieses instationäre Verhalten kann für alle untersuchten Drehzahlen (siehe Abbildung 4-15) des Hochleistungs-Schneckenförderers festgestellt werden.

Auch die Förderneigung hat einen Einfluss auf diese Füllungsgradabweichung. Durch die Neigung des Förderers wird die Relativgeschwindigkeit bereits bei niedrigeren Füllungsgraden herabgesetzt. Dies zeigen die Verläufe der Füllungsgradabweichung für verschiedene Fördererneigungen in Abbildung 4-17. Für den geneigten Betrieb kann bereits bei eingestellten Füllungsgraden von kleiner 50 % eine Zunahme des Füllungsgrades gemessen werden, was auf einen instationären Betrieb hinweist.

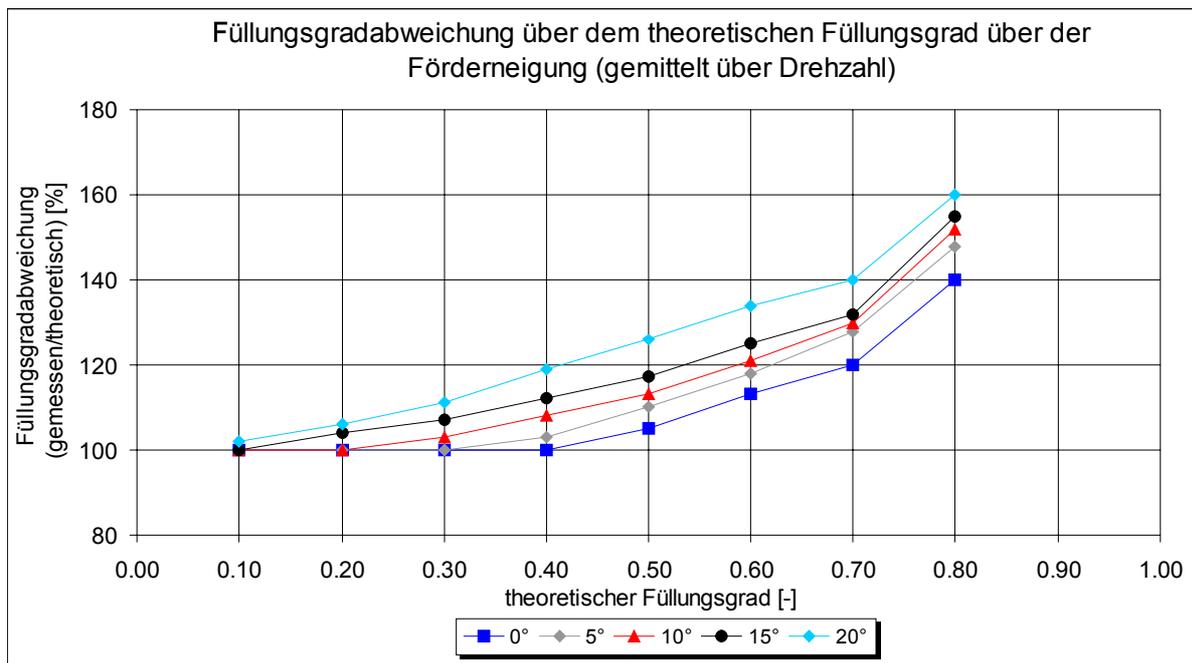


Abbildung 4-17: Verlauf der Füllungsgradabweichung über dem theoretischen Füllungs-grad für Förderneigungen von 0° bis 20° (gemittelt über der Drehzahl, ohne Zwischenlager, Fördergut: Weizen, Schneckendurchmesser 200 mm)

Diese Charakteristiken sind ebenso in den Verläufen des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ und der spezifischen Leistung über der Förderneigung und dem Füllungsgrad festzustellen. Daher scheint ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Füllungsgradabweichung und den Verläufen der spezifischen Leistung und des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ zu bestehen.

4.4.3.5 Einfluss eines Zwischenlagers

Neben den Betriebsparametern haben auch konstruktive Parameter Einfluss auf den Fördervorgang und somit auf ein zu entwickelndes Auslegungsverfahren. Hier wird daher der Einfluss eines Zwischenlagers untersucht.

In Abbildung 4-18 ist der Verschiebewiderstandsbeiwert über dem Füllungsgrad, jeweils für die Förderung mit und ohne Zwischenlager für die Drehzahl $n = 150$ 1/min dargestellt. Es lassen sich die folgenden zwei Bereiche unterscheiden:

Bereich 1: Füllungsgrad $\varphi \leq \text{ca. } 25 \%$

- Nahezu identischer Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ bei der Förderung mit und ohne Zwischenlager
- Abnahme des λ -Werts mit zunehmendem Füllungsgrad für konstante Drehzahl

Bereich 2: Füllungsgrad $\varphi > \text{ca. } 25 \%$

- Starke Abweichung der λ -Verläufe bei der Förderung mit und ohne Zwischenlager (λ -Werte bei Förderung mit Zwischenlager wesentlich größer)
- Deutliche Zunahme des λ -Werts mit zunehmendem Füllungsgrad für konstante Drehzahl

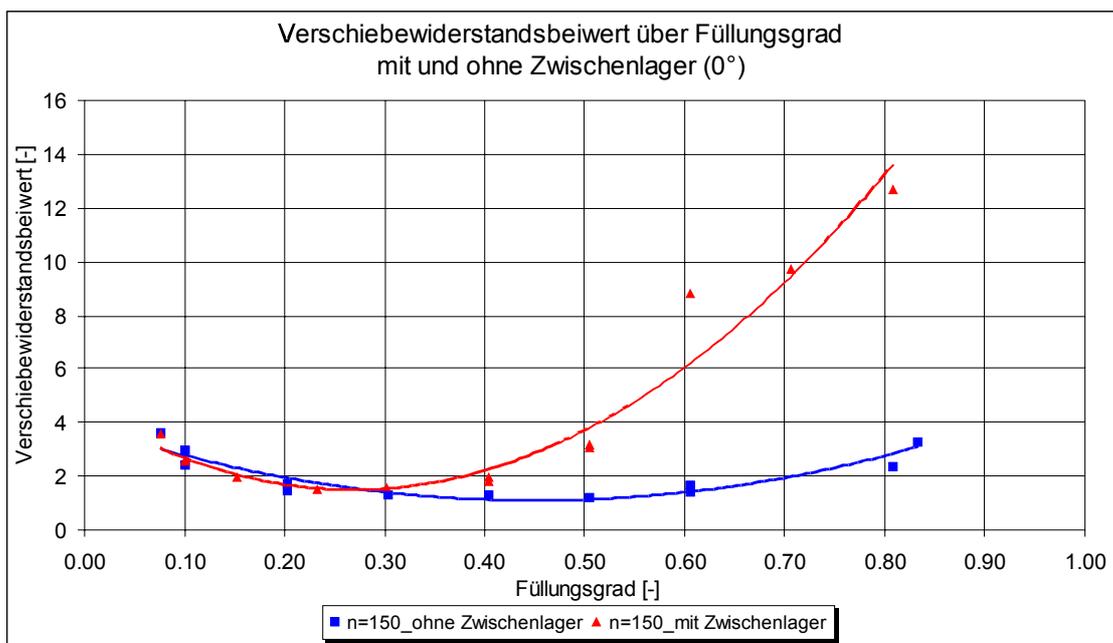


Abbildung 4-18: Verschiebewiderstandsbeiwerts λ über dem Füllungsgrad mit und ohne Zwischenlager für die Drehzahl $n = 150$ 1/min (Fördergut: Weizen)

Die in Abbildung 4-18 dargestellte Charakteristik lässt sich für alle Drehzahlen feststellen. Wie in Abbildung 4-19 zu sehen ist, nimmt auch dabei, mit ansteigender Drehzahl, der Verschiebewiderstandsbeiwert zu.

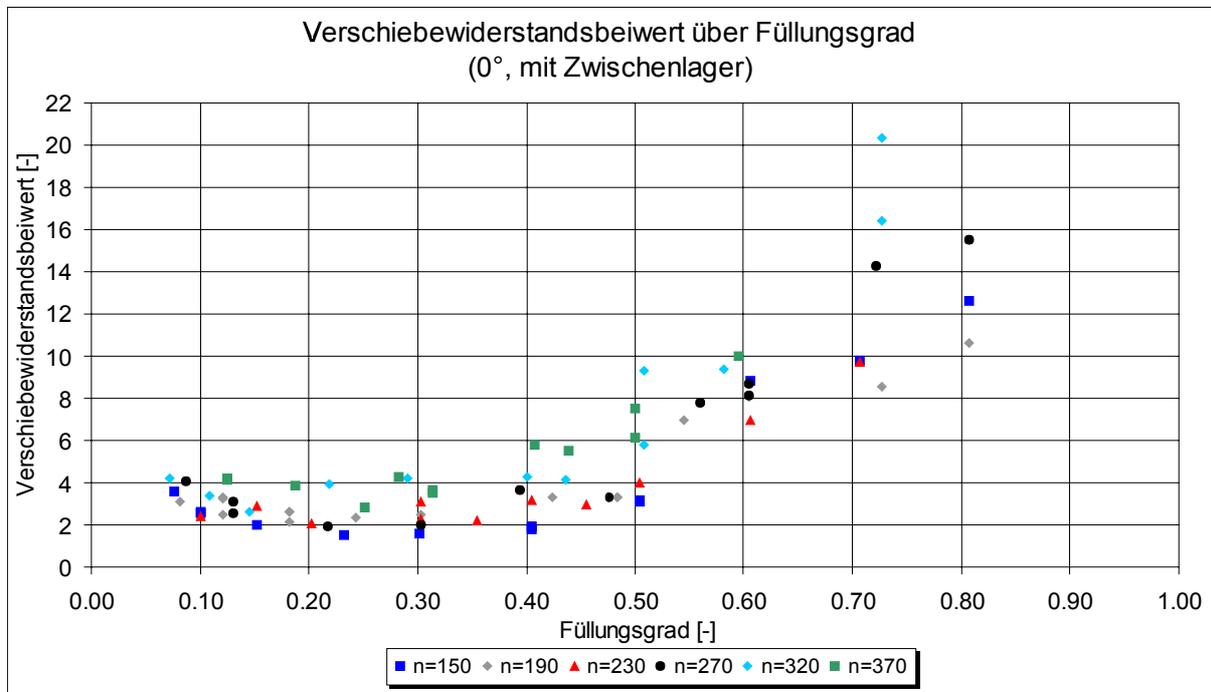


Abbildung 4-19: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung, mit Zwischenlager, Fördergut: Weizen, Schneckendurchmesser 200 mm)

Neben Füllungsgrad und Drehzahl hat auch die Förderneigung, so wie bei der Förderung ohne Zwischenlager, einen linearen Einfluss auf die Höhe des Verschiebewiderstandsbeiwertes. Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 4-20.

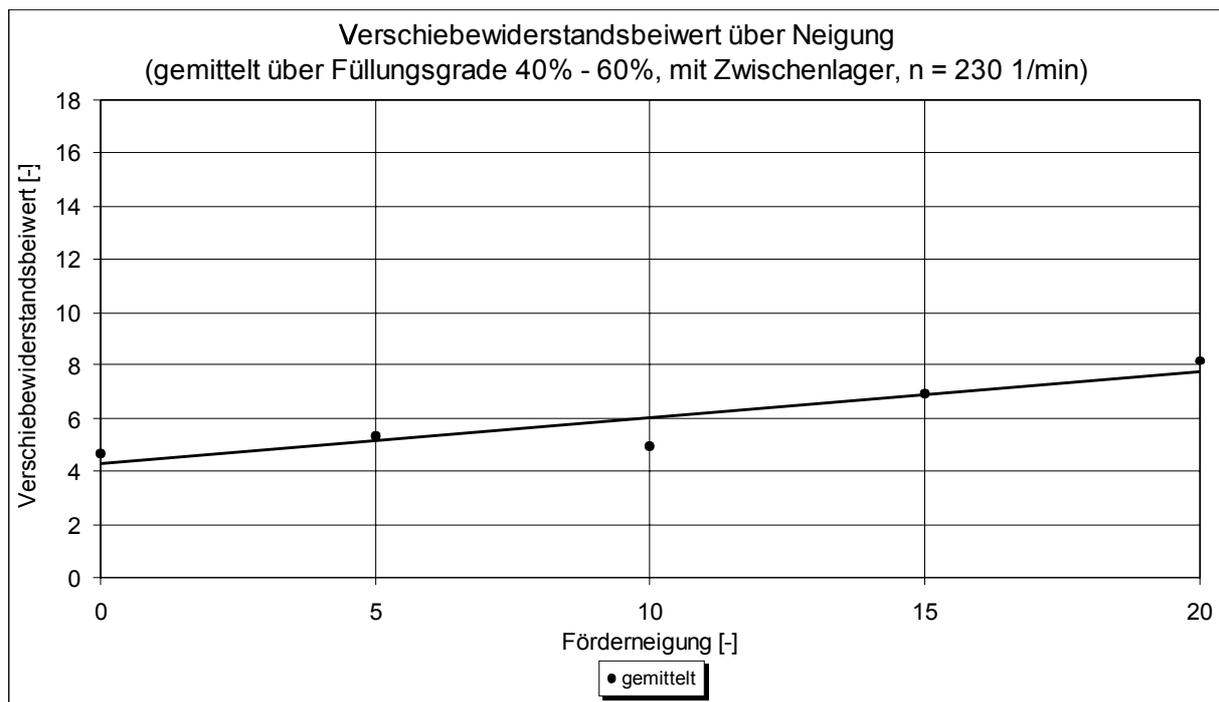


Abbildung 4-20: Verschiebewiderstandsbeiwert über Förderneigung (Förderung mit Zwischenlager, Schneckendurchmesser 200 mm)

5 Auslegungsverfahren für vertikal betriebene Hochleistungs-Schneckenförderer

Bei der Entwicklung eines Auslegungsverfahrens für einen vertikalen Schneckenförderer spielt die Bestimmung der Gutwinkelgeschwindigkeit und deren Einflussparameter die entscheidende Rolle. Folgende Größen haben Einfluss auf die Gutwinkelgeschwindigkeit:

- Schneckendurchmesser
- Ganghöhe
- Schneckendrehzahl
- Füllungsgrad der Schneckenkammer
- Art und Beschaffenheit des Schüttgutes (Reibwert)

Sowohl *Fottner* [Fo-02] als auch *Rong* [Ro-04] betrachteten die Problematik der richtigen Wahl des Berechnungsmodells. Zur Auswahl standen jeweils das Einzelkörpermodell nach Böttcher [Böt-63] sowie das Mehrkörpermodell (siehe dazu Kapitel 3.1). Beide kamen zu dem Schluss, dass das Mehrkörpermodell aufgrund seiner besseren Abbildung des Fördervorgangs exaktere Werte für die Gutwinkelgeschwindigkeit liefert.

Als Berechnungsmodell zur Gutwinkelgeschwindigkeit wird aufbauend auf den Ergebnissen von *Fottner* [Fo-02] und *Rong* [Ro-04] daher das Mehrkörpermodell verwendet.

5.1 Baugrößendimensionierung

Bei der Dimensionierung eines vertikalen Schneckenförderers ist der Massen- bzw. Volumenstrom, welcher gefördert werden soll, von entscheidender Bedeutung.

Als Eingangsparameter für die Baugrößendimensionierung wird aus dem zu fördernden Massenstrom über die Schüttdichte des Förderguts der Volumenstrom nach Gl. (5.1) ermittelt:

$$I_v = \frac{I_m}{\rho} \quad (5.1)$$

Im Anschluss kann die Baugröße des Förderers in Abhängigkeit des Volumenstroms und des festgelegten Füllungsgrads ausgewählt werden (Abbildung 5-1).

Zur Fördererauslegung werden dem Anwender Diagramme mit verschiedenen Betriebszuständen zur Verfügung gestellt. Aus diesen lässt sich für unterschiedliche Füllungsgrade, je nach Baugröße und dem geförderten Volumenstrom, eine Schneckendrehzahl und die dazugehörige Axialgeschwindigkeit ermitteln. Die Axialgeschwindigkeit wird im Verlauf der Baugrößendimensionierung zur Berechnung der Gutwinkelgeschwindigkeit benötigt. Ein solches Diagramm ist für den Füllungsgrad von 40% in Abbildung 5-1 abgebildet. Weitere Diagramme für weitere Füllungsgrade sind dem Anhang zu entnehmen.

Für die in Abbildung 5-1 zu Grunde gelegten Förderergeometrien wurden die genormten Größen der DIN 15261 [DIN 15261] verwendet.

Bei der Variation des Füllungsgrads und der Drehzahl ist weiterhin zu beachten, dass beide Parameter auf die spezifische Leistung des Schneckenförderers Einfluss nehmen. So können für den gleichen Volumenstrom unterschiedliche Förderer mit sehr verschiedenen spezifischen Leistungen gewählt werden. Dieser Umstand wird in Kapitel 5.2 näher erläutert.

Auf eine Variation der Reibwerte zwischen Gut und Schneckenwendel bzw. auch zwischen Gut und Förderrohr wird im Rahmen der Baugrößendimensionierung verzichtet, da die Auswirkungen veränderlicher Reibwerte auf die Gutwinkelgeschwindigkeit innerhalb der Baugrößendimensionierung vernachlässigbar sind.

Im Gegensatz hierzu müssen die Reibkoeffizienten jedoch im Rahmen der Leistungsauslegung im Berechnungsmodell berücksichtigt werden, da diese, wie soeben erwähnt, die Gutwinkelgeschwindigkeit beeinflussen und diese z. T. in dritter Potenz (siehe Rohrreibleistung) in die Leistungsberechnung eingeht.

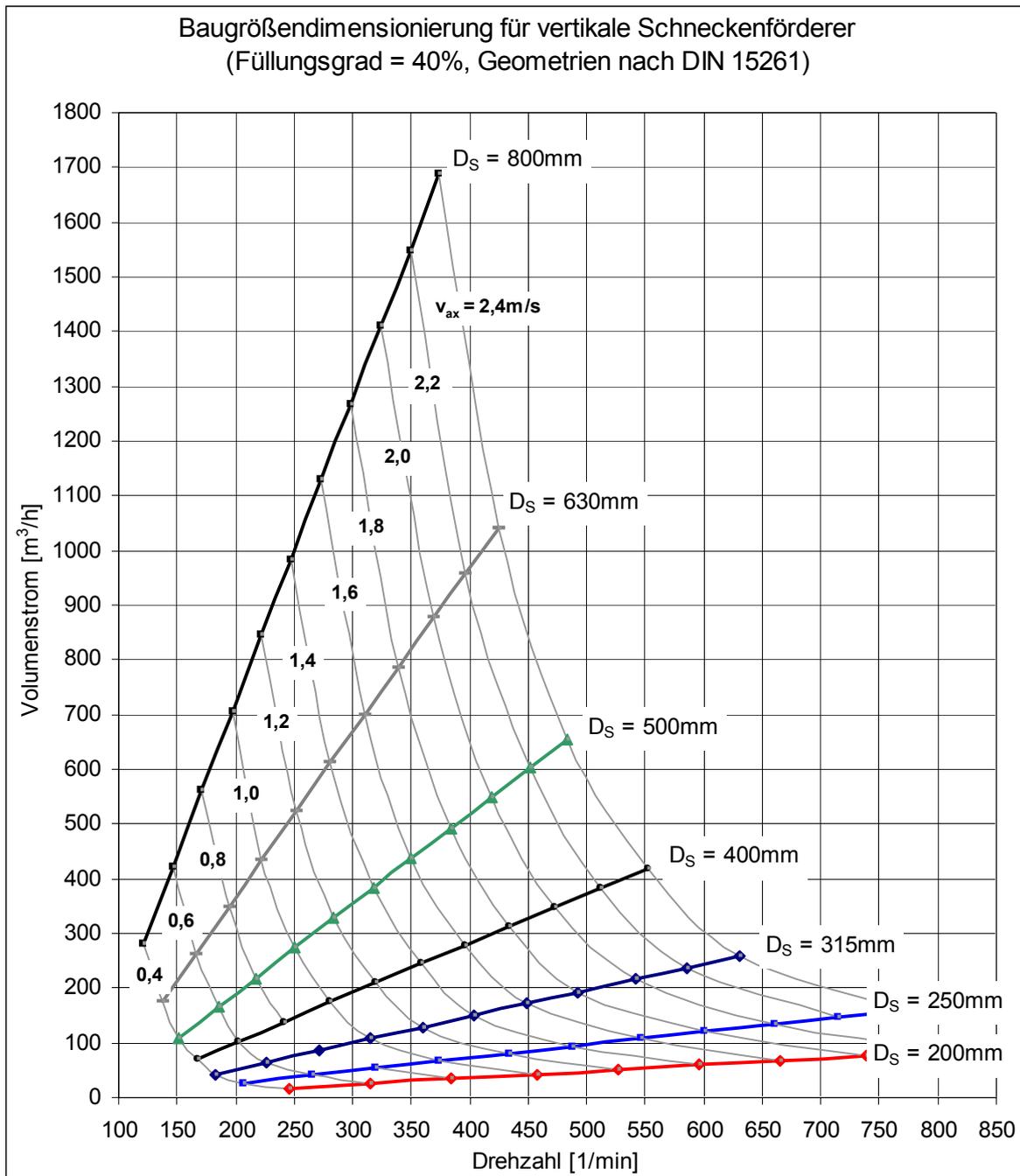


Abbildung 5-1: Baugrößendimensionierung in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl und der axialen Gutgeschwindigkeit für Fördergeometrien nach DIN 15261 [DIN 15261] für 40 % Füllungsgrad (vertikale Förderung)

Aus Gleichung (5.2) kann anhand der axialen Gutgeschwindigkeit aus Abbildung 5-1 die Winkelgeschwindigkeit des Förderguts ω_G berechnet werden. Diese wird im nächsten Kapitel im Rahmen der Leistungsberechnung benötigt.

$$\omega_G = \omega_S - \omega_{rel} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_S}{60} - \frac{2 \cdot \pi \cdot v_{ax}}{H} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{n_S}{60} - \frac{v_{ax}}{H} \right) \quad (5.2)$$

5.2 Leistungsberechnung

Bei der Entwicklung eines Auslegungsverfahrens für vertikale Hochleistungs-Schneckenförderer stehen bei der Leistungsberechnung eine einfache Handhabung des Verfahrens, die ausreichende Genauigkeit der Berechnungsergebnisse für die Praxis sowie eine gute Anpassung an weitere auftretende Einflüsse im Vordergrund.

Analytisch am einfachsten zu bestimmen ist die Hubleistung, also der Leistungsanteil, der zur Überwindung des Höhenunterschieds zwischen Gutauf- und abgabe aufzubringen ist. Diese nimmt linear mit dem Massenstrom und der Förderhöhe zu und kann unabhängig von betrieblichen und konstruktiven Einflussgrößen ermittelt werden.

Daneben werden zwei weitere Leistungsanteile analytisch bestimmt: die Rohrreibleistung, der Leistungsanteil, der aufgrund der Reibung des Schüttgutes an der Rohrwand entsteht, und die Wendelreibleistung, der Anteil, welcher durch die Reibung des Schüttgutes an der Schneckenwendel entsteht. Diese beiden Anteile ergeben die Gesamtreibleistung, den größten, analytisch ermittelbaren Anteil.

Wie Abbildung 5-2 zeigt, ist eine Auslegung anhand der analytisch ermittelten Leistungsanteile (Hubleistung, Rohrreibleistung und Wendelreibleistung) nicht möglich, da der gemessene Gesamtleistungsbedarf deutlich höher liegt. Grund hierfür sind Leistungsanteile wie z. B. Reibungsverluste im Inneren des Guts und im Spalt. Diese wurden bislang nicht berücksichtigt.

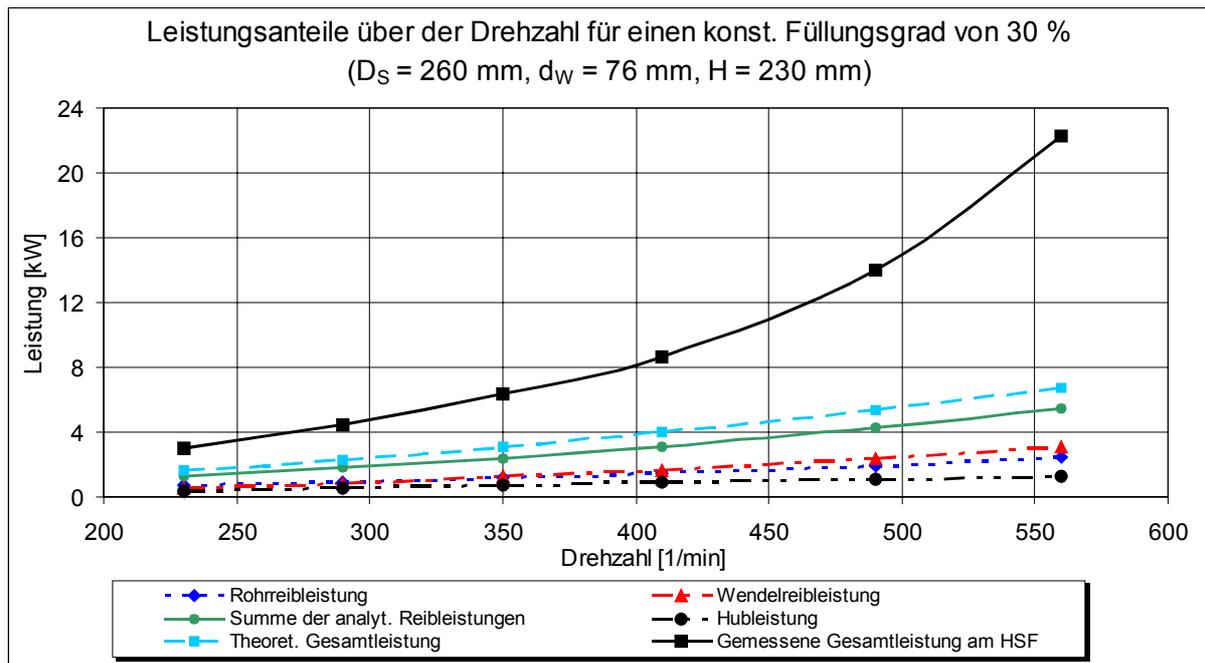


Abbildung 5-2: Verlauf unterschiedlicher Leistungsanteile über der Drehzahl für den Versuchsförderer (vertikale Förderung)

Da das in diesem Kapitel vorgestellte Berechnungsverfahren in der Einfachheit und Zweckmäßigkeit dem genormten Verfahren der *DIN 15262* [DIN 15262] angenähert werden soll, wird der Berechnungsansatz ähnlich dem der Norm gewählt.

Dazu wird, ähnlich dem Verschiebewiderstandsbeiwerts, ein fiktiver Reibungsbeiwert eingeführt. Dieser Reibungsfaktor soll für den vertikalen Förderbereich nach dem ursprünglichen Vorschlag von *Vollmann* [Voll-00] für einen konstanten vertikalen Reibungsfaktor als Förderfaktor λ_v bezeichnet werden.

Da sowohl die Rohrreibleistung als auch die Wendelreibleistung einen großen Einfluss auf die Höhe der Gesamtreibleistung haben, werden beide Anteile, also die Gesamtreibleistung, als Bezugsgröße für den Förderfaktor angesetzt.

Das Berechnungsansatz ergibt sich nach Gl. (5.3) aus den beiden analytisch zu berechnenden Leistungsanteilen Rohrreibleistung und Wendelreibleistung, einer empirischen Kenngröße (Förderfaktor λ_v) und der Hubleistung folgendermaßen:

$$P_{\text{Ges}} = \lambda_v \cdot (P_{\text{Rohr,Reib}} + P_{\text{Wendel,Reib}}) + P_{\text{Hub}} \quad (5.3)$$

Die Berechnung der analytischen Leistungsanteile und die Entwicklung des Förderfaktors λ_v werden im Anschluss ausführlich erläutert.

5.2.1 Hubleistung

Die Hubleistung berechnet sich nach Gleichung (5.5) aus dem Hubwiderstand F_{Hub} und der axialen Fördergeschwindigkeit v_{ax} .

Der Hubwiderstand berechnet sich aus der Förderhöhe h , dem Massenstrom I_m , der axialen Geschwindigkeitskomponente des Förderguts v_{ax} und dem Ortsfaktor g :

$$F_{Hub} = \frac{I_m \cdot g \cdot h}{v_{ax}} \quad (5.4)$$

Die Hubleistung folgt demnach aus dem Produkt des Hubwiderstandes F_{Hub} und der axialen Fördergeschwindigkeit v_{ax} :

$$P_{Hub} = F_{Hub} \cdot v_{ax} = I_m \cdot g \cdot h \quad (5.5)$$

5.2.2 Rohrreibleistung

Die Rohrreibleistung entsteht durch die Reibung zwischen dem sich auf einer schraubenlinienförmigen Bahn bewegenden Förderguts und dem feststehenden Förderrohr. Sie berechnet sich aus der auf die Rohrwand wirkenden Gesamtreibkraft R_R und der Relativgeschwindigkeit $v_{R,rel}$ zwischen Fördergut und Rohrwand:

$$P_{Rohr,Reib} = R_R \cdot v_{R,rel} \quad (5.6)$$

Aufgrund des feststehenden Außenrohrs entspricht die Relativgeschwindigkeit in diesem Fall der Absolutgeschwindigkeit des Förderguts an der Rohrwand. Diese ergibt sich aus dem Förderwinkel ψ , der Gutwinkelgeschwindigkeit ω_G und dem Schneckenradius r_s (Spaltmaß wird vernachlässigt):

$$v_{abs} = \frac{\omega_G \cdot r_S}{\cos \psi} \quad (5.7)$$

Der Förderwinkel errechnet sich aus:

$$\psi = \arctan \left[\left(\frac{\omega_S}{\omega_a} - 1 \right) \cdot \tan \alpha \right] \quad (5.8)$$

Die Gesamtreibungskraft R_R berechnet sich aus der Zentrifugalkraft auf das Gut F_Z und dem Reibungskoeffizienten μ_R zwischen Fördergut und Rohrwand:

$$R_R = F_Z \cdot \mu_R \quad (5.9)$$

Die Zentrifugalkraft des Guts im Förderer resultiert aus der Masse des Förderguts im Förderer m , dem Schwerpunktsradius des Förderguts r_{SP} (= Kraftangriffspunkt) und der Gutwinkelgeschwindigkeit ω_G :

$$F_Z = m \cdot r_{SP} \cdot \omega_G^2 \quad (5.10)$$

Die Gesamtmasse des Förderguts m kann aus dem Massenstrom I_m und der axialen Fördergeschwindigkeit des Guts v_{ax} in Verbindung mit der Förderhöhe h bestimmt werden.

Die Reibungskraft am Förderrohr R_R lautet demnach folgendermaßen:

$$R_R = \frac{I_m}{v_{ax}} \cdot h \cdot r_{SP} \cdot \omega_G^2 \cdot \mu_R \quad (5.11)$$

In Abhängigkeit der Geschwindigkeitskomponenten in axialer Richtung (v_{ax}) und in Richtung der Gutbewegung (v_{abs}) kann die Rohrreibleistung $P_{Rohr,Reib}$ angegeben werden:

$$P_{Rohr,Reib} = \frac{I_m}{v_{ax}} \cdot h \cdot r_{SP} \cdot \omega_G^2 \cdot \mu_R \cdot v_{abs} \quad (5.12)$$

Durch Einsetzen der Berechnungsansätze für diese Geschwindigkeitskomponenten kann die Rohrreibleistung umformuliert werden zu:

$$P_{\text{Rohr,Reib}} = \frac{I_m}{(\omega_S - \omega_G) \cdot H} \cdot \pi \cdot h \cdot r_{SP} \cdot \omega_G^3 \cdot \mu_R \cdot D_S \cdot \frac{1}{\cos \psi} \quad (5.13)$$

In Gl. (5.13) sind die Einflussgrößen auf die Rohrreibung zu erkennen. Es gehen sowohl Konstruktionsparameter wie die Ganghöhe, der Schneckendurchmesser und die Förderhöhe, als auch Betriebsparameter wie der Massenstrom, der Füllungsgrad und die Drehzahl und des Weiteren auch Stoffparameter, wie der Reibwert zwischen dem Fördergut und der Rohrwand ein.

Alle weiteren enthaltenen Größen wie die Gutwinkelgeschwindigkeit ω_G , der Förderwinkel ψ und der Schwerpunktsradius des Guts r_{SP} resultieren aus diesen Größen.

Aufgrund der relativ aufwendigen Berechnung des Schwerpunktsradius (s. Kap. 3.2) in Abhängigkeit von zahlreichen Einflussgrößen, wird in Kapitel 5.2.5 eine vereinfachte, grafische Lösungsmöglichkeit vorgestellt.

5.2.3 Wendelreibung

Die Wendelreibung berechnet sich aus der Gesamtreibkraft R_S auf der Schneckenwendel und der Relativgeschwindigkeit $v_{S,rel}$ zwischen Fördergut und Schneckenwendel am Gutschwerpunkt:

$$P_{\text{Wendel,Reib}} = R_S \cdot v_{S,rel} \quad (5.14)$$

Die für die Bestimmung der Wendelreibung maßgebliche Relativgeschwindigkeit zwischen Fördergut und Schneckenwendel $v_{S,rel}$ tritt an der Stelle des Gutschwerpunkts r_{SP} auf. Sie berechnet sich folgendermaßen:

$$v_{S,rel} = \frac{r_{SP} \cdot (\omega_S - \omega_G)}{\cos \alpha_{SP}} \quad (5.15)$$

Die Gesamtreibkraft R_S wirkt dabei stets in tangentialer Richtung und zwar entgegen der relativen Bewegung des Guts zur Wendel. Sie berechnet sich aus den zur Schneckenwendel normalen Kraftkomponenten der Gewichtskraft $G_{S,n}$ und der Reibkraft R_R am Förderrohr:

$$R_S = \mu_S \cdot G_{S,n} + \mu_S \cdot R_R \cdot \sin(\alpha_{SP} + \psi) \quad (5.16)$$

Darin ist μ_S der Reibungskoeffizient zwischen Fördergut und Schneckenwendel, α_{SP} der Steigungswinkel der Schneckenwendel im Gutschwerpunkt und ψ der Förderwinkel, unter dem das Gut gefördert wird.

Die Normalkraft auf die Schneckenwendel $G_{S,n}$ ergibt sich aus der Gewichtskraft des Förderguts G und dem Steigungswinkel der Schneckenwendel an der Stelle des Gutschwerpunkts α_{SP} . Die Gewichtskraft des Guts im Förderer berechnet sich aus dem Massenstrom I_m , der axialen Gutgeschwindigkeit v_{ax} und der Förderhöhe h .

Die Normalkraft auf die Wendel $G_{S,n}$ folgt demnach zu:

$$G_{S,n} = G \cdot \cos \alpha_{SP} = m \cdot g \cdot \cos \alpha_{SP} = \frac{I_m}{v_{ax}} \cdot h \cdot g \cdot \cos \alpha_{SP} \quad (5.17)$$

Der Steigungswinkel der Schneckenwendel an der Stelle des Gutschwerpunkts kann aus der Ganghöhe H der Schnecke und dem Schwerpunktsradius r_{SP} ermittelt werden:

$$\alpha_{SP} = \arctan\left(\frac{H}{2 \cdot \pi \cdot r_{SP}}\right) \quad (5.18)$$

Daraus resultiert die Reibkraft an der Schneckenwendel:

$$R_S = \mu_S \cdot \frac{I_m}{v_{ax}} \cdot h \cdot (g \cdot \cos \alpha_{SP} + R_{SP} \cdot \omega_G^2 \cdot \mu_R \cdot \sin(\alpha_{SP} + \psi)) \quad (5.19)$$

Durch Einsetzen von Gl. (5.19) und Gl. (5.15) in Gl. (5.14) ergibt sich die Reibleistung an der Schneckenwendel:

$$P_{Wendel,Reib} = \mu_S \cdot \frac{I_m}{v_{ax}} \cdot h \cdot (g \cdot \cos \alpha_{SP} + r_{SP} \cdot \omega_G^2 \cdot \mu_R \cdot \sin(\alpha_{SP} + \psi)) \cdot \frac{r_{SP} \cdot (\omega_S - \omega_G)}{\cos \alpha_{SP}} \quad (5.20)$$

Wie beim Berechnungsansatz der Rohrreibleistung ist zu erkennen, dass die Wendelreibleistung eine Funktion von Konstruktions-, Betriebs-, und Schüttgutparametern ist.

5.2.4 Förderfaktor

Wie bereits erläutert, kann der Gesamtleistungsbedarf nicht ausschließlich durch analytisch zu bestimmende Anteile errechnet werden. Es bedarf eines empirischen Kennwertes, der sonstige, noch nicht erfasste Leistungsanteile berücksichtigt.

Zunächst werden daher die gemessenen Gesamtreibleistungen zusammen mit den analytisch zu ermittelten Reibleistungsanteilen aufgetragen. Diese beiden Verläufe zeigt Abbildung 5-3. Es ist deutlich zu erkennen, dass der analytisch zu ermittelnde Teil der Reibleistung nur etwa die Hälfte, bei geringen Drehzahlen, bzw. etwa ein Viertel, bei höheren Drehzahlen, der, bei den Versuchen gemessenen, Größe der Gesamtreibleistung ausmacht.

Die Berechnung des Förderfaktors λ_v erfolgt aus der in dieser Arbeit gemessenen tatsächlichen Reibleistung im Förderer und der Summe der analytisch zu berechnenden Reibleistungen. Letztere setzt sich aus der Reibung am Rohr (Rohrreibleistung) und der Reibung an der Schneckenwendel (Wendelreibleistung) zusammen.

Der Berechnungsansatz für den Förderfaktor lautet wie folgt:

$$\lambda_v = \frac{P_A - P_{Hub}}{P_{Reib,analyt.}} = \frac{P_{Reib,tat}}{P_{Reib,analyt.}} = \frac{P_{Reib,tat}}{P_{Rohr,Reib} + P_{Wendel,Reib}} \quad (5.21)$$

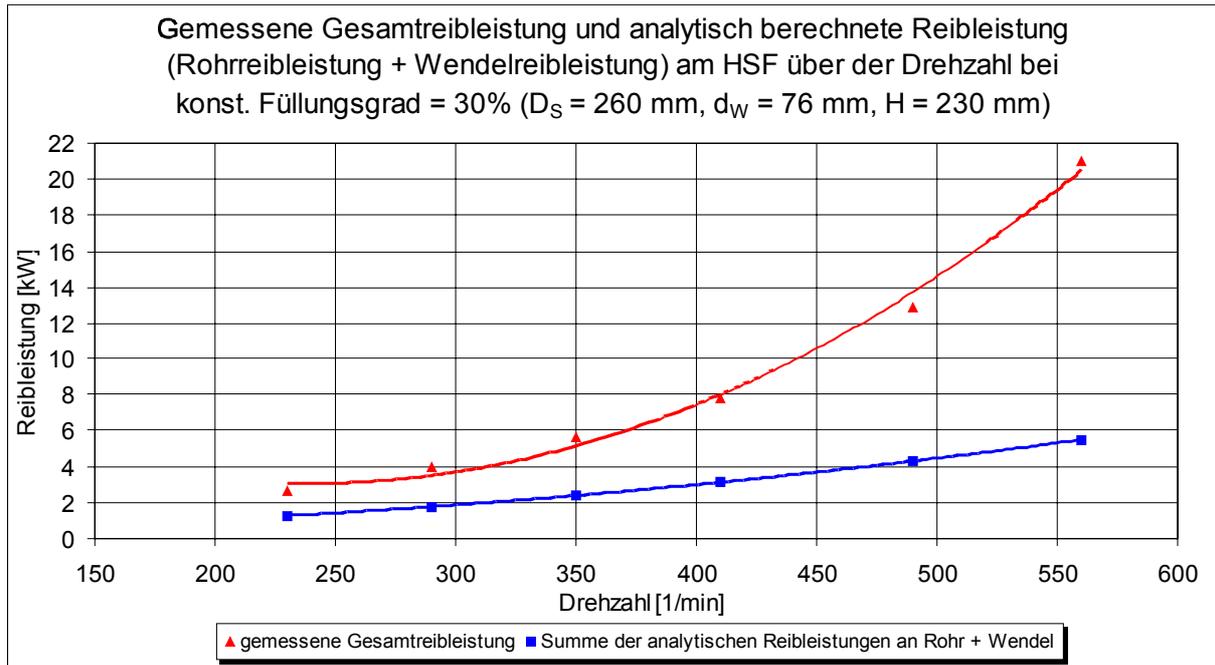


Abbildung 5-3: Gemessene Gesamtreibleistung und Summe der analytisch berechenbaren Reibleistungen, aufgetragen über der Drehzahl bei 30 % Füllungsgrad für den Versuchsförderer; (vertikale Förderer, Fördergut: Weizen)

Nun stellt sich die Frage, als Funktion welcher Einflussgrößen der Förderfaktor aufgetragen und zu ermitteln ist. Als zweckmäßig erscheinen hier Größen, die eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Förderzustands ermöglichen.

Für den Fall, dass nur eine Fördergeometrie betrachtet wird, bietet sich hierfür neben dem Füllungsgrad die Schneckendrehzahl an. Eine Übertragbarkeit des Förderfaktors auf andere Fördergeometrien ist damit jedoch nicht sinnvoll möglich, da konstante Schneckendrehzahlen bei unterschiedlichen Fördergeometrien verschiedenartige Betriebs- und Förderzustände hervorrufen können.

Daher muss eine Einflussgröße gewählt werden, die den Förderzustand für jede Fördergeometrie möglichst genau erfasst. Innerhalb der theoretischen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit stellte sich die Winkelgeschwindigkeit des Förderguts für den vertikalen Schneckenförderer als geeignete Koppelgröße zwischen unterschiedlichen Geometrien heraus.

Der Verlauf des Förderfaktors λ_v über der Gutwinkelgeschwindigkeit und dem Füllungsgrad ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass der Verlauf des Förderfaktors λ_v über der Gutwinkelgeschwindigkeit eine parabolische

Funktion annimmt und die Steigung der Funktion für jeweils konstante Füllungsgrade annähernd gleich groß ist.

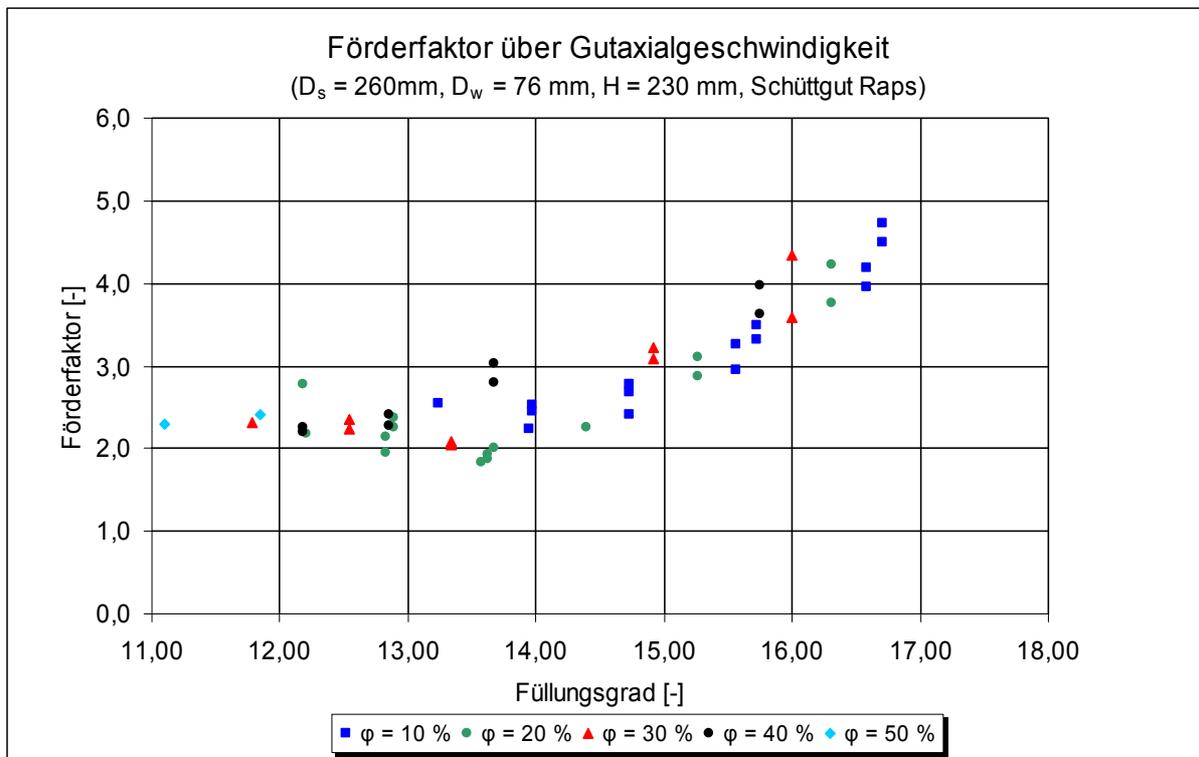


Abbildung 5-4: Verlauf des Förderfaktors λ_v über der Gutwinkelgeschwindigkeit für den Versuchsförderer (vertikale Förderung, Fördergut: Raps)

Da als wesentliche Einflussparameter auf den Fördervorgang und den Leistungsbedarf in den Arbeiten von *Günthner* [Gün-02a], *Fottner* [Fo-02] und *Rong* [Ro-04] die Betriebsparameter Drehzahl und Füllungsgrad genannt wurden, ist zusätzlich noch der Verlauf des Förderfaktors über dem Füllungsgrad von Interesse. Der Einfluss der Drehzahl geht über die Gutwinkelgeschwindigkeit mit ein.

In Abbildung 5-5 ist der Verlauf des Förderfaktors über dem Füllungsgrad für verschiedene Drehzahlen dargestellt.

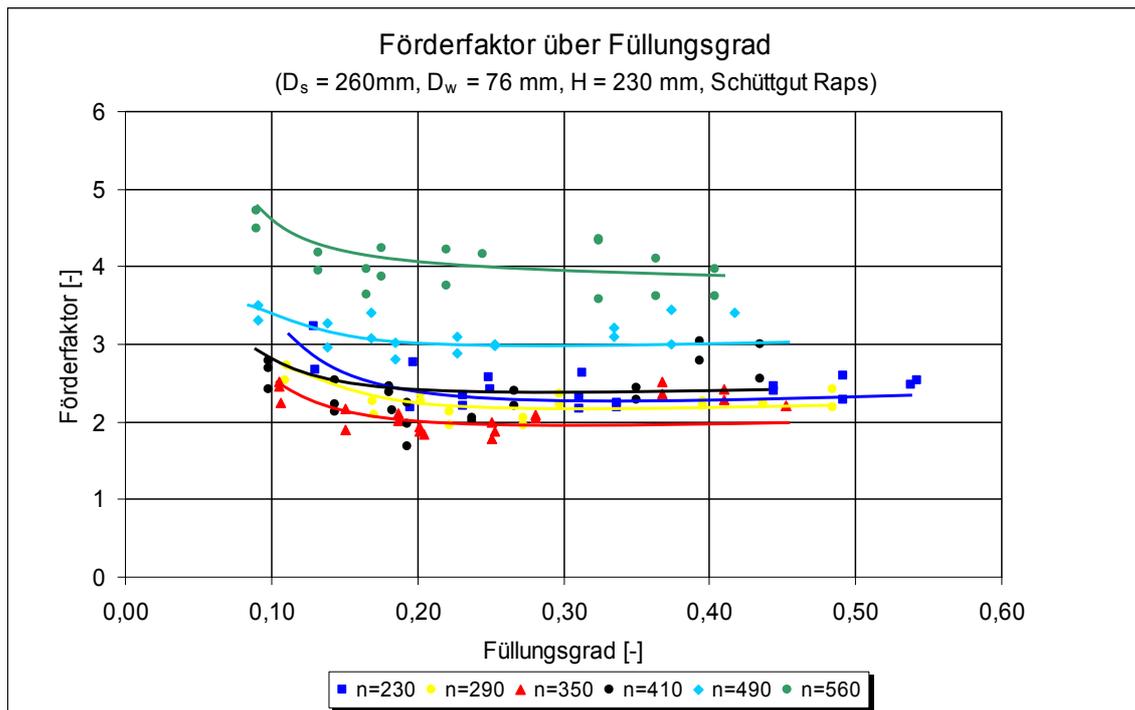


Abbildung 5-5: Verlauf des Förderfaktors λ_v über dem Füllungsgrad (vertikale Förderung, Fördergut: Raps)

Deutlich zu erkennen ist, dass für Füllungsgrade größer ca. 20 % der Förderfaktor für eine konstante Drehzahl bei steigendem Füllungsgrad nahezu konstant bleibt. Für Füllungsgrade kleiner ca. 20 % steigt der Förderfaktor mit sinkendem Füllungsgrad an. Als Grund für diesen Anstieg können Spaltverluste, Quetschungen und Guttermahlung genannt werden, da deren Gewichtung im Gesamtleistungsbedarf mit sinkendem Füllungsgrad zunimmt. Somit ist für eine Förderung mit Füllungsgrad größer 20 % keine Abhängigkeit des Förderfaktors vom Füllungsgrad zu erkennen.

Auf Basis der vorangegangenen Ergebnisse wird der Förderfaktor in Einzelfaktoren zerlegt, welche die verschiedenen Einflüsse widerspiegeln. Der Förderfaktor setzt sich somit aus den folgenden Komponenten zusammen:

$$\lambda_v = \lambda_{S,v} \cdot \lambda_\omega \quad (5.22)$$

Die einzelnen Komponenten definieren sich wie folgt:

- $\lambda_{S,v}$: **vertikaler Schüttgutbeiwert:** $\lambda_{S,v} = f(\text{Schüttgut})$
 $\lambda_{S,v}$ ist ein rein schüttgutspezifischer, konstanter Beiwert, der die innere Reibung des Schüttguts und die mechanischen Eigenschaften des Guts berücksichtigt (Fließeigenschaften, Korngröße, Feuchtigkeit, Schüttdichte, Kornhärte, etc...).
- λ_{ω} : **Rotationsbeiwert:** $\lambda_{\omega} = f(\text{Gutwinkelgeschwindigkeit})$
 λ_{ω} berücksichtigt den parabolischen Anstieg des Förderfaktors λ_v über der Winkelgeschwindigkeit des Förderguts für jeweils konstante Füllungsgrade.

Der Förderfaktor λ_v und der daraus zu berechnende, konstante Schüttgutbeiwert $\lambda_{S,v}$, können nur rein experimentell in Abhängigkeit des Schüttguts ermittelt werden.

Der Rotationsbeiwert wird über der Gutwinkelgeschwindigkeit abgebildet und errechnet sich aus:

$$\lambda_{\omega} = 0.0484 \cdot \omega_a^2 - 1.1669 \cdot \omega_a + 8.0284 \quad (5.23)$$

In Abbildung 5-6 ist der Verlauf der des Rotationsbeiwertes über der Gutwinkelgeschwindigkeit dargestellt.

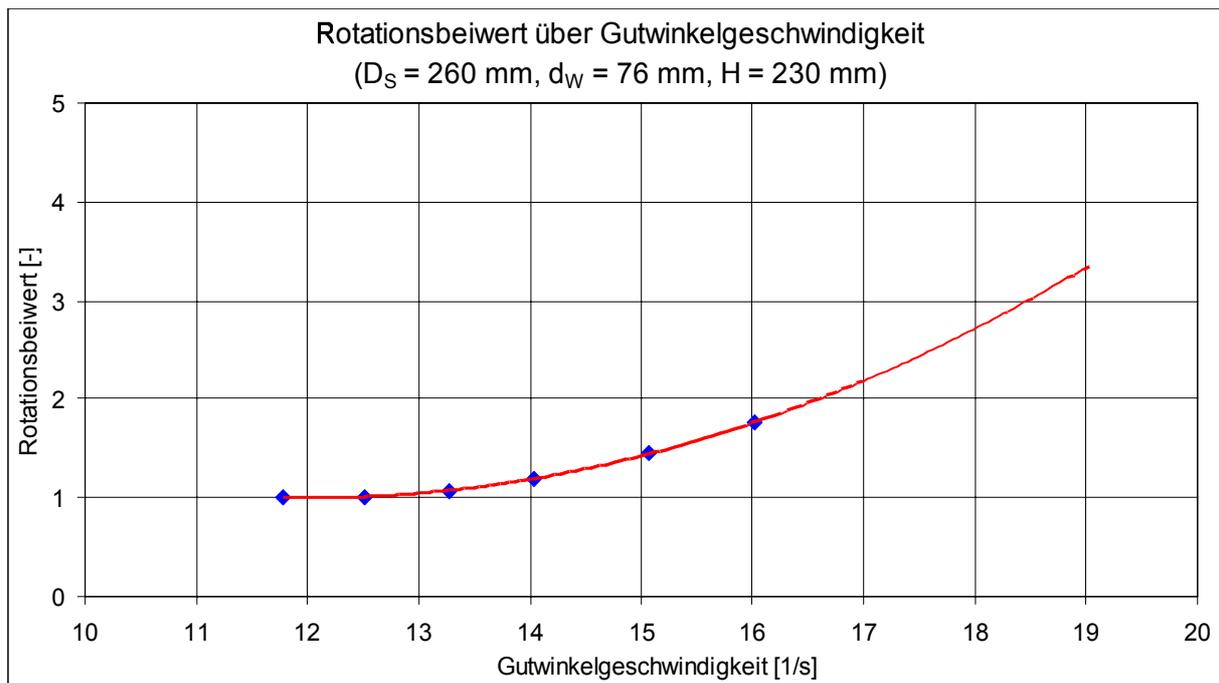


Abbildung 5-6: Verlauf des Rotationsbeiwerts über der Gutwinkelgeschwindigkeit für den Versuchsförderer (vertikale Förderung)

Mit Hilfe des Rotationsbeiwerts λ_ω kann der konstante, rein schüttgutspezifische vertikale Schüttgutbeiwert $\lambda_{S,v}$ berechnet werden:

$$\lambda_{S,v} = \frac{\lambda_v}{\lambda_\omega} \quad (5.24)$$

In den Arbeiten von *Günthner* [Gün-02] und *Rong* [Ro-04] wurden für verschiedene Schüttgüter vertikale Schüttgutbeiwerte ermittelt. Diese Werte sind in Tabelle 5-1 nochmals aufgeführt.

Für die verschiedenen Schüttgüter ergeben sich meist sehr gute Übereinstimmungen zwischen dem Berechnungsverfahren und den Messwerten. Die Abweichungen lagen in der Regel unter 10 %. Für wenige Schüttgüter wurde diese Abweichung überschritten. Alle diese Abweichungen lagen jedoch deutlich unter 20 %, sodass für diese Schüttgüter noch ein gutes Ergebnis erzielt wurde.

Tabelle 5-1: Schüttgutbeiwerte $\lambda_{S,v}$ für die vertikale Förderung für verschiedene Fördergüter inkl. zugehöriger Reibwerte zwischen Gut und Förderer

Schüttgut	Vertikaler Schüttgutbeiwert $\lambda_{S,v}$	Reibwerte Gut / Förderer $\mu_R = \mu_S$
Futterkalk	2,4	0,58
Gerste	1,7	0,47
Hafer	1,4	0,45
Kohle	1,4	0,35-0,53
Kunstdünger	2,3	0,42
Mais	1,9	0,38
PET	1,6	0,49
Raps	2,1	0,40
Sand	2,1	0,51
Soja-Schrot	1,5	0,51
Weizen	1,7	0,40

5.2.5 Vereinfachte, grafische Lösungsmöglichkeit

Das in Kapitel 5.2 vorgestellte Berechnungsverfahren für vertikale Schneckenförderer ist für den täglichen Einsatz in der Praxis noch nicht tauglich. Verschiedene Faktoren, im Besonderen der Schwerpunktsradius r_{SP} und die Gutwinkelgeschwindigkeit ω_G , sind nur durch für den Anwender zu schwierige Formel zu berechnen.

Daher wird nun im Folgenden eine vereinfachte, grafische Lösungsmöglichkeit vorgestellt. Diese soll dem Anwender eine Berechnung mit annähernd gleicher Genauigkeit in wenigen Minuten ermöglichen. Das Verfahren muss sich dabei jedoch auf ausgewählte Fördergeometrien beschränken. Als Standardgeometrien werden die aus der *DIN 15261* [DIN 15261] bekannten Fördergeometrien verwendet. Die Berechnungsergebnisse für die Rohr- und Wendelreibleistung sind für einen Füllungsgrad von $\varphi = 40\%$ und einen Reibwert zwischen Fördergut und Rohr bzw. Wendel von $\mu_R = \mu_S = 0,3$ in Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 dargestellt.

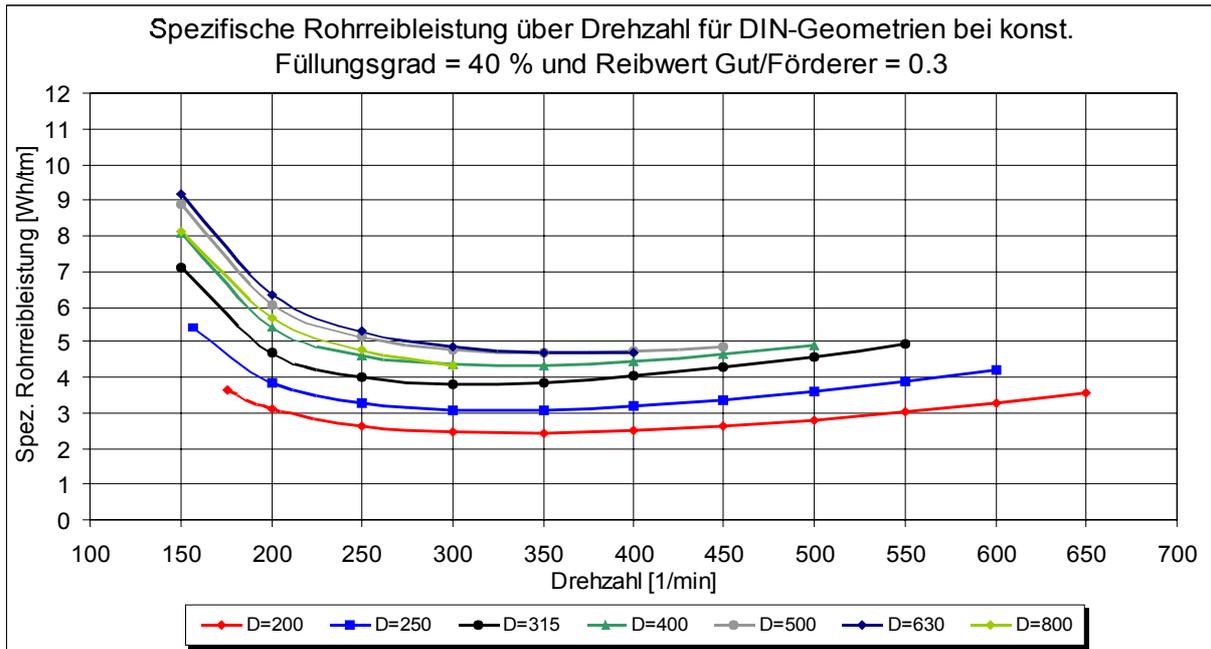


Abbildung 5-7: Verlauf der spezifischen Rohrreibleistung über der Drehzahl bei 40 % Füllungsgrad, Reibwerten zwischen Fördergut und Förderer von 0,3 und Fördergeometrien nach DIN 15261 (vertikale Förderung)

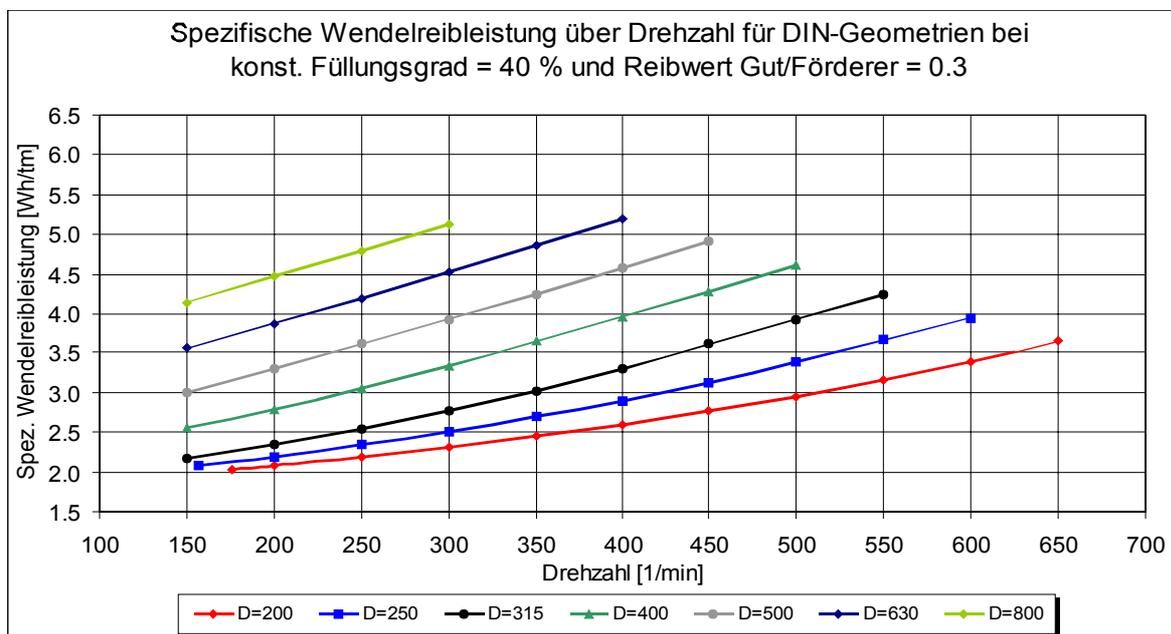


Abbildung 5-8: Verlauf der spezifischen Wendelreibleistungen über der Drehzahl bei 40 % Füllungsgrad, Reibwerten zwischen Fördergut und Förderer von 0,3 und Fördergeometrien nach DIN 15261 (vertikale Förderung)

Um auch eine Berechnung für Schüttgüter zu ermöglichen, die andere Reibwerte zwischen Schüttgut und Förderer aufweisen, werden in dieser Arbeit normierte

Reibungsfaktoren eingeführt. Die Faktoren werden als Rohrreibungsfaktor ε_R und Wendelreibungsfaktor ε_S bezeichnet und sind Abbildung 5-9 zu entnehmen.

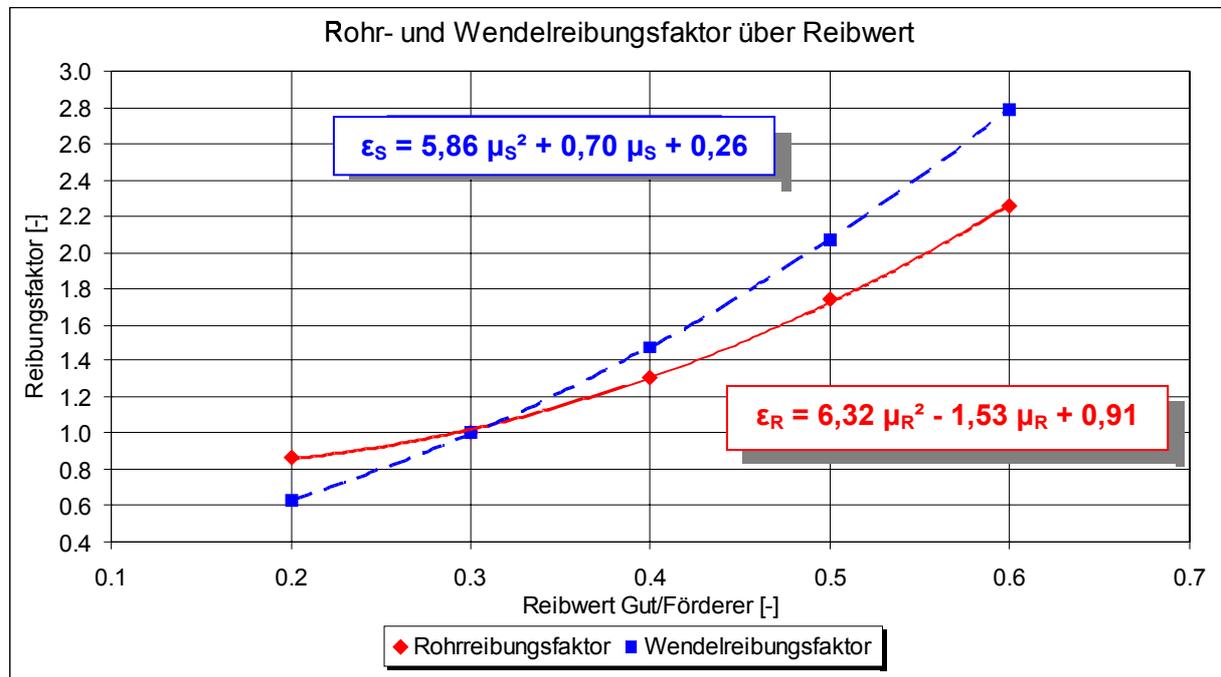


Abbildung 5-9: Verlauf des Rohr- und Wendelreibungsfaktors über dem Reibwert zwischen Fördergut und Innenrohr bzw. Schneckenwendel ($\mu_R = \mu_S$)

Der Rohrreibungsfaktor ε_R und der Wendelreibungsfaktor ε_S können wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_R = 6.32 \cdot \mu_R^2 - 1.53 \cdot \mu_R + 0.91 \quad (5.25)$$

$$\varepsilon_S = 5.86 \cdot \mu_S^2 + 0.70 \cdot \mu_S + 0.26 \quad (5.26)$$

Um eine weitere Übertragbarkeit der Berechnungsmethode auf andere Füllungsgrade zu ermöglichen, werden zusätzliche Füllungsfaktoren eingeführt. Der Rohrfüllungsfaktor φ_R und der Wendelfüllungsfaktor φ_S berechnen sich wie folgt:

$$\varphi_R = 1.81 \cdot \varphi^2 - 3.14 \cdot \varphi + 1.97 \quad (5.27)$$

$$\varphi_S = 0.69 \cdot \varphi^2 - 1.32 \cdot \varphi + 1.42 \quad (5.28)$$

Damit können Rohrreibleistung $P_{Rohr,Reib}$ und Wendelreibleistung $P_{Wendel,Reib}$ nach folgenden Formeln berechnet werden:

$$P_{Rohr,Reib} = I_m \cdot h \cdot \varepsilon_R \cdot \varphi_R \cdot P_{Rohr,Reib,spez} \quad (5.29)$$

$$P_{Wendel,Reib} = I_m \cdot h \cdot \varepsilon_S \cdot \varphi_S \cdot P_{Wendel,Reib,spez} \quad (5.30)$$

Zusammen mit der Hubleistung aus Formel (5.5) und dem Förderfaktor aus Formel (5.22) ergibt sich eine Antriebsleistung P von:

$$P = \lambda_{S,v} \cdot \lambda_\omega \cdot I_m \cdot h \cdot (\varepsilon_R \cdot \varphi_R \cdot P_{Rohr,Reib,spez} + \varepsilon_S \cdot \varphi_S \cdot P_{Wendel,Reib,spez}) + P_{Hub} \quad (5.31)$$

5.3 Verifikation durch Leistungsmessungen

5.3.1 Voraussetzungen für Leistungsmessungen

Da ein Vergleich zwischen dem Vertikalförderer der Versuchsanlage des Lehrstuhls fml einerseits und dem vertikalen Schneckenförderer einer externen Anlage andererseits vorgenommen werden soll, müssen im Vorfeld bestimmte Voraussetzungen gegeben und geklärt sein.

Grundbedingung für einen Vergleich zweier Anlagen ist, dass das geförderte Schüttgut übereinstimmt, sodass die gleichen Schüttgutbeiwerte angesetzt werden können. Das heißt, dass für eine Leistungsmessung nur eine Anlage heran gezogen werden kann, die mit einem der Schüttgüter betrieben wird, die bereits in den Versuchsreihen am Lehrstuhl fml untersucht wurden.

Da der Massenstrom einen wichtigen Parameter bei der Leistungsbestimmung eines Schneckenförderers darstellt, muss dieser bei einer Messung bestimmt werden. Daher ist es sinnvoll für eine Vergleichsmessung eine Anlage auszuwählen, die über ein Massenstrommesssystem, meist eine Bandwaage, verfügt.

5.3.2 Durchführung der Leistungsmessungen

Die Durchführung einer Leistungsmessung gliedert sich in die folgenden Punkte auf:

- Ermittlung der Geometriedaten des Schneckenförderers

Für die nachfolgende Vergleichsrechnung werden der Schneckendurchmesser, der Wellendurchmesser, Schneckenganghöhe sowie die Förderhöhe benötigt.

- Ermittlung der Betriebsdrehzahl des Schneckenförderers
- Ermittlung der elektrischen Daten des Antriebsmotors

Zur Umrechnung der Messdaten werden die Betriebsspannung und der Nennstrom des Antriebsmotors benötigt.

- Messung des Massenstroms während des Betriebs und gleichzeitige
- Messung des Wirkstroms am Antrieb des vertikalen Schneckenförderers
- Entnahme einer Schüttgutprobe
- Bestimmung des Reibwertes und der Korngrößenverteilung der Schüttgutprobe

Der Ablauf sowie der Versuchsaufbau zur Reibwertbestimmung sowie der Bestimmung der Korngrößenverteilung sind in Kapitel 4.3 erläutert.

- Umrechnung des Wirkstroms in eine mechanische Leistung

Mit der ermittelten Betriebsspannung und dem gemessenen Wirkstrom wird die vom Motor aufgenommene Leistung ermittelt.

Dabei gilt:

$$P_{el,Wirk} = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{M,Schein} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{M,Wirk} \quad (5.32)$$

Die mechanisch abgegebene Leistung P_{mech} ermittelt sich aus:

$$P_{mech} = P_{el,Wirk} \cdot \eta_M \cdot \eta_G = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{M,Wirk} \cdot \eta_{ges} \quad (5.33)$$

Der Getriebewirkungsgrad kann mit $\eta_M = 0,99$ angesetzt werden [Lin-96]. Für moderne Getriebemotoren höherer Leistungsklassen ($> ca. 75 kW$) kann unabhängig vom Lastfall ein Motorwirkungsgrad von $\eta_M = 0,95$ berücksichtigt werden [SEW-02].

5.3.3 Messung an der Referenzanlage 1

Als erster Referenzförderer diente der vertikale Schneckenförderer eines Schiffsentladers zur Entladung von Steinkohle für ein Kohlekraftwerk.

Das zu fördernde Schüttgut wird dabei mit Hilfe eines speziellen Zuführorgans aus dem Schiff in den vertikalen Schneckenförderer transportiert. Dieser fördert das Material zu einem horizontal bis leicht geneigten Schneckenförderer. Dieser transportiert das Material weiter bis zu einer vertikalen Rinne, in der das Material durch Schwerkraft auf einen Gurtförderer zum weiteren Transport ins Kohlekraftwerk fällt.

Für die Verifikation des Berechnungs- und Auslegungsverfahrens wird ausschließlich der vertikale Schneckenförderer betrachtet. Die technischen Daten des vertikalen Schneckenförderers sind in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Technische Daten der Referenzanlage 1

Schneckendurchmesser	490	mm
Schneckenganghöhe	380	mm
Förderhöhe	13,25	m
Anzahl der Zwischenlager	2	-
Nennmassenstrom	300	t / h
Nennantriebsleistung	90	kW
Drehzahl	185	1 /min

Neben den technischen Daten des Schneckenförderers müssen die Kennwerte des Schüttgutes bekannt sein. Nach der Probennahme wird daher die Korngrößenverteilung sowie der Reibwert des in dieser Anlage geförderten Schüttgutes ermittelt.

Der Ablauf sowie der Versuchsaufbau zur Reibwertbestimmung sind in Kapitel 4.3 erläutert. Wie Abbildung 5-10 zeigt, wird ein Reibwert der mittel feuchten Kohle auf Stahl von 0,49 ermittelt

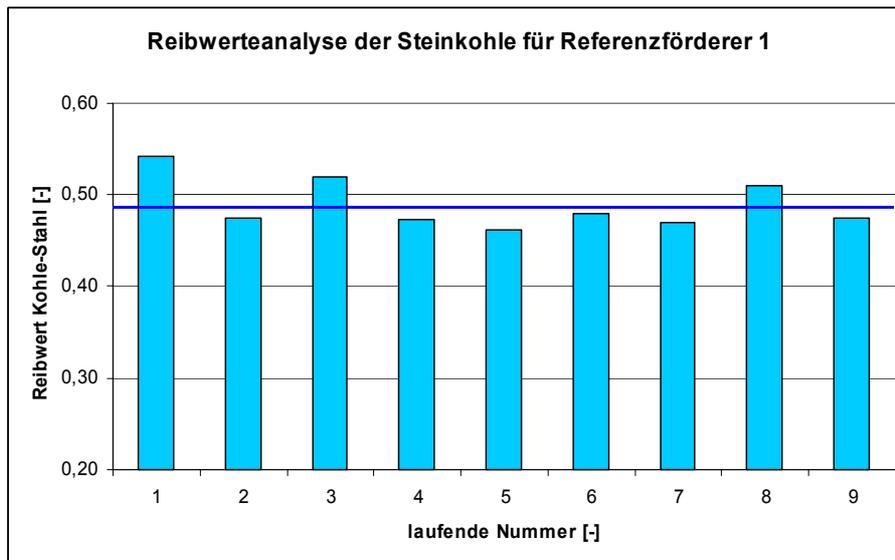


Abbildung 5-10: Ergebnis der Reibwertanalyse des Schüttgutes Steinkohle für die Referenzanlage 1

Die Korngrößenverteilung der verwendeten Kohle ist in Abbildung 5-11 dargestellt.

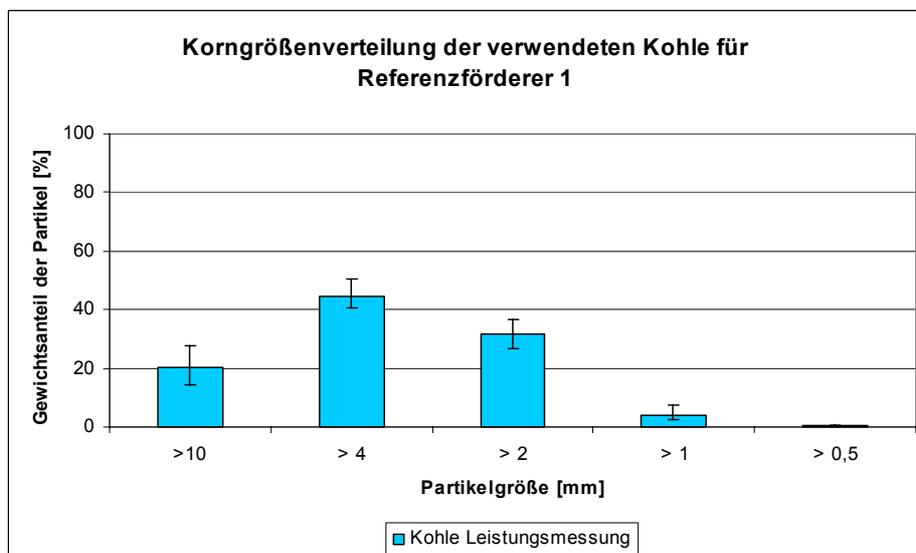


Abbildung 5-11: Ergebnis der Bestimmung der Korngrößenverteilung des Schüttgutes Steinkohle für die Referenzanlage 1

Auf Basis der technischen Daten des Referenzförderers 1 und den ermittelten schüttguttechnischen Kennwerten wird das neu entwickelte Berechnungsverfahren mit der Leistungskurve der Referenzanlage 1 verglichen. Den Vergleich der beiden Kurven ist in Abbildung 5-12 dargestellt.

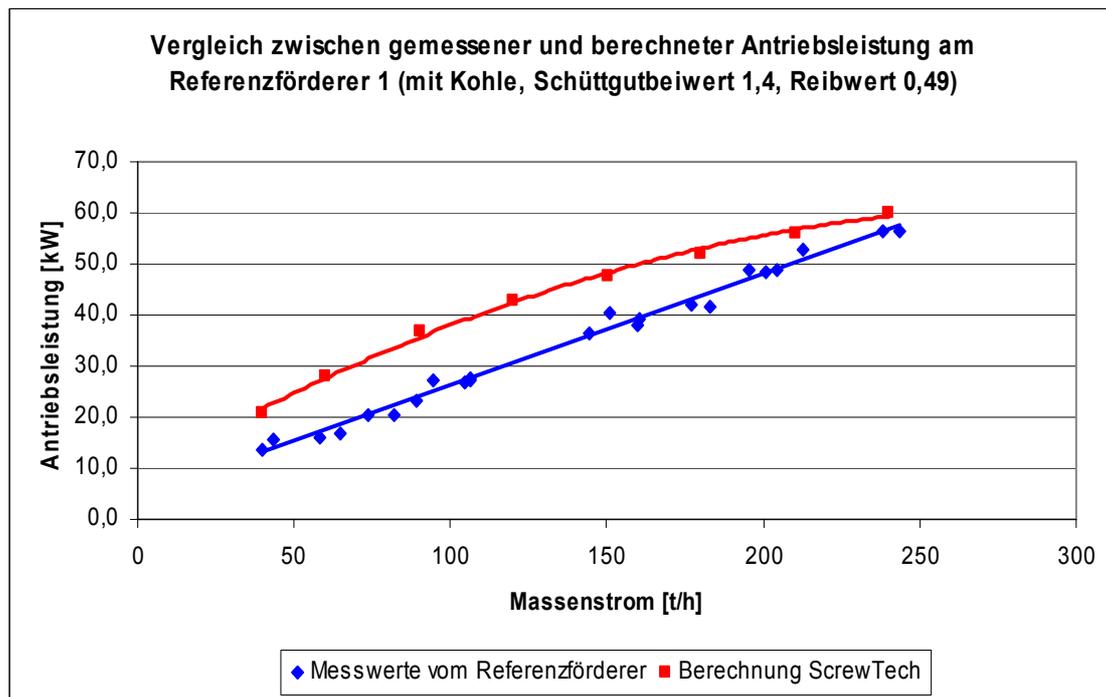


Abbildung 5-12: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Antriebsleistung am Referenzförderer 1

Beim Vergleich der beiden Kurven aus der Leistungsmessung und der Berechnung der Antriebsleistung mit dem entwickelten Berechnungsverfahren lässt sich erkennen, dass die Kurve der Berechnung leicht über der Kurve der Messwerte der Leistungsmessung liegt. Zudem weist die Kurve der Berechnung eine leicht konvexe Form auf. Diese ergibt sich durch den unterschiedlichen Einfluss der Rohrreibleistung und der Wendelreibleistung zur Gesamtleistung. Mit zunehmendem Massenstrom und damit zunehmendem Füllungsgrad erhöht sich der Einfluss der Wendelreibleistung relativ zur Rohrreibleistung. Dieses Verhalten spiegelt sich in den Messwerten nicht wieder.

Der Schneckenförderer der Referenzanlage 1 wird im Regelbetrieb mit einem Massenstrom von 200 bis 250 t/h betrieben. In diesem Betriebsbereich beträgt die Abweichung zwischen Messung und Berechnung der Antriebsleistung ca. 10% bis ca. 4%.

5.3.4 Messung an der Referenzanlage 2

Auch als zweiter Referenzförderer diente der vertikale Schneckenförderer eines Schiffsentladers zur Entladung von Steinkohle für ein nahe gelegenes Kohlekraftwerk. Der Aufbau der Referenzanlage 2 gleicht sehr dem der

Referenzanlage 1. Auch hier wird das zu fördernde Schüttgut mit Hilfe eines speziellen Zuführgans aus dem Schiff in den vertikalen Schneckenförderer transportiert. Dieser fördert das Material zum oberen Ende des vertikalen Schneckenförderers und übergibt es dort an einen horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderer. Dieser transportiert das Material weiter bis zu einer vertikalen Rinne, in der das Material durch Schwerkraft auf einen Gurtförderer fällt. Dieser fördert das Material direkt in das Kohlekraftwerk bzw. auf eine Halde.

Sehr deutlich unterscheidet sich die Referenzanlage 2 von der Referenzanlage 1 durch ihre Größe und damit Leistungsfähigkeit. Während Referenzanlage 1 auf einen Massenstrom von 250 t/h ausgelegt ist, beträgt der Nennmassenstrom von Referenzanlage 2 1200 t/h.

Die technischen Daten des Schneckenförderers der Referenzanlage 2 sind in Tabelle 5-3 dargestellt.

Tabelle 5-3: Technische Daten des vertikalen Schneckenförderers der Referenzanlage 2

Schneckendurchmesser	790	mm
Wellendurchmesser	270	mm
Schneckenganghöhe	675	mm
Förderhöhe	23,75	m
Anzahl der Zwischenlager	4	-
Nennmassenstrom	1200	t / h
Nennantriebsleistung	2 x 355	kW
Drehzahl	331	1 /min

Wie Abbildung 5-13 zeigt, ergab die Reibwertanalyse der nur leicht feuchten Kohle einen Reibwert zwischen Stahl und Kohle von 0,35.

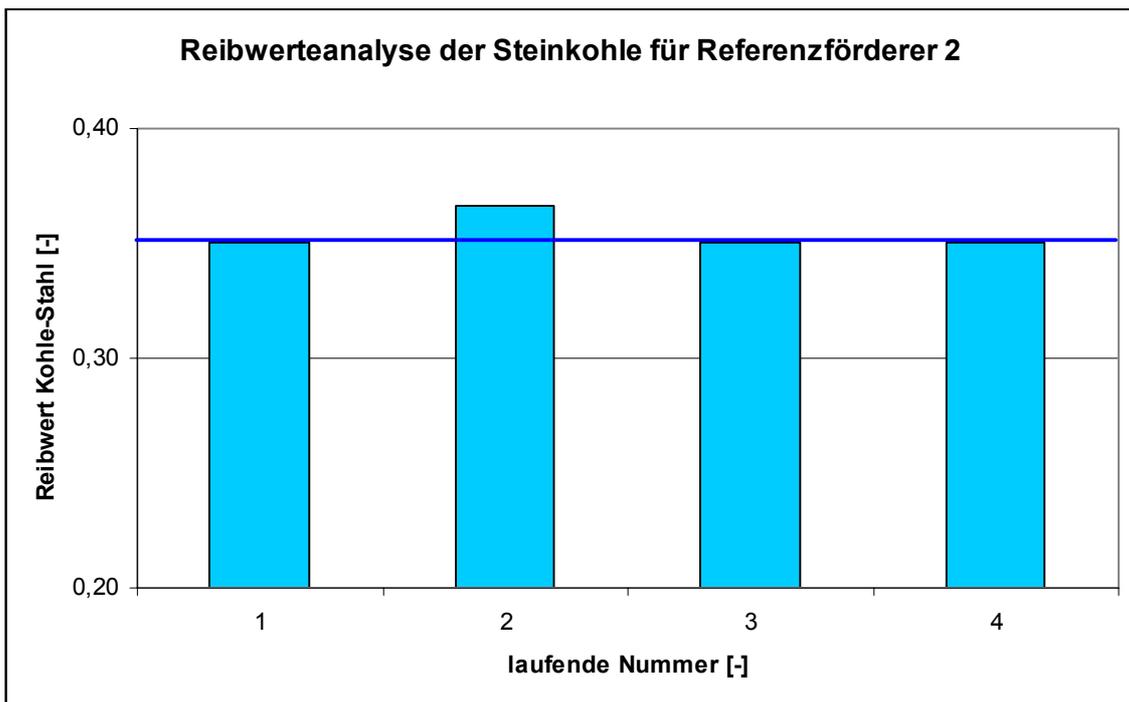


Abbildung 5-13: Ergebnis der Bestimmung des Reibwertes des Schüttgutes Steinkohle für die Förderversuche am Lehrstuhl fml

Auf Basis der technischen Daten des Referenzförderers 2 und den ermittelten schüttguttechnischen Kennwerten wird das neu entwickelte Berechnungsverfahren mit der Leistungskurve der Referenzanlage 2 verglichen. Den Vergleich der beiden Kurven ist in Abbildung 5-14 dargestellt.

Beim Vergleich der beiden Kurven aus der Leistungsmessung und der Berechnung der Antriebsleistung mit dem entwickelten Berechnungsverfahren lässt sich erkennen, dass die Kurve der Berechnung leicht über der Kurve der Messwerte der Leistungsmessung liegt. Wie in Abbildung 5-12 lässt sich auch hier eine leicht konvexe Form der Kurve aus der Berechnung erkennen.

Der Schneckenförderer der Referenzanlage 2 wird im Regelbetrieb mit einem Massenstrom von ca. 1100 bis ca. 1400 t/h betrieben. In diesem Betriebsbereich beträgt die Abweichung zwischen Messung und Berechnung der Antriebsleistung ca. 15% bis ca. 10%.

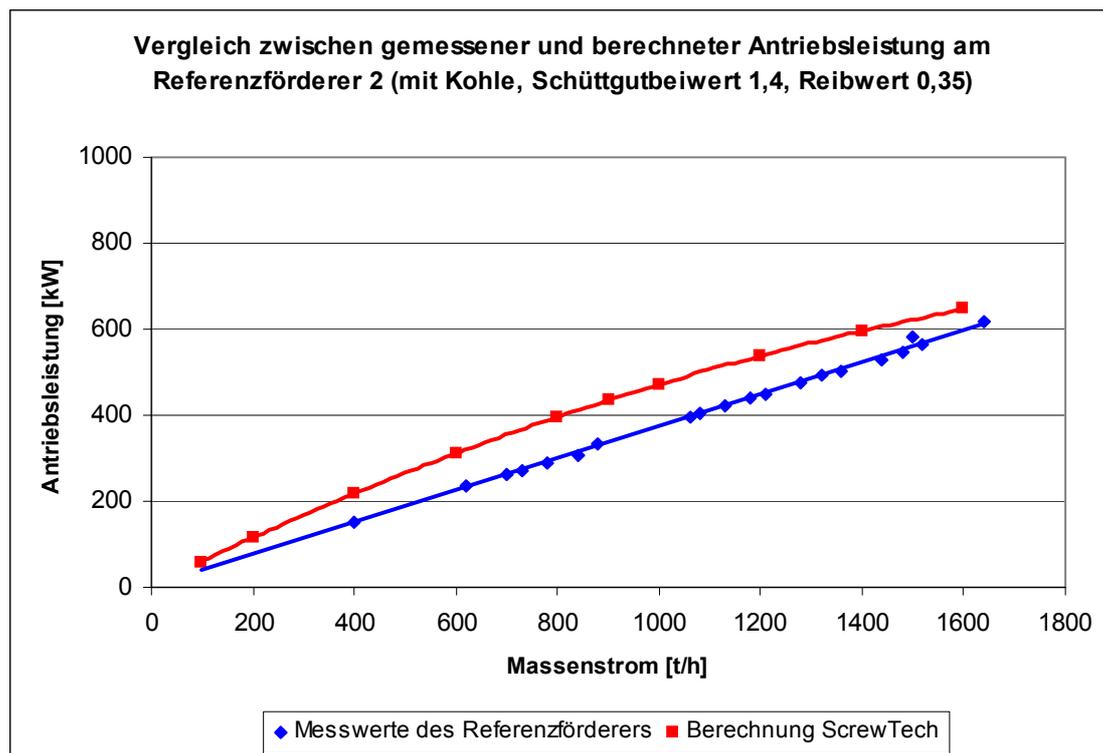


Abbildung 5-14: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Antriebsleistung am Referenzförderer 2

5.3.5 Zusammenfassende Bewertung der Leistungsmessungen

Bei beiden Messungen lässt sich erkennen, dass die Kurven der Berechnung leicht über den Kurven der Messwerte der Leistungsmessung liegen.

Zudem weisen die Kurven der Berechnung eine leicht konvexe Form auf. Diese ergibt sich durch den unterschiedlichen Einfluss der Rohrreibleistung und der Wendelreibleistung zur Gesamtleistung. Mit zunehmendem Massenstrom und damit zunehmendem Füllungsgrad erhöht sich der Einfluss der Wendelreibleistung relativ zur Rohrreibleistung. Dieses Verhalten spiegelt sich in den Messwerten zwar nicht wieder, dennoch wird der Leistungsanstieg über dem Massenstrom gut abgebildet.

Die Abweichung zwischen Leistungsberechnung und Leistungsmessung beträgt in den relevanten Betriebsbereichen der jeweiligen Förderanlagen zwischen 4% und 15%.

Für die Anwendung des Berechnungsverfahrens für eine Auslegung ergibt sich somit eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung.

Mit der Referenzanlage 1, mit einem Schneckendurchmesser von 490 mm, der Referenzanlage 2, mit einem Schneckendurchmesser von 790 mm, und der Versuchsanlage des Lehrstuhls fml, mit einem Schneckendurchmesser von 260 mm, wurden drei Förderanlagen mit sehr deutlich unterschiedlichen Förderergrößen und somit auch Nennmassenströmen untersucht. Da das Berechnungsverfahren anhand der Versuchsanlage entwickelt wurde und die Berechnungsergebnisse beider Referenzanlagen gut mit den Messergebnissen übereinstimmen, kann auch von einer Übertragbarkeit des Berechnungsverfahrens auf anderer Förderergrößen ausgegangen werden.

6 Auslegungsverfahren für horizontale und leicht geneigte Hochleistungs-Schneckenförderer

Im Rahmen dieses Projektes wurden an der Versuchsanlage des Lehrstuhls fml Versuche mit sehr hohen Füllungsgraden und Drehzahlen, Förderneigungen bis 20° gefahren sowie die Einflüsse von Zwischenlagern auf das Förderverhalten und den Leistungsbedarf analysiert. Die Ergebnisse, welche in Kapitel 4.4.3 vorgestellt wurden, bilden die Grundlage der weiteren theoretischen Untersuchungen sowie der Entwicklung eines Auslegungsverfahrens. Dieses soll, in Anlehnung an die DIN 15262, ebenfalls einfach zu handhaben und für den Anwender leicht verständlich sein.

6.1 Baugrößendimensionierung

6.1.1 Berechnung des Massenstroms

Ebenso wie in der DIN15262 [DIN 15262] leitet sich der Massenstrom aus folgendem Zusammenhang her.

Die Förderquerschnittsfläche A ergibt sich aus dem Füllungsgrad φ und dem Schneckendurchmesser D_S zu:

$$A = \varphi \cdot A_{th} = \varphi \cdot \pi \cdot \frac{D_S^2}{4} \quad (6.1)$$

Mit der Axialgeschwindigkeit des Schüttgutes v_{ax} , welche sich aus der Schneckendrehzahl n_S und der Ganghöhe H ergibt

$$v_{ax} = n_S \cdot H \quad (6.2)$$

und der Schüttdichte ρ berechnet sich der Massenstrom I_M zu:

$$I_m = \rho \cdot I_v = \rho \cdot A \cdot v_{ax} = \rho \cdot \varphi \cdot \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot n_s \cdot H \quad (6.3)$$

Zur Berechnung des Volumen- bzw. Massenstroms wird daher von einer rein axialen Gutbewegung ausgegangen. Rotatorische Geschwindigkeitskomponenten bleiben hier unberücksichtigt.

6.1.2 Einschränkungen und Richtlinien für den Betrieb

Mit den Erkenntnissen aus den experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 4.4.3 werden nun, aufbauend auf den Richtlinien der *DIN 15262* [DIN15262], Einschränkungen und Richtlinien für den Betrieb von horizontalen bis leicht geneigten Hochleistungs-Schneckenförderern formuliert.

Wie bereits in Kapitel 4.4.3.4 erläutert, ist im untersuchten Drehzahlbereich von 150 1/min und 370 1/min kein Zusammenhang zwischen der Drehzahl und einem Füllungsgradanstieg im Förderer zu erkennen. Daher sind die folgenden Einschränkungen für den gesamten Drehzahlbereich als gültig anzusehen. Restriktionen, die bereits in der *DIN 15262* [DIN15262] genannt werden und aufgrund der experimentellen Ergebnisse auch für den Betriebsbereich der Hochleistungs-Schneckenförderer heranzuziehen sind, werden dabei übernommen und als solche kenntlich gemacht.

Die in der *DIN 15262* [DIN15262] genannten Restriktionen bezüglich des Füllungsgrades φ in Abhängigkeit des Fördergutes sind in Anbetracht der experimentellen Untersuchungen auch für den Hochleistungsbereich einzuhalten.

$\varphi \approx 0,45$	Für leicht fließende, kaum schleißende Fördergüter (z.B. Mehl, Getreide)
$\varphi \approx 0,3$	Für mäßig schleißende, körnige bis kleinstückige Schüttgüter (z.B. Salz, Sand, Kohle)
$\varphi \approx 0,15$	Für schwere, stark schleißende, aggressive Schüttgüter (z.B: Asche, Kies, Erz)

Weiterhin haben die Untersuchungen in Kapitel 4.4.3.4 gezeigt, dass mit zunehmender Neigung des Schneckenförderers eine instationäre Füllungsgradzunahme bereits bei niedrigen Füllungsgraden erreicht wird (siehe dazu auch Abbildung 4-17). Um dies zu vermeiden, sind die oben genannten Füllungsgrade der Norm um bis zu 4 % je Grad Förderneigung zu reduzieren, also um bis zu 80 % bei 20° Förderneigung.

Die in der *DIN 15262* [DIN15262] zusätzlich genannten Restriktionen hinsichtlich der Reduzierung des Füllungsgrads beim Einsatz von Zwischenlagern um bis zu 10 %, falls Stauungen an diesen zu erwarten sind, werden aufgrund der experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit für leicht fließende Schüttgüter, wie zum Beispiel Weizen oder Raps als nicht zwingend erforderlich angesehen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zahlreiche Versuche mit Füllungsgraden von über 80 % gefahren, ohne dass Stauungen am Zwischenlager zu erkennen waren. Bei der Förderung von Kohle kam es jedoch bereits bei Füllungsgraden von ca. 50 % zu erheblichen Stauungen.

Eine weitere Einschränkung bezüglich der Fördergeometrie wird in Kapitel 6.2.6 näher behandelt.

6.2 Leistungsberechnung

Die Antriebsleistung errechnet sich für den Bereich der horizontalen bis leicht geneigten Hochleistungs-Schneckenförderer ebenso wie in der *DIN 15262* [DIN15262] aus einem Reibanteil und einem Anteil für Hubarbeit (bei leicht geneigter Förderung).

$$P_{Ges,0^\circ-20^\circ} = P_{Reib,gesamt} + P_{Hub} \quad (6.4)$$

6.2.1 Hubleistung

Der Anteil der Hubleistung tritt nur bei leicht geneigter Förderung auf und ist abhängig vom geförderten Massenstrom I_M und der Förderhöhe h . Die Hubleistung errechnet sich demnach aus folgender Formel:

$$P_{Hub} = I_m \cdot g \cdot h \quad (6.5)$$

6.2.2 Fiktive Gesamtreibleistung

Alle sonstigen während der Förderung auftretenden Leistungsverluste werden in der so genannten fiktiven Gesamtreibleistung zusammengefasst. Die fiktive Gesamtreibleistung berechnet sich aus dem Produkt der Gesamtreibungskraft $F_{R,gesamt}$ und der axialen Gutgeschwindigkeit v_{ax} . Die Gesamtreibungskraft $F_{R,gesamt}$ berechnet sich hier aus der Reibkraft am Förderrohr und einem fiktiven Reibungsbeiwert λ_h für horizontale und leicht geneigte Hochleistungs-Schneckenförderer. Mit $\cos\beta = 1$ für $\beta \leq 20^\circ$ gilt:

$$F_{R,gesamt} = \lambda_h \cdot m \cdot g \quad (6.6)$$

Ersetzt man die Gutmasse durch die Streckenlast multipliziert mit der Förderlänge l , wobei sich die Streckenlast aus Massenstrom I_M und Axialgeschwindigkeit v_{ax} zusammensetzt, folgt:

$$F_{R,gesamt} = \lambda_h \cdot m'_L \cdot l \cdot g = \frac{\lambda_h \cdot I_m \cdot l \cdot g}{v_{ax}} \quad (6.7)$$

Die fiktive Gesamtreibleistung im Förderer berechnet folgt dann zu:

$$P_{Reib,gesamt} = F_{R,gesamt} \cdot v_{ax} = \lambda_h \cdot I_m \cdot l \cdot g \quad (6.8)$$

6.2.3 Verschiebewiderstandsbeiwert λ_h

In der DIN 15262 wird der Verschiebewiderstandsbeiwert als Gutkonstante aufgeführt. Die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit haben jedoch gezeigt, dass für den Bereich der Hochleistungs-Schneckenförderer der Verschiebewiderstandsbeiwert von verschiedenen Faktoren unterschiedlich

beeinflusst und verändert wird. Als Einflussparameter sind hier vornehmlich zu nennen:

- Schneckendrehzahl
- Füllungsgrad
- Neigung des Schneckenförderers
- Zwischenlageranzahl

Daher kann der Verschiebewiderstandsbeiwert λ_h hier keinesfalls als Konstante angesehen werden.

Um die verschiedenen Einflüsse auf den Verschiebewiderstandsbeiwert in geeignetem Maß übersichtlich darstellen zu können, wird dieser in verschiedenen Komponenten unterteilt. Der Verschiebewiderstandsbeiwert λ setzt sich zusammen aus dem horizontalen Schüttgutbeiwert $\lambda_{S,h}$, dem Neigungsbeiwert λ_β sowie dem Geschwindigkeitsbeiwert λ_n .

$$\lambda_h = \lambda_{S,h} \cdot \lambda_\beta \cdot \lambda_n \quad (6.9)$$

- $\lambda_{S,h}$: horizontaler Schüttgutbeiwert: $\lambda_{S,h} = f(\text{Schüttgut})$
 $\lambda_{S,h}$ berücksichtigt die Art und Eigenschaften des Förderguts
- λ_β : Neigungsbeiwert: $\lambda_\beta = f(\text{Förderneigung})$
 λ_β berücksichtigt den Einfluss der Förderneigung auf den Reibleistungsbedarf
- λ_n : Geschwindigkeitsbeiwert: $\lambda_n = f(\text{Drehzahl})$
 λ_n berücksichtigt den Einfluss der Schneckendrehzahl auf den Reibleistungsbedarf

6.2.3.1 Horizontaler Schüttgutbeiwert

Innerhalb der experimentellen Auswertung konnte für horizontale bis leicht geneigte Hochleistungs-Schneckenförderer die in Tabelle 6-1 dargestellten horizontalen

Schüttgutbeiwerte ermittelt werden. Der Schüttgutbeiwert ist experimentell und schüttgutspezifisch zu bestimmen.

Tabelle 6-1: Horizontale Schüttgutbeiwerte für verschiedene Versuchsgüter

Schüttgut	$\lambda_{s,h}$ [-]
Kohle	2,0
PET-Recyclat	2,0
Raps	1,7
Weizen	1,4

6.2.3.2 Neigungsbeiwert

Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 4.4.3.3 wird ein linearer Einfluss der Förderneigung auf den Verschiebewiderstandsbeiwert abgeleitet. Der Neigungsbeiwert ergibt sich, wie in Abbildung 6-1 dargestellt zu:

$$\lambda_{\beta} = 0,045 \cdot \beta + 1 \quad (6.10)$$

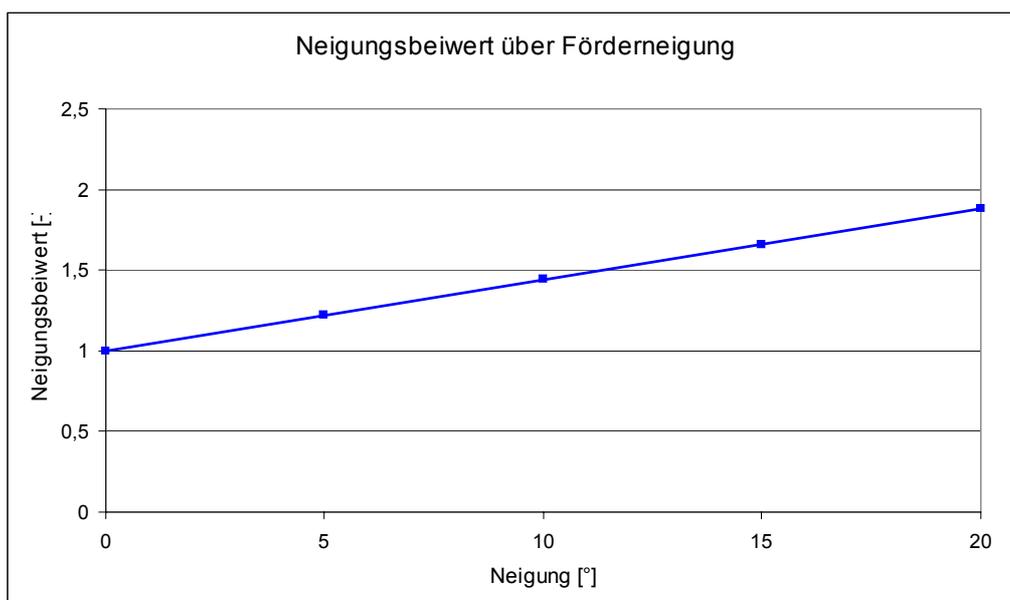


Abbildung 6-1: Verlauf des Neigungsbeiwerts λ_{β} über der Förderneigung (ohne Zwischenlager, Fördergüter: Raps, Weizen, PET-Recyclat, Kohle)

6.2.4 Geschwindigkeitsbeiwert

Bei den experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit konnte darüber hinaus eine Abhängigkeit des spezifischen Leistungsbedarfs P_{spez} und des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ_h von der Drehzahl festgestellt werden. Um den Einfluss der Drehzahl in der Leistungsberechnung zu berücksichtigen, wird an dieser Stelle der so genannte Geschwindigkeitsbeiwert λ_n eingeführt.

Dieser resultiert aus dem Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ_h über der Drehzahl n . Der Verlauf ist für verschieden Neigungen des Schneckenförderers in Abbildung 6-2 für einen Füllungsgrad von 40 % dargestellt.

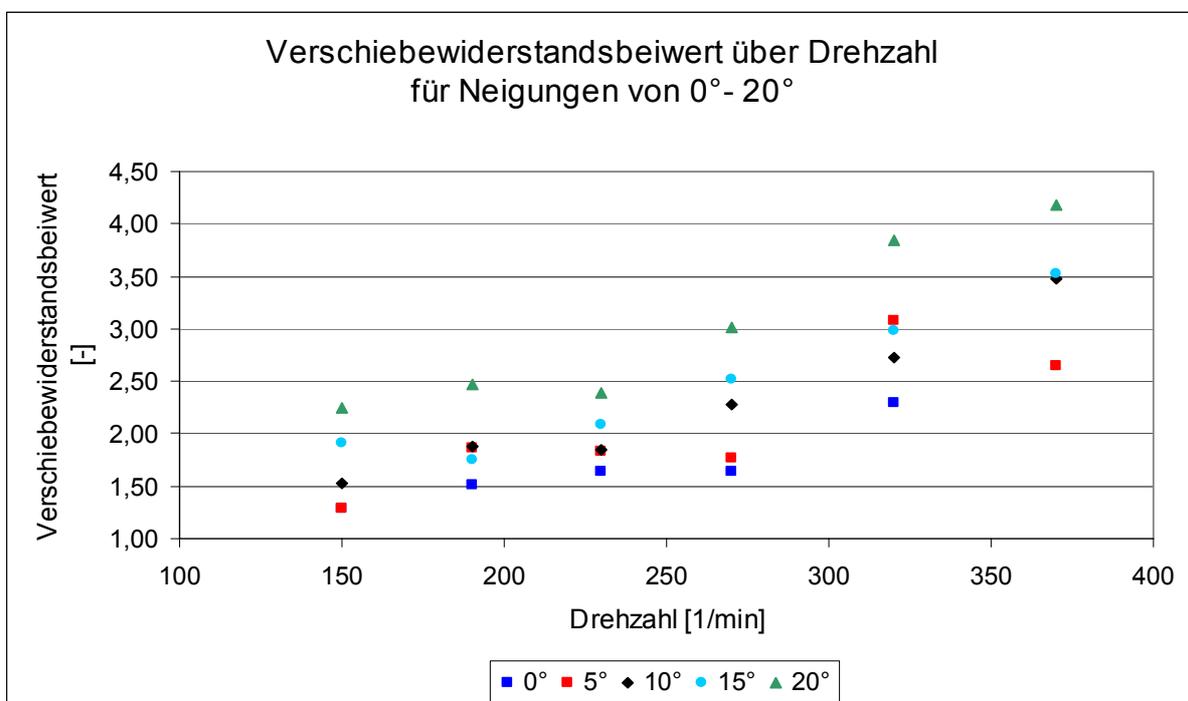


Abbildung 6-2: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ_h über der Drehzahl (ohne Zwischenlager, Fördergut: Weizen, Fördererbaugröße 200 mm)

Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsbeiwerts λ_n wird der gemittelte Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts λ_h für verschiedene Schüttgüter bei jeweils unterschiedlichen Fördererbaugrößen über der Drehzahl n aufgetragen. Daraus ergibt sich die folgende Näherungslösung zur Berechnung des Geschwindigkeitsbeiwerts λ_n :

$$\lambda_n = 3,2 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 - 9,7 \cdot 10^{-3} \cdot n + 1,73 \quad (6.11)$$

In Abbildung 6-3 ist zusätzlich der gemittelte Verlauf des Geschwindigkeitsbeiwerts über der Drehzahl dargestellt.

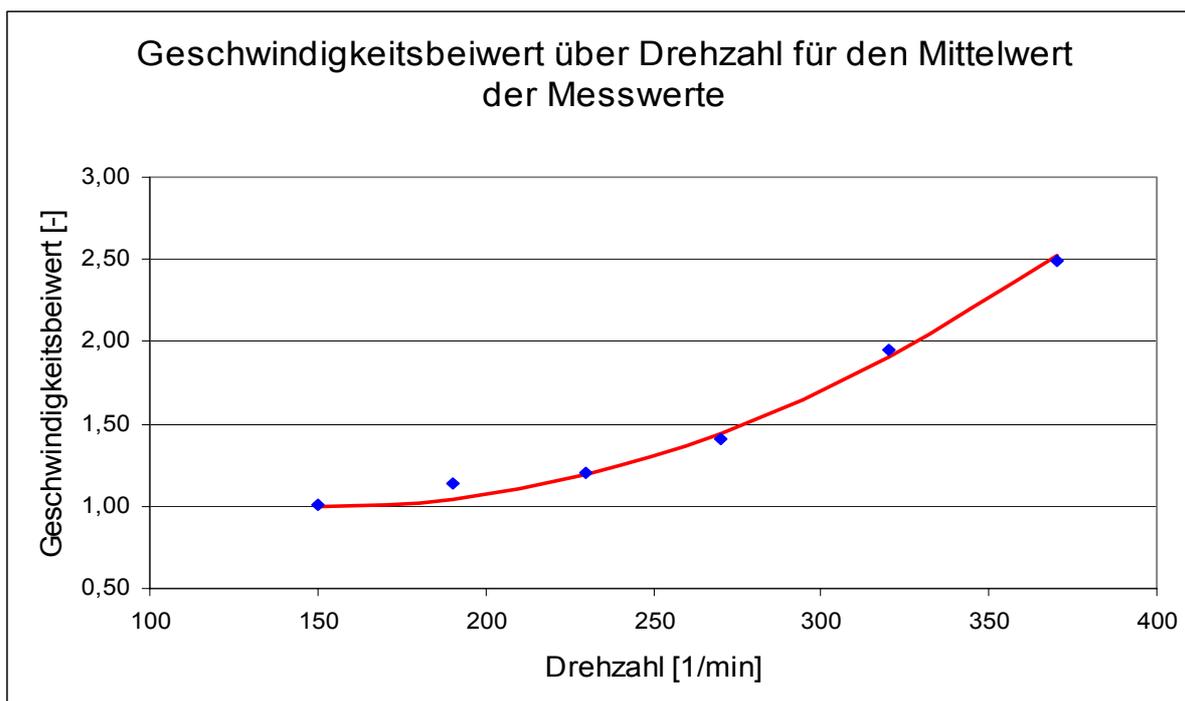


Abbildung 6-3: Verlauf des Geschwindigkeitsbeiwerts λ_n über der Drehzahl (gemittelt über Messwerte mit den Schüttgütern PET-Recyclat, Weizen, Raps, Kohle; ohne Zwischenlager; Schnecken-Ø: 200 mm, 250 mm, 315 mm)

Aus den Formeln der Einflussbeiwerte (λ_β , λ_n) und dem empirischen, konstanten Schüttgutbeiwert $\lambda_{S,h}$ kann der Verschiebewiderstandsbeiwert λ_h berechnet werden.

Anhand einer Beispielrechnung für das Schüttgut Raps resultiert bei einer Förderneigung von $\beta = 10^\circ$ und einer Schneckendrehzahl von $n_S = 270$ 1/min der Verschiebewiderstandsbeiwert λ_h zu:

$$\lambda_h = \lambda_{S,h} \cdot \lambda_\beta \cdot \lambda_n = 1,7 \cdot 1,45 \cdot 1,44 = 3,55 \quad (6.12)$$

Das Ergebnis liegt um ca. 5,3% über dem vergleichbarem Versuchswert mit $\lambda_h = 3,37$.

6.2.4.1 Einfluss des Zwischenlagers

Um den Zwischenlagereinfluss, wie er in Kapitel 4.4.3.5 erläutert wurde, auch in der Leistungsberechnung zu berücksichtigen, wird im Folgenden der so genannte Lagerbeiwert λ_{ZWL} eingeführt. Dieser berechnet sich aus dem Leistungsmehrbedarf bei der Förderung mit einem Zwischenlager gegenüber der Förderung ohne Zwischenlager.

Darüber hinaus ist λ_{ZWL} auch abhängig von der konstruktiven Ausführung des Zwischenlagers (der horizontale bis leicht geneigte Schneckenförderer der Versuchsanlage ist mit einem Standardzwischenlager ausgerüstet [Gün-SK]).

In Abbildung 6-4 ist der Lagerbeiwert λ_{ZWL} als Funktion des Füllungsgrads und der axialen Gutgeschwindigkeit dargestellt. Als Berechnungsfunktion von wird der maximale Anstieg von λ_{ZWL} über dem Füllungsgrad ab $\varphi = 15\%$ herangezogen.

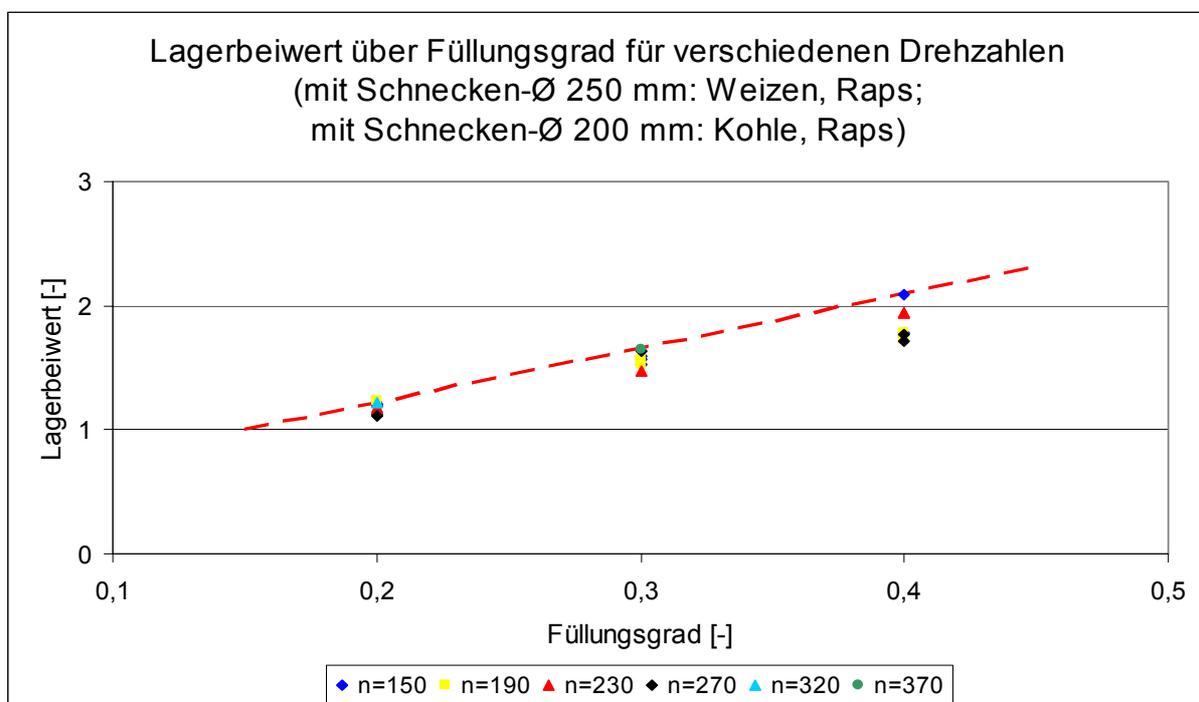


Abbildung 6-4: Verlauf des Lagerbeiwerts λ_{ZWL} über dem Füllungsgrad (horizontale Förderung)

Für den Lagerbeiwert λ_{ZWL} ergibt sich in Abhängigkeit der Anzahl der Zwischenlager n_{ZWL} folgender Zusammenhang (Tabelle 6-2):

Tabelle 6-2: Lagerbeiwert λ_{ZWL} für die horizontale und leicht geneigte Förderung

Ohne Zwischenlager: $n_{ZWL} = 0$	Mit Zwischenlager: $n_{ZWL} \geq 1$
$\lambda_{ZWL} = 1$	$\lambda_{ZWL} = [4,4 \cdot (\varphi - 0,15)] + 1$ (gültig für Füllungsgrade $20 \% \leq \varphi \leq 50 \%$)

6.2.5 Antriebsleistung

Die Antriebsleistung berechnet sich aus der Summe der Hubleistung und der fiktiven Gesamtreibleistung unter Berücksichtigung von λ_h und λ_{ZWL} :

$$P_{Ges,0^\circ-20^\circ} = P_{Hub} + P_{Reib,gesamt} = I_m \cdot g \cdot \{[\lambda_h \cdot ((\lambda_{ZWL} - 1) \cdot n_{ZWL} + 1)] \cdot l + h\} \quad (6.13)$$

Für den Sonderfall ohne Zwischenlager ($\lambda_{ZWL} = 1$) ergibt sich folgende Antriebsleistung:

$$P_{Ges,0^\circ-20^\circ} = I_m \cdot g \cdot (\lambda_h \cdot l + h) \quad (6.14)$$

Damit gleicht der Ansatz des Auslegungsverfahrens sehr dem der DIN 15262, was eine Anwendung in der Praxis vereinfacht.

6.2.6 Einfluss der Förderergeometrie

Alle drei untersuchten Förderer besitzen ($D_S = 315 \text{ mm}$, $D_S = 250 \text{ mm}$ bzw. $D_S = 200 \text{ mm}$) das gleiche Verhältnis zwischen Durchmesser und Ganghöhe von 1. Somit ergibt sich mit Formel (6.20) bei jedem dieser Förderer ein Steigungswinkel der Schneckenwendel von $\alpha(r_{max}) = \text{ca. } 18^\circ$.

$$\frac{D_s}{H} = \frac{315 \text{ mm}}{315 \text{ mm}} = \frac{250 \text{ mm}}{250 \text{ mm}} = \frac{200 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 1 \quad (6.15)$$

$$\tan \alpha = \frac{H}{D_s \cdot \pi} \quad (6.16)$$

Für das in dieser Arbeit aufgestellte Auslegungsverfahren wird als weiterer Einflussfaktor die Ganghöhe bzw. das Verhältnis zwischen Schneckendurchmesser und Ganghöhe vermutet. Rong [Ro-04] versuchte in seiner Arbeit diesen Einfluss, durch das Zugrundelegen der Axialgeschwindigkeit zum Geschwindigkeitsbeiwert, mit auf zunehmen. Die Untersuchungen mit mehreren verschiedenen Fördererbaugrößen in dieser Arbeit konnten diese These jedoch nicht stützen.

Aufgrund des hohen finanziellen Aufwands konnte dieser Einfluss in dieser Arbeit allerdings auch nicht näher untersucht werden. Eine Anschaffung von ca. 4 bis 5 weiteren Schneckenbäumen und damit einem sehr hohen experimentellen Aufwand wären die Folge gewesen. Eine Möglichkeit der Untersuchung dieses Parametereinflusses bietet jedoch die Simulation des Fördervorganges im Schneckenförderer, wie Kapitel 6.3 erläutert.

Der Umstand des Einflusses des Steigungswinkels auf die Berechnung des Förderzustands ist somit auch ein begrenzender Faktor. Da über Förderer mit einem anderen Steigungswinkel so weit noch keine Aussagen getroffen werden können, muss das hier vorgestellte Auslegungsverfahren auf Förderer mit einem Steigungswinkel von ca. 18° am maximalen Radius bzw. einem Schneckendurchmesser/Ganghöhen-Verhältnis von ca.1 begrenzt werden.

6.3 Verifikation des Auslegungsverfahrens mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode (DEM)

Die in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen stellen die Basis für die entwickelten Auslegungsverfahren dar. Da diese Versuche insgesamt sehr zeitintensiv sind, liegt es nahe, den Versuchsaufwand in der Zukunft möglichst gering zu halten. Dies gelingt jedoch nur, wenn ein Teil der Versuchsergebnisse auf

einem anderen Weg zur Verfügung gestellt werden können. Ein geeignetes Mittel kann hierzu die Simulation sein.

Kapitel 6.3 untersucht daher, wie und in welchem Maße sich die experimentellen Ergebnisse durch eine Simulation der Bewegungsabläufe im Schneckenförderer abbilden lassen und ob ein teilweiser Ersatz der experimentellen Untersuchungen durch die Simulation möglich erscheint.

Die dazu eingesetzte Diskrete Elemente Methode (DEM) basiert auf dem Ansatz, dass für alle diskreten Partikel in einem Mehrkörpersystem die Newtonschen Bewegungsgleichungen für alle Freiheitsgrade gelöst werden. Für die Anwendung in der Schüttgutförderertechnik ist sie somit bestens geeignet und wird hier zur Nachbildung der Bewegungszustände verwendet.

6.3.1 Forschung im Bereich der Diskreten Elemente Methode

Im Bereich der Forschung zur Diskreten Elemente Methode muss man zwei verschiedene Bereiche unterscheiden. Zum einen den Bereich der grundlagenorientierten Forschung, der sich mit den Abläufen und Berechnungsalgorithmen in der Simulation beschäftigt, und der anwendungsorientierten Forschung, welche die DEM als Werkzeug zur Untersuchung verschiedener Prozesse verwendet. [Kat-05c]

In der grundlagenorientierte Forschung werden die Berechnungsabläufe und Algorithmen zur Berechnung untersucht und optimiert um eine möglichst effiziente und schnelle Berechnung zu ermöglichen. Damit wird die Anwendbarkeit der DEM verbessert.

Dabei werden folgende Punkte im Ablauf einer DEM-Simulation betrachtet:

- Modellierung einer Geometrie
- Definition von Partikeleigenschaften (Dichte, Reibwerte, Parameter zum jeweils verwendeten Kontaktmodell, etc.) und der Randbedingungen (Gravitation, etc.)
- Erzeugung der Partikel (Größe, Anzahl, Form, Lage)
- Kontinuierliche Berechnung in Abhängigkeit der gewählten Anfangsbedingungen bis zu einem gewählten Abbruchkriterium (Zeit, Anzahl von Berechnungsschritten, Gleichgewichtszustand, etc.)

- Darstellung des Systems und der Messwerte

In diesem Bereich gibt es bereits eine Vielzahl von Veröffentlichungen. Ein großer Teil findet sich in den Tagungsbänden der internationalen Konferenz: „International Conference on Discrete Element Method“.

Aufgrund des Bedarfs an hohen Rechenleistungen ist die anwendungsorientierte Forschung mit der DEM noch nicht sehr verbreitet. Mit der Simulation eines senkrechten Schlauchgurtförderers stellte Gröger [Grö-99] die erste Anwendung der Diskreten Elemente Simulation in der Schüttgutfördertechnik vor. Durch die Simulation des Schüttgutstroms in Gurtübergabestellen stellten Dewicki [Dew-03] und Alspaugh et al [Als-02] weitere Anwendungen vor. Gröger, Katterfeld und Krause zeigten in weiteren Untersuchungen die Vielseitigkeit der Simulationsmethode [Grö-03, Kat-05a, Kat-05b, Krau-03, Krau-04, Krau-05]

6.3.2 Simulation von Schneckenförderern

Bei der Simulation eines fördertechnischen Prozesses müssen nahezu immer Vereinfachungen und Kompromisse getroffen werden. Dabei muss immer darauf geachtet werden, dass die Vereinfachungen noch zu einem realitätsnahen Simulationsergebnis führen.

Bereits beim Aufbau des Simulationsmodells muss eine Vereinfachung getroffen werden. Um die im Prozess beteiligten Schüttgutpartikel und damit die Rechenzeit zu reduzieren, wird der Schneckenförderer in seiner Länge auf ein sinnvolles Maß gekürzt. In diesem Fall beträgt die Länge des Schneckenförderers nur noch einen Meter. Damit sind vier (bei Ganghöhe 250 mm) bzw. fünf (bei Ganghöhe 200 mm) Schneckenkammern am Förderprozess beteiligt.

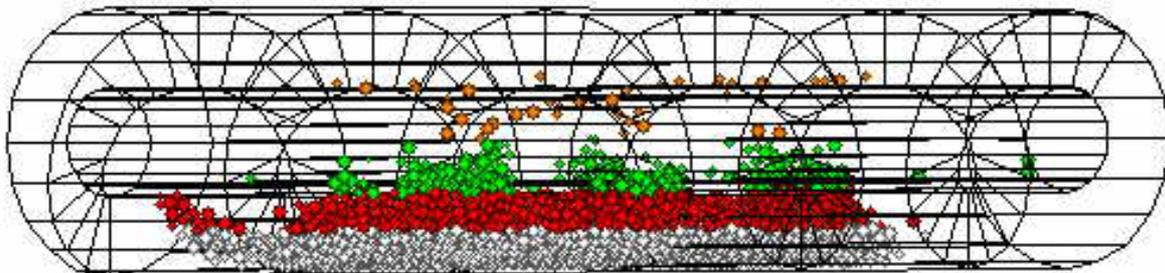


Abbildung 6-5: Gefüllter horizontaler Schneckenförderer \varnothing 250 mm im Ausgangszustand der Simulation (Ruhezustand des Schüttguts)

In Abbildung 6-5 ist das Simulationsmodell eines Schneckenförderers dargestellt. Die unterschiedlichen Partikelfarben im Modell kennzeichnen die unterschiedlichen Positionen der Partikel in z-Richtung im Ausgangszustand. Damit lässt sich die Vermischung der Partikel während der Förderung beobachten.

Zusätzlich werden periodische Grenzen eingeführt. Diese ermöglichen einen konstanten Förderprozess mit einer konstanten Anzahl an Schüttgutpartikeln. Verlässt ein Schüttgutpartikel an einer periodischen Grenze das Modell, wird es mit all seinen Eigenschaften (Position der jeweils anderen Koordinaten, Geschwindigkeiten, Spannungen, etc.) auf der gegenüberliegenden Seite des Modells wieder hinzugefügt.

Während des Simulationslaufes können verschiedene Größen aufgezeichnet und dargestellt werden. Neben der Ansicht des Schneckenförderermodells aus verschiedenen Blickwinkeln werden als wichtigste Größen der Leistungsbedarf an der Wendel und der Leistungsbedarf an der Welle aufgezeichnet.

Nach der qualitativen Kalibrierung des Schüttgutes wird begonnen die verschiedenen Parameter zu variieren. Das Hauptaugenmerk liegt bei der Verifikation nun bei der Veränderung der Drehzahl des Schneckenförderermodells sowie bei der Veränderung der Baugröße des Schneckenförderermodells. Zur Baugrößenvariation werden die Parameter Schneckendurchmesser, Wellendurchmesser und Ganghöhe verändert und den realen Schneckenförderern der Versuchsanlage angepasst.

6.3.3 Ergebnisse aus der Simulation

In Abbildung 6-6 ist der Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwertes über der Drehzahl für eine rein horizontale Fördersimulation mit einem Füllungsgrad von ca. 30% dargestellt. Es ist ein deutlicher polynomischer Anstieg des Verschiebewiderstandsbeiwertes über der Drehzahl zu erkennen. Dieses Verhalten konnte bei den experimentellen Untersuchungen ebenfalls festgestellt werden (siehe dazu Kapitel 4.4.3.2 bzw. Abbildung 4-13).

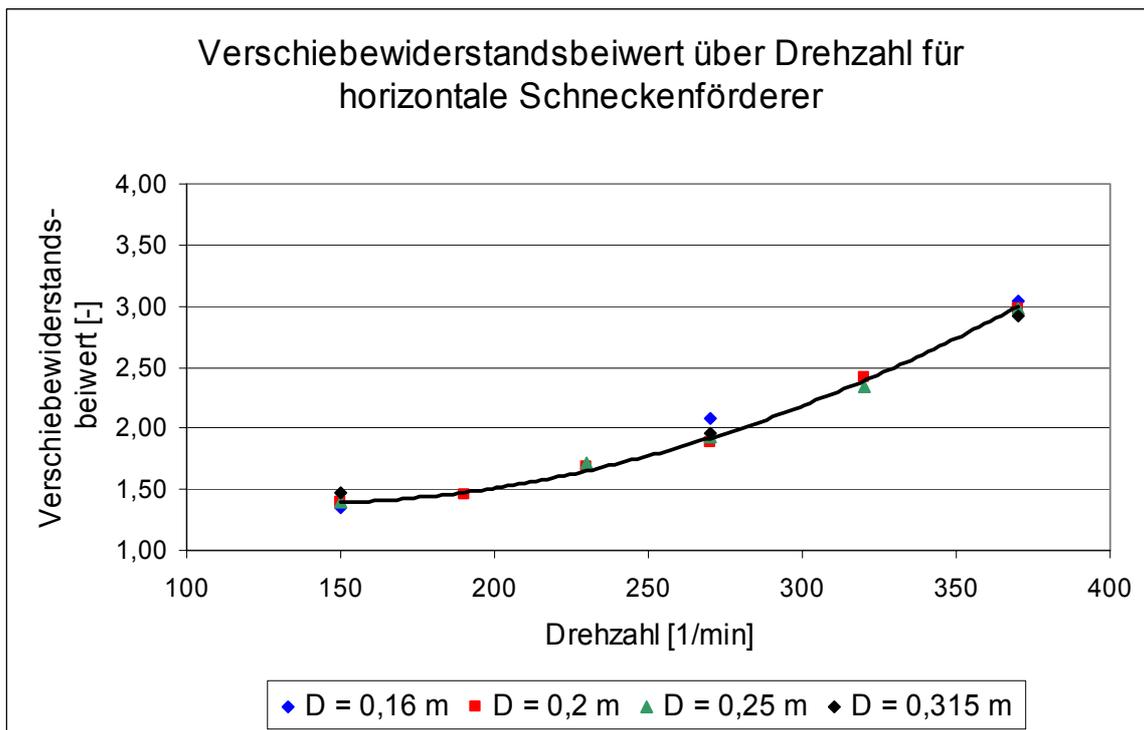


Abbildung 6-6: Verlauf des Verschiebewiderstandsbeiwerts über der Drehzahl für konstanten Füllungsgrad von 30%

Vergleicht man Abbildung 4-13 mit Abbildung 6-6, so kann in beiden Diagrammen für die Förderung bei einem Füllungsgrad von ca. $\varphi = 30\%$ und einer Drehzahl von $n_s = 150$ 1/min der Verschiebewiderstandsbeiwert mit $\lambda = 1,4$ abgelesen werden. Dies entspricht dem horizontalen Schüttgutbeiwert von Weizen.

Weiterhin lässt sich aus Abbildung 6-6 erkennen, dass sowohl für die Schneckenförderer der Baugrößen 160 mm, 200 mm, 250 mm und 315 mm die gleichen Werte für den Verschiebewiderstandsbeiwert, abhängig von der jeweiligen Drehzahl, berechnet werden (die Baugrößen beziehen sich auf die in der Norm DIN 15261 genormten Baugrößen).

In Abbildung 6-7 ist der Geschwindigkeitsbeiwert über der Drehzahl für die Fördersimulation bei Füllungsgrad 30% dargestellt. Im Vergleich zu den simulierten Werten ist der Verlauf des Geschwindigkeitsbeiwertes des Auslegungsverfahrens (siehe dazu Kapitel 6.2) aufgetragen. Für die Drehzahlen kleiner 250 1/min ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten Werte mit der aus den Experimenten resultierenden Kurve. Für Drehzahlen größer 250 1/min lässt sich eine

zunehmende Abweichung der beiden Kurven erkennen. Dies lässt auf eine noch nicht abgeschlossene Kalibrierung des Schüttgutes schließen.

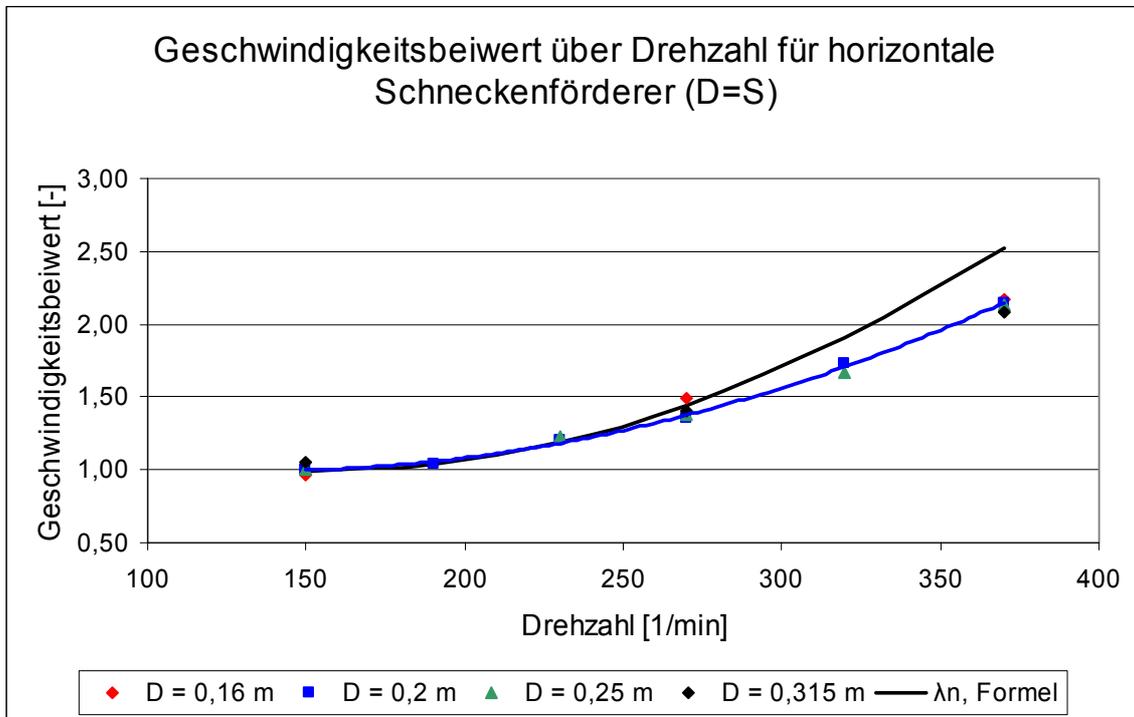


Abbildung 6-7: Verlauf des Geschwindigkeitsbeiwertes λ_n über der Drehzahl

Somit lässt sich anhand der Simulation durchaus das Verhalten des Schüttgutes im Förderer nachbilden.

Für die Weiterentwicklung des Auslegungsverfahrens für unterschiedliche Förderergeometrien (siehe Kapitel 6.2.6) kann daher auf die Diskrete Elemente Methode zurückgegriffen werden und somit die experimentellen Untersuchungen verkürzt werden. Ein vollständiger Verzicht auf Experimente erscheint nicht möglich, da das zur Simulation kalibrierte Schüttgut auch für die neuen Betriebszustände überprüft werden muss.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anforderungen an stetige Fördermittel steigen beständig. Es sollen zunehmend größere Massen in einer geringeren Zeit umgeschlagen werden. Im modernen Massengutumschlag bestimmt die Förderleistung einzelner Umschlagsgeräte immer mehr die Wirtschaftlichkeit von Umschlagsbetrieben. Der Schneckenförderer erfreut sich, mit den zunehmend strengeren Umweltauflagen, dank seiner geschlossenen Bauweise dabei immer größerer Beliebtheit. Damit entstand der Wunsch nach einer Erweiterung des Betriebsbereichs von Schneckenförderern über die Grenzen der schon seit vielen Jahren bestehenden Norm DIN 15262. Für den Bereich der vertikalen Schneckenförderer fehlt bisher ein anwendbares Auslegungsverfahren völlig.

Durch die experimentellen Untersuchungen konnten wichtige Zusammenhänge und Einflussparameter auf Auslegungsverfahren für horizontale und leicht geneigte sowie vertikal betriebene Hochleistungs-Schneckenförderer untersucht und dargestellt werden. Untersucht wurden dabei nicht nur leicht fließende Schüttgüter, wie Weizen oder Raps, sondern auch stückige und schwere Güter, wie zum Beispiel Kohle und Sand.

Anschließend wurde jeweils getrennt für die Bereiche der vertikalen Förderung sowie für den horizontalen bis leicht geneigten Förderbereich ein Auslegungsverfahren entwickelt und vorgestellt.

Für den vertikalen Förderbereich stellte sich als Bezugsgröße für eine Berechnung eine Kombination aus Rohrreibleistung und Wendelreibleistung als sinnvoll heraus. Als Kenngröße dient der Förderfaktor, der sich aus einem vertikalen Schüttgutbeiwert und einem Rotationsbeiwert zusammensetzt. Um die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen und das daraus resultierende Auslegungsverfahren weiter abzusichern, wurden mit gutem Erfolg Leistungsmessungen an verschiedenen Schneckenförderern im industriellen Einsatz durchgeführt.

Für horizontale bis leicht geneigte Hochleistungs-Schneckenförderer wurde ein Berechnungsverfahren ähnlich dem der DIN 15262 aufgestellt. Die Antriebsleistung berechnet sich dabei aus einer fiktiven Gesamtreibleistung und einer Hubleistung für leicht geneigte Förderer. In die fiktive Gesamtreibleistung geht ähnlich wie in der Normung ein Verschiebewiderstandbeiwert ein. Dieser ist aber nun nicht mehr als konstanter Schüttgutparameter anzusehen. Der Verschiebewiderstandsbeiwert setzt sich im neu entwickelten Berechnungsverfahren aus einem konstanten horizontalen

Schüttgutbeiwert, dem Neigungsbeiwert für leicht geneigte Förderung und einem Geschwindigkeitsbeiwert zusammen. Der Geschwindigkeitsbeiwert berücksichtigt dabei den Einfluss der Drehzahl auf den Verschiebewiderstandsbeiwert. Die noch qualitativen Ergebnisse der Simulation mit der Diskreten Elemente Methode zeigen das gleiche Verhalten, das dem Berechnungsverfahren zu Grunde liegt. Durch eine genauere Kalibrierung des Schüttguts können auch quantitative Ergebnisse erzielt werden und die Simulation in Zukunft zur Weiterentwicklung der Berechnungsverfahren mit genutzt werden.

Durch eine einfache Ermittlung der jeweiligen Berechnungsgrößen und die Anlehnung an das Auslegungsverfahren der DIN 15262 erscheinen die beiden neuen Auslegungsverfahren als, auch für die Praxis, tauglich.

Für die Auslegung von Schneckenförderern stellt gerade das Auslegungsverfahren für vertikale Hochleistungs-Schneckenförderer einen wichtigen Fortschritt dar, da es bisher kein anwendbares Berechnungsverfahren für diesen Förderbereich gab.

Trotz der großen und wichtigen Fortschritte durch dieses Projekt besteht weiterhin Forschungspotential im Bereich der Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer. So konnte in diesem Projekt zwar ein Einfluss der Ganghöhe auf den Förderzustand und damit die Leistungsberechnung eines horizontalen bis leicht geneigten Hochleistungs-Schneckenförderer fest gestellt werden, jedoch konnte dieser Einfluss aufgrund des dafür nötigen sehr hohen experimentellen und finanziellen Aufwandes nicht genauer quantifiziert werden. Für die Untersuchung dieses Einflusses wird von einer experimentellen Vorgehensweise aus eben genannten Gründen abgeraten.

Eine gute Möglichkeit den Einfluss der Ganghöhe näher zu bestimmen bietet in den nächsten Jahren sicherlich die Simulation mit der Diskreten Elemente Methode (DEM). Zwar benötigen die Simulationen mit den momentan verfügbaren Computern noch sehr viel Zeit, aber es ist absehbar, dass mit der fortschreitenden Prozessorentwicklung auch die Rechenzeiten für diese Simulationen stark sinken werden. Somit können teure Versuchskomponenten und der immense Zeitaufwand für Experimente stark reduziert werden.

Weiterhin lassen sich noch der Einfluss von Zwischenlagern und deren unterschiedliche Konstruktionsweise näher untersuchen. Beispielsweise besteht die

Möglichkeit das Auslegungsverfahren für vertikale Hochleistungs-Schneckenförderer durch den Einfluss von Zwischenlagern zu verfeinern.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im nun noch nicht untersuchten Förderbereich der stark geneigten Hochleistungs-Schneckenförderer. Auch hier gibt es bisher kein praxistaugliches Auslegungsverfahren.

8 Literaturverzeichnis

- [Als-02] Alspaugh, M.; Dewicki, G.; Quesenberry, E.:
Computer Simulation Solves Conveyor Problems. *Coal Age*
(2002) Nr. 1, S. 28-31.
- [Böt-63] Böttcher, S.:
Eine allgemeine Analyse der Aufwärtsförderung eines
Einzelkörpers in Schneckenförderern beliebiger Neigung. Teil 1
bis 3. *VDI-Zeitschrift* 105 (1963) Nr. 14, S. 581-593; Nr. 16, S.
663-671; Nr. 18, S. 743-754.
- [Böt-87a] Böttcher, S.; Ertl, W.:
Bewegungsanalyse eines Einzelkörpers im konischen
Förderabschnitt steiler Schneckenförderer. *Fördern und Heben*
37 (1987) Nr. 2, S. 84-91.
- [Böt-87b] Böttcher, S.; Ertl, W.:
Zur optimalen Auslegung des konischen Förderabschnitts bei
senkrechten Schneckenförderern. *Deutsche Hebe- und
Fördertechnik* 33 (1987) Nr. 7/8, S. 25-32.
- [Bou-64] Bouse, L. F.; Schoenleber, L. G.; Porterfield, J. G.:
Screw Conveyor Capacity and Castorseed Damage.
Transactions of the ASAE Vol. 9 (1964) Nr. 2, S. 152-156.
- [Bra-69] Brandtner, F.:
Die Förderschnecke in ihrer vielseitigen Anwendung.
Aufbereitungstechnik 10 (1969) Nr. 8, S. 424-437.
- [Bru-69] Brusewitz, G. H.; Persson, S. P. E.:
Parametric Study of Factors Influencing Screw Conveyor
Throughput and Power Requirement. *Transactions of the ASAE*
Vol. 12 (1969) Nr. 1, S. 51-54 und 59-62.
- [Bru-98] Bruck, K.:
Parameter und Einsatzbereiche von Spiralförderern.
Tagungsbeitrag Fachtagung Schüttgutfördertechnik '98, Otto-
von-Guericke Universität Magdeburg, 1998.
- [Cal-61] O'Callaghan, J. R.; Fallon, T. A.:
Performance of Vertical Screw Conveyors. *J. agric. Engng. Res.*
Vol. 6 (1961) Nr. 2, S. 87-97.
- [Cal-62] O'Callaghan, J. R.:
Some Experiments on the Intake Process in a Vertical Screw
Conveyor. *J. agric. Engng. Res.* Vol. 7 (1962) Nr. 4, S. 282-287.

- [Cum-87] Cumberland, D. J., Crawford, R. J.:
The Packing of Particles. Handbook of Powder Technology, 1987.
- [Dew-03] Dewicki, G.:
Bulk Material Handling and Processing – Numerical Techniques and Simulation of Granular Material. Bulk solids handling 23 (2003) Nr. 2, S. 110-113.
- [DIN ISO 3435] DIN ISO 3435:
Stetigförderer; Klassifizierung und Symbolisierung von Schüttgütern. Beuth Verlag, Berlin, 1979.
- [DIN15201a] DIN 15201 Teil 1:
Stetigförderer. Hrsg. Deutscher Normenausschuss, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe April 1994.
- [DIN15201b] DIN 15201 Teil 2:
Stetigförderer. Hrsg. Deutscher Normenausschuss, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe November 1981.
- [DIN 15261] DIN 15261:
Schneckenförderer Teil 1 - Anschlussmaße, Teil 2 Schneckenblatt. Hrsg. Deutscher Normenausschuss, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe Feb. 1986.
- [DIN 15262] DIN 15262:
Schneckenförderer für Schüttgut - Berechnungsgrundsätze. Hrsg. Deutscher Normenausschuss, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe Jan. 1983.
- [DIN 18123] DIN 18123:
Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag, Berlin, 1996.
- [DIN 51705] DIN 51705:
Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung der Schüttdichte. Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [Eph-57] Ephremidis, C.:
Untersuchungen zum Fördervorgang beim waagrechten Schneckenförderer. Dissertation, TU Hannover 1957.
- [Ertl-88] Ertl, W.:
Beitrag zur Berechnung der Förderung leicht fließender Schüttgüter in senkrechten Schneckenförderern. Dissertation TU München, 1988.

- [Feh-77] Fehlaue, M.; Gläser, M.; Hartung, L.:
Messungen von Fördergeschwindigkeit und Förderquerschnitt an einem senkrechten Schneckenförderer mit großem Durchmesser. Agrartechnik 27 (1977), Heft 4, S. 171-173.
- [Feh-78] Fehlaue, M.:
Untersuchungen zur Senkrechtförderung landwirtschaftlicher Schütt- und Halmgüter mittels Schneckenförderer. Dissertation Universität Rostock, 1978.
- [Feh-80] Fehlaue, M.:
Berechnungsvorschrift für Schneckenförderer zur Senkrechtförderung landwirtschaftlicher Schütt- und Halmgüter. Agrartechnik 30 (1980), Heft 1.
- [Feh-80b] Fehlaue, M.; Baganz, K.:
EDV-gestützte Optimierung des Fördervorgangs in der senkrechten Förderschnecke. Agrartechnik 30 (1980), Heft 4, S. 167-168.
- [FEM 2121] FEM 2121:
Schneckenförderer für Schüttgut - Empfehlungen für die Berechnung. Deutsche Ausgabe, 1975.
- [FEM 2181] FEM 2181:
Spezifische Schüttguteigenschaften bei der mechanischen Förderung. Deutsche Ausgabe, dt. Nationalkomitee der FEM, Frankfurt, 1989.
- [FEM 2381] FEM 2381:
Spezifische Eigenschaften der Schüttgüter in Bezug auf die Silolagerung - Ermittlung und Darstellung der Fließeigenschaften. Deutsche Ausgabe, dt. Nationalkomitee der FEM, Frankfurt, 1986.
- [FEM 2481] FEM 2481:
Spezifische Schüttguteigenschaften bei der pneumatischen Förderung - Definition und Festlegung der Messverfahren. Deutsche Ausgabe, dt. Nationalkomitee der FEM, Frankfurt, 1997.
- [FEM 2581] FEM 2581:
Schüttguteigenschaften. Deutsche Ausgabe, dt. Nationalkomitee der FEM, Frankfurt, 1984.
- [FEM 2582] FEM 2582:
Allgemeine Schüttguteigenschaften hinsichtlich der Klassifizierung und der Symbolisierung. Deutsche Ausgabe, dt. Nationalkomitee der FEM, Frankfurt, 1984.

- [Fo-99] Fottner, J., Günthner, W.A.:
High-Capacity Screw Conveyor - Research Project of Krupp
Fördertechnik and TU München, Bulk Solids Handling II (1999),
1999
- [Fo-01] Bortolamasi, M.; Fottner J.:
Design and Sizing of Screw Feeders, gemeinsam mit Dr. Marco
Bortolamasi, Universität Modena, Begleitband der Fachtagung
powtech 2001, Nürnberg, 2001.
- [Fo-02] Fottner, J.:
Auslegung und wirtschaftlicher Einsatz von Hochleistungs-
Schneckenförderern. Dissertation TU München, 2002.
- [Gab-81] Gabler, H.:
Theoretische und experimentelle Untersuchung der Förderung in
steilen und senkrechten Schneckenförderern. Dissertation TU
München, 1981.
- [Gho-67] Ghosh, B. N.:
Conveyance of Wet Parchment Coffee Beans by an Auger.
Journal o. Agr. Eng. Research Vol. 12, 1967 Nr. 4, S. 274-280.
- [Grei-90] Greinwald, K.; Stahl, H.:
Messprotokoll über die Leistungsmessung an einem
Schiffsentlader. Unveröffentlichte Forschungsarbeit, TU
- [Grei-94] Greinwald, K.:
Untersuchung der Förderung leicht fließender Schüttgüter im
senkrechten Schneckenförderer unter Berücksichtigung der
Zwischenlager. Dissertation, TU München, 1994.
- [Grei-95] Greinwald, K.:
Power Requirement of a Ship Unloader with Screw Conveyors.
Bulk Solids Handling Vol. 15, Nr. 4, Oktober 1995.
- [Gri-94] Grimmer, K.-J.; Weninger, L.:
Einige Betrachtungen zum Schüttgutdurchsatz bei Senkrecht-
Schneckenförderern. "Miscolcer Gespräche `94", 20./21.Sept.
1994, Universität Miscolc / Ungarn.
- [Gro-95] Schnell; Gross; Hauger:
Technische Mechanik, Band 2 Elastostatik, 5. Auflage. Springer-
Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1995.
- [Gro-95] Hauger; Schnell; Gross:
Technische Mechanik, Band 3 Kinetik, 5. Auflage. Springer-
Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1995.

-
- [Grö-99] Gröger, T.:
Partikelmechanische Untersuchungen zur senkrechten Förderung in steilen und senkrechten Schlauchgutförderern. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 1999.
- [Grö-03] Gröger, T.:
Grundlagen der Diskreten Elemente Methode (DEM) in der Schüttgutfördertechnik. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2003, Magdeburg, 2003.
- [Gün-97] Günthner, W. A.; Vollmann, A.:
Hochleistungs-Schneckenförderer: Forschung, Entwicklung, Trends. Tagungsbeitrag Kolloquium Stetigförderung von Schüttgütern, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1997.
- [Gün-98] Günthner, W. A.; Vollmann, A.:
Schüttgutförderung in geneigten Schnecken: experimentelle Untersuchungen. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik '98, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1998.
- [Gün-99a] Günthner, W. A.; Vollmann, A.:
Untersuchungsergebnisse zur Schüttgutförderung in geneigten Schnecken. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik '99, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1999.
- [Gün-99b] Günthner, W.A.; Fottner, J.:
Hochleistungs-Schneckenförderer. Schüttgut I, 1999.
- [Gün-00] Günthner, W.A.; Fottner, J.:
Praxisgerechte Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2000, 2000.
- [Gün-02a] Günthner, W.A.; Fottner, J.; Rong, O.:
Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern. Forschungsbericht 2002, Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2002.
- [Gün-02b] Günthner, W.A.; Rong, O.; Fottner, J.:
Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern. Schüttgut 8 (2002), S. 486 - 493.
- [Gün-02c] Günthner, W.A.; Rong, O.; Fottner, J.:
Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2002, 2002.
- [Gün-Sk] Günthner, W.A.:
Skriptum zur Vorlesung Schüttgutfördertechnik. Lehrstuhl fml, Technische Universität München.

- [Har-62] Harries, G. O.:
Application of a Radio-Isotope to the Determination of the Annular Thickness of Grain in an Auger Conveyor. J. agric. Engng. Res. Vol. 7 (1962) Nr. 2, S. 65-67.
- [Her-99] Hering, E.; Gutekunst, J.; Martin, R.:
Elektrotechnik für Maschinenbauer. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1999.
- [Hun-87] Hunaeus, B.:
Continuous Bulk Unloading of Barges. Bulk Solids Handling Vol. 7, Nr. 5, Oktober 1987; S. 627-630.
- [Jan-85] Janssen, H. A.:
Versuche über Getreidedruck in Silos. VDI-Zeitschrift 39 (1985), S. 1045-1049.
- [Jen-61] Jenike, A. W.:
Gravity Flow of Bulk Solids. University of Utah, Bulletin Nr. 108, 1961.
- [Joh-85] Johansson, R.:
The Siwertell Coal Unloader at Kingsnorth - A Case History. Bulk Solids Handling Vol. 5, Nr. 1, Februar 1985.
- [Joh-86] Johansson, R.:
An Economy-Size Ship Unloader. Bulk Solids Handling Vol. 6, Nr. 5, Oktober 1986, S. 935-937.
- [Kat-05a] Katterfeld, A.; Gröger, T.:
Kalibrierung von DEM-Simulationsmodellen für die Schüttgutfördertechnik. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2005, Magdeburg 2005.
- [Kat-05b] Katterfeld, A.; Franz, M.:
Beitrag zur Simulation von Gutübergabestellen mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2005, Magdeburg 2005.
- [Kat-05c] Katterfeld, A.:
Funktionsanalyse von Rohrkettenfördern. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg, 2005.
- [Klein-03] Klein, K.-O.:
Fördern von Schüttgütern im Schneckentempo. Schüttgut. 9 (2003) Nr. 6. S. 424-426.
- [Kön-60] König, A.; Riemann, U.:
Untersuchungen am senkrechten Schneckenförderer. Landtechnische Forschung 10 (1960), Heft 2.

-
- [Kor-83] Korzen, Z.:
Über das Spannungs- und Fließverhalten von Schüttgütern in vertikalen Verladeeinrichtungen. *Aufbereitungstechnik* Nr. 11 (1983), S. 656-661.
- [Krau-83] Krause, F.:
Zur mechanischen Senkrechtförderung von Schüttgütern. Magdeburg, Technische Universität, Dissertation B, 1983.
- [Krau-02] Krause, F.:
Einsatz eines Wendelfördersystems (Spiralfördersystems) für Rohrbraunkohle (Mischbrennstoff) im Kraftwerk Schwarze Pumpe. Otto-von-Guericke-Universität, IFSL, Magdeburg, 2003, un-veröffentlichter Forschungsbericht.
- [Krau-03] Krause, F.; Katterfeld, A.:
Anwendung der DEM in der Schüttgutfördertechnik. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2003, Magdeburg, 2003.
- [Krau-04] Krause, F.; Katterfeld, A.:
Funktionsanalyse eines Rohrkettenförderers mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2004, Magdeburg, 2004.
- [Krau-05] Krause, F.; Minkin, A.:
Funktionsanalyse von Wendelförderern mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2005, Magdeburg, 2005.
- [Lei-99] Leitner, J.:
Untersuchungen zum Spalteinfluss und Einlauf des Förderguts in senkrechten und steil geneigten Schneckenförderern. Dissertation Montanuniversität Leoben, 1999.
- [Lem-61] Lemmon, N. F.; Gunkel, W. W.; Rehkugler, G. E.:
Design Considerations and Operating Characteristics of an Axially-Flexible Screw Conveyor. *Transactions of the ASAE* Vol. 4 (1961) Nr. 1, S. 155-157.
- [Lin-96] Linke, H.:
Stirnradverzahnung, Berechnung Werkstoffe Fertigung. München, Carl Hanser Verlag, 1996.
- [Lvin-71] Lvin, J. B.:
Analytical Evaluation of Pressures of Granular Materials on Silo Walls. *Powder technology* 4 (1970-71), S. 280-285.
- [Mar-03] Marton, C.:
Lagerung und Umschlag staubender Massengüter. *Zeitschrift Schüttgut*, Vol. 9 (2003) Nr. 1. S. 30-35.

- [Mat-94] Maton, A. E.:
Screw feeder design. Powder Handling and Processing, Band 6 (1994) Heft 1, S. 87-89.
- [Mey-93] Meyers Neues Lexikon in zehn Bänden:
Erster Band, S. 102, S. 285, Meyers Lexikonverlag, 1993.
- [Mol-85] Molerus, O.:
Schüttgutmechanik - Grundlagen und Anwendungen in der Verfahrenstechnik. Berlin, Springer-Verlag, 1985.
- [N.N.-85] N.N.:
Moderne Schiffsentlader: Vielseitig, leistungsstark und umweltschonend. Fördern und Heben 35 (1985) Nr. 11, S. 856-859.
- [N.N.-02] N.N.:
Förderschnecken im Wickelverfahren aus Rechteck-Profilen hergestellt. Schüttgut 8 (2002) Nr. 4, S. 354-355.
- [Nie-64] Nier, R.:
Experimentelle Untersuchungen der Fördervorgänge und Leistungen an senkrechten und schrägen Schneckenförderern. Dissertation Universität Kiel, 1964.
- [Nil-71] Nilsson, L. G.:
On the Vertical Screw Conveyor for Noncohesiv Bulk Materials. Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical Engineering Series Nr. 64, Stockholm 1971.
- [Pahl-89] Pahl, M. H.:
Lagern, Fördern und Dosieren von Schüttgütern, Verlag TÜV Rheinland, 1989.
- [Par-69] Parsons, J. D.; Schwiesow, W. F.; Burkhardt, G. J.:
Fluid-Flow Analogy Applied to Auger Conveyance of Grains. Transactions of ASAE Vol. 12 (1969) Nr. 5, S. 616-620.
- [Pea-67] Peart, R. M.; Mc.Kenzie, A.; Herum, F. L.:
Dimensional Standards and Performance-Test Procedures for Screw Conveyors. Transactions of the ASAE Vol. 10 (1967) Nr. 5, S. 667-669.
- [Per-86] Pereira, M.:
Total Bulk Handling Capability. A Company Profile of Simon-Solitec Ltd. Bulk Solids Handling Vol. 6, Nr. 1, Februar 1986, S. 181-183.
- [Pet-75] Peto, S.; Lobotka, J.:
Analysis of Input Power on Screw Conveyor Drive. Acta Technol. Agric. Vol.13 (1975), S. 111-130.

-
- [Rad-72] Rademacher, F. J. C.:
De vertikale schroeftransporteur. Dissertation TH Twente, 1972.
- [Rad-77] Rademacher, F. J. C.:
Are Inclined Screw-Blades for Vertical Auger Advantageous?
Transactions of the ASAE Vol. 20 (1977) Nr. 6, S. 1142-1150.
- [Rad-79] Rademacher, F. J. C.:
On the Characteristics of Vertical Screw Conveyors for Free
Flowing Bulk Material. VDI Forschungsheft 592, 1979.
- [Rad-81a] Rademacher, F. J. C.:
On Seed Damage in Grain Augers. J. agric. Engng. Res. Vol. 13
(1981) Nr. 26, S. 87-96.
- [Rad-81b] Rademacher, F. J. C.:
On Possible Flow Back in Vertical Screw Conveyors for
Cohesionless Granular Materials. J. agric. Engng. Res. Vol. 26
(1981) Nr. 26, S. 225-250.
- [Reg-59] Regan, W. M.; Henderson, S. M.:
Performance Characteristics of Inclined Screw Conveyors. Agric.
Engng. Vol. 40 (1959) Nr. 8, S. 450-452.
- [Reh-62] Rehkugler, G. E.; Boyd, L. L.:
Dimensional Analysis of Auger Conveyor Operation. Transactions
of the ASAE Vol. 5 (1962), S. 98-102.
- [Reh-67] Rehkugler, G. E.:
Screw Conveyors State of Art. Transactions of ASAE Vol. 10
(1967) Nr. 5, S. 615-618.
- [Rie-59] Riemann, U.:
Untersuchungen am senkrechten Schneckenförderer.
Dissertation Universität Kiel, 1959.
- [Ro-02a] Rong, O.:
Fachtagung Schüttgutfördertechnik. Fördern und Heben 7 (2002),
S. 426.
- [Ro-02b] Rong, O.:
Nachlese Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2002. Schüttgut 6
(2002), S. 518-519.
- [Ro-03a] Rong, O.; Günthner, W.A.:
Empirical Development of Characteristic Values for the Design of
High-Capacity Screw Conveyors for Bulk Materials. Mineral
Processing 3 (2003), S. 40- 56.

- [Ro-03b] Rong, O.:
Innovative Verfahren und Techniken, 6. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2002. Aufbereitungstechnik 2003, S. 56-57.
- [Ro-04] Rong, O.:
Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer. Dissertation TU München, 2004.
- [Rob-62] Roberts, A. W.; Willis, A. M.:
Performance of Grain Augers. Proc. Instit. Mech. Engng. Vol.176 (1962) Nr. 8, S. 165-194.
- [Rob-64] Roberts, A. W.:
An Investigation of Grain Vortex Motion with Relation to the Performance within Vertical Grain Augers. Proc. Instit. Mech. Engng. Vol. 178 Pt. 1 (1963-64) Nr. 12, S. 293-310.
- [Ross-61] Ross, I. J.; Isaacs, G. W.:
Forces Acting in Stacks of Granular Material I. Transactions of ASAE Vol. 4 (1961) Nr. 1, S. 92-96.
- [Ross-61b] Ross, I. J.; Isaacs G. W.:
Capacity of Enclosed Screw Conveyors Handling Granular Materials II. Transactions of ASAE Vol 4 (1961) Nr. 1, S. 97-100, 104-107.
- [San-71] Sands, L. D.; Hall, G. E.:
Damage to Shelled Corn During Transport in a Screw Conveyor. Transactions of the ASAE Vol. 14 (1971) Nr. 3, S. 584-585.
- [Schlau-03] Schlauri, M.:
Silo- und Fördertechnik in der Getreideverarbeitung. SchüttgutSpezial 2003 Lebensmitteltechnik, S. 15-16.
- [Schu-89] Schulze, D.; Schwedes, J.:
Der Fördervorgang in biegsamen Schneckenförderern. Fördern und Heben 39 (1989) Nr. 3, S. 231-235.
- [Schu-03] Schulze, D.:
Anwendungen der Schüttguttechnik in der Lebensmittelindustrie. SchüttgutSpezial 2003 Lebensmitteltechnik, S. 10-14.
- [Schu-03a] Schulze, D.:
Grundlagen der Schüttgutmechanik. Fachaufsatz, www.dietmar-schulze.de/grld1.html, Stand Juni 2004.
- [Schum-87] Schumacher, W.:
Zum Förderverhalten von Bunkerabzugsschnecken mit Vollblattwendeln. Dissertation RWTH Aachen, 1987.

-
- [Schwe-68] Schwedes, J.:
Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern. Weinheim, Verlag Chemie, 1968.
- [Schwe-82] Schwedes, J.:
Entwicklung der Schüttguttechnik seit 1974. Aufbereitungstechnik 23 (1982) Nr. 8, S. 402-410.
- [SEW-02] SEW-Eurodrive. Preiskatalog Getriebemotoren Ausgabe 06/2002. Bruchsal, 2002
- [Sin-59] Sinha, G. L.:
Untersuchung zum Fördervorgang beim senkrechten Schneckenförderer. Dissertation TU Hannover, 1959.
- [Stad-86] Stadler, R.:
Stationäres, schnelles Fließen von dichtgepackten, trockenen und feuchten Schüttgütern. Dissertation TH Karlsruhe, 1986.
- [Stahl-94] Stahl, H.:
Beitrag zur Förderung leicht fließender, feinkörniger Schüttgüter im senkrechten Schneckenförderer unter Spalteinfluss. Dissertation TU München, 1994.
- [Ste-62] Stevens, G. N.:
Performance Tests on Experimental Auger Conveyors. J. agric. Engng. Res. Vol. 7 (1962) Nr. 1, S. 47-60.
- [Ste-66] Stevens, G. N.:
Aspects of the Performance of Small Auger Grain Conveyors. J. agric. Engng. Res. Vol. 11 (1966) Nr. 1, S. 11-18.
- [Ste-68] Stevens, G. N.:
Handling Groundnuts with an Auger Conveyor. J. agric. Engng. Res. Vol. 13 (1968) Nr. 1, S. 44-48.
- [Stein-76] Stein, D. H.:
Untersuchungen an Steil- und Senkrechtförderern für den Transport von Futtermitteln. Dissertation TU Dresden, 1976.
- [Sto-87] Stosnach, K.:
Schiffsentlader nach dem Screw-Conveyor-Prinzip bieten gute Restentladung. Fördern und Heben 37 (1987) Nr. 6, S. 395-398.
- [Str-68] Stropfel, A.:
Spannungszustände in lagernden körnigen Haufwerken in der Nähe einer ebenen Wand. VDI-Forschungsheft 525, 1968.
- [Ted-74] Tedder, W.:
Neue Erkenntnisse zur Feststoff-Förderung in senkrechten Schneckenförderern. Fördern und Heben 24 (1974) Nr. 12, S. 1147-1150.

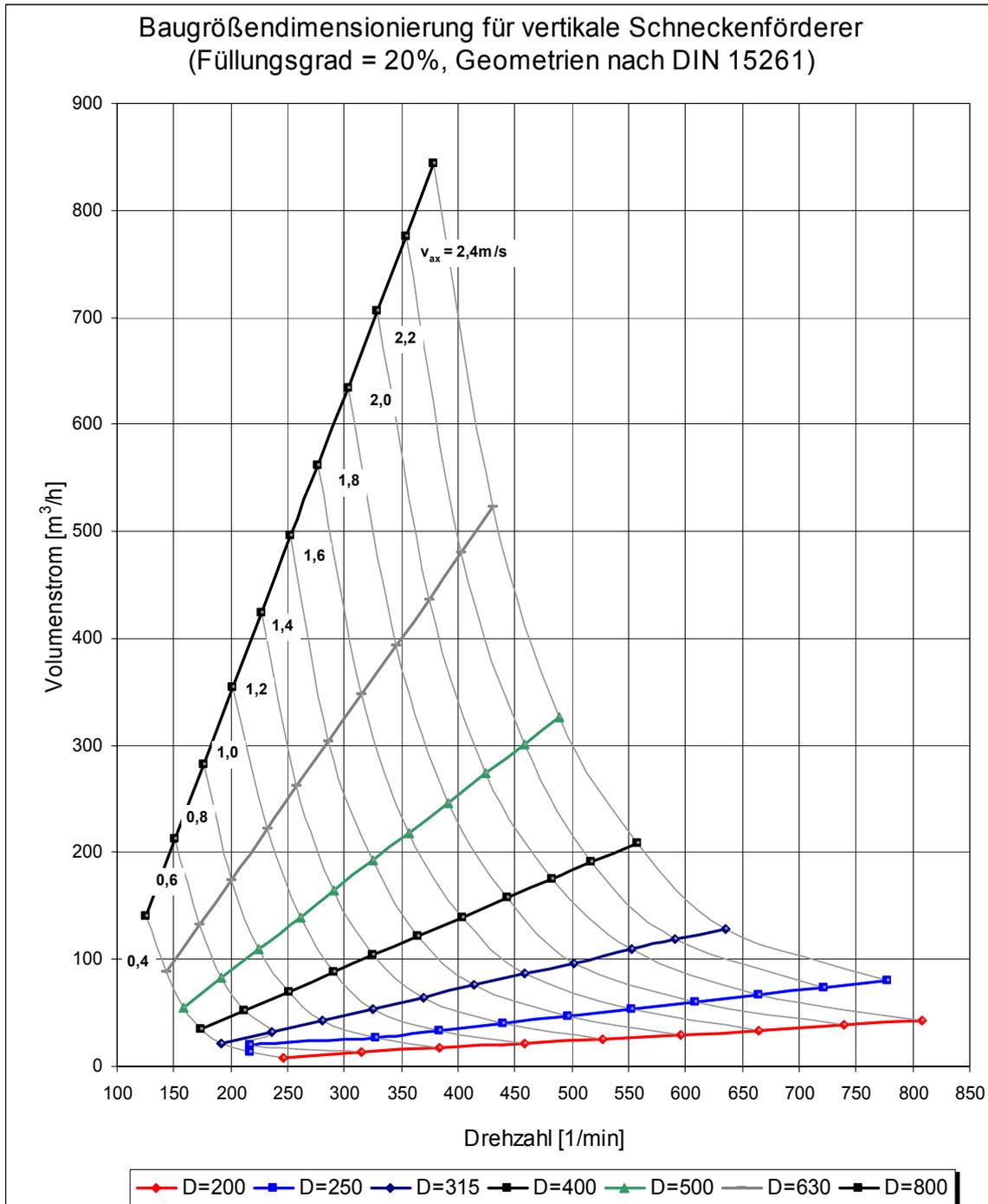
- [Tru-80] Truckenbrodt, E.:
Fluidmechanik. Band 1, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- [Voll-00] Vollmann, A.:
Untersuchung der Schüttgutförderung in geneigten
Schneckenförderern. Dissertation TU München, 2000.
- [Wal-66] Walker, D. W.:
An Approximate Theory for Pressures and Arching in Hoppers.
Chem. Engng. Sci. vol. 21 (1966), S. 975-997.
- [Wal-73] Walters, J. K.:
A Theoretical Analysis of Stresses in Silos with Vertical Walls.
Chem. Engng. Sci. vol. 28 (1973), S. 13-21.
- [Wei-90] Weidner, J.:
Vergleich von Stoffgesetzen granularer Schüttgüter zur
Silodruckermittlung. Dissertation TH Karlsruhe, 1990.
- [Wil-69] Wilkes, R. S.:
Developing Augers to Convey Forage. Agricultural Engineering
Vol. 50, 1969, Nr.2, S. 82 und 95.
- [Wild-98] Wildgruber, A.:
Experimentelle Untersuchung zur Bestimmung des
Leistungsverlustes im Spalt steiler Schneckenförderer.
Unveröffentlichte Studienarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik
Materialfluss Logistik, TU München, 1998.

Anhang A – Weitere Abbildungen – Vertikalförderer

Datenblätter zur Baugrößendimensionierung

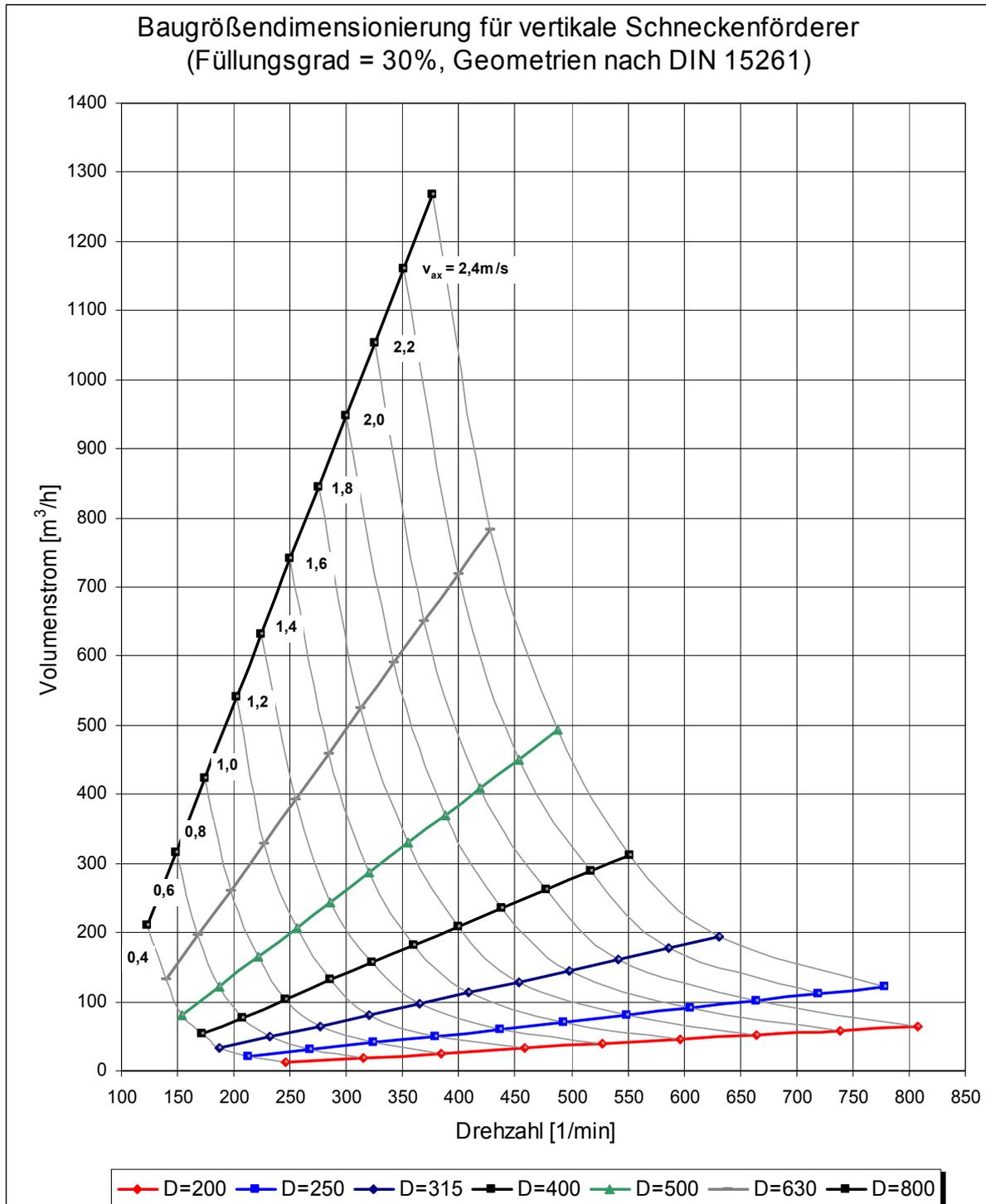
Volumenstrom über Drehzahl

(Füllungsgrad 20%)



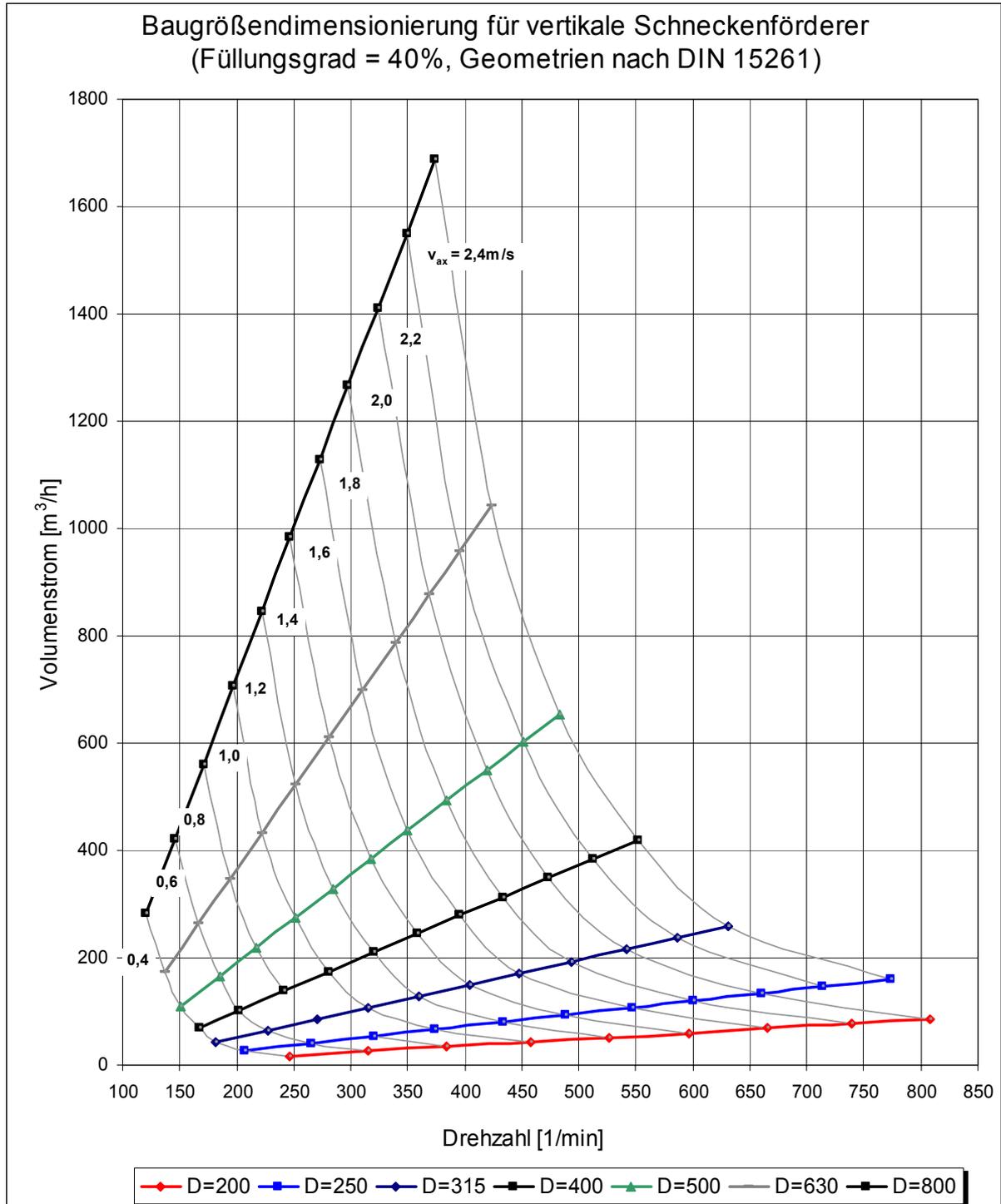
Volumenstrom über Drehzahl

(Füllungsgrad 30%)



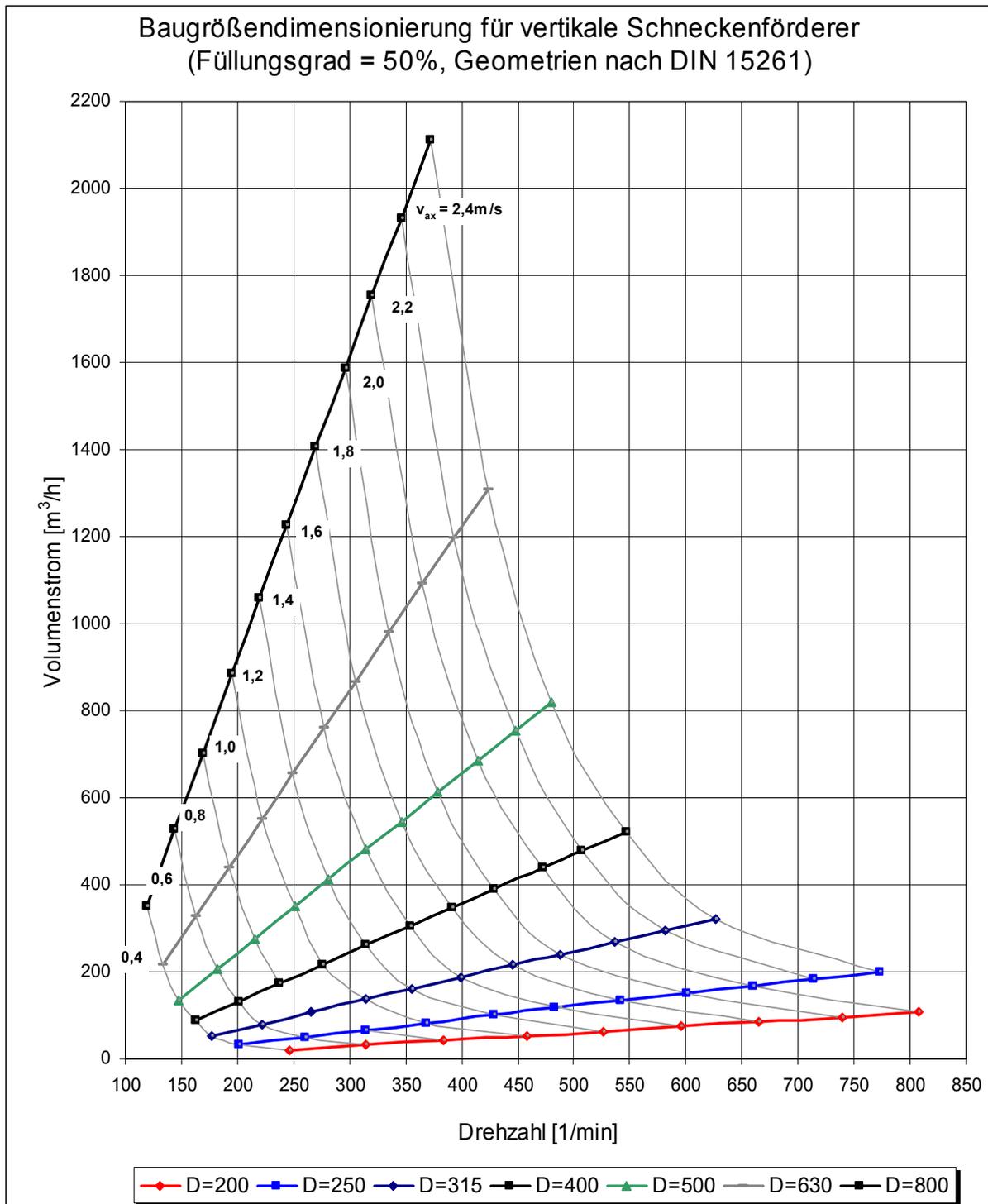
Volumenstrom über Drehzahl

(Füllungsgrad 40%)



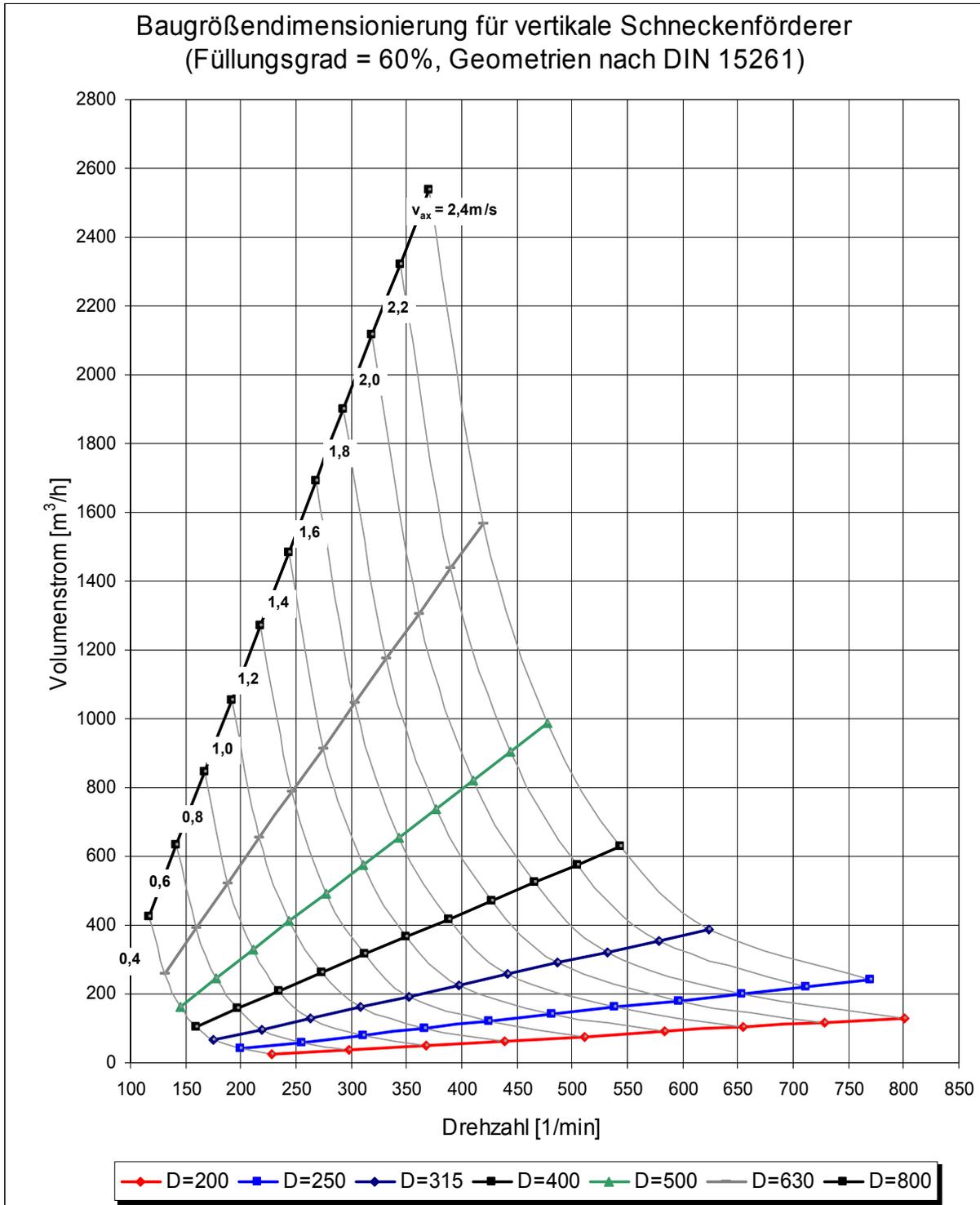
Volumenstrom über Drehzahl

(Füllungsgrad 50%)



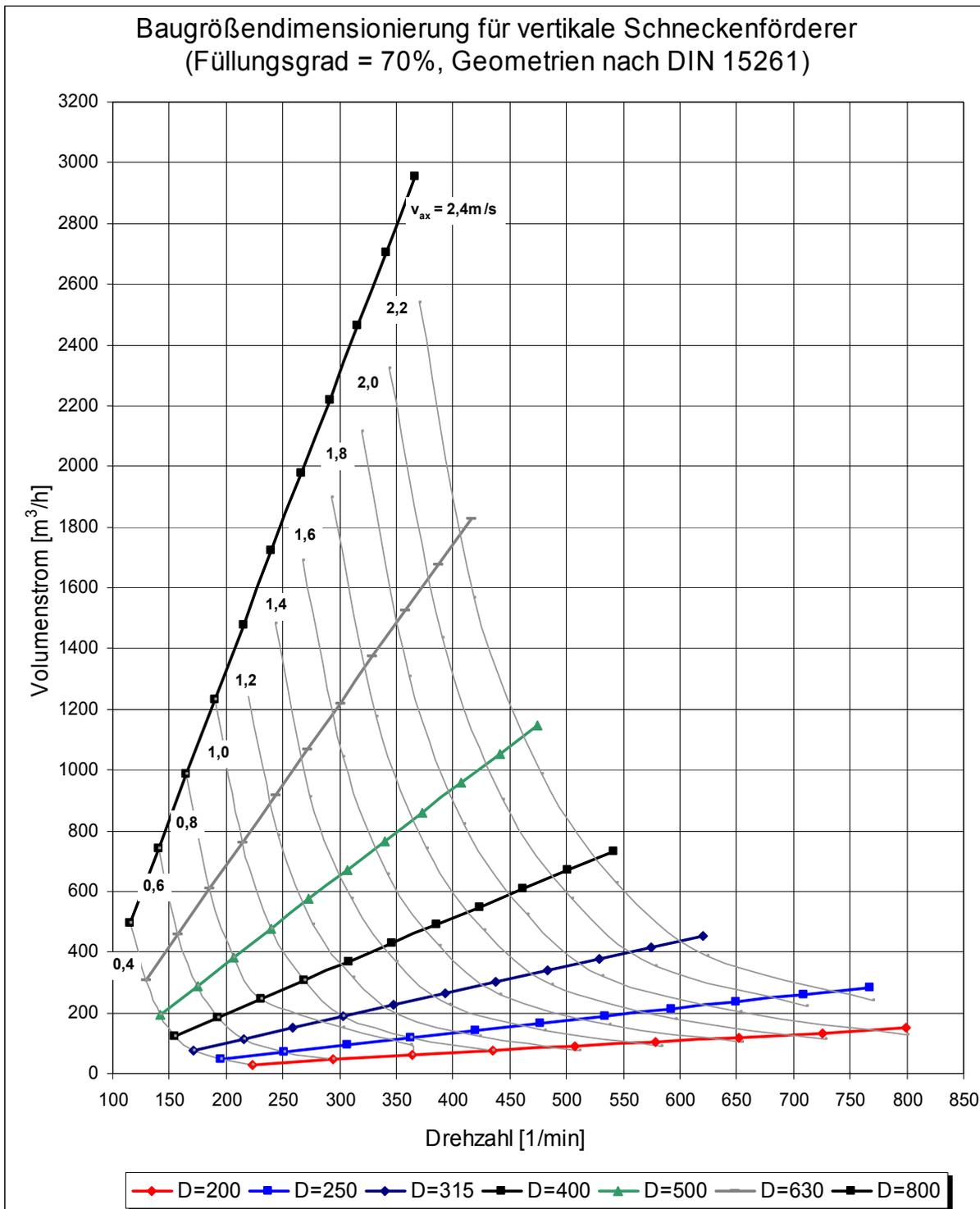
Volumenstrom über Drehzahl

(Füllungsgrad 60%)



Volumenstrom über Drehzahl

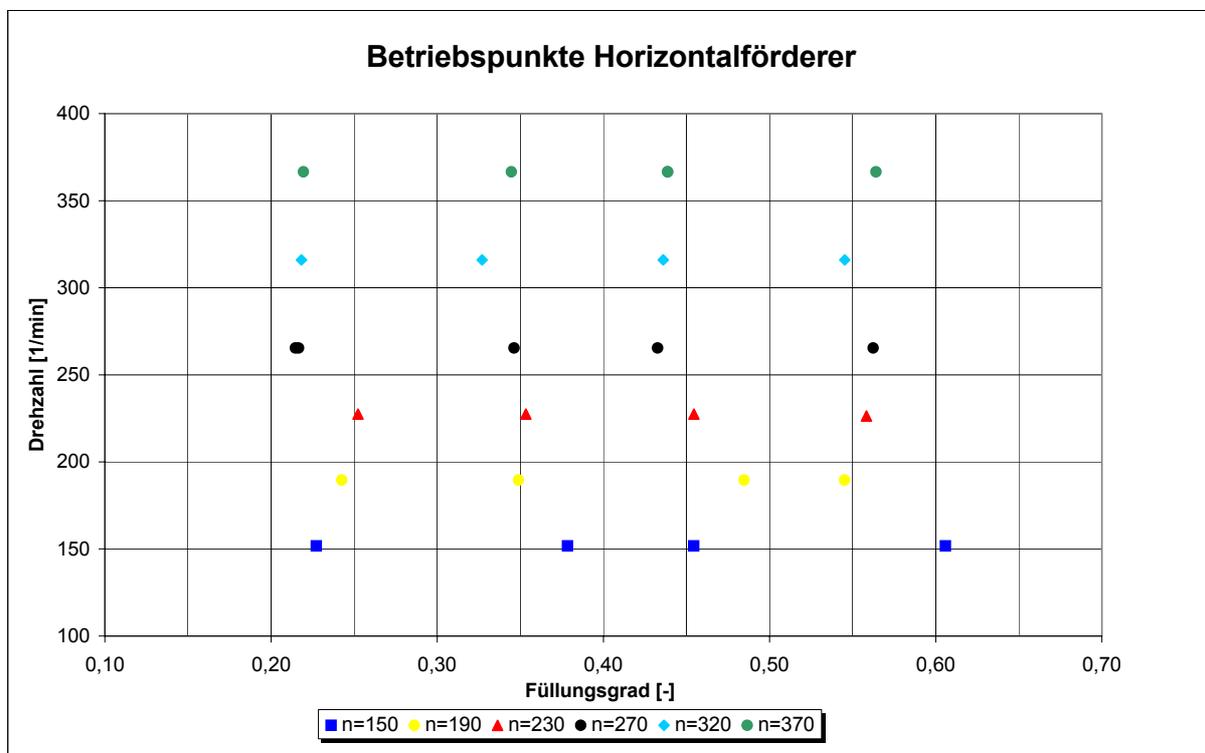
(Füllungsgrad 70%)



Anhang B – Weitere Abbildungen – horizontal bis leicht geneigter Förderer

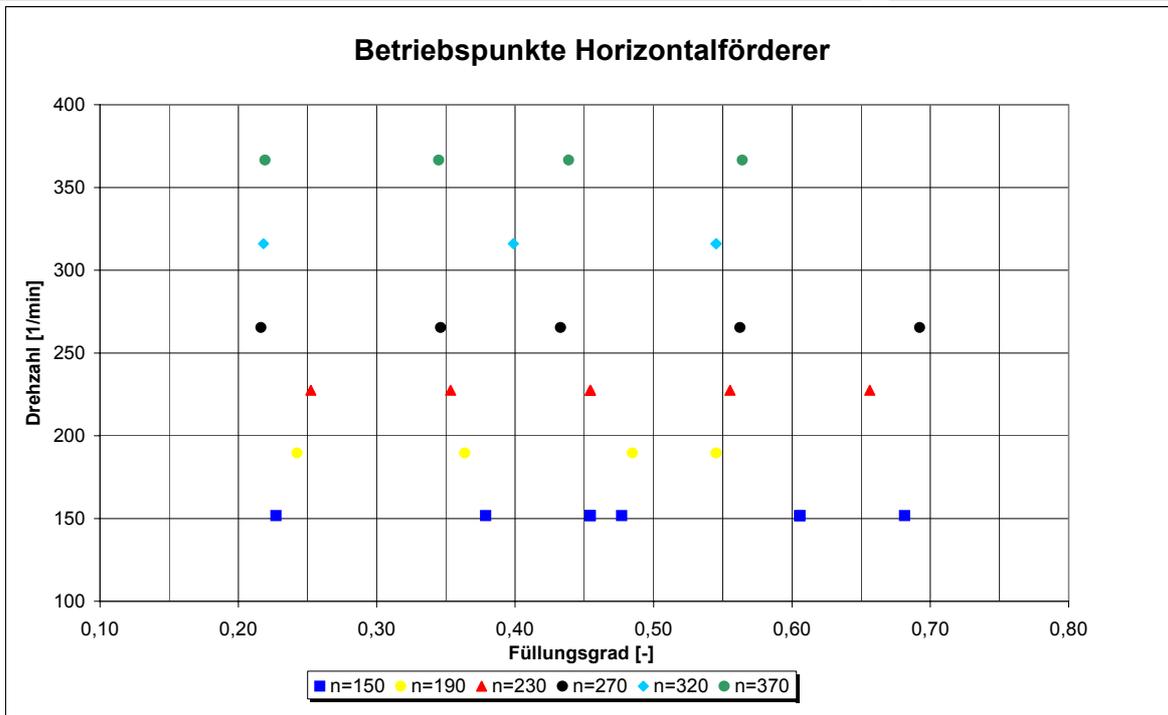
Kohle, Baugröße 200 mm, Neigung 0° / 10° / 20°

Betriebspunkte



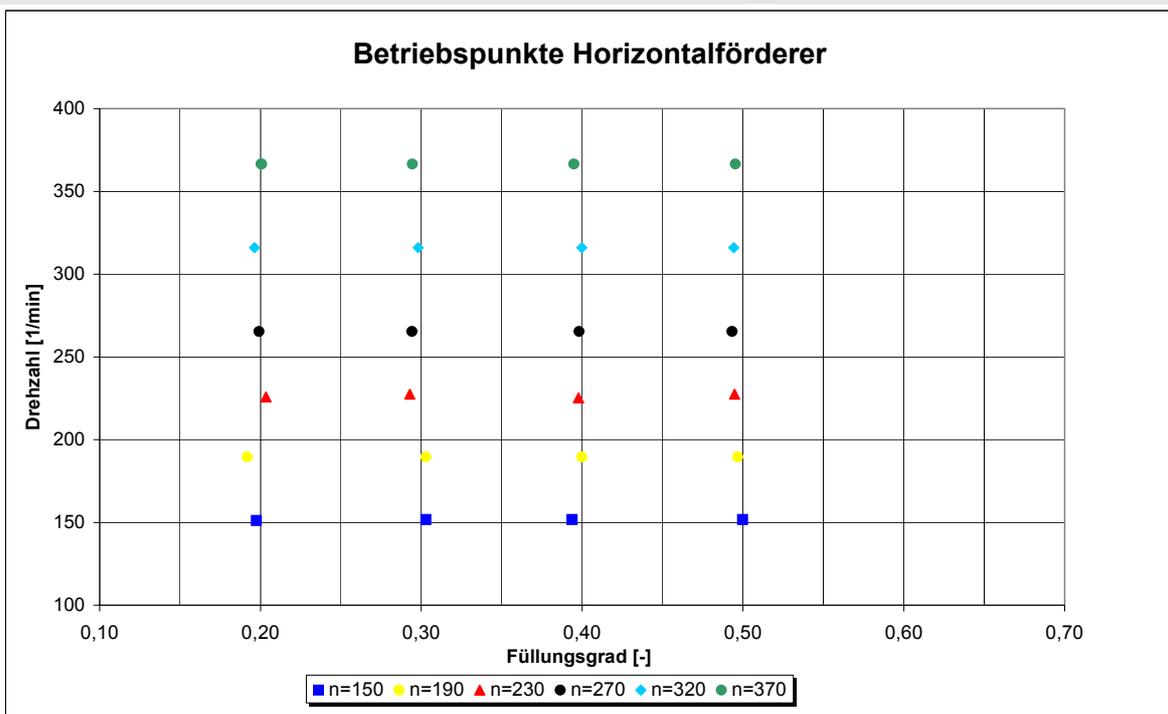
PET-Recyclat, Baugröße 200 mm, Neigung 0° / 10° / 20°

Betriebspunkte



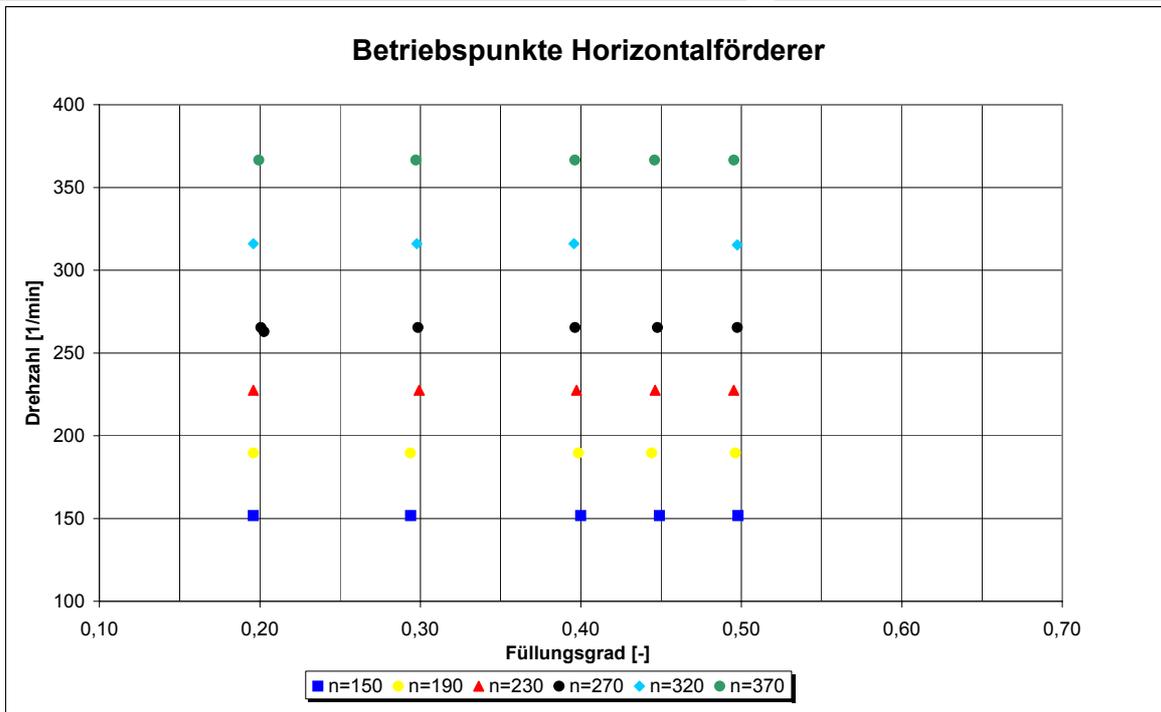
Raps, Baugröße 200 mm, Neigung 0° / 10° / 20°

Betriebspunkte



Raps, Baugröße 250 mm, Neigung 0° / 10° / 20°

Betriebspunkte



Weizen, Baugröße 250 mm, Neigung 0° / 10° / 20°

Betriebspunkte

